



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE
JABOTICABAL

Inventário de Gases de Efeito Estufa e estoque de carbono
do solo em três sistemas de produção de cana-de-açúcar

Clara Barros Bueno

Engenheira Agrônoma

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE
JABOTICABAL

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal)

**Inventário de Gases de Efeito Estufa e estoque de carbono do solo em três
sistemas de produção de cana-de-açúcar**

Clara Barros Bueno

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Jr.

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Faroni

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

Jaboticabal - SP

2024

B928i

Bueno, Clara Barros

Inventário de gases de efeito estufa e estoque de carbono do solo
em três sistemas de produção de cana-de-açúcar / Clara Barros

Bueno. -- Jaboticabal, 2024

92 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Newton La Scala Jr.

Coorientador: Carlos Eduardo Faroni

1. Mudanças climáticas. 2. Inventário de GEE. 3. Bioenergia. 4.
Mitigação. 5. Emissões antrópicas. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

A pesquisa teve por objetivo avaliar as emissões de GEE de três sistemas de produção de cana-de-açúcar. Como também, a forma como inventários de emissões são construídos e se estes representam a realidade da produção no Brasil. Apresentou-se assim um sistema de produção mais sustentável que poderá contribuir com o ODS 13.

Potential impacts of this research

The research aimed to evaluate the GHG emissions of three sugarcane production systems. It also aimed to assess how emissions inventories are constructed and whether they represent the reality of production in Brazil. This presented a more sustainable production system that could contribute to SDG 13.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM TRÊS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: CLARA BARROS BUENO

ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

COORIENTADOR: CARLOS EDUARDO FARONI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / ESALQ USP Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI
Data: 29/10/2024 15:42:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 29 de outubro de 2024

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Clara Barros Bueno – nascida em São Paulo – SP, em 04 de outubro de 1999, iniciou o curso de graduação de Engenharia Agrônômica na Unesp de Jaboticabal em 2017. Durante a graduação monitorou e estagiou no departamento de Microbiologia Agrícola, desenvolveu a pesquisa de “Fluorescência de *Bacillus subtilis* para análise do endofitismo e promoção do crescimento em plantas de milho e soja”, com bolsa FAPESP. Ao final do curso estagiou no setor de Sustentabilidade da Usina São Martinho, aproximando-se do tema de emissões de gases de efeito estufa e a produção da cana-de-açúcar. Posteriormente tornou-se analista da Diretoria Agrícola e de Tecnologia do grupo São Martinho, além de cursar mestrado no programa de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), campus de Jaboticabal.

“Acreditava que quando se
sonha tão grande, a realidade
aprende.” – Valter Hugo Mãe

Dedico este trabalho aos meus pais que estiveram comigo em todos os momentos não apenas desta jornada, mas de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Rosana C. Barros Bueno e Sidney Corrêa Bueno, pelo apoio, compreensão, incentivo constante e por tornar possível não só a realização deste trabalho, mas de meus estudos e outros sonhos.

Ao apoio recebido pelo orientador Prof. Dr. Newton La Scala Jr. desde o início do projeto e até mesmo antes dele, durante a graduação, sendo um dos maiores apoiadores da minha pesquisa.

Assim como à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp de Jaboticabal onde me formei e construí laços.

Ao coorientador, Dr. Carlos Eduardo Faroni, pelas boas palavras que sempre chegaram na hora certa.

Agradeço também à Usina São Martinho onde iniciei minha carreira como Engenheira Agrônoma e, principalmente, à Diretoria Agrícola e de Tecnologia e sua equipe (Aparecido Vitorino, Antônio Carlos Pelizzari, Carlos Eduardo Faroni, Eduardo Benedetti, Henrique Sampaio, Luís Gustavo Teixeira, Luís Renato de Paula, Mário Gandini e Rafael Pelucco) que me ensinou muito além do que eu esperava aprender (ainda além do lado profissional) e também permitiu que este projeto acontecesse. Assim como os amigos que formei e que, infelizmente, não será possível citar todos aqui. Além das equipes de amostragem e do laboratório de solos da usina, que tornaram possível a coleta e análise das amostras de solo para este estudo.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Inventários de Gases de Efeito Estufa (GEE)	4
2.2. GHG Protocol: iniciativas privadas para contabilização de GEE	6
2.3. Principais fontes de emissões de GEE do Brasil: inventário nacional	7
2.4. Óxido nitroso (N ₂ O) nas atividades agrícolas	9
2.4.1. Fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos	10
2.4.2. Resíduos vegetais	11
2.5. Dióxido de carbono (CO ₂) nas atividades agrícolas: Ureia e Calcário	12
2.6. GEE emitidos por combustão móvel: Diesel	12
2.7. Escopo 3: emissões associadas a produção de insumos (diesel, fertilizantes sintéticos e defensivos agrícolas)	13
2.8. Impacto das mudanças climáticas na produção agrícola	14
2.9. Soluções baseadas na natureza e estoques de C do solo	15
2.10. Cana-de-açúcar	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Caracterização da área experimental	19
3.2. Sistemas de produção de cana-de-açúcar	20
3.2.1. Linha do tempo de operações e doses	22
3.2.2. Comparativo entre sistemas de produção	25
3.3. Estimativa de emissões de GEE	26
3.3.1. Emissões diretas e indiretas de óxido nitroso (N ₂ O) a partir do manejo agrícola	33
3.3.1.1. Fertilizantes sintéticos e orgânicos nitrogenados: % N	35
3.3.1.2. Resíduos vegetais: FEs	35

3.3.2. Emissões diretas de dióxido de carbono (CO ₂) a partir do manejo agrícola	37
3.3.3. Emissões diretas de CO ₂ , N ₂ O e CH ₄ advindas da combustão móvel	37
3.3.4. Emissões a partir da produção de defensivos agrícolas, fertilizantes sintéticos e corretivos	39
3.4. Estoque de Carbono e Nitrogênio do solo	40
3.4.1. Coleta das amostras de solo	40
3.4.2. Análise das amostras de solo	41
3.4.3. Metodologia de cálculo para os estoques de C e N	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Emissões associadas à produção agrícola	43
4.1.1. Emissões por consumo de diesel	48
4.1.2. Emissões por insumos e resíduos vegetais	51
4.1.3. Emissões por tonelada de cana	53
4.2. Comparativo de emissões: Tier 1 vs. Tier 2	54
4.3. Estoques de C e N do solo	56
5. CONCLUSÃO	59
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

Inventário de Gases de Efeito Estufa e estoque de carbono do solo em três sistemas de produção de cana-de-açúcar

RESUMO – Diante dos impactos das mudanças climáticas e as metas dos países para cooperação no Acordo de Paris, vê-se a necessidade de inventariar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de setores produtivos como a agricultura. A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância para o Brasil e por este motivo foi a cultura de estudo deste trabalho. Assim, caracterizamos a emissão de GEE e o estoque de carbono e nitrogênio do solo, de três sistemas de produção. Estes foram classificados de acordo com seu preparo de solo, como convencional (operações de gradagem pesada e niveladora, e subsolagens), intermediário (gradagem niveladora e subsolagens) e reduzido (subsolagens), sendo possível observar se ocorreu variações tanto de emissões, como de estoque, de acordo com o sistema adotado. A área total avaliada foi de 228 hectares com um histórico de manejo de 9 anos. A metodologia utilizada para inventariar emissões seguiu o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC), e os fatores de emissão (FEs) utilizados foram tanto de pesquisas regionais (Tier 2) como também fatores de nível global (Tier 1). As fontes de maior emissão foram o diesel ($12,27 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$), fertilizantes sintéticos ($8,09 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$) e calagem ($6,23 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$), respectivamente, enquanto as menores emissões foram observadas nos fertilizantes orgânicos ($2,04 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$), resíduos vegetais ($1,31 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$) e nos defensivos químicos ($1,08 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$). Os resultados evidenciam que as emissões de GEE de um sistema considerado de manejo reduzido obteve a menor emissão por tonelada de cana colhida, sendo 18% inferior às emissões dos sistemas convencional e intermediário. Além disso, ao se comparar as estimativas da emissão utilizando Tier 2 nota-se uma diminuição de cerca de 4 a $5,6 \text{ kg CO}_2\text{e t}^{-1}$ se comparada as estimativas utilizando fatores de Tier 1. Evidenciou-se que manejos reduzidos de cana-de-açúcar reduzem emissões de GEE e promovem maior sustentabilidade produtiva da cultura.

Palavras-chaves: Inventário de GEE, Emissões Antrópicas, Bioenergia, Mitigação, Mudanças Climáticas, Preparo de solo

Greenhouse gas inventory and soil carbon stock in three sugarcane production systems

ABSTRACT – In the face of the impacts of climate change and also the trying to achieve the Nationally Determined Contributions from the Paris Agreement, there is a need to inventory greenhouse gas (GHG) emissions from different sectors such as agriculture. Sugarcane is a crop of great importance to Brazil and for this reason it was the crop studied in this work. Thus, we characterized the GHG emissions and the soil carbon and nitrogen stocks of three production systems. These were classified according to their soil preparation, as conventional (heavy harrowing and leveling harrowing, and subsoiling), intermediate (leveling harrowing and subsoiling) and reduced (subsoiling), and it was possible to observe whether there were variations in both emissions and stocks, according to the system adopted. The total area evaluated was 228 hectares with a management history of 9 years. The methodology used to inventory emissions followed the Intergovernmental Panel on Climate Change of the United Nations (IPCC), and the emission factors (EFs) used were from both regional research (Tier 2) and global-level factors (Tier 1). The sources of greatest emissions were diesel ($12.27 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$), synthetic fertilizers ($8.09 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) and liming ($6.23 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$), respectively, while the lowest emissions were observed in organic fertilizers ($2.04 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$), plant residues ($1.31 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) and chemical pesticides ($1.08 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$). The results show that GHG emissions from a production system considered to be of reduced management had the lowest emissions per ton of sugarcane harvested, being 18% lower than emissions from conventional and intermediate systems. Furthermore, when comparing emission estimates using Tier 2, a decrease of approximately 4 to $5.6 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$ is observed when compared to estimates using Tier 1 factors. It was shown that reduced sugarcane management reduces GHG emissions and promotes greater productive sustainability of the crop.

Palavras-chaves: GHG Inventory, Anthropogenic emissions, Bioenergy, Mitigation, Climate Change, Tillage

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características principais das áreas selecionadas como sistemas de produção para o estudo.	22
Tabela 2 – Doses por insumo aplicado e por safra, para cada um dos sistemas de produção estudados. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido (continua).	24
Tabela 3 – Fontes de emissão de GEE do setor agrícola. Fontes móveis e produção de insumos, classificados em Escopo 1, e emissões a partir da produção de insumos comprados, classificadas em Escopo 3.	27
Tabela 4 – Fatores de emissão (FE) direta de N_2O , Tiers 1 e 2, para cálculo de Escopo 1 do inventário de GEE ($kg\ N_2O-N\ kg\ N^{-1}$).	33
Tabela 5 – Fatores de emissões (FE) indiretas, de volatilização ($kg\ N_2O-N\ kg\ (NH_3-N + Nox-N)\ volatilizados^{-1}$) e lixiviação ($kg\ N_2O-N\ kg\ N\ lixiviado^{-1}$) de N_2O do Tier 1, para cálculo de Escopo 1 do inventário de GEE.	34
Tabela 6 – Frações (Frac) perdidas de N por volatilização ($kg\ (NH_3-N + Nox-N)\ kg\ N\ aplicado^{-1}$) e lixiviação ($kg\ N\ lixiviado\ kg\ N\ aplicado^{-1}$), para cálculo de emissões indiretas de N_2O utilizando Tier 1 e Tier 2, em Escopo 1 do inventário de GEE.	34
Tabela 7 – Teores de N (%) dos adubos orgânicos: torta de filtro (%), vinhaça ($kg\ m^{-3}$) e cama de frango (%), aplicados ao longo dos 9 anos de manejo dos sistemas de produção avaliados.	35
Tabela 8 – Fatores para cálculo de emissões de N_2O advindo de resíduos da cana-de-açúcar e soja.	36
Tabela 9 – Fatores para cálculo de emissões de CO_2 advindo da aplicação de calcário (%).	37
Tabela 10 – Consumo específico de diesel ($L\ ha^{-1}$) classificados em três grandes processos agrícolas.	38
Tabela 11 – Fatores utilizados para cálculo de FEs de GEE a partir da queima do diesel pelo maquinário agrícola.	38
Tabela 12 – FEs (em $kg\ CO_2e\ kg\ i.a.^{-1}$ ou $kg\ CO_2e\ kg\ insumo^{-1}$) para cálculo das emissões advindas da produção dos insumos consumidos, Escopo 3.	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema sobre os escopos 1, 2 e 3 que compõem um inventário de GEE.	5
Figura 2 – Representação gráfica da localização da cidade de Rincão, no estado de São Paulo, na qual os três sistemas de produção estão localizados.	20
Figura 3 – Linha do tempo das operações ao longo das safras 2014/2015, nos três sistemas de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.	23
Figura 4 – Aba de somatório de emissões da planilha de inventário.	29
Figura 5 – Células de input de dados de produtividade e manejo da área a ser analisada (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	30
Figura 6 – Células de input de dados, como volume de insumos, e de cálculos de emissões diretas de N ₂ O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	30
Figura 7 – Células de cálculos de emissões indiretas de N ₂ O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	31
Figura 8 – Células de input de dados, como volume de insumos, e de cálculos de emissões de CO ₂ (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	31
Figura 9 – Células de input de dados relacionados ao diesel e de cálculos de emissões de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	32
Figura 10 – Células de input de dados de insumos para cálculos do Escopo 3. Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).	32

Figura 11 – Imagem de uma das trincheiras e demarcação das camadas avaliadas.

.....41

Figura 12 – Distribuição das emissões em kg CO₂e ha⁻¹ por categoria, sistema e safra.

As emissões por categoria estão sendo comparadas de acordo com sua intensidade, quanto mais forte a cor azul, maior foi a emissão registrada naquela categoria e ano.

O mesmo ocorre para o comparativo de emissões totais por sistema, quanto mais forte a cor laranja, maior foi a emissão registrada em kgCO₂e ha⁻¹ naquele sistema de produção e ano. Os sistemas de produção correspondem a SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....44

Figura 13 – Emissões acumuladas por hectare e ano (kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹), distribuída

por categorias para cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....47

Figura 14 – Emissões por hectare e ano (kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹) contemplando todo o

período estudado, distribuídas por categorias de consumo de diesel (colheita, tratos culturais, preparo e plantio) e relacionadas à produtividade média (ou TCH, em tc ha⁻¹) de cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido. 48

Figura 15 – Emissões por hectare (kgCO₂e ha⁻¹) do consumo de diesel em suas três etapas (colheita, tratos culturais, preparo e plantio) durante a reforma (safra 19/20) de cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido. 49

Figura 16 – Quantidade de operações de tratos culturais, preparo e plantio realizadas ao longo das 9 safras, em relação à área. “< Área”: operação ocorreu em menos do que a área total; “Área total:” operação ocorreu em área total; “> Área:” operação ocorreu em mais do que a área total do sistema, ou seja, houve operações repetidas.

.....50

Figura 17 – Relação entre produtividade e emissões por resíduos vegetais (kgCO₂e ha⁻¹), por safra e sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI:

Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido. 52

Figura 18 – Emissões acumuladas por tonelada de cana ($\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) distribuídas por categoria em cada sistema de produção, durante todo o período estudado. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....	53
Figura 19 – Relação entre produtividade média (tc ha^{-1}) e emissões ($\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) para cada sistema de produção, em todo o período estudado.	54
Figura 20 – Comparativo de emissões acumuladas ($\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) por sistema de produção, ao utilizar Tier 1 vs. Tier 2, para todo o período estudado. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....	55
Figura 21 – Estoque de carbono (Mg C ha^{-1}) e nitrogênio (Mg N ha^{-1}) dos sistemas de produção e área de referência. Referência: Mata nativa; SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....	56
Figura 22 – Quantidade aplicada de N ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e C ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) nos três sistemas de produção, ao longo do período de 9 anos. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.....	57

1. INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – *International Panel on Climate Change*), no relatório publicado em 2021, reporta que os impactos das mudanças climáticas chegarão mais cedo do que se espera. Em 2007 já eram apontadas uma série de evidências de que as mudanças climáticas, expressas pelo aumento das temperaturas médias globais, acompanhadas e avaliadas desde o século XX, estão relacionadas ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) advindos das atividades humanas que alteram o balanço de energia do sistema climático (IPCC, 2007).

A Organização Mundial de Meteorologia (WMO – *World Meteorological Organization*), em seu relatório *Provisional State of the Global Climate*, referente ao ano de 2021, reafirmou que as concentrações dos principais gases de efeito estufa continuam a crescer e a atingir novos recordes. O dióxido de carbono (CO₂) atingiu $415,7 \pm 0,2$ ppm; metano (CH₄): 1908 ± 2 ppb e óxido nitroso (N₂O): $334,5 \pm 0,1$ ppb; tais valores são considerados 149%, 262% e 124% acima dos níveis de 1750, respectivamente.

O aumento de emissões desde o período citado foi diretamente causado por ações humanas advindas da industrialização. Com isso, a média global da temperatura tem aumentado, de 2011-2020 chegou em 1,09 °C, ou seja, 0,99 °C superior à época pré-industrial (1850-1900), um movimento mais rápido do que já aconteceu em qualquer outro momento (IPCC, 2021). As emissões globais antropogênicas foram $59 \pm 6,6$ GtCO₂eq em 2019, cerca de 12% a mais que 2010 e 54% a mais que as emissões de 1990 (IPCC, 2023). Apesar do crescimento de emissões ter desacelerado na última década, as ações de mitigação ainda precisam gerar um declínio acentuado, o que não tem ocorrido devido a barreiras sobre políticas climáticas e ausência de ações adaptativas (IPCC, 2023). Além disso, as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs – *Nationally Determined Contributions*) para 2030 têm se mostrado ultrapassadas, já que estimativas que consideram a implantação de todas elas em sua integralidade, a temperatura ainda atingiria de 2,1 a 2,9 °C até o final do século (UNFCCC, 2022).

Para o Brasil, em 2021, o Observatório do Clima (OC) por meio do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) calculou um aumento de

12,2% das emissões se comparado ao ano anterior, sendo esse o maior aumento em quase duas décadas ficando atrás apenas do ano de 2003. A categoria ligada ao desmatamento, Mudanças no Uso da Terra, foi a principal responsável, sendo seu aumento de 18,5%. Hoje esta categoria corresponde à 49% de toda emissão bruta do país. No mesmo ano, o setor agropecuário foi responsável por 601 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, também com um aumento de 3,8% se comparado ao ano anterior (SEEG, 2023a). Dentro deste setor, são contabilizadas emissões provenientes da fermentação entérica, manejo de dejetos de animais, cultivo de arroz, queima de resíduos agrícolas e solos manejados.

Toda estimativa de emissões e o acompanhamento sobre o aumento ou redução das mesmas só pode ser feita graças a construção de inventários de GEE, por meio da metodologia do IPCC. A construção e fornecimento de inventários se torna uma obrigação por parte dos países signatários do Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) e tem se tornado uma prática comum dentro do mercado com o reaparecimento da sigla ESG, que visa aproximar o setor privado de assuntos como meio ambiente, social e governança. O intuito é que as atividades de uma empresa sejam avaliadas e gerenciadas diante desses três grandes pilares (Teixeira et al., 2024), dessa forma será possível entender os impactos socioambientais e promover ou implantar projetos de mitigação desses efeitos.

Pensando especificamente na cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e a obtenção de etanol, ela pode cooperar com 85% de redução de GEE em vista da produção de combustíveis fósseis, enquanto o etanol de milho dos EUA leva a uma redução de cerca de 20% (Börjesson, 2009). O etanol de milho demonstra menor potencial de redução de emissões porque carvão e gás natural são utilizados nas indústrias produtoras deste combustível (Wang et al., 2007), diferentemente daquele derivado da cana-de-açúcar em que suas usinas atuam em grande parte sob uma economia circular. O bagaço, subproduto da cultura, é utilizado para gerar energia para abastecer a planta industrial e ainda ser exportada (Nunes et al., 2000).

Além dos benefícios trazidos pelo uso do etanol, existem muitas iniciativas de produção mais sustentáveis para a cana-de-açúcar, como por exemplo: plantio de culturas intercalares, possibilitando diferentes benefícios ao solo e ao próximo ciclo de cana, desde proteção contra erosões até aumento do teor de nitrogênio e fósforo

que depois serão disponibilizados às gramíneas (Tang et al., 2021); o uso de subprodutos da produção de açúcar e etanol, como adubos orgânicos (Jesus et al., 2023). Assim, a cultura pode demonstrar diferentes intensidades de emissões em seus inventários de acordo com os manejos adotados durante o cultivo, como por exemplo, adoção de uma cultura de rotação e preparo reduzido (Bordonal et al., 2013). Há ainda que se observar o impacto no cálculo de estimativa de emissões ao utilizar fatores de emissão (FEs) obtidos por pesquisas globais (Tier 1) e pesquisas regionais (Tier 2), devido a características ambientais diferentes.

Outro fator importante e ainda pouco aprofundado são os estoques de carbono (C) do solo e como este tem sido manejado durante o cultivo, se ocorrem prejuízos ou benefícios a ele de acordo com as culturas e sistemas de produção empregados. Smith et al. (2008) afirma que o setor agrícola tem um potencial de mitigação estimado em 5.500 a 6.000 Mt CO₂eq ano⁻¹ até 2030, desconsiderando ainda a compensação feita por combustíveis produzidos a partir da biomassa. Estudos já comprovaram que práticas agrícolas conservacionistas auxiliam tanto na qualidade da estrutura do solo, como em benefícios na fertilidade, retenção de água e sequestro de carbono (Amelung et al., 2020; Pisante et al., 2015), propiciando uma reversão da degradação causada por anos de preparo de solo convencional (Malhi et al., 2021).

Por sua vez, Powlson, Whitmore e Goulding (2011) ressaltam que é importante que o mundo seja cauteloso com a ideia de sequestro de C pelo solo, por três fatores: a capacidade do solo em estocar carbono é finita, o processo é reversível, e o aumento do carbono orgânico do solo pode afetar o fluxo de emissão e fixação de outros gases de efeito estufa, como o óxido nitroso (N₂O). Portanto, é importante não apenas tentar elevar o teor de C no solo, mas avaliar quais são as possíveis reduções de emissões no manejo agrícola. Afinal, 70% das emissões de GEE da agricultura estão associadas à produção e uso de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2007).

A partir da estimativa do balanço de GEE associada à produção agrícola seria possível propor medidas que reduzem as emissões e favorecem o acúmulo de C no solo ao entender quais manejos empregados são maiores e menores emissores. Existe uma ampla gama de trabalhos que comparam insumos e suas emissões ao serem aplicados ao solo, mas não o comparativo de sistemas de produção reais sobre

o manejo da cana-de-açúcar e a aplicação de FEs regionais (Tier 2) sobre as estimativas.

Assim, como hipótese, consideramos que a emissão de GEE associada à produção de cana-de-açúcar deverá apresentar o menor valor no sistema de produção reduzido (SR), diferentemente do que se espera para os sistemas convencional (SC) e intermediário (SI). Desta forma, os objetivos deste trabalho, foram a realização do inventário de GEE da fase agrícola em três sistemas de produção diferentes – considerando um manejo reduzido (preparo de solo apenas com subsolagem), intermediário (preparo de solo com gradagem niveladora e subsolagem) e convencional (preparo de solo com gradagem pesada, niveladora e subsolagem). Em conjunto aos inventários, este trabalho também se propôs a realizar o comparativo entre as estimativas utilizando FEs de Tier 1 e de Tier 2. Além da compreensão sobre o efeito do manejo no estoque de C do solo usando, como base, dados de sistemas de produção existentes em uma usina de cana-de-açúcar da região de Ribeirão Preto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Inventários de Gases de Efeito Estufa (GEE)

Uma ação global para tentar conter o aumento médio da temperatura abaixo de 2 °C, preferivelmente até 1,5 °C, acima do período pré-industrial, e equilibrar as emissões de GEE por ação humana até a segunda metade do século, é o Acordo de Paris. Instituído em 2015 e assinado por 195 países que contribuem para este projeto por meio das “Contribuições Nacionalmente Determinadas” (NDCs), definidas individualmente abrangendo suas singularidades. Periodicamente, os países devem reportar seus avanços em relação às NDCs com transparência. Assim, o países devem incluir em seus relatórios evidências possíveis de se quantificar, com um respectivo ano base (UNFCCC, 2015).

A construção de inventários de emissões ou inventários de gases de efeito estufa (GEE) surge como uma forma de acompanhar as emissões provocadas a partir das atividades humanas e mapeia as principais fontes, para onde esforços devem ser direcionados. Os inventários seguem a metodologia internacional definida pelo IPCC (2006), que abrange setores como: A primeira metodologia foi descrita em 1995 e

abrangia quatro setores basicamente: Energia; Processos Industriais e uso de produtos; Agricultura, Floresta e outros usos da terra; Resíduos.

Um inventário voltado para as atividades agrícolas, tem por objetivo contabilizar todos os insumos aplicados durante um ano naquele cultivo. Ele também pode envolver um processo natural, que é a decomposição dos resíduos que são deixados após a colheita, e emite GEE. Os cálculos de estimativas de emissões dependem de fatores de emissão (FE) que podem ser definidos tanto pelo IPCC, em uma visão global, como por pesquisas nacionais/regionais. Além disso, os inventários dividem suas fontes emissoras em diferentes categorias, denominadas “Escopos”.

As emissões do Escopo 1 podem ser consideradas emissões diretas, vindas do manejo, e são aquelas que a empresa ou fazenda inventariada pode modificar, seja pela alteração de algum insumo ou de alguma prática. As emissões do Escopo 2 estão relacionadas à compra de energia elétrica da rede e, portanto, possui um FE referente à matriz energética do país. O Escopo 3, por sua vez abrange emissões que estão no início ou no final da cadeia produtiva do produto inventariado, ou seja, esse escopo contabiliza tanto as emissões que ocorreram durante a produção de um insumo como o transporte do produto inventariado até o consumidor final. Normalmente, a empresa inventariada não possui controle sobre essas emissões, não conseguiria atuar sobre ela diretamente (Figura 1).



Figura 1 – Esquema sobre os escopos 1, 2 e 3 que compõem um inventário de GEE.

A metodologia do IPCC (2019) fornece, além das equações para as estimativas, os FEs de Tier 1, ou nível global. O IPCC classifica os FEs que podem ser utilizados

em três níveis, sendo o primeiro o Tier 1, relacionado à revisão de pesquisas globais que garantem a obtenção de um FE comum para diversas culturas e ambientes. O segundo nível seria o Tier 2, restringindo um pouco mais a amplitude desse FE que contemplaria a área nacional ou regional. Fatores de Tier 2 podem ser obtidos a partir de pesquisas nacionais reconhecidas. O último nível, denominado Tier 3, está relacionado a medições de emissão em campo, ele possui a maior precisão possível. Ao utilizar FEs de Tier 2 o cálculo de emissões se aproximaria mais da realidade do manejo nacional e da cultura analisada que pode, ou não, ser mais sustentável do que os FEs globais indicam.

Porém, utilizando FEs globais (Tier 1), Bordonal et al. (2012), construiu inventários para diferentes cenários de produção de cana-de-açúcar. Os inventários demonstraram a variação das emissões de acordo ao manejo adotado. Para o cenário com a colheita de cana queimada, a emissão foi de $2,65 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto para a colheita de cana crua a emissão estimada foi de $1,43 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e ao associar este tipo de colheita a um preparo reduzido do solo e plantio de um adubo verde durante a reforma, a emissão deste terceiro cenário reduziu para $1,06 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esses resultados também consideraram o acúmulo de C no solo graças à deposição de resíduos vegetais. Portanto, por meio da construção de um inventário foi possível notar os benefícios da colheita mecanizada da cana-de-açúcar e da adoção de métodos mais conservacionistas para o manejo, como o plantio de cultura de cobertura e adoção de um preparo de solo com menor revolvimento.

Ainda assim é importante que FEs de Tier 2 sejam cada vez mais empregados nas estimativas de emissões, pois o cultivo de cana-de-açúcar tem características importantes, como por exemplo o reaproveitamento de subprodutos do processamento da matéria-prima. Estudos como de Carmo et al. (2013), Oliveira et al. (2023) e Siqueira neto et al. (2016), já avaliaram as emissões de fertilizantes orgânicos e sintéticos no contexto da produção nacional da cana-de-açúcar, caracterizando-os como Tier 2.

2.2. GHG Protocol: iniciativas privadas para contabilização de GEE

O *Greenhouse Gas Inventories Protocol*, ou GHG Protocol, é uma iniciativa, tanto de organizações governamentais como não governamentais, fundada em 1998

com o objetivo de desenvolver uma estratégia de relato padrão de inventários de GEE que seja aceita internacionalmente (Ranganathan et al., 2004).

Os padrões produzidos pela iniciativa visam direcionar a construção de inventários de emissões de atividades governamentais, atividades privadas e também outros tipos de organizações. A contabilização abrange seis tipos de GEE, dentre eles o CO₂, N₂O e CH₄, e o guia padronizado para empresas tem por finalidade simplificar a construção de um inventário e reduzir o custo que companhias têm com esse tipo de serviço, promover a transparência, incentivando que empresas compartilhem suas informações de emissões publicamente com seus stakeholders adentrando na plataforma, e prover ao negócio informações que possam ser usadas como direcionadores para tomada de decisão quanto à mitigação de GEE (Ranganathan et al., 2004).

O GHG Protocol também oferece ferramentas que são consideradas de fácil implementação e utilização nas companhias. Tais ferramentas foram construídos com o apoio de organizações de pesquisa como a World Resources Institute (WRI) e seguem a metodologia do IPCC, publicada inicialmente em 1996 (Ranganathan et al., 2004). Porém, o projeto avançou para diversos países e aprimorou ferramentas para características locais. No Brasil existe o Programa Brasileiro GHG Protocol, desenvolvido em 2008 com apoio da Fundação Getúlio Vargas (FGV) e outras organizações empresariais, além do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (Monzoni et al., 2008).

O programa brasileiro possui uma plataforma denominada “Registro Público de Emissões”, na qual as empresas signatárias podem divulgar seus inventários e demonstrar seus avanços ano a ano. Assim como o programa internacional, dentre os vários objetivos um deles está a promoção de uma cultura corporativa de caráter voluntário sobre a construção de inventários de emissões (Monzoni et al., 2008).

2.3. Principais fontes de emissões de GEE do Brasil: inventário nacional

As mudanças do uso da terra e florestas são responsáveis pela maior parte das emissões de GEE do Brasil (SEEG, 2023a), o que diferencia o país de outros. Normalmente, o setor que mais coopera com as emissões em países europeus e nórdicos é o setor de Energia. Porém, a matriz energética nacional pode ser

considerada limpa, pois utiliza, em sua maior parte, de fontes renováveis como a própria cana-de-açúcar com a produção de energia elétrica por meio do bagaço ou então das hidrelétricas. Portanto, a geração de energia foi responsável por 18% das emissões totais em 2022 (SEEG, 2023). Já os setores de Agricultura e Mudança do uso da terra e Florestas no inventário nacional somam 75% das emissões totais (SEEG, 2023).

No período de 1850 a 1990, o mundo teve 73 Gt C emitidas a partir dos estoques de C do solo, e mesmo com uma recuperação de 38 Gt C também pelo solo, caso consideremos emissões que ocorreram por perda de biomassa, esse total se torna 108 Gt C (Houghton, 1990). Esses valores demonstram como a alteração de florestas para outras atividades humanas, ou seja, desmatamentos, tem alta relevância sobre as emissões de GEE não apenas no Brasil. O desmatamento causa a destruição de três estoques de C terrestres: a matéria orgânica na superfície (serrapilheira), o solo e a biomassa (parte aérea das plantas) (IPCC, 2019).

Em um estudo de cronossequência, avaliando a alteração de mata nativa, para pastagem e posteriormente cana-de-açúcar, Oliveira et al. (2016) analisou os efeitos dessas mudanças sobre o estoque de C do solo. Da mata nativa à pastagem, a perda de carbono consistiu em $-1,01 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para 1 m de profundidade. Quando houve a conversão de pastagem para cultivo de cana-de-açúcar, foi observado o ganho de C no solo $1,97 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Porém, uma das áreas estudadas adotou a colheita de cana queimada durante 13 anos e quando adotou a colheita mecanizada, retirou 50% da palha para a produção de etanol de segunda geração. Justamente nesta área não foram observados ganhos no estoque de C do solo até a profundidade de 50 cm. Estes resultados demonstram que o manejo adotado no cultivo, seja a colheita ou até mesmo a retirada da palha, interfere diretamente no estoque de C do solo e no seu incremento.

Culturas anuais e semiperenes podem adotar manejos que sejam benéficos à manutenção dos estoques de C dos solos agrícolas. Algumas práticas conhecidas são: rotação de culturas, uso de variedades que depositam mais resíduos vegetais sobre e abaixo do solo, utilização de adubos orgânicos, preparo reduzido com cobertura do solo, entre outros (Paustian et al., 2016). Os resultados de estudos de longo prazo com práticas sustentáveis de manejo, demonstraram resultados tanto

positivos (Powlson et al., 2016) como inconclusivos sobre o estoque de carbono (Cheesman et al., 2016), discussão essa também apresentada por Jia et al. (2019). Porém, para o IPCC (2022) com a aplicação métodos mais conservacionistas de manejo na agropecuária, essas atividades agrícolas poderiam contribuir com uma redução de 1,8 a 4,1 Gt CO₂e ano⁻¹ nas emissões (Nabuurs et al., 2022).

2.4. Óxido nitroso (N₂O) nas atividades agrícolas

A formação do óxido nitroso ocorre no solo devido principalmente à atividade microbiana como descrito por Firestone et al. (1989) e Zumft (1997). No processo de nitrificação, transformando amônio (NH₄⁺) para NO₃⁻, o produto é o N₂O e em áreas anaeróbicas pode ocorrer uma sequência de reduções do NO₃⁻, e caso essa redução seja incompleta, a emissão será de N₂O e não de N₂. As emissões de N₂O, em especial, podem ser consideradas como emissões diretas ou indiretas, sendo as indiretas advindas da lixiviação e volatilização do N aplicado no solo por meio de insumos.

Este gás é emitido principalmente pelo uso do solo, influenciando a atividade microbiana ao mobilizá-lo, e pela aplicação de fertilizantes e outras fontes nitrogenadas, como esterco animal. Dentro do setor agropecuário, de acordo com SEEG (2023a), as emissões advindas dos solos manejados correspondem a 29,8% deste setor, sendo essas principalmente N₂O. Além disso, durante os anos de 2000 a 2005, as emissões de N₂O advindas das atividades agrícolas representaram 95% do total de emissões deste gás no país (Cerri et al., 2009).

O fator de emissão (FE) direta de N₂O advindos da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos, adotados pelo IPCC (2019), é de 1%, ou seja 0,01 kg N₂O-N kg N⁻¹ aplicado. Porém, pesquisas nacionais demonstram variação deste FE de acordo com o tipo de fertilizante adotado e a dose aplicada, como por exemplo: para ureia, Siqueira Neto et al. (2016) encontrou fatores de emissão que variam de 0,52% a 0,83%, para doses de 80 kg N e 120 kg N em cana soca, respectivamente. Portanto, ao compararmos inventários que utilizaram FEs do Tier 1 e do Tier 2 conseguimos compreender se existem grandes diferenças entre as emissões estimadas com fatores globais e aquelas estimadas com fatores nacionais, podendo até mesmo encontrar estimativas superestimadas ou subestimadas.

As emissões indiretas de N_2O advém dos processos de volatilização e lixiviação dos fertilizantes nitrogenados. O FE adotado pelo IPCC para volatilização (FE_4) é o mesmo valor do FE de emissões diretas, 1%, ou seja, $0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N kg (NH}_3\text{-N + Nox-N)}^{-1}$. Isso porque em diversas revisões selecionadas pelo IPCC, como Liu e Greaver (2009) e Aronson e Allison (2012), ficou concluído que os valores não diferem das emissões diretas. Quanto ao FE_5 , fator para lixiviação, este vem do somatório de outros três fatores, chamados pelo IPCC de: FE_{5g} , FE_{5r} e FE_{5e} , que correspondem às emissões de N_2O das águas subterrâneas, de rios e reservas, e de estuários, respectivamente. Este fator tem um percentual, de acordo com o IPCC, de 1,1%, ou então $0,011 \text{ kg N}_2\text{O-N kg N}^{-1}$.

Já as frações perdidas por lixiviação e volatilização também podem ser encontradas em pesquisas nacionais, como de Cantarella et al. (2008) e Paredes et al. (2014). Essas frações complementam o cálculo de emissões indiretas pois dizem respeito à quantidade de N aplicado que será perdido para esses processos, muitas vezes possíveis de se reduzir por meio do manejo.

2.4.1. Fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos

Fertilizantes nitrogenados sintéticos são aplicados anualmente nas áreas estudadas visando manter a produtividade, e geralmente é seguida a recomendação de Cantarella e Mattos (2022). Para o plantio, independente da produtividade (t ha^{-1}) esperada, usualmente é recomendada a aplicação de 30 kg N ha^{-1} e para os próximos cortes da cana é recomendada a aplicação de 120 kg N ha^{-1} para produtividade esperada entre 100 e 120 t ha^{-1} .

Uma boa prática que as usinas normalmente adotam é que a ureia, quando utilizada em anos de “cana soca”, é aplicada em conjunto com a vinhaça localizada. Este líquido permite que a ureia, mesmo aplicada em superfície, tenha uma melhor infiltração no solo. Assim, é possível evitar, em grande parte, o processo de volatilização que ocorreria caso fosse aplicada em superfície, como foi avaliado por Oliveira et al. (2023). Esta redução na emissão de NH_3 se deve ao pH ácido da vinhaça junto da incorporação da ureia, beneficiada pelo meio líquido (Otto et al., 2017). Essa aplicação conjunta também reduz as emissões por diesel, já que subtraímos uma operação

Outras fontes de nutrientes muito utilizadas na cultura da cana-de-açúcar são os fertilizantes orgânicos. Os principais são os subprodutos do próprio processamento da cana-de-açúcar, a vinhaça e a torta de filtro, e ainda pode-se somar as cinzas e a fuligem que vêm da queima do bagaço nas caldeiras. Esta é uma boa prática adotada pois além de garantir um bom destino à resíduos da produção, promove também outros benefícios como a maior distribuição das raízes com aplicação de vinhaça por longos períodos (Paulino et al., 2011). Mas além dos subprodutos internos ao processo industrial, há a oportunidade de ampliar o uso de fertilizantes orgânicos com a compra de esterco, como a cama de frango reportada por Guimarães et al. (2016).

A adubação verde é outra boa prática adotada principalmente na época da reforma do canavial. A Crotalária (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*) é um grande exemplo, assim como culturas comerciais de ciclo curto como amendoim, soja e girassol, que são plantadas no período de pousio do canavial. Estes adubos verdes trazem benefícios observados na produtividade da cana e na redução do uso de fertilizantes nitrogenados nos próximos anos de cultivo, o que pode cooperar com a redução da emissão de N_2O . Ambrosano et al. (2013) demonstrou que, em diferentes tratamentos com 7 tipos de culturas de cobertura, a produtividade da cana-de-açúcar aumentou em média 30% em todos os tratamentos se comparados ao controle. E Park et al. (2010), por meio de modelos, demonstrou que o N advindo de leguminosas fica disponível no solo para o aproveitamento da cana-de-açúcar até o 4º corte, e durante o 1º corte pode eliminar toda a necessidade de adubação nitrogenada, além de também permitir reduções na adubação para os cortes subsequentes, sendo respectivamente: 60%, 25% e 10%.

2.4.2. Resíduos vegetais

Os resíduos vegetais deixados sobre e sob o solo também são fontes de emissões de N_2O . Esse material vegetal pode ser tanto da cultura principal, a cana-de-açúcar, ou então de culturas anuais ou adubos verdes plantados durante a reforma do canavial. Uma característica importante é a composição química do resíduo, como o teor de nitrogênio e também de lignina, pois definirá a mineralização do N no solo (Constantinides e Fownes, 1994). Huang et al. (2004), utilizando 5 tipos de resíduos vegetais, avaliaram a relação entre as emissões de N_2O e CO_2 e a relação C:N de

cada resíduo. Com uma variação de 8 a 118 nas relações C:N dos resíduos testados, concluíram que há uma correlação negativa entre as emissões e a relação C:N, ou seja, quanto maior a relação C:N, menor a emissão de ambos os gases.

Além disso, um fator importante que devemos considerar nos cálculos de emissões para resíduos vegetais da cana-de-açúcar é o percentual de nitrogênio que fica disponível para reações no solo. Basanta et al. (2002) reportou que o nitrogênio da palha sofre uma lenta decomposição, portanto não é todo o nitrogênio da palha que ficará passível de emitir N_2O , sendo liberado para esses processos apenas de 3 até 30% no período de 1 ano. Oliveira (1999) encontrou que 20% deste nitrogênio fica disponível no mesmo período.

2.5. Dióxido de carbono (CO_2) nas atividades agrícolas: Ureia e Calcário

A ureia ($CO(NH_2)_2$) é uma molécula composta por Carbono, Oxigênio e um radical amino que, ao ter contato com a água e por atuação da enzima urease, liberará amônia (NH_3) e o gás de efeito estufa, CO_2 . Um processo similar ocorre para o calcário, compostos por carbonato (CO_3), que ao entrarem em contato com a água, serão dissociados e uma das moléculas liberadas será o CO_2 . Diferentemente dos insumos de origem orgânica, que também liberam CO_2 durante suas reações no solo, o carbono advindo do calcário e da ureia são de origem fóssil, portanto devem ser considerados como emissões prejudiciais ao sistema.

Normalmente a calagem é realizada durante a reforma do canavial, mas também ocorrem aplicações de calcário nas áreas de cana-soca logo após o seu corte. É comum encontrar a adoção de um manejo que há cada dois anos (anos pares) realiza-se a análise do solo do canavial, e de acordo com o resultado é recomendado, ou não, aplicação de calcário superficialmente para elevar a saturação por bases do solo na camada superficial. O intuito deste tratamento é, além de fornecer cálcio e magnésio para a cultura, não deixar que o solo chegue ao final do ciclo de 5 ou até 8 anos da cana com uma acidez muito alta.

2.6. GEE emitidos por combustão móvel: Diesel

A categoria de combustão móvel diz respeito à queima de combustíveis fósseis através de meios de transporte. No inventário nacional construído pelo SEEG (2023a),

essa categoria se encontra dentro de “Energia e Processos Industriais”. Os autores do relatório ressaltam que 44% das emissões desses setores vêm do transporte, reforçando a necessidade de substituir o diesel utilizado para transportes de longa distância por algum combustível renovável.

Estudando também as emissões da produção da cana-de-açúcar com colheita de cana queimada versus a colheita de cana crua, Figueiredo e La Scala Jr. (2011) constataram que para a cana crua seus principais emissores foram os fertilizantes sintéticos nitrogenados (44% de todas as emissões) e o consumo de diesel (33% de todas as emissões). Ambos aumentaram o consumo com a transição para uma área sem queima. Porém, de toda forma, este novo manejo com colheita de cana crua reduziu 310,7 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ do total de emissões após a transição por evitar a queima do canavial.

Tratores, colhedoras e caminhões são os equipamentos que mais costumam consumir diesel quando olhamos para as operações de uma usina sucroenergética. Estudando especificamente a cultura da cana-de-açúcar, Macedo et al. (2004) realizaram um levantamento que permitiu estabelecer o consumo específico de diesel (l ha⁻¹) para cada uma das operações comumente realizadas no estado de São Paulo.

2.7. Escopo 3: emissões associadas a produção de insumos (diesel, fertilizantes sintéticos e defensivos agrícolas)

Todo insumo, ao ser produzido, acarreta uma emissão de GEE, no geral associado ao uso de energia para produzi-lo, sendo esta classificada como Escopo 3. Neste escopo considera-se produtos ou insumos que são esgotados na fase agrícola, como é o caso dos defensivos agrícolas (herbicidas, inseticidas e fungicidas), diesel e de fertilizantes sintéticos associadas à produção. Este tipo de emissão é um grupo que está na origem ou no final da cadeia de valor do produto, e sobre as quais a empresa fabricante do produto estudado não possui jurisdição para controle.

Defensivos agrícolas como herbicidas, inseticidas e fungicidas, que possuem formulação química e são produzidos sinteticamente, não possuem uma emissão direta a partir de sua aplicação no campo, porém durante sua produção é possível observar emissões pelo consumo de energia. Desta forma, pesquisas como de Lal

(2004) e Do Carmo et al. (2016) definiram FEs para tais produtos de acordo com seu ingrediente ativo.

2.8. Impacto das mudanças climáticas na produção agrícola

O volume global da produção agrícola, até o momento, não foi afetado pelas mudanças climáticas de uma maneira geral. Parry et al. (1999) demonstraram que isso já estava previsto para acontecer pois o aumento da temperatura em regiões de altas e médias latitudes beneficiaria a produção em locais que costumavam ser mais frios. Porter et al. (2014) comprovam esta previsão após 14 anos. Alguns exemplos são a expansão de áreas aptas ao cultivo em direção aos polos e a redução de estresses causados pelo frio nas regiões Leste da Ásia e na América do Norte (IPCC, 2021). Além da redução do ciclo de vida de diversas culturas (Ahmed et al., 2018; Shen e Liu, 2015; Tan et al., 2021), permitindo que ocorram mais safras.

O relatório do IPCC (2021) reforça que, apesar de avanços tecnológicos no campo da agricultura terem sido importantes para o aumento da produtividade, como o melhoramento vegetal, uso de fertilizantes, irrigação e o manejo integrado de pragas, existem comprovações de que as tendências climáticas também atuaram sobre a produtividade em regiões de médias e altas latitudes. Porém, fatores que atingem a agricultura variam tanto com a localização quanto com cultura cultivada, e, portanto, nota-se que os impactos negativos para a produção de alimentos ainda são maiores do que impactos positivos em regiões específicas. Efeitos positivos foram observados nas regiões do Norte da Europa e Oeste da Ásia para algumas culturas, como arroz e trigo (IPCC, 2021). Por sua vez, os efeitos negativos chamam a atenção nas regiões da América do Sul e Caribe, Sudeste da Europa e Ásia, e também na África Subsaariana (IPCC, 2021).

Analisando um fator denominado Produtividade Total dos Fatores (PTF), que avalia a produção a partir de todas as ferramentas empregadas nela (como mão de obra, capital, entre outros), Ortiz-Bobea et al. (2021) notaram que 1961 a 2015 este fator cresceu. Porém, em modelos futuros considerando as mudanças climáticas, o modelo demonstrou uma redução deste fator em 21% ao longo de 55 anos. Este efeito poderá impactar mais ainda continentes da África, América Latina e Caribe (IPCC, 2021). Praticamente todas as culturas alimentícias serão afetadas negativamente, em

diferentes níveis na América Latina, sendo milho, soja, trigo, cereais em geral e hortaliças, as de maior potencial para continuar sofrendo com impactos negativos (IPCC, 2021).

Atrasos na adaptação poderão causar ainda mais declínio na produção e qualidade dos alimentos. Manners e Van Etten (2018) ressaltam o baixo desenvolvimento de pesquisas sobre melhoria genética e seleção de cultivares mais resistentes à estresses bióticos e abióticos de culturas de importância alimentar. Em consequência das mudanças climáticas, haverá um declínio da biodiversidade de flora e fauna e assim, sistemas agrícolas tendem a ficar mais vulneráveis a pragas e doenças, além da redução dos polinizadores (IPBES, 2019).

A cana-de-açúcar, por sua vez, possui estudos variáveis quanto aos resultados das mudanças climáticas sobre sua produção. Em ambiente controlado, De Souza et al. (2008) demonstrou que com aumento da concentração de CO₂ na atmosfera ocorreria uma maior taxa fotossintética e com isso, maior produção de biomassa. Da mesma forma, Vu e Allen (2009) afirmam que o aproveitamento de água pela planta seria melhor, já que o aumento da concentração de CO₂ contribuiria com o fechamento dos estômatos, reduzindo transpiração. Por outro lado, estudos que utilizaram modelagens e adicionaram as altas temperaturas no cenário produtivo da cana-de-açúcar, consideram que poderá ocorrer um aumento a evapotranspiração e exigir irrigação que o desenvolvimento normal da cultura continue (De Carvalho et al., 2015; Dos Santos e Sentelhas, 2012). Contribuindo com essas afirmações, Jaiswal et al. (2023) observando alterações na produção em médio e longo prazo, reforça que a temperatura mais alta poderá gerar um desenvolvimento mais rápido da cultura, porém com menor qualidade por possuir menor teor de sacarose.

2.9. Soluções baseadas na natureza e estoques de C do solo

Soluções baseadas na natureza (*land-based solutions*) são assim nomeadas as práticas que apresentam facilidade de implementação e contribuem de forma significativa para a remoção de CO₂ da atmosfera. Algumas dessas soluções que possuem alto potencial de mitigação (acima de 3 Gt CO₂e ano⁻¹) são: redução do desmatamento; aumento da produtividade sobre áreas já manejadas; manutenção e incremento dos estoques de C sobre e sob o solo; combate a incêndios e redução de

perdas pós-colheita (Smith et al., 2019). Avaliando o potencial de sequestro de C pelo solo e por agroflorestas, Roe et al. (2019) apresentou os valores de 0,3 a 6,8 Gt CO₂e ano⁻¹ e 0,1 a 5,7 GtCO₂e ano⁻¹, respectivamente. Por sua vez, Paustian et al. (2016), o potencial de mitigação das práticas de manejo mais conservacionistas, que inclui a restauração de solos degradados e aumentar exploração do solo por alteração do fenótipo das raízes, pode alcançar valores maiores que 8 GtCO₂e ano⁻¹.

O incremento nos estoques de C do solo é considerado uma das soluções baseadas na natureza, porém existem diversos fatores que atuam sobre este carbono orgânico (C org). O próprio balanço do C no solo acontecerá por meio da adição de C via fontes orgânicas subtraindo as perdas que ocorrem por meio da decomposição ou então de erosões (Paustian et al., 2016). A depender de características ambientais do local, este estoque poderá sofrer mais perdas do que ganhos. La Scala Jr et al. (2022) em avaliação de estoques de C dos trópicos, constataram que esses são menores do que os estoques de regiões de climas frios, o que, para Ghimire et al. (2019), estaria relacionado à umidade do solo, temperatura e atividade microbiana mais intensa nas áreas de clima tropical.

Técnicas de manejo relacionadas às soluções baseadas na natureza adotadas no cultivo de cana-de-açúcar podem também beneficiar na redução das emissões, como demonstrado por Bordonal et al. (2012). Os autores compararam diferentes cenários, incluindo: colheita manual (cana queimada) e durante a reforma o canavial recebeu um preparo convencional; colheita mecânica (cana crua) e durante a reforma houve preparo convencional; colheita mecânica e durante a reforma ocorreu preparo reduzido; e, por fim, colheita mecânica, sendo que durante a reforma o preparo utilizado foi o reduzido com plantio de adubo verde, no caso, *Crotalaria juncea* L. Todos os cenários apresentaram emissões de CO₂e diferentes, e o que reforça a ideia de um manejo conservacionista ser benéfico é que a emissão do cenário que consistiu em colheita mecânica, preparo reduzido e plantio de adubo verde, evitou 9,5 tCO₂e ha⁻¹ se comparado ao cenário de cana queimada. Ao comparar este cenário, o mais conservacionista, ao cenário de colheita mecânica e preparo reduzido, sem o plantio do adubo verde, também houve uma diferença de 0,7 tCO₂e ha⁻¹. Essa redução pode ser explicada por o último cenário reduziu o consumo de fertilizantes sintéticos nitrogenados após a implantação do adubo verde. Pois a Crotalária é uma planta

leguminosa com capacidade de sequestrar nitrogênio e deixá-lo disponível no solo para a cultura posterior (Costa et al., 2008).

2.10. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura considerada semiperene, pois é colhida anualmente, mas não plantada anualmente. A rebrota das partes vegetativas da cultura que ficaram no solo após a colheita, ocorre anualmente e são chamadas de soqueiras. Normalmente estes ciclos de colheita e rebrota ocorrem ao longo de 5 ou 6 anos, e ao final deste período o canavial é reformado e um novo plantio é realizado após pousio que pode durar de 3 a 4 meses. Durante o pousio, culturas de rotação, consideradas adubos verdes, ou então soja e amendoim, podem ser plantadas tanto para beneficiar o solo com aporte de nutrientes como para ganhos econômicos.

A sua importância econômica cresceu com a criação da Proálcool no momento da crise do petróleo, na década de 70 e após os anos 90 o álcool etílico anidro passou a ser utilizado em conjunto com a gasolina, o que impulsionou o cultivo de cana-de-açúcar (Siansi, 2024). Além de políticas internas que foram importantes patrocinadoras da produção do etanol (Kohlhepp, 2010), compromissos ambientais internacionais também colocaram os combustíveis renováveis em foco, como o Protocolo de Kyoto (Soares e Zukowski Jr., 2021). Atualmente o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, atrás apenas dos Estados Unidos (RFA, 2024) e a principal região produtora do país é o sudeste que aumentou seu volume colhido na safra 2023/2024 em 21%, mesmo com redução de área de 0,6% (CONAB, 2024).

Além do aumento de estudos para hibridação e produção de novos cultivares de cana-de-açúcar que sejam mais tolerantes a doenças e adaptadas a condições climáticas específicas de acordo com a região (Landell e Bressiani, 2008), também foram intensificadas as pesquisas para melhorias no plantio da cana-de-açúcar. Foi observado, com o plantio mecânico, que é comum a ocorrência de falhas por gemas não brotadas, provavelmente pelo encontro de condições desfavoráveis à brotação. Como uma solução a isso, o IAC – Instituto Agrônomo de Campinas, desenvolveu o plantio de Mudanças Pré-Brotadas (MPBs).

Gemas individuais plantadas e cultivadas em ambientes controlados, passarão por uma série de etapas, de brotação à aclimatização, antes de ir ao campo. O objetivo

desse tipo de plantio é obter mudas com padrão fitossanitário adequado e vigor, o que favorece a uniformidade do plantio e do desenvolvimento dessas canas (Nicchi, Cardozo e Vieira, 2020). Além disso, essa modalidade de plantio permite a redução do consumo de matéria-prima para produção de mudas, ou seja, mais matéria-prima será destinada ao processo industrial e ao produto final. O modelo convencional de plantio mecânico utiliza cerca de 18 a 20 toneladas de mudas para plantar 1 hectare, enquanto o método de produção de MPB utiliza 2 toneladas para o mesmo 1 hectare (De Marco et al., 2017).

Outro sistema de plantio que é muito utilizado atualmente é o “Método inter ocupacional ocorrendo simultaneamente”, mais conhecido como Meiosi (CTC, 2019). Este método consiste em plantar cerca de uma ou duas linhas de cana entre vãos de pousio, sendo que essas duas linhas se desenvolverão no tempo suficiente para se tornarem mudas que serão plantadas posteriormente nos vãos. Essas linhas contemplam uma razão de 1:4 até 1:24, ou seja, uma “rua mãe” de cana pode ser “desdobrada”, como é normalmente chamado, ou convertidas para 24 linhas. Isso permite que haja o plantio de outras culturas de rápido desenvolvimento ou então de adubos verdes como Crotalária, que são benéficos à saúde do solo. Este plantio passa a ser considerado “plantio de 18 meses” ou “cana de ano e meio”, pois há um desenvolvimento mais longo deste canavial que varia de 16 a 18 meses até a primeira colheita. Da Costa et al. (2019) ressalta que o sucesso do sistema de meiosi está diretamente associado ao uso de MPBs para montar as linhas de cana que posteriormente serão desdobradas, já que essas mudas possuem padrões de qualidade superiores.

Ao longo do desenvolvimento do canavial e após os cortes, ocorrem diferentes operações de tratos culturais, que envolvem a aplicação de fertilizantes sintéticos, fertilizantes orgânicos, aplicação de defensivos agrícolas (inseticida, herbicida e fungicidas), calcário e gesso. Todas as operações consomem diesel e a maioria dos insumos aplicados reagem com o solo e emitem gases como CO₂ e N₂O. Portanto, fica evidente a importância da construção de inventários de GEE para direcionar esforços e o planejamento de medidas mitigatórias de tais emissões.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

As três áreas selecionadas estão localizadas dentro de uma mesma mancha de solo, na cidade de Rincão (21° 37' 45" S e 48° 06' 32" W, e altitude média de 530 m) entre os municípios de Araraquara e Ribeirão Preto (Figura 1). Com características de clima tropical com estação seca de inverno de acordo com a classificação de Köppen e Geiger Aw. A cidade de Rincão apresentou, durante o período do estudo (de 2014 a 2023) uma precipitação anual média de 988,51 mm e temperatura média de 23,8 °C (NASA, 2024).

As áreas de estudo receberam o plantio de “cana de 18 meses”. Apesar de apresentarem o mesmo tipo de plantio e tipo de solo, as áreas se diferem quanto aos sistemas de manejo, classificado especialmente pelo preparo do solo, como preparo convencional, intermediário e reduzido (SC, SI e SR, respectivamente). Essa seleção foi feita para contrastarmos as emissões e os estoque de C do solo.

O levantamento de dados para a escolha dessas áreas e posterior estimativa a partir da construção do inventário de emissões de GEE em 3 sistemas distintos foi realizado por meio da análise do banco de dados de uma usina sucroenergética, localizada na região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo (SP), Brasil. O levantamento e classificação do solo indicou que o mais predominante entre as áreas pertencentes à usina é o Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) como classificado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e textura argilosa.

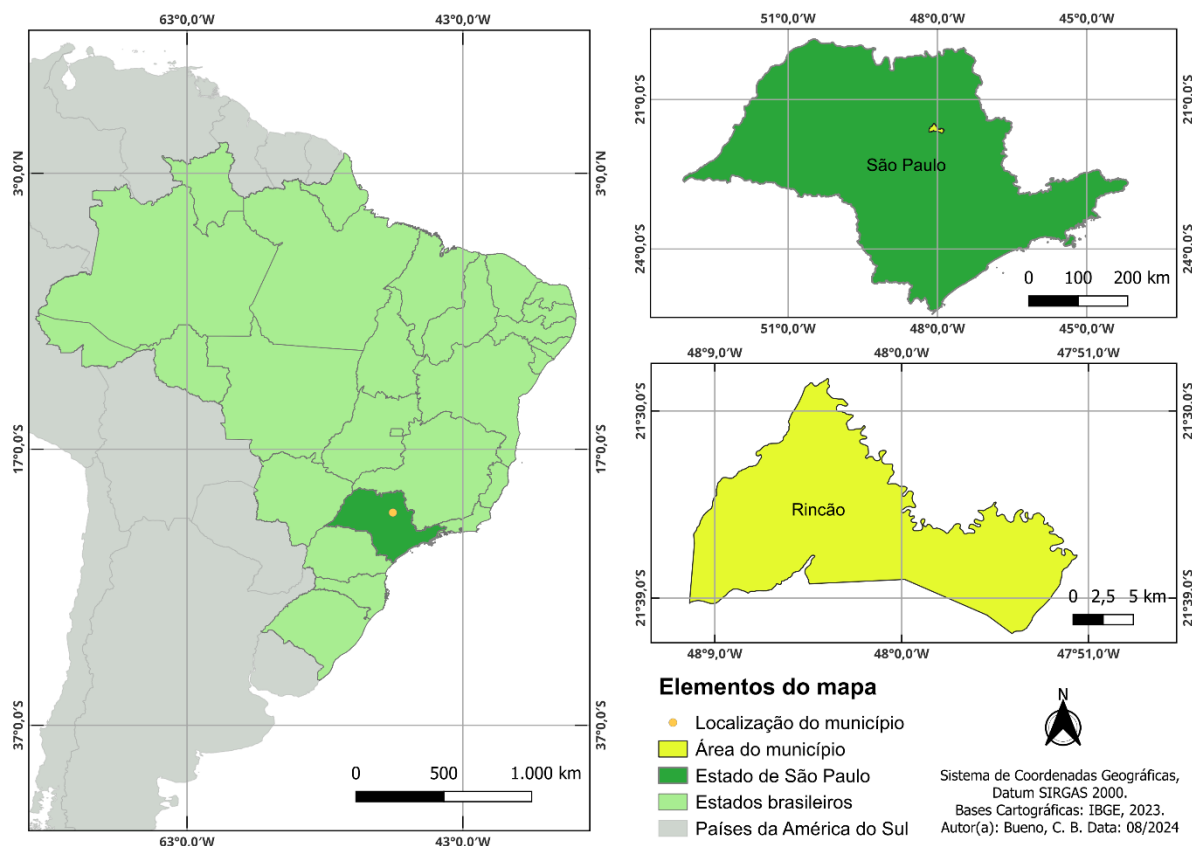


Figura 2 – Representação gráfica da localização da cidade de Rincão, no estado de São Paulo, na qual os três sistemas de produção estão localizados.

3.2. Sistemas de produção de cana-de-açúcar

Para este trabalho, foram considerados 3 sistemas de produção diferenciados especialmente pelo preparo de solo conduzido na reforma do canavial, e pelo padrão de insumos utilizados ao longo dos anos de 2014 a 2023 de tratamentos culturais. Sendo o Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), o solo que apresentou maior predominância nas áreas da usina. Portanto, áreas sobre essa mancha de solo foram priorizadas.

Os sistemas de produção também diferem devido a incidência de pragas em algumas áreas, como o *Sphenophorus levis*. Em casos como esses, o manejo desde o preparo do solo exige cuidados diferentes. A intensidade de tratamento para prevenir e remediar o ataque de pragas, variará de acordo com o nível de infestação que é constantemente monitorado ao longo dos anos.

Inicialmente foi realizado um extenso levantamento das operações empregadas na reforma e no trato dos canaviais, em 9 anos do histórico de manejo de todas as áreas com solo classificado como LVdf, desde 2014 a 2023. Assim, as

áreas selecionadas foram classificadas de acordo com as operações empregadas no preparo de solo e, para fins comparativos, elas também deveriam estar no mesmo ano de corte (Tabela 1). Ou seja, as áreas selecionadas deveriam ter passado pela reforma na mesma safra, neste caso, safra 2019/2020. Em seguida também foi avaliado o volume de insumos utilizados ao longo dos anos. Portanto, os três sistemas considerados foram:

1. Manejo convencional: sistema que recebeu preparo de solo convencional e que durante o cultivo de cana-de-açúcar precisou de maior interferência dos tratos culturais. Essa interferência maior do processo de tratos culturais pode se caracterizar por maior aplicação de insumos por conta de pragas, doenças e/ou plantas daninhas, e/ou necessidade de aumento de produtividade. As operações consideradas na reforma do canavial e que definiram tal sistema foram: gradagem pesada, gradagem niveladora, seguida por duas subsolagens;

2. Manejo intermediário: área que não permite a mínima interferência dos tratos culturais, porém não necessita de preparo intensivo na reforma do canavial, como o manejo convencional. As operações consideradas na reforma do canavial e que definiram este segundo sistema, foram: gradagem niveladora seguida de duas subsolagens;

3. Manejo reduzido: área que recebeu preparo reduzido durante a reforma e, durante o cultivo da cana-de-açúcar, é um sistema que foi passível de menor intervenção e/ou com práticas compreendidas como mais sustentáveis nos tratos culturais. A operação específica da reforma do canavial que definiu este sistema, foi apenas: subsolagens.

A avaliação da emissão de GEE foi conduzida para um período de 9 anos, desde a safra 2014/2015, sendo este o histórico máximo de informações para tais áreas.

Tabela 1 – Características principais das áreas selecionadas como sistemas de produção para o estudo.

	Convencional	Intermediário	Reduzido
Área (ha)	152	32	44
Produtividade média (t/ha)	61	66	71
Safra de reforma	19/20	19/20	19/20
Tipo de solo	LVdf	LVdf	LVdf
Textura do solo	Argilosa	Argilosa	Argilosa
Preparo de solo	Gradagem pesada + Gradagem niveladora + Subsolagens	Gradagem niveladora + Subsolagens	Subsolagens

As áreas e os correspondentes sistemas de produção selecionados formam a base dos tratamentos estudados para a construção dos inventários de emissão de GEE, bem como para as análises e determinação dos estoques de carbono e nitrogênio do solo (camadas de 0 a 100 cm).

3.2.1. Linha do tempo de operações e doses

Para facilitar a visualização e entendimento sobre operações e insumos aplicados ao longo do período estudado nos três tratamentos, foram construídas linhas do tempo em ilustração para as operações (Figura 2) e em tabelas para as doses (Tabela 2).

A linha do tempo das principais operações de manejo conduzidas no período de 2014 a 2023, durante 9 safras, nos sistemas de produção estudados (SC, SI, SR). Em todos os anos e em todos os sistemas foram conduzidas as 3 principais etapas de manejo: preparo e plantio, tratos culturais e colheita (Figura 2).

LINHA DO TEMPO DE OPERAÇÕES

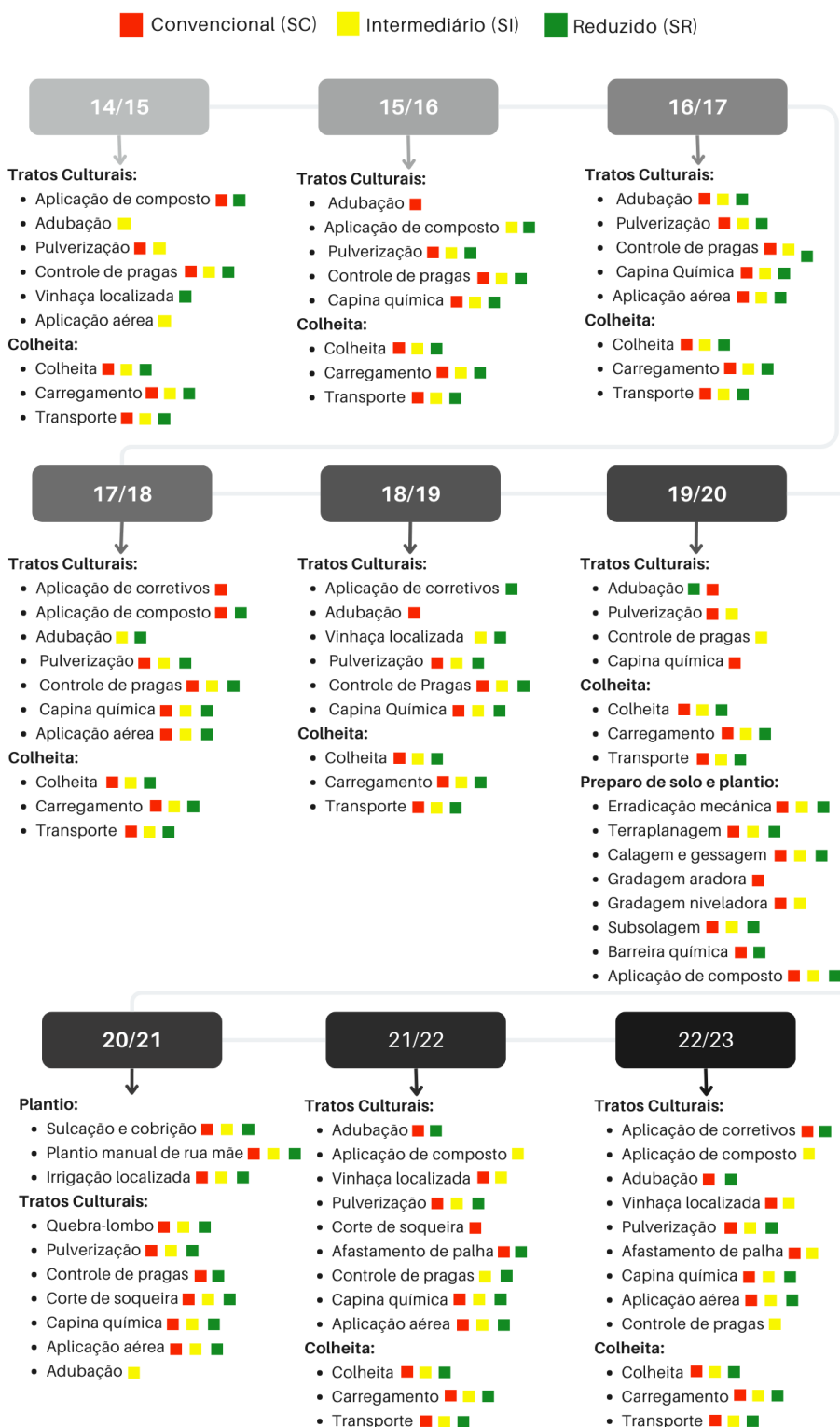


Figura 3 – Linha do tempo das operações ao longo das safras 2014/2015, nos três sistemas de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Tabela 2 – Doses por insumo aplicado e por safra, para cada um dos sistemas de produção estudados. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido (continua).

Sistema	Insumos	Dosagens (kg ha ⁻¹)								
		14/15	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23
SC	Ureia (kg N ha ⁻¹)	-	-	10,4	11,1	-	-	7,3	83,1	61,4
SI		-	-	-	9,6	87,6	1,2	9,2	47,7	64,9
SR		-	-	11,8	12,5	98,0	-	4,8	-	1,9
SC	Fertilizantes nitrogenados (kg N ha ⁻¹)	47,2	96,5	109,8	39,3	99,5	-	-	6,2	7,2
SI		102,8	45,5	91,0	91,0	-	-	-	6,2	-
SR		53,4	109,2	127,3	44,5	5,5	-	-	0,5	7,8
SC	Fertilizante fosfatado (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	1,5	24,1	27,5	1,2	24,9	-	-	5,6	14,4
SI		25,7	-	22,8	22,8	-	-	-	35,9	-
SR		1,7	-	-	1,4	36,5	-	-	-	15,6
SC	Fertilizante potássico (kg K ₂ O ha ⁻¹)	-	91,7	104,3	-	94,5	70,5	-	42,9	2,4
SI		97,7	-	86,5	86,5	-	-	-	0,6	-
SR		-	-	-	-	-	-	-	27,2	2,6
SC	Torta de filtro (kg N ha ⁻¹)	42,9	-	-	44,1	-	53,9	-	-	-
SI		-	27,9	-	-	-	64,2	-	25,6	25,0
SR		48,6	-	-	49,8	-	59,3	-	-	-
SC	Vinhaça (kg N ha ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	8,7	8,9
SI		-	-	-	-	21,2	-	-	28,5	1,5
SR		-	-	-	-	26,3	-	14,9	-	-
SC	Cama de frango (kg N ha ⁻¹)	134,5	-	-	129,4	-	134,9	-	-	-
SI		-	130,7	-	-	-	126,8	-	-	-
SR		152,1	-	-	146,3	-	113,3	-	-	-

Tabela 2 – Doses por insumo aplicado e por safra, para cada um dos sistemas de produção estudados. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido (conclusão).

Sistema	Insumos	Dosagens (kg ha ⁻¹)								
		14/15	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23
SC	Calcário (kg ha ⁻¹)	119,4	-	-	2083,0	-	3077,0	-	-	1592,9
SI		-	2096,8	-	-	-	3571,0	-	374,1	503,0
SR		1039,0	-	-	1163,4	1322,4	2875,8	-	-	689,0
SC	Gesso (kg ha ⁻¹)	459,3	-	-	514,3	-	1603,8	-	-	265,5
SI		-	1048,4	-	-	-	1243,9	-	-	-
SR		519,5	-	-	581,7	-	1238,7	-	-	160,8
SC	Herbicida (kg ha ⁻¹)	1,5	6,5	6,9	6,8	5,7	2,3	3,2	2,5	0,9
SI		1,4	6,3	3,3	12,4	8,5	21,2	5,6	3,6	0,8
SR		1,7	7,7	8,7	8,0	6,6	1,1	1,9	0,8	0,6
SC	Inseticida (kg ha ⁻¹)	-	-	-	-	-	0,3	0,1	0,3	0,0
SI		-	-	-	-	-	0,3	0,1	0,3	0,1
SR		-	-	-	-	-	0,3	0,1	1,1	-
SC	Fungicida (kg ha ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	0,0	-	-
SI		-	-	-	-	-	-	-	-	-
SR		-	-	-	-	-	-	0,1	0,2	0,1

3.2.2. Comparativo entre sistemas de produção

Ao compararmos os sistemas de produção apresentados, é possível notar que o fornecimento de nitrogênio do SC é majoritariamente de fertilizantes nitrogenados sintéticos e ureia (Tabela 2). Sendo a maior dose de N aplicado por meio de fertilizantes nitrogenados: 109,8 kg N ha⁻¹ na safra 16/17, seguido por 99,5 kg N ha⁻¹ na safra 18/19. No geral, é possível notar três safras com altas doses de fertilizantes nitrogenados (acima de 90 kg N ha⁻¹): 15/16, 16/17 e 18/19. Para ureia a maior dose

foi de 83,1 kg N ha⁻¹ na safra 21/22, seguida de 61,4 kg N ha⁻¹ na safra 22/23, ambas são as safras com maiores doses aplicada de ureia em todo o período estudado. Enquanto isso, os fertilizantes orgânicos no SC tiveram sua maior contribuição nas safras 14/15, 17/18 e 19/20, com as doses: 177,4 kg N ha⁻¹, 173,4 kg N ha⁻¹ e 188,9 kg N ha⁻¹, respectivamente, somando cama de frango e torta de filtro.

No SR a visão é diferente, o maior fornecimento de nitrogênio é majoritariamente de fertilizantes orgânicos, destacando-se as safras 14/15, 17/18 e 19/20, com as doses de cama de frango e torta de filtro contribuindo com: 200,7 kg N ha⁻¹, 196,2 kg N ha⁻¹ e 172,9 kg N ha⁻¹, respectivamente. Já os fertilizantes sintéticos contribuíram com doses acima de 90 kg N ha⁻¹ apenas nas safras 15/16 e 16/17, sendo elas: 109,2 kg N ha⁻¹ e 127,3 kg N ha⁻¹. As outras safras dentro do período estudado tiveram doses de fertilizantes nitrogenados abaixo de 60 kg N ha⁻¹. Enquanto a ureia teve relevância apenas na safra 18/19, quando contribuiu com 98,0 kg N ha⁻¹.

3.3. Estimativa de emissões de GEE

A estimativa de emissão de GEE a partir dos sistemas de produção seguiu o *Guidelines for national greenhouse gas inventories* do IPCC, metodologia lançada em 2006 e com uma atualização em 2019 (IPCC, 2019). A metodologia do IPCC visa auxiliar os países no cálculo de seus inventários produzindo estimativas padronizadas a partir de FEs baseados na revisão de pesquisas globais. Os inventários normalmente são divididos em três escopos de avaliação, como citado no tópico 2.1. desta dissertação. Estes escopos contemplam emissões por advindas do manejo (Escopo 1), emissões pelo uso de energia elétrica (Escopo 2) e emissões advindas da produção dos insumos a serem utilizados (Escopo 3). Apenas as emissões advindas do uso de energia elétrica foram desconsideradas neste trabalho devido ao foco em apenas três fazendas e não a usina toda.

O limite considerado nesse estudo foi apenas as atividades agrícolas, o campo. Fontes de emissão industriais e administrativas foram desconsideradas nas estimativas. O processo de uma usina sucroenergética envolve diferentes fases que, por sua vez, possuem outras fontes de emissão de GEE. Um exemplo são os gases refrigerantes que podem vazar de maquinários, como os hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Além de outros

relacionados ao processo industrial, como: a fermentação do etanol e até mesmo a compra de energia elétrica. Porém, essas fontes de emissão só seriam válidas no caso da construção de inventários em que o limite é toda a usina.

Portanto, as fontes de emissão consideradas para o inventário de GEE nesse trabalho foram: a) emissão de CO₂ advinda da aplicação de calcário; b) emissão direta e indireta de N₂O pela aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos, orgânicos, e ureia; c) emissão direta e indireta de N₂O pela decomposição dos resíduos vegetais deixados sobre o solo; e) emissão de CO₂ pela aplicação de ureia; f) emissões advindas da produção de defensivos agrícolas (herbicidas, inseticidas e fungicidas) e fertilizantes sintéticos utilizados na lavoura; f) emissões de CO₂, N₂O e CH₄ das fontes móveis, relacionadas ao consumo de diesel nas operações agrícolas.

Tabela 3 – Fontes de emissão de GEE do setor agrícola. Fontes móveis e produção de insumos, classificados em Escopo 1, e emissões a partir da produção de insumos comprados, classificadas em Escopo 3.

Escopos	Fonte de emissão
Escopo 1	Emissões diretas e indiretas de N: - Fertilizantes sintéticos nitrogenados - Ureia - Adubos orgânicos (vinhaça, torta de filtro e cama de frango) - Nitrogênio advindo da decomposição dos resíduos
	Emissão de CO₂ advinda de insumos: - Aplicação de ureia - Aplicação de calcário
	Emissão de CO₂, N₂O, CH₄: - Combustão móvel por uso de diesel pelo maquinário agrícola.
Escopo 3	Emissões de GEE na produção dos insumos: - Fertilizantes sintéticos - Inseticidas - Fungicidas - Herbicidas - Calcário - Gesso
	Emissões de GEE na produção de combustíveis: - Diesel

Os dados de entrada para cálculo vieram do histórico de manejo de cada uma das áreas, fornecido pela usina. Estes históricos continham a quantidade de insumos utilizados no manejo da cultura, assim como o consumo específico de diesel para cada operação e atividades relacionadas. Estes foram divididos de acordo com as fontes e escopos definidos acima (Tabela 3). Os cálculos envolveram as estimativas de emissões anuais de GEE bem como, ao final do estudo, o comparativo entre estimativas com FEs globais (Tier 1) e FEs regionais (Tier 2).

Os FEs que podem ser de até três níveis, denominados Tiers pelo IPCC (2006). O Tier 1 diz respeito a fatores globais que foram obtidos através de revisão de diversas pesquisas internacionais, fornecidos pelo IPCC em suas metodologias. O Tier 2 possui um caráter nacional/regional, podendo ser obtido através de pesquisas reconhecidas do país ou de algum estado, e aplicado nas regiões respectivas. Enquanto o Tier 3 tem um caráter local, pois os fatores de emissão são medidos dentro da própria propriedade a ser inventariada.

Os FEs direta e indireta, além das frações perdidas por lixiviação e volatilização, foram de Tier 2 sempre que possível, ou seja, advém de pesquisas já desenvolvidas no país, como de Paredes et al. (2014), Ghiberto et al. (2011), Ghiberto, Libardi e Trivelin (2015) e Siqueira Neto et al. (2016). Baseados tanto nos artigos brasileiros que fazem parte da revisão da metodologia do IPCC (2019) para definição dos fatores de Tier 1, como no Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCTI, 2021) e nos relatórios de Análise de Emissões de GEE do Sistema de Estimativa de Emissões de GEE (SEEG, 2023a) do Observatório do Clima.

A despeito da existência de calculadoras, como o *IPCC Inventory Software* e planilhas disponibilizadas por institutos de pesquisa como o *World Resources Institute* (WRI) em parceria com o *GHG Protocol* Brasil, programa brasileiro para contabilização de GEE por cidades, estados e empresas; as estimativas deste estudo foram conduzidas utilizando planilha construída internamente, com todos os cálculos expressos pelo IPCC transcritos nesta planilha e fatores de emissão como explicados acima.

Além dos FEs, o potencial de aquecimento global (PAG) de cada um dos gases emitidos foram considerados para o cálculo final de emissões. O PAG é um índice que

mede a capacidade de um gás aquecer a atmosfera, ou seja, reter calor, sempre comparado ao CO₂ e apresentado em unidades deste gás, o que nos resultaria em um valor de CO₂ equivalente (CO₂e). O PAG é calculado de acordo com o forçamento radiativo do gás em um período de tempo determinado, que para o IPCC é dado em 20 anos ou 100 anos. O PAG considerado neste estudo foi para o período de tempo de 100 anos e obtido no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC sobre Potenciais de Aquecimento Global (2021). Enquanto o CO₂ corresponde ao valor 1, o PAG do N₂O e do CH₄ são, respectivamente, 273 e 29,8 (IPCC, 2021).

A planilha de cálculo para este trabalho (Figuras 3 a 9) foi composta por: abas para cada ano safra inventariado (safra 14/15 a 22/23), para FEs, consumo específico de combustível e uma aba compilando as emissões de todos os anos inventariados. A mesma estrutura segue para cada um dos sistemas de produção, variando apenas os valores imputados.

Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa das atividades agrícolas

Cenário: Convencional

Fazenda: XXX

Gleba: YYY

Somatório - E1

Safras	14/15	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23	Total
tCO ₂ e	292	173	186	375	113	502	18	180	315	2153
Área	166	166	166	166	166	166	123	123	123	152
Toneladas	12112	14838	14550	10610	7925	9436	0	6153	10034	85658
kg CO ₂ e/tc	24,12	11,66	12,76	35,37	14,22	53,19	0,00	29,25	31,36	25,13
kg CO ₂ e/ha	1761	1043	1119	2262	679	3025	143	1460	2552	14190
TCH	73	89	88	64	48	57	0	50	81	61

Somatório - E3

Safras	14/15	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21	21/22	22/23	Total
tCO ₂ e	61	115	127	71	103	65	15	88	80	725

E1 + E3

Total tCO ₂ e	353,53	287,82	312,99	446,05	215,96	566,58	32,55	267,75	394,29	2877,52
kg CO ₂ e/tc	29,19	19,40	21,51	42,04	27,25	60,04	0,00	43,51	39,30	33,59
kg CO ₂ e/ha	2131	1735	1886	2688	1302	3415	264	2172	3198	18965

Classes de emissões (tCO₂e) - E1

										Total
Fertilizantes sintéticos	21	44	59	27	45	0	4	77	70	347
kg CO ₂ e/ha	128,30	262,17	353,46	165,49	270,28	0,00	35,21	628,53	564,82	2288,50
Fertilizantes orgânicos	95	0	0	93	0	100	0	6	6	300
kg CO ₂ e/ha	573,01	0,00	0,00	558,20	0,00	602,57	0,00	47,74	48,82	1974,45
Corretivos	115	0	0	151	0	223	0	0	115	604
kg CO ₂ e/ha	694,36	0,00	0,00	908,01	0,00	1341,32	0,00	0,00	934,38	3978,44

Figura 4 – Aba de somatório de emissões da planilha de inventário.

Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa das atividades agrícolas

Cenário: Convencional

Fazenda: XXX

Gleba: YYY

Ano: 19/20

Estágio: 6º Corte / Reforma

Input de dados

Estoque de Carbono

Cultura principal

Área de Cultivo	ha	166
Estágio de Corte	-	6º corte / reforma
Área de preparo	ha	123
Preparo de solo	-	Convencional
Produtividade	tch	56,872
Produção	ton	9436
Resíduos	ton MS	0,00

Cultura secundária

Área da cultura de cobertura	ha	105,6
Produção	ton	397

Figura 5 – Células de input de dados de produtividade e manejo da área a ser analisada (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

Emissões Diretas				
Fertilizantes Nitrogenados - FSN	Dose	kg	N	kg N-N₂O
Nitrato de Amônio			0,000	0,000
Ureia (120 kg N/ha)			0,000	0,000
Ureia (80 kg N/ha)			0,000	0,000
MAP			0,000	0,000
Formulados			0,000	0,000
Teor N	%			
Outros fertilizantes nitrogenados			0,000	0,000
Teor N	%			
Outros fertilizantes nitrogenados			0,000	0,000
Teor N	%			
Outros fertilizantes nitrogenados			0,000	0,000
Teor N	%			
Fertilizantes Nitrogenados em Cana Planta				
Nitrato de Amônio			0,000	0,000
Ureia			0,000	0,000
MAP			0,000	0,000
Fertilizantes Orgânicos - Fon	Dose	kg ou m³	N	kg N-N₂O
Vinhaça (150m³/ha)			0,000	0,000
Vinhaça (200m³/ha)			0,000	0,000
Vinhaça (300m³/ha)			0,000	0,000
Torta de Filtro (25t/ha)	1t t/ha	1152758,4	8184,584	13,914
Torta de Filtro (40t/ha)			0,000	0,000
Cama de Frango		499425,61	20476,450	81,906
Resíduos - Fcr				
Cana de Açúcar		kg N (resíduos sobre o solo)	kg N (resíduos sob o solo)	kg N-N₂O
Emissões dos resíduos da cultura	-	10587	1059	16,770
Cultura de rotação/Adubo verde	CROP	Agdm	N	kg N-N₂O
Emissões dos resíduos da cultura de rotação	3270,417	6465,614409	7841,326	33,718

Figura 6 – Células de input de dados, como volume de insumos, e de cálculos de emissões diretas de N₂O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

Figura 7 – Células de cálculos de emissões indiretas de N₂O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

Emissões Diretas de CO2			
		kg	t C-CO2
Ureia	-		0
Calcário dolomítico		466892,28	60,696
Calcário calcítico	-		0

Figura 8 – Células de input de dados, como volume de insumos, e de cálculos de emissões de CO₂ (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

Emissões Diretas por Diesel						
Operações de preparo	área (ha)	litros	kg CO2	kg CH4	kg N2O	kg CO2e
Aplicação Corretivos	331,84	1388,4	3886,874	0,218	1,500	4302,915
Gradagem Aradora	115,01	3114,9	8720,380	0,488	3,366	9653,787
Gradagem Niveladora	88,74	1344,5	3764,204	0,211	1,453	4167,115
Subsolagem	331,84	9086,1	25437,533	1,425	9,818	28160,300
Eliminador mecânico	165,92	3629,5	10161,188	0,569	3,922	11248,815
Terraplanagem	331,84	1128,3	3158,678	0,177	1,219	3496,775
Operações de plantio						
Cobrição		0,0	0	0	0	0
Sulcação		0,0	0	0	0	0
Aplicação de Composto	165,92	2001,6	5603,630	0,314	2,163	6203,428
Operações de lavoura						
Quebra Lombo		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Quebra Lombo com Herbicida		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Adubação Unifort		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Adubação Trator	123,40	853,1	2388,448	0,134	0,922	2644,102
Vinhaça Localizada		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Pulverização Patriot	123,40	152,5	426,902	0,024	0,165	472,597
Pulverização Tanque		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Corte de Soqueira		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Afastamento de Palha		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Irrigação Localizada		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Raçadeira		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Controle de Pragas (Formiga e Cigarrinha)		0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
Barreira Química	144,92	3968,0	11108,990	0,622	4,288	12298,067
Herbicida Quadríciclo	87,96	70,9	198,505	0,011	0,077	219,753
Total						82867,653
Operações de colheita						
	tc	l/tc				
Colheita 19/20	9436,202	8303,858	23247,573	1,302	8,973	25735,932
Transbordo 19/20	9436,202	5001,187	14001,379	0,784	5,404	15500,050
Caminhão 19/20	9436,202	7077,152	19813,272	1,110	7,647	21934,033

Figura 9 – Células de input de dados relacionados ao diesel e de cálculos de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O (aba de cálculos da planilha de estimativa de emissões). Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

Escopo 3		
	kg	kg CO2e
Herbicida	344,476	6286,694
Inseticida	46,754	691,487
Fungicida		0,000
Formulação		0,000
Fertilizante Nitrogenado	0,000	0,000
Fertilizante Fosfatado	0,224	0,253
Fertilizante Potássico	10693,573	7592,437
Calcário	466892,280	4668,923
Diesel	40304,850	37886,559
Gesso	243356,200	7300,686
	tCO2e	64,624
Ingredientes Ativos Específicos		
	kg a.i.	kg CO2e
Glifosato	5,237	196,904

Figura 10 – Células de input de dados de insumos para cálculos do Escopo 3. Valores da imagem correspondem a um ano safra do sistema de produção convencional (SC).

3.3.1. Emissões diretas e indiretas de óxido nitroso (N₂O) a partir do manejo agrícola

Para cada insumo aplicado foram utilizados FEs específicos tanto para emissões diretas (Tabela 4), e como para emissões indiretas (Tabela 5). Em um complemento aos cálculos de emissões indiretas, também devem ser utilizados valores de frações perdidas para lixiviação e volatilização (Tabela 6).

Tabela 4 – Fatores de emissão (FE) direta de N₂O, Tiers 1 e 2, para cálculo de Escopo 1 do inventário de GEE (kg N₂O-N kg N⁻¹).

Insumos	FE % - Tier 1	Fontes - Tier 1	FE % - Tier 2	Fontes - Tier 2
<i>Cana Soca</i>				
Ureia (80 kg N)	1,00	IPCC (2019)	0,52	Siqueira Neto et al. (2016)
Ureia (120 kg N)	1,00	IPCC (2019)	0,83	Siqueira Neto et al. (2016)
Nitrato de Amônio	1,00	IPCC (2019)	0,25	Siqueira Neto et al. (2016)
Outros fertilizantes sintéticos	1,00	IPCC (2019)	-	-
Vinhaça (150m ³ /ha)	1,00	IPCC (2019)	0,77	Siqueira Neto et al. (2016)
Vinhaça (300m ³ /ha)	1,00	IPCC (2019)	0,54	Siqueira Neto et al. (2016)
Outros fertilizantes orgânicos	1,00	IPCC (2019)	-	-
<i>Cana Planta</i>				
Nitrato de Amônio (60kg N)	1,00	IPCC (2019)	0,44	Siqueira Neto et al. (2016)
Ureia (60kg N)	1,00	IPCC (2019)	0,52	Siqueira Neto et al. (2016)
Torta de filtro (25 t/ha)	1,00	IPCC (2019)	0,17	Siqueira Neto et al. (2016)

Por conta da dificuldade em encontrar pesquisas brasileiras focadas nos FEs desses processos indiretos de reação do fertilizante no solo, os fatores utilizados para os cálculos não puderam ser do Tier 2 neste caso (Tabela 5).

Tabela 5 – Fatores de emissões (FE) indiretas, de volatilização (kg N₂O-N kg (NH₃-N + Nox-N) volatilizados⁻¹) e lixiviação (kg N₂O-N kg N lixiviado⁻¹) de N₂O do Tier 1, para cálculo de Escopo 1 do inventário de GEE.

Insumos	FE	Unidade	Fonte
Volatilização (FE4)	1,00	kg N ₂ O-N kg (NH ₃ -N + Nox-N) volatilizados ⁻¹	IPCC (2019)
Lixiviação (FE5)	1,10	kg N ₂ O-N kg N lixiviado ⁻¹	IPCC (2019)

Para as frações perdidas (Frac) de N, por volatilização e lixiviação, foi possível aplicar fatores oriundos de pesquisas brasileiras, como de Cantarella et al. (2008), Paredes et al. (2014) e Ghiberto, Libardi e Trivelin (2015).

Tabela 6 – Frações (Frac) perdidas de N por volatilização (kg (NH₃-N + Nox-N) kg N aplicado⁻¹) e lixiviação (kg N lixiviado kg N aplicado⁻¹), para cálculo de emissões indiretas de N₂O utilizando Tier 1 e Tier 2, em Escopo 1 do inventário de GEE.

Insumos	Frac % - Tier 1	Fontes - Tier 1	Frac % - Tier 2	Fontes - Tier 2
Volatilização (kg (NH₃-N + Nox-N) kg N aplicado⁻¹)				
Nitrato de Amônio	6,0	IPCC (2019)	3,2	NH ₃ -N: Cantarella et al., (2008); Nox-N: IPCC (2019) NH ₃ -N: Cantarella et al., (2008); Nox-N: Macdonald; Denmead and White (2014).
Ureia	15,3	IPCC (2019)	19,0	
MAP	6,0	IPCC (2019)	-	
Vinhaça	21,0	IPCC (2019)	0,6	Paredes et al. (2014)
Outros fertilizantes orgânicos	21,0	IPCC (2019)	-	-
Outros fertilizantes sintéticos	11,0	IPCC (2019)	-	-
Lixiviação (kg N lixiviado kg N aplicado⁻¹)				
Fertilizantes nitrogenados - CS	24,0	IPCC (2019)	22,5	Ghiberto, Libardi e Trivelin (2015)
Fertilizantes nitrogenados - CP	24,0	IPCC (2019)	0,045	Ghiberto et al. (2011)
Fertilizantes orgânicos	24,0	IPCC (2019)	-	-

É importante ressaltar que para fertilizantes nitrogenados aplicados no fundo do sulco do plantio, emissões de NH_3 foram consideradas como desprezíveis (Trivelin et al., 2002).

3.3.1.1. Fertilizantes sintéticos e orgânicos nitrogenados: % N

Os principais fertilizantes sintéticos aplicados nos três sistemas de produção foram Ureia e Nitrato de Amônio por meio de formulação, e em menor quantidade Fosfato Monoamônico (MAP). Estes fertilizantes foram então classificados como: Ureia, Fertilizantes Nitrogenados e Fertilizantes Fosfatados (Tabela 2). Os teores de N adotados para cada um destes fertilizantes foi baseado no trabalho de Alcarde, Guidolin e Lopes (1998), sendo os teores: 44% para ureia, 32% para nitrato de amônio e 20% para MAP.

Os principais fertilizantes orgânicos aplicados nos três sistemas de produção estudados foram a torta de filtro, vinhaça e cama de frango (Tabela 7). Os dois primeiros são subprodutos do processamento da própria cana-de-açúcar. Dados internos, fornecidos pela usina, foram utilizados como teor de N para a vinhaça e a torta de filtro. Já para a cama de frango, o teor de N foi obtido de uma circular técnica da Embrapa de 1992 por Avila, Mazzuco e Figueiredo (1992).

Tabela 7 – Teores de N (%) dos adubos orgânicos: torta de filtro (%), vinhaça (kg m^{-3}) e cama de frango (%), aplicados ao longo dos 9 anos de manejo dos sistemas de produção avaliados.

Insumo	Teor	Fonte
Torta de filtro (%)	1,58	Banco de dados interno
Vinhaça (kg/m^3)	0,71	Banco de dados interno
Cama de frango (%)	4,10	Avila, Mazzuco e Figueiredo (1992)

3.3.1.2. Resíduos vegetais: FEs

Os resíduos considerados para os cálculos de emissões são aqueles tanto da cultura principal, ou seja, da cana-de-açúcar, quanto da soja, cultura de cobertura em período de reforma. A metodologia nacional do SEEG (2023b), adaptou os cálculos do IPCC para emissões advindas dos resíduos abaixo e acima do solo

especificamente para a cultura da cana-de-açúcar. Portanto este trabalho seguiu as equações utilizadas no inventário nacional do SEEG.

Com a finalidade de estimar a quantidade de resíduo vegetal deixado sobre o solo após a colheita da cana-de-açúcar foram consideradas as produções de cada área em cada safra e os fatores de Tier 2. Como, por exemplo, teor de N presente nos resíduos acima e abaixo do solo, razão entre resíduos seco e produto seco da cana-de-açúcar, entre outros (Tabela 8). Em contrapartida, fatores de Tier 1 fornecidos pelo IPCC também foram utilizados para comparação posterior.

Tabela 8 – Fatores para cálculo de emissões de N₂O advindo de resíduos da cana-de-açúcar e soja.

	Fatores - Tier 1	Fonte	Fatores - Tier 2	Fonte	Unidade
Cana-de-açúcar					
% Resíduos ¹	18,7	SEEG (2023b)	18,7	SEEG (2023b)	ton MS* ton colmos fresco ⁻¹
DRY ²	0,85	IPCC (2019)	0,79	SEEG (2023b)	kg MS kg peso fresco ⁻¹
Nag ³	0,008	IPCC (2019)	0,006	SEEG (2023b)	kg N kg MS ⁻¹
Rs ou R _{bg-bio} ⁴	0,22	IPCC (2019)	0,1	SEEG (2023b)	kg MS kg MS ⁻¹
Nbg ⁵	0,009	IPCC (2019)	0,006	SEEG (2023b)	kg N kg MS ⁻¹
Soja					
DRY	0,91	IPCC (2019)	0,87	MCTI (2020)	kg MS kg peso fresco ⁻¹
Nag	0,008	IPCC (2019)	0,009	MCTI (2020)	kg N kg MS ⁻¹
Rs ou R _{bg-bio}	0,19	IPCC (2019)	0,11	MCTI (2020)	kg MS kg MS ⁻¹
Nbg	0,008	IPCC (2019)	0,015	MCTI (2020)	kg N kg MS ⁻¹

¹ % Resíduos: razão entre resíduo seco e produto seco da cana-de-açúcar; ² DRY: fração de matéria seca da safra colhida, utilizado apenas no cálculo de emissões da colheita manual na qual ocorreu queima; ³ Nag: teor de N de resíduos acima do solo para a cultura; ⁴ Rs ou R_{bg-bio}: proporção de resíduos secos abaixo do solo para o rendimento colhido para cultura; ⁵ Nbg: teor de N de resíduos abaixo do solo para a cultura. *MS: Matéria seca.

Baseado em Figueiredo e La Scala Jr. (2011), este trabalho adotou como 100 a relação C:N para os resíduos da cultura da cana-de-açúcar, que normalmente está acima deste valor. Além de um fator adicionado aos cálculos, o percentual de nitrogênio da palha que fica disponível para os processos de nitrificação e desnitrificação no período de 1 ano, que é 20% (Bordonal et al., 2013).

3.3.2. Emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂) a partir do manejo agrícola

As principais fontes de emissão de CO₂ durante o manejo agrícola são ureia e calcário. Os FEs utilizados para cálculo de emissões advindas da calagem seguiram a norma do MCTI (2021), os mesmos sugeridos pelo IPCC (2019) (Tabela 9).

Tabela 9 – Fatores para cálculo de emissões de CO₂ advindo da aplicação de calcário (%).

Calcário	%	Fonte
Dolomítico	13	IPCC (2019); MCTI (2020)
Calcítico	12	IPCC (2019)

Quanto à ureia, anualmente ocorreu a aplicação de fertilizantes nitrogenados, sendo a ureia uma das fontes utilizada. Sua aplicação ocorre normalmente em conjunto com a operação de vinhaça localizada, porém este procedimento não foi considerado dentro do cálculo das emissões. Emissões advindas da aplicação de ureia e da vinhaça foram estimadas utilizando fatores de emissão individuais. O fator de emissão utilizado para cálculo das emissões de CO₂ a partir da ureia foi de 20% (0,20 t C-CO₂ t ureia⁻¹) de acordo com o IPCC (2019) e MCTI (2020).

3.3.3. Emissões diretas de CO₂, N₂O e CH₄ advindas da combustão móvel

Para fins de demonstração (Tabela 10), os consumos específicos foram classificados em grandes processos do manejo da cana-de-açúcar que são compostos por diversas operações. As operações contempladas pelo processo de tratos culturais são: aplicação de corretivos, quebra-lombo, adubação, pulverização, aplicação e transporte de vinhaça, afastamento de palha, corte de soqueira, capina química e controle de pragas. Para o processo de plantio e preparo são: gradagem

(aradora e niveladora), subsolagem, eliminador mecânico de soqueira, sulcação e cobertura. E no processo classificado como “colheita e carregamento” estão: colheita, carregamento e transporte.

Tabela 10 – Consumo específico de diesel (L ha⁻¹) classificados em três grandes processos agrícolas.

Etapa	L ha ⁻¹
Tratos Culturais	5,95
Plantio e Preparo	19,45
Colheita e Carregamento	51,85

O volume de diesel utilizado nas estimativas de emissões de GEE foi calculado de acordo com o consumo específico em litros por hectare (l ha⁻¹) de cada operação fornecido pelo banco de dados da usina. Já o cálculo de consumo específico (l ha⁻¹) para colheita e carregamento está baseado no TCH médio dos três sistemas de produção. Quanto aos FEs dos gases CO₂, CH₄ e N₂O, foram calculados com base na metodologia do IPCC (2006) sobre combustão móvel, com dados de densidade e poder calorífico do diesel advindos do Balanço Energético Nacional (EPE, 2023) (Tabela 11).

Tabela 11 – Fatores utilizados para cálculo de FEs de GEE a partir da queima do diesel pelo maquinário agrícola.

Fatores	Valores	Unidade	Fonte
Densidade	840	kg m ⁻³	EPE (2023)
Poder calorífico superior	7,58	kcal kg ⁻¹	EPE (2023)
CO ₂	74.100	kg CO ₂ TJ ⁻¹	IPCC (2006)
CH ₄	4,15	kg CH ₄ TJ ⁻¹	IPCC (2006)
N ₂ O	28,60	kg N ₂ O TJ ⁻¹	IPCC (2006)

3.3.4. Emissões a partir da produção de defensivos agrícolas, fertilizantes sintéticos e corretivos

Todos os insumos utilizados, sejam eles fertilizantes sintéticos, combustível, corretivos ou defensivos agrícolas (inseticidas, fungicidas e herbicidas) emitem GEE durante o processo produtivo deles. Essas emissões foram contempladas no Escopo 3 deste inventário de acordo com seus respectivos FEs (Tabela 12).

Tabela 12 – FEs (em kg CO₂e kg i.a.⁻¹ ou kg CO₂e kg insumo⁻¹) para cálculo das emissões advindas da produção dos insumos consumidos, Escopo 3.

Insumo/Ingrediente ativo	FE	Fonte
Herbicida (kg CO ₂ e kg i.a. ⁻¹)	18,25	Do Carmo (2016)
2,4-D	6	Do Carmo (2016)
Atrazine	3,8	Lal (2004)
Diuron	18,56	Do Carmo (2016)
Glyphosate	37,6	Lal (2004)
Metolachlor	5,5	Lal (2004)
Inseticida (kg CO ₂ e kg i.a. ⁻¹)	14,79	Do Carmo (2016)
Carbofuran	9,1	Lal (2004)
Malathion	4,6	Lal (2004)
Methoxychlor	1,4	Lal (2004)
Fungicida (kg CO ₂ e kg i.a. ⁻¹)	11,93	Do Carmo (2016)
Piraclostrobina	48,43	Do Carmo (2016)
Fluazinam	40,98	Do Carmo (2016)
Fertilizantes (kg CO ₂ e kg insumo ⁻¹)		
Fertilizantes Nitrogenados	3,97	Macedo et al. (2008)
Fertilizantes Fosfatados	1,13	Macedo et al. (2008)
Fertilizantes Potássicos	0,71	Macedo et al. (2008)
Corretivos (kg CO ₂ e kg insumo ⁻¹)		
Calcário	0,01	Macedo et al. (2008)
Gesso	0,03	Popp et al. (2021)
Diesel (kg CO ₂ e kg insumo ⁻¹)	0,94	Lal (2004)

3.4. Estoque de Carbono e Nitrogênio do solo

Nas mesmas áreas em que foram feitas as estimativas de emissões de GEE, também foram avaliados os estoques de carbono e de nitrogênio. A avaliação dos estoques é de extrema importância para entendermos qual o impacto do manejo realizado (principalmente o preparo no momento da reforma) sobre o conteúdo de C e N do solo. Assim, entendemos se as operações utilizadas potencializam emissões.

Os estoques foram calculados após coleta e análise de amostras de solo das camadas de 0 a 100 cm. Além dos tratamentos, também houve coleta de solo em área de mata nativa em mesma mancha de solo (Latossolo Vermelho Distroférrico), para que essa fosse considerada como uma área de referência, pois não houve interferências humanas em seu solo. O cálculo para os estoques seguiu equações de Veldkamp (1994), Moraes et al. (1996) e Carvalho et al. (2009).

3.4.1. Coleta das amostras de solo

Entre os dias 21/01/2024 e 26/01/2024, foram coletadas as amostras de solo por meio da abertura de trincheiras tanto nas áreas estudadas como em área de referência. Para a coleta das amostras, foram abertas trincheiras de dimensões 1,0 x 1,5 x 3,0 m, nas quais foram demarcadas as 4 profundidades de análise (0-10, 10-30, 30-60 e 60-100 cm) e em suas paredes foram coletadas amostras indeformadas para análise da densidade do solo e amostras deformadas para análise do teor de C e N do solo, ambas nas linhas e nas entrelinhas da cana. No caso da mata nativa, foram coletadas amostras próximas à raiz e entre raízes para serem consideradas linha e entrelinha.

A metodologia de coleta adotada seguiu protocolo de Zanatta, Pulrolnik e Viana (2015), na qual “degraus” são formados nas paredes das trincheiras em todas as camadas definidas para análise (Figura 11). Optou-se por não coletar amostras com trado holandês para evitar a contaminação entre camadas. Para a primeira coleta, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, foi retirada toda a palhada depositada na superfície do solo, além de 10 cm de solo onde há a maior concentração de resíduos em decomposição que poderiam interferir no teor de C da amostra.

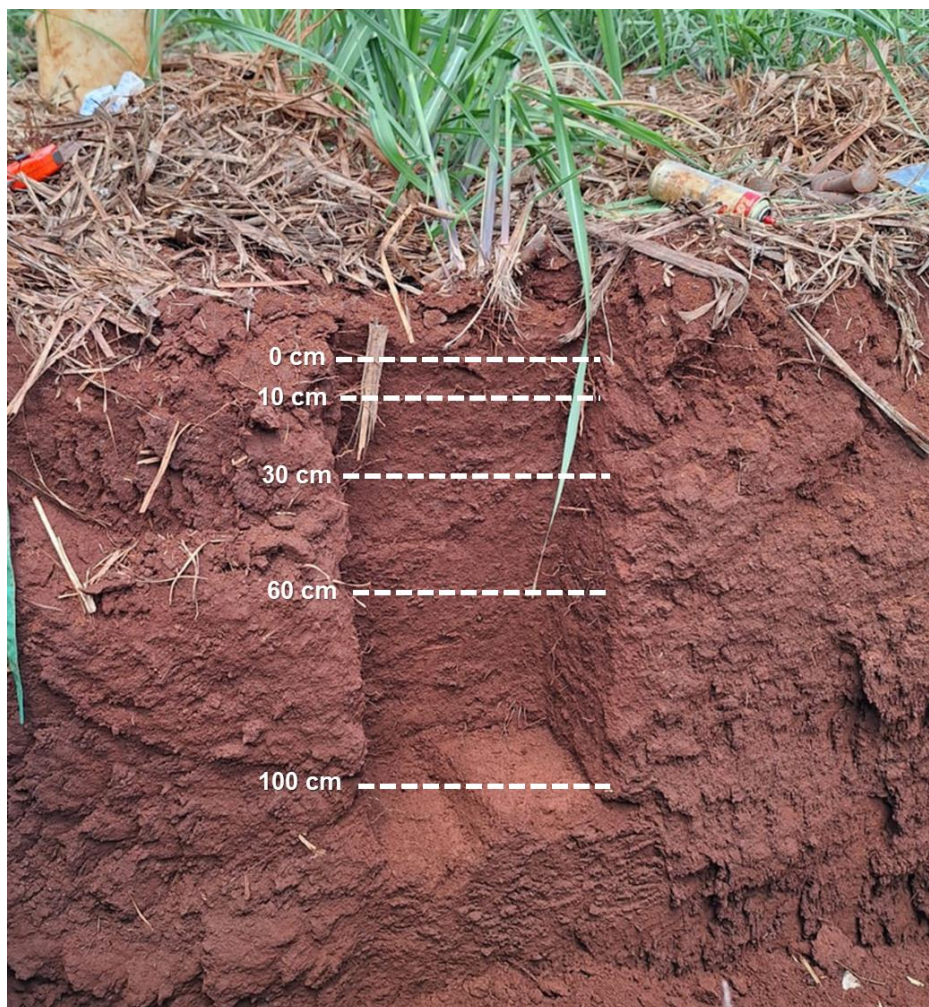


Figura 11 – Imagem de uma das trincheiras e demarcação das camadas avaliadas.

Cada amostra de solo teve 500g enquanto a amostra indeformada foi realizada com anéis volumétricos de 35mm de altura. Os anéis foram cravados no solo nos “degraus” formados nas paredes da trincheira após a coleta das amostras de solo com uma espátula, em uma área de 10 x 20 cm. E no total, foram obtidas 4 amostras por profundidade, em linha e entrelinha, com repetição, por sistema de produção e mata nativa, ou seja, 64 amostras.

3.4.2. Análise das amostras de solo

As análises de solo foram conduzidas em Fevereiro de 2024 junto ao laboratório Athenas – Consultoria Agrícola e Laboratórios, baseado na cidade de Jaboticabal – SP e também ao laboratório de solos da própria usina. Os métodos utilizados para determinação do teor de carbono e teor de nitrogênio do solo foram:

oxidação em dicromato de potássio com ácido sulfúrico e método Kjeldahl, descrito por Baliero e Alves (2017).

O método da oxidação em dicromato de potássio é um método de via úmida para obter o carbono orgânico (C org) a partir da matéria orgânica do solo (MOS). Neste caso, essa reação de oxidação é catalisada pelo calor do ácido sulfúrico e de uma fonte externa. O dicromato que foi reduzido na reação será correspondente ao carbono orgânico da amostra (Fontana e Campos, 2017).

O método apresentado por Baliero e Alves (2017) é uma adaptação da análise de Bremner e Mulvaney (1982) para solos tropicais, e consiste na digestão Kjeldahl, na qual há a oxidação do N da matéria orgânica em ácido sulfúrico e em altas temperaturas. O nitrogênio orgânico foi transformado em amônio (NH_4^+) e após esta etapa ocorre a alcalinização da solução com hidróxido de sódio (NaOH), produzindo amônia (NH_3^+) que passa por destilação e entra em contato com o ácido bórico (H_3BO_3) para titulação (Baliero e Alves, 2017).

Para a densidade do solo, foi utilizado o método do cilindro volumétrico, no qual há a obtenção do volume por meio da coleta de solo em estrutura indeformada, por um cilindro de volume interno conhecido, e a pesagem dessa mesma massa coletada (Almeida et al., 2017). Posteriormente, a massa coletada através do anel volumétrico foi secada em 105°C por 48h e pesada, para que o cálculo da densidade fosse feito.

3.4.3. Metodologia de cálculo para os estoques de C e N

As equações utilizadas para cálculo dos estoques de C e N seguiram metodologia de Veldkamp (1994) e correção de Carvalho et al. (2009) que foram apresentados no Protocolo da Embrapa de Fernandes e Fernandes (2013). A equação de Veldkamp (1994) deve ser aplicada para cada uma das profundidades, considerando o teor de C org em determinada profundidade (CO) em g kg^{-1} , densidade aparente (Dap) do solo na profundidade amostrada em kg dm^{-3} e espessura (e) da camada em cm.

Equação 1 – Cálculo de estoque de C do solo (Veldkamp, 1994).

$$Est\ C = (CO \times Dap \times e)/10$$

Após este cálculo, devemos aplicar o fator de correção da densidade do solo sugerido por Carvalho et al. (2009) com base em Moraes et al. (1996) e Veldkamp (1994). Este fator deve ser aplicado pois entende-se que o manejo de um solo pode interferir em sua densidade, portanto ao se considerar a mesma profundidade para uma área de cultivo e uma área de mata nativa, não estaríamos comparando as mesmas massas de solo, o que geraria interpretações errôneas sobre os estoques (Jantalia et al., 2006).

Equação 2 – Correção de estoque de C (Carvalho et al., 2009).

$$Est\ C = \frac{Cs \times Ds \times \left(\frac{Dref}{Ds} \times e \right)}{10}$$

Na qual Cs representa o teor de carbono orgânico na camada amostrada (g kg⁻¹), Ds é a densidade aparente do solo na profundidade amostrada (kg dm⁻³), Dref é a densidade para a profundidade amostrada da área de referência (kg dm⁻³), enquanto e é a espessura da camada. Esta equação, como a anterior, também deve ser aplicada para cada profundidade amostrada individualmente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Emissões associadas à produção agrícola

As emissões foram classificadas em seis categorias (Figura 12). A intensidade das emissões foi avaliada entre todas as categorias, anos e sistemas de produção, por meio de dois indicadores, kg CO₂e ha⁻¹ e kg CO₂e tc⁻¹.

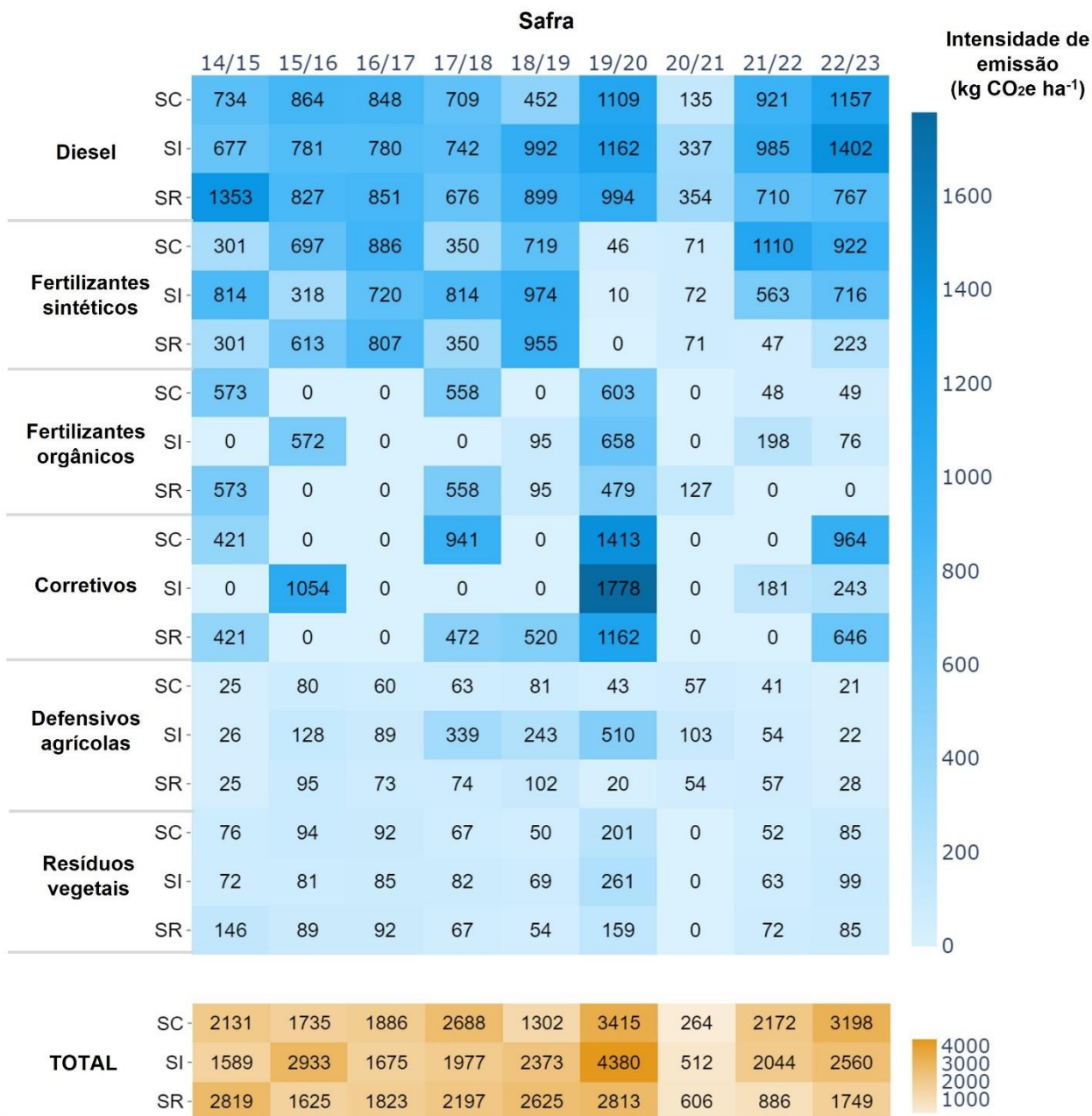


Figura 12 – Distribuição das emissões em kg CO₂e ha⁻¹ por categoria, sistema e safra. As emissões por categoria estão sendo comparadas de acordo com sua intensidade, quanto mais forte a cor azul, maior foi a emissão registrada naquela categoria e ano. O mesmo ocorre para o comparativo de emissões totais por sistema, quanto mais forte a cor laranja, maior foi a emissão registrada em kgCO₂e ha⁻¹ naquele sistema de produção e ano. Os sistemas de produção correspondem a SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

De uma forma geral, as maiores emissões estão relacionadas ao consumo de diesel e fertilizantes sintéticos. Um exemplo está na safra 14/15, na qual os sistemas

SR e SI apresentaram as maiores emissões relativas ao uso do diesel (1.352,6 kg CO_{2e} ha⁻¹) e aplicação de fertilizantes sintéticos (813,5 kg CO_{2e} ha⁻¹), respectivamente. Por outro lado, as menores emissões puderam ser observadas nas categorias de resíduos vegetais e defensivos agrícolas. Nesta safra, o sistema de maior emissão foi o SR (2.819,2 kg CO_{2e} ha⁻¹), por outro lado o de menor emissão foi o SI (1.589,4 kg CO_{2e} ha⁻¹) (Figura 12).

Para a safra 15/16, a Figura 12 mostra que as maiores emissões foram encontradas nos sistemas SI e SC, na categoria de corretivos (1.053,8 kg CO_{2e} ha⁻¹) e de consumo de diesel (864,4 kg CO_{2e} ha⁻¹), respectivamente. As menores emissões novamente ficam restritas às categorias de defensivos agrícolas e resíduos vegetais. O sistema que mais emitiu nesta safra como um todo, foi o SI (2.933,2 kg CO_{2e} ha⁻¹) enquanto o SR foi o sistema que apresentou menor emissão (1.624,5 kg CO_{2e} ha⁻¹) (Figura 12).

Na safra 16/17 novamente os maiores emissores foram as categorias do diesel e fertilizantes sintéticos, com 850,9 kg CO_{2e} ha⁻¹ no SR e 886,0 kg CO_{2e} ha⁻¹ no SC, respectivamente (Figura 12). Nesta safra não houve aplicação de fertilizantes orgânicos e nem mesmo corretivos, como o calcário, portanto não houve emissão nessas duas categorias. O sistema de maior intensidade foi o SC (1.886,4 kg CO_{2e} ha⁻¹) e o de menor emissão foi o SI (1.674,8 kg CO_{2e} ha⁻¹) (Figura 12).

Dois sistemas (SC e SR) receberam a aplicação de corretivos na safra 17/18 (Tabela 2), destacando-se o SC com a maior emissão entre todas as categorias (941,2 kg CO_{2e} ha⁻¹), seguida pela aplicação de fertilizantes sintéticos no SI (814,0 kg CO_{2e} ha⁻¹) (Figura 12). As menores emissões foram novamente nas categorias de resíduos vegetais e defensivos agrícolas. Sendo 67,0 kg CO_{2e} ha⁻¹ no SC para os resíduos vegetais, e 63,4 kg CO_{2e} ha⁻¹ também no SC para os defensivos agrícolas. O sistema de maior emissão, considerando todas as categorias, foi novamente o SC, com 2.688,3 kg CO_{2e} ha⁻¹, enquanto o SI apresentou-se com a menor emissão (1.977,3 kg CO_{2e} ha⁻¹), repetindo resultados observados na safra anterior (Figura 12).

Em 18/19 há novamente o destaque para as principais categorias de emissão, diesel e fertilizantes sintéticos, como pode ser visualizado na Figura 12. Neste caso as maiores emissões se encontram no SI, sendo elas 992,2 kg CO_{2e} ha⁻¹ para o diesel e 973,6 kg CO_{2e} ha⁻¹ para os fertilizantes sintéticos. Porém, observamos que em

valores de emissão totais o sistema de maior contribuição foi o SR, com 2.625,4 kg CO₂e ha⁻¹, e isso ocorreu pois apenas esta área recebeu aplicação de calcário nesta safra. Enquanto o sistema de menor emissão foi o SC (1.301,6 kg CO₂e ha⁻¹).

A safra em que ocorreu a reforma foi a safra 19/20, que é justamente quando encontramos as maiores emissões da série. Somando as emissões de todas as categorias, como pode ser visto na parte inferior da Figura 12, destaca-se o SI (4.379,6 kg CO₂e ha⁻¹), seguido pelo SC (3.414,8 kg CO₂e ha⁻¹) e por fim o SR (2.813,0 kg CO₂e ha⁻¹). É possível notar que estas emissões tiveram grande influência principalmente da aplicação de corretivos, majoritariamente o calcário que possui emissões tanto em sua aplicação como em sua produção. O SI, de maior emissão total, também é o que emitiu mais com a aplicação de calcário (1.778,4 kg CO₂e ha⁻¹), enquanto o SR, de menor emissão total, foi o que emitiu menos com a aplicação deste corretivo (1.161,5 kg CO₂e ha⁻¹) (Figura 12).

Porém, as emissões por consumo de diesel não seguiram o esperado. Era suposto que haveria uma maior concentração de operações durante a reforma, pois a maioria delas não ocorrem normalmente durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar e, portanto, as emissões seriam superiores também neste período. Além disso, era esperado que as emissões desta fonte fossem maiores no SC, justamente por seu preparo convencional. Tais hipóteses foram descartadas após os resultados obtidos (Figura 12).

Durante a safra 20/21 ocorreu o período conhecido como “formação” do canavial, quando as canas plantadas estão se desenvolvendo e só serão colhidas na safra seguinte. Por este motivo várias operações ocorreram pouco, como a aplicação de fertilizantes e defensivos, além da ausência de colheita. Assim, a maior emissão, considerando a somatória de todas as categorias, foi do SR, com 606,1 kg CO₂e ha⁻¹. Isso pode ser explicado pois este foi o único sistema a receber fertilizantes orgânicos nesta safra (Figura 12).

Na safra 21/22, a colheita retorna com o primeiro corte das novas canas. As maiores emissões foram observadas no SC e no SI, nas categorias de fertilizantes sintéticos (1.110,0 kg CO₂e ha⁻¹) e diesel (985,1 kg CO₂e ha⁻¹ respectivamente). Com o somatório de todas as categorias observamos que a maior emissão (2.171,5 kg

CO₂e ha⁻¹) correspondeu ao SC enquanto a menor emissão (885,7 kg CO₂e ha⁻¹) está relacionada ao SR (Figura 12).

A safra 22/23 foi a última avaliada no período deste estudo e suas maiores emissões ficam restritas ao consumo de diesel no SI e no SC (1.402,1 kg CO₂e ha⁻¹ e 1.156,9 kg CO₂e ha⁻¹, respectivamente). Já as menores emissões ficaram concentradas na categoria de defensivos agrícolas, também nos sistemas SC e SI (20,8 kg CO₂e ha⁻¹ e 22,3 kg CO₂e ha⁻¹). No geral daquele ano, o sistema que mais emitiu foi o SC com o valor de 3.197,8 kg CO₂e ha⁻¹, enquanto o de menor emissão foi o SR com 1.748,8 kg CO₂e ha⁻¹ (Figura 12).

Em toda a série avaliada é possível notar que o SI foi o sistema que mais contribuiu com as emissões, enquanto o SR esteve abaixo na maioria dos anos, exceto nas safras 14/15 e 18/19. As emissões acumuladas ao longo dos 9 anos também foram calculadas em kg CO₂e ha⁻¹ (Figura 13). Apesar do alto valor encontrado nas estimativas advindas do consumo de diesel no SR, este ainda é o sistema com menores emissões por área e por ano. O SR apresentou um total de 1.904,8 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto o SC e SI emitiram: 2.087,8 kgCO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ e 2.227,0 kgCO₂e ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Figura 13).

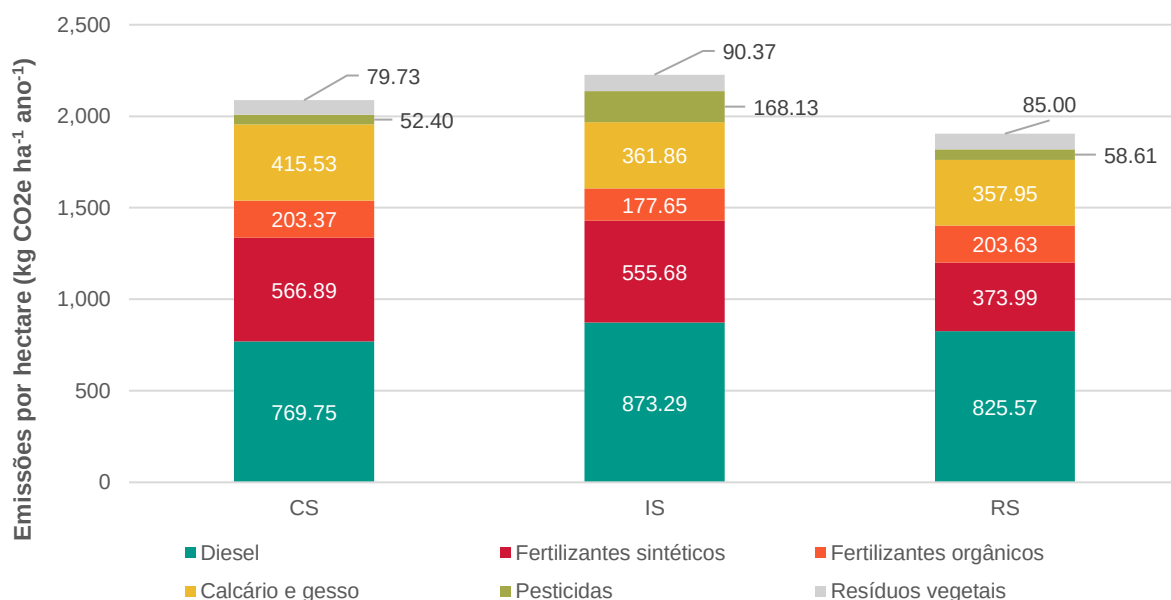


Figura 13 – Emissões acumuladas por hectare e ano (kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹), distribuída por categorias para cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

4.1.1. Emissões por consumo de diesel

As emissões por consumo de diesel apresentaram-se menor no SC, algo que não era esperado (Figura 13). Porém, esse efeito pode ser explicado com a colheita da cana-de-açúcar e a relação do consumo de diesel neste processo diretamente proporcional à produtividade da área. Portanto, quanto maior o TCH, maior o volume de diesel utilizado na colheita da cana-de-açúcar. Por este motivo o SR, sistema de maior produtividade, foi quem emitiu mais GEE na colheita. Mas, por outro lado, SR foi o sistema que apresentou as menores emissões nos processos de tratos culturais, preparo de solo e plantio (Figura 14).

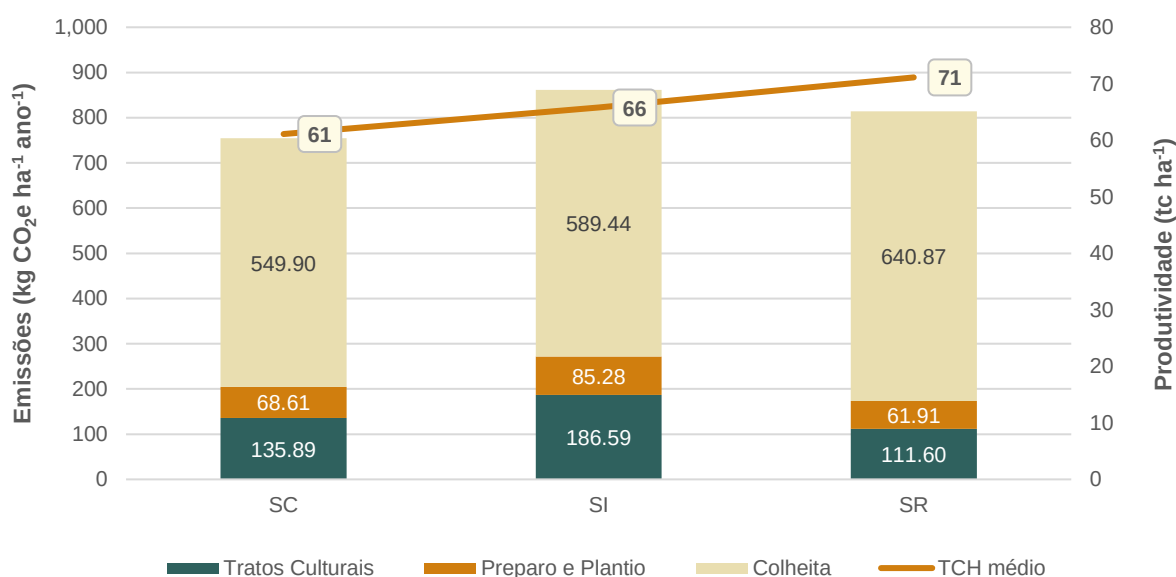


Figura 14 – Emissões por hectare e ano (kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹) contemplando todo o período estudado, distribuídas por categorias de consumo de diesel (colheita, tratos culturais, preparo e plantio) e relacionadas à produtividade média (ou TCH, em tc ha⁻¹) de cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Durante o período estudado, foi observado que as maiores emissões foram oriundas do consumo de diesel pela colheita (Figura 14), porém quando detalhamos especificamente a safra de reforma (19/20) conseguimos observar as emissões por consumo de diesel nas operações de preparo de solo (Figura 15).

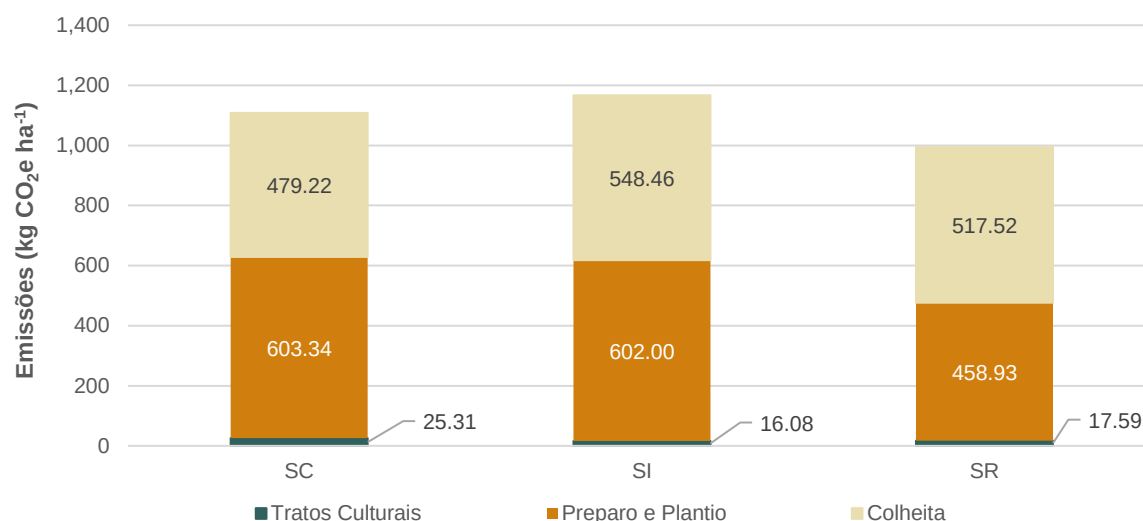


Figura 15 – Emissões por hectare (kgCO₂e ha⁻¹) do consumo de diesel em suas três etapas (colheita, tratos culturais, preparo e plantio) durante a reforma (safra 19/20) de cada sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Especificamente na safra 19/20, altas emissões por diesel no SI estão relacionadas as emissões pela colheita, pois neste ano o TCH (toneladas de cana por hectare) do SI foi o maior (65 TCH) enquanto o SC teve a menor produtividade (57 TCH). O SR apresentou um TCH de 61 nesta mesma safra, o que explicaria até mesmo o SR ter emissões por colheita maiores do que o SC (Figura 15).

No caso do preparo de solo observamos uma diferença pouco significativa de emissões entre o SC para o SI, apenas 1,34 kg CO₂e ha⁻¹, enquanto do SC para o SR há uma diferença de 144,41 kg CO₂e ha⁻¹ (Figura 15). Com isso, podemos observar uma redução de 23,9% quando comparamos os sistemas SC e SI com o sistema SR. Este percentual de redução condiz com os valores apresentados por Koga et al. (2003), que estudou as emissões advindas do consumo de diesel na produção agrícola de 4 culturas, na cidade de Hokkaido, no Japão. Os autores concluíram que, dependendo da cultura, a redução nas emissões pela adoção do preparo reduzido de solo ao invés do preparo convencional, variou entre 15 e 29%. Por outro lado, Bordonal et al. (2013), comparando três tipos de cenário de manejo na cana-de-açúcar, sendo o segundo e o terceiro compostos por preparo convencional e preparo reduzido, demonstraram que houve uma redução de consumo de diesel e emissões de CO₂e ha⁻¹ de cerca de 5,5%.

Portanto, os resultados indicam que as emissões no SI durante o período analisado foram impactadas tanto pelo consumo de diesel na colheita como nas operações de preparo e plantio durante a reforma. Tais valores nos leva a crer que a utilização de apenas uma gradagem ao invés de duas durante o preparo de solo, não causou reduções significativas no consumo de diesel e, concomitantemente, nas emissões de CO₂e.

Um outro ponto importante é que nem todas as operações foram realizadas na totalidade da área do sistema de produção, ou seja, uma operação de adubação pode ter ocorrido em apenas 70% da área. Com isso, é possível entender que a operação foi direcionada a locais específicos do canavial, tornando-a mais eficiente tanto no consumo de insumos como no consumo de diesel, o que defende a agricultura de precisão. Por outro lado, ocorreram também operações que foram repetidas, indicando ou necessidade de reaplicações, como muitas vezes indicam bulas de defensivos químicos, ou então retrabalhos (Figura 16).

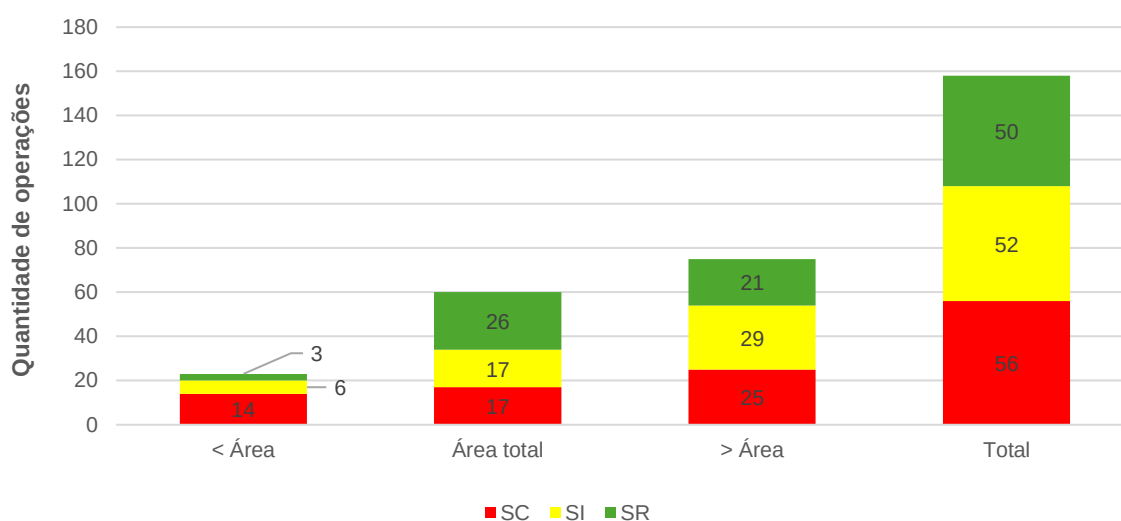


Figura 16 – Quantidade de operações de tratores culturais, preparo e plantio realizadas ao longo das 9 safras, em relação à área. “< Área”: operação ocorreu em menos do que a área total; “Área total:” operação ocorreu em área total; “> Área:” operação ocorreu em mais do que a área total do sistema, ou seja, houve operações repetidas.

É possível notar que o sistema de produção SI apresenta mais operações na categoria “> Área”, sendo seguido pelo SC e SR (Figura 16). Essa quantidade de operações refeitas, pode explicar o porquê as emissões do sistema SI, quando

olhamos para o diesel das operações de tratos culturais, preparo e plantio, foram maiores do que as emissões no SC (Figura 14).

4.1.2. Emissões por insumos e resíduos vegetais

Os fertilizantes sintéticos são grandes contribuintes das emissões de GEE, estando atrás apenas do diesel, já discutido no tópico anterior. Para eles é possível notar uma redução direta do SC ao SR. SC teve uma emissão acumulada de 566,9 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto o SI emitiu 555,7 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ e SR apresentou a menor emissão, 374,0 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 13). Na safra 21/22 obtivemos a maior emissão por fertilizantes sintéticos, com 1.110,0 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ no SC, enquanto a menor emissão ocorreu na safra 19/20 no SI, durante a reforma, sendo que neste mesmo ano não houve aplicação no sistema SR (Figura 12).

As emissões por aplicação de calcário se comportaram da mesma maneira que as emissões por fertilizantes sintéticos ao longo do período estudado. Sendo SC, SI e SR emissores de 415,5 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹, 361,9 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ e kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente (Figura 13). A safra na qual houve maior aplicação de calcário e, com isso, maiores emissões de CO₂e, foi durante a reforma, safra 19/20, sendo o sistema de maior emissão o SI (1.778,4 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹) e o de menor emissão, o SR (1.161,5 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 13).

Por outro lado, os fertilizantes orgânicos não apresentaram uma redução ao compararmos os três sistemas de produção. As maiores emissões foram observadas nos sistemas SC e SR: 203,4 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ e 203,6 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto SI apresentou a menor emissão 177,6 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 13). A safra em que houve maior emissão também foi a safra de reforma, sendo o SI o responsável por emitir 658,1 kg CO₂e ha⁻¹, enquanto a menor emissão ocorreu na safra 21/22, no SC (47,7 kg CO₂e ha⁻¹) (Figura 12). Ambos os sistemas não receberam a aplicação de fertilizantes orgânicos em 4 safras do período estudado.

As maiores emissões por defensivos agrícolas utilizados também estão representadas no SI (168,1 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹). A safra 19/20 foi responsável tanto pela maior emissão no período, 509,7 kg CO₂e ha⁻¹ no SI, como também pela menor emissão 19,8 kg CO₂e ha⁻¹ no SR (Figura 12). As emissões por resíduos vegetais também foram maiores no SI (90,4 kg CO₂e ha⁻¹ ano⁻¹) e menores no SC (Figura 13). O SC teve poucos resíduos vegetais e, com isso, menos emissões advindas dessa

fonte. Isto ocorreu principalmente devido à sua baixa produtividade em comparação aos outros sistemas. A maior emissão se encontra na safra 19/20, também no SI (261,4 kg CO₂e ha⁻¹) e a menor emissão está na safra 18/19, no SC (50,0 kg CO₂e ha⁻¹) (Figura 12).

Os resíduos vegetais foram os menores emissores de GEE entre todas as categorias e estão diretamente relacionados à biomassa da cultura e o quanto essa produção deixará de palha sobre o solo. Além disso, também há a contribuição dos resíduos deixados por culturas de cobertura. Assim, a safra 19/20, na qual ocorreu a reforma do canavial, é a que apresentou as maiores emissões por resíduos em todos os sistemas (Figura 17).

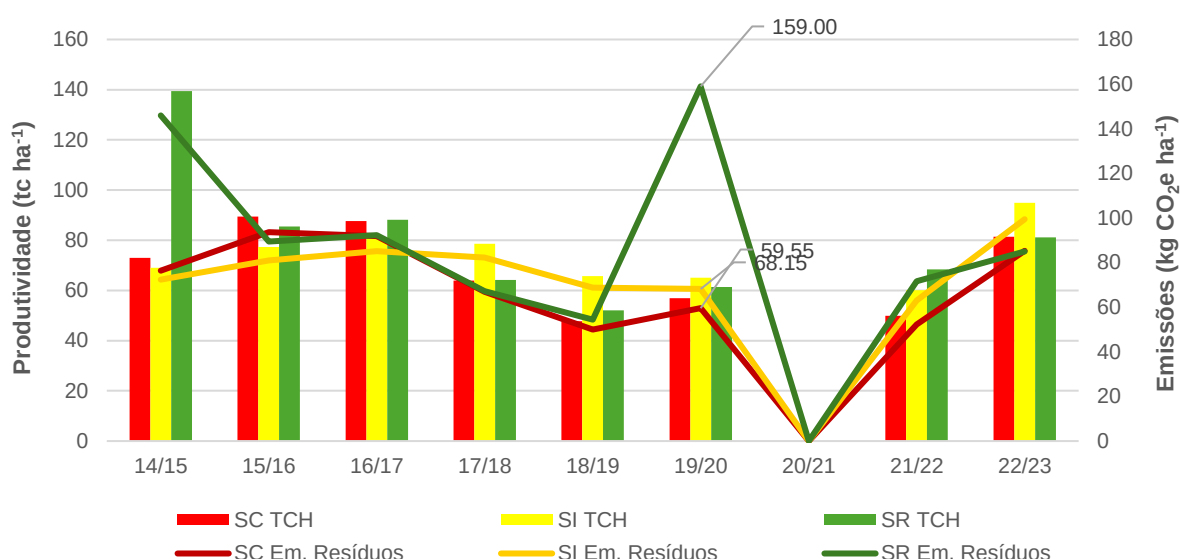


Figura 17 – Relação entre produtividade e emissões por resíduos vegetais (kgCO₂e ha⁻¹), por safra e sistema de produção. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

O sistema de plantio meiosi consiste no plantio de linhas, ou ruas mãe de cana-de-açúcar, para que essas se desenvolvam e sejam “desdobradas”, nos vãos onde antes estava plantada alguma cultura de cobertura como, neste caso, a soja. No entanto, a taxa de desdobra, como é chamado a quantidade de linhas novas que serão plantadas a partir daquela rua mãe, pode variar de acordo com o planejamento da usina, o que também altera o espaço dos vãos onde serão plantadas as culturas de cobertura. O SC teve cerca de 64% de sua área de reforma coberta por soja, enquanto

o SI recebeu soja em 87% de sua área e o SR apenas 43%. A maior área plantada de soja no SI pode justificar as maiores emissões por resíduos vegetais neste sistema durante o período de reforma do canavial.

4.1.3. Emissões por tonelada de cana

Diante do exposto, quando observamos o indicador $\text{kg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ conclui-se que o SI seria o menos sustentável dentre as opções de manejo, emitindo até mais do que o SC. No total, as emissões de cada um dos sistemas de produção foram: $2.087,7 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o SC, $2.227,0 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o SI e $1.904,7 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o SR. No entanto, quando alteramos o indicador para $\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$, conseguimos avaliar a real eficiência do manejo, ou seja, se este favoreceu a produtividade ao mesmo tempo que foi sustentável, pois relacionamos a emissão com a produção de cada sistema.

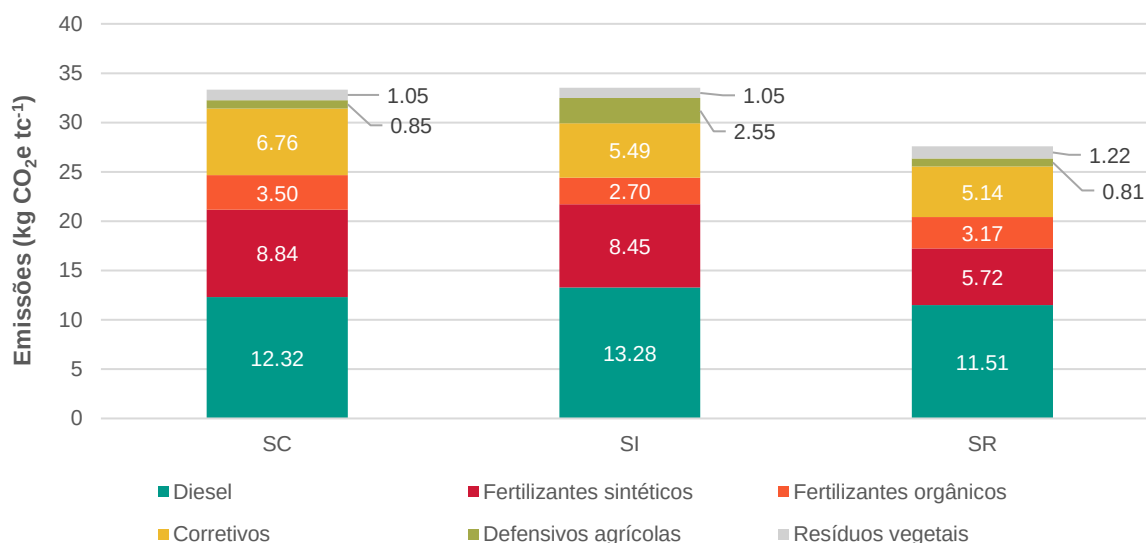


Figura 18 – Emissões acumuladas por tonelada de cana ($\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) distribuídas por categoria em cada sistema de produção, durante todo o período estudado. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Neste caso, com um balanço das emissões e produções das 9 safras estudadas, os sistemas SC e SI se tornam praticamente idênticos, com $33,6$ e $33,8 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$, respectivamente. Enquanto o SR é o que apresenta a menor emissão por tonelada de cana: $27,6 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$. Apesar de uma emissão $0,2 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$ maior

do SI em relação ao SC, ele também obteve uma produtividade maior do que o SC (Figura 19). Relacionando emissões e produtividade, os resultados indicam que o SR é o sistema de produção de maior eficiência em produtividade e com maior sustentabilidade ambiental, garantindo menores emissões por tonelada de cana.

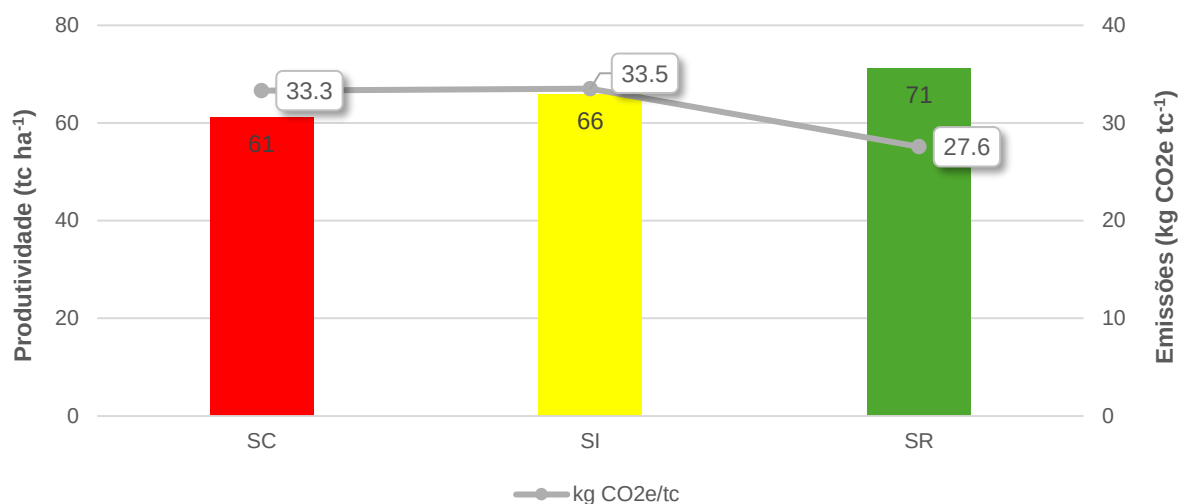


Figura 19 – Relação entre produtividade média (tc ha⁻¹) e emissões (kg CO₂e tc⁻¹) para cada sistema de produção, em todo o período estudado.

E mesmo que desconsideremos a safra 14/15 dos três sistemas, pois esta, foi a safra de produtividade destoante do SR (139 tc ha⁻¹), a intensidade das emissões não se altera bruscamente entre as áreas. O SI se manteve como maior emissor, com 35,3 kg CO₂e tc⁻¹, seguido pelo SC 34,3 kg CO₂e tc⁻¹ e, por fim, o SR 30,0 kg CO₂e tc⁻¹.

4.2. Comparativo de emissões: Tier 1 vs. Tier 2

Ao compararmos os cálculos de emissões de GEE no qual foram utilizados FEs do Tier 1 (Tabelas 4, 5, 6, 8 e 9) e aqueles nos quais utilizamos FEs de Tier 2 (Tabelas 4, 6, 8 e 9), foram encontradas diferenças em todos os sistemas. A emissão do SC com FEs Tier 1 foi de 39,2 kg CO₂e tc⁻¹, enquanto no Tier 2 o resultado foi de 33,6 kg CO₂e tc⁻¹, uma diferença de 5,6 kg CO₂e tc⁻¹. A estimativa de emissões do SI utilizando FEs Tier 1 correspondeu a 38,8 kg CO₂e tc⁻¹, enquanto no Tier 2: 33,8 kg CO₂e tc⁻¹, uma variação de 5,0 kg CO₂e tc⁻¹. E para o SR, com FEs Tier 1 o valor apresentado

foi de 31,6 kg CO₂e tc⁻¹, enquanto para o Tier 2 o valor final foi de 27,6 kg CO₂e tc⁻¹, uma alteração de 4,0 kg CO₂e tc⁻¹.

Essas diferenças de emissão ocorreram nos cálculos dos resíduos vegetais, fertilizantes orgânicos e sintéticos, pois o restante das categorias utilizou os mesmos FEs nas duas estimativas. Com isso, é possível concluir que há uma superestimativa de emissões, variando entre 4 a 5,6 kg CO₂e tc⁻¹, ao utilizarmos FEs de Tier 1 (Figura 20).

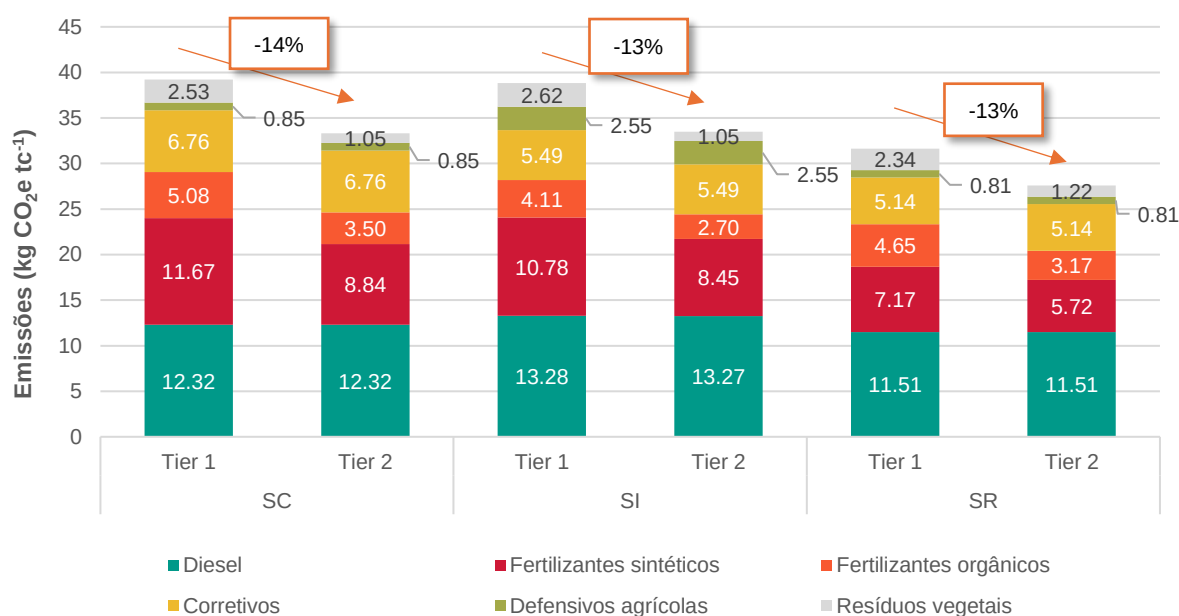


Figura 20 – Comparativo de emissões acumuladas (kg CO₂e tc⁻¹) por sistema de produção, ao utilizar Tier 1 vs. Tier 2, para todo o período estudado. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

As menores emissões observadas nas estimativas utilizando Tier 2 se devem ao fato de que os fatores apresentados pelo IPCC podem superestimar as emissões de GEE (Siqueira Neto et al., 2016; Smeets et al., 2009) quando os aplicamos em uma perspectiva regional. De acordo com Siqueira Neto et al. (2016), os estudos sobre emissões de N₂O mais encontrados na literatura são de origem Australiana, e apesar de serem estudos também sobre a cana-de-açúcar, neles existem diversas peculiaridades de manejo que diferenciam do cultivo brasileiro, como o uso de irrigação, drenagem, alterações de umidade do solo, entre outros. Com estes resultados conseguimos compreender a importância da aplicação de FEs de Tier 2,

obtidos através de estudos regionais e respectivos à cultura inventariada, para tornar as estimativas de emissões mais próximas da realidade da produção nacional.

4.3. Estoques de C e N do solo

Nos três sistemas estudados também foram coletadas amostras de solo para estimarmos o estoque de C e N de cada área, com base em uma área de mata nativa como referência.

O maior valor da densidade foi encontrado na camada de 10-30 cm da entrelinha do SR, com 1,65 kg/dm³. Já o menor valor encontrado ocorreu na área de mata nativa, na camada de 10-30, sendo ele 0,89 kg/dm³ na entrelinha, como era o esperado. O teor mais alto de C org foi encontrado na área de referência, na camada superficial de 0-10 cm, 18,4 g/kg. Enquanto o teor mais baixo foi encontrado na entrelinha do SI, na última camada (60-100 cm), 5,8 g/kg. Quanto aos teores de N, o maior valor encontrado ocorreu na linha da camada superficial da mata nativa (0-10 cm), 1,43 g/kg. Já o valor inferior ocorreu na linha do SI, porém na camada mais profunda (60-100 cm), 0,45 g/kg.

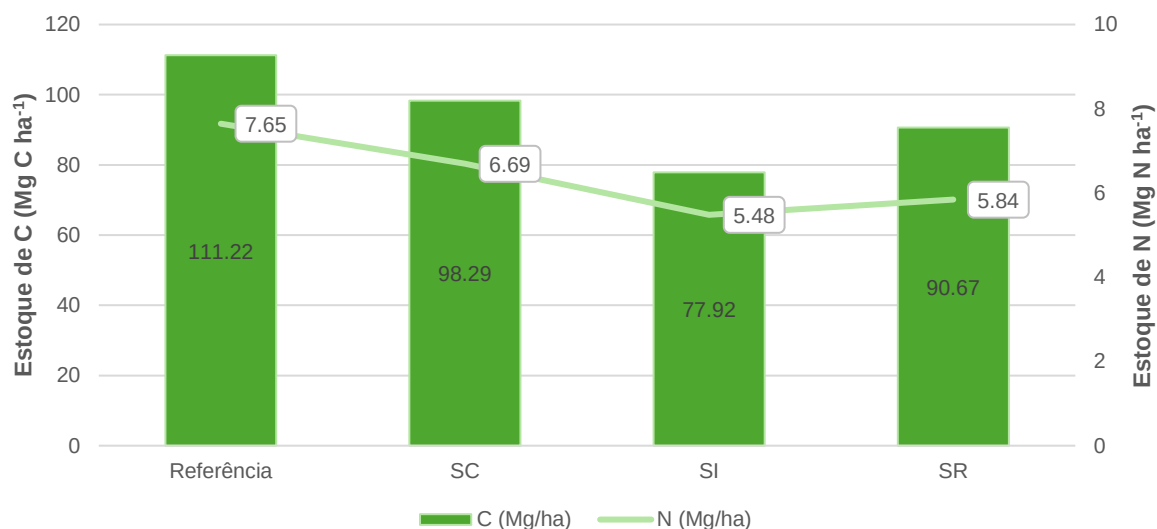


Figura 21 – Estoque de carbono (Mg C ha⁻¹) e nitrogênio (Mg N ha⁻¹) dos sistemas de produção e área de referência. Referência: Mata nativa; SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Os maiores estoques, tanto de C quanto de N, foram observados na área de referência, ou seja, a mata nativa (111,22 Mg C ha⁻¹ e 7,65 Mg N ha⁻¹) e dentre os sistemas estudados, destacam-se, com os maiores valores, o SC (98,29 Mg C ha⁻¹ e 6,69 Mg N ha⁻¹) e SR (90,67 Mg C ha⁻¹ e 5,84 Mg N ha⁻¹) (Figura 21).

Os estoques apresentaram uma correlação positiva, concordando com outras pesquisas como Anaya e Huber-Sannwald (2015), Cherubin et al. (2015) e Oliveira et al. (2016). Isso se deve ao fato de que o N tem uma importante atuação na fixação do C através da interação entre seus ciclos (Wang e Houlton, 2009) e da necessidade deste nutriente, seja por plantas ou por microrganismos do solo que, por sua vez, competem por ele (Zaehle e Dalmonech, 2011) para realizar a decomposição de materiais vegetais de diferentes relações C:N.

Para Wieder et al. (2015) um dos fatores que podem limitar o sequestro de C é justamente o N, concordando com Wang e Houlton (2009), que apresentam valores potenciais de redução do estoque de C de 16 até 149 Pg C até 2050, por conta da quantidade insuficiente de nitrogênio no solo. Ao longo dos 9 anos de estudo os sistemas apresentaram uma deposição de C através dos resíduos vegetais deixados sobre o solo e de N por meio de insumos orgânicos e sintéticos (Figura 22).

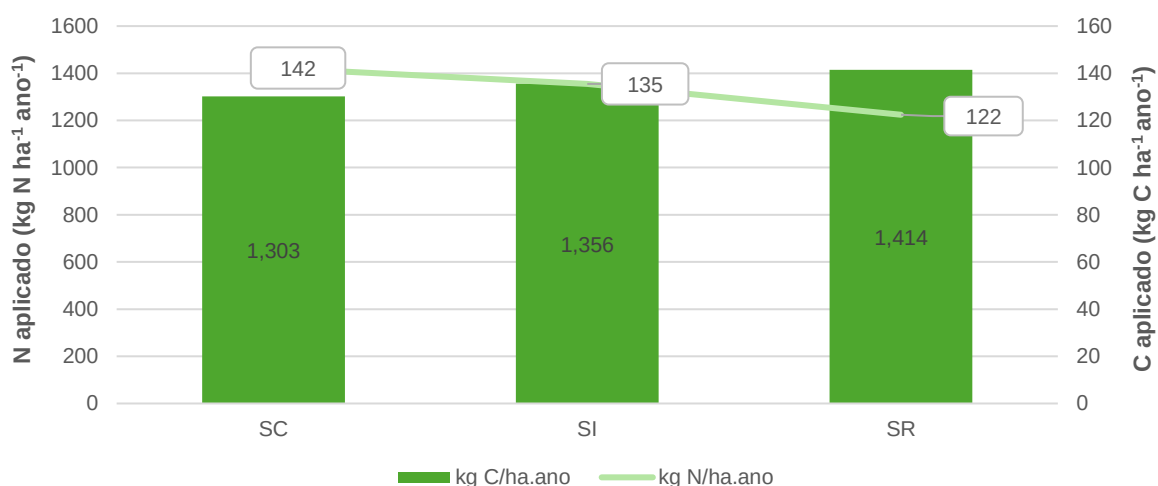


Figura 22 – Quantidade aplicada de N (kg N ha⁻¹ ano⁻¹) e C (kg C ha⁻¹ ano⁻¹) nos três sistemas de produção, ao longo do período de 9 anos. SC: Sistema de produção convencional; SI: Sistema de produção intermediário; SR: Sistema de produção reduzido.

Um dos fatores observados é que o sistema que mais recebeu nitrogênio, não foi o sistema que mais recebeu adição de carbono. Neste caso, o nitrogênio não contribuiu diretamente com o aumento da produtividade pois o SC foi o sistema de menor produtividade (Tabela 1), deixando sobre o solo, menos palhada do que SI e SR.

Em um estudo com a forrageira *Cynodon* spp., Borges et al. (2019) constataram que altas taxas de aplicação de nitrogênio não impactaram nos estoques de C do solo. Acredita-se que o nitrogênio pode tanto beneficiar a atividade microbiana e, portanto, acelerar a decomposição de resíduos vegetais e compostos de carbono, emitindo-os para a atmosfera (Neff et al., 2002), assim como promover um aumento da biomassa sobre e abaixo do solo através do aumento da produtividade primária e favorecer o input de carbono no solo (Chen et al., 2018; Valdez et al., 2017), portanto seus efeitos podem ser tanto benéficos como maléficos ao estoque de C.

Neste estudo, não observamos diretamente aumento de biomassa através da produtividade para o sistema de maior estoque, SC (98,2 Mg C/ha) (Figura 21). No entanto, Janssens et al. (2010) reportam que em solos ricos em nitrogênio a deposição do mesmo tem poucos efeitos no crescimento das plantas, mas pode reduzir a taxa de decomposição, promovendo aumento do estoque de carbono. Porém, os autores ressaltam a necessidade de realizar mais pesquisas nos trópicos, com solos intemperizados como os encontrados no Brasil. Para Chen et al. (2018) a adição de N alterou a atividade de uma enzima modificadora de lignina (lignin-modifying enzymes – LMEs) e essa supressão levou a um aumento de C no solo em longo prazo, mesmo sem um efeito sobre a produtividade. Reforça-se que a relação entre estoque de carbono e as enzimas LMEs não foi observada em solos de alta relação C/N.

Já com relação ao manejo do solo, existem diversos estudos que apresentam resultados positivos quanto ao preparo reduzido ou ao não preparo do solo, sobre o estoque de C (Powlson et al., 2016; Zhang et al., 2014). Por outro lado, Alcántara et al. (2016) apresenta justificativas para maiores estoques em solos no qual o preparo foi realizado com gradagem profunda. Para os autores, a MOS seria levada a profundidades maiores e sua decomposição se tornaria mais lenta, contribuindo assim com o aumento do estoque de C do solo.

5. CONCLUSÃO

Ao comparar as emissões dos três sistemas de produção avaliados, concluímos que há uma diferença significativa das estimativas apenas em relação ao sistema de produção reduzido quando comparado tanto ao convencional quanto ao intermediário. Portanto, o sistema que apresentou melhores resultados em ambos os indicadores avaliados ($\text{kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$ e $\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$), foi o SR. A redução foi cerca de 18% quando comparamos a intensidade de emissão (em $\text{kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) do SR ($27,6 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) aos outros dois sistemas, SC ($33,6 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$) e SI ($33,8 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$). Porém, diferentemente do esperado, este não foi o sistema que demonstrou maior estoque de C e de N. Ambos os estoques estão diretamente relacionados e ambos foram maiores no sistema SC.

Conclui-se também, com um dos objetivos deste trabalho, que se compararmos as emissões que foram estimadas utilizando FEs do Tier 1 com cálculos que utilizaram FEs do Tier 2, é possível notar uma variação positiva de 4 a $5,6 \text{ kg CO}_2\text{e tc}^{-1}$ nos cálculos de Tier 1. Isso indica que há uma superestimativa das emissões nacionais ao usarmos FEs globais que muitas vezes se distanciam de características ambientais do Brasil e da cultura inventariada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de produção considerados neste estudo para o cálculo de emissões de GEE e análise de estoque de C e N do solo, são sistemas reais que ocorrem em usinas sucroenergéticas. O inventário de emissões construído demonstrou que os manejos que receberam as operações de gradagem (SC e SI) durante o preparo do solo, não foram tão efetivos em manter a produtividade e ao mesmo tempo que garantir baixas emissões de GEE. Portanto, visando sustentabilidade ambiental e econômica, o sistema de produção que recebeu um preparo reduzido (SR) em sua reforma, garantiu os melhores resultados, sendo eles maior produtividade e menor emissão. Por sua vez, apresentando maior produtividade média ao longo, o SR garante maior deposição de resíduos vegetais por hectare, algo que pode beneficiar o canavial no input de C na MOS ao longo do tempo.

Tais resultados são importantes para usinas sucroenergéticas e produtores de cana-de-açúcar, pois demonstram a influência de um determinado manejo sobre as

emissões de GEE daquela produção. Além disso, a adoção de FEs de Tier 2 garante uma maior proximidade da realidade do manejo agrícola do Brasil refletida nas emissões. Pois, neste caso, características ambientais e culturais serão consideradas nas estimativas, o que muitas vezes não consegue ser visualizado por ferramentas de cálculos generalistas.

De acordo com os resultados obtidos, o emprego do manejo reduzido para a cana-de-açúcar, com menos interferências nas áreas, menos operações e aprimoramento da aplicação de insumos, possibilitará aumentar a contribuição socioambiental que a produção de cana-de-açúcar traz ao país e mundo. Desta forma, nota-se que é possível utilizar inventários de emissões de gases de efeito estufa como um direcionador para tomada de decisões dentro de empresas e fazendas, visando apoiar a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e o avanço nas contribuições nacionalmente determinadas do Brasil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, I.; RAHMAN, M. H.; AHMED, S.; HUSSAIN, J.; ULLAH, A.; JUDGE, J. Assessing the impact of climate variability on maize using simulation modeling under semi-arid environment of Punjab, Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 28413–28430, 2018.
- ALCÁNTARA, V.; DON, A.; WELL, R.; NIEDER, R. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2939–2956, 2016.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Adubos e a eficiência das adubações. **Associação Nacional para Difusão de Adubos - Boletim Técnico**, v. 3, 1998.
- ALMEIDA, B. G. de; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: 2017. p. 65-75.
- AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; AZCÓN, R.; TERAMOTO, J. R. S. Crop Rotation Biomass and Effects on Sugarcane Yield in Brazil. **Biomass Now - Cultivation and Utilization**, 2013.

AMELUNG, W.; BOSSIO, D.; VRIES, W. de; KÖGEL-KNABER, I.; LEHMANN, J.; AMUNDSON, R.; BOL, R.; COLLINS, C.; LAL, R.; LEIFELD, J.; MINASNY, B.; PAN, G.; PAUSTIAN, K.; RUMPEL, C.; SANDERMAN, J.; van GROENIGEN, J. W.; MOONEY, S.; van WESEMAEL, B.; WANDER, M.; CHABBI, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature Communications**, v. 11, n. 5427, p. 1–10, 2020.

ANAYA, C. A.; HUBER-SANNWALD, E. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. **Soil and Tillage Research**, v. 147, p. 20–29, 2015.

ARONSON, E. L.; ALLISON, S. D. Meta-analysis of environmental impacts on nitrous oxide release in response to N amendment. **Frontiers in Microbiology**, v. 3, n. 272, p. 29987, 2012.

AVILA, V. S. DE; MAZZUCO, H.; FIGUEIREDO, E. A. P. DE. **Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante**. Concórdia, SC: EMBRAPA-CNSPA, Circular Técnica, n. 16, 38 p. 1992.

BALIEIRO, F. de C.; ALVES, B. J. R. Nitrogênio total - Kjeldahl. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: 2017. p. 368-376.

BASANTA, M.V.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, J.R. Eficiência no uso de nitrogênio em relação aos manejos resíduos da cultura de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇÚCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL., *Anais...* 8., 2002, Recife. Piracicaba: STAB, 2002. p. 268-275.

BORDONAL, R.; FIGUEIREDO, E. B. de; AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 195–207, 2013.

BORDONAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 846–858, 2012.

BORGES, B. M. M. N.; BORDONAL, R. de O.; SILVEIRA, M. L.; COUTINHO, E. L. M. Short-term impacts of high levels of nitrogen fertilization on soil carbon dynamics in a tropical pasture. **CATENA**, v. 174, p. 413–416, 2019.

BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – What determines this? **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 589–594, 2009.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen - Total. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (org.). **Methods of soil analysis: part 2: chemical and microbiological properties**. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 595-624.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, 2022. v. 65, n. 4, p. 397–401.

CANTARELLA, H.; MATTOS, DIRCEU. **Nitrogênio**. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (org.). **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 1 ed. Campinas, SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2022. v. 1, p. 86-94.

CARMO, J. B. do; FILOSO, S.; ZOTELLI, L. C.; SOUSA NETO, E. R. de; PITOMBO, L. M.; DUARTE-NETO, P. J.; VARGAS, V. P.; ANDRADE, C. A.; GAVA, G. J. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; NETO, A. E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: Effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2013.

CARMO, H. F.; MADARI, B. E.; WANDER, A. E.; MOREIRA, F. R. B.; GONZAGA, A. C. de O.; SILVEIRA, P. M. da; SILVA, A. G.; SILVA, J. G. da; MACHADO, L. O. de A. Balanço energético e pegada de carbono nos sistemas de produção integrada e convencional de feijão-comum irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1069–1077, 2016.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 342–349, 2009.

- CARVALHO, A. L. de; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A. de S.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. von; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26–34, 2015.
- CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 6, p. 831–843, 2009.
- CHEESMAN, S.; THIERFELDER, C.; EASH, N. S.; KASSIE, G. T.; FROSSARD, E. Soil carbon stocks in conservation agriculture systems of Southern Africa. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 99–109, 2016.
- CHEN, J.; LUO, Y.; GROENIGEN, K. J. van; HUNGATE, B. A.; CAO, J.; ZHOU, X.; WANG, RUI-W. A keystone microbial enzyme for nitrogen control of soil carbon storage. **Science Advances**, v. 4, n. 8, 2018.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. da S.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils — Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 211, p. 173–184, 2015.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF: v. 11, n. 4, 2024.
- CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecological Applications**, v. 11, p. 343-355. 2001.
- CONANT, R. T.; CERRI, C. E. P.; OSBORNE, B. B.; PAUSTIAN, K. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. **Ecological Applications**, v. 27, n. 2, p. 662–668, 2017.
- CONSTANTINIDES, M.; FOWNES, J. H. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 26, n. 1, p. 49–55, 1994.
- COSTA, F.S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (org.). **Fundamentos da matéria orgânica**

do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 ed. Porto Alegre, RS: Metrópole, 2008, p. 545–559.

COSTA, Y. K. S. da; BACHA, A. L.; FRANÇA, A. B. C.; CIRILO, L. C.; CARVABLHO, L. B. de. **Manejo de plantas daninhas no sistema MEIOSI.** *Revista Agronomia Brasileira.* v. 3. 2019.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual técnico de plantio de cana-de-açúcar em MEIOSI (Método Inter rotacional Ocorrendo Simultaneamente).** Piracicaba, SP: 2019, 14 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2023: Ano base 2022.** Rio de Janeiro, RJ: EPE, 2023, 275 p.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. *State of the World's forests 2007.* Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome: FAO, 2007.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **FAO STAT Statistical Database 2013.** Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome: FAO, 2015.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, v. 319, n. 5867, p. 1235–1238, 2008.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Atualização dos Métodos de Cálculo dos Estoques de Carbono do Solo sob Diferentes Condições de Manejo.** Corumbá, MS: EMBRAPA, 2013.

FERREIRA, C. B.; ARAUJO, J. A.; TABOSA, F. J. S.; LIMA, J. R. F. de. Produtividade Agrícola nos Países da América Latina. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 54, n. 3, p. 437–458, 2016.

FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, v. 141, n. 1–2, p. 77–85, 2011.

FIRESTONE, M.; DAVIDSON, E. A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. *In*: ANDREAE, M. O.; SCHIMEL, D. S. (org.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem workshop on exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere.** 1 ed. Nova York, NY: Wiley, 1989, p. 7 – 21.

- FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. de. Carbono orgânico. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: 2017. p. 360-367.
- FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; PAVINATO, P. S.; CERRI, C. E. P.; SIX, J.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.
- FRAVET, P. R. F.; SOARES, R. A. B.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 3, p. 618–624, 2010.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. dos S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer leaching in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 1, p. 86–93, 2011.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 141–149, 2015.
- GHIMIRE, R.; BISTA, P.; MACHADO, S. Long-term Management Effects and Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon in Grassland and Agricultural Soils. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.
- GONÇALVES, D. R. P.; MISHRA, U.; WILLS, S.; GAUTAM, S. Regional environmental controllers influence continental scale soil carbon stocks and future carbon dynamics. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2021.
- GUIMARÃES, G.; LANA, R. de P; REI, R. de S.; VELOSO, C. M.; SOUSA, M. R. de M.; RODRIGUES, R. C.; CAMPOS, S. de A. Produção de cana-de-açúcar adubada com cama de frango. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, n. 4, p. 617–625, 2016.
- HOUGHTON, R. A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990*. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 51, n. 2, p. 298–313, 1999.
- HUANG, Y.; ZOU, J.; ZHENG, X.; WANG, Y.; XU, X. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 6, p. 973–981, 2004.

IPBES – Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. **Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science. Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.** [DÍAZ, S.; SETTELE, J.; BRONDÍZIO, E. S.; NGO, H. T.; GUÈZE, M.; AGARD, J.; ARNETH, A.; BALVANERA, P.; BRAUMAN, K. A.; BUTCHART, S. H. M.; CHAN, K. M. A.; GARIBALDI, L. A.; ICHII, K.; LIU, J.; SUBRAMANIAN, S. M.; MIDGLEY, G. F.; MILOSLAVICH, P.; MOLNÁR, Z.; OBURA, D.; PFAFF, A.; POLASKY, S.; PURVIS, A.; RAZZAQUE, J.; REYER, B.; ROY CHOWDHURY, R.; SHIN, Y. J.; VISSEREN-HAMAKERS, I. J.; WILLIS, K. J.; ZAYAS, C. N. (org.)]. Bonn: IPBES secretariat. 2019.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.** [EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (orgs.)]. Japão: IGES, 2006.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (org.)]. Genebra: IPCC, 2007. 104 p.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** [CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (org.)]. Suécia: IPCC. 2019.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (org.)]. Cambridge e Nova York: IPCC, 2021. 2409 p.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [LEE, H.; ROMERO, J. (org.)]. Genebra: IPCC, 2023. p. 35-115.

JAISWAL, R.; MALL, R. K.; PATEL, S.; SINGH, N.; MENDIRATTA, N.; GUPTA, A. Indian sugarcane under warming climate: A simulation study. **European Journal of Agronomy**, v. 144, p. 126760, 2023.

JANSSENS, I. A.; DIELEMAN, W.; LUYSSAERT, S.; SUBKE, J.-A.; REICHSTEIN, M.; CEULEMANS, R.; CIAIS, P.; DOLMAN, A. J.; GRACE, J.; MATTEUCCI, G.; PAPALE, D.; PIAO, S. L.; SCHULZE, E.-D.; TANG, J.; LAW, B. E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 5, p. 315–322, 2010.

JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; BODEY, R. M.; URQUIAGA, S. Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: avaliação do impacto do manejo de solo. *In*: ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. A. O. (org.). **Manejo de sistemas agrícolas: impacto no sequestro de C e nas emissões de gases do efeito estufa**. Porto Alegre: Embrapa Agrobiologia, 2006. p. 35-57.

JESUS, G. M. K.; JUGEND, D.; PAES, L. A. B.; SIQUEIRA, R. M.; LEANDRIN, M. A. Barriers to the adoption of the circular economy in the Brazilian sugarcane ethanol sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 2, p. 381–395, 2023.

JIA, G.; SHEVLIKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP, A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. Land–climate interactions. *In*: SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; van DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (org.). **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. IPCC, 2019, p. 131 – 247.

LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environment International**, v. 30, n. 7, p. 981–990, 2004.

LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. *In*: MIRANDA, L. L. D.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (org.). **Cana-de-açúcar**. Instituto Agronômico, Campinas, SP: IAC, 2008. p. 101-155.

LA SCALA JR., N.; MARTINEZ, A. S.; SPOKAS, K. A.; GONÇALVES, D. R. P.; ETTO, R. M. Should alterations in water viscosity be addressed in soil carbon models? **arXiv:2204.00405 [q-bio.QM]**. 2022.

LIU, L.; GREAVES, T. L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission. **Ecology letters**, v. 12, n. 10, p. 1103–1117, 2009.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2004.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, n. 1–2, p. 84–91, 2009.

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.

MANNERS, R.; VAN ETTEN, J. Are agricultural researchers working on the right crops to enable food and nutrition security under future climates? **Global Environmental Change**, v. 53, p. 182–194, 2018.

MARCO, E.; ANJOS E SILVA, S. D. dos; PERES, M. M.; MATOSO, E. S.; TATTO, F. R.; BOELTER, J. H.; CAMPOS, A. D. S. de. Uso de substratos alternativos na produção de mudas de cana-de-açúcar. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa - Congrega Urcamp**, v. 14, p. 2677–2690, 2017.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Resultados do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa por unidade federativa, Quarta comunicação nacional do Brasil a UNFCCC**. São Paulo, 2021. 51 p.

MONZONI, M.; BHATIA, P.; BIDERMAN, R.; FRANSEN, T.; OLIVEIRA, B.; STRUMPF, R.; ROBINSON, K. Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol:

Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa. **Fundação Getúlio Vargas (FGV) e World Resources Institute (WRI)**, ed. 2, p. 39, 2008.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63–81, 1996.

NABUURS, G-J.; MRABET, R.; ABU HATAB, A.; BUSTAMANTE, M.; CLARK, H.; HAVLÍK, P.; HOUSE, J.; MBOW, C.; NINAN, K. N.; POPP, A.; ROE, S.; SOHNGEN, B.; TOWPRAYOON, S. **Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)**. In **IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; SLADE, R.; AL KHOURDAJIE, A.; van DIEMEN, R.; MCCOLLUM, D.; PATHAK, M.; SOME, S.; VYAS, P.; FRADERA, R.; BELKACEMI, M.; HASIJA, A.; LISBOA, G.; LUZ, S.; MALLEY, J. (org.)]. Cambridge e Nova York: IPCC, 2022.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER), Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program and Langley Research Center (LaRC). POWER Project's Hourly 2.3.6. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

NEFF, J. C.; TOWNSEND, A. R.; GLEIXNER, G.; LEHMAN, S. J.; TURBULL, J.; BOWMAN, W. D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. **Nature**, v. 419, n. 6910, p. 915–917, 2002.

NICCHIO, B.; CARDOZO, C. C.; VIEIRA, M. A. M. Efeitos de substratos na qualidade de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 25, n. 1, p. 1 – 6, 2020.

NUNES, L. J. R.; LOUREIRO, L. M. E. F.; SÁ, L. C. R.; SILVA, H. F. C. Sugarcane Industry Waste Recovery: A Case Study Using Thermochemical Conversion Technologies to Increase Sustainability. **Applied Sciences**, v. 10, n. 18, p. 6481, 2020.

OLIVEIRA, M.W. *Dinâmica do nitrogênio da uréia (15N), no sistema solo-cana-de-açúcar com e sem queima da palhada*. 1999. 93f. (Tese - Doutorado) – Universidade de São Paulo/CENA, Piracicaba, 1999.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200–201, p. 77–84, 2013.

OLIVEIRA, D. M. da S.; PAUSTIAN, K.; DAVIES, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 228, p. 38–48, 2016.

OLIVEIRA, B. G.; LOURENÇO, K. S.; CARVANLHO, J. L. N.; GONZAGA, L. C.; TEIXEIRA, M. C.; TAMARA, A. F.; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. New trends in sugarcane fertilization: Implications for NH₃ volatilization, N₂O emissions and crop yields. **Journal of Environmental Management**, v. 342, p. 118233, 2023.

ORTIZ-BOBEA, A.; AULT, T. R.; CARRILLO, C. M.; CHAMBERS, R. G.; LOBELL, D. B. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 4, p. 306–312, 2021.

OTTO, R.; FREITAS JR.; J. C. M. de; ZAVASCHI, E.; FARIA, I. K. P. de; PAIVA, L. A.; BAZANI, J. H.; MIRA, A. B. de; KAMOGAWA, M. Y. Combined Application of Concentrated Vinasse and Nitrogen Fertilizers in Sugarcane: Strategies to Reduce Ammonia Volatilization Losses. **Sugar Tech**, v. 19, n. 3, p. 248–257, 2017.

PAREDES, D. da S.; LESSA, A. C. da R.; SANT'ANNA, S. A. C. de; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 98, n. 1, p. 41–55, 2014.

PARK, S. E.; WEBSTER, T. J.; HORAN, H. J.; JAMES, A. T.; THORBURN, P. J. A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. **Field Crops Research**, v. 119, n. 2–3, p. 331–341, 2010.

PARRY, M.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; FISCHER, G.; LIVERMORE, M. Climate change and world food security: A new assessment. **Global Environmental Change**, v. 9, p. s51-s67, 1999.

PORTER, J. R.; XIE, L.; CHALLINOR, A. J.; COCHRANE, K.; HOWDEN, S. M.; IQBAL, M. M.; LOBELL, D. B.; TRAVASSO, M. I. Food security and food production systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of

the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (org.)]. Cambridge e Nova York: IPCC, 2014, p. 485-533.

PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: II. Características da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 244–249, 2011.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.

PEREIRA, B. de J.; CECÍLIO FILHO, A. B.; LA SCALA JR., N.; FIGUEIREDO, E. B. de. Greenhouse gas emissions and carbon footprint of collard greens, spinach and chicory production systems in Southeast of Brazil. **Frontiers in plant science**, v. 13, 2022.

PEREIRA, B. DE J.; CECÍLIO FILHO, A. B.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas emissions and carbon footprint of cucumber, tomato and lettuce production using two cropping systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124517, 2021.

PERILLO, L. I.; BORDONAL, R. de. O.; FIGUEIREDO, E. B. de; MOITINHO, M. R.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JR., N. Avoiding burning practice and its consequences on the greenhouse gas emission in sugarcane areas southern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 1, p. 719–730, 2022.

PISANTE, M. et al. Conservation agriculture and climate change. **Conservation Agriculture**, p. 579–620, 2015.

POWLSON, D. S.; STIRLING, C. M.; GERARD, B. G.; PALM, C. A.; SANCHEZ, P. A.; CASSMAN, K. G. Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 220, p. 164–174, 2016.

POWLSON, D. S.; WHITMORE, A. P.; GOULDING, K. W. T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 42–55, 2011.

RANGANATHAN, J.; CORBIER, L.; BHATIA, P.; SCHMITZ, S.; GAGE, P.; OREN, K. The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard. **World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)**, ed. 2, p. 116, 2004.

RFA – Renewable Fuels Association. **Ethanol industry outlook**. 2024.

ROE, S.; STRECK, C.; OBERSTEINER, M.; FRANK, S.; GRISCOM, B.; DROUET, L.; FRICKO, O.; GUSTI, M.; HARRIS, N.; HASEGAWA, T.; HAUSFATHER, Z.; HAVLIK, P.; HOUSE, J.; NABUURS, G.-J.; POPP, A.; SÁNCHEZ, M. J. S.; SANDERMAN, J.; SMITH, P.; STEHFEST, E.; LAWRENCE, D. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 11, p. 817–828, 2019.

RONQUIM, C. C. **Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2007. 52 p.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F (orgs.). **Sistema Brasileiro de Ciência do Solo**. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355 p.

SANTOS, D. L.; SENTELHAS, P. C. Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 7, n. 2, 2012.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2022**. São Paulo, SP: SEEG, 2023. 34 p.

SEEG - Sistema de Estimativas e Remoções de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Nota metodológica: Setor Agropecuário**. [POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. de O.; CARDOSO, A. M.; LIMA, P. N. A., eds]. São Paulo. 2023b.

SHEN, Y.; LIU, X. Phenological Changes of Corn and Soybeans over U.S. by Bayesian Change-Point Model. **Sustainability**, v. 7, n. 6, p. 6781–6803, 2015.

SILVA, A. P. M. da; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. DE A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 38–43, 2014.

SIANSI, F. L. *Emissão CO₂ do solo e indicadores de produtividade e suas relações com características espectrais da cana-de-açúcar sob diferentes épocas de plantio*. 2024. 96 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’, São Paulo. 2024.

SIQUEIRA NETO, M.; GALDOS, M. V.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Direct N₂O emission factors for synthetic N-fertilizer and organic residues applied on sugarcane for bioethanol production in Central-Southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 269–280, 2016.

SMEETS, E. M. W. et al. Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels. **Global Change Biology**, v. 15, n. 1, p. 1–23, 1 jan. 2009.

SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 363, n. 1492, p. 789–813, 27 fev. 2008.

SMITH, P.; NKEM, J.; CALVIN, K.; CAMPBELL, D.; CHERUBINI, F.; GRASSI, G.; KOROTKOV, V.; HOANG, A. L.; LWASA, S.; MCELWEE, P.; NKONYA, E.; SAIGUSA, N.; SOUSSANA, J.-F.; TABOADA, M. A. Interlinkages Between Desertification, Land Degradation, Food Security and Greenhouse Gas Fluxes: Synergies, Trade-offs and Integrated Response Options. In: SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PORTNER, H.- O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; van DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (eds.) **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. IPCC, 2019.

SOARES, A. A.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C. O Brasil como grande player no mercado mundial de etanol. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 57, 2021.

SOMBROEK, W. G.; NACHTERGAELE, F. O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio (Journal of the Human Environment, Research and Management); (Sweden)**, v. 22:7, 1993.

SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; SILVA, E. A. da; ULIAN, E. C.; WACLAWOVSKY, J.; NISHIYAMA JR., M. Y.; SANTOS, R. V. dos; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, cell e environment**, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, 2008.

TAN, Q.; LIU, Y.; DAI, L.; PAN, T. Shortened key growth periods of soybean observed in China under climate change. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2021.

TANG, X.; ZHANG, Y.; JANG, J.; MENG, X.; HUANG, Z.; WU, H.; HE, L.; XIONG, F.; LIU, J.; ZHONG, R.; HAN, Z.; TANG, R. Sugarcane/peanut intercropping system improves physicochemical properties by changing N and P cycling and organic matter turnover in root zone soil. **PeerJ**, v. 9, 2021.

TEIXEIRA, A. V.; SOBRINHO, L. L. P.; REATO, T. T. Sustentabilidade e ESG: O consumo sustentável no cenário neoliberal. **Veredas do Direito**, v. 21, p. e212633, 2024.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W. de; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Perdas do nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193–201, 2002.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Decision 17/CP.8, Guidelines for the preparation of national communications from Parties not included in Annex I to the Convention**. Nova Déli: Conference of the Parties, 2008.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **Adoption of the Paris Agreement**. Paris: Conference of the Parties, 2015.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. **United Nations Climate Change: Annual Report 2022**. Bonn: UNFCCC, 2023. 56 p.

VALDEZ, Z. P.; HOCKADAY, W. C.; MASIELLO, C. A.; GALLAGHER, M. E.; ROBERTSON, P. Soil Carbon and Nitrogen Responses to Nitrogen Fertilizer and Harvesting Rates in Switchgrass Cropping Systems. **Bioenergy Research**, v. 10, n. 2, p. 456–464, 2017.

- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.
- VU, J. C. V.; ALLEN, 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, n. 11, p. 1141–1151, 2009.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934
- WANG, M.; WU, M.; HUO, H. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. **Environmental Research Letters**, v. 2, n. 2, p. 024001, 2007.
- WANG, Y. P.; HOULTON, B. Z. Nitrogen constraints on terrestrial carbon uptake: Implications for the global carbon-climate feedback. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 24, 2009.
- WIEDER, W. R.; CLEVELAND, C. C.; SMITH, W. K.; TODD-BROWN, K. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. **Nature Geoscience** 2014 8:6, v. 8, n. 6, p. 441–444, 2015.
- ZAEHLE, S.; DALMONECH, D. Carbon–nitrogen interactions on land at global scales: current understanding in modelling climate biosphere feedbacks. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 3, n. 5, p. 311–320, 2011.
- ZANATTA, J. A.; PULROLNIK, K; VIANA, J. H. M. **Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais – Projeto Saltus**. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 31 p.
- ZHANG, H. L.; LAL, R.; ZHAO, X.; XUE, J-F.; CHEN, F. Opportunities and Challenges of Soil Carbon Sequestration by Conservation Agriculture in China. **Advances in Agronomy**, v. 124, p. 1–36, 2014.
- ZUMFT, W. G. Cell biology and molecular basis of denitrification. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 61, n. 4, p. 533, dez. 1997.