RODRIGO HARTKOFF FUNES

**Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da
reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de
etanol de cana-de-açúcar**

São Paulo

2016

RODRIGO HARTKOFF FUNES

**Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da
reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de
cana-de-açúcar**

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em dois de março de 2016. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH/USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca

São Paulo
2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Biblioteca)

Funes, Rodrigo Hartkoff

Avaliação do ciclo de vida e pegada de carbono da reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar / Rodrigo Hartkoff Funes ; orientador, Sergio Almeida Pacca. – São Paulo, 2016

125 f. : il

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo
Versão corrigida

1. Gestão ambiental. 2. Energia de biomassa. 3. Cana-de-açúcar. 4. Carbono – uso. 5. Ciclo de vida. I. Pacca, Sérgio Almeida, orient. II. Título

CDD 22.ed. – 577.068

Nome: FUNES, Rodrigo Hartkoff

Título: Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia Ambiental

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____
Prof. Dr.	_____	Instituição:	_____
Julgamento:	_____	Assinatura:	_____

Dedico esta obra à minha mãe que nunca perdeu a fé em mim. A ela dedico minha eterna devoção e gratidão.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Sérgio Almeida Pacca por seus ensinamentos, pela orientação, pelo companheirismo, pelo tempo dedicado, por sua paciência e amizade. Levo dele a dedicação.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e auxiliaram em tudo que estava ao alcance deles. Levo deles o amor.

Agradeço aos anjos que me socorreram em momentos críticos e que me permitiram chegar até aqui, anjos com o nome de Diana, Romy, Wanessa e Virginia. Levo delas a benevolência.

Agradeço aos meus amigos fiéis que sempre estiveram comigo nos bons e maus momentos da vida e que tenho certeza que sempre estarão, Amanda, Ivan, Lara, Mariana, Murilo, Renato e Vitor. Levo deles a amizade.

Agradeço ao NUPPREC pela assistência e por auxiliar a realização do trabalho. Levo dele a experiência.

Agradeço a Capes pela bolsa concedida. Levo dela a resiliência.

Agradeço a EACH/USP pela criação de um programa de Pós-Graduação que venha ao encontro das necessidades deste planeta e ao grupo que integra essa importante área de pesquisa, todos os professores, colegas e funcionários. Levo deles o conhecimento.

Agradeço aos mentores espirituais que sempre me prestaram auxílio e que nunca me abandonaram. Levo deles a luz.

Agradeço sobre tudo a Deus, que permitiu tudo isso ser possível. Levo dele o sopro da vida.

“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo. Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.” (Francisco Cândido Xavier)

Resumo

FUNES, Rodrigo Hartkoff. **Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da reciclagem de CO₂ em um sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Versão corrigida.

A captura e uso do dióxido de carbono é uma das formas de ajudar a frear as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e destiná-lo a um fim útil. Um possível uso para o CO₂ seria como fertilizante agrícola, uma vez que as plantas quando em maiores concentrações deste gás *ceteris paribus* apresentam um incremento de biomassa. Os biocombustíveis são opções que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas em detrimento ao uso de combustíveis fósseis e entre os biocombustíveis a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar se destaca devido a vantagens quanto à emissão de GEE e energia acumulada. Essas vantagens podem ser ainda maiores com o uso do CO₂ proveniente de suas biorrefinarias na forma de insumo agrícola. O objetivo deste trabalho é avaliar esta nova técnica de uso de carbono por meio da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e da pegada de carbono de produtos para encontrar suas contribuições no balanço de energia e carbono do sistema. Um modelo de dispersão de gases foi utilizado para saber se é possível manter a concentração de CO₂ no campo dentro dos parâmetros necessários para o incremento de biomassa. A análise indica que um sistema adaptado de irrigação por gotejamento pode manter a concentração deste gás dentro do nível desejado quando a emissão fica em 22,5 g ha⁻¹s⁻¹, mas que uma mesma área não é autossuficiente para o fornecimento de CO₂ para fase de crescimento dos colmos. Através da ACV e da pegada de carbono da cana-de-açúcar em um cenário onde o incremento de biomassa é médio em relação aos experimentos encontrados, a tecnologia reduz em 13,5% a demanda de energia e 11,8% as emissões de GEE por MJ de bioenergia produzida se comparada ao sistema tradicional. O balanço de energia para o sistema tradicional e com reciclagem de CO₂ foi de 170 GJ/ha e 206 GJ/ha, enquanto o balanço de carbono foi de -13950 kgCO₂eq/ha e -17019 kgCO₂eq/ha, respectivamente. Considerando as possíveis variações de incremento de biomassa, para cada MJ produzido a emissão de GEE pode variar em 8,9% e o consumo de energia em 10,9%. Essa nova técnica de uso de carbono do ponto vista teórico pode ser aplicada em campo e implica em um aumento entre 13 a 30% do balanço de energia para um hectare de cana-de-açúcar, consequentemente uma menor quantidade de terra será necessária para atingir as metas energéticas estipuladas.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Cana-de-açúcar. Bioenergia. Pegada de carbono. Captura e uso de carbono.

Abstract

FUNES, Rodrigo Hartkoff . **Life Cycle Assessment and Carbon Footprint of CO₂ recycling in a sugarcane based ethanol production system**. 2016. 125 f. Dissertation (Master of Science) - School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2015. Corrected version.

Carbon capture and use (CCU) may slow down greenhouse gas (GHG) emissions and direct them to a useful end. A possible CO₂ application is as plant fertilizer because *ceteris paribus* biomass increases when plants grow under high CO₂ concentrations. Compared to fossil fuels, biofuels mitigate climate change, and the use of sugarcane ethanol stands out due to its low lifecycle GHG emissions and Cumulative Energy Demand (CED). Such benefits might be enhanced with the use of CO₂ from the biorefinery as a crop fertilizer. The objective of this study is evaluating this new CCU scheme based on a life cycle assessment (LCA) and a carbon footprint to determine its energy and carbon balances. An air pollution dispersion model was used to verify whether it is possible to maintain the CO₂ concentration on the field so that biomass increase takes place. The analysis demonstrates that a drip irrigation system can keep the concentration of gas within the desired level when the emission is 22.5 g ha⁻¹s⁻¹, but that the same area is not self sufficient to supply CO₂ for the complete growth phase of the stalks. Results from the LCA and the carbon footprint demonstrate that compared to the traditional system, the scheme decreases CED and GHG emissions by 13,5% and 11,8%, respectively. The energy balance of the traditional and the recycling system were 170 GJ/ha and 206 GJ/ha, respectively, whereas the carbon balance was -13,950 kgCO₂eq/ha and -17,019 kgCO₂eq/ha, respectively. Considering the range of growth responses, for each MJ produced GHG emissions vary 8,9% whereas energy consumption varies 10,9%. These CCU scheme might be applied on the field and implies in improvements between 13 and 30% in the energy balance of 1ha of sugarcane; thus, a smaller land area will be needed than with the traditional system to achieve the energy goals.

Keywords: Life Cycle Assessment. Sugarcane. Bioenergy. Carbon footprint. Carbon capture and use.

Lista de figuras

Figura 1 – Resumo do ciclo de vida da produção de etanol de cana-de-açúcar convencional e com a reciclagem de CO ₂ tendo como única categoria de impacto o CO ₂ relativo às mudanças climáticas	24
Figura 2 – Rede de possibilidades para o CCU	30
Figura 3 – Variabilidade do incremento de biomassa para cana-de-açúcar e sorgo sob diferentes condições experimentais e com aumento da concentração de CO ₂ no ambiente de 300 a 600 ppm	34
Figura 4 – Tecnologia FACE em diferentes culturas em campo: A em cultura de várzea, B em cultura florestal e C em cultura agrícola extensiva.....	37
Figura 5 – Tecnologia de câmeras de topo aberto	38
Figura 6 – Tecnologia de casa de vegetação	38
Figura 7 – Esquema da irrigação por gotejamento para irrigar CO ₂ ou água na área de cultivo	40
Figura 8 – Estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar	42
Figura 9 – Resposta da folha à taxa fotossintética líquida de radiação fotossinteticamente ativa expressa como irradiância	43
Figura 10 – Esquema da pluma gaussiana	47
Figura 11 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida	49
Figura 12 – Esquema considerado na avaliação	52
Figura 13 – Concentração de CO ₂ adicional em campo por fonte pontual e por linha para uma emissão de 2,25 miligramas por metro por segundo, em ppm a cada km	70
Figura 14 – Concentração de CO ₂ adicional em campo por linha para uma emissão de 1,7 e 2 miligramas por metro por segundo, em ppm a cada km	71
Figura 15 – CED dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em MJ/ha	78
Figura 16 – Emissões de GEE dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em kg de CO ₂ eq/ha.....	78
Figura 17 – Participação porcentual de cada componente nos resultados da ACV e CFP dos sistemas tradicional e com reciclagem de CO ₂	79
Figura 18 – CED dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em kJ/MJ de bioenergia.....	83

Figura 19 – Emissões de GEE dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em gCO ₂ eq/MJ de bioenergia.....	83
Figura 20 – Emissões evitadas por hectare de cana-de-açúcar em substituição da gasolina e da eletricidade gerada por MDL nos sistemas tradicionais e com reciclagem de CO ₂ , em kgCO ₂ eq/ha.....	84
Figura 21 – Fluxo de energia e emissões de GEE no ciclo da cana-de-açúcar sem a reciclagem do CO ₂	85
Figura 22 – Fluxo de energia e emissões de GEE no ciclo da cana-de-açúcar com a reciclagem do CO ₂	86
Figura 23 – Variação da quantidade de energia consumida em diferentes cenários de incremento de biomassa com o uso da tecnologia com a reciclagem do CO ₂ , em kJ/MJ.....	87
Figura 24 – Variação da quantidade de GEE emitido em diferentes cenários de incremento de biomassa com o uso da tecnologia com a reciclagem do CO ₂ , em kgCO ₂ eq/MJ ..	87
Figura 25 – Relação de energia para os cenários de incremento de produtividade considerados no presente estudo	88
Figura 26 – Retorno do investimento de energia para os cenários de incremento de produtividade considerados no presente estudo	89
Figura 27 – Emissão líquida dos cenários de incremento de biomassa comparados à produção tradicional de cana-de-açúcar, em kgCO ₂ eq/ha	90

Lista de equações

Equação da fermentação alcoólica (1)	23
Equação da fotossíntese (2).....	23
Equação da dispersão de gases por pluma gaussiana (3)	47
Equação da dispersão vertical (4)	48
Equação da produção de CO ₂ (5).....	48
Equação do consumo de CO ₂ (6).....	48
Equação da relação de energia (7)	56
Equação GEE insumos agrícolas (8).....	56
Equação GEE tratos culturais (9)	57
Equação GEE maquinários agrícolas (10)	57
Equação GEE mudas (11)	57
Equação GEE insumos industriais I (12)	58
Equação GEE insumos industriais II (13).....	58
Equação energia equipamentos I (14).....	59
Equação energia equipamentos II (15).....	59
Equação energia equipamentos III (16)	60
Equação GEE equipamentos I (17).....	60
Equação GEE equipamentos II (18)	61
Equação energia edificações (19)	61
Equação GEE edificações (20)	62
Equação GEE queima bagaço (21)	62
Equação GEE retorno fertilizante (22).....	62
Equação GEE resíduos (23)	63
Equação GEE subprodutos I (24)	63
Equação GEE subprodutos II (25).....	63
Equação balanço de energia (26).....	64
Equação retorno de investimento de energia (27)	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Projetos de CCS de larga escala e suas tecnologias para cada fase.....	28
Tabela 2 – Técnicas usadas nos experimentos de enriquecimento atmosférico com CO ₂	36
Tabela 3 – Entradas consideradas incluídas e excluídas na ACV e CFP dos sistemas de bioenergia estudados.....	53
Tabela 4 – Incremento de produtividade da cana-de-açúcar com a reciclagem do CO ₂ obtido da fermentação alcoólica.....	66
Tabela 5 – Intensidade energética da terra considerando apenas o etanol da cana-de-açúcar com a técnica de reciclagem de CO ₂ proposta, em GJ/ha/ano	67
Tabela 6 – Intensidade energética da terra para cana-de-açúcar com a técnica de reciclagem de CO ₂ proposta, em GJ/ha/ano	67
Tabela 7 – Área plantada de cana-de-açúcar necessária para cumprir as metas do PDE 2021 considerando a técnica de reciclagem de CO ₂	68
Tabela 8 – Dispersão do CO ₂ em campo na forma de pluma gaussiana para uma única fonte pontual.....	69
Tabela 9 – Dispersão do CO ₂ em campo na forma de pluma gaussiana para todas as fontes pontuais	69
Tabela 10 – Insumos da etapa agrícola do ciclo de vida da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar	72
Tabela 11 – Insumos da etapa industrial do ciclo de vida da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar	73
Tabela 12 – Parâmetros e saídas relativas à etapa industrial.....	74
Tabela 13 – Resultados da ACV para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em MJ/ha	75
Tabela 14 – Resultados da CFP para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em kgCO ₂ eq/ha	76
Tabela 15 – Resultados da ACV para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em kJ/MJ	80
Tabela 16 – Resultados da CFP para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂ , em gCO ₂ eq/MJ	81
Tabela 17 – Resultados das relações de energia dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO ₂	85
Tabela 18 – Parâmetros para dispersão em pluma gaussiana.....	112

Tabela 19 – Resultado para dispersão em pluma gaussiana para emissão de 2,25 mg/m.s. ...	112
Tabela 20 – ACV para os diferentes cenários de incremento de produtividade (quartis)	113
Tabela 21 – CFP para os diferentes cenários de incremento de produtividade (quartis)	114
Tabela 22 – ACV para os diferentes cenários de incremento de produtividade (experimentos)	115
Tabela 23 – CFP para os diferentes cenários de incremento de produtividade (experimentos)	116
Tabela 24 – Balanço de carbono.....	117
Tabela 25 – Relações de energia	118
Tabela 26 – Características ambientais dos insumos	119
Tabela 27 – Outras características ambientais dos insumos e parâmetros utilizados	120
Tabela 28 – Aumento porcentual em peso seco (biomassa) de cana-de-açúcar para um aumento de 300 ppm na concentração de CO ₂ atmosférico.....	121
Tabela 29 – Aumento porcentual em peso seco (biomassa) de sorgo para um aumento de 300 ppm na concentração de CO ₂ atmosférico	122

Lista de abreviaturas e siglas

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ATR	Açúcar Total Recuperável
BECCS	<i>Biomass Energy Carbon Capture and Storage</i>
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCU	<i>Carbon Capture and Use</i>
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CFP	<i>Carbon Footprint of Products</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FACE	<i>Free Air Carbon Enrichment</i>
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Análise de Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
iLUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LUC	<i>Land Use Change</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
OTC	<i>Open-top chamber</i>
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PDE 2021	Plano Decenal de Expansão de Energia 2021

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	17
1.2	Estrutura	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	As mudanças climáticas e os bicomustíveis.....	19
2.2	Da captura e seqüestro de carbono à sua utilização	26
2.3	A resposta das plantas ao CO₂ atmosférico.....	32
2.4	Sistemas de enriquecimento de CO₂ na atmosfera das plantas	36
2.5	Modelagem do uso de CO₂ em campo	41
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	Descrição do sistema de reciclagem de CO₂ proposto para as biorrefinarias	45
3.2	Modelagem da dispersão do CO₂ no campo.....	46
3.3	Avaliação de Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos	49
3.4	Procedimentos seguidos na Avaliação do Ciclo de Vida e na Pegada de Carbono.....	51
3.4.1	A definição de objetivo e escopo.....	51
3.4.2	Análise de Inventário de Ciclo de Vida	55
3.4.2.1	Etapa Agrícola	56
3.4.2.2	Etapa industrial	58
3.4.2.2.1	Equipamentos.....	59
3.4.2.2.2	Edificações.....	61
3.4.2.3	Emissões atribuídas aos resíduos	62
3.4.2.4	Saídas.....	64
3.4.3	Análise da incerteza	64
3.4.4	Figuras de mérito utilizadas.....	65
4	RESULTADOS	66
4.1	Uso do CO₂ das biorrefinarias como insumo agroenergético	66
4.2	Modelo de irrigação e dispersão do CO₂	68
4.3	Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos	71
4.4	Análise de sensibilidade	86
5	DISCUSSÃO	91
5.1	Técnica	91
5.2	Modelagem.....	92
5.3	Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos	93
5.4	Implicações.....	94
6	LIMITAÇÕES E INCERTEZAS	96
7	CONCLUSÕES.....	97
8	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	98

REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – Parâmetros e resultados da análise de dispersão do CO₂ em campo.	112
APÊNDICE B – Resultados da ACV e CFP para os cenários de incremento de biomassa.	113
ANEXO A – Parâmetros ambientais utilizados na ACV e CFP	119
ANEXO B – Experimentos de incremento de biomassa com cana-de-açúcar e sorgo sobre maiores concentrações de CO₂.	121

1 INTRODUÇÃO

O uso de biocombustíveis é uma alternativa para reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) do setor de transportes. Contudo, para saber a real contribuição para mitigação das mudanças climáticas destes combustíveis é necessária uma avaliação abrangente em todo o ciclo de vida do produto, considerando a cadeia de produção até a distribuição e o uso.

É necessário frisar que as emissões do ciclo de vida dos biocombustíveis não estão apenas associadas ao uso de combustíveis fósseis e a emissão de CO₂ devido à combustão. Outros GEE também são emitidos, como N₂O, que está associado ao uso de fertilizantes nitrogenados, queima da biomassa e mudanças de uso da terra. O N₂O possui um potencial de aquecimento global (PAG¹) de 265, mas quando considerado os efeitos climáticos de retroalimentação seu PAG é de 298 (MYHRE et al., 2013), ou seja, a mesma massa de N₂O pode equivaler a 298 vezes a massa de CO₂ quanto ao potencial de aquecimento global. A contabilidade das emissões de outros GEE, que não o CO₂, por meio da normalização pelo PAG resulta em valores em CO₂ equivalentes (CO₂eq).

Houve um debate acadêmico intenso quanto aos biocombustíveis e sua capacidade de mitigação das mudanças climáticas, em especial o etanol. De um lado, trabalhos afirmando que os biocombustíveis não apresentam um balanço global favorável de carbono (FARGIONE et al., 2008; SEARCHINGER et al., 2009), do outro, trabalhos afirmando o contrário, que este balanço é capaz de reduzir a emissão dos GEE (EPA, 2010; CHUM et al., 2014). Hoje é considerado que os biocombustíveis auxiliam na mitigação para as mudanças climáticas quando produzido em condições corretas (CHERUBINI; STRØMMAN, 2011, MACEDO; DAVIDSON, 2014). Também é importante diferenciar a origem da biomassa utilizada para a produção do etanol.

O balanço de carbono dos biocombustíveis poderia contribuir ainda mais para a mitigação das mudanças climáticas, caso o CO₂ que é emitido na fase da fermentação da cultura agrícola fosse capturado e destinado a depósitos geológicos ou usado em outros processos. Neste caso a emissão de GEE poderia ser negativa, ou seja, a produção de bioenergia contribuiria para retirada de CO₂ da atmosfera (MÖLLERSTEN; YAN; MOREIRA, 2003).

¹ O termo mais usual é em inglês *Global Warming Potential* (GWP).

Processos de captura e armazenamento de carbono (CCS²) de grandes fontes pontuais em formações geológicas são promissores quanto à capacidade de mitigação das mudanças climáticas. O CSS quando ligado à produção de energia da biomassa recebe o nome de *Biomass Energy Carbon Capture and Storage* (BECCS) (AZAR et al., 2010). Apesar do alto potencial dessas tecnologias, ainda há dificuldades para sua implementação, principalmente devido ao custo elevado e aos marcos regulatórios (ISHII; LANGHELLE, 2011). Já quanto à utilização do CO₂ como insumo em outros processos há um crescente aumento no número de pesquisas no assunto. Sinal deste fato é a criação do periódico ‘Journal of CO₂ Utilization’ em 2013 e dos eventos ‘Carbon Dioxide Utilization Congress’, ‘3rd Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Chemistry and Polymers’ e ‘3º Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis’. Bringezu (2014), afirma que a captura e utilização do carbono (CCU³) irá mais longe que o CCS e destaca alguns de seus usos, como combustível, substância química ou outros materiais.

Paralelamente ao interesse pelo uso do CO₂, tem sido publicadas pesquisas também buscando entender o efeito do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera no desenvolvimento dos vegetais (DELUCIA et al., 1999; LADEAU; CLARK, 2001).

Pesquisas realizadas com diversas espécies de vegetais relataram que ambientes com maiores concentrações de CO₂ têm um efeito de incremento de biomassa (LEUZINGER; HÄTTENSCHWILER, 2013). Isso quer dizer que o CO₂ derivado da fermentação da cana-de-açúcar pode ser usado como adubo para a própria cana ou para outras culturas. Essa forma de CCU pode melhorar ainda mais o balanço de emissões de GEE do ciclo de vida do etanol da cana-de-açúcar. O incremento de biomassa também contribui com a eficiência do uso do solo, pois a mesma área obtém uma maior produtividade, o que gera menor pressão sobre o uso do solo em outras áreas. Um problema causado pela crescente demanda por biocombustíveis é justamente a pressão sobre o uso do solo, que pode gerar alta dos preços dos alimentos e perda de florestas (CHAKRAVORTY; HUBERT; NØSTBAKKEN, 2009). Sendo que minimizar a perda de florestas (desmatamento) também implica em redução na emissão de GEE.

Giesen, Kleijn e Kramer (2014), afirmam que o CCU associado à produção de combustíveis hydrogenados pode auxiliar na diminuição das emissões de GEE, especialmente quando energias renováveis são utilizadas no seu ciclo de vida. Contudo, a quantidade de

²Do inglês *Carbon Capture and Storage*.

³ Do inglês *Carbon Capture and Use*.

energia gasta no processo pode ser tão alta a ponto de inviabilizar a utilização do carbono do ponto de vista energético e econômico. Esse resultado demonstra a necessidade de se realizar tanto o balanço energético quanto o de carbono para avaliar novas tecnologias de mitigação das mudanças climáticas que envolvam a captura e o uso do CO₂.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a ferramenta usada para realizar o processo de análise do balanço energético, enquanto a pegada de carbono de produtos (CFP⁴) é a ferramenta para análise do balanço de carbono. No Brasil, a ACV segue as normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, e a CFP a norma ISO 14067. Na verdade, trata-se de procedimentos bastante similares do ponto de vista metodológico.

Neste contexto, o presente trabalho vem avaliar a produção de etanol em sistemas de bioenergia com a tecnologia de reciclagem do CO₂ proveniente da fermentação da cana-de-açúcar como fertilizante agrícola através da CFP e da ACV, com foco na energia primária.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste estudo é avaliar a tecnologia da reciclagem de CO₂ oriundo da fermentação da cana-de-açúcar como técnica de CCU em sistemas bioenergéticos por meio da metodologia da avaliação do ciclo de vida e da pegada de carbono de produtos.

O presente estudo tem como objetivos específicos:

- Descrever a nova modalidade de CCU que utiliza o CO₂ como fertilizante agrícola;
- Avaliar através da pegada de carbono o balanço de carbono da reciclagem de CO₂;
- Avaliar através da Avaliação do Ciclo de Vida o balanço de energia da reciclagem de CO₂;

⁴Do inglês *Carbon Footprint of Products*.

1.2 Estrutura

A presente dissertação é segmentada em oito capítulos, sendo esta parte o primeiro capítulo. O capítulo referido contém a introdução da dissertação, contextualização do problema, apresentação dos objetivos e da estrutura do documento.

O capítulo dois é uma revisão da bibliografia. Este capítulo apresenta um panorama das mudanças climáticas e dos biocombustíveis, dos processos de captura e utilização do carbono e das respostas das plantas expostas a concentrações elevadas de CO₂ na atmosfera. Também delinea uma nova proposta de CCU.

O terceiro capítulo é destinado à descrição da metodologia utilizada nas análises desenvolvidas, que demonstra os procedimentos utilizados na ACV, CFP e na análise de dispersão de CO₂.

O quarto capítulo apresenta os resultados, os ganhos de produtividade gerados pela implantação da técnica, a dispersão de gases do CO₂ no campo, a demanda acumulada de energia e a emissão de gases do efeito estufa, por meio, respectivamente, da aplicação da ACV e da CFP aos cenários estudados.

O capítulo cinco apresenta a discussão dos resultados obtidos.

O capítulo seis discute as incertezas da pesquisa.

O capítulo sete reúne as conclusões da pesquisa.

O último capítulo descreve as sugestões para próximos trabalhos.

Os apêndices e anexos apresentados reúnem informações utilizadas neste estudo para a realização da ACV e da CFP, os seus resultados e informações importantes para o trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 As mudanças climáticas e os bicomcombustíveis

As mudanças climáticas e a questão energética possuem elevada importância e relevância nas atuais preocupações com o ambiente (SCHAEFFER et al., 2008). Essas mudanças climáticas são processos naturais que ocorrem em larga escala de tempo, porém a velocidade com que estas mudanças estão acontecendo após a Revolução Industrial, é objeto de estudo da comunidade científica e de análise dos líderes mundiais. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tem continuamente compilado e publicado dados que alertam sobre as mudanças climáticas causadas pela ação humana no mundo (IPCC, 2007a, 2013). No pior dos cenários previstos pelo IPCC (2013), onde as emissões de GEE continuam a crescer em ritmo acelerado, a temperatura da superfície da terra pode aumentar entre 2,6°C a 4,8°C até 2100, em relação ao período de 1986 a 2005.

Este aumento de temperatura provocaria grandes problemas ao meio ambiente e para a humanidade. Portanto, para frear o avanço do aumento da concentração de GEE na atmosfera é necessário que haja uso de tecnologias que emitam menos carbono. Desta forma o balanço de carbono é de suma importância para avaliação do desempenho de produtos e tecnologias e para a tomada de decisão.

O balanço de carbono consiste no inventário de todas as emissões de GEE presentes no ciclo de vida de um produto. O avanço da visão do ciclo de vida de produtos fez com que outros estoques e fluxos de GEE, que se manifestavam ao longo da cadeia de produção fossem sendo incluídos nas análises das emissões de produtos e serviços. Hoje em dia, no balanço de carbono constam todas as emissões contabilizadas feitas para cada insumo usado no ciclo de vida do produto em análise.

A norma internacional que rege avaliação da pegada de carbono de produtos é a ISO 14067. Segundo a norma ISO (2013), a pegada de carbono consiste na soma das fontes e das remoções das emissões GEE em um sistema com base em seu ciclo de vida, tendo como única categoria de impacto a mudança climática expressa em massa de CO₂ equivalente.

O balanço energético é tão importante quanto o balanço de carbono na tomada de decisão para escolha de tecnologias mais eficientes. Energia consumida implica em custos e outros impactos ambientais que transcendem a questão climática. O balanço energético, assim como outros inventários relacionados a produtos e seu ciclo de vida, é realizado através da

ferramenta da ACV. A categoria de impacto relativa à energia primária acumulada nos produtos em estudos de ACV é a *Cumulative Energy Demand* (CED).

A ACV é uma ferramenta que permite a avaliação dos potenciais impactos de um produto em toda sua cadeia produtiva considerando uma determinada unidade funcional⁵. Ela é especialmente utilizada para avaliar os impactos da reciclagem nos sistemas de produto. A ACV permite que se possa analisar as possíveis cargas ambientais atribuídas a um produto, auxiliando a tomada de decisão quanto à procura de produtos mais ambientalmente corretos e eficientes. No Brasil ela é regida pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044.

Nesta perspectiva, é necessário que as tecnologias de produção estejam cada vez mais adequadas ao cenário mundial, ou seja, a CFP e ACV devem auxiliar quanto a escolhas mais adequadas em relação aos problemas das mudanças climáticas e a questão energética.

Entre os setores econômicos, a produção de energia foi responsável por 25% das emissões de GEE em 2010 no mundo (IPCC, 2014). No Brasil, este setor foi responsável por 29,4% das emissões em 2012 (SEEG, 2014). O maior problema do sistema energético mundial é que ele é altamente dependente de combustíveis fósseis e se continuar assim haverá um grande aumento do uso desses combustíveis, o que gera uma maior concentração de GEE na atmosfera (FAPESP, 2010). Ademais, a relevância das emissões oriundas do setor energético no Brasil está aumentando (SEEG, 2015).

Diversas técnicas vêm sendo estudadas no intuito de diminuir a emissão de GEE no setor energético e uma que vem tendo grande destaque é o CCS (ISHII; LANGHELLE, 2011; RÓMAN, 2011; WILLSON et al., 2011). O CCS tem a função de capturar e armazenar o carbono que seria emitido para atmosfera, principalmente por grandes fontes pontuais. Apesar de seu alto potencial para mitigação das mudanças climáticas, de 15 a 55% do esforço de mitigação até 2100 (IPCC, 2005), o CCS encontra diversas dificuldades para ser implementado (IPCC, 2005; ISHII; LANGHELLE, 2011; RÓMAN, 2011; ROMEIRO, 2014; WILLSON et al., 2011).

Quando o sequestro e o armazenamento do carbono são associados à produção de energia através de biomassa ele é classificado como BECCS. O balanço de carbono desta tecnologia pode ser negativo, ou seja, contribui na redução de GEE da atmosfera (GOUGH; UPHAM, 2010; PACCA; MOREIRA, 2009). O BECCS tem sido estudado e os cenários

⁵ Segundo a ABNT NBR ISO 14040, unidade funcional é: "desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência".

projetados de sua participação na mitigação das mudanças climáticas apresentam alto potencial de uso (AZAR et al., 2010; CARBO et al., 2011).

Sem a tecnologia do CCS e do BECCS não será possível cumprir as metas de estabilizar a concentração de CO₂ equivalente em 400 ppm (EDENHOFER et al., 2010). Porém dificuldades ainda são encontradas para implantação em maior escala destas tecnologias, como alto valor da implantação (ISHII; LANGHELLE, 2011) e ausência de políticas e marcos regulatórios (ISHII; LANGHELLE, 2011; RÓMAN, 2011; WILLSON et al., 2011). As nações, então, devem avaliar suas prioridades referentes à garantia da segurança energética ou o cumprimento dos objetivos de desenvolvimento antes de investir na tecnologia do CCS (WILLSON et al., 2011). Portanto, a escolha por opções tecnológicas mais acessíveis devem ser adotadas neste momento.

Os biocombustíveis são opções energéticas viáveis que podem contribuir para a diminuição da emissão de GEE (FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2011). O etanol produzido no Brasil através da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é considerado de boa qualidade, seja pela sua eficiência ou pela menor poluição gerada (ROVERE; PEREIRA; SIMÕES, 2011) e ainda pelos padrões internacionais nos quais ele consegue se enquadrar (HIRA, 2011). Triana (2011), considera que o etanol pode ser uma das melhores opções em relação a combustíveis convencionais.

Apesar das vantagens dos biocombustíveis, eles também emitem GEE e tem processos associados à degradação ambiental. Até 96% da demanda de energia e 64,1% das emissões de GEE do ciclo de vida da produção convencional de etanol de cana foram atribuídos à fase agrícola, segundo Souza, Ávila e Pacca (2012). Portanto, os processos agrícolas devem ser estudados no intuito de diminuir a emissão GEE.

Um aspecto importante no cenário dos processos agrícolas é aumentar a eficiência do uso do solo, isso significa aumentar a produtividade. Quando se refere à questão dos biocombustíveis e a eficiência do uso da terra, pode-se afirmar que procuramos melhorar a densidade energética da terra, expressa, na maioria das vezes, em GJ/ha/ano ou W/ha (PACCA; MOREIRA, 2011, 2013). A melhoria da eficiência do uso do solo gera como consequência uma menor pressão sobre novas áreas para agricultura, ou seja, diminui a pressão sobre o uso do solo e possíveis emissões de GEE pelo desmatamento.

A expansão de terras para produção de bioenergia cresce aceleradamente (USDA, 2007; CAMPBELL et al., 2008) e este fator pressiona áreas agrícolas destinadas à produção de alimentos (CHAKRAVORTY; HUBERT; NØSTBAKKEN, 2009). A mudança de uso do solo também é um fator importante para se obter um balanço líquido favorável para mitigação

das mudanças climáticas (SEARCHINGER et al., 2009). Mudanças no uso do solo de outras culturas para cana-de-açúcar podem diminuir a emissão de GEE, principalmente em locais de solo degradado (FARGIONE et al., 2008), mas Mello et al. (2014), considera que se a cobertura do solo for cerrado ou pasto, a transição para cana-de-açúcar terá maior emissão. Nesta concepção, a elaboração de estratégias de uso do solo deve reconhecer as necessidades de curto e longo prazo, os serviços ecossistêmicos e a resiliência dos sistemas (FOLEY et al., 2005).

O Brasil então deveria realizar estratégias quanto ao cenário de uso do solo e ao planejamento energético, pois o governo federal planeja através do Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 (PDE 2021), que em 2021, 21,2% da produção da energia interna do país seja oriunda de derivados de cana-de-açúcar, o que representa um aumento de 45,3 milhões de m³ de etanol em relação ao ano de 2011 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012). Atualmente, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estima que a área destinada a cultivo de cana-de-açúcar para atividade sucroalcooleira é de 9057,2 mil hectares para a safra 2015/16, com uma produtividade de 73,2 tcana/ha e uma produção de 663,11 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e 28,82 bilhões de litros de etanol total (CONAB, 2015).

Deve se considerar que a agricultura foi responsável por 29,6% das emissões de GEE em 2012 no Brasil (SEEG, 2014). Porém, diversos estudos demonstram que determinadas técnicas agrícolas podem fixar carbono no solo, ou seja, contribuem para mitigação das mudanças climáticas (BATJES; SOMBROEK, 1997; INGRAM; FERNANDES, 2001; ALBRECHT; KANDJI, 2003; LAL, 2004, 2005; LAL et al., 2006). Esses estudos corroboram com a proposta do uso da bioenergia como forma de mitigação das mudanças climáticas.

O etanol brasileiro tem alcançado índices de qualidade internacional e em 2010 foi considerado como *advanced biofuel* pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA⁶), ou seja, ele reduz ao longo do seu ciclo de vida 50% ou mais das emissões de GEE em comparação com combustíveis fósseis de referência, como a gasolina e o diesel (EPA, 2010). Mesmo com os bons resultados, o etanol deve sofrer mudanças em sua forma de produção para que atinja melhores níveis de desempenho ambiental e energético.

A obtenção do álcool a partir da cana-de-açúcar se dá através do processo de fermentação. Neste processo, a sacarose da cana é convertida em glicose e frutose através de

⁶ Do inglês *Environmental Protection Agency*.

ações enzimáticas. Esses açúcares, então, são transformados em etanol e dióxido de carbono, conforme a equação 1, a equação da fermentação alcoólica.

O balanço de carbono poderia ser mais favorável caso este CO_2 , que atualmente é liberado para a atmosfera, fosse utilizado em outro processo. Este CO_2 oriundo da fermentação alcoólica, após processos de purificação, poderia ser utilizado em indústrias alimentícias e químicas (XU; ISOM; HANNA, 2010). Outra opção seria utilizar este CO_2 como fertilizante para produzir biomassa.

Processos de reciclagem do carbono proveniente de processos industriais na agricultura estão inovando as técnicas de mitigação das mudanças climáticas. Lohrey e Kochergin (2012), analisaram a reciclagem do carbono de usinas de açúcar e álcool e o seu uso em produção de alga para obtenção de biodiesel, tendo obtido resultados satisfatórios.

O reaproveitamento do carbono, que seria emitido para atmosfera no processo de fermentação, pode contribuir na redução da pegada de carbono do processo de obtenção do álcool se utilizado como fertilizante na própria cultura, uma vez que o desenvolvimento da cultura em ambientes com maior concentração de CO_2 pode incrementar a sua produtividade (de SOUZA et al., 2008; VU; ALLEN JR., 2009; VU; ALLEN JR.; GESCH, 2006). Além do incremento da produtividade, ambientes com maiores concentrações de CO_2 tem efeitos positivos em plantas, como aumento da eficiência do uso da luz solar, da água e de nutrientes (DRAKE; GONZÁLEZ-MELER; LONG, 1997; REZENDE et al., 2003).

Desta forma, este CO_2 pode ser usado como fertilizante para a própria cana-de-açúcar ou outras culturas energéticas. Isso é possível devido à capacidade das plantas em transformar CO_2 , água e energia solar em energia disponível para as plantas através da fotossíntese, o que na prática significa que as plantas podem transformar uma parte do CO_2 da atmosfera em biomassa, como demonstrado na equação 2, a equação da fotossíntese, explicitada a seguir.

Neste cenário, o CO_2 que seria emitido no processo de fermentação da transformação do caldo de cana em etanol poderia ser reaproveitado na forma de fertilizante se fosse transportado das usinas de etanol para as plantações bioenergéticas e reintroduzido no

ambiente do sistema agrícola. Pois essa mudança faz com que as plantas tenham uma maior produtividade devido às reações metabólicas provocadas pelo ambiente com aumento da concentração do dióxido de carbono em sua atmosfera. Como o desenvolvimento das plantas é realizado devido à fotossíntese e o consequente sequestro de CO_2 do ar e seu armazenamento na forma de biomassa, o balanço do carbono no final do processo seria menor quando comparado com o ciclo convencional de produção do etanol. Esse esquema pode ser visualizado através da figura 1, explicitada a seguir.

Figura 1 – Resumo do ciclo de vida da produção de etanol de cana-de-açúcar convencional e com a reciclagem de CO_2 tendo como única categoria de impacto o CO_2 relativo às mudanças climáticas

Fonte: Elaboração própria.

A figura 1 demonstra o fluxo da reciclagem do CO_2 da fermentação alcoólica. Esse CO_2 seria normalmente emitido para a atmosfera, mas na reciclagem é usado como subproduto na forma de insumo agrícola, assim como ocorre com a torta de filtro e vinhaça ambas derivadas do processo de obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar. A reciclagem

que ocorre neste sistema é do tipo reciclagem em circuito fechado⁷, pois a reciclagem ocorre no mesmo sistema de produto (ISO, 2006).

A mudança desta reciclagem no sistema industrial de produção de bioenergia altera este sistema inicialmente considerado aberto, também chamado de Fim-de-Tubo, para um sistema fechado. Os sistemas abertos consideram o meio ambiente provedor e receptor de forma ilimitada (MANAHAN, 1999), o que é contra os objetivos da sociedade na promoção do desenvolvimento sustentável. Fechar os sistemas industriais é o objetivo da Ecologia Industrial que visa “formar uma rede de processos industriais mais elegante e com menos desperdício” (GIANNETTI; ALMEIDA, 2006, p.05).

A Ecologia Industrial tem base nos estudos da termodinâmica, na visão sistêmica, nos pressupostos da ecologia e da economia ecológica. Com base em uma analogia que associa sistemas industriais com ecossistemas, “a Ecologia Industrial considera que todos os resíduos/materiais devem ser continuamente reciclados dentro do sistema e somente a energia solar ilimitada seria utilizada de forma dissipativa.” (GIANNETTI; ALMEIDA, 2006, p.03). Nesta perspectiva, a reciclagem do CO₂ nos próprios sistemas bioenergéticos contribui para satisfação dos objetivos da Ecologia Industrial. De uma forma geral, o CCU tem o mesmo propósito da Ecologia Industrial, pois o CO₂ que é considerado um resíduo deve ser reutilizado como recurso em outro sistema. Além disso, na presente proposta, esta reutilização é possível graças ao uso da energia solar.

As técnicas de CCU devem ser analisadas, para se conhecer seus reais benefícios quanto a sua utilização. Um dos aspectos principais é contabilizar a emissão de GEE durante seu ciclo de vida. Pois o CCU busca a utilização do carbono em algum processo para que este não esteja presente na atmosfera e venha contribuir com as mudanças climáticas. O mesmo se refere à energia gasta durante esses processos, pois a quantidade desta pode ser tão alta que inviabiliza o processo do CCU (GIESEN; KLEIJN; KRAMER, 2014). Portanto, apesar do ganho de produtividade desta técnica é necessário realizar uma ACV e CFP para saber sua real contribuição quanto à mitigação das mudanças climáticas e seu balanço energético.

Muitos estudos de ACV foram realizados no tema da bioenergia. Macedo, Seabra e Silva (2008), através de cenários e da ACV concluíram que em 2020 poderá haver uma diminuição de 118 kg CO₂eq m⁻³ em relação a 2006 no processo de obtenção do etanol de cana no Brasil, apenas com uso de tecnologias já existentes no mercado. Souza, Ávila e Pacca

⁷*Close loop recycling.*

(2012), usaram a ACV para comparar a produção convencional de etanol de cana com a produção conjunta de etanol de cana e biodiesel de dendê (*Elaeis guianensis*). O estudo em questão demonstrou que a alternativa pode contribuir com a redução da emissão de GEE, diminuir os impactos relacionados ao uso da terra e melhorar o balanço energético.

A maioria das ACVs, que comparam a produção de bioenergia com a produção de energia oriunda de combustíveis fósseis, afirma que existe uma redução líquida de emissão de GEE a favor dos bicomcombustíveis (CHERUBINI; STRØMMAN, 2011).

No continente africano, na República de Maurício, a metodologia da ACV demonstrou ser possível um aumento de 58 kWh/tonelada de cana-de-açúcar através do uso de parte do bagaço para compostagem e melhorias na geração de energia com o uso do bagaço em relação ao sistema tradicional de obtenção de açúcar na usina (MOHEE; BEEHARRY, 1999). Contudo, o resultado da ACV demonstra ser questionável o uso do bagaço para a compostagem, pois a técnica pode melhorar o desempenho ambiental sob alguns pontos, mas não em todos. Porém, Beeharry (2001), coloca que, apesar do ganho energético, as emissões de GEE são maiores quando se obtém mais energia pela combustão dos produtos derivados da cana-de-açúcar. Portanto é importante analisar tanto o balanço de carbono quanto o balanço energético com a finalidade de melhor informar os tomadores de decisão.

A metodologia da ACV se faz tão importante no estudo da sustentabilidade dos sistemas energéticos que é amplamente usada para apoiar a decisão a favor de tecnologias mais eficientes e limpas por órgãos como a EPA (2013), o IPCC (2011), a *California Air Resources Board* (CARB) e a União Européia (CHUM et al., 2014).

2.2 Da captura e seqüestro de carbono à sua utilização

O IPCC alega que para mitigar as mudanças climáticas uma gama diversificada de ações e tecnologias deve ser realizada e grande parte delas necessitam de mudanças econômicas e sociais, porém a maioria dos países não está disposta a adotá-las (IPCC, 2007a, 2013, 2014). Dentro desta perspectiva, o CCS tem ganho cada vez mais espaço nas pesquisas e no desenvolvimento de tecnologias para mitigação das mudanças climáticas, principalmente devido ao seu potencial técnico e atuação no setor de geração de energia.

O CCS contribui diretamente no cenário de mitigação de mudanças climáticas para o setor energético, uma vez que cerca de dois terços dos combustíveis fósseis já identificados não podem ser queimados tendo em vista o objetivo de respeitar uma meta segura de 2°C para o aquecimento global (MCGLADE; EKINS, 2015; BIELLO, 2015). Mas com o uso CCS uma

maior quantidade desses combustíveis pode ser utilizado (MCGLADE; EKINS, 2015). Desta forma, o CCS é fundamental para redução das emissões de CO₂ do setor de geração de energia. Essa possibilidade de mitigação das mudanças climáticas faz com que o CCS tenha atraído cada vez mais a atenção da comunidade internacional e tenha estado no centro do debate e das negociações políticas sobre o clima (BÄCKSTRAND; MEADOWCROFT; OPPENHEIMER, 2011).

O CCS é um processo no qual os GEE, em essencial o CO₂, proveniente da indústria e de recursos energéticos relacionados, é separado, transportado e armazenado por um longo período de tempo isolado da atmosfera (IPCC, 2005). Desta forma, o CCS retira ou evita que o CO₂ seja lançado para a atmosfera, contribuindo para mitigação das mudanças climáticas.

No processo do CCS, o CO₂ é comprimido e transportado para locais onde deve ser armazenado, como em formações geológicas ou no oceano, possuindo três fases distintas, a captura, o transporte e o armazenamento do carbono. A aplicação do CCS depende da maturidade técnica, dos custos, do potencial global, dos aspectos regulatórios, das questões ambientais, da percepção pública, da difusão e transferência de tecnologia para os países em desenvolvimento e de sua capacidade de aplicação da tecnologia (IPCC, 2005).

A fase de captura do CO₂ ocorre na fonte pontual de emissão deste, podendo ser em indústrias, usinas de energia ou poços de extração de combustíveis fósseis, que são grandes fontes pontuais com potencial para implantação do CCS. Muitas inovações na captura de carbono estão relacionadas a usinas de carvão (VERGRAGT et al., 2011), mas o BECCS é o que apresenta os resultados mais promissores, pois pode implicar em produção de energia com emissões negativas (AZAR et al., 2010).

A captura pode ocorrer em quatro diferentes processos, na pós-combustão, na pré-combustão, na oxi-combustão e em fontes pontuais de processos industriais. Os sistemas de pós-combustão retiram o CO₂ diretamente dos gases resultantes da combustão através de um solvente líquido. Para os sistemas pré-combustão é necessário uma usina de vapor e ar ou oxigênio, que através de reações têm como produto final o CO₂ e o hidrogênio. Nos sistemas oxi-combustíveis o ar é substituído por oxigênio, que no final de sua reação liberam basicamente vapor da água e CO₂, que posteriormente são separados por arrefecimento e compressão. As indústrias produtoras de hidrogênio e amônia também são fontes pontuais de CO₂ que podem ser exploradas diretamente.

O transporte do CO₂ pode ser realizado através de gasodutos ou sistemas intermodais, como ferrovias e navios. Atualmente, o sistema mais amplamente utilizado é o sistema de gasodutos (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2014). No sistema de gasoduto, o dióxido de

carbono pode ser transportado na forma líquida, fluido supercrítico, gasosa ou em uma mistura gasosa e líquida (KNOOPE; RAMÍREZ; FAAIJ, 2013).

O armazenamento pode ser realizado de diferentes formas, nas formações geológicas, tanto na zona marítima quanto na terrestre; no oceano, na forma concentrada ou dissolvida. A forma mais aceita e utilizada de armazenamento do CCS é a que se dá nas formações geológicas. Esse sistema é eficiente e mais propenso a ser usado, pois utiliza tecnologias já desenvolvidas pelas indústrias de exploração de petróleo e gás natural.

Há uma divergência quanto ao quadro do potencial técnico de armazenamento do CCS. O IPCC (2005), atribui um potencial técnico seguro para o armazenamento de CO₂ de 220 a 2200 GtCO₂ no mundo; a Agência Internacional de Energia⁸ (2004), atribui uma capacidade de 1000 a 10920 GtCO₂ nos aquíferos salinos e campos de petróleo e gás esgotados do mundo; enquanto o Laboratório Nacional de Tecnologia e Energia dos EUA⁹ (2010), atribui uma capacidade para formações geológicas na área continental da América do Norte entre 1420 a 15000 GtCO₂. Apesar da grande variação seu potencial técnico de uso é alto, mesmo para diferentes cenários da capacidade de armazenamento. A tabela 1 apresenta a distribuição tecnológica dos atuais projetos de CCS de larga escala no mundo.

Tabela 1 – Projetos de CCS de larga escala e suas tecnologias para cada fase

Tipo de captura	Número de projetos	
	2014	2016
Captura pós-combustão	9	6
Captura pré-combustão (de processamento de gás natural)	13	13
Captura pré-combustão (gaseificação)	18	10
Não especificado	2	2
Captura oxi-combustão	4	2
Separação industrial	9	10
Variado	0	1
Tipo de transporte		
Gasoduto	50	40
Multimodais	3	2
Sem transporte (injeção direta)	2	2
Tipo de armazenamento		
Dedicado Armazenamento Geológico	23	18

⁸International Energy Agency (IEA).

⁹National Energy Technology Laboratory (U.S.).

Recuperação melhorada de hidrocarbonetos	30	23
Não especificado	2	3

Fonte: Elaboração própria com base em Global CCS Institute (2014, 2016).

Dos 44 projetos de CCS em grande escala em operação, 13 deles estão situados nos EUA, 9 na China, 7 na Europa, 6 no Canadá, 3 na Oceania, 2 no Oriente Médio, 2 no restante da Ásia, 1 para América do Sul e 1 na África (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2016). O desenvolvimento desta tecnologia, por parte dos EUA, pode ser atribuído à pressão política que, recentemente, redundou em uma lei que prevê a redução das emissões das termelétricas a carvão em 30% (EPA, 2014).

Um aspecto importante em relação à prospecção do uso do CCS é que sem o uso desta tecnologia, o custo adicional estimado do investimento no setor de energia seria de US\$ 2 trilhões nos próximos 40 anos para atingir as metas de mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2012). Dentro de dois cenários para mitigação das mudanças climáticas elaborados pela IEA, o custo total para o setor energético será de US\$ 28,3 e 35,9 trilhões entre os anos de 2010 a 2050 (IEA, 2012).

Mesmo com o cenário positivo em relação às questões técnicas, CCS tem enfrentado entraves para seu desenvolvimento, entre eles as políticas e marcos regulatórios (IPCC, 2005; ISHII; LANGHELLE, 2011; RÓMAN, 2011; ROMEIRO, 2014; WILLSON et al., 2011), o baixo preço do mercado do carbono atrelado ao seu alto valor de implantação (IPCC, 2005; ISHII; LANGHELLE, 2011), além das grandes diferenças entre os níveis tecnológicos e fatores sócio-políticos (MARKUSSON; ISHII; STEPHENS, 2011). Sinal destes entraves é que alguns projetos de CCS foram fechados ou paralisados temporariamente (MIT, 2015).

Apesar dos entraves enfrentados pelo CCS, o desenvolvimento de tecnologias de captura de CO₂ apresentou uma prospecção positiva para uso em outro importante meio de mitigação das mudanças climáticas, o CCU. O uso de carbono inicialmente era considerado como uma pequena parcela do potencial de mitigação das mudanças climáticas e estudado dentro do CCS, mas seus avanços permitiram que o CCU fosse considerado tão importante quanto o CCS para alguns pesquisadores.

A Styring e Jansen (2011), colocam que o CCU atua sobre fontes pontuais de forma a transformá-las em produtos valiosos, mas ele sozinho não pode remover o carbono da economia como o CCS. Outros fatores que devem ser levados em conta para o desenvolvimento do CCU é a disponibilidade de hidrogênio e outras matérias-primas para a cadeia de produção, além da energia limpa necessária para os processos de conversão.

Os principais usos iniciais para o CO₂ estavam ligados à recuperação de poços de petróleo, gás natural e carvão. Atualmente, o CCU apresenta um leque de ações mais diversificado, atuando nas indústrias de contenção do fogo, plástico, produtos alimentícios, agricultura, extratores orgânicos, mineralização, refrigeração, proteção e outros usos variados (BOCIN-DUMITRIU et al., 2013). A figura 2 demonstra essas possibilidades de uso do CO₂.

Figura 2 – Rede de possibilidades para o CCU

Fonte: Adaptado de Bocin-Dumitriu et al. (2013).

No Brasil, pesquisas na área de utilização de carbono também estão sendo realizadas, o 3º Congresso de CO₂ na Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis apresentou algumas delas. Rodrigues et al. (2015), estudou reações de catálise para melhorar os processos relacionados a gás de síntese; Mendieta et al. (2015) e Fanka et al. (2015), estudaram o uso do CO₂ para cultivos de algas; Funes e Pacca (2015), e Carvalho e Gomes (2015), estudaram o uso de CO₂ para a produção de biocombustíveis através de cana-de-açúcar e alga, respectivamente; Lima G. et al. (2015), e Arce et al. (2015), estudaram processos de mineralização e uso do CO₂. Estudos sobre recuperação de poços combustíveis também foram apresentados, Ligero e Schiozer (2015), discutiram sobre a recuperação de óleo leve com a injeção contínua em reservatórios altamente heterogêneos e Lima B. et al. (2015), apresentou resultados sobre a viabilidade ambiental, econômica e técnica do uso de CO₂ para recuperação de poços de gás natural *offshore*.

É importante frisar que o CCU tem como função a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que seu objetivo é encontrar um fim útil para o CO₂. Neste caso, para aferir se tecnologia de CCU auxilia nesta função, é necessário um estudo de seu ciclo de vida. Neste aspecto, diversos autores têm colaborado com o estado da arte do CCU, analisando se suas tecnologias, de fato, podem ser benéficas quanto à questão da redução da emissão de GEE.

Cuéllar-Franca e Azapagic (2014), analisaram 27 artigos que estudaram ACVs relacionadas à CCU e CCS, sendo 16 voltados para tecnologias de CCU e 11 de CCS. O estudo concluiu, de forma geral, que CCS tem vantagens quanto ao seu balanço de carbono em relação ao CCU, porém todos os outros impactos analisados do ciclo vida apresentaram piores resultado para o CCS (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2014). Assen, Jung e Bardow (2013), levantaram pontos que devem ser analisados com cuidado em estudos de ACV para CCU, como não considerar negativa a emissão de GEE quando o CO₂ é utilizado, usar adequadamente a alocação nos processos de captura e uso do CO₂ e a dificuldade de mensurar a questão da armazenagem do CO₂, uma vez que este processo não ocorre na ACV tradicional.

No contexto brasileiro, um importante uso para o CO₂ é a conversão biológica, onde pelo processo de fotossíntese, as plantas e algas fixam o carbono e produzem biomassa. Grande parte dos estudos desta modalidade de CCU é voltada para produção de algas, porém outros usos também devem ser considerados. Outro possível fim útil para o CO₂ seria usá-lo como insumo agrícola, uma vez que plantas em ambientes em maiores concentrações deste gás apresentam ganho de biomassa (LEUZINGER; HÄTTENSCHWILER, 2013). A cana-de-açúcar é uma das culturas mais plantadas no Brasil. Seu uso é diversificado, podendo atuar tanto na produção de biocombustíveis ou açúcar. O uso do CO₂ como fertilizante na cana pode ser um importante CCU, considerando que o uso do etanol de cana-de-açúcar em detrimento a combustíveis fósseis já é um importante agente na mitigação das mudanças climáticas.

A cana-de-açúcar é uma planta C₄, que não deveria apresentar incremento de biomassa quando em maiores concentrações de CO₂ em condições ambientais normais, porém resultados de experimentos demonstraram o contrário e isso abriu uma lacuna para diversas pesquisas na área de fisiologia vegetal para explicar esse fenômeno (GHANNOUM et al., 2010).

Nesta perspectiva, o CO₂ aplicado na cultura da cana-de-açúcar poderia ser utilizado como CCU na modalidade de fixação biológica, porém para atestar sua viabilidade quanto à técnica de mitigação das mudanças climáticas seria necessário uma CFP e ACV de seu ciclo

de vida com e sem a reciclagem do CO₂, além de uma base biológica que justifique o incremento de biomassa adquirido pela planta C4.

2.3 A resposta das plantas ao CO₂ atmosférico

As mudanças climáticas podem afetar a produção de alimentos em todo o mundo (PARRY; ROSENZWEIGW; LIVERMORE, 2004; SCHMIDHUBER; TUBIELLO, 2007). Modelos apontam que plantas C4, como a cana-de-açúcar e outras gramíneas plantadas, podem apresentar redução de produtividade devido às mudanças climáticas (DE SOUZA, 2011). Porém, as projeções da queda produtividade da cana-de-açúcar devido às mudanças climáticas não levam em consideração o incremento de produtividade que a espécie pode obter quando se encontra em concentrações elevadas de CO₂ (PARRY; ROSENZWEIGW; LIVERMORE, 2004; DE SOUZA, 2011). Isso ocorre devido ao fato de que parte das pesquisas anteriores apontarem que apenas as plantas C3 possuem mecanismos metabólicos para se beneficiarem com o aumento da taxa fotossintética nas condições de enriquecimento de CO₂ atmosférico (AINSWORTH; LONG, 2005). As plantas C4 teriam um ganho de biomassa nestas condições apenas quando apresentassem déficit hídrico, mas os experimentos apresentados por Ziska e Bunce (1997), Vu, Allen Jr e Gesch (2006) e de Souza et al. (2008), mostraram que as plantas C4 também obtêm incremento de biomassa mesmo em condições de rega constante.

Segundo de Souza, 2011, “Em plantas C3, a alta concentração de CO₂ aumenta a taxa de carboxilação da Rubisco uma vez que proporciona redução da competição entre CO₂ e O₂ pelo sítio ativo da enzima e, consecutivamente, reduz a fotorrespiração”. Como as plantas C4 possuem um nível cinco vezes maior de CO₂ nas células da bainha que no ambiente externo (FURBANK; HACTH, 1987), acreditava-se que essas plantas não apresentariam respostas ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico. Porém diversos estudos demonstram que as plantas C4 também podem apresentar incremento de biomassa quando nestas condições (ALI, 2008; WU et al., 2009; MANDERSCHIED; ERBS; WEIGEL, 2014; CO2 SCIENCE, 2015a b).

Para Ainsworth et al. (2008) e Leakey (2009), que usaram experimentos com a tecnologia *Free Air Carbon Enrichment* (FACE), as plantas C4 apenas apresentam respostas positivas ao incremento de CO₂ quando há déficit hídrico, devido ao fechamento dos estômatos e redução da transpiração causados pela presença do CO₂ em altas concentrações. Nos experimentos de Vu, Allen Jr e Gesch (2006) e Prasad et al. (2009), que usaram câmaras

de topo aberto (OTCs¹⁰) e casa de vegetação, o aumento da atividade da enzima Rubisco foi identificado como responsável pelo crescimento da atividade fotossintética. De Souza et al. (2008), conclui que o aumento da fotossíntese está relacionado com o aumento da taxa de elétrons na planta. De qualquer forma, haverá benefícios para essas plantas quando em maiores concentrações de CO₂ atmosférico, seja por estímulo ao desenvolvimento ou melhoria da eficiência hídrica (DE SOUZA, 2011).

Esses estudos de adaptação às mudanças climáticas puderam aferir que as plantas, sejam elas C3 ou C4, respondem positivamente ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Esse efeito pode ser comparado a um insumo agrícola, pois sua adição no campo pode aumentar a produtividade das plantas. Desta forma, pode-se usar o CO₂ de fontes puras como uma forma de fertilizante para os vegetais, como no caso do CO₂ oriundo da fermentação do processo de obtenção de etanol de cana-de-açúcar. Esse efeito fertilizante do CO₂ atmosférico pode agir promovendo incremento de biomassa desde sistemas florestais (NORBY; ZAK, 2011) a culturas bioenergéticas (ALI, 2008; BURKART; MANDERSCHIED; WEIGE, 2009; WU et al., 2009; MANDERSCHIED; ERBS; WEIGEL, 2014).

O *Center for the Study of Carbon Dioxide and Global Change* tem compilado estudos relativos a respostas das plantas quando em maiores concentrações de CO₂. A partir dos artigos e dados reunidos por este centro, foi realizada a figura 3, que apresenta a variação do incremento de biomassa em cana-de-açúcar e sorgo quando em ambientes enriquecidos com CO₂.

¹⁰ Do inglês *open-top chambers*.

Figura 3 – Variabilidade do incremento de biomassa para cana-de-açúcar e sorgo sob diferentes condições experimentais e com aumento da concentração de CO₂ no ambiente de 300 a 600 ppm

Fonte: Funes e Pacca (2015).

A figura gráfica foi construída com base em estudos sobre o ganho de biomassa pelas plantas em ambientes com maiores concentrações de CO₂ na atmosfera. Os experimentos considerados para esta análise foram sete para cana-de-açúcar e quinze para o sorgo. As medianas do incremento encontradas foram de 26% para a cana, e 25% para o sorgo. O primeiro quartil foi de 16% para as duas culturas. O terceiro quartil foi de 35,5% e 39,5% para cana e sorgo, respectivamente. Os valores máximos foram de 53% para o sorgo e 41% para cana. Quanto aos valores mínimos encontrados, o sorgo não teve crescimento enquanto a cana-de-açúcar apresentou crescimento de 6% em relação às testemunhas. Os resultados encontrados com os valores mínimos foram nos experimentos de Ziska e Bunce (1997), para cana-de-açúcar e de Ottman et al. (2001), para o sorgo. A figura 3 atesta a viabilidade do uso de CO₂ como fertilizante para estas culturas do ponto de vista do ganho de biomassa. Este aumento na biomassa corresponde a um aumento na massa de Açúcar Total Recuperável (ATR) e bagaço, que constituem os insumos que são convertidos, respectivamente, em etanol e eletricidade. Estes dois vetores energéticos têm potencial de deslocar combustíveis fósseis evitando as emissões de CO₂.

Todos os experimentos considerados são relativos ao incremento da parte aérea das plantas ou do conjunto total. O resumo dos estudos pode ser visualizado no ANEXO B. Não foram considerados experimentos e dados que analisaram apenas a biomassa radicular ou nos

quais as condições experimentais fugissem das práticas agrícolas tradicionais para o cultivo dessas culturas¹¹. Os estudos considerados para realização da figura 3 foram os de Marc e Gifford (1984); Morison e Gifford (1984); Amthor et al. (1994); Ziska e Bunce (1997); Watling e Press (1997); Ottman et al. (2001); Torbert et al. (2004); Prasad, Boote e Allen Jr. (2006); Vu et al. (2006); de Souza et al. (2008); Prasad et al. (2009); Vu e Allen Jr. (2009); Wu et al. (2009).

O estudo de Souza et al. (2008), que foi realizado no Brasil, mostra que a produtividade da cana-de-açúcar aumenta 34% quando se desenvolve exposta a uma concentração adicional de 300 ppm de CO₂ na atmosfera. Este experimento também apresenta uma grande relevância como estudo de caso devido ao fato de que suas condições experimentais serem semelhantes às condições naturais encontradas em campo no Brasil.

Um problema relativo ao uso deste CO₂ do processo de fermentação como fertilizante na cana-de-açúcar é que ele estará disponível para ser usado em um período não ideal para a cultura, onde não auxiliará o desenvolvimento da planta, necessitando então ser armazenado até a época de maior crescimento da cana-de-açúcar. Uma solução para este problema é usar outra cultura bioenergética que possa aproveitar o CO₂ neste período, como o sorgo.

Algumas variedades de sorgo podem ter produtividade semelhante ou até superior à da cana-de-açúcar (MAY; SILVA; DOS SANTOS, 2013). May et al. (2012), destacam o sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) como cultura bioenergética para produção de etanol, tanto na fase agrícola quanto na industrial. O sorgo tem sido considerado uma boa opção para produção de etanol junto com a cana-de-açúcar, pois é colhido na entre safra da cana e a tecnologia destinada ao processo industrial e a colheita da cana pode ser adaptada para esta cultura com bons resultados (DURÃES et al., 2012).

Tanto a cana-de-açúcar quanto o sorgo são culturas energéticas que podem se beneficiar da reciclagem do CO₂ oriundo das biorrefinarias. Portanto, um estudo sobre essa técnica de CCU por meio da ACV e da CFP poderia demonstrar a viabilidade desta técnica em relação aos balanços de energia e carbono e compará-la nestas categorias de impacto ambiental a outros produtos similares para saber seus reais benefícios.

¹¹ Estudos avaliando o efeito da fertilização por CO₂ no teor de suco da cana-de-açúcar após 3 meses de vida indicam aumentos na faixa de 70% em relação a testemunha.

2.4 Sistemas de enriquecimento de CO₂ na atmosfera das plantas

Nas pesquisas analisadas, os experimentos realizados com o enriquecimento de CO₂ na atmosfera das plantações as técnicas utilizadas foram o FACE (DELUCIA et al., 1999; LADEAU; CLARK, 2001; NORBY; ZAK, 2011), as câmeras de topo aberto (DE SOUZA et al., 2008; WU et al., 2009), as câmeras fechadas e as casas de vegetação (VU et al. 2006; VU; ALLEN JR, 2009). A tabela 2, a seguir, apresenta as técnicas utilizadas nos experimentos analisados para realização da figura 3.

Tabela 2 – Técnicas usadas nos experimentos de enriquecimento atmosférico com CO₂

Artigo	Tecnologia
Allen Jr. et al. (2011)	Câmeras fechadas
Amthor et al. (1994)	Câmera de topo aberto
Amthor et al. (1994)	Câmera de topo aberto
de Souza et al. (2008)	Câmera de topo aberto
Marc e Gifford (1984)	Câmeras fechadas
Morison e Gifford (1984)	Casa de vegetação
Ottman et al. (2001)	FACE
Prasad et al. (2006)	Câmera de topo aberto
Torbert et al. (2004)	Câmera de topo aberto
Vu et al. (2006)	Casa de vegetação
Vu e Allen (2009)	Casa de vegetação
Vu e Allen Jr. (2009)	Casa de vegetação
Watling e Press (1997)	Câmeras fechadas
Ziska e Bunce (1997)	Casa de vegetação

Fonte: Elaboração própria.

As técnicas que mais foram utilizadas foram à câmara de topo aberto e a casa de vegetação, em seguida a câmera fechada e, por fim, o FACE. Apesar de haver apenas um artigo nesta tabela que usou a tecnologia FACE, há um número crescente de pesquisas que utilizam essa tecnologia, sobre tudo para outras culturas vegetais diferentes da cana-de-açúcar. Esta técnica envolve maior grau de tecnologia, enquanto as câmeras de topo aberto, fechado e estufas envolvem um menor grau tecnológico e são usadas há mais tempo para pesquisas e produção de culturas intensivas.

A tecnologia do FACE é mais complexa dentre as técnicas estudadas. O FACE consiste em um mecanismo que mantém a concentração de CO_2 constante na área estudada. A vantagem dessa tecnologia é que quando adaptada, pode ser usada em áreas abertas, como campos, florestas e até em sistemas de várzea. Apesar de ser muito eficiente, a tecnologia é inviável quanto ao custo para culturas extensivas, como aquelas que são voltadas para fins energéticos. Na figura 4, a seguir, podemos visualizar a tecnologia FACE sendo empregada em diferentes culturas.

Figura 4 – Tecnologia FACE em diferentes culturas em campo: A em cultura de várzea, B em cultura florestal e C em cultura agrícola extensiva

Fonte: A e C: Plant and Cell Physiology (2014). B: National Center for Ecological Analysis and Synthesis (2015).

O FACE está cada vez mais sendo utilizado nas pesquisas de adaptação das plantas a condições de concentração elevada de CO_2 na atmosfera. Apesar de seu grau tecnológico estar mais desenvolvido, a quantidade de insumos para injeção de CO_2 constante é alta, tanto para a energia consumida quanto para a quantidade de CO_2 necessária. Este fato não apresenta problemas para a realização de experimentos, o mesmo não se pode dizer quanto à aplicação desta tecnologia com a intenção de obter incremento de biomassa em culturas extensivas, pois a quantidade de energia e CO_2 necessários para esta tecnologia poderia inviabilizar o projeto.

As câmeras de topo aberto, as câmeras fechadas e as casas de vegetação podem ser denominadas como técnicas de cultivo em ambiente protegido. Elas são mais usadas para

hortaliças, plantas medicinais e ornamentais, de forma geral cultivos intensivos. O grande diferencial dos cultivos em ambientes protegidos é que todas constantes ambientais podem ser controladas, desde a temperatura, umidade, luminosidade, até a quantidade de CO_2 presente em sua atmosfera. Este ambiente controlado já é muito utilizado nas hortaliças e contribui para segurança fitopatológica, eficiência de plantio, precocidade, eficiência do terreno, facilidade para questões operacionais e, caso haja transplântio, menor estresse (BEZERRA, 2003). Ambientes protegidos com atmosfera enriquecida com CO_2 são usados em culturas de melão, tomate, pepino e pimentão com melhores resultados quando comparados a testemunhas sem enriquecimento de CO_2 . De uma forma geral, os ambientes controlados permitem um menor estresse das plantas quando comparada as mesmas em campo. As figuras 5 e 6, a seguir, demonstram diferentes tipos de técnicas que podem ser aplicadas para realização de experimentos em ambientes controlados.

Figura 5 – Tecnologia de câmeras de topo aberto

Fonte: A: De Souza (2011). B: Silva et al. (2012). C: Oak Ridge National Laboratory (2015).

Figura 6 – Tecnologia de casa de vegetação

Fonte: Guimarães (2011).

As técnicas apresentadas nas figuras 5 e 6 podem variar muito em grau tecnológico, mas de uma forma geral possuem tecnologias mais baratas e simples de serem aplicadas comparadas ao FACE. Porém, essas técnicas ainda não apresentam viabilidade para serem aplicadas a culturas extensivas, como a cana-de-açúcar e as demais culturas bioenergéticas, principalmente, devido a questões operacionais e a extensão destas culturas.

Todas essas técnicas utilizadas para avaliar o incremento de biomassa nas plantas são válidas quanto ao caráter experimental, mas não poderiam ser utilizadas em condições operacionais de campo para produção de bioenergia, seja por questões técnicas ou devido ao seu alto custo. As técnicas de incremento com as câmeras de topo aberto e fechado e as casas de vegetação não poderiam ser constituídas para grandes áreas e também há limitações técnicas que podem inviabilizar o crescimento das plantas, além das dificuldades geradas para as operações agrícolas como plantio, colheita e reforma do solo. A tecnologia do FACE pode ser utilizada em campo, porém seu alto custo financeiro e energético inviabilizam o seu uso para produção de bioenergia. Ou seja, por mais que estas técnicas apresentem bons resultados quanto ao incremento de biomassa, elas não são viáveis para culturas extensivas.

Uma técnica que pode colher os mesmos benefícios das demais técnicas estudadas e é mais simples e operacional, seria o uso de um sistema de irrigação por gotejamento adaptado. Esse sistema de irrigação quando auxiliado por uma bomba de pressão poderia irrigar tanto água como CO_2 . Desta forma o custo do sistema seria dividido em duas funções: distribuir água e distribuir CO_2 . A densidade do CO_2 é superior à densidade do ar, isso possibilita que a dispersão deste gás fique mais próxima à superfície e que ele esteja mais tempo disponível para as plantas. Além disso, com o desenvolvimento da cultura a velocidade do vento diminuiria o que reduziria a dispersão do gás. O sistema de irrigação deve ser programado corretamente para que a irrigação ocorra em períodos do dia nos quais a taxa fotossintética é mais alta, a velocidade do vento é menor, possibilitando uma maior absorção do dióxido de carbono. Certamente, o CO_2 irá se dispersar no ambiente, mas é possível que a tecnologia de fertilização no campo possa ser desenvolvida a ponto de garantir um ganho de produtividade de forma economicamente competitiva.

Sistemas de irrigação por gotejamento já são utilizados em cana-de-açúcar, principalmente, em locais onde há deficiência hídrica. Dalri et al. (2008), usou a técnica de irrigação por gotejamento superficial em cana-de-açúcar com fitas de irrigação instaladas a 30 cm de profundidade e seus resultados apresentaram um ganho de produtividade de 39,86%, 47,33% e 58,53% nos seus experimentos em relação a testemunha e não foram constatadas diferenças de qualidade da cana. Esta operação possibilita que a colheita da cana-de-açúcar

possa ser mecanizada. Em sistemas naturais com deficiência hídrica para cultura da cana-de-açúcar, o enriquecimento com CO_2 pode ser ainda mais vantajoso, por otimizar a quantidade de água usada pelas plantas (AINSWORTH, et al., 2008; LEAKEY, 2009).

Apesar dos benefícios diretos do sistema de irrigação por gotejamento que emite tanto água quanto CO_2 há possíveis prejuízos, como uma pequena acidificação do solo devido ao enriquecimento com CO_2 , mas que podem ser corrigidos com técnicas agrícolas de correção do solo. A figura 7, a seguir, representa um esquema de um sistema de irrigação por gotejamento que poderia irrigar tanto água quanto CO_2 .

Figura 7 – Esquema da irrigação por gotejamento para irrigar CO_2 ou água na área de cultivo

Fonte: Elaboração própria.

Para a implantação do sistema de irrigação por gotejamento demonstrado na figura 7 é necessária uma bomba com capacidade de irrigar tanto CO_2 quanto água, uma rede de irrigação por gotejamento, um tanque de reserva de CO_2 e outro para a água ou uma ligação entre a rede de água e a fornecedora de CO_2 . Também é necessário um sistema de geração de energia e um painel de controle que possa realizar a irrigação de modo programado. Este sistema é relativamente simples e pode ser instalado com facilidade. O preço deste sistema também é mais viável que os outros sistemas e ele pode ser realocado para outra utilização depois do ciclo da cultura em questão. Este sistema pode ser mais viável tanto operacionalmente, em relação à implantação e a colheita, quanto economicamente se comparado ao FACE e às técnicas de cultivo em ambiente protegido.

A quantidade de CO₂ necessária para manter as concentrações de CO₂ em níveis ideais para o incremento de produtividade também pode representar um entrave na aplicação desta tecnologia. Uma solução para este problema é avaliar a demanda por meio de um modelo de dispersão que faça um uso eficiente do CO₂ oriundo da fermentação alcoólica para que este insumo tenha uma maior taxa de aproveitamento pelas plantas.

2.5 Modelagem do uso de CO₂ em campo

O CO₂ que é obtido da fermentação da cana-de-açúcar na fase industrial é relativamente puro e pode ser usado em outros processos industriais. O uso na própria cana é importante do ponto de vista da Ecologia Industrial para o produto, pois assim o sistema se configura mais fechado e mais semelhante aos sistemas naturais, um dos objetivos da Ecologia Industrial. Este CO₂ que é produzido na fermentação é limitado, pois depende da quantidade de cana-de-açúcar que é fermentada. Desta forma, o sistema não pode utilizar CO₂ de maneira irrestrita, pois seria necessário trazer uma quantidade deste gás de outros sistemas industriais, o que elevaria a quantidade de insumos necessários além do custo. Portanto, utilizar de forma racional o CO₂ produzido na fase industrial do etanol da cana-de-açúcar é primordial para que esta forma de CCU possa ser bem-sucedida. Neste aspecto, uma modelagem sobre o uso do CO₂ deve ser realizada tendo em vista a cultura utilizada, o insumo e o ambiente.

A cana-de-açúcar é uma cultura de alta produtividade, cujo objetivo principal é a produção de sacarose. No Brasil ela é muito plantada e é a base da indústria alcooleira e açucareira. A espécie possui quatro estágios durante seu ciclo de desenvolvimento, em cada um desses estágios há diferentes fatores limitantes para a planta (AUDE, 1993). De uma forma geral, as condições fisiológicas, climáticas e nutricionais são fatores que devem ser analisados durante todos os estágios de desenvolvimento da planta.

O primeiro estágio é a brotação e estabelecimento, que dura de 20 a 30 dias. Neste momento a umidade do solo é fundamental para a brotação da planta. O segundo é o perfilhamento, que pode iniciar no 40º dia e durar até o 120º. O terceiro estágio é de crescimento dos colmos, começando no dia 120º até o 270º aproximadamente; esse é o estágio mais importante no crescimento da planta, pois corresponde a 75% da matéria seca total final da planta. O último estágio é o de maturação dos colmos, no qual cai a taxa de crescimento e sobe a de acumulação de sacarose nos colmos da planta, iniciando-se entre os

dias 270° ao 360°e podendo durar 6 meses (DIOLA; SANTOS, 2010; MARAFON, 2012). A figura 8, a seguir, ilustra as fases de crescimento da cana-de-açúcar.

Figura 8 – Estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar

Fonte: Gascho e Shih (1993).

O período de crescimento dos colmos é o mais importante para o desenvolvimento do vegetal, já que ele é responsável por 75% da biomassa da planta. Portanto, quando consideramos o CO₂ como um recurso finito que deve ser usado no melhor período possível, os 150 dias do período de crescimento dos colmos é o mais indicado. Pois o incremento de produtividade será realizado em relação aos 75% da biomassa total da planta.

Quanto aos fatores climáticos, a irradiância, a quantidade de horas sol, a umidade, o vento e a temperatura devem ser levados em consideração na escolha e no planejamento do ambiente para cultura. O planejamento da cultura deve priorizar a realização da fotossíntese, pois ela é responsável direta pelo desenvolvimento da planta.

O desenvolvimento da fotossíntese pode ser afetado por vários fatores, como a composição mineral do solo e a temperatura, mas o fator mais importante é variação de luz solar (PAUL; PELLNY, 2003). A luz solar é a responsável por reduzir o CO₂ em formas que a planta pode usar como reserva energética, como a sacarose e a frutose através de reações

fotossintéticas. Portanto, a luz solar é indispensável para o desenvolvimento da planta. A fotossíntese ocorre sobre tudo durante o dia, quando há luz solar. A figura 9, a seguir, demonstra a variação fotossintética líquida de folhas C3 e C4 em relação à radiação fotossinteticamente ativa expressa em irradiância.

Figura 9 – Resposta da folha à taxa fotossintética líquida de radiação fotossinteticamente ativa expressa como irradiância

Fonte: Fischer, Byerlee e Edmeades (2014).

A figura 9 demonstra que a irradiância é fundamental para a fotossíntese das plantas. Para as plantas C₄, como no caso da cana-de-açúcar, quanto maior a irradiância maior a quantidade de fotossíntese realizada e consecutivamente maior produtividade, seja por maior crescimento ou acúmulo de açúcar. Com elevado ponto de saturação luminosa e alta eficiência fotossintética, a cana-de-açúcar apresenta melhores resultados quando em ambientes com alta irradiância. Segundo Waldron, Glasziou e Bull (1967), a taxa de fotossíntese eleva-se na cana-de-açúcar quando em ambiente com irradiância entre 0,2 a 0,6 cal.cm⁻².min⁻¹ e atinge a saturação acima de 0,9 cal.cm⁻².min⁻¹.

Como os períodos nos quais há maior insolação são também aqueles nos quais há maior taxa fotossintética, a fertilização com CO₂ nos campos agrícolas deve ocorrer nestes períodos, para que haja um maior aproveitamento do dióxido de carbono pelas plantas. Como nos períodos nos quais não há Sol as plantas não utilizam CO₂, não existe necessidade de enriquecer a atmosfera com este gás neste momento.

Outro fator importante para um modelo de enriquecimento atmosférico de CO₂ é a velocidade do vento. Segundo a Embrapa (2015), para a cana-de-açúcar, o vento pode ser

prejudicial quando excede 60 km/h, podendo causar quebra da cana e *lodging*. Os ventos também podem causar nas folhas faixas cloróticas ou estrias, o que diminui sua superfície foliar, também podem aumentar o sistema radicular e diminuir a parte aérea da planta (AUDE, 1993). Mas de uma forma geral, o vento não é um fator que limita a produtividade da cana, pois não é comum cultivar cana-de-açúcar em locais onde há altas velocidades de vento. A velocidade do vento, neste caso, é primordial para determinar a dispersão do CO₂ no campo. Portanto, essa variável deve ser considerada para a construção de um modelo de dispersão de CO₂ no campo.

Quanto à temperatura, temperaturas quentes são ideais para cana-de-açúcar e baixas podem ser prejudiciais à planta. Guerra et al. (2013), realizou um experimento para avaliar a taxa fotossintética e o desenvolvimento da cana-de-açúcar sob diferentes temperaturas. Em seus resultados as temperaturas elevadas não prejudicaram o desenvolvimento das plantas, apenas houve uma alteração no diâmetro do colmo; na temperatura média obteve os resultados ideais e a quando submetida à temperatura mais baixa houve queda na fotossíntese e no crescimento das plantas. As temperaturas médias mais propícias para os melhores resultados da taxa fotossintética e do desenvolvimento das plantas são 29°C para a temperatura diurna e 23°C para a noturna (GUERRA et al., 2013).

3 METODOLOGIA

Este trabalho utiliza como procedimento metodológico a análise de dispersão de gases, a ACV e a CFP para poder cumprir com seus objetivos. A metodologia utilizada para avaliar a quantidade de gases do efeito estufa emitida e a energia utilizada durante o ciclo de vida do etanol com e sem a reciclagem do CO₂ da fermentação da cana-de-açúcar foi a CFP e a ACV, respectivamente. O presente estudo também realizou uma análise de dispersão de gases com o objetivo de diagnosticar a técnica da irrigação do CO₂ em plantios agrícolas recomendada neste estudo, que será discutida a seguir.

3.1 Descrição do sistema de reciclagem de CO₂ proposto para as biorrefinarias

O sistema de reciclagem proposto é composto de:

- Uma bomba;
- Um sistema de armazenamento de CO₂ e água ou conexão à fonte;
- Um sistema de controle automático de irrigação;
- Um sistema de irrigação de fita de gotejamento de aproximadamente 1100 metros para cada hectare.

A bomba deve ser programada para funcionar apenas em alguns períodos do dia para otimizar o efeito do CO₂ irrigado em campo. Ela deve estar diretamente ligada aos locais de armazenamento ou às fontes de água e CO₂, sendo este segundo caso o mais recomendável e usado no ciclo de vida deste estudo.

O sistema de irrigação por gotejamento pode ser composto de uma fita de irrigação contínua ou em rede. Os bicos de irrigação devem estar em uma distância de 10 metros um do outro, de forma que cada linha contenha 10 furos, tanto na largura quanto na profundidade. O sistema pode estar sobre o solo ou a 30 cm de profundidade, conforme for melhor para as operações agrícolas locais.

No item 2.5 deste trabalho, que trata sobre a modelagem do uso de CO₂ em campo, foi citado que a fase de crescimento dos colmos é a mais importante do desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois representa 75% da biomassa do vegetal. A fase em questão tem duração de até

150 dias e é nesse período que o enriquecimento do CO₂ é realizado, pois desta forma há uma otimização do CO₂ da fermentação da cana-de-açúcar.

Ainda no item 2.5 deste trabalho, foi citado que a cana-de-açúcar necessita de uma alta quantidade de irradiação solar para obter melhores resultados de produção. No Brasil, de uma forma geral, a irradiação solar é boa de forma que país é propício ao aproveitamento da energia solar (TIBA et al., 2001).

Trabalhos sobre a variação da quantidade de irradiação solar recebida durante o dia mostram que a maior quantidade de irradiação incide no campo entre o período das 10:00 h até 14:00 horas (BURIOL et al., 1995; PEREIRA; VRISMAN; GALVANI, 2002; MACEDO; PINHO, 2002; SOUZA; SILVA; CEBALLOS, 2008). O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mede a insolação, em horas por dia, em diversas estações meteorológicas, considerando as estações de São Paulo com dados disponíveis¹², a irradiação média no estado é de 6,4 horas.

Neste cenário, considerando que a fotossíntese é mais alta nos períodos de pleno sol e o período das 10:00 horas até às 14:00 horas é aquele com maior taxa fotossintética, o enriquecimento de CO₂ atmosférico deve ser adotado neste período. Considerando que a média da insolação no estado de São Paulo é de 6,4 horas o enriquecimento pode ser feito por 6 horas para garantir que o CO₂ irrigado contribuía com o aumento da fotossíntese da planta. Desta forma, estabelecendo que haja um enriquecimento do CO₂ durante 6 horas por dia, entre 09:00 horas às 15:00 horas, temos que durante o período no qual a taxa fotossintética é maior, que ele possa ser atendido com a demanda de CO₂ necessária para o incremento de biomassa.

O enriquecimento de CO₂ atmosférico pretendido neste estudo é de 300 ppm acima da condição natural do ambiente, assim como feito nos artigos considerados para a realização da figura 3, que avaliaram o incremento de biomassa da cana-de-açúcar em condições de concentrações elevadas de CO₂ em sua atmosfera.

3.2 Modelagem da dispersão do CO₂ no campo

Um modelo de dispersão tipo pluma gaussiana foi utilizado, nesta análise, para representar a dispersão do CO₂ em campo por meio do sistema de irrigação por gotejamento

¹² A média foi estabelecida com base nas estações meteorológicas do INMET de Franca, Guarulhos, São Carlos, São Paulo, São Simão, Sorocaba e Taubaté.

que pode ser usado tanto para água quanto CO₂. O objetivo do modelo é determinar o fluxo de CO₂ necessário para aumentar a concentração deste gás no entorno da plantação. Cada poro de irrigação funciona como uma fonte pontual de emissão, que tem o CO₂ disperso na forma de pluma através do vento no ambiente. A figura 10, a seguir, representa a pluma gaussiana com emissão pontual.

Figura 10 – Esquema da pluma gaussiana

Fonte: Seinfeld (1998) apud Silva, Landau e Pimentel (2006).

Neste estudo, uma adaptação do modelo de pluma gaussiana por linha foi utilizado. Desta forma, o hectare de cana-de-açúcar possui 10 linhas, dispostas a cada 10 metros uma da outra. Uma aplicação convencional para este modelo de pluma é encontrar a concentração de gases emitidos por escapamentos de veículos em uma estrada. Neste caso, as fontes são os bicos de irrigação que devem emitir o CO₂ durante determinado período do dia e do ano. A equação 3, a seguir, ilustra o modelo de dispersão de uma linha (adaptado do modelo da pluma gaussiana que considera uma emissão pontual), retirado do livro de Nazaroff e Alvarez-Cohen (2001).

$$C = \left(\frac{\sqrt{2}m_{line}}{\sqrt{\pi}U\sigma_z} \right) \quad (3)$$

Onde:

C = concentração em mg/m³

m_{line} = emissão de CO₂ em g/m.s.

U = velocidade do vento em m/s

σ_z = dispersão vertical em metros

A dispersão vertical (σ_z) foi calculada através do emprego da equação 4, a seguir:

$$\sigma_z = d \cdot x^{(e+f \cdot LN x)} \quad (4)$$

Onde:

σ_z = dispersão vertical em metros

d, e, f = parâmetros relativos à classe de estabilidade da atmosfera

x = distância da fonte emissora em metros

Outras três equações foram usadas para converter e determinar parâmetros quanto à produção e utilização do CO_2 pelas áreas de cana-de-açúcar. A lei universal dos gases foi usada para transformar concentração em mg/m^3 para partes por milhão. Para encontrar a quantidade de kg de CO_2 produzido por cada hectare de cana-de-açúcar foi usada a equação 5:

$$kg \ CO_2 = Pc * Pet * 0,76 \quad (5)$$

Onde:

Pc = Produtividade da cana em toneladas por hectare

Pet = Produtividade de etanol em litros por tonelada de cana processada

O coeficiente de 0,76 foi empregado para converter o litro de etanol produzido em kg de CO_2 emitido na fermentação, conforme cálculo estequiométrico (SOUZA, 2015). Quanto à quantidade de CO_2 necessária para o incremento de 300 ppm na atmosfera da cultura foi empregada a equação 6:

$$kg \ CO_2 consumo = m_{line} * \acute{a}rea * tempo \quad (6)$$

Onde:

m_{line} = Emissão de CO_2 em gramas por metro por segundo

Área = área analisada em metros quadrados

Tempo = Tempo em que a irrigação ocorre em segundos

A velocidade do vento utilizada foi à velocidade média obtida para o estado de São Paulo a partir das estações meteorológicas do INMET com dados disponíveis. A opção por considerar os parâmetros meteorológicos do estado de São Paulo para análise do modelo foi baseada nas entradas da ACV e CFP que tem referência neste estado, além do desenvolvimento do nível da tecnologia canavieira local. Os outros parâmetros utilizados são relativos ao item 2.5 deste trabalho, que disserta sobre a modelagem do uso de CO₂ em campo¹³.

3.3 Avaliação de Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos

A metodologia base utilizada nesta etapa é a Avaliação do Ciclo de Vida. A ACV é regida pelas normas ISO 14040 e ISO 14044 traduzidas e referenciadas no Brasil pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044, respectivamente. Este trabalho também contempla norma ISO 14067, que normatiza a pegada de carbono. A ACV é composta por quatro fases distintas, como demonstrado na figura 11, a seguir.

Figura 11 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: ABNT (2009).

¹³ Todos os parâmetros utilizados constam no APÊNDICE A.

No presente estudo, foram realizadas adaptações metodológicas, de forma a descrever o objetivo e o escopo das normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 juntamente com a norma ISO 14067. Desta forma foi realizada uma análise conjunta das metodologias. Todos os procedimentos foram adotados de forma que as normas citadas tiveram seus princípios e bases seguidas.

a) Fase de definição de objetivo e escopo

Nesta fase precisam estar claros os objetivos da ACV e da CFP, sua aplicação, razão, público alvo e afirmação comparativa. A definição do escopo envolve os seguintes itens: sistema de produto, função dos sistemas, fluxo de referência, unidade funcional, fronteira do sistema, procedimentos de alocação, categorias de impactos selecionados, requisitos de dados, pressupostos, limitações, mudanças de uso da terra, requisitos da qualidade dos dados, revisão crítica e tipo de relatório requerido no estudo.

b) Fase de Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A ICV é fase onde são contabilizadas todas as entradas e saídas relativas a um sistema de produto. A condução de uma ICV é um processo iterativo. Assim quanto mais se amplia o conhecimento do sistema e mais dados são coletados, novos requisitos podem ser propostos, requerendo mudanças necessárias nos procedimentos de coleta e até revisão de objetivo ou escopo.

c) Fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Esta fase tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, tendo como base os resultados da ICV. Neste estudo são considerados o balanço de energia e a emissão de gases do efeito estufa.

d) Fase de interpretação do ciclo de vida

Fase onde as constatações da ICV e da AICV são consideradas em conjunto e em consonância com os objetivos e escopo do estudo. Nesta fase também estão compreendidas as conclusões, limitações e recomendações com base nos procedimentos realizados. Este estudo é do tipo do berço até o portão de saída da fábrica (SILVA et al., 2014).

3.4 Procedimentos seguidos na Avaliação do Ciclo de Vida e na Pegada de Carbono

3.4.1 A definição de objetivo e escopo

a) Objetivo da Avaliação do Ciclo de Vida e da Pegada de Carbono

O objetivo desta ACV é diagnosticar a tecnologia da reciclagem do CO₂ oriundo da fermentação da cana-de-açúcar para produção de etanol com aplicação em um sistema bioenergético.

A aplicação desta ACV pretende encontrar quais dos sistemas propostos possuem maior capacidade de produção de energia e menor emissão de GEE ao longo de seu ciclo de vida.

A razão deste estudo é testar a viabilidade da tecnologia da reciclagem de CO₂ das biorrefinarias como insumo agrícola do ponto de vista ambiental quanto à energia e emissão de gases que promovem o aquecimento global. Ele visa avaliar se, de fato, esta técnica pode ser classificada como CCU, ou seja, se promove a mitigação das mudanças climáticas.

O público-alvo é a comunidade acadêmica e os tomadores de decisão, em especial aqueles ligados à segurança energética e às mudanças climáticas globais, bem como produtores de cana-de-açúcar.

A afirmação comparativa aqui estudada é entre o sistema convencional de produção de etanol de cana-de-açúcar em relação ao sistema com reciclagem de CO₂ proposto.

b) Sistema de produto

O sistema de produto de referência nesta ACV é o sistema de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, no qual são estudados todos os processos desde o berço até o portão de saída da usina. O sistema consiste em duas etapas, a agrícola e a industrial.

O sistema de produto com a tecnologia estudada tem como principal diferencial em relação ao sistema de referência, o deslocamento de um subproduto, o gás carbônico (CO₂), para dentro do subsistema agrícola na forma insumo por um único ciclo. A figura 12, a seguir, representa o sistema de produto estudado.

Figura 12 – Esquema considerado na avaliação

Fonte: Elaboração própria.

c) Função dos sistemas

Dentro do objetivo e do sistema de produto estudado, pode-se considerar a função do sistema como a produção de bioenergia.

d) Fluxo de referência

O fluxo de referência adotado é um hectare de área agrícola para bioenergia.

e) Unidade funcional

A unidade funcional deste estudo é um MJ de bioenergia obtido na saída do portão da usina. A unidade foi escolhida com base na função do sistema, de produção de etanol e energia pela queima de bagaço e palha de cana-de-açúcar, tendo como base um hectare de área plantada.

f) Fronteira do sistema

O sistema apresentado possui abrangência do tipo berço ao portão de saída da usina. As relações entre os sistemas analisados e o meio ambiente estão presentes no ciclo de vida das etapas agrícola e industrial, todas relativas à produção de etanol.

Na definição da fronteira do sistema foi usado um critério de corte, onde algumas entradas foram desconsideradas devido à pequena representatividade que estas possuem no sistema. Desta forma os micronutrientes, lubrificantes das máquinas agrícolas e a fita de irrigação não foram considerados na análise. A tabela 3, a seguir, apresenta as entradas incluídas e excluídas do sistema na realização desta ACV e CFP.

Tabela 3 – Entradas consideradas incluídas e excluídas na ACV e CFP dos sistemas de bioenergia estudados

Sistemas incluídos	Sistemas excluídos
Fase agrícola	
Produção de sementes	Produção de micronutrientes
Produção de diesel	
Produção de fertilizantes (NPK ¹⁴)	Produção e manutenção de bens pessoais
Produção de pesticidas	
Produção de corretivos agrícolas	
Produção de energia elétrica	
Operações de campo	
Produção e manutenção de bens de capital	
Fase industrial	
Produção de químicos	Produção e manutenção de bens pessoais
Produção de energia elétrica	
Produção e manutenção de bens de capital	
Produção de obras de engenharia	

Os sistemas referentes à tabela 3 são os sistemas de produção relativos à cadeia de produção dos insumos em questão nas fases deste estudo. Não está incluso o transporte dos insumos até os locais de processamento devido à grande variação entre os locais de produção e uso destes. A produção e a manutenção de bens pessoais não foram incluídas nesta análise devido a todos os estudos de ACV consultados para bioenergia também não o realizarem, além da dificuldade técnica que seria mensurar tais bens. Os bens de capital considerados neste sistema são relativos à usina e aos equipamentos usados nas operações agrícolas em campo.

¹⁴ Nitrogênio, Fósforo e Potássio.

g) Categorias de impactos selecionados

Serão avaliados os balanços energético e de carbono.

h) Origem dos dados

Os dados utilizados nesta ACV são dados secundários reunidos através de uma revisão bibliográfica, esses dados são provenientes de artigos, produções acadêmicas de alta relevância e da base de dados da Ecoinvent.

i) Pressupostos

Os sistemas de produto estudados estão todos em um raio de 100 km das usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar para produção de etanol.

As áreas de produção agrícola neste estudo já eram destinadas a produção de cana-de-açúcar, de modo a não haver tratamentos culturais necessários para mudança de uso do solo.

As obras e infraestruturas da usina no final do ciclo de vida neste estudo serão readequadas para o mesmo fim ou outros, de forma que não será incluída no sistema a desativação da usina.

A área destinada ao plantio de cana-de-açúcar sofre reforma a cada sete anos e as entradas e saídas referentes a estes processos serão divididos em relação a este tempo.

O transporte de CO₂ para o campo é realizado através de uma bomba compressora.

As áreas irrigadas com CO₂ serão as áreas cultiváveis mais próximas à usina, de forma que a energia gasta no processo possa ser minimizada e os gastos com transporte do CO₂ para o campo desconsiderados.

j) Mudanças de uso da terra

Conforme os pressupostos, as áreas de produção neste estudo já eram de sistemas bioenergéticos de cana-de-açúcar, portanto, não há mudança de uso da terra. Assim, a *Land Use Change* (LUC) e a *Indirect Land use Change* (iLUC) são consideradas fora do sistema.

k) Limitações da ACV e da CFP

Este estudo não considera a LUC e iLUC, as entradas relativas aos bens de capital humano e pessoais devido à dificuldade que existe em ponderar os limites nestes casos e os pressupostos desse trabalho.

Entradas excluídas devido à pequena participação neste sistema, como micronutrientes e fita de irrigação, podem ser consideradas quanto a outros sistemas de menor impacto.

l) Requisitos da qualidade dos dados

Todos os dados utilizados neste estudo foram retirados da literatura internacional e nacionalmente reconhecidas, de forma a apresentarem a qualidade necessária para um estudo de ACV e CFP.

m) Tipo de relatório requerido no estudo

A dissertação de mestrado apresentada terá a função do relatório final, já que este estudo segue todas as normas e a estrutura metodológica de um estudo de ACV.

n) Cenário considerado

No intuito de cumprir os objetivos deste estudo, serão realizadas ACV e a CFP de dois sistemas diferentes. O sistema de referência é o de produção convencional de bioenergia a partir de cana-de-açúcar, com as tecnologias e produtividade relativa à safra 2013/2014.

O sistema dois é referente à produção de bioenergia de cana-de-açúcar com a tecnologia da reciclagem de CO₂ na forma de insumo agrícola na própria cana-de-açúcar. As condições experimentais quanto ao crescimento da cultura em relação ao incremento de biomassa são relativas aos resultados encontrados na figura 3. Foram considerados a média, o primeiro e o terceiro quartil.

3.4.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida

A ICV foi baseada nos estudos de Macedo, Seabra e Silva (2008); Macedo, Leal e Silva (2004); Seabra et al. (2011); Souza, Ávila e Pacca (2012), e Souza e Seabra (2014). Essa escolha é devida ao fato de que estas pesquisas serem realizadas tendo como base o cenário brasileiro de produção bioenergética e serem publicadas em periódicos internacionais reconhecidos. Também constam para realização desta etapa os procedimentos descritos pelo IPCC (2006, 2013). Todos os dados referentes às entradas e saídas foram atualizados com a bibliográfica pertinente quando necessário.

Todas as entradas são relativas à produção da cultura até o biocombustível pronto para uso no portão de saída da fábrica. No presente estudo foram considerados três fluxos para sua realização, são eles:

1. Consumo direto por energia e combustíveis;

2. Toda energia adicional necessária para produção das entradas relativas aos produtos químicos e também para confecção dos materiais usados nas etapas agrícola e industrial;
3. As entradas relativas à produção das construções e máquinas.

Os cálculos quanto à energia primaria foram realizados em todos os fluxos de energia. Quanto ao balanço energético do sistema, todas as contribuições térmicas relacionadas à biomassa foram computadas como energia renovável. Desta forma serão somadas todas as entradas e saídas de energia para se obter a relação de energia, pela equação 7:

$$\text{Relação de energia} = \frac{\sum \text{Saídas de energia}}{\sum \text{Entradas de energia}} \quad (7)$$

Os GEE analisados foram os principais gases causadores de efeito estufa relacionados à produção de biocombustíveis. O seu cálculo foi realizado através das equações a seguir.

3.4.2.1 Etapa Agrícola

Os insumos agrícolas utilizados nesta análise foram os fertilizantes, corretivos e defensivos agrícolas e tiveram suas emissões de GEE calculadas pela equação 8, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE_{ins.agri.} = T * FE \quad (8)$$

Onde:

FE = Fator de emissão de GEE relacionado ao ciclo de vida do insumo agrícola
(em kg CO₂ eq/ha.ano)

T = taxa de aplicação do insumo (kg/ha)

Nas emissões relativas aos tratos culturais se encontram todas as atividades operacionais que ocorrem em campo relativo as praticas agrícolas, como preparo da terra, plantio, adubação, irrigação, colheita e transporte. Essas emissões são relacionadas

diretamente à combustão de combustíveis fósseis e foram calculadas pelo emprego da equação 9, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE\ tra.\ cul. = C * FE * m$$

(9)

Onde:

C = consumo de diesel durante as operações agrícolas (L/ha.a)

FE = fator de emissão relacionado ao ciclo de vida do diesel (kgCO₂eq/kg)

m = densidade do diesel (kg /L)

Para o maquinário utilizado, foram considerados os tratores, colhedoras, implementos e caminhões, a bomba apenas no segundo cenário. Neste contexto, a emissão de GEE foi calculada pela equação 10, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE\ maq.\ agri. = T * FE$$

(10)

Onde:

T = taxa de utilização do maquinário (kg/ha)

FE = fator de emissão relacionado à produção de aço (kg CO₂eq/kg)

Segundo Macedo, Seabra e Silva (2008), as mudas representam 2,9% de toda as emissões e energia consumida relacionadas a etapa agrícola. Portanto, as emissões associadas à produção de mudas foram calculadas pela equação 11, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE\ mudas = (GEE\ maq.\ agri. + GEE\ tra.\ cul. + GEE\ ins.) * 0,029$$

(11)

3.4.2.2 Etapa industrial

As equações para as emissões associadas aos insumos industriais dependem do insumo utilizado. A quantidade de CaO e lubrificantes utilizados esta relacionada à quantidade de cana processada, enquanto o hidróxido de sódio, cicloexano, ácido sulfúrico, dispersante e anti espumante dependem da quantidade de litros de etanol produzido. A equação 12, foi usada para os insumos industriais CaO e lubrificantes, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE\ ind\ 1. = \left(\frac{Q}{1000} * FE \right) * P \quad (12)$$

Onde:

FE = fator de emissão relacionado ao ciclo de vida do insumo químico (kg CO₂eq/kg)

Q = quantidade de insumo industrial utilizado (g/tc)

P = produtividade de cana-de-açúcar (tc/ha.a)

Já para o hidróxido de sódio, cicloexano, ácido sulfúrico, dispersante e anti espumante foi utilizada a equação 13, em kg CO₂ eq/ha.ano:

$$GEE\ ind\ 2. = \left(\frac{Q}{1000} * FE \right) * (P * Pet) \quad (13)$$

Onde:

FE = fator de emissão relacionado ao ciclo de vida do insumo químico (kg CO₂eq/kg)

Q = quantidade de insumo industrial utilizado (g/tc)

P = produtividade de cana-de-açúcar (tc/ha.a)

Pet = produtividade de etanol (l/tc)

3.4.2.2.1 Equipamentos

A energia dos equipamentos foi calculada com base na ACV de Macedo, Leal e Silva (2004). O primeiro paço para calcular a energia utilizada nos equipamentos é saber quanto cada equipamento possui em consumo de energia. Esse cálculo é baseado na quantidade de material usado para construir cada equipamento. Em todos os equipamentos foi considerada a energia de produção de aço no Brasil, bem como sua emissão de GEE. A equação 14 demonstra a primeira parte do processo:

$$Energia\ equipamento = \sum (peso\ equipamento * CED\ aço * 1000) \quad (14)$$

Onde:

Energia equipamento = energia, em MJ, por tonelada dos equipamentos

Peso equipamento = quantidade em tonelada dos equipamentos

CED aço = CED para o aço no Brasil em MJ por kg

A vida útil de equipamentos foi considerada como sendo de 25 anos. Então, a somatória da energia dos equipamentos é dividida por 25, para obtenção da quantidade de energia despendida por ano pelos equipamentos.

A manutenção dos equipamentos é considerada como 4% por ano da energia acumulada para manufatura dos equipamentos. Por tanto, a energia por ano é a soma da energia acumulada para manufatura dos equipamentos pesados mais a manutenção dos equipamentos, conforme a equação 15, em MJ/ano por equipamento:

$$Energia\ equipamentos\ por\ ano = \left(\frac{Energia\ equipamento}{vida.\ útil} \right) + Energia\ equipamento * manutenção \quad (15)$$

Onde:

Energia equipamento por ano = energia em MJ por usina

Energia equipamento = energia, em MJ, por tonelada dos equipamentos

Vida útil = quantidade em anos da vida útil do equipamento

Manutenção = taxa de manutenção do equipamento em %

Para se obter a quantidade de energia acumulada nos equipamentos por hectare de cana-de-açúcar, divide-se a energia dos equipamentos, por ano, pela capacidade de processamento da usina multiplicada pela produtividade de cana em toneladas por hectare ano, conforme a equação 16, em MJ/ha.ano por equipamento:

$$\text{Ener. equi. ha} = \text{Energia equipamentos por ano} / (\text{Cap. usina} * P) \quad (16)$$

Onde:

Ener. Equi. ha = energia acumulada nos equipamentos pesados em MJ por hectare ano

Energia equipamento por ano = energia em MJ por usina

Cap. Usina = capacidade de processamento da usina ano (t/ano cana)

P = Produtividade da cana (t/ha.ano)

O cálculo relativo à quantidade de GEE emitido segue o mesmo princípio do cálculo da energia. Inicialmente calcula-se a quantidade de CO₂ equivalente que é emitido na manufatura dos equipamentos. A equação 17, a seguir, ilustra como foi realizado este cálculo:

$$\text{GEE equipamentos} = \sum (\text{peso equipamento} * \text{FE aço} * 1000) \quad (17)$$

Onde:

GEE equipamento = emissão em kg de CO₂ equivalente por tonelada dos equipamentos

Peso equipamento = quantidade em toneladas dos equipamentos

FE aço = Fator de emissão do aço no Brasil em tCO₂ /t

O somatório da emissão dos equipamentos foi dividido pela vida útil dos equipamentos e, depois, dividido pela quantidade de tonelada de cana-de-açúcar que é processada na usina em um ano, como demonstrado na equação 18, a seguir:

$$GEE\ eq.\ ha = \frac{\left(\frac{GEE_{equipamentos}}{vida\ útil} \right)}{(Cap.usina * P)}$$

(18)

Onde:

GEE eq. ha = emissão de CO₂ equivalente associada à equipamentos pesados, em kg por hectare de cana plantada

GEE equipamento = emissão de CO₂ equivalente por tonelada dos equipamentos

Vida útil = quantidade em anos associada à vida útil do equipamento

Cap. Usina = capacidade de processamento da usina ano (t/ano cana)

P = Produtividade da cana (t/ha.ano)

3.4.2.2.2 Edificações

As construções relacionadas à usina seguem o mesmo princípio dos equipamentos. O que, basicamente, diferencia as equações das edificações em relação à dos equipamentos é que na construção o consumo de materiais é relativo à área da construção, não ao peso em toneladas, conforme a equação 19:

$$Energia\ edificação = \sum (área\ const * CED\ edif.)$$

(19)

Onde:

Energia edificação = energia associada às edificações, em GJ

Área const = área da construção em metros quadrados

CED edif. = CED para a construção, em GJ por metro quadrado

Os demais procedimentos dos cálculos das edificações seguem os mesmos cálculos dos equipamentos pesados. A vida útil das construções é de 50 anos e a taxa de manutenção é 4% da energia da manufatura por ano.

A emissão de GEE foi obtida a partir da quantidade de energia gasta nas edificações multiplicada pelo fator de emissão. Esse fator foi considerado como sendo equivalente ao coque de petróleo. A equação 20, a seguir, ilustra esse procedimento:

$$GEE\ edificação = \sum (Energia\ edificação * FE\ edif.)$$

(20)

Onde:

GEE edificação = emissão de CO₂ eq em kg

Energia edificação = energia em GJ pela edificação

FE edif. = fator de emissão para a construção em kgCO₂/GJ

A emissão por tonelada de cana-de-açúcar produzida também foi calculada através dos os mesmos princípios estabelecidos para os equipamentos, porém com as mudanças dos parâmetros dos equipamentos para o das edificações.

3.4.2.3 Emissões atribuídas aos resíduos

Quanto à queima do bagaço nos processos de geração de energia, ela foi realizada através da equação 21, a seguir:

$$GEE\ queima = P * P_{bagaço} * Ef * FEq$$

(21)

Onde:

P = produtividade de cana-de-açúcar (tc/ha.ano)

P_{bagaço} = produtividade de bagaço (kg/tc)

Ef = eficiência da queima (90%)

FEq = Fator da emissão da queima de bagaço (kgCO₂eq/kg)

A emissão associada ao uso de fertilizantes nitrogenados quanto a retorno de N₂O foi estimada pelo emprego da equação 22, a seguir:

$$GEE\ res.\ fer. = T.res.* Nf * Nc * \frac{44}{28} * GWPN_2O$$

(22)

Onde:

T.res. = Taxa de aplicação do produto (kg/ha.ano)

Nf = Quantidade de nitrogênio nos fertilizantes (%)

N.fer.conv. = Nitrogênio convertido em N₂O nos fertilizantes (%)

GWPN₂O = Potencial de Aquecimento Global do N₂O

A emissão relacionada à decomposição dos resíduos deixados em campo foi calculada pelo emprego da equação 23, a seguir:

$$GEE_{dec.} = (P * P_{palha} * palha \text{ não recolhida}) * (N_{palha} * N_{conv} * \frac{44}{28} * GWPN_{2O}) \quad (23)$$

Onde:

P = Produtividade de cana-de-açúcar (tc/ha.ano)

P_{palha} = Produtividade da palha (kg/tc)

N_{palha} = % de nitrogênio na palha da cana-de-açúcar

N_{conv} = % de nitrogênio convertido em N₂O

GWPN₂O = Potencial de Aquecimento Global do N₂O

As emissões associadas ao uso em campo da torta de filtro, cinzas da caldeira e fuligem foi estimada pela equação 24, a seguir:

$$GEE_{dec.} = T_p * N_{prod} * N_{conv} * \frac{44}{28} * GWPN_{2O} \quad (24)$$

Onde:

T_p = Taxa de aplicação do produto (kg/ha.ano)

N_{prod} = % de nitrogênio no produto

N_{conv} = % de nitrogênio convertido em N₂O

GWPN₂O = Potencial de Aquecimento Global do N₂O

No cálculo das emissões relacionadas ao uso da vinhaça em campo, utilizo-se a equação 25, a seguir:

$$GEE_{vinhaça.} = T_x.vinhaça * N_{prod} * N_{conv} * \frac{44}{28} * GWPN_{2O} \quad (25)$$

Onde:

Tx. vinhaça = Taxa de aplicação da vinhaça ($\text{m}^3/\text{ha.ano}$)

Nprod = % de nitrogênio no produto

Nconv = % de nitrogênio convertido em N_2O

GWPN $_2\text{O}$ = Potencial de Aquecimento Global do N_2O

3.4.2.4 Saídas

Após o cálculo de todas as entradas, realizou-se os cálculos das saídas. Nesta etapa entram as saídas de energia relativas à produção de etanol e de energia elétrica excedente.

Para o cálculo das emissões de GEE deslocadas foi considerada a gasolina e a produção de energia elétrica gerada através de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) de projetos brasileiros pelo método simples ajustado tendo como ano base 2014, para os produtos etanol e energia elétrica excedente, respectivamente.

O balanço de energia foi calculado pelo emprego da equação 26, a seguir:

$$\text{Balanço de energia} = \text{Energia saída} - \text{Energia de entrada} \quad (26)$$

O retorno do investimento de energia foi calculado através do emprego da equação 27, a seguir:

$$\text{Retorno IE} = \frac{\text{Energia de saída} - \text{Energia de entrada}}{\text{Energia de entrada}} \quad (27)$$

Todos os cálculos para o fluxo de referência de um hectare de cana-de-açúcar foram divididos pela quantidade de bioenergia gerada na área, que é a soma do poder calorífico do etanol mais a eletricidade excedente gerada pela queima do bagaço de cana-de-açúcar. Desta forma, todas as entradas foram medidas em kJ e kgCO_2eq por MJ de bioenergia produzida.

3.4.3 Análise da incerteza

Análises de sensibilidade são feitas em trabalhos de ACV para demonstrar as possíveis variâncias que podem ocorrer em relação aos resultados obtidos (LLOYD; RIES, 2007). Neste trabalho, foi realizada uma faixa de sensibilidade em relação aos possíveis resultados esperados da ACV e CFP no cenário da produção de cana-de-açúcar com reciclagem de CO_2 .

A faixa analisada levou em consideração os parâmetros estatísticos da figura 3, sendo avaliados os incrementos de produtividade relativos aos três quartis.

Também foi realizado a ACV e CFP de todos cenários de incremento de biomassa com o objetivo de obter os pontos de cruzamento da relação de energia e do retorno de investimento de energia dos cenários com a reciclagem de CO₂ com o sistema tradicional de produção de etanol de cana-de-açúcar. Os balanços de carbono para os cenários também foram realizados para se obter os valores mínimo e máximo que a tecnologia pode obter.

3.4.4 Figuras de mérito utilizadas

As figuras de mérito utilizadas para análise da ACV e CFP foram à comparação entre os diferentes resultados para cada cenário em emissões de GEE e CED, a comparação entre as emissões evitadas, a quantidade de GEE e CED em porcentagem de participação para cada etapa, e os fluxos de energia e emissão de GEE para cada cenário.

Figuras da análise da incerteza também foram produzidas considerando a faixa da incerta em relação ao incremento de biomassa ganho e seus resultados na ACV e CFP, e também gráficos das linhas de relação de energia e retorno de investimento de energia para os sete cenários de incremento de biomassa e do balanço de energia de cada um.

4 RESULTADOS

4.1 Uso do CO₂ das biorrefinarias como insumo agroenergético

A técnica de CCU proposta, que reutiliza o CO₂ produzido na fermentação alcoólica da cana-de-açúcar, ainda não foi realizada experimentalmente em campo. Os resultados considerados para elaboração da presente pesquisa foram de experimentos nos quais se comparou o crescimento da cana-de-açúcar em condições naturais com ambientes enriquecidos com CO₂ em sua atmosfera. Nesta pesquisa a técnica de CCU da reciclagem de CO₂ é discutida do ponto de vista teórico e, sob tal perspectiva, a técnica pode ser promissora.

Considerando os dados das pesquisas realizadas anteriormente, os resultados indicam que há uma variação de 6% a 41% do incremento de produtividade da cana-de-açúcar com a adição de 300 ppm de CO₂ em sua atmosfera. A média dos resultados do incremento de produtividade para um aumento de CO₂ em 300 ppm acima das condições naturais do ambiente é de 25,1%, a mediana de 26%, o primeiro quartil de 16% e o terceiro quartil de 35,5%, conforme mostrado na figura 3.

Na ACV e CFP deste estudo utilizou-se a produtividade da cana-de-açúcar de 85 toneladas por hectare, que é relativa aos estados de Goiás, Mato Grosso e São Paulo (SOUZA, SEABRA, 2014). Tendo como base este dado e considerando o primeiro e o terceiro quartil, o incremento de produtividade seria de 13,6 a 30,2 toneladas de cana-de-açúcar por hectare, como pode ser visto da tabela 4, a seguir. Esse incremento só pode ser atingido quando a planta possui o enriquecimento atmosférico de CO₂ durante todo seu ciclo de vida.

Tabela 4 – Incremento de produtividade da cana-de-açúcar com a reciclagem do CO₂ obtido da fermentação alcoólica

Incremento de Produtividade (%)	Produtividade total (tcana/ha)	Incremento em massa (tcana/ha)
16,0	98,6	13,6
25,1	106,3	21,3
35,5	115,2	30,2

Mesmo o incremento de produtividade mais baixo considerado na tabela 4, apresenta resultados significativos para a produção de bioenergia. A tabela 5, a seguir, apresenta a

intensidade energética da terra considerando apenas a produção de etanol da cana-de-açúcar com a técnica de CCU por meio da reciclagem do CO₂.

Tabela 5 – Intensidade energética da terra considerando apenas o etanol da cana-de-açúcar com a técnica de reciclagem de CO₂ proposta, em GJ/ha/ano

Incremento de Produtividade (%)	Energia etanol (GJ/ha/ano)	Incremento energético (GJ/ha/ano)
16,0	187,4	25,8
25,1	202,1	40,5
35,5	218,9	57,4

Estes resultados podem ser ainda mais promissores, em termos absolutos, quando consideramos a energia excedente obtida pela queima do bagaço. A tabela 6, a seguir, apresenta a intensidade energética da terra considerando a produção de etanol e a energia excedente associada à queima do bagaço da cana-de-açúcar com emprego da técnica de CCU da reciclagem do CO₂.

Tabela 6 – Intensidade energética da terra para cana-de-açúcar com a técnica de reciclagem de CO₂ proposta, em GJ/ha/ano

Incremento de Produtividade (%)	Bioenergia total (GJ/ha/ano)	Incremento energético (GJ/ha/ano)
16,0	224,5	31,0
25,1	242,1	48,6
35,5	262,3	68,7

A técnica da reciclagem de CO₂ da fermentação da cana-de-açúcar pode apresentar ganhos energéticos consideráveis conforme observado nas tabelas 5 e 6. Esses ganhos, além de serem positivos para produção de energia, também representam aspectos positivos para mudança de uso do solo, já que a quantidade de terra necessária para cumprir com as metas energéticas do governo segundo o PDE 2021, seria menor. Além disso, um estudo recente publicado na revista Nature afirma que o aumento na produtividade agrícola deve ser parte fundamental da estratégia para reduzir as emissões de GEE pela agricultura (LAMB et al., 2016). A tabela 7, a seguir, apresenta a diferença de área plantada necessária para cumprir as metas de produção de etanol do PDE 2021 considerando a tecnologia de CCU proposta e a área que seria disponível para produção de outras culturas devido à mudança de uso do solo.

Tabela 7 – Área plantada de cana-de-açúcar necessária para cumprir as metas do PDE 2021 considerando a técnica de reciclagem de CO₂

Incremento de Produtividade (%)	Área plantada (ha x 10 ⁶)	Área disponível para outras culturas	
		(ha x 10 ⁶)	(%)
-	6,27	-	
16	5,41	0,85	14%
25,1	5,01	1,26	20%
35,5	4,63	1,64	26%

Nestes parâmetros, considerando o incremento médio de biomassa pela técnica, seriam necessários cerca de 5 milhões hectares de cultivo de cana-de-açúcar contra 6,2 milhões de hectares sem a tecnologia para cumprir com as metas do PDE 2021.

Quanto à qualidade dos dados estudados, as pesquisas realizadas por Ziska e Bunce (1997), Vu et al. (2006), de Souza et al. (2008), Vu e Allen (2009), atestaram que plantas C₄, como a cana-de-açúcar, cultivadas em ambientes com maiores concentrações de CO₂ *ceteris paribus* apresentam maior incremento de biomassa. De Souza et al. (2008), que realizou suas pesquisas no Brasil, aponta que as plantas estudadas que se desenvolveram em ambiente natural e com maior concentração de CO₂ não obtiveram diferenças quanto a sua composição química, o que configura que ambas possuem, relativamente, a mesma quantidade de ATR. Estes resultados demonstram que o uso de CO₂ como possível fertilizante pode ser considerado viável, sendo atestado pela literatura.

4.2 Modelo de irrigação e dispersão do CO₂

O modelo de dispersão de CO₂ visa aferir se o gás irrigado em campo pode estar presente nos momentos em que a planta mais necessita. No caso da cana-de-açúcar, assim como outras culturas extensivas, o momento mais proveitoso quanto à utilização do CO₂ irrigado ocorre no momento de saturação luminosa, que costuma ocorrer no período no qual o Sol está mais perto de 90°, o que pode variar entre as 10:00h e 14:00h. Considerando uma faixa mais abrangente, que possa estar entre das 9:00h às 15:00h, estas 6 horas seria o período mais proveitoso para utilização do dióxido de carbono.

O objetivo é que na atmosfera sobre a área sejam adicionados um mínimo de 300 ppm de CO₂, assim como realizado nos artigos estudados. O modelo de CCU proposto possui fitas de irrigação que tem furos a cada 10 metros, esses furos podem irrigar tanto CO₂ quanto água.

Considerando que a média da velocidade do vento é de 1,4 m/s no estado de São Paulo¹⁵ e que a atmosfera é considerada estável para o modelo, realizou-se um cálculo através das equações 5 e 6 com o objetivo de obter a emissão mínima necessária para que toda área tenha um incremento de 300 ppm em sua atmosfera. Desta forma, uma emissão de 2,25 mg/m.s. de CO₂ seria o suficiente para que 100% da área ao redor do ponto emissor estivesse com a mesma concentração adicional de CO₂ que realizada nos experimentos considerados. A tabela 8, a seguir, mostra a dispersão do CO₂ em campo para uma fonte emissora de acordo com o modelo utilizado.

Tabela 8 – Dispersão do CO₂ em campo na forma de pluma gaussiana para uma única fonte pontual

Distância (m)	Concentração (ppm)
10	300,1
20	69,2
30	29,3
40	15,9
50	9,9
60	6,8
70	4,9
80	3,7
90	2,9
100	2,3

Neste caso, uma única fonte pontual de gás é capaz de suprir a demanda adicional de CO₂ em 300 ppm em sua área próxima com os parâmetros utilizados. No entanto, o total de fontes pontuais é de 100 para um hectare e dispostas a 10 metros uma da outra. Desta forma, cada linha possui 10 fontes pontuais de gás e a concentração de CO₂ deve contabilizar todas as fontes pontuais da mesma linha. A tabela 9, a seguir, apresenta a concentração do CO₂ irrigado no campo, levando-se em conta as fontes pontuais da mesma linha.

Tabela 9 – Dispersão do CO₂ em campo na forma de pluma gaussiana para todas as fontes pontuais

Distância (m)	Concentração (ppm)
10	300,1
20	369,2
30	398,6
40	414,5

¹⁵ Média obtida a partir das estações meteorológicas do INMET com dados disponíveis.

50	424,4
60	431,2
70	436,1
80	439,8
90	442,6
100	444,9

Os dados da tabela 9, demonstram que o modelo de dispersão de gases pode contemplar 100% da área plantada com mais de 300 ppm adicionais de CO₂, que é a concentração utilizada nos experimentos estudados. Porém, nas distâncias mais longas, a contração de CO₂ chega a ficar mais alta que o esperado. Quando considera-se que as áreas de cana-de-açúcar são plantadas continuamente, as emissões pontuais se somam e geram valores ainda maiores na concentração de CO₂. A figura 13, a seguir, apresenta o comportamento da concentração adicional de CO₂ por fonte emissora e pela sobreposição das fontes até uma distância de 2 km.

Figura 13 – Concentração de CO₂ adicional em campo por fonte pontual e por linha para uma emissão de 2,25 miligramas por metro por segundo, em ppm a cada km

A concentração adicional de CO₂ chega a passar de 150 ppm do objetivo de 300 ppm à uma distância de 2 km da primeira fonte emissora. Apesar desse aumento não apresentar problemas para fisiologia das plantas, a quantidade de CO₂ necessária para esse incremento seria alta, cerca de 22,5 gramas de CO₂ por hectare por segundo.

Pela aplicação equação 5, um hectare de cana produz cerca de 5491 kg de CO₂ e quando considerado o incremento médio de biomassa, essa produção sobe para 6524,6 kg de CO₂. Considerando que o período ideal para uso do CO₂ é na fase de crescimento dos colmos que dura cerca de 150 dias e com irrigação por 6 horas diárias, pela aplicação da equação 6, a

demanda de CO₂ seria de 79,2 toneladas por ano. Desta forma, a produção de CO₂ por hectare de cana-de-açúcar poderia suprir essa demanda em apenas 8 e 9% para produção convencional e com reciclagem, respectivamente.

Através da aplicação da equação 6, a produção convencional de cana-de-açúcar tem a capacidade de emitir 1,7 mg/m.s. de CO₂ e, com reciclagem, 2 mg/m.s. para os parâmetros deste estudo. A área irrigada apenas com o CO₂ da produção de cada hectare de cana não conseguiria atingir o incremento ideal do gás em 300 ppm nas produções convencional e com reciclagem de CO₂, mesmo com a sobreposição dos pontos emissores, conforme observa-se na figura 14, a seguir.

Figura 14 – Concentração de CO₂ adicional em campo por linha para uma emissão de 1,7 e 2 miligramas por metro por segundo, em ppm a cada km

Pelo modelo e pelos parâmetros utilizados, uma mesma área não pode ser autossuficiente em produção de CO₂ para manter a concentração incremental do gás em 300 ppm durante a fase de crescimento dos colmos.

Considerando a capacidade máxima de uma usina no presente estudo, que é de 4000000 de toneladas de cana-de-açúcar por ano, observa-se que se uma usina funcionar em capacidade máxima ela poderá irrigar com CO₂ cerca de 3545 hectares de cana-de-açúcar sem fontes externas de CO₂.

4.3 Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos

Os insumos utilizados neste estudo para as etapas agrícola e industrial são apresentados nas tabelas 10 e 11, a seguir, respectivamente. Os dados considerados para sua

realização foram obtido a partir dos artigos de Macedo, Seabra e Silva (2008), Seabra et al. (2011), e Souza e Seabra (2014), de forma a complementar um ao outro. A escolha destes artigos como base é devido a todos serem referência no cenário da cana-de-açúcar brasileiro e terem um grande escopo de análise de usinas. Os estudos selecionados foram usados de modo a completar os dados necessários para realização da metodologia descrita no capítulo 3.

Tabela 10 – Insumos da etapa agrícola do ciclo de vida da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar

1. Etapa agrícola		
Parâmetro	Valores	Unidade
Número de cortes	5 ^a	
Sementes	18 ^a	t ha ⁻¹
Produtividade da cana	85 ^a	t ha ⁻¹ ano ⁻¹
Produtividade da palha	140 ^a	kg seco t ⁻¹ cana
Palha recolhida	20 ^a	%
Insumos		
Nitrogênio	84,5 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Amônia	14 ^b	%
Uréia	48 ^b	%
Nitrato de amônia	37 ^b	%
MAP	1 ^b	%
Fósforo	27 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Acido fosfórico	91 ^b	%
Rocha de fósforo	<1 ^b	%
MAP	9 ^b	%
Potássio	73 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Inseticida	0,2 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Fungicida	0,1 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Herbicida	4 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Calcário	1000 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Gesso (CaSO ₄)	500 ^a	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹
Consumo de diesel	260 ^a	L ha ⁻¹ ano ⁻¹
Vinhaça	140 ^a	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
Cinzas da caldeira	170 ^a	kg seco ha ⁻¹ ano ⁻¹
Fuligem	1020 ^a	kg seco ha ⁻¹ ano ⁻¹
Torta de filtro	5 ^a	t seco ha ⁻¹ ano ⁻¹
Maquinários		

Tratores + colhedoras	41,8 ^c	kg ha ⁻¹
Implementos	12,4 ^c	kg ha ⁻¹
Caminhões	82,4 ^c	kg ha ⁻¹
Bomba compressora	1 ^d	

^aSouza e Seabra (2014). ^bSeabra et al. (2011). ^cMacedo et al. (2008). ^dConsiderado apenas uma unidade para área com reciclagem.

A diferença entre os sistemas tradicional e com reciclagem na etapa industrial é a bomba compressora utilizada para irrigação do CO₂. Apesar deste tipo de aparelho estar mais adequado ao parâmetro dos equipamentos industriais, ele será computado como integrante de parte do maquinário agrícola, já que sua função é diretamente relacionada a um insumo de campo. A média do incremento de biomassa encontrado nos experimentos considerados na figura 3 é de 25,1 %. Este dado porcentual, no presente estudo, é usado como entrada no cenário com a reciclagem de CO₂. Portanto, considerando que a irrigação ocorre na etapa de crescimento dos colmos, que corresponde ao crescimento de 75% da biomassa da planta, o incremento esperado em campo para a análise da ACV e CFP é de 18,82%¹⁶ para o cenário com a tecnologia de CCU proposta.

A tabela 11, a seguir, apresenta as entradas relativas à etapa industrial.

Tabela 11 – Insumos da etapa industrial do ciclo de vida da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar

2. Etapa industrial		
Insumos	Valores	Unidade
CaO	530 ^a	g t ⁻¹ cana
Anti espumante	0,3 ^a	g L ⁻¹ etanol
Dispersante	0,3 ^a	g L ⁻¹ etanol
Ácido sulfúrico	6,6 ^a	g L ⁻¹ etanol
Lubrificantes	13 ^a	g t ⁻¹ cana
Ciclohexano	1,2 ^a	g L ⁻¹ etanol
Hidróxido de sódio	0,4 ^a	g L ⁻¹ etanol
Equipamentos industriais		
Caldeiras	2400 ^b	Toneladas

¹⁶ O incremento de biomassa esperado é calculado pela média dos incrementos dos artigos estudados multiplicada pela produção de biomassa no período de crescimento dos colmos. Desta forma o incremento esperado será superior em 18,82% em relação mesma área de cana-de-açúcar sem a reciclagem de CO₂. Esse cálculo é necessário para o ciclo de vida deste estudo, uma vez que o CO₂ é irrigado apenas no período de crescimento dos colmos.

Trituradores e dispositivos de condução	1300 ^b	Toneladas
Transportadoras	450 ^b	Toneladas
Destilaria	3000 ^b	Toneladas
Tanques	1540 ^b	Toneladas
Edificações		
Edifícios industriais	12000 ^b	m ²
Escritórios	800 ^b	m ²
Laboratórios e oficinas de reparação	3800 ^b	m ²
Armazém e pátios	10000 ^b	m ²

^aSouza e Seabra (2014). ^bMacedo et al. (2008).

Os insumos e a produção considerados foram a do estudo mais recente analisado, que é o de Souza e Seabra (2014), para o cenário referenciado. Os equipamentos industriais e as edificações foram retirados a partir da pesquisa de Macedo, Seabra e Silva (2008). Os mais recentes estudos de ACV para o cenário brasileiro da cana-de-açúcar não tem considerado as entradas relativas às edificações e aos equipamentos industriais devido a sua baixa participação nos impactos do sistema (DIAS et al., 2011; SOUZA; SEABRA, 2014). Seguindo esta linha, não considerou-se o sistema de irrigação por gotejamento por não representar impactos significativos quanto à emissão de CO₂ e seu CED, além de sua fácil reutilização em outros processos fora deste procedimento. Está análise considerou as entradas relativas às edificações e aos equipamentos industriais com a finalidade de avaliar se o uso do compressor de CO₂ pode alterar, significativamente, o balanço de carbono e de energia do sistema.

Para os parâmetros e saídas da etapa industrial foram utilizados os dados de Souza e Seabra (2014), que constam na tabela 12, a seguir. Quanto à bioeletricidade excedente por tonelada de cana-de-açúcar considerou-se os dados provenientes de Dias et al. (2011), sendo que a energia consumida na usina é de 30 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada e a geração total de 134,6 kWh por tonelada de cana.

Tabela 12 – Parâmetros e saídas relativas à etapa industrial

Parâmetro	Valor	Unidades
Capacidade de processamento da usina	4000000 ^a	t ano ⁻¹ cana
Saídas		
Etanol	85 ^a	L t ⁻¹ cana
Eletricidade excedente	104,6 ^b	kWh t ⁻¹ cana

Vinhaça	11 ^a	L L ⁻¹ etanol
Torta de filtro	32 ^a	kg t ⁻¹ cana

^a Souza e Seabra, (2014). ^b Dias et al. (2011).

A ACV e CFP demonstraram que a produção tradicional da cana-de-açúcar emite menor quantidade de GEE e consome menor quantidade de energia por hectare comparada a produção com o uso da reciclagem do CO₂ das biorrefinarias, conforme demonstrado nas tabelas 13 e 14, a seguir.

Tabela 13 – Resultados da ACV para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em MJ/ha

Entrada	Tradicional MJ/ha	Reciclagem de CO₂ MJ/ha
Etapa Agrícola		
1. Mudas	633,94	645,75
2. Insumos Agrícolas		
2.1. Fertilizantes		
Nitrogênio	5045,52	5045,52
Fósforo	622,84	622,84
Potássio	658,45	658,45
Calcário	196,01	196,01
Gesso	18,67	18,67
Total fertilizantes	6541,50	6541,50
2.2. Defensivos		
Inseticida	68,62	68,62
Fungicida	20,20	20,20
Herbicida	827,61	827,61
Total defensivos	916,43	916,43
Total insumos agrícolas	7457,93	7457,93
3. Tratos culturais	11984,26	11984,26
4. Máquinas		
Tratores + colhedoras	739,86	739,86
Implementos	219,48	219,48
Caminhões	1458,48	1458,48
Compressor	0,00	407,38
Total máquinas	2417,82	2825,20
Total da etapa agrícola	22493,95	22913,14
Etapa Industrial		
5. Insumos industriais		
CaO	8,83	10,49
Anti espumante	130,05	154,53
Dispersante	130,05	154,53

Ácido sulfúrico	101,13	120,17
Lubrificantes	88,16	104,75
Ciclohexano	664,50	789,60
Hidróxido de sódio	65,90	78,31
Total insumos industriais	1188,62	1412,38
6. Equipamentos		
Caldeiras	0,07	0,09
Trituradores e dispositivos de condução	0,04	0,05
Transportadoras	0,01	0,02
Destilaria	0,09	0,11
Tanques	0,05	0,06
Total equipamentos	0,26	0,31
7. Edificações		
Edifícios industriais	27,54	32,72
Escritórios	2,45	2,91
Laboratórios e oficinas de reparação	11,63	13,82
Armazém e pátios	15,30	18,18
Total edificações	56,92	67,63
Total da etapa industrial	1245,80	1480,32
Total	23739,7	24393,46

Tabela 14 – Resultados da CFP para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em kgCO₂eq/ha

Etapas	Tradicional kgCO₂eq/ha	Reciclagem de CO₂ kgCO₂eq/ha
Agrícola		
1. Mudanças	44,39	45,11
2. Insumos Agrícolas		
2.1. Fertilizantes		
Nitrogênio	427,84	427,84
Fósforo	33,26	33,26
Potássio	36,41	36,41
Calcário	11,68	11,68
Gesso	1,02	1,02
Total fertilizantes	510,21	510,21
2.2. Defensivos		
Inseticida	3,33	3,33
Fungicida	1,06	1,06
Herbicida	40,97	40,97
Total defensivos	45,36	45,36
Total insumos agrícolas	555,58	555,58
3. Tratos culturais	804,49	804,49
4. Máquinas		

Tratores + colhedoras	52,25	52,25
Implementos	15,50	15,50
Caminhões	103,00	103,00
Compressor	0,00	24,64
Total máquinas	170,75	195,39
Total da etapa agrícola	1575,21	1600,57
Indústria		
5. Insumos industriais		
CaO	0,53	0,63
Anti espumante	3,97	4,71
Dispersante	3,97	4,71
Ácido sulfúrico	5,89	7,00
Lubrificantes	1,16	1,38
Ciclohexano	20,03	23,80
Hidróxido de sódio	3,17	3,76
Total insumos industriais	38,71	45,99
6. Equipamentos		
Caldeiras	5,10	6,06
Trituradores e dispositivos de condução	2,76	3,28
Transportadoras	0,96	1,14
Destilaria	6,38	7,58
Tanques	3,27	3,89
Total equipamentos	18,47	21,94
7. Edificações		
Edifícios industriais	2,78	3,30
Escritórios	0,25	0,29
Laboratórios, oficinas de reparação	1,17	1,39
Armazém e pátios	1,54	1,83
Total edificações	5,74	6,82
Total da etapa industrial	62,91	74,75
8. Outras emissões		
Decomposição dos resíduos	333,13	395,84
Vinhaça	224,87	224,87
Torta de filtro	157,75	157,75
Cinzas da caldeira	0,10	0,10
Fuligem	9,36	9,36
Queima do bagaço	266,53	316,70
Nitrogênio (fertilizantes)	524,30	524,30
Total outras emissões	1516,04	1628,93
Total	3154,17	3304,25

O aumento na CED para o sistema com reciclagem é 653,7 MJ/ha e a emissão de GEE em 150 kgCO₂eq/ha, comparado ao sistema tradicional. Mesmo com essa diferença não há

uma variação significativa entre os diferentes parâmetros analisados para produção tradicional e com a reciclagem, como é possível ver na nas figuras 15 e 16, a seguir.

Figura 15 – CED dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em MJ/ha

Figura 16 – Emissões de GEE dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em kg de CO₂eq/ha

Em relação CFP, apesar de o parâmetro “outras emissões” apresentar uma quantidade de CO₂ emitido superior em 112,9 kg por hectare no sistema com a tecnologia de CCU comparada ao sistema tradicional, não há variações significativas quanto à participação em porcentagem, afinal a variação muda em apenas um por cento, conforme podemos ver na figura 17, a seguir, que apresenta a participação porcentual de cada componente relativo à quantidade de energia consumida e GEE emitido por hectare.

Figura 17 – Participação porcentual de cada componente nos resultados da ACV e CFP dos sistemas tradicional e com reciclagem de CO₂

O sistema com a reciclagem do CO₂ apresenta vantagens quando se analisa a quantidade de energia consumida e a emissão de GEE para cada MJ de bioenergia produzida. Isso ocorre devido ao sistema com o CCU possuir uma maior intensidade energética da terra, ou seja, produzir mais etanol e bioenergia por hectare. As tabelas 15 e 16, a seguir, apresentam os resultados da ACV e CFP considerando-se à energia total produzida. A bioenergia considerada neste estudo é o poder calorífico do etanol e a energia excedente produzida pela queima do bagaço.

Tabela 15 – Resultados da ACV para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em kJ/MJ

Etapa	Tradicional kJ/MJ	Reciclagem de CO₂ kJ/MJ
Etapa Agrícola		
1. Mudas	3,28	2,81
2. Insumos Agrícolas		
2.1. Fertilizantes		
Nitrogênio	26,07	21,94
Fósforo	3,22	2,71
Potássio	3,40	2,86
Calcário	1,01	0,85
Gesso	0,10	0,08
Total fertilizantes	33,80	28,44
2.2. Defensivos		
Inseticida	0,35	0,30
Fungicida	0,10	0,09
Herbicida	4,28	3,60
Total defensivos	4,73	3,98
Total insumos agrícolas	38,53	32,43
3. Tratos culturais	61,92	52,11
4. Máquinas		
Tratores + colhedoras	3,82	3,22
Implementos	1,13	0,95
Caminhões	7,54	6,34
Compressor	0,00	1,77
Total máquinas	12,49	12,28
Total da etapa agrícola	116,21	99,62
Etapa Industrial		
5. Insumos industriais		
CaO	0,05	0,05
Anti espumante	0,67	0,67
Dispersante	0,67	0,67
Ácido sulfúrico	0,52	0,52
Lubrificantes	0,46	0,46
Ciclohexano	3,43	3,43
Hidróxido de sódio	0,34	0,34
Total insumos industriais	6,14	6,14
6. Equipamentos		
Caldeiras	0,00	0,00
Trituradores e dispositivos de condução	0,00	0,00

Transportadoras	0,00	0,00
Destilaria	0,00	0,00
Tanques	0,00	0,00
Total equipamentos	0,00	0,00
7. Edificações		
Edifícios industriais	0,14	0,14
Escritórios	0,01	0,01
Laboratórios, oficinas de reparação	0,06	0,06
Armazém e pátios	0,08	0,08
Total edificações	0,29	0,29
Total da etapa industrial	6,44	6,44
Total	122,6	106,06

Tabela 16 – Resultados da CFP para os sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em gCO₂eq/MJ

Etapas	Tradicional gCO₂eq /MJ	Reciclagem de CO₂ gCO₂eq/MJ
Agrícola		
1. Mudanças	0,23	0,20
2. Insumos Agrícolas		
2.1. Fertilizantes		
Nitrogênio	2,21	1,86
Fósforo	0,17	0,14
Potássio	0,19	0,16
Calcário	0,06	0,05
Gesso	0,01	0,00
Total fertilizantes	2,64	2,22
2.2. Defensivos		
Inseticida	0,02	0,01
Fungicida	0,01	0,00
Herbicida	0,21	0,18
Total defensivos	0,23	0,20
Total insumos agrícolas	2,87	2,42
3. Tratos culturais	4,16	3,50
4. Máquinas		
Tratores + colhedoras	0,27	0,23
Implementos	0,08	0,07
Caminhões	0,53	0,45
Compressor	0,00	0,11
Total máquinas	0,88	0,85

Total da etapa agrícola	8,14	6,96
Indústria		
5. Insumos industriais		
CaO	0,00	0,00
Anti espumante	0,02	0,02
Dispersante	0,02	0,02
Ácido sulfúrico	0,03	0,03
Lubrificantes	0,01	0,01
Ciclohexano	0,10	0,10
Hidróxido de sódio	0,02	0,02
Total insumos industriais	0,20	0,20
6. Equipamentos		
Caldeiras	0,03	0,03
Trituradores e dispositivos de condução	0,01	0,01
Transportadoras	0,00	0,00
Destilaria	0,03	0,03
Tanques	0,02	0,02
Total equipamentos	0,10	0,10
7. Edificações		
Edifícios industriais	0,01	0,01
Escritórios	0,00	0,00
Laboratórios, oficinas de reparação	0,01	0,01
Armazém e pátios	0,01	0,01
Total edificações	0,03	0,03
Total da etapa industrial	0,33	0,33
8. Outras emissões		
Decomposição dos resíduos	1,72	1,72
Vinhaça	1,16	0,98
Torta de filtro	0,82	0,69
Cinzas da caldeira	0,00	0,00
Fuligem	0,05	0,04
Queima do bagaço	1,38	1,38
Nitrogênio (fertilizantes)	2,71	2,28
Total outras emissões	7,83	7,08
Total	16,30	14,37

Todos os parâmetros agrícolas apresentam menor impacto no ciclo de vida quando considerado a CED e a emissão de GEE por MJ de bioenergia. A exceção se aplica à bomba compressora, que não está contabilizada no primeiro cenário, mas que não altera nem mesmo a vantagem do sistema com a reciclagem para o parâmetro “maquinas agrícolas”. Como a

etapa agrícola tem forte peso nos impactos do ciclo de vida do etanol, o sistema com a reciclagem do CO₂ apresenta um melhor cenário que o tradicional em relação a esses impactos. As figuras 18 e 19, a seguir, ilustram os benefícios da reciclagem de CO₂ em relação à CED e emissão de GEE, respectivamente.

Figura 18 – CED dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em kJ/MJ de bioenergia

Figura 19 – Emissões de GEE dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂, em gCO₂eq/MJ de bioenergia

Quando analisada a energia consumida e os GEE emitidos por MJ de bioenergia, os equipamentos industriais não apresentam resultados significativos, tendo uma participação mínima com valores inferiores a 1 kJ e 1gCO₂eq por MJ produzido, portanto, não são apresentados nas figuras 18 e 19.

A tecnologia de CCU de reciclagem de CO₂ aumenta a CED em 2,7% e a emissão de GEE em 5% por hectare de área destinada a cana-de-açúcar comparada ao sistema tradicional. Porém, a tecnologia reduz em 13,5% a CED e 12% as emissões de GEE por MJ de bioenergia produzida para produtos energéticos da cana-de-açúcar. O que demonstra a vantagem da implantação da técnica sobre o ponto de vista energético e ambiental relativo a mudanças climáticas.

O balanço de carbono da tecnologia estudada apresenta um resultado positivo quanto aos benefícios do uso da reciclagem mesmo com um aumento de 174,4 kg de CO₂eq das emissões por hectare, pois a emissão evitada comparada ao sistema tradicional pelo uso da gasolina e da eletricidade excedente gerada é de 2420 e 824 kg de CO₂eq por hectare, respectivamente. Desta forma, a emissão de GEE evitada é de 22% para os produtos energéticos da cana-de-açúcar comparando o sistema com reciclagem ao tradicional. A figura 20, a seguir, apresenta o balanço de carbono da técnica comparada ao sistema tradicional.

Figura 20 – Emissões evitadas por hectare de cana-de-açúcar em substituição da gasolina e da eletricidade gerada por MDL nos sistemas tradicionais e com reciclagem de CO₂, em kgCO₂eq/ha

O balanço energético também é positivo para a técnica de CCU, apresentando um ganho de 35,78 GJ por hectare em produtos energéticos derivados da cana-de-açúcar em

relação ao sistema tradicional. A tabela 17, a seguir, apresenta os valores do balanço de energia, da relação de energia e do retorno do investimento de energia comparando o sistema tradicional de com de reciclagem de CO₂.

Tabela 17 – Resultados das relações de energia dos sistemas de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar tradicional e com reciclagem de CO₂

Relação	Tradicional	Reciclagem de CO ₂
Balanço de energia (GJ/ha)	169,82	205,60
Relação de energia	8,15	9,43
Retorno de investimento de energia	7,15	8,43

A figura 20 e tabela 17 configuram que tecnologia de reciclagem de CO₂ oriundo das biorrefinarias apresenta vantagens tanto no balanço de carbono quanto no balanço de energia em relação ao sistema tradicional de produção de cana-de-açúcar. As figuras 21 e 22, a seguir, apresentam o fluxo de emissões de GEE e de energia de modo mais claro para os cenários estudados tendo como fluxo referencial um hectare de cana-de-açúcar para fins energéticos.

Figura 21 – Fluxo de energia e emissões de GEE no ciclo da cana-de-açúcar sem a reciclagem do CO₂

Figura 22 – Fluxo de energia e emissões de GEE no ciclo da cana-de-açúcar com a reciclagem do CO₂

4.4 Análise de sensibilidade

Considerando que o incremento de biomassa pode não ser o esperado e que tenha uma faixa de variação conforme os parâmetros estatísticos para realização da figura 3, realizou-se uma análise de variação considerando a média, o primeiro e o terceiro quartil da análise para ACV e CFP desta tecnologia de CCU. Esses resultados podem ser observados nas figuras 23 e 24¹⁷, a seguir.

¹⁷ Os resultados obtidos na análise de sensibilidade constam no APÊNDICE B.

Figura 23 – Variação da quantidade de energia consumida em diferentes cenários de incremento de biomassa com o uso da tecnologia com a reciclagem do CO₂, em kJ/MJ

Figura 24 – Variação da quantidade de GEE emitido em diferentes cenários de incremento de biomassa com o uso da tecnologia com a reciclagem do CO₂, em kgCO₂eq/MJ

As variações entre os cenários de sensibilidade da reciclagem com menor e maior produtividade é de 11,5% para as entradas relativas a mudas, fertilizantes, defensivos, tratos culturais e máquinas agrícolas; não houve variação significativa quanto às edificações, insumos e equipamentos industriais, tanto para energia consumida quanto GEE emitido no ciclo de vida. As emissões de campo relativas à vinhaça, torta de filtro, cinzas das caldeiras e fuligem também obtiveram variações de 11,5%, quanto à queima de bagaço e a decomposição dos resíduos em 0%, fazendo com que a variação das emissões atribuídas a outras emissões

fosse de 6,7%. A variação final da emissão de GEE é de 8,9% e o consumo de energia em 10,9%.

Em todos os cenários de incremento de biomassa encontrados nos experimentos considerados neste estudo, quando realizada a ACV e CFP para cada cenário¹⁸, a relação de energia e o retorno de investimento de energia continuam acima do cenário tradicional, conforme demonstrado nas figuras 25 e 26¹⁹, a seguir.

Figura 25 – Relação de energia para os cenários de incremento de produtividade considerados no presente estudo

¹⁸ Todos os experimentos de incremento de biomassa analisados foram avaliados como condições para cada cenário. Cenário 1: Ziska e Bunce (1997), incremento em 6%. Cenário 2: experimento 1 de Vu e Allen Jr. (2009), incremento em 12%. Cenário 3: experimento 2 de Vu e Allen Jr. (2009), incremento em 20%. Cenário 4: experimento 3 Vu e Allen Jr. (2009), incremento em 26%. Cenário 5: de Souza et al. (2008), incremento em 34%. Cenário 6: Vu et al. (2006), incremento em 37%. Cenário 7: experimento 4 de Vu e Allen Jr. (2009), incremento em 41%.

¹⁹ Todos os resultados da ACV, CFP, balanço de carbono e relações de energia para os cenários de incremento de biomassa constam no APÊNDICE B.

Figura 26 – Retorno do investimento de energia para os cenários de incremento de produtividade considerados no presente estudo

O cenário 1 é aquele que apresenta menor incremento de biomassa e onde a CED e emissão de GEE são mais próximas ao sistema tradicional de produção. Nos gráficos das figuras 25 e 26 a progressão linear traçada demonstra como seriam a relação de energia e o retorno de investimento de energia caso o incremento fosse menor ou maior que os considerados nesta análise.

Assim como o balanço energético do cenário de menor incremento é muito próximo do tradicional, o balanço de carbono deste também apresenta uma pequena vantagem se comparado ao tradicional. A emissão líquida final considerando o incremento de cada experimento estudado pode ser observada na figura 27, a seguir.

Figura 27 – Emissão líquida dos cenários de incremento de biomassa comparados à produção tradicional de cana-de-açúcar, em kgCO₂eq/ha

Apesar da emissão líquida ainda ser positiva para o cenário 1, evitando que 714 kg de CO₂eq fossem emitidos por hectare em relação ao sistema tradicional, sua emissão pode ser considerada baixa frente ao cenário 7, de maior incremento de biomassa, que evita a emissão de GEE em 5030 kg de CO₂eq por hectare se comparada ao sistema tradicional.

5 DISCUSSÃO

5.1 Técnica

A técnica de CCU estudada apresenta ganhos energéticos consideráveis. Os benefícios considerados vão desde ganhos para cultura da cana-de-açúcar, que otimiza o uso da água e nutrientes, até benéficos para outras culturas, já que uma menor área é necessária para produção da mesma quantidade de energia o que requer menor área de cana plantada. As tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentaram parte dos benefícios da técnica da reciclagem do CO₂ oriundo das biorrefinarias, mas como demonstrado na análise de dispersão e na ACV e na CFP, os resultados dos ganhos de energia não correspondem diretamente ao incremento de produtividade dos artigos, uma vez que as relações dependem de uma série de fatores.

A área necessária para o cumprimento da meta do PDE 2021 é superior à estimada neste estudo, uma vez que a produtividade considerada na análise é relativamente alta comparada a muitos dos cenários de produção de cana-de-açúcar no Brasil. Os valores considerados ainda não apresentam as variações que podem ocorrer devido aos parâmetros ambientais e agrícolas de cada cenário. A contribuição desta análise é saber que se pode obter a mesma produção de bioenergia com até 26% menos área plantada de cana-de-açúcar com a técnica de CCU da reciclagem de CO₂ proposta.

Uma técnica de CCU que é diretamente relacionada à proposta nesta pesquisa é a que utiliza o CO₂ como insumo para tanques de produção de alga com objetivo de produção de etanol ou bioenergia. Souza (2015), realizou uma ACV que comparou a produção convencional de cana-de-açúcar com um sistema integrado de cana e alga, sua pesquisa demonstrou que há uma queda de 56 kJ e 3,5 gCO₂eq por MJ de combustível produzido no sistema integrado. Para saber qual técnica de CCU seria mais adequada ou a que apresentasse mais benefícios seria necessária uma análise do custo oportunidade de uso do carbono. Uma análise econômica da técnica de CCU da reciclagem do CO₂ das biorrefinarias poderia contribuir para saber sua real capacidade de mitigação das mudanças climáticas frente a outras técnicas.

Também é necessário frisar que a técnica de CCU para que tenha o incremento de biomassa considerado nos artigos deve ter uma adição de CO₂ em 300 ppm em sua atmosfera. A quantidade deste gás para um hectare segundo o modelo de dispersão de gases utilizado seria de 79,2 toneladas, essa quantidade de CO₂ é superior a produzida, portanto a própria

área não é autossuficiente para sua demanda. Neste caso, as áreas mais próximas da usina poderiam ter a técnica implantada, enquanto que as mais afastadas continuariam com sua produção convencional. O uso da técnica em áreas mais próximas também é mais adequado enquanto a questões operacionais e técnicas, uma vez que a dificuldade em transportar o CO₂ para áreas mais distantes é maior e implica em mais custos e equipamentos. Portanto, a otimização do gás deve ser sempre considerada.

5.2 Modelagem

O objetivo da modelagem da dispersão do CO₂ em campo é saber se é possível manter a concentração do CO₂ a 300 ppm acima da concentração normal deste gás no ambiente agrícola. A análise com os parâmetros e metodologia utilizada demonstrou que é possível manter essa concentração com uma emissão em 2,25 mg m⁻¹s⁻¹ de CO₂. Porém, a produção deste gás por hectare de área plantada no sistema tradicional e com reciclagem pode suprir apenas em 8 e 9% da demanda de CO₂ para um hectare, respectivamente. Este fato faz com as áreas plantadas não sejam autossuficientes em CO₂ segundo o modelo de dispersão utilizado.

O uso do CO₂ para áreas mais próximas pode ser positivo quanto a questões técnicas e operacionais, uma vez que quando a distância entre a usina e a área produtora é muito grande há um maior consumo de energia para o transporte do CO₂, o que pode acarretar em mudanças nos balanços de carbono e energia.

O modelo de dispersão utilizado não é o ideal para o gás CO₂ uma vez que ele possui densidade superior a do ar. Desta forma, o modelo pode não representar a dispersão real do CO₂ em campo, pois sua dispersão será menor. Portanto, uma menor quantidade de gás seria necessária para manter o ambiente sob as condições ideais para o incremento de produtividade. Este modelo cumpre sua função de demonstrar que o CO₂ pode ser usado como um insumo agrícola. As condições do uso desta técnica de CCU podem ser ainda melhores que os resultados encontrados nesta análise de dispersão quando utilizado um modelo mais significativo para o CO₂.

Outro fator superestimado neste modelo é relativo à velocidade do vento, pois no campo a cana-de-açúcar apresenta resistência ao vento, o que faz com que o CO₂ tenha uma dispersão ainda menor. Ou seja, uma menor quantidade de gás seria necessária para manter a concentração de CO₂ em 300 ppm por 150 dias do ciclo de crescimento da cana considerado mais importante para irrigação do gás.

Outro aspecto importante é que o modelo considerou 100 fontes pontuais de dispersão de CO₂. Cada fonte está a 10 metros de distância uma da outra, assim cada fonte irriga diretamente 100 metros quadrados. Uma adaptação do sistema de irrigação por gotejamento convencional da cana-de-açúcar poderia ser utilizada, desta forma haveriam mais fontes pontuais de CO₂ e uma menor emissão por fonte para manter a mesma área irrigada com o gás com a mesma quantidade deste.

5.3 Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Produtos

Os benefícios da reciclagem do CO₂ como insumo agrícola quanto ao balanço de energia e carbono foram confirmados pela ACV e CFP. O fluxo de referência utilizado foi o hectare de cana-de-açúcar destinado à produção de bioenergia. Nesta análise de fluxo, a técnica de reciclagem promove um aumento na quantidade de energia consumida e emissão de GEE, como era esperado, uma vez que mais insumos são utilizados e a maior produção de cana gera como consequência uma maior emissão devido aos resíduos e a queima do bagaço. Porém, quando considerado as emissões evitadas, o fluxo de referência apresenta os benefícios da reciclagem quanto aos balanços de carbono e energia.

A diminuição em 13,5% da CED e 12% das emissões de GEE por MJ de produtos bioenergéticos da cana-de-açúcar para reciclagem do CO₂ com um incremento de biomassa em 18,8% demonstra que a técnica é vantajosa para mitigação das mudanças climáticas. Quanto ao incremento considerado, é importante lembrar que a média dos incrementos pesquisados foi de 25,1% para cana-de-açúcar quando em ambientes com 300 ppm acima do nível ambiental, mas deve ser considerado que apenas o período de crescimento dos colmos usa a irrigação com CO₂, portando o incremento projetado é de 18,8%.

Pesquisas recentes de ACV realizadas para cana-de-açúcar não estão considerando equipamentos e edificações industriais no ciclo de vida dos produtos devido sua baixa participação. Este trabalho considerou estas entradas com objetivo de averiguar se a contabilização da bomba compressora poderia apresentar alguma mudança significativa na análise. Os resultados confirmaram que os equipamentos e edificações apresentam uma participação muito pequena, mesmo com a bomba compressora. Juntos essas entradas contabilizam 1,9 e 1,6% da energia e das emissões de GEE por cada MJ de bioenergia.

Outro fator importante a ser considerado e não contabilizado no ciclo de vida deste estudo é relativo à energia necessária para irrigação do CO₂ em campo. Para aferir com precisão a quantidade de energia que seria consumida pela bomba compressora, o mais

indicado seria uma análise em campo, pois para realização de um modelo do uso de energia da bomba compressora seriam necessários cálculos de pressão, vazão e consumo de equipamentos específicos, ainda assim, o modelo poderia não representar a realidade, uma vez que esta técnica ainda não foi realizada em campo aberto para cultura.

As entradas relativas a tratamentos culturais são parte importante dos impactos energéticos e de emissão de CO₂ equivalente nesta análise. Essas entradas podem ser ainda maiores considerando que a contabilização destes dados é relativa a padrões médios e não específicos para cada cenário.

A etapa mais importante do ponto de vista dos impactos ambientais é a agrícola, que é responsável por 94,7 e 93,9% da demanda de energia para produção tradicional e com reciclagem de CO₂, respectivamente. Considerando que as emissões da decomposição dos resíduos deixados em campo e as emissões do solo estão dentro da etapa agrícola, ela é responsável por 89,5 e 88,1% das emissões de GEE, para o cenário tradicional e com reciclagem. Portanto, usar as melhores tecnologias e técnicas no campo deve ser prioridade para mitigação das mudanças climáticas e para economia dos recursos energéticos.

Outro fator importante é quanto à unidade funcional usada. O uso da unidade funcional como MJ de bioenergia produzida representa melhor os benefícios da técnica utilizada. Essa unidade funcional ainda permite que diferentes tecnologias de geração de energia possam ser comparadas de forma mais próxima quanto aos seus impactos na CED e emissão de GEE. Entre as ACVs analisadas por Cuéllar-Franca e Azapagic (2014), as referentes à CCS tinham como unidade funcional um MWh, e das que estudavam CCU, nove delas usavam unidades funcionais referentes a energia produzida.

Essa proposta de CCU pode melhorar o balanço de energia sem com isso prejudicar o balanço de GEE. Beeharry (2001), propôs que quanto maior o ganho energético, maior será a emissão devido a combustão dos produtos derivados da cana-de-açúcar. Entretanto, neste estudo, não houve prejuízo do balanço de carbono em detrimento da melhora do balanço energético.

5.4 Implicações

As usinas de cana-de-açúcar não funcionam em sua plena capacidade, mas considerando sua capacidade total, uma usina poderia irrigar com CO₂ 3545 hectares, o que poderia gerar com a técnica de CCU com incremento médio de biomassa cerca de 127 TJ de bioenergia a mais que o sistema tradicional.

Apesar de uma mesma área não ser autossuficiente, segundo o modelo de dispersão quanto à produção de CO₂, a técnica de CCU pode ser usada como uma forma de aumentar a eficiência do solo e gerar mais bioenergia. Fontes externas de CO₂ também poderiam auxiliar a completar o fornecimento deste gás para etapa agrícola da cana-de-açúcar. Caso haja usinas termoeletricas no entorno das plantações de cana-de-açúcar e o CO₂ produzido em suas operações não seja usado em outros processos ou armazenado, esse gás poderia ser destinado aos campos agrícolas e gerar o aumento de produtividade deste. No entanto, um novo estudo deve ser feito para saber quais os benefícios da técnica neste cenário.

A técnica de CCU pode promover benefícios quanto ao balanço de carbono e de energia, mas outros estudos devem ser realizados para o aprimoramento da técnica, como uso deste CO₂ em outros sistemas de bioenergia, como os de sorgo ou alga.

6 LIMITAÇÕES E INCERTEZAS

Os cenários considerados neste estudo são relativos a experimentos em condições controladas de parâmetros ambientais. Para se saber a real contribuição desta técnica de CCU no incremento de biomassa da cana-de-açúcar seria necessário um experimento em campo.

O modelo de dispersão de gás utilizado leva em consideração parâmetros ambientais que podem mudar de região para região, não sendo representativo para todo Brasil, mas sim para cidades nas quais os dados meteorológicos puderam ser aferidos.

Dentro das faixas dos cenários considerados de incremento de biomassa, há uma variação de incremento entre o 1º quartil e o 3º de 19,5%, o que gera uma variação da emissão de GEE de 8,9% e CED em 10,9%. Esses números indicam que o incremento real ocorrido no campo, considerando que o CO₂ é usado no período de crescimentos dos colmos, varia entre 12 e 26,6%, e para cada MJ de energia produzida, a emissão de GEE pode variar entre 13,7 e 15,3 gCO₂ e a CED entre 99,9 e 112,1 kJ.

Neste cenário, o balanço de energia varia entre 192 e 220,6 GJ por hectare, o que corresponde a um aumento de energia produzida em relação ao sistema tradicional entre 13 e 19%.

A relação de energia varia entre 8,9 e 10 e o retorno de investimento de energia entre 7,9 e 9. Quanto ao balanço de carbono, as emissões líquidas evitadas variam entre 15,7 e 18,1 tCO₂ por hectare.

Mesmo no cenário no qual o incremento de produtividade da cana-de-açúcar é mais baixo, que é 6%, há diminuição da energia consumida e de GEE emitido em 2,93 kJ e 0,43 gCO₂ para cada MJ de bioenergia produzida.

Apesar de não ser considerado o uso do CO₂ em campo nas etapas iniciais do crescimento da cana-de-açúcar, este uso pode ser muito importante, tanto para o melhora do incremento de produtividade quanto para eficiência da fotossíntese e de uso da água e de nutrientes.

7 CONCLUSÕES

A modalidade de CCU que utiliza o CO₂ como fertilizante pode ser usada sobre o ponto de vista biológico e técnico.

O CO₂ proveniente de um hectare de cana-de-açúcar é suficiente para suprir 10% da sua demanda para a fase de crescimento dos colmos.

A técnica de CCU que utiliza o CO₂ oriundo das biorrefinarias de cana-de-açúcar apresenta benefícios quanto aos balanços de carbono e energia, mesmo nos piores cenários considerados.

Esta nova técnica de uso de carbono do ponto de vista teórico pode ser aplicada em campo e implica em um aumento entre 13 e 19% do balanço de energia para a cana-de-açúcar, consequentemente, uma menor quantidade de terra será necessária para atingir as metas energéticas estipuladas.

O uso do CO₂ em todo ciclo de vida da cana-de-açúcar no campo pode obter resultados ainda mais positivos para o balanço de energia e carbono.

8 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Realizar um experimento em campo para aferir o ganho de produtividade da cana-de-açúcar sobre diferentes concentrações incrementais de CO₂ em sua atmosfera utilizando o modelo de CCU proposto. Este experimento poderia demonstrar o potencial real da técnica em campo comparado ao seu potencial teórico e aferir o potencial dessa como CCU.

Realizar uma ACV que compara diferentes cenários de uso do CO₂ oriundo das biorrefinarias de cana-de-açúcar como insumo agrícola para produção de combustível através de outras culturas, como sorgo e alga. Esta análise permitiria avaliar o potencial desta técnica de CCU para diferentes sistemas de bioenergia.

Realizar uma análise econômica dessa técnica de CCU para diagnosticar seu potencial de mitigação das mudanças climáticas em comparação a outras técnicas de CCU.

Realizar uma análise de custo de oportunidade do CO₂ dessa técnica para avaliar se o seu uso na forma de insumo agrícola é o mais indicado no cenário brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ABNT ISO 14040: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**, 2009.
- ABNT ISO 14044: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**, 2009.
- AINSWORTH E. A.; LONG S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy. **New Phytol**, v. 165, 2005.
- AINSWORTH, E. A., LEAKEY, A. D. B., ORT, D. R., LONG, S. P. FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. **New Phytologist**, v. 179, 2008. Disponível em: <doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02500.x>
- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 99, 2003.
- ALI, A. Factors affecting on response of broad bean and corn to air quality and soil CO₂ flux rates in Egypt. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 195, 2008.
- ALLEN JR. L.H.; KAKANI, V.G.; VU, J.C.V.; BOOTE, K.J. Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. **Journal of Plant Physiology**, v.168, 2011.
- AMTHOR, J.S.; MITCHELL, R.J.; RUNION, G.B.; ROGERS, H.H.; PRIOR, S.A.; WOOD, C.W. Energy content, construction cost and phytomass accumulation of Glycine max (L.) Merr. and Sorghum bicolor (L.) Moench grown in elevated CO₂ in the field. **New Phytologist**, v.128, 1994.
- ARCE, G. L. A. F.; NETO, T. G.S.; ÁVILA, I.; FACIO, V. O.; LUNA, C. M. R.; CARVALHO JR., J. A. **Processos de carbonatação mineral de CO₂: caracterização físico-química de matérias primas brasileiras**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.
- ASSEN, N. V. D.; JUNG, J.; BARDOW, A. Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls. **Energy Environ. Sci.**, v. 6, 2013. doi: 10.1039/c3ee41151f
- AUDE, M. I. S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Cienc. Rural** [online], v.23, 1993.
- AZAR, C. et al. The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). **Climatic Change**, v.100, mai. 2010.

BÄCKSTRAND, K.; MEADOWCROFT, J.; OPPENHEIMER, M. The politics and policy of carbon capture and storage: Framing an emergent technology. **Global Environmental Change**, v. 21, n. 2, mai. 2011.

BATJES, N.H.; SOMBROEK, W.G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. **Global Change Biology**, v. 3, 1997.

BEEHARRY, R. P. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, v.20, 2001.

BEZERRA, F. C. **Produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido**. / Fred Carvalho Bezerra. - Fortaleza : Embrapa Agroindústria Tropical, 2003. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 72).

BIELLO, D. Blacklist proposed for fossil fuels. **Nature**, jan. 2015. Disponível em: <doi : 10.1038 / nature.2015.16695>

BOCIN-DUMITRIU, A.; PEREZ FORTES, M. D. M.; TZIMAS, E.; SVEEN, T. **Carbon Capture and Utilisation Workshop**: Background and proceedings. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2013. Disponível em: <doi: 10.2790/12012 (print).10.2790/11560 (online)>

BRINGEZU, S. Carbon Recycling for Renewable Materials and Energy Supply. **Journal of Industrial Ecology**, v.18, 2014.

BURIOL, G. A.; STRECK, N. A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F. M. Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Cienc. Rural** [online], v.25, 1995.

BURKART, S.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H.-J. Canopy CO₂ exchange of sugar beet under different CO₂ concentrations and nitrogen supply: results from a free-air CO₂ enrichment study. **Plant Biology**, v. 11, 2009.

CAMPBELL, J. E.; LOBELL, D. B.; GENOVA, R. C.; FIELD, C. B. The Global Potential of Bioenergy on Abandoned agriculture Lands. **Environment Science & Technology**, v. 42, 2008.

CARBO, M.C.; SMIT, R.; DRIFT, B. V. D.; JANSEN, D. Bio Energy with CCS (BECCS): Large potential for BioSNG at low CO₂ avoidance cost. **Energy Procedia**, v. 4, 2011.

CARVALHO, V. C. H. A.; GOMES, M. S. P. **Evaluation of the installation of a biofuel producing algae farm in an ethanol plant**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

CHAKRAVORTY, U.; HUBERT, M. H.; NØSTBAKKEN, L. Fuel versus Food. **Annual Review of Resource Economics**, v. 1, 2009.

CHAUDHURI, U.N.; BURNETT, R.B.; KIRKHAN, M.B.; KANEMASU, E.T.. Effect of carbon dioxide on sorghum yield, root growth, and water use. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 37, 1986.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. **Bioresource Technology**, v. 102, 2011.

CHUM, H. L.; WARNER, E.; SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. A Comparison of Commercial Ethanol Production Systems from Brazilian Sugarcane and US Corn. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, mar. 2014.

CO2 SCIENCE; **Percent Dry Weight (Biomass) Increases for 300, 600 and 900 ppm Increases in the Air's CO2 Concentration. Saccharum officinarum L. [Sugarcane]**. Disponível em: <http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/s/saccharumo.php>. Acesso em: 20 mar. de 2014a.

CO2 SCIENCE; **Percent Dry Weight (Biomass) Increases for 300, 600 and 900 ppm Increases in the Air's CO2 Concentration. Sorghum bicolor (L.) Moench [Sorghum]**. Disponível em: <http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/s/sorghumb.php>. Acesso em: 10 jul. de 2014b.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 2 – Safra 2015/16, n. 2 - Segundo Levantamento, Brasília, 2015.

CTBE. **CanaSoft**. v. 9 ee 15, 2012.

CUÉLLAR-FRANCA, R. M.; AZAPAGIC, A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, **Journal of CO2 Utilization**, v. 9, 2015.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga (UNESP Botucatu)**, v. 13, p. 1-11, 2008.

DE SOUZA, A. P. **Mecanismos fotossintéticos e relação fonte-dreno em cana-de-açúcar cultivada em atmosfera enriquecida com CO2**. (Tese) Universidade de São Paulo, 2011.

DE SOUZA, A.P.; GASPAR, M.; DA SILVA, E. A.; WACLAWOVSKY, A. J.; ULIAN, E. C. ; NISHIYAMA JR., M. Y.; DOS SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell and Environment** (Print), v. 31, p. 1116-1127, 2008.

DELUCIA, E. H. et al. Net Primary Production of a Forest Ecosystem with Experimental CO₂ Enrichment. **Science**, v. 284, 1999.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROCHA, G. J. M.; PRADELLA, J. G. C.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI A. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? **Bioresource Technology**, v. 102, n. 19, p. 8964–8971, 2011.

DRAKE, B. G.; GONZÁLEZ-MELER, M. A.; LONG, S. P. More efficient plants: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, 1997.

DURÃES, O. M.; MAY, A.; PARRELLA, R. A. da C. **Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público-privada: oportunidades, perspectivas e desafios**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

ECOINVENT. Ecoinvent centre. **Database**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2012.

EDENHOFER, O. et al. The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs. **The Energy Journal**, v. 31 (Special Issue 1). The Economics of Low Stabilization. 2010.

EMBRAPA. **Clima favorável à produção de cana-de-açúcar**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/clima_para_cana_000fhc5hpr702wyiv80efhb2aul9pfw4.pdf>. Acesso em: 30 ago. de 2015.

EPA. **Carbon Pollution Emission Guidelines for Existing Stationary Sources: Electric Utility Generating Units. Proposed Rule**. Jul. 2014. Disponível em: <<https://www.federalregister.gov/articles/2014/06/18/2014-13726/carbon-pollution-emission-guidelines-for-existing-stationary-sources-electric-utility-generating>>. Acesso em: 10 Jan. de 2015.

EPA. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency, Fev. de 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/renewablefuels/420r10006.pdf>>. Acesso em: 20 mar. de 2014.

EPA. **Standards for the Renewable Fuel Standard Program; Proposed Rule**. Nov. 2013. Disponível em: <<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2013-11-29/pdf/2013-28155.pdf>>. Acesso em: 20 mar. de 2014.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FANKA, L S.; MOREIRA, J. B.; TERRA A. L. M.; CORÁ, J. DUARTE, J. H. MORAIS, E. G.; COSTA, J. A. V.; MORAIS, M. G. **Utilização de CO2 como fonte de carbono nos cultivos semicontínuo e em batelada de chlorella**. In: III Congresso Brasileiro de CO2 na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

FAPESP. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho** / tradução, Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: FAPESP, Amsterdam: Inter Academy Council, Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2010.

FARGIONE, J.; HILL, J. D.; POLASKY, T. S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and biofuel carbon debt. **Science**, v. 319. 2008.

FISCHER, R. A.; BYERLEE, D.; EDMEADES, G. O. **Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?**. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research. 2014. Disponível em: <<http://aciagov.au/publication/mn158>> Acesso em: 20 dez. de 2014.

FOLEY, J. A. et al. Global Consequences of Land Use. **Science**. v.309, jul. 2005.

FUNES, R. H.; PACCA, S. A. **O potencial do uso do CO₂ oriundo de biorrefinarias como fertilizante em culturas energéticas**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

FURBANK, R. T.; HATCH, M. D. Mechanism of C₄ photosynthesis — the size and composition of the inorganic carbon pool in bundle sheath cells. **Plant Physiology**. v. 85, no.4, p. 958-964. 1987. doi: <http://dx.doi.org/10.1104/pp.85.4.958>

FURTADO, A. T.; SCANDIFFIO, M. I. G.; CORTEZ, L. A. B. The Brazilian sugarcane innovation system, **Energy Policy**, v. 39, 2011.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GHANNOUM, O.; CAEMMERER, S. V.; ZISKA, L. H.; CONROY, J. P. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell & Environment**, v. 23, 2000. Disponível em: <doi: 10.1046/j.1365-3040.2000.00609.x>.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. **Ecologia Industrial. Conceitos, Ferramentas e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

GIESEN, V. D.; KLEIJN, R.; KRAMER, G. J. Energy and Climate Impacts of Producing Synthetic Hydrocarbon Fuels from CO₂. **Environ. Sci. Technol.** 2014.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Large Scale CCS Projects**, 2015. 2016. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>>. Acesso em: 07 jan.de 2016.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **The Global Status of CCS: 2014**. Melbourne, Australia. 2014.

GOUGH, C.; UPHAM, P. **Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS): a review**. The Tyndall Centre, University of Manchester, Manchester Institute of Innovation Research. Tyndall Working Paper 147, dez. 2010.

GUERRA, A.; BARBOSA, A. M.; GUIDORIZI, K. A.; SOUZA, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. **Agrarian** (Dourados. Online), v. 7, p. 211-217, 2014.

GUIMARÃES, A. C. R. **Caracterização de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) submetidas a déficit hídrico**. (Dissertação) Universidade de São Paulo. 2011.

HIRA, A. Sugar rush: Prospects for a global ethanol market. **Energy Policy**, v. 39, 2011.

IEA. **Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System**, OCED/IEA, França. 2012.

IEA.. **Prospects for CO₂ Capture and Storage**. OCED/IEA, França. 2004.

INGRAM, J.S.I.; FERNANDES, E.C.M. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.87, out. 2001.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>>. Acesso em: 13 mai.de 2015.

IPCC. **Climate Change 2007**: Synthesis Report. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf>. Acesso em: 14 nov. de 2012.

IPCC. **Climate Change 2007**: Working Group I: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006.

IPCC. **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. 2011. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp. Disponível em: <http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf>. Acesso em: 18 mar. de 2014.

IPCC. **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. 2005. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf>. Acesso em: 1 abr. de 2013.

IPCC. **Summary for Policymakers**, In: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014.

IPEA. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República: Brasília, 2011.

ISHII, A.; LANGHELLE, O. Toward policy integration: Assessing carbon capture and storage policies in Japan and Norway. **Global Environmental Change**, v. 21, 2011. Acesso em: 22 mai.de 2013. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378011000276>>

ISO, "ISO/TS 14044: Environmental management — **Life cycle assessment — Requirements and guidelines**, 2006.

ISO, "ISO/TS 14067: **Carbon Footprint of Products – Requirements and Guidelines for Quantification and Communication**, 2013.

KIM, Y.; WORRELL, E. International comparison of CO₂ emissions trends in the iron and steel industry. **Energy Policy**, v. 30, 2002.

KNOOPE, M. M. J.; RAMÍREZ, A.; FAAIJ, A.P.C. A state-of-the-art review of techno-economic models predicting the costs of CO₂ pipeline transport. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 16, ago. 2013.

LADEAU, S. L.; CLARK, J. S. Rising CO₂ Levels and the Fecundity of Forest Trees. **Science**, v. 292, out. 2001.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v.304, 2004.

LAL, R.; CERRI, C. C. ; BERNOUX, M. ; ETCHEVES, J. D. ; CERRI, C. E. P. **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: The Haworth Press, 2006. v. 1. 586 p.

LAL,R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, 2005.

LAMB, A. et al. The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. **Nature Climate Change**, 2016. Disponível em: <doi:10.1038/nclimate2910>.

LEAKEY, A. D. B. Rising atmosphere carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. **Proceeding of the Society Biology Sciences**, v. 276, p 2333-2343. 2009. Disponível em: <doi: 10.1098/rspb.2008.1517>.

LEUZINGER, S.; HÄTTENSCHWILER, S. Beyond global change: lessons from 25 years of CO₂ research. **Oecologia**, v. 171, 2013.

LIGERO, E. L.; SCHIOZER D. J. **Recuperação de óleo leve sob injeção contínua de co2 e wag-co2 miscíveis em reservatórios heterogêneos**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

LIMA B. C. S; ARAÚJO, O. Q. F.; MEDEIROS, J. L.; MORGADO, C. R. V. **Technical, economic and environmental viability of offshore co2 reuse from natural gas by dry reforming**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

LIMA, G. M. DE; PINTO, P. C. DE C.; MOREIRA, C. DE A. **Carbonatação mineral de resíduos de gesso**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

LOHREY, C.; KOCHERGIN, V. Biodiesel production from microalgae: Co-location with sugar mills. **Bioresource Technology**, v.108, mar. 2012.

LOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v.11, jan. 2007.

- MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V., SILVA, J. E. A. R. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção de etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2004.
- MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, jul. 2008.
- MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E. A. Climate and Land Use: Forgive Us Our Carbon Debts. **Nature Climate Change**, v.4, jun. 2014.
- MACEDO, W. N.; PINHO, J. T. **ASES: programa para análise de sistemas eólicos e solares fotovoltaicos**. In: Encontro de energia no meio rural, Campinas, 2002. Proceedings online. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100022&lng=en&nrm=abn>. Acessado em 03 out. 2015.
- MANAHAN. S. E. Industrial Ecology. **Environmental Chemeistry and Hazardous Waste**. USA: Lewis Publishers, 1999.
- MANDERSCHIED, R.; ERBS, M.; WEIGEL, H.-J. Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. **European Journal of Agronomy**, v. 52, 2014.
- MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012 (Série Documentos, 168).
- MARC, J.; GIFFORD, R. M. Floral initiation in wheat, sunflower, and sorghum under carbon dioxide enrichment. **Canadian Journal of Botany**, v. 62, 1984.
- MARKUSSON, N.; ISHII, A.; STEPHENS, J. C. The social and political complexities of learning in carbon capture and storage demonstration projects. **Global Environmental Change**, v. 21, n. 2, mai. 2011.
- MAY, A. et al. **Sistema Embrapa de Produção Agroindustrial de Sorgo Sacarino para Bioetanol Sistema BRS1G – Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2012.
- MAY, A.; SILVA, D. D.; SANTOS, F. C. **Cultivo do Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia Elétrica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2013.
- MCGLADE, C.; EKINS. P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. **Nature**, v. 517, jan. 2015.
- MELLO, F. ; CERRI, C.E.P. ; DAVIES, C. ; HOLBROOK, N.M. ; PAUSTIAN, K.; MAIA, S.M.F. ; GALDOS, M. V. ; BERNOUX, M. ; CERRI, C. C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v. 4, 2014.
- MENDIETA P. C.; ARAUJO O. Q. F.; MEDEIROS J. L.; CHALOUB R. M. **Biofixação de CO₂ com microalga marinhaisochrysis galbana sob estresse nutricional**. In: III

Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

MINISTÉRIO CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Fatores de emissão de CO₂ da margem de operação pelo método simples ajustado**. 2015. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/363726.html>>. Acesso em: 19 mai.de 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano decenal de expansão de energia 2021**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2012.

MIT. **Carbon Capture and Sequestration Project Database**. Banco de dados MIT. Disponível em: <<http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index.html>>. Acesso em: 08 Dez de 2015.

MOHEE, R.; BEEHARRY, R. P. Life cycle analysis of compost incorporated sugarcane bioenergy systems in Mauritius. **Biomass and Bioenergy**, v.17, jul. 1999.

MÖLLERSTEN, K.; YAN, J.; MOREIRA, J. R. Potential market niches for biomass energy with CO₂ capture and storage — Opportunities for energy supply with negative CO₂ emissions. **Biomass and Bioenergy**, v.25, set 2003.

MORISON, J.I.L.; GIFFORD, R.M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. II. Plant dry weight, partitioning and water use efficiency. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 11, 1984.

MYHRE, G. D., SHINDELL, F.M. BRÉON, W., COLLINS, J., FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, et al. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

NATIONAL CENTER FOR ECOLOGICAL ANALYSIS AND SYNTHESIS. **New framework published to improve model predictions of transpiration responses to elevated carbon dioxide**. 2015. Disponível em: <<https://www.nceas.ucsb.edu/news/new-framework-model-predictions-transpiration-responses-elevated-carbon-dioxide>>. Acesso em: 10 ago. de 2015.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (U.S.). **Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada**. US DOE, Pittsburgh, PA. 2010.

NAZAROFF, W. W.; ALVAREZ-COHEN, L. **Environmental engineering Science**. Wiley: New York, 2001.

NORBY, R. J.; ZAK, D. R. Ecological Lessons from Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) Experiments. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**. v. 42, dez. 2011.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Temperature Response and Adjustment in Trees: Physiological and Ecological Basis for Forest Responses to a Warmer Climate**. Disponível em: <<http://warming.ornl.gov/PER-2.html>>. Acesso em: 27 ago. de 2015.

OTTMAN, M.J.; KIMBALL, B.A.; PINTER JR., P.J.; WALL, G.W.; VANDERLIP, R.L.; LEAVITT, S.W.; LAMORTE, R.L.; MATTHIAS, A.D.; BROOKS, T.J. Elevated CO₂ increases sorghum biomass under drought conditions. **New Phytologist**, v. 150, 2001.

PACCA, S.; MOREIRA, J. R. A. Biorefinery for Mobility? **Environmental Science & Technology**, v. 45, 2011.

PACCA, S.; MOREIRA, J. R. **Bioenergia, sustentabilidade, meio-ambiente e avaliação do ciclo de vida**. In: ARISTONE, F.. (Org.). Perspectivas para a bioenergia no Mato Grosso do Sul. 1ed. Campo Grande, MS: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2013, p. 87-118.

PACCA, S.; MOREIRA, J. R. Historical carbon budget of the brazilian ethanol program. **Energy Policy**, v. 37, 2009.

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v. 14, 2004.

PAUL, M. J.; PELLNY T. K. Carbon metabolite feedback regulation of the leaf photosynthesis and development. **Journal of experimental botanic**, v. 54, 2003.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola** (USP. Impresso), v. 59, n.2, p. 211-216, 2002.

PLANT AND CELL PHYSIOLOGY. Special Focus Issue Plant Response to CO₂. **Plant Cell Physiol**, v. 55, 2014.

PRASAD, P.V. V.; BOOTE, K.J.; ALLEN JR., L.H. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, 2006.

PRASAD, P. V. V.; VU, J. C. V.; BOOTE, K. J.; ALLEN JR., L. H. Enhancement in leaf photosynthesis and upregulation of Rubisco in the C₄ sorghum plant at elevated growth carbon dioxide and temperature occur at early stages of leaf ontogeny. **Functional Plant Biology**, v. 36, 2009.

PRIOR, S. A.; RUNION, G. B.; ROGERS, H. H.; TORBERT, H. A.; REEVES, D. W. Elevated atmospheric CO₂ effects on biomass production and soil carbon in conventional and conservation cropping systems. **Global Change Biology**, v. 11, 2005.

REZENDE, F. C. ; FRIZZONE, J. A. ; OLIVEIRA, R. F. ; PEREIRA, A. S. Interaction of CO₂ and irrigation on the yield and water use of the bell pepper. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 1, p. 7-12, 2003.

RODRIGUES, M. T.; ZONETTI, P. C.; ALVES, O. C.; BORGES, L. E. P.; APPEL, L. G. **Óxidos mistos a base de ni, mg e al e a reação de rwgs**. In: III Congresso Brasileiro de CO₂ na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2015.

ROMÁN, M. Carbon capture and storage in developing countries: A comparison of Brazil, South Africa and India. **Global Environmental Change**, v.21, mai. 2011.

ROMEIRO-CONTURBIA, V. R. S. **Carbon capture and storage legal and regulatory framework in developing countries: proposals for Brazil**. (Tese) Universidade de São Paulo, 2014.

ROVERE, E. L. L.; PEREIRA, A. S.; SIMÕES, A. F. Biofuels and Sustainable Energy Development in Brazil. **World Development**, v. 39, 2011.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P. ; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; PEREIRA JR, A. O.; CUNHA, S. H. F. **Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Brasileira, 2008.

SCHMIDHUBER, J.; TUBIELLO, N. F. Global food security under climate change. **PNAS**, v. 104, 2007. Disponível em:<www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0701976104 Sch>. Acesso em: 15 mai. de 2013

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico econômicas de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. (Tese) Universidade de Campinas. 2008.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E.; SARTO, C. A. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 5, p. 519-532, 2011.

SEARCHINGER, T. D.; HAMBURG, S. P.; MELILLO, J.; CHAMEIDES, W.; HAVLIK, P.; KAMMEN, D. M.; LIKENS, G. E.; et al. Fixing a critical climate accounting error. **Science**, v.326, out. 2009.

SEEG. **Documento síntese** [recurso eletrônico] : análise das emissões de GEE no Brasil (1970-2013) e suas implicações para políticas públicas / Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI) ... [et al.]. – São Paulo : Observatório do Clima, 2015. 52 p.

SEEG. **Emissões por setor**. Observatório do Clima, 2014. Disponível em: <<http://seeg.observatoriodoclima.eco.br/index.php/page/17-Emiss%25C3%25B5es-por-setor>>. Acesso em: 10 mar.de 2014.

SILVA S. L.; LANDAU, L.; PIMENTEL, L. C. G. Modelagem do Transporte de SO₂ Gerado em Plataformas de Produção da Bacia de Campos RJ no Período de Inverno Através do Modelo OCD. **Anuário do Instituto de Geociências** (Rio de Janeiro), v. 29 - 2, p. 13-29, 2006.

SILVA, D. A. L.; DELAI, I.; MONTES, M. L. D.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, ab. 2014.

SILVA, J. B. L.; FERREIRA, P. A.; PEREIRA, E. G.; COSTA, L. C.; MIRANDA, G. V. Development of experimental structure and influence of high CO₂ concentration in maize crop. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 32, p. 306-314, 2012.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. B.; CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Rev. Bras. Geof.** [online], v. 26, n.1, p. 31-44, 2008.

SOUZA, S. P. **Avaliação de aspectos econômicos e ambientais da produção integrada de etanol e biodiesel.** (Tese) Universidade Campinas. 2015.

SOUZA, S. P.; ÁVILA, M. T. DE; PACCA, S. Life cycle assessment of sugarcane ethanol and palm oil biodiesel joint production. **Biomass and Bioenergy**, v.44, set. 2012. Disponível em: <doi:10.1016/j.biombioe.2012.04.018>.

SOUZA, S. P.; SEABRA, J. E.A. Integrated production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implications of fossil diesel displacement. **Energy Conversion and Management**, v. 87, 2014.

STYRING, P.; JANSEN, D. **Carbon Capture and Utilisation in the green economy:** Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials. Publisher: The Centre for Low Carbon Futures. Report no. 501. 2011.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** (Tese) Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil** : banco de dados solarimétricos.- Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em: 13 set. de 2014.

TORBERT, H.A.; PRIOR, S.A.; ROGERS, H.H.; RUNION, G.B. Elevated atmospheric CO₂ effects on N fertilization in grain sorghum and soybean. **Field Crops Research**, v. 88, 2004.

TRIANA, C. A. R. Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches. **Energy Policy**, v. 39, ago. 2011. Disponível em: <doi: 10.1016 / j.enpol.2011.05.001>

USDA **Agricultural Projections to 2016.** Office of the Chief Economist, World Agricultural Outlook Board, U.S. Department of Agriculture. Prepared by the Interagency Agricultural Projections Committee. Long-term Projections Report OCE-2007-1, 110 pp.

VERGRAGT, P. J.; MARKUSSON, N.; KARLSSON. H. Carbon capture and storage, bio-energy with carbon capture and storage, and the escape from the fossil-fuel lock-in. **Global Environmental Change**, v. 21, n. 2, mai. 2011.

VU, J. C. V.; ALLEN JR., L. H.; GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO₂. **Plant Science**. v. 171, mar. 2006.

VU, J.C.V.; ALLEN JR., L.H. Stem juice production of the C₄ sugarcane (*Saccharum officinarum*) is enhanced by growth at double-ambient CO₂ and high temperature. **Journal of Plant Physiology**, v.166, fev. 2009.

WALDRON, J.C., GLASZIOU, K.T., BULL, T.A. The physiology of sugarcane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal of Biological Sciences**. Melbourne, v. 20, n. 6, p. 1043-1052. 1967.

WATLING, J. R.; PRESS, M. C. How is the relationship between the C4 cereal *Sorghum bicolor* and the C3 root hemi-parasites *Striga hermonthica* and *Striga asiatica* affected by elevated CO₂. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, 1997.

WILSON, E.; ZHANG, D.; ZHENG, L. The socio-political context for deploying carbon capture and storage in China and the U.S.. **Global Environmental Change**, v. 21, mai. 2011.

WU, H., et al. Using elevated CO₂ to increase the biomass of a *Sorghum vulgare* x *Sorghum vulgare* var. *sudanense* hybrid and *Trifolium pratense* L. and to trigger hyperaccumulation of cesium. **Journal of hazardous materials**, v. 170, mai. 2009. Disponível em: <doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.069>.

XU, Y.; ISOM, L.; HANNA, M. A. Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations. **Bioresource Technology**, v.101, mai. 2010. Disponível em: <doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.006>

ZISKA, L. H.; BUNCE, J. A. Effects of elevated carbon dioxide concentration at night on the growth and gas exchange of selected C4 species. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 26, 1999.

ZISKA, L. H.; BUNCE, J. A. Influence of increasing carbon dioxide concentration on the photosynthetic and growth stimulation of selected C4 crops and weeds. **Photosynthesis Research**, v. 54, 1997.

APÊNDICE A – Parâmetros e resultados da análise de dispersão do CO₂ em campo.

Tabela 18 – Parâmetros para dispersão em pluma gaussiana

Parâmetros para análise de dispersão		
Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura	29	°C
Pressão	0,91	atm
Velocidade do vento	1,4	m/s
Emissão CO ₂	0,0225	g/m.s.
Variáveis para dispersão do modelo de pluma gaussiana		
d	453,9	
e	2,117	
f	0	

Tabela 19 – Resultado para dispersão em pluma gaussiana para emissão de 2,25 mg/m.s.

x (km)	σz (m)	C (mg/m ³)	ppm (fonte)	ppm (linha)
0,01	0,0	484,2	300,1	300,1
0,02	0,1	111,6	69,2	369,2
0,03	0,3	47,3	29,3	398,6
0,04	0,5	25,7	15,9	414,5
0,05	0,8	16,0	9,9	424,4
0,06	1,2	10,9	6,8	431,2
0,07	1,6	7,9	4,9	436,1
0,08	2,2	5,9	3,7	439,8
0,09	2,8	4,6	2,9	442,6
0,1	3,5	3,7	2,3	444,9
0,11	4,2	3,0	1,9	446,8
0,12	5,1	2,5	1,6	448,3
0,13	6,0	2,1	1,3	449,7
0,14	7,1	1,8	1,1	450,8
0,15	8,2	1,6	1,0	451,8
0,16	9,4	1,4	0,8	452,6
0,17	10,7	1,2	0,7	453,3
0,18	12,0	1,1	0,7	454,0
0,19	13,5	1,0	0,6	454,6
0,2	15,0	0,9	0,5	455,1

APÊNDICE B – Resultados da ACV e CFP para os cenários de incremento de biomassa.

Tabela 20 – ACV para os diferentes cenários de incremento de produtividade (quartis)

Entrada	Reciclagem de CO ₂							Variação entre os incrementos Q3/Q1
	Tradicional kJ/MJ	Incremento 16% kJ/MJ	Aumento	Incremento 25,1% kJ/MJ	Aumento	Incremento 35,5% kJ/MJ	Aumento	
Etapa Agrícola								
1. Mudas	3,28	2,979	-9,1%	2,808	-14,3%	2,635	-19,55%	-11,5%
2. Insumos Agrícolas								
2.1. Fertilizantes								
Nitrogênio	26,07	23,27	-10,7%	21,94	-15,8%	20,59	-21,03%	-11,5%
Fósforo	3,22	2,87	-10,7%	2,71	-15,8%	2,54	-21,03%	-11,5%
Potássio	3,40	3,04	-10,7%	2,86	-15,8%	2,69	-21,03%	-11,5%
Calcário	1,01	0,90	-10,7%	0,85	-15,8%	0,80	-21,03%	-11,5%
Gesso	0,10	0,09	-10,7%	0,08	-15,8%	0,08	-21,03%	-11,5%
Total fertilizantes	33,80	30,17	-10,7%	28,44	-15,8%	26,69	-21,03%	-11,5%
2.2. Defensivos								
Inseticida	0,35	0,32	-10,7%	0,30	-15,8%	0,28	-21,03%	-11,5%
Fungicida	0,10	0,09	-10,7%	0,09	-15,8%	0,08	-21,03%	-11,5%
Herbicida	4,28	3,82	-10,7%	3,60	-15,8%	3,38	-21,03%	-11,5%
Total defensivos	4,73	4,23	-10,7%	3,98	-15,8%	3,74	-21,03%	-11,5%
Total insumos agrícolas	38,53	34,40	-10,7%	32,43	-15,8%	30,43	-21,03%	-11,5%
3. Tratos culturais	61,92	55,28	-10,7%	52,11	-15,8%	48,90	-21,03%	-11,5%
4. Máquinas								
Tratores + colhedoras	3,82	3,41	-10,7%	3,22	-15,8%	3,02	-21,03%	-11,5%
Implementos	1,13	1,01	-10,7%	0,95	-15,8%	0,90	-21,03%	-11,5%
Caminhões	7,54	6,73	-10,7%	6,34	-15,8%	5,95	-21,03%	-11,5%
Compressor	0,00	1,88	100,0%	1,77	100,0%	1,66	100,00%	-11,5%
Total máquinas	12,49	13,03	4,3%	12,28	-1,7%	11,53	-7,72%	-11,5%
Total da etapa agrícola	116,21	105,69	-9,1%	99,62	-14,3%	93,49	-19,55%	-11,5%
Etapa Industrial								
5. Insumos industriais								
CaO	0,05	0,05	0,0%	0,05	0,0%	0,05	0,00%	0,0%
Anti espumante	0,67	0,67	0,0%	0,67	0,0%	0,67	0,00%	0,0%
Dispersante	0,67	0,67	0,0%	0,67	0,0%	0,67	0,00%	0,0%
Ácido sulfúrico	0,52	0,52	0,0%	0,52	0,0%	0,52	0,00%	0,0%
Lubrificantes	0,46	0,46	0,0%	0,46	0,0%	0,46	0,00%	0,0%
Ciclohexano	3,43	3,43	0,0%	3,43	0,0%	3,43	0,00%	0,0%
Hidróxido de sódio	0,34	0,34	0,0%	0,34	0,0%	0,34	0,00%	0,0%
Total insumos industriais	6,14	6,14	0,0%	6,14	0,0%	6,14	0,00%	0,0%
6. Equipamentos								
Caldeiras	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,0%
Trituradores e dispositivos de conduç	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,0%
Transportadoras	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,0%
Destilaria	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,0%
Tanques	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,0%
Total equipamentos	0,00	0,001	0,0%	0,001	0,0%	0,001	0,00%	0,0%
8. Edificações								
Edifícios industriais	0,14	0,14	0,0%	0,14	0,00%	0,14	0,00%	0,0%
Escritórios	0,01	0,01	0,0%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Laboratórios, oficinas de reparação	0,06	0,06	0,0%	0,06	0,00%	0,06	0,00%	0,0%
Armazém, pátios	0,08	0,08	0,0%	0,08	0,00%	0,08	0,00%	0,0%
Total edificações	0,29	0,29	0,0%	0,29	0,00%	0,29	0,00%	0,0%
Total da etapa industrial	6,44	6,44	0,0%	6,44	0,00%	6,44	0,00%	0,0%
Total	122,65	112,13	-8,6%	106,06	-13,53%	99,92	-18,53%	-10,9%

Tabela 21 – CFP para os diferentes cenários de incremento de produtividade (quartis)

Entrada	Reciclagem de CO ₂							Variação entre os incrementos Q3/Q1
	Tradicional	Incremento 16%		Incremento 25,1%		Incremento 35,5%		
	gCO ₂ /MJ	gCO ₂ /MJ	Aumento	gCO ₂ /MJ	Aumento	gCO ₂ /MJ	Aumento	
Etapla Agrícola	gCO₂/MJ							
1. Mudás	0,23	0,21	-9%	0,20	-14,49%	0,18	-19,76%	-11,5%
2. Insumos Agrícolas								
2.1. Fertilizantes								
Nitrogênio	2,21	1,97	-10,71%	1,86	-15,84%	1,75	-21,03%	-11,5%
Fósforo	0,17	0,15	-10,71%	0,14	-15,84%	0,14	-21,03%	-11,5%
Potássio	0,19	0,17	-10,71%	0,16	-15,84%	0,15	-21,03%	-11,5%
Calcário	0,06	0,05	-10,71%	0,05	-15,84%	0,05	-21,03%	-11,5%
Gesso	0,01	0,00	-10,71%	0,00	-15,84%	0,00	-21,03%	-11,5%
Total fertilizantes	2,64	2,35	-10,71%	2,22	-15,84%	2,08	-21,03%	-11,5%
2.2. Defensivos								
Inseticida	0,02	0,02	-10,71%	0,01	-15,84%	0,01	-21,03%	-11,5%
Fungicida	0,01	0,00	-10,71%	0,00	-15,84%	0,00	-21,03%	-11,5%
Herbicida	0,21	0,19	-10,71%	0,18	-15,84%	0,17	-21,03%	-11,5%
Total defensivos	0,23	0,21	-10,71%	0,20	-15,84%	0,19	-21,03%	-11,5%
Total insumos agrícolas	2,87	2,56	-10,71%	2,42	-15,84%	2,27	-21,03%	-11,5%
3. Tratos culturais	4,16	3,71	-10,71%	3,50	-15,84%	3,28	-21,03%	-11,5%
4. Máquinas								
Tratores + colhedoras	0,27	0,24	-10,71%	0,23	-15,84%	0,21	-21,03%	-11,5%
Implementos	0,08	0,07	-10,71%	0,07	-15,84%	0,06	-21,03%	-11,5%
Caminhões	0,53	0,48	-10,71%	0,45	-15,84%	0,42	-21,03%	-11,5%
Compressor	0,00	0,11	100,00%	0,11	100,00%	0,10	100,00%	-11,5%
Total máquinas	0,88	0,90	2,17%	0,85	-3,70%	0,80	-9,63%	-11,5%
Total da etapa agrícola	8,14	7,38	-9,28%	6,96	-14,49%	6,53	-19,76%	-11,5%
Etapla Industrial								
5. Insumos industriais								
CaO	0,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,0%
Anti espumante	0,02	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,0%
Dispersante	0,02	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,0%
Ácido sulfúrico	0,03	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,0%
Lubrificantes	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Ciclohexano	0,10	0,10	0,00%	0,10	0,00%	0,10	0,00%	0,0%
Hidróxido de sódio	0,02	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,0%
Total insumos industriais	0,20	0,20	0,00%	0,20	0,00%	0,20	0,00%	0,0%
6. Equipamentos								
Caldeiras	0,03	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,0%
Trituradores e dispositivos de	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Transportadoras	0,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,0%
Destilaria	0,03	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,0%
Tanques	0,02	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,02	0,00%	0,0%
Total equipamentos	0,10	0,10	0,00%	0,10	0,00%	0,10	0,00%	0,0%
7. Edificações								
Edifícios industriais	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Escritórios	0,00	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,0%
Laboratórios, oficinas de rep.	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Armazém, pátios	0,01	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,01	0,00%	0,0%
Total edificações	0,03	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,03	0,00%	0,0%
Total da etapa industrial	0,33	0,33	0,00%	0,33	0,00%	0,33	0,00%	0,0%
8. Emissões atribuídas ao resíduos e queima								
Decomposição dos resíduos	1,72	1,72	0,00%	1,72	0,00%	1,72	0,00%	0,0%
Vinhaça	1,16	1,04	-10,71%	0,98	-15,84%	0,92	-21,03%	-11,5%
Torta de filtro	0,82	0,73	-10,71%	0,69	-15,84%	0,64	-21,03%	-11,5%
Cinzas da caldeira	0,00	0,00	-10,71%	0,00	-15,84%	0,00	-21,03%	-11,5%
Fuligem	0,05	0,04	-10,71%	0,04	-15,84%	0,04	-21,03%	-11,5%
Queima do bagaço	1,38	1,38	0,00%	1,38	0,00%	1,38	0,00%	0,0%
Nitrogênio (fertilizantes)	2,71	2,42	-10,71%	2,28	-15,84%	2,14	-21,03%	-11,5%
Total outras emissões	7,83	7,33	-6,48%	7,08	-9,58%	6,84	-12,71%	-6,7%
Total	16,30	15,03	-7,75%	14,37	-11,84%	13,69	-15,97%	-8,9%

Tabela 22 – ACV para os diferentes cenários de incremento de produtividade (experimentos)

Entrada	kJ/MJ						
	C 1 ^a	C 2 ^b	C 3 ^c	C 4 ^d	C 5 ^e	C 6 ^f	C 7 ^g
Etapla Agrícola							
1. Mudás	3,19	3,06	2,90	2,79	2,66	2,61	2,55
2. Insumos Agrícolas							
2.1. Fertilizantes							
Nitrogênio	24,94	23,91	22,67	21,81	20,77	20,40	19,94
Fósforo	3,08	2,95	2,80	2,69	2,56	2,52	2,46
Potássio	3,26	3,12	2,96	2,85	2,71	2,66	2,60
Calcário	0,97	0,93	0,88	0,85	0,81	0,79	0,77
Gesso	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07
Total fertilizantes	32,34	31,01	29,39	28,28	26,93	26,45	25,85
2.2. Defensivos							
Inseticida	0,34	0,33	0,31	0,30	0,28	0,28	0,27
Fungicida	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08
Herbicida	4,09	3,92	3,72	3,58	3,41	3,35	3,27
Total defensivos	4,53	4,34	4,12	3,96	3,77	3,71	3,62
Total insumos agrícolas	36,87	35,35	33,50	32,24	30,70	30,16	29,47
3. Tratos culturais	59,25	56,80	53,84	51,81	49,34	48,47	47,35
4. Máquinas							
Tratores + colhedoras	3,66	3,51	3,32	3,20	3,05	2,99	2,92
Implementos	1,09	1,04	0,99	0,95	0,90	0,89	0,87
Caminhões	7,21	6,91	6,55	6,31	6,00	5,90	5,76
Compressor	2,01	1,93	1,83	1,76	1,68	1,65	1,61
Total máquinas	13,97	13,39	12,69	12,21	11,63	11,43	11,16
Total da etapa agrícola	113,28	108,60	102,94	99,06	94,33	92,66	90,54
Etapla Industrial							
5. Insumos industriais							
CaO	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Anti espumante	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Dispersante	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Ácido sulfúrico	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Lubrificantes	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Ciclohexano	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
Hidróxido de sódio	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Total insumos industriais	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14
6. Equipamentos							
Caldeiras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trituradores e dispositivos de conduç	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Transportadoras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Destilaria	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tanques	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total equipamentos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7. Edificações							
Edifícios industriais	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Escritórios	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Laboratórios, oficinas de reparação	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Armazém, pátios	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Total edificações	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Total da etapa industrial	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Total	119,72	115,04	109,37	105,50	100,76	99,10	96,97

^a Ziska and Bunce (1997), Incr.Bio. 6%. ^b I Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 12%. ^c II Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 20%. ^d III Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 26%. ^e de Souza et al. (2008), Inc.Bio. 34%. ^f Vu et al. (2006), Inc.Bio. 37%. ^g Vu e Allen Jr. (2009), Inc.Bio. 41%.

Tabela 23 – CFP para os diferentes cenários de incremento de produtividade (experimentos)

Entrada	gCO ₂ eq./ha						
	C 1 ^a	C 2 ^b	C 3 ^c	C 4 ^d	C 5 ^e	C 6 ^f	C 7 ^g
Etapla Agrícola							
1. Mudás	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,18
2. Insumos Agrícolas							
2.1. Fertilizantes							
Nitrogênio	2,12	2,03	1,92	1,85	1,76	1,73	1,69
Fósforo	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13
Potássio	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14
Calcário	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Gesso	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total fertilizantes	2,52	2,42	2,29	2,21	2,10	2,06	2,02
2.2. Defensivos							
Inseticida	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fungicida	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Herbicida	0,20	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16
Total defensivos	0,22	0,22	0,20	0,20	0,19	0,18	0,18
Total insumos agrícolas	2,75	2,63	2,50	2,40	2,29	2,25	2,20
3. Tratos culturais	3,98	3,81	3,61	3,48	3,31	3,25	3,18
4. Máquinas							
Tratores + colhedoras	0,26	0,25	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
Implementos	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
Caminhões	0,51	0,49	0,46	0,45	0,42	0,42	0,41
Compressor	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
Total máquinas	0,97	0,93	0,88	0,84	0,80	0,79	0,77
Total da etapa agrícola	7,91	7,59	7,19	6,92	6,59	6,47	6,32
Etapla Industrial							
5. Insumos industriais							
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anti espumante	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Dispersante	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Ácido sulfúrico	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Lubrificantes	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ciclohexano	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Hidróxido de sódio	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Total insumos industriais	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6. Equipamentos							
Caldeiras	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Trituradores e dispositivos de condução	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Transportadoras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Destilaria	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Tanques	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Total equipamentos	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
7. Edificações							
Edifícios industriais	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Escritórios	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Laboratórios, oficinas de reparação	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Armazém, pátios	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Total edificações	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Total da etapa industrial	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
8. Emissões atribuídas ao resíduos e queima							
Decomposição dos resíduos	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
Vinhaça	1,11	1,07	1,01	0,97	0,93	0,91	0,89
Torta de filtro	0,78	0,75	0,71	0,68	0,65	0,64	0,62
Cinzas da caldeira	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuligem	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Queima do bagaço	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Nitrogênio (fertilizantes)	2,59	2,49	2,36	2,27	2,16	2,12	2,07
Total outras emissões	7,63	7,44	7,21	7,06	6,87	6,80	6,72
Total	15,87	15,35	14,73	14,30	13,78	13,60	13,37

^a Ziska and Bunce (1997), Incr.Bio. 6%. ^b I Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 12%. ^c II Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 20%. ^d III Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 26%. ^e de Souza et al. (2008), Inc.Bio. 34%. ^f Vu et al. (2006), Inc.Bio. 37%. ^g Vu e Allen Jr. (2009), Inc.Bio. 41%.

Tabela 24 – Balanço de carbono

Balanço de carbono (kgCO₂eq/ha)	Cenários de incremento da reciclagem			
	Tradicional	Incremento 16%	Incremento 25,1%	Incremento 35,5%
Emissão total	3347	3475	3534	3600
Emissão evitada gasolina	-12855	-14397	-15275	-16278
Emissão evitada eletricidade	-4314	-4832	-5127	-5463
Emissão líquida	-13822	-15754	-16868	-18140

Balanço de carbono (kgCO₂eq/ha)	Cenários de incremento da reciclagem						
	C 1 ^a	C 2 ^b	C 3 ^c	C 4 ^d	C 5 ^e	C 6 ^f	C 7 ^g
Emissão total	3344	3380	3428	3463	3511	3528	3552
Emissão evitada gasolina	-13433	-14012	-14783	-15362	-16133	-16422	-16808
Emissão evitada eletricidade	-4575	-4772	-5035	-5232	-5495	-5593	-5724
Emissão líquida	-14664	-15404	-16390	-17130	-18117	-18487	-18980

^a Ziska and Bunce (1997), Incr.Bio. 6%. ^b I Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 12%. ^c II Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 20%. ^d III Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 26%. ^e de Souza et al. (2008), Inc.Bio. 34%. ^f Vu et al. (2006), Inc.Bio. 37%. ^g Vu e Allen Jr. (2009), Inc.Bio. 41%.

Tabela 25 – Relações de energia

Relação	Tradicional	Reciclagem de CO ₂					
		Incremento 16%	Incremento 25,1%	Incremento 35,5%			
Balanço de energia (GJ)	169,8	192	205,6	220,6			
Relação de energia	8,2	8,9	9,4	10,0			
Retorno de investimento de energia	7,2	7,9	8,4	9,0			
Cenários de incremento da reciclagem							
Relação	C 1 ^a	C 2 ^b	C 3 ^c	C 4 ^d	C 5 ^e	C 6 ^f	C 7 ^g
Balanço de energia (GJ)	178,1	186,7	198,2	206,9	218,4	222,8	228,5
Relação de energia	8,4	8,7	9,1	9,5	9,9	10,1	10,3
Retorno de investimento de energia	7,4	7,7	8,1	8,5	8,9	9,1	9,3

^a Ziska and Bunce (1997), Incr.Bio. 6%. ^b I Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 12%. ^c II Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 20%. ^d III Vu e Allen Jr. (2009), Incr.Bio. 26%. ^e de Souza et al. (2008), Inc.Bio. 34%. ^f Vu et al. (2006), Inc.Bio. 37%. ^g Vu e Allen Jr. (2009), Inc.Bio. 41%.

ANEXO A – Parâmetros ambientais utilizados na ACV e CFP

Tabela 26 – Características ambientais dos insumos

Insumo	CED MJ/kg	Emissão de GEE kg CO ₂ eq/kg
Diesel	54,1 ^a	0,49 ^a
Sulfato de amônia	45,27 ^a	2,69 ^a
Amônia	41,95 ^a	2,1 ^a
Nitrato de amônia	58,92 ^a	8,55 ^a
Uréia	66,27 ^a	3,31 ^a
Fosfato diamônico (DAP)	23,09 ^a	1,57 ^a
Super fosfato simples	49,28 ^a	2,62 ^a
Super fosfato triplo	33,69 ^a	2,02 ^a
Cloreto de potássio	9,02 ^a	0,5 ^a
Herbicida	206,9 ^a	10,24 ^a
Inseticida	343,12 ^a	16,66 ^a
Fungicida	201,96 ^a	10,59 ^a
Hidróxido de sódio	22,8 ^a	1,1 ^a
Ciclohexano	76,64 ^a	2,31 ^a
Lubrificante	79,78 ^a	1,05 ^a
Gesso	0,04 ^a	0,002
Cal	0,2 ^a	0,01 ^a
Compressor (unidade)	10184 ^a	616 ^a
Anti espumante	60 ^a	1,83 ^a
Dispersante	60 ^a	1,83 ^a
Acido sulfúrico	2,12 ^a	0,12 ^a
Aço	17,7 ^b	1,25 ^b
Edifícios industriais	1,8 ^c	100,8 ^d
Escritórios	2,4 ^c	100,8 ^d
Laboratórios, oficinas de reparação	2,4 ^c	100,8 ^d
Pátios, armazém	1,2 ^c	100,8 ^d

^aEcoinvent Centre (2012). ^bKim and Worrell (2002), em MJ/t. ^cTavares (2006), em GJ/m². ^dSeabra (2008) kgCO₂/GJ.

Tabela 27 – Outras características ambientais dos insumos e parâmetros utilizados

Parâmetros relativos a combustíveis			
	Densidade (kg/L)	Energia (MJ/L)	Fonte
Diesel	0,85		EPE, 2014
Etanol (h)	0,81	21,35	EPE, 2014
Etanol (a)	0,79	22,36	EPE, 2014
Gasolina	0,74	32,22	EPE, 2014

Parâmetros relativos a mudanças climáticas			
	Unidade		Fonte
GWP N ₂ O	298,0	CO ₂ eq	IPCC, 2007b
GWP CH ₄	25,0	CO ₂ eq	IPCC, 2007b

Fonte	Emissão	Unidade
Combustão - Diesel	2,68 ^a	kgCO ₂ /l
Combustão - Etanol	0,0008 ^b	kgCO ₂ eq/MJ
Queima de bagaço	0,0268 ^c	kgCO ₂ eq/kg
Combustão - Gasolina	3,49 ^d	kgCO ₂ eq/kg
Emissão MDL 2014	0,5224 ^e	tCO ₂ /MWh

^aIPEA (2011). ^bEcoInvent (2010). ^cIPCC (2010). ^dCTBE (2012).

^eMinistério da Ciência Tecnologia e Inovação (2015).

ANEXO B – Experimentos de incremento de biomassa com cana-de-açúcar e sorgo sobre maiores concentrações de CO₂.

Tabela 28 – Aumento porcentual em peso seco (biomassa) de cana-de-açúcar para um aumento de 300 ppm na concentração de CO₂ atmosférico

Artigo de referência	Condições experimentais	% aumento de peso seco
Ziska e Bunce (1997)	Em estufa.	6%
Vu et al. (2006)	Biomassa área de plantas bem regadas e adubadas, cultivadas a partir de estaquia sob condições de campo para a luz solar em estufas com controle de temperatura por uma estação de crescimento integral.	37%
de Souza et al. (2008)	Plantas cultivadas em vasos em câmaras de topo aberto por um período de 50 semanas de crescimento (abril-março) bem regadas e fertilizadas em São Paulo, Brasil.	34%
Vu e Allen Jr. (2009)	Produção de caldo de cana de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 6,0 ° C acima da temperatura do ar do ambiente exterior, bem regadas e adubadas (clone tolerante a inundação).	78%
Vu e Allen Jr. (2009)	Massa seca da parte área de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 1,5 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a seca).	26%
Vu e Allen Jr. (2009)	Massa seca da parte área de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 6,0 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a seca).	20%
Vu e Allen Jr. (2009)	Produção de caldo de cana de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 1,5°C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a seca).	71%
Vu e Allen Jr. (2009)	Produção de caldo de cana de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 6,0 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a seca).	30%

Vu e Allen Jr. (2009)	Produção de caldo de cana de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 1,5 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a inundação).	19%
Vu e Allen Jr. (2009)	Massa seca da parte área de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 1,5 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a inundação).	12%
Vu e Allen Jr. (2009)	Massa seca da parte área de plantas cultivadas a partir de estaquia por três meses em estufas ensolaradas com temperatura controlada do ar a 6,0 ° C acima da temperatura externa, bem regadas e adubadas (clone tolerante a inundação).	41%

Fonte: Elaboração própria com base em CO2 SCIENCE (2014a).

Tabela 29 – Aumento percentual em peso seco (biomassa) de sorgo para um aumento de 300 ppm na concentração de CO₂ atmosférico

Artigo de referência	Condições experimentais	% aumento de peso seco
Allen Jr. et al. (2011)	Plantas cultivadas a partir de sementes em vasos dentro de câmaras ensolaradas e com controle ambiental por 39 dias, muito bem irrigadas.	-5%
Allen Jr. et al. (2011)	Plantas cultivadas a partir de sementes em vasos dentro de câmaras ensolaradas com controle ambiental por 39 dias, com estresse hídrico.	23%
Amthor et al. (1994)	Produção de grãos em câmaras de topo aberto.	12%
Amthor et al. (1994)	Planta inteira em câmaras de topo aberto.	22%
Chaudhuri et al. (1986)	Plantas cultivadas em câmaras em ambiente natural.	28%
Marc e Gifford (1984)	Plantas cultivadas em vasos em câmaras de crescimento (600 ppm).	41%

Morison e Gifford (1984)	Plantas cultivadas em vasos de 3,2 kg de solo.	20%
Ottman (2001)	FACE em solo úmido.	0%
Ottman (2001)	FACE em solo seco.	23%
Prasad et al. (2006)	Biomassa vegetal de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 32°C durante o dia e 22 °C durante a noite.	49%
Prasad et al. (2006)	Biomassa vegetal de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 36°C durante o dia e 26°C durante a noite.	12%
Prasad et al. (2006)	Biomassa vegetal de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 40°C durante o dia e 30°C durante a noite.	11%
Prasad et al. (2006)	Biomassa vegetal de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 44°C durante o dia e 34°C durante a noite.	38%
Prasad et al. (2006)	Produção de sementes de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 32°C durante o dia e 22 °C durante a noite.	24%
Prasad et al. (2006)	Produção de sementes de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 36°C durante o dia e 26°C durante a noite.	-12%
Prasad et al. (2006)	Produção de sementes de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 40°C durante o dia e 30°C durante a noite.	0%
Prasad et al. (2006)	Produção de sementes de plantas bem regadas e fertilizadas cultivadas a partir de sementes em câmaras de topo aberto a uma temperatura de 44°C durante o dia e 34°C durante a noite.	0%
Prasad et al. (2009)	Biomassa vegetal total de plantas semeadas e bem regadas e fertilizadas por 50 dias em câmaras ensolaradas com controle ambiental na Flórida (EUA) e temperatura durante o dia de 30°C e a noite 20°C.	42%
Prasad et al. (2009)	Biomassa vegetal total de plantas semeadas e bem regadas e fertilizadas por 50 dias em câmaras ensolaradas com controle ambiental na Flórida (EUA) e temperatura durante o dia de 36°C e a noite 26°C.	53%

Prior et al. (2005)	Plantas cultivadas a partir de sementes para dois ciclos de cultivo dentro de câmaras de topo aberto (produção de grãos no primeiro ciclo de corte).	0%
Prior et al. (2005)	Plantas cultivadas a partir de sementes para dois ciclos de cultivo dentro de câmaras de topo aberto (produção de grãos no segundo ciclo de corte).	21%
Prior et al. (2005)	Plantas cultivadas a partir de sementes para dois ciclos de cultivo dentro de câmaras de topo aberto (matéria vegetal do primeiro ciclo de corte).	14%
Prior et al. (2005)	Plantas cultivadas a partir de sementes para dois ciclos de cultivo dentro de câmaras de topo aberto (matéria vegetal do segundo ciclo de corte).	23%
Torbert et al. (2004)	Biomassa vegetal de plantas cultivadas a partir de sementes com maturidade fisiológica em câmaras de topo aberto com enraizamento natural por três anos (1992, 1993 e 1994).	25%
Watling e Press (1997)	Plantas cultivadas por dois meses em câmaras fechadas.	31%
Ziska and Bunce (1997)	Plantas cultivadas em estufa.	4%
Ziska and Bunce (1999)	Plantas cultivadas em câmaras por três semanas.	0%
Wu et al. (2009)	Biomassa aérea de plantas híbridas bem regadas e adubadas, cultivadas a partir de sementes em vasos e câmaras de topo aberto durante 47 dias (600 ppm).	32%

Fonte: Elaboração própria com base em CO2 SCIENCE (2014).