

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E PEGADA DE
CARBONO NA PRODUÇÃO DE PEPINO, TOMATE E
ALFACE EM DOIS SISTEMAS DE CULTIVO**

Breno de Jesus Pereira

Engenheiro Agrônomo

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E PEGADA DE
CARBONO NA PRODUÇÃO DE PEPINO, TOMATE E
ALFACE EM DOIS SISTEMAS DE CULTIVO**

Breno de Jesus Pereira

Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

Coorientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

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)

2020

P436e Pereira, Breno de Jesus
Emissão de gases de efeito estufa e pegada de carbono na
produção de pepino, tomate e alface em dois sistemas de cultivo /
Breno de Jesus Pereira. -- Jaboticabal, 2020
37 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho
Coorientador: Newton La Scala Júnior

1. Horticultura. 2. Gases de efeito estufa. 3. Hortaliças. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE PEPINO, TOMATE E ALFACE EM DOIS SISTEMAS DE CULTIVO

AUTOR: BRENO DE JESUS PEREIRA

ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO

COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO
UFSCAR / Araras/SP

Resquisador Dr. ROBERTO BOTELHO FERRAZ BRANCO
APTA - IAC / Ribeirão Preto/SP

Jaboticabal, 20 de fevereiro de 2020

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

BRENO DE JESUS PEREIRA – nascido em 28 de janeiro de 1993 na cidade de Dário Meira, Bahia. Filho de Valdir Santos Pereira e Maria Aparecida de Jesus; e irmão de Bruno de Jesus Pereira e Beatriz de Jesus Pereira. Em 2012 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Durante a graduação estagiou na Embrapa Mandioca e Fruticultura (2014/2015), como bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/FAPESB). Realizou intercâmbio na École d'Ingénieurs Agronomes Bordeaux Sciences Agro (2015/2016), em Bordeaux, França, como participante do Programa de Intercâmbio Brasil França Agricultura (BRAFRAGRI), período em que estagiou na empresa vitícola Domaine La Suffrene (2016), em Toulon. Ao regressar a UFRB, participou do Grupo de Pesquisa - Manejo de Nutrientes no Solo e em Plantas Cultivadas (2017/2018). Em junho de 2018 recebeu o título de Engenheiro Agrônomo pela UFRB. Em agosto de 2018 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal, sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho e coorientação do Prof. Dr. Newton La Scala Júnior.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Valdir e Maria, os quais não mediram esforços para que eu estudasse, me incentivaram e aconselharam nas decisões que tomei e nos momentos difíceis, sendo o grande alicerce para que eu alcançasse esse objetivo.

Aos meus irmãos Bruno e Beatriz, e minha tia Sandra, por sempre me apoiarem.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, e meu coorientador, Prof. Dr. Newton La Scala Júnior, pelos conhecimentos compartilhados, incentivo e excelente orientação e coorientação no desenvolvimento desse trabalho, contribuindo imensamente para minha carreira como profissional.

A minha namorada, Laura Campos, pelo companheirismo, amor, carinho e apoio em todos os momentos.

Aos meus grandes amigos, Alexandre Gonçalves, Ilan Félix e Danilo Passos, pela amizade em todos os momentos.

Aos amigos do grupo de pesquisa em nutrição e adubação de hortaliças, Beliza Queiroz, Camila Seno, Carolina Seno, Danilo Passos, Isaías Reis, María José, Paulo Henrique Soares e Tancredo Carlos, pelas experiências compartilhadas e momentos de descontração.

Aos amigos da Unesp, Alaor Rocha, Alexson Dutra, Clebson Praxedes, Gabriel Fernandes, Larissa Silva e Maiara Alexandre, pelos momentos especiais.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Jaboticabal-SP, pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro concedido para realização do curso de mestrado.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Emissão de GEE na agricultura	3
2.2 Pegada de carbono	4
2.3 Impacto da produção de hortaliças	4
2.4 Consórcio de hortaliças	6
3 MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1 Descrição dos sistemas de produção.....	7
3.2 Limites estabelecidos e unidades funcionais.....	8
3.3 Corretivos e fertilizantes sintéticos e orgânicos.....	9
3.3.1 Emissão direta de N ₂ O - fertilizante nitrogenado	9
3.3.2 Emissão indireta de CO ₂ – fabricação de fertilizantes.....	11
3.3.3 Emissões provenientes da calagem e adubação orgânica	11
3.4 Pesticidas	12
3.5 Irrigação – emissão indireta	13
3.6 Diesel – emissão direta e indireta	13
3.7 Infraestrutura – emissão indireta	14
3.8 Variação no estoque de carbono no solo	14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 CONCLUSÕES	21
6 REFERÊNCIAS	22

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE PEPINO, TOMATE E ALFACE EM DOIS SISTEMAS DE CULTIVO

RESUMO – O cultivo consorciado de hortaliças é considerado uma alternativa ao sistema convencional, pois caracteriza-se pela maior eficiência do uso da terra e de insumos. Por esta razão, acredita-se ser este um modelo de cultivo mais sustentável e de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE). Assim, objetivou-se estimar a emissão direta e indireta de GEE e a pegada de carbono por quilograma de hortaliça produzida nos sistemas de consórcio e monocultivo, em ambiente protegido. Para isso, baseado em trabalhos publicados sobre a eficiência agrônômica destes sistemas, foram comparados consórcios de pepino-alface e de tomate-alface com monocultivos de pepino, tomate e alface. Duas unidades funcionais foram selecionadas para estimar o impacto de cada sistema, um quilograma de hortaliça produzido e um hectare de cultivo. O total de GEE emitido para cada sistema de cultivo foi convertido em CO₂ equivalente (CO₂eq), utilizando a metodologia do IPCC e fatores específicos (Tier 2). As emissões totais de GEE nos dois consórcios (16.368 kg CO₂eq ha⁻¹) foram cerca de 35 % menores que o total emitido quando em monocultivos (25.273 kg CO₂eq ha⁻¹), sendo a infraestrutura e fertilizantes sintéticos as principais fontes contribuintes nos dois sistemas. A pegada de carbono para a produção de um quilograma de hortaliça em consórcio (0,105 kg CO₂eq kg⁻¹) é cerca de cinco vezes menor que em monocultivo (0,516 kg CO₂eq kg⁻¹), e essa diferença se deve, também, às diferentes produtividades das culturas. Os resultados confirmam que os consórcios de pepino-alface e de tomate-alface devem ser fomentados pois são mitigadores de GEE em relação aos seus respectivos monocultivos.

Palavras-chave: CO₂ equivalente, hortaliças, consórcio, emissão direta e indireta.

GREENHOUSE GAS EMISSION AND CARBON FOOTPRINT FROM PRODUCTION OF CUCUMBER, TOMATO AND LETTUCE IN TWO CROP SYSTEMS

ABSTRACT – Vegetables intercropping cultivation is considered an alternative to the conventional system, as it is characterized by greater efficiency of land use and inputs. For this reason, it is believed to be a more sustainable and low greenhouse gas (GHG) emission cultivation model. Thus, the aim of this study was estimate direct and indirect GHG emission and the carbon footprint per kilogram of vegetables produced in intercropping and monoculture systems, in protected environment. Based on published works about agronomic efficiency of these systems, it was compared intercropping of cucumber-lettuce and tomato-lettuce with cucumber, tomato and lettuce monoculture. Two functional units were selected to estimate the impact of each system, one kilogram of vegetables produced and one hectare of cultivation. Total GHG emissions for each cropping system were converted in CO₂ equivalent (CO₂eq) using the IPCC methodology and specific factors (Tier 2). GHG emissions in both intercropping cultivation (16,368 kg CO₂eq ha⁻¹) were about 35% lower than the total emitted in monocultures (25,273 kg CO₂eq ha⁻¹). The main contributing GHG emission sources were infrastructure and synthetic fertilizers in both systems. Carbon footprint for production of one kilogram vegetables in intercropping (0.105 kg CO₂eq kg⁻¹) is about five times lower than in monoculture (0.516 kg CO₂eq kg⁻¹), and this difference is also due to the different crop productivity. The results confirm that intercropping cultivation of cucumber-lettuce and tomato-lettuce should be promoted as they are GHG mitigators in relation to their respective monocultures.

Keywords: CO₂ equivalent, vegetables, intercropping, direct and indirect emission.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Fontes de emissão direta e indireta de GEE e respectivos fatores de emissões utilizados nos cálculos para a produção de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.	10
Tabela 2. Total de insumos e materiais no cultivo de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.	12
Tabela 3. Consumo de combustível (diesel) nas operações realizadas com trator MF 275 (77 cv) no cultivo de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.	14
Tabela 4. Produtividade das culturas obtidas nos experimentos realizados por Rezende et al. (2010) e Cecílio Filho et al. (2011) e utilizada nos cálculos da pegada de carbono da produção de hortaliças nos sistemas avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivo: pepino, tomate e alface.	19

LISTA DE FIGURAS

Página

- Figura 1.** Sistemas de produção de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivo: pepino, tomate e alface; e suas respectivas fontes de emissões de GEE durante o ciclo de produção de 4 meses para o pepino, 6 meses para o tomate e 2 meses para a alface.... 8
- Figura 2.** Emissões totais de GEE (kg CO₂eq ha⁻¹), associadas as mudanças de estoque de carbono no solo e as fontes emissoras de GEE definidas de acordo com o limite adotado, nos sistemas de produção de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivos: pepino, tomate e alface. 16
- Figura 3.** Emissões totais (kg CO₂eq ha⁻¹) para cada produção dentro dos sistemas avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivos: pepino, tomate e alface. 18
- Figura 4.** Pegada de carbono total (kg CO₂eq kg⁻¹ de hortaliças) e em cada produção dentro dos sistemas de cultivo de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) pepino, tomate e alface..... 19

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é um dos principais setores que contribuem para as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), cerca de 25 % do total de GEE. Por isso, a adoção de modelos de produção com baixa emissão de carbono é essencial no processo de mitigação e remoção de GEE da atmosfera (IPCC, 2014). A produção de alimentos de forma sustentável é prioridade para a sociedade e o desafio da agricultura está na necessidade de aumentar a produção sem comprometer o ambiente (Sala et al., 2017; Zarei et al., 2019).

No Brasil, dada à substancial participação da agricultura na emissão de GEE, cerca de 25 % das emissões totais (SEEG, 2019), ela se apresenta como setor fundamental a ser trabalhado para o país atingir a meta assinada no acordo da 21^a Conferência das Partes (COP21), de reduzir as emissões de GEE em 43% dos níveis referentes a 2005, até 2030, o que equivale a um teto de emissões de 1.200 MtCO₂ (BRASIL, 2015) e, ainda, restaurar a credibilidade do Brasil na adoção de políticas de combate ao aquecimento global.

Estudos vêm sendo realizados para avaliar o impacto das práticas agrícolas e das mudanças no uso da terra nas emissões globais de GEE (Cerri et al., 2016; Carmo et al., 2016; Bordonal et al., 2017; Figueiredo et al., 2017; Silva et al., 2017; Silva et al., 2018; Farhate et al., 2019); entretanto, ainda são poucos os estudos referentes ao impacto da produção de hortaliças no Brasil.

No contexto mundial, estudos sobre o impacto do cultivo de hortaliças sobre os sistemas naturais e climático tem sido realizados, em especial sobre a emissão de GEE e pegada de carbono associada a produção de pepino (Zarei et al., 2019; Khoshnevisan et al., 2014), tomate (Clavreul et al., 2017; Ntinis et al., 2017; Torrellas et al., 2012) e alface (Bartzas et al., 2015; Plawecki et al., 2014). A necessidade de aumento da produção devido à crescente demanda do mercado consumidor, bem como as normas de segurança alimentar cada vez mais rígidas e a preocupação com a sustentabilidade dos recursos naturais têm gerado uma busca por novas práticas que tornem os sistemas de cultivos mais eficientes (Cecílio Filho et al., 2011; Nascimento et al., 2018) e sustentáveis.

Entre as hortaliças mais consumidas no Brasil estão tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) e alface (*Lactuca sativa*) e juntas ocupam 25.733 hectares no estado de São Paulo (IEA, 2018), Brasil. O cultivo dessas

hortaliças é realizado predominantemente no sistema de monocultivo, sendo uma atividade impactante ao ambiente devido ao intenso uso dos recursos naturais (solo, água), insumos (fertilizantes, plástico, energia, pesticidas) e mão de obra. Por isso, estudos demonstrando como tornar sistemas de produção de alimentos mais econômico e ambientalmente sustentável são essenciais para conter o aquecimento do planeta, garantindo a segurança alimentar da população (Notarnicola et al., 2017).

O cultivo consorciado de hortaliças é uma interessante alternativa ao sistema convencional (monocultura), pois caracteriza-se pela maior eficiência do uso da área, aumenta a produtividade, maximiza o uso dos recursos ambientais e otimiza o uso de insumos, tornando o sistema ecologicamente mais equilibrado (Koefender et al., 2016). Considerando os aspectos econômicos, Rezende et al (2010) e Cecílio Filho et al (2011) observaram que, o cultivo consorciado entre pepino-alface e tomate-alface é vantajoso em relação aos monocultivos. Porém, quanto aos aspectos ambientais, não foram encontrados na literatura trabalhos quantificando as emissões de GEE e a pegada de carbono da produção de pepino, tomate e alface, em consórcio ou monocultivo, no Brasil.

A determinação da pegada de carbono é um importante atributo na avaliação do impacto de um sistema produtivo sobre o ambiente (Wiedmann e Minx, 2007) e pode contribuir para mitigação do aquecimento global decorrente da produção de alimentos. Assim, além das vantagens agroeconômicas do consórcio (Rezende et al., 2010; Cecílio Filho et al., 2011), pode-se também ratificá-lo, sob o ponto de vista das emissões de GEE, como o sistema de cultivo menos impactante ao ambiente e, portanto, a ser fomentado aos produtores destas hortaliças, no Brasil. Portanto, a hipótese é de que a produção de pepino, tomate e alface no sistema de consórcio emite menor quantidade de GEE e tem menor pegada de carbono em relação ao monocultivo.

Diante do exposto, objetivou-se estimar as emissões diretas e indiretas de GEE, e a pegada de carbono para hortaliças produzida, em casa de vegetação, em dois sistemas de cultivo – a) consórcios de pepino-alface e tomate-alface, e – b) monocultivos de pepino, tomate e alface.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissão de GEE na agricultura

A agricultura ocupa cerca de, aproximadamente, 24 % da superfície terrestre (Cerri et al., 2007) e as atividades antropogênicas como as mudanças no uso da terra e manejo do solo para práticas agrícolas são os principais contribuintes para as emissões dos gases de efeito estufa (GEE) associadas a este setor, gerando impactos sobre as mudanças climáticas e aquecimento do planeta (IPCC, 2014). A previsão para os próximos 100 anos é de um aumento entre 1,4 °C e 5,8 °C na temperatura média da Terra e os principais gases emitidos em consequência das práticas de manejo agrícola são o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que juntos representam cerca de 25 % do total emitido (IPCC, 2014).

O Brasil é o 7º maior emissor de GEE no mundo, contribuindo com cerca de 2,9 % do total emitido. Em 2018, o país emitiu 1,939 bilhão de toneladas brutas de CO₂ eq, sendo o setor agropecuário e as mudanças no uso da terra responsáveis por cerca de 69 % das emissões (SEEG, 2019). Diante da urgência de reduzir as emissões de GEE, o desenvolvimento de sistemas agrícolas ambientalmente mais sustentáveis e de baixa emissão de carbono é fundamental, uma vez que a agricultura é o principal meio de garantir a segurança alimentar, fornecimento de fibras e biocombustíveis para a população mundial (IPCC, 2014).

No acordo submetido durante à COP21, o Brasil propôs reduzir as emissões nacionais a 1,3 GtCO₂ eq em 2025 e 1,2 GtCO₂ eq em 2030, o que corresponde à redução de 37% em 2025 e 43% em 2030, tendo como base as emissões nacionais de 2005 reportadas em 2,1 GtCO₂ eq (BRASIL, 2015). Porém, a governança climática do país passou a ser contestada e encontra-se em descrédito desde as mudanças no cenário político do Brasil nos últimos anos (SEEG, 2019). Ações no setor agrícola, visando explorar de forma racional as áreas de cultivo, sob a ótica do aumento da produtividade, redução das emissões de GEE e baixo impacto ambiental, são fundamentais para o Brasil reestabelecer a credibilidade em cumprir os acordos internacionais e atingir as metas de mitigação das emissões de GEE (MCTI, 2017).

Os estudos sobre a emissão de GEE advindos do setor agrícola, no Brasil, concentram-se, principalmente, em áreas como a pecuária (Cerri et al., 2016; Figueiredo et al., 2017; Silva et al., 2017) e grandes culturas, como a cana de açúcar

(Macedo et al., 2008; Bordonal et al., 2013; Bordonal et al., 2017), café (Oliveira Júnior et al., 2015), feijão (Carmo et al., 2016), entre outras. Entretanto, não foram encontrados estudos sobre emissão de GEE e pegada de carbono na produção de hortaliças no Brasil, sendo necessário a realização de trabalhos que avaliem o impacto deste setor e proponha alternativas de sistemas mais eficientes e com menores emissões.

2.2 Pegada de carbono

A pegada de carbono é uma medida da quantidade total, em unidade de massa, das emissões diretas e indiretas de gases de efeito estufa causada por uma pessoa, atividade, organização, evento ou acumulada durante a produção, uso e descarte de um produto (Weidmann e Minx, 2007; Pandey et al., 2011). No setor agrícola, a avaliação da pegada de carbono permite identificar as atividades com maior potencial de emissão de GEE ao longo do ciclo de produção e possibilita a definição de práticas de manejo que reduzam essas emissões (Santos et al., 2013).

As estimativas da pegada de carbono são apresentadas em CO₂ equivalente, considerando o potencial de aquecimento global de diferentes gases de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono (IPCC, 2013). O potencial de aquecimento global (PAG) é a uma medida que determina a quantidade que cada GEE contribui para o aquecimento global em relação ao CO₂, calculado de acordo com a força radioativa e o tempo médio em que cada molécula desses gases permanecem na atmosfera. Portanto, o PAG permite comparar o impacto de diferentes GEE e padronizá-los em uma unidade, CO₂ equivalente (Pandey et al., 2011).

O PAG pode variar de acordo o horizonte temporal. De acordo com o IPCC (2013), o PAG, para o período de 100 anos, é igual a 1 para o CO₂, pois é o gás de referência, 28 para o CH₄ e 265 para N₂O. Geralmente, considera-se o horizonte de 100 anos nas avaliações das emissões de GEE no setor agrícola.

2.3 Impacto da produção de hortaliças

A quantidade de hortaliças produzidas no mundo aumentou, aproximadamente, 58 % entre os anos de 2000 a 2016 (FAO, 2016). As melhorias de produtividade,

possibilitadas principalmente pela mecanização e pelo uso intensivo de insumos (fertilizantes e pesticidas), resultaram em aumento do impacto ambiental e emissões diretas e indiretas de GEE, o que frequentemente está relacionado ao uso ineficiente ou inadequado desses recursos (Tasca et al., 2017).

O Brasil é o 10º maior produtor mundial de hortaliças, com produção de 3.077.506 toneladas (FAO, 2017), sendo a região sudeste do Brasil o principal centro de comercialização do país, com cerca de 54 % do total (CONAB, 2019). Tomate, pepino e alface estão entre as principais hortaliças produzidas e consumidas e juntas ocuparam área plantada de cerca de 25.733 hectares no estado de São Paulo, em 2018 (IEA, 2019). Na região Sudeste do Brasil, o cultivo dessas hortaliças em casa de vegetação é uma tecnologia que protege as plantas das baixas temperaturas no inverno e da elevada pluviosidade no verão, o que permite o produtor obter produtos de excelente qualidade comercial (Rezende et al., 2010). Todavia, o cultivo em ambiente protegido gera impacto sobre as emissões de GEE e mudanças climáticas (Gruda et al., 2019a).

Diante da crescente conscientização da população sobre as questões de sustentabilidade, o desenvolvimento de métodos de produção ambientalmente responsáveis e de baixa emissão de carbono são cada vez mais necessários (Clavreul et al., 2017). O entendimento sobre a origem das emissões de GEE é essencial no processo de mitigação dos GEE e adaptação às mudanças climáticas, visando garantir a segurança alimentar e atender as exigências dos consumidores por produtos com alto padrão de qualidade e oriundos de sistemas sustentáveis (Ntinis et al., 2017; Bisbis et al., 2018).

Em países de regiões temperadas, o cultivo de hortaliças em ambiente protegido é altamente dependente do consumo de energia, utilizada principalmente na climatização das casas de vegetação (Boulard et al., 2011; Gruda et al., 2019b). Estudos indicam o uso de energia, oriunda basicamente de fontes fósseis e não renováveis, como uma das principais fontes emissoras de GEE nesse setor (Khoshnevisan et al., 2013; Plawecki et al., 2014; Ntinis et al., 2017).

No Brasil, acredita-se que o consumo de energia associado à produção de hortaliças gera baixa emissão de GEE, uma vez que, o cultivo em ambiente protegido geralmente não utiliza sistema de climatização, devido às condições climáticas favoráveis, e as fontes de energia utilizadas são cerca de 75 % renováveis (IPEA, 2019). Entretanto, outras potenciais fontes emissores de GEE neste setor, como a

infraestrutura e a alta demanda por fertilizantes, pesticidas, irrigação e combustível, nas operações de manejo do solo, podem impactar no aquecimento global e mudanças climáticas (Brito et al., 2017; Ntinis et al., 2017).

2.4 Consórcio de hortaliças

O cultivo consorciado de hortaliças é uma prática que busca melhorar a eficiência do sistema de produção através da combinação de plantas que serão cultivadas sobrepostas na mesma área, visando maximizar a produtividade, o uso dos recursos naturais (solo e água), insumos (fertilizantes e pesticidas) e o retorno econômico (Koefender et al., 2016; Costa et al., 2017). Ainda, essa tecnologia pode ser vantajosa quanto a sustentabilidade do sistema de produção, através da manutenção da biodiversidade, proteção do solo contra erosão e reciclagem de nutrientes (Almeida et al., 2015; Colombo et al., 2018; Cecílio Filho et al., 2019).

O consórcio em olericultura vem sendo amplamente estudado e tem demonstrado ser uma alternativa ao monocultivo (Rezende et al. 2010; Cecílio Filho et al. 2011; Fonseca et al., 2016; Koefender et al., 2016; Brito et al., 2017; Costa et al., 2017; Colombo et al., 2018; Nascimento et al., 2018; Sousa et al., 2018). O cultivo consorciado é mais complexo que o sistema tradicional (monocultivo), por isso, a eficiência agroeconômica desse sistema depende de fatores como a época adequada de plantio e a escolha de espécies envolvidas (Almeida et al., 2015; Cecílio Filho et al., 2019).

Avaliando a produtividade de pepino em consórcio com alface, em ambiente protegido e diferentes épocas de cultivo, Rezende et al. (2011) verificaram que o consórcio entre essas culturas é viável agroeconomicamente, desde que realizado na época adequada. Cecílio Filho et al. (2011) avaliaram a viabilidade econômica do cultivo em consórcio de tomate e alface, em casa de vegetação, e constataram índices de eficiência do uso da área de 1,57 a 2,22 do consórcio em relação ao monocultivo, em diferentes épocas de estabelecimento.

Apesar dos muitos estudos sobre a viabilidade econômica e agrônômica do consórcio de hortaliças, não foram encontrados trabalhos estimando o impacto desses sistemas de cultivo sobre as emissões de GEE. Assim, avaliar o impacto desses sistemas em relação aos monocultivos, poderá consolidá-lo como um modelo de produção sustentável, também, quanto aos aspectos de mudanças climáticas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição dos sistemas de produção

Visando estimar a pegada de carbono em dois sistemas de cultivo de hortaliças, em casa de vegetação, no Estado de São Paulo, Brasil, dois sistemas produtivos foram adotados baseando-se em informações dos trabalhos publicados por Rezende et al. (2010) e Cecílio Filho et al. (2011), os quais demonstraram as vantagens econômicas dos consórcios entre pepino-alface e tomate-alface, em relação aos respectivos monocultivos. Os sistemas produtivos avaliados foram: A) consórcios de pepino-alface e de tomate-alface; B) monocultivos de pepino, tomate e alface.

O sistema A foi composto por dois cultivos consorciados: consórcio de pepino e alface (Rezende et al., 2010) e consórcio de tomate e alface (Cecílio Filho et al., 2011). O sistema B correspondeu aos monocultivos de pepino, de tomate e de alface, realizados na mesma época em que as culturas estavam sendo consorciadas (Figura 1).

Os experimentos realizados por Rezende et al. (2010) e Cecílio Filho et al. (2011) foram em casas de vegetação, ambas de modelo teto em arco, com pé-direito de 3 m, cobertas com filme de polietileno de baixa densidade, transparente, de 0,15 mm de espessura, aditivado contra raios ultravioleta, localizadas na UNESP, em Jaboticabal, SP, Brasil, situada à altitude de 575 metros, latitude 21°15'22" S e longitude 48°15'58" W.

Foram utilizadas as cultivares 'Hokushin', (pepino, grupo japonês) e 'Verônica' (alface, grupo cressa) e 'Deborah Max' (tomate, do grupo Débora). O plantio foi realizado em canteiros, com duas linhas de plantas de pepino (fileira dupla – 1,20 x 0,60 x 0,50 m) e quatro linhas de alface (0,25 x 0,25 m), assim como no consórcio de tomate (fileira dupla – 1,20 x 0,60 x 0,50 m) e alface (0,25 x 0,25 m) (Figura 1). Com base nessas informações, os dados foram extrapolados para 1 hectare, considerando o ciclo de 4 e 6 meses para pepino e tomate, respectivamente e de 2 meses para a alface. Para as monoculturas, foram consideradas as informações do pepino, tomate e alface, nos mesmos períodos e manejo adotado em seus respectivos consórcios (Figura 1).

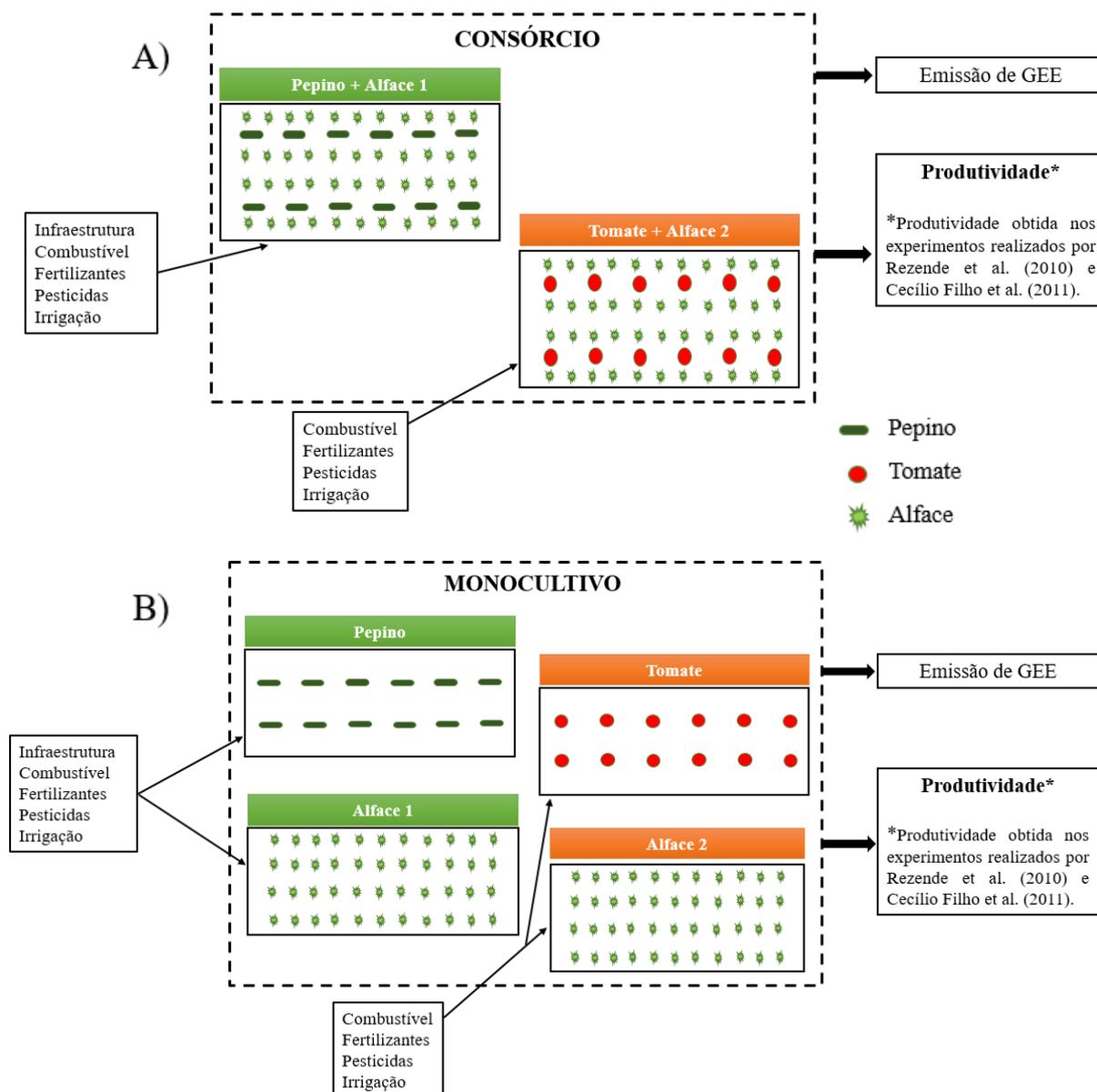


Figura 1. Sistemas de produção de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivo: pepino, tomate e alface; e suas respectivas fontes de emissões de GEE durante o ciclo de produção de 4 meses para o pepino, 6 meses para o tomate e 2 meses para a alface.

3.2 Limites estabelecidos e unidades funcionais

Os limites estabelecidos para o estudo abrangem apenas a fase agrícola da produção de pepino, tomate e alface (dentro da porteira) em cada sistema (Figura 1). As fontes de emissões de GEE, dentro do limite estabelecido, foram classificadas em

cinco categorias: infraestrutura (filme plástico, ferro da casa de vegetação e arame para tutoramento); combustível (diesel), fertilizantes (NPK, calcário e adubo orgânico); pesticidas (inseticida e fungicida) e irrigação (tubogotejadores e energia elétrica) (Figura 1).

Utilizou-se a metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) e, em alguns casos, outros fatores específicos (Tier 2) para calcular as emissões das fontes contempladas nesse estudo (Tabela 1). O total de GEE emitido foi calculado em CO₂ equivalente (CO₂ eq), considerando o potencial de aquecimento global para o dióxido de carbono (CO₂) igual a 1, para o metano (CH₄) igual a 28 e para o óxido nitroso (N₂O) igual a 265, em um período determinado de 100 anos (IPCC, 2013).

Dois unidades funcionais foram utilizadas neste estudo para comparar a entrada e a saída de materiais em cada sistema de cultivo: um quilograma de hortaliça produzido e um hectare de cultivo. Nos consórcios de pepino-alface e tomate-alface ocorre sobreposição da área de cultivo, ou seja, a alface (cultura secundária) é cultivada nas entrelinhas das culturas principais (pepino e tomate), sendo utilizado o mesmo espaçamento do monocultivo. Portanto, um hectare de sistema consorciado tem o mesmo número de plantas de cada espécie que dois hectares de monoculturas (Figura 1). Assim, para retratar a real condição de cultivo dos dois sistemas, as estimativas de emissão de GEE foram feitas comparando-se um hectare de consórcio (sistema A), com dois hectares de monoculturas (sistema B), sendo um hectare de monocultura para cada espécie presente no consórcio (Figura 1).

A pegada de carbono para a produção de um quilograma de hortaliças foi determinada dividindo-se a emissão de GEE de cada produção dentro dos sistemas (kg ha⁻¹) pela produtividade de cada cultura (kg ha⁻¹), somando as parciais para obter o total do sistema (Figuras 1 e 3, Tabela 4). Neste estudo, foi desconsiderado o CO₂ absorvido pelas plantas.

3.3 Corretivos e fertilizantes sintéticos e orgânicos

3.3.1 Emissão direta de N₂O - fertilizante nitrogenado

O uso de fertilizantes nitrogenados é essencial para o bom desenvolvimento e obtenção de altas produtividades em hortaliças. Para esse estudo, a fonte de N

utilizada em ambos os sistemas de cultivo foi o nitrato de amônio (32 – 33 % de N). Segundo Trani et al. (2018), a recomendação de adubação de N para plantio varia de 30 – 40 kg ha⁻¹ (pepino), 40 – 60 kg ha⁻¹ (tomate) e 20 – 40 kg ha⁻¹ (alface). Em cobertura, varia de 120 – 180 kg ha⁻¹ (pepino), 180 – 360 kg ha⁻¹ (tomate) e 60 – 100 kg ha⁻¹ (alface).

Tabela 1. Fontes de emissão direta e indireta de GEE e respectivos fatores de emissões utilizados nos cálculos para a produção de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.

Fontes	Unidade	Fator de emissão	Referência
Emissão direta			
N fertilizante	kg N ₂ O kg ⁻¹ de N	N aplicado – 0,01 N volatilizado – 0,001 N lixiviado – 0,00225	IPCC (2006)
Esterco bovino	kg N ₂ O kg ⁻¹ de N	0,001	Lessa et al. (2014)
Calcário	kg CO ₂ kg ⁻¹	0,13	IPCC ^a (2006)
Diesel	kg CO ₂ L ⁻¹	2,603	CETESB ^b (2015)
Emissão indireta			
N fertilizante	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ N	3,97	Macedo et al. (2008)
P fertilizante	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ P ₂ O ₅	1,13	Macedo et al. (2008)
K fertilizante	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ K ₂ O	0,71	Macedo et al. (2008)
Calcário	kg CO ₂ eq kg ⁻¹	0,01	Macedo et al. (2008)
Fungicida	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ i.a ^d	28,29	Do Carmo et al. (2016)
Inseticida	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ i.a ^d	29,00	Macedo et al. (2008)
Diesel	kg CO ₂ L ⁻¹	0,581	Macedo et al. (2008)
Energia (Irrigação)	t CO ₂ MWh ⁻¹	0,0927	MCTI ^c (2017)
Tubos gotejadores	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ PEDB ^e	1,80	Posen et al. (2016)
Arame tutoramento	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ aço	1,06	IPCC (2006)
Ferro	CO ₂ eq kg ⁻¹	1,35	IPCC (2006)
Filme plástico	kg CO ₂ eq kg ⁻¹	5,18	Cheng et al. (2011)

^a Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.

^b Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

^c Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação.

^d Ingrediente ativo.

^e Polietileno de Baixa Densidade.

Devido a carência de estudos, para os cultivos consorciados de pepino-alface (Rezende et al., 2010) e tomate-alface (Cecílio Filho et al., 2011), a adubação de plantio deve ser realizada de acordo com a cultura mais exigente e em cobertura foi feita seguindo a recomendação para cada cultura. Assim, as quantidades de N utilizadas nos sistemas de produção encontram-se na Tabela 2. As emissões de N_2O associadas ao uso do fertilizante foram calculadas de acordo com a metodologia do IPCC (Tabela 1), considerando as emissões associadas as perdas por lixiviação e volatilização de N.

3.3.2 Emissão indireta de CO_2 – fabricação de fertilizantes

As quantidades de P fertilizante (P_2O_5) e de K fertilizante (K_2O) utilizados em cada cenário basearam-se na recomendação de Trani et al. (2018) e são descritas na Tabela 1. Os fertilizantes fonte de P e K utilizados foram superfosfato simples (17 – 18 % de P_2O_5) e cloreto de potássio (58 – 60 % de K_2O).

As emissões indiretas atribuídas ao processo de fabricação dos fertilizantes NPK e calcário foram estimadas com fatores usados nos modelos EBAMM e GREET, adaptados por Macedo et al. (2008) (Tabela 1).

3.3.3 Emissões provenientes da calagem e adubação orgânica

Para as culturas em estudo, a aplicação de calcário antes do plantio é essencial para elevar a saturação por bases a 80 % e o teor de magnésio a $9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a fim de atender a recomendação de Trani et al. (2018). Assim, calculou-se a dose de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário nos consórcios e para cada área de monocultivo (Tabela 2). Foi utilizado o fator do IPCC (2006) para o cálculo da emissão direta. Para o cálculo da emissão indireta associada a fabricação desse corretivo, foi utilizado o fator adaptado por Macedo et al. (2008) (Tabela 1).

A adubação orgânica é recomendada por Trani et al. (2018) e muito utilizada por produtores no cultivo de hortaliças. Assim, foi adotado o uso de 20 t ha^{-1} de esterco bovino em cada ciclo de produção nos consórcios, no primeiro monocultivo de alface e nos monocultivos de pepino e tomate (Tabela 2). O teor médio de N no esterco adotado foi de 1,7 % de N e o fator de emissão utilizado nos cálculos foi de acordo com Lessa et al. (2014) (Tabela 1).

Tabela 2. Total de insumos e materiais no cultivo de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.

Fontes	Unidade	Consórcios	Monocultivos
		-----	-----
N fertilizante	kg ha ⁻¹	(200+80) ^a + (330+80) ^b = 690	200 ^c + 260 ^d + 330 ^e = 790
P fertilizante (P ₂ O ₅)	kg ha ⁻¹	(200+20) ^a + (550+20) ^b = 790	200 ^c + 400 ^d + 550 ^e = 1.150
K fertilizante (K ₂ O)	kg ha ⁻¹	(180+50) ^a + (440+50) ^b = 720	180 ^c + 180 ^d + 440 ^e = 800
Calcário	kg ha ⁻¹	1.500	3.000
Esterco bovino	t ha ⁻¹	20 ^a + 20 ^b = 40	20 ^c + 20 ^d + 20 ^e = 60
Fungicida (Dithane)	kg ha ⁻¹	3 ^a + 3 ^b = 6	3 ^c + 5 ^d + 3 ^e = 11
Inseticida (Decis)	L ha ⁻¹	0,3 ^a + 0,3 ^b = 0,6	0,3 ^c + 0,48 ^d + 0,3 ^e = 1,08
Diesel	L ha ⁻¹	165 ^a + 154 ^b = 319	165 ^c + 319 ^d + 54 ^e = 638
Energia (Irrigação)	kWh ha ⁻¹	88 ^a + 133 ^b = 221	88 ^c + 88 ^d + 133 ^e = 309
Tubos gotejadores	kg ano ⁻¹	904 / 2 anos = 452	904 / 2 anos = 452
Arame tutoramento	kg ano ⁻¹	3.325 / 2 anos = 1.075	3.325 / 2 anos = 1.075
Ferro	kg ano ⁻¹	56.090 / 40 anos = 1.402	112.180 / 40 anos = 2.804
Filme plástico	kg ano ⁻¹	2.565 / 3 anos = 855	5.128 / 3 anos = 1.709

^a Total do consórcio pepino-alface. NPK fertilizantes: dose adotada para pepino (plantio e cobertura) somado a dose adotada para a alface (apenas em cobertura).

^b Total do consórcio tomate-alface. NPK fertilizantes: dose adotada para tomate (plantio e cobertura) somado a dose adotada para o alface (apenas em cobertura).

^c Total do monocultivo de pepino.

^d Total para os dois monocultivos de alface (metade do valor em cada ciclo). NPK fertilizantes: dose adotada para adubação de plantio e cobertura.

^e Total do monocultivo de tomate.

3.4 Pesticidas

No cultivo em ambiente protegido, normalmente, não se utiliza herbicidas, por isso, para este estudo foi considerado apenas o uso de inseticida (Decis – 25 g de ingrediente ativo L⁻¹) e fungicida (Dithane – 800 g de ingrediente ativo kg⁻¹), em ambos os sistemas de cultivo. A quantidade foi determinada de acordo com a recomendação para cada cultura (Tabela 2). Os fatores adaptados por Macedo et al. (2008) e por Carmo et al. (2016) foram utilizados para o cálculo da emissão indireta associada à fabricação do inseticida e fungicida, respectivamente (Tabela 1).

3.5 Irrigação – emissão indireta

Em ambos os sistemas de cultivo do estudo, considerou-se o sistema de irrigação por gotejamento com bomba KSB (2 cv / 1472 Watts), suficiente para irrigar 1 hectare. O consumo total de energia elétrica foi determinado assumindo um turno de rega de 30 minutos diários nos consórcios e monocultivos (Tabela 2), através da seguinte fórmula:

$$\text{Consumo (kWh)} = (\text{Pb} \times \text{h} / 1000) \times \text{tc}$$

onde: Pb = potência da bomba (Watts); h = horas de funcionamento por mês; tc = tempo do ciclo da cultura (em meses).

Para os cálculos da emissão de CO₂eq associada ao consumo de energia na irrigação foi utilizado o valor médio dos fatores de emissão para geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil, de acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) (2017) (Tabela 1).

A quantidade de tubogotejadores foi calculada de acordo com o espaçamento de plantio (Tabela 2) (Rezende et al., 2010; Cecílio Filho et al., 2011) e o peso do material baseou-se em informações do fabricante (Amanco®), calculado a partir do peso de uma bobina de 500 m (8.1 kg) de tubogotejadores de polietileno de baixa densidade (PEBD). Considerou dois anos de vida útil dos tubogotejadores e o fator utilizado nos cálculos das emissões associadas a fabricação do PEBD foi de acordo com Posen et al. (2016) (Tabela 1).

3.6 Diesel – emissão direta e indireta

O total de diesel consumido nos consórcios e monocultivos considera as operações de aração, gradagem, encanteiramento, aplicação de calcário, aplicação do esterco bovino e transporte da colheita do campo até o barracão (limite estabelecido à distância de 1 km) (Tabelas 2 e 3), realizadas com trator MF 275 (77 cv). O cálculo para estimar a emissão direta de CO₂ associada a queima do combustível foi feito utilizando o fator de emissão estabelecido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2015) e, para a emissão indireta, associada a extração e produção do diesel, o fator utilizado foi de acordo com Macedo et al. (2008) (Tabela 1).

Tabela 3. Consumo de combustível (diesel) nas operações realizadas com trator MF 275 (77 cv) no cultivo de pepino, tomate e alface em consórcios e monocultivos.

Operações	Tempo de operação (horas)	Consumo diesel (L h ⁻¹)	Consumo diesel no 1º ciclo (L ha ⁻¹)	Consumo diesel no 2º ciclo (L ha ⁻¹)
Aração	3	11,0	33	33
Gradagem	2	11,0	22	22
Encanteiramento	3	11,0	33	33
Calagem ^a	1	11,0	11	-
Aplicação de esterco	1	11,0	11	11
Colheita	5	11,0	55,0	55,0
Total			165	154

^a Realizada apenas no primeiro consórcio (pepino-alface) e nos primeiros monocultivos (pepino e alface1).

3.7 Infraestrutura – emissão indireta

Dados sobre os materiais utilizados para a construção de uma casa de vegetação foram obtidos junto ao fabricante, sendo utilizado cerca de 3.500 kg de ferro galvanizado e 160 kg de plástico filme de polietileno para a construção de uma casa de vegetação de 624 m². A partir desses valores foi calculado o total de materiais utilizados nos consórcios e monocultivos (Tabela 2), assumindo o período de duração de 40 anos para o ferro galvanizado e 3 anos para o filme plástico. Foram utilizados os fatores de Cheng et al. (2011) e do IPCC (2006) para o cálculo das emissões associada a fabricação do plástico filme e do ferro, respectivamente (Tabela 1).

A quantidade de arame utilizado no tutoramento do tomate e pepino foi semelhante em ambos os sistemas de cultivo e calculada de acordo com o espaçamento de plantio (Tabela 2) (Rezende et al., 2010; Cecílio Filho et al., 2011). O fator do IPCC (2006) foi utilizado nos cálculos da emissão de CO₂eq (Tabela 1).

3.8 Variação no estoque de carbono no solo

As mudanças no estoque de carbono no solo foram estimadas com base nos fatores do IPCC (2006), para o período de 20 anos. Os fatores de manejo do solo (F_{MG}) e de deposição de resíduos da cultura (F_i) foram definidos de acordo o clima

específico, classificado como tropical úmido no clima do estado de São Paulo (CEPAGRI, 2006) e considerando alta intensidade de manejo do solo, sendo os valores igual a $F_{MG} = 1,00$ e $F_I = 0,92$. O valor do estoque de carbono referencial (C_{ref}) utilizado foi de 47 t C ha^{-1} , valor padrão do IPCC para solos argilosos (Latosolo vermelho escuro), considerando a profundidade de 0-30 cm de solo. Assim, as estimativas foram feitas utilizando a seguinte fórmula:

$$\Delta C_{\text{solo}} = (C_{\text{ref}} \cdot F_I \cdot F_{MG}) - C_{\text{ref}}$$

onde: ΔC_{solo} = mudança no estoque de carbono no solo no período de 20 anos (t C ha^{-1}); C_{ref} = estoque de carbono referencial para Latossolos (t C ha^{-1}); F_I = fator de mudança associado a deposição de resíduos da cultura (adimensional); F_{MG} = fator relacionado as práticas de manejo do solo adotadas (adimensional).

Após a determinação do total de acúmulo/perda de carbono no solo, o valor encontrado foi convertido de carbono (C) para dióxido de carbono (CO_2), multiplicando pela proporção de 44/12, ou seja, 1 t de C corresponde a 3,67 t de CO_2 .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o limite estabelecido neste estudo, as emissões de GEE são maiores nos monocultivos, sendo emitido $25.273 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$, enquanto nos consórcios é emitido $16.368 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ (Figura 2), cerca de 35 % a menos. Essa diferença se deve principalmente às quantidades de ferro e filme plástico referentes à casa de vegetação, uso de fertilizantes sintéticos e a queima de combustível (diesel) nas operações com trator, uma vez que, a infraestrutura e a área manejada nos monocultivos é o dobro em relação à dos consórcios. Portanto, a vantagem agrônômica constatada por Rezende et al. (2010) e Cecílio Filho et al. 2011 segundo os índices de eficiência do uso da área também foi ambientalmente percebida por meio da redução da emissão de GEE nesse sistema. Considerando o estoque de carbono do solo, o sistema de consórcio ($690 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$) perde menor quantidade de CO_2 para atmosfera que o monocultivo ($1.380 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$) (Figura 2), o que também está relacionado a menor área de manejo e preparo do solo no consórcio, pois as duas culturas são conduzidas sobrepostas na mesma área. Nos monocultivos, são necessárias duas áreas distintas de cultivo.

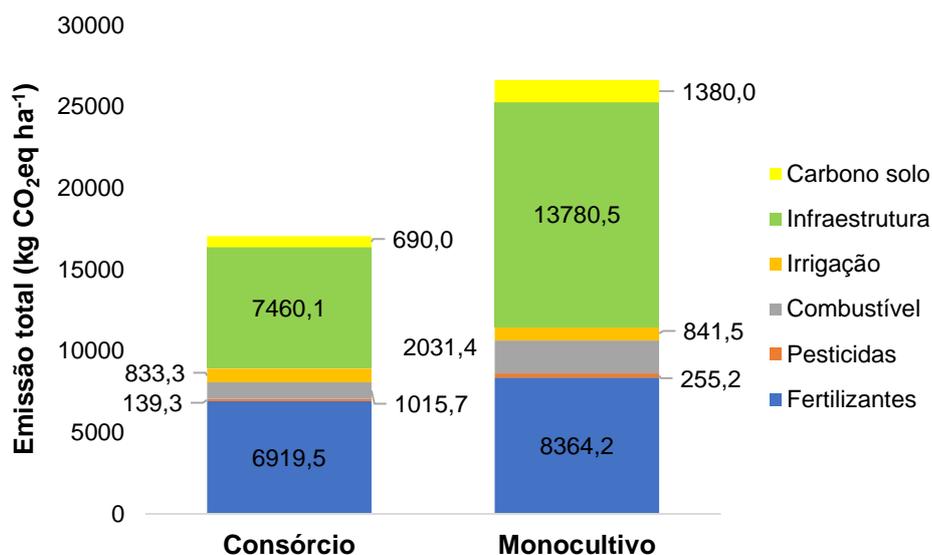


Figura 2. Emissões totais de GEE ($\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$), associadas as mudanças de estoque de carbono no solo e as fontes emissoras de GEE definidas de acordo com o limite adotado, nos sistemas de produção de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivos: pepino, tomate e alface.

Os materiais utilizados na infraestrutura (filme plástico, ferro e arame para tutoramento) representaram cerca de 45,6 e 54,5 % das emissões totais de GEE nos consórcios e monocultivos, respectivamente. Na sequência, aparece os fertilizantes, que representaram 42,2 % nos consórcios e 33,1 % nos monocultivos. A queima de combustível (diesel) contribuiu com cerca de 6,2 % do total nos consórcios e 8,0 % do total nos monocultivos, e a irrigação (energia e tubogotejadores), representou 5,1 e 3,3 % dos totais nos consórcios e monocultivos, respectivamente (Figura 2).

Avaliando o impacto de sistemas de cultivo de tomate em casa de vegetação na Grécia e Alemanha, Ntinas et al. (2017) obtiveram valores que variaram de 7,6 a 58,7 $\text{kg CO}_2\text{eq m}^{-2}$ (igual a 76 e 587 $\text{t CO}_2\text{eq ha}^{-1}$), em diferentes cenários. Khoshnevisan et al. (2013) estimaram a emissão de 45.177,3 $\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ para produção de pepino em casa de vegetação na província de Esfahan, Irã. Em ambos os trabalhos, os maiores contribuintes foram eletricidade e gás natural, utilizados para manter a temperatura adequada da casa de vegetação e no bombeamento de água por longa distância até o local de produção. No Brasil, geralmente, não é utilizado sistema de climatização nas casas de vegetação e, também, há disponibilidade hídrica próximo aos locais de cultivo, o que explica a diferença em relação aos resultados do

presente estudo, o qual considerou apenas a energia elétrica para funcionamento do sistema de irrigação durante o turno de rega.

É importante ressaltar que, além das diferenças climáticas e hídricas que diferenciam o cultivo de hortaliças nos citados países do hemisfério norte em relação ao Brasil, a emissão de GEE também pode variar consideravelmente devido aos limites estabelecidos no estudo, metodologia utilizada nos cálculos das emissões (Adewale et al., 2018), quantidade de insumos e fontes de energia utilizadas nos sistemas de cultivo nesses países.

Analisando o impacto do ciclo de vida da produção de alface em campo aberto na Grécia, no sistema orgânico e convencional, Foteinis e Chatzisyneon (2016) verificaram a energia consumida na irrigação foi o principal contribuinte na emissão de GEE, devido a composição da matriz energética grega, que é altamente dependente da queima de combustíveis fósseis. No Brasil, a maior parte da geração de eletricidade é através das hidrelétricas, fonte de energia menos poluente que as fósseis. Isso explica a diferença nas emissões de GEE relacionados ao consumo de energia, que neste estudo corresponderam a menos de 1 % do total emitido em ambos os sistemas.

Jones et al. (2012), avaliando as emissões GEE na produção de tomate na Florida, EUA, verificaram que a irrigação e os fertilizantes foram as principais fontes emissoras. Os autores observaram que a maior parte das emissões relacionadas aos fertilizantes são advindas do fertilizante nitrogenado, resultado semelhante ao obtido nesse estudo, onde as emissões diretas relacionadas ao N fertilizante representaram 14,5 % do total nos consórcios e 10,8 % do total nos monocultivos, considerando as perdas por lixiviação e volatilização do N (Figura 2). Aumentar a eficiência de utilização desse insumo pode ser uma alternativa para potenciais reduções nas emissões de GEE em ambos os sistemas de cultivo.

Analisando as emissões de GEE individuais para cada produção dentro dos sistemas avaliados, é possível observar que o cultivo de tomate gera maiores emissões de GEE, tanto em consórcio com a alface (8.784 kg CO₂eq ha⁻¹) quanto em monocultivo (8.024 kg CO₂eq ha⁻¹). No consórcio de pepino-alface as emissões foram de 7.584 kg CO₂eq ha⁻¹. Nos monocultivos foram de 6.653 kg CO₂eq ha⁻¹ para produção de pepino, 5.446 kg CO₂eq ha⁻¹ no primeiro monocultivo de alface e 5.130 kg CO₂eq ha⁻¹ no segundo monocultivo de alface (Figura 3). Essa diferença se deve, principalmente às emissões associadas aos fertilizantes sintéticos, uma vez que, a

fertilização do tomateiro demanda maior quantidade deste insumo do que para as demais culturas estudadas.

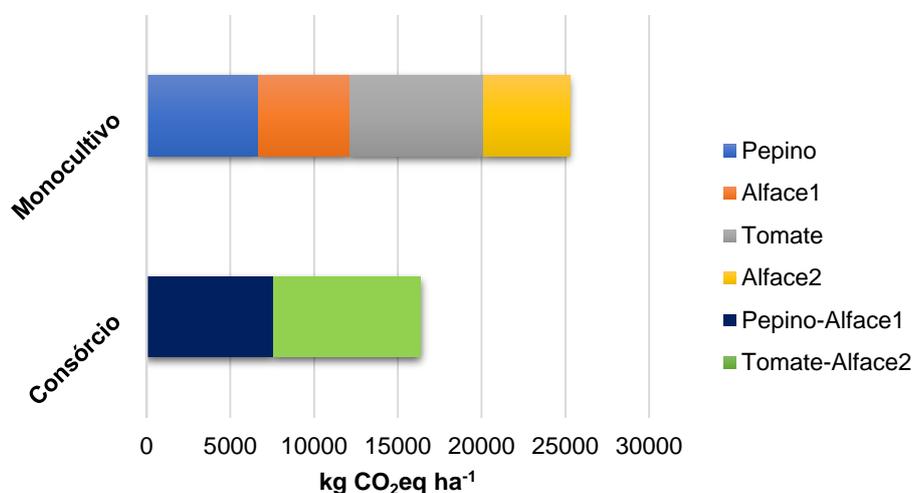


Figura 3. Emissões totais (kg CO₂eq ha⁻¹) para cada produção dentro dos sistemas avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivos: pepino, tomate e alface.

De acordo com as estimativas, a pegada de carbono na produção de um quilograma de hortaliças em monocultivo, igual a 0,516 kg CO₂eq kg⁻¹ de hortaliças, é maior que no consórcio, igual a 0,105 kg CO₂eq kg⁻¹ de hortaliças (Figura 4). Nos consórcios, a pegada de carbono em cada produção dentro do sistema foi de 0,066 e 0,039 kg CO₂eq kg⁻¹ de pepino-alface e tomate-alface, respectivamente. Nos monocultivos, foi de 0,078 kg CO₂eq kg⁻¹ de pepino, 0,039 kg CO₂eq kg⁻¹ de tomate e 0,145 e 0,254 kg CO₂eq kg⁻¹ para alface no primeiro e segundo cultivo, respectivamente (Figura 4). Portanto, a pegada de carbono da produção de um quilograma de hortaliças em consórcios subsequentes (total em consórcios) é de, aproximadamente, um quinto da observada em monocultivos (total em monocultivos) (Figura 4). Essa diferença se deve principalmente à maior eficiência do uso da área, equipamentos, estrutura, insumos e a produtividades das culturas (Tabela 4). Enquanto no consórcio as duas culturas são cultivadas sobrepostas na mesma área e, portanto, utiliza a mesma infraestrutura da casa de vegetação e menos insumos; nos monocultivos, as culturas exploram individualmente cada área, demandando o dobro de infraestrutura e maior uso de insumos.

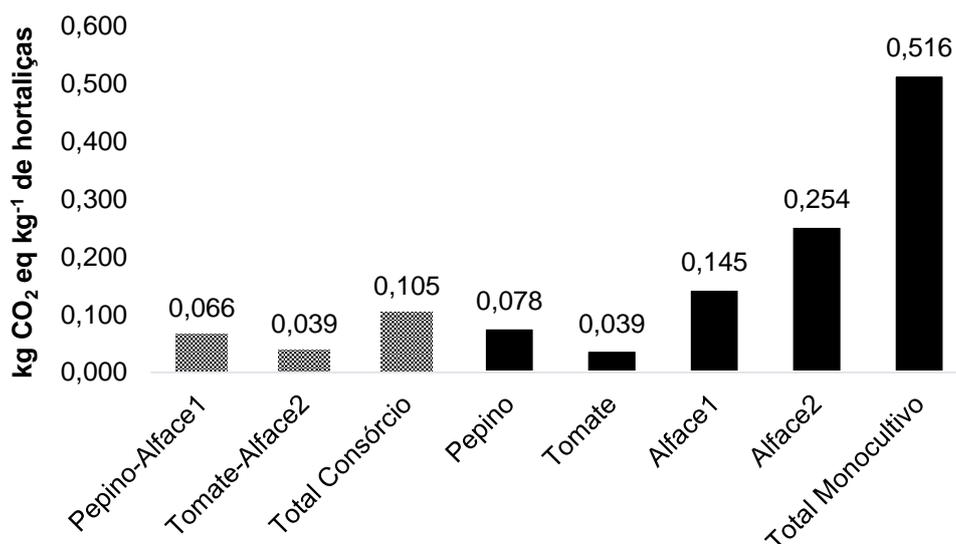


Figura 4. Pegada de carbono total (kg CO₂eq kg⁻¹ de hortaliças) e em cada produção dentro dos sistemas de cultivo de hortaliças avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) pepino, tomate e alface.

Tabela 4. Produtividade das culturas obtidas nos experimentos realizados por Rezende et al. (2010) e Cecílio Filho et al. (2011) e utilizada nos cálculos da pegada de carbono da produção de hortaliças nos sistemas avaliados: A) consórcio: pepino-alface e tomate-alface; B) monocultivo: pepino, tomate e alface.

Culturas	Produtividade (t ha ⁻¹)
A) Consórcio	
Pepino-Alface1	(87,0 ^a + 28,6 ^b) = 115,6
Tomate-Alface2	(206,7 ^c + 17,0 ^d) = 223,9
B) Monocultivo	
Pepino	85,1
Alface1	37,7
Tomate	203,7
Alface2	20,2

^a Produtividade do pepino. ^b Produtividade do alface1. ^c Produtividade do tomate. ^d Produtividade do alface2.

Ainda, quanto maior a produtividade da cultura menor a pegada de carbono por quilograma (Pishgar-Komleh et al., 2017), o que também explica os resultados obtidos, pois a produtividade de tomate foi cerca de 138 e 140 % a maior que a de

pepino, em consórcio com alface e em monocultivo, respectivamente (Tabela 4). Ainda, a diferença da pegada de carbono nos monocultivos de alface se deve também a diferença na produtividade da cultura em cada ciclo, cerca de 87 % maior no primeiro em relação ao segundo monocultivo (Tabela 4) (Figuras 1 e 4) (Rezende et al., 2010; Cecílio Filho et al., 2011).

Plawecki et al. (2014) estimaram pegada de carbono de $0,192 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de alface cultivado em casa de vegetação na Geórgia, EUA e Bartzas et al. (2015) calcularam pegada de carbono de $0,205 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de alface produzido em casa de vegetação na Itália, valores próximos aos determinados nos monocultivos de alface. Em ambos os trabalhos citados, a infraestrutura da casa de vegetação foi o maior contribuinte na emissão de GEE, assim como nos monocultivos deste estudo. O consórcio de alface com outras culturas é uma alternativa para reduzir a pegada de carbono da produção dessa hortaliça, pois este sistema proporciona maior aproveitamento da área de cultivo, diminuindo a quantidade de matérias utilizados na infraestrutura.

Em estudos sobre o impacto da produção de hortaliças no Irã, Pishgar-Komleh et al. (2017) verificaram que a pegada de carbono da produção de tomate em campo aberto foi igual a $0,2 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ e Khoshnevisan et al. (2014) estimaram valores de $0,244 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ para pepino e $0,129 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ para tomate, para a produção de pepino e tomate em casa de vegetação, valores acima dos encontrados neste estudo. Segundo os autores, o consumo de energia do sistema de irrigação foi o maior contribuinte para a pegada de carbono da produção de hortaliças no Irã, diferentemente do que foi observado nesse estudo, onde os maiores contribuintes foram os materiais da infraestrutura e o uso de fertilizantes.

Ntinis et al. (2017) obtiveram valores da pegada de carbono que variaram de $0,4$ a $10,1 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de tomate em diferentes cenários de produção em casa de vegetação na Grécia e Alemanha. O consumo de energia e o uso do gás natural, fonte de energia fóssil, no sistema de aquecimento das casas de vegetação foram os principais contribuintes para a pegada de carbono. Em revisão de literatura, Clune et al. (2017) relataram que, em média, a emissão para produção de um quilograma de tomate e pepino é de, respectivamente, $0,67$ e $0,33 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$, respectivamente, e $3,15 \text{ kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ para alface, produzida em casa de vegetação com climatização. Não foram encontrados na literatura trabalhos avaliando a pegada de carbono na produção de hortaliças no Brasil, em monocultivo ou em consórcio.

Na maioria dos estudos citados, o uso de fontes de energias fósseis nos sistemas de irrigação e na climatização das casas de vegetação é o principal fator associado à pegada de carbono nas produções de pepino, tomate e alface, em países da Europa e Oriente Médio. No Brasil, aproximadamente 75 % das fontes de energias utilizadas são oriundas de fontes renováveis (IPEA, 2019) e, portanto, tem baixa pegada de carbono associada à sua produção e consumo. Além disso, as casas de vegetação no Brasil não utilizam sistema de aquecimento, o que diminui significativamente o impacto do consumo de energia na pegada de carbono para a produção dessas hortaliças.

Os materiais da infraestrutura da casa de vegetação e os fertilizantes foram os principais contribuintes na geração de GEE. Substituí-los ou aumentar a eficiência dessas fontes de emissão são potenciais pontos de mitigação de GEE associado à produção das três hortaliças avaliadas, no Brasil, o que em boa parte foi conseguido pela adoção do sistema de cultivo consorciado. Assim, este estudo sugere que o cultivo consorciado pepino-alface e tomate-alface pode ser utilizado como estratégia para reduzir as emissões de GEE no setor de produção de hortaliças, pois gera menos impacto sobre as emissões que os monocultivos.

5 CONCLUSÕES

Sistemas de cultivo de hortaliças consorciando pepino-alface e tomate-alface em podem ser utilizados como estratégia de mitigação de GEE na produção de alimentos, pois reduz em 35% a emissão de GEE em relação aos seus monocultivos. O compartilhamento da infraestrutura e a otimização de insumos nos cultivos em consórcio são fatores que pode contribuir para reduzir as emissões de GEE e a pegada de carbono neste sistema de produção. A pegada de carbono para a produção de um quilograma de hortaliças em cultivo consorciado é de, aproximadamente, um quinto da observada em monocultivo. Dentre as culturas estudadas, o tomate é a que tem a menor pegada de carbono, principalmente devido à maior produtividade em relação às de pepino e alface.

Devido à escassez de trabalhos e dados que analisem o impacto da produção de hortaliças no Brasil, não é possível fazer projeções mais amplas sobre como esse setor pode contribuir para o Brasil atingir as metas de redução das emissões de GEE,

sendo necessário a realização de mais estudos sobre o assunto. Porém, este estudo demonstra que esse modelo de cultivo pode fazer parte das propostas de implementações de sistemas agrícolas integrados com maior produção e menor emissão de GEE, contribuindo para a sustentabilidade da produção de hortaliças no Brasil.

6 REFERÊNCIAS

Adewale C, Reganold JP, Higgins S, Evans RD, Carpenter-Boggs L (2018) Improving carbon footprinting of agricultural systems: Boundaries, tiers, and organic farming. **Environmental Impact Assessment Review** 71:41–48. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.004>

Almeida AEDS, Bezerra Neto F, Costa LR, Silva ML, Lima JSS, Barros Júnior AP (2015) Eficiência agronômica do consórcio alface-rúcula fertilizado com flor-de-seda. **Revista Caatinga** 28:79–85. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n309rc>

Bartzas G, Zaharaki D, Komnitsas K (2015) Life cycle assessment of open field and greenhouse cultivation of lettuce and barley. **Information Processing in Agriculture** 2:191–207. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.10.001>

Bisbis MB, Gruda N, Blanke M (2018) Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality – A review. **Journal of Cleaner Production** 170:1602–1620. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.224>

Bordonal RO, Lal R, Ronquim CC, Figueiredo EB, Carvalho JLN, Maldonado W, Milori DMBP, La Scala N (2017) Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 240:54–65. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>

Bordonal RDO, Figueiredo EB, Aguiar DA, Adami M, Rudorff BFT, La Scala N (2013) Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil. **Biomass and Bioenergy** 59:195–207. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.040>

Boulard T, Raeppe C, Brun R, Lecompte F, Hayer F, Carmassi G, Gaillard G (2011) Environmental impact of greenhouse tomato production in France. **Agronomy for Sustainable Development** 31:757–777. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0031-3>

BRASIL (2015) **Contribuição Nacionalmente Determinada** (intended Nationally Determined Contribution – iNDC). Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/>>. Acesso em: 16 set. 2019.

Brito AU, Puiatti M, Cecon PR, Finger FL, Mendes TDC (2017) Viabilidade agroeconômica dos consórcios taro com brócolis, couve-chinesa, berinjela, jiló, pimentão e maxixe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 12:296–302. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5452>

Carmo HF, Madari BE, Wander AE, Moreira FRB, Gonzaga ACO, Silveira PM, Silva AG, Silva JG, Machado PLOA (2016) Balanço energético e pegada de carbono nos sistemas de produção integrada e convencional de feijão-comum irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1069–1077. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900006>

Cecílio Filho AB, Rezende BLA, Barbosa JC, Grangeiro LC (2011) Agronomic efficiency of intercropping tomato and lettuce. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 83:1109–1119. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652011000300029>

Cecílio Filho AB, Rezende BLA, Dutra AF (2019) Yield of intercropped lettuce and cucumber as a function of population density and cropping season. **Revista Caatinga** 32:943–951. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n410rc>

CEPAGRI Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (2006) **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 16.set.19.

Cerri CC, Moreira CS, Alves PA, Raucci GS, Castigioni BA, Mello FFC, Cerri DGP, Cerri CEP (2016) Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: a case study with 22 farms in the State of Mato Grosso. **Journal of Cleaner Production** 112:2593–2600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.072>

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2015) **Relatório Emissões Veiculares**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2015-v4_.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.

Cheng K, Pan G, Smith P, Luo T, Li L, Zheng J, Zhang X, Han X, Yan M (2011) Carbon footprint of China's crop production—An estimation using agro-statistics data over 1993–2007. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 142:231–237. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.012>

Clavreul J, Butnar I, Rubio V, King H (2017) Intra- and inter-year variability of agricultural carbon footprints – A case study on field-grown tomatoes. **Journal of Cleaner Production** 158:156–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.004>

Clune S, Crossin E, Verghese K (2017) Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. **Journal of Cleaner Production** 140:766–783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.082>

Colombo JN, Puiatti M, Silva Filho JB, Vieira JCB, Silva GCC (2018) Viabilidade agroeconômica do consórcio de taro (*Colocasia esculenta* L.) e pepino em função do arranjo de plantas. **Revista Ceres** 65:56–64. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865010008>

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento (2019) **Centrais de Abastecimento - Comercialização total 2018**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/hortigranjeiros-prohort>>. Acessado em: 02 de janeiro de 2020.

Costa AP, Bezerra Neto F, Silva ML, Lima JSS, Barros Júnior AP, Porto VCN (2017) Intercropping of Carrot X Cowpea-Vegetables: Evaluation of Cultivar Combinations Fertilized With Roostertree. **Revista Caatinga** 30:633–641. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n311rc>

Figueiredo EB, Jayasundara S, Bordonal RO, Berchielli TT, Reis RA, Wagner-Riddle C, La Scala Júnior N (2017) Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production** 142:420–431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>

Farhate CVV, Souza ZM, La Scala Júnior N, Sousa ACM, Santos APG, Carvalho JLN (2019) Soil tillage and cover crop on soil CO₂ emissions from sugarcane fields. **Soil Use and Management** 35:273–282. <https://doi.org/10.1111/sum.12479>

Foteinis S, Chatzisyneon E (2016) Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. **Journal of Cleaner Production** 112:2462–2471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.075>

Gruda N, Bisbis M, Tanny J, (2019a) Impacts of protected vegetable cultivation on climate change and adaptation strategies for cleaner production – A review. **Journal of Cleaner Production** 225:324–339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.295>

Gruda N, Bisbis M, Tanny J (2019b) Influence of climate change on protected cultivation: Impacts and sustainable adaptation strategies - A review. **Journal of Cleaner Production** 225:481–495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210>

IEA Instituto de Economia Agrícola (2018) **Estatísticas da produção paulista**. Disponível em: <<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/index.php>>. Acesso em: 16 jul. 2019.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: **IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan, 664 p.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: **Climate change 2007: the Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: **Climate Change 2013: the Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.659-740.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.811-922.

IPEA Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2019) **ODS 7 - Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. O que mostra o retrato do Brasil?**. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/portal/>>. Acesso em: 16 jul. 2019.

Jones CD, Fraise CW, Ozores-Hampton M (2012) Quantification of greenhouse gas emissions from open field-grown Florida tomato production. **Agricultural Systems** 113:64–72. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.07.007>

Khoshnevisan B, Rafiee S, Omid M, Mousazadeh H (2013) Reduction of CO₂ emission by improving energy use efficiency of greenhouse cucumber production using DEA approach. **Energy** 55:676–682. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.021>

Khoshnevisan B, Rafiee S, Omid M, Mousazadeh H, Clark S (2014) Environmental impact assessment of tomato and cucumber cultivation in greenhouses using life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system. **Journal of Cleaner Production** 73:183–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.057>

Koefender J, Schoffel A, Manfio CE, Golle DP, Silva AN, Horn RC (2016) Consorciação entre alface e cebola em diferentes espaçamentos. **Horticultura Brasileira** 34:580–583. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620160419>

Lessa ACR, Madari BE, Paredes DS, Boddey RM, Urquiaga S, Jantalia CP, Alves BJR (2014) Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 190:104–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.010> 444

Macedo IC, Seabra JEA, Silva JEAR (2008) Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy** 32:582–595. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>

MCTI Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2018) **Arquivos dos fatores médios de emissão de CO₂ grid mês/ano**. Disponível em: <<http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/index.html>>. Acesso em: 28 out. 2018.

MCTI Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2017) **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU)**. Disponível em: <<http://www.mctic.gov.br>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

Nascimento Camila Seno, Cecílio Filho AB, Mendoza-Cortez JW, Nascimento Carolina Seno, Bezerra Neto F, Grangeiro LC (2018) Effect of population density of lettuce intercropped with rocket on productivity and land-use efficiency. **PLoS One** 13:1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194756>

Notarnicola B, Sala S, Anton A, McLaren SJ, Saouter E, Sonesson U (2017) The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. **Journal of Cleaner Production** 140:399–409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>

Ntinas GK, Neumair M, Tsadilas CD, Meyer J (2017) Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. **Journal of Cleaner Production** 142:3617–3626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.106>

Oliveira Júnior GG, Silva AB, Mantovani JR, Miranda JM, Florentino LA (2015) Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science** 10:412–419.

Pandey D, Agrawal M, Pandey JS (2011) Carbon footprint: current methods of estimation. **Environmental Monitoring and Assessment** 178:135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>

Pishgar-Komleh SH, Akram A, Keyhani A, Raei M, Elshout PMF, Huijbregts MAJ, van Zelm R (2017) Variability in the carbon footprint of open-field tomato production in Iran - A case study of Alborz and East-Azerbaijan provinces. **Journal of Cleaner Production** 142:1510–1517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.154>

Plawecki R, Pirog R, Montri A, Hamm MW (2014) Comparative carbon footprint assessment of winter lettuce production in two climatic zones for Midwestern market. **Renewable Agriculture and Food Systems** 29:310–318. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000161>

Posen ID, Jaramillo P, Griffin WM (2016) Uncertainty in the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from U.S. Production of Three Biobased Polymer Families. **Environmental Science & Technology** 50:2846–2858. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05589>

Rezende BLA, Cecílio Filho AB, Pôrto DRDQ, Barros Júnior AP, Silva GS, Barbosa JC, Feltrim AL (2010) Consórcios de alface crespa e pepino em função da população do pepino e época de cultivo. **Interciencia** 35:374–379.

Sala S, Anton A, McLaren SJ, Notarnicola B, Saouter E, Sonesson U (2017) In quest of reducing the environmental impacts of food production and consumption. **Journal of Cleaner Production** 140:387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.054>

Santos TL, Barros VS, Figueirêdo MCB, Nunes ABA, Gondim RS, Silva EO, Aragão FAS, Sousa, JA (2013) **Pegada de Carbono de Produtos Agrícolas: Estudo de Caso do Melão**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 34 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 167).

SEEG Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (2019) **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. Observatório do clima. Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/>>. Acesso em: 28 out. 2019.

Silva RO, Barioni LG, Hall JAJ, Moretti AC, Veloso RF, Alexander P, Crespolini M, Moran D (2017) Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems** 153:201–211. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>

Silva RO, Barioni LG, Pellegrino GQ, Moran D (2018) The role of agricultural intensification in Brazil's Nationally Determined Contribution on emissions mitigation. **Agricultural Systems** 161:102–112. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.003>

Tasca AL, Nessi S, Rigamonti L (2017) Environmental sustainability of agri-food supply chains: An LCA comparison between two alternative forms of production and distribution of endive in northern Italy. **Journal of Cleaner Production** 140:725–741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.170>

Trani PE, Van Raij B, Cantarella H, Figueiredo GJB (2018) **Hortaliças, recomendação de calagem a adubação para o estado de São Paulo**. Campinas: CATI, 88 p.

Torrellas M, Antón A, López JC, Baeza EJ, Parra JP, Muñoz P, Montero JI (2012) LCA of a tomato crop in a multi-Tunnel greenhouse in Almeria. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 17:863–875. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0409-8>

Wiedmann T, Minx J (2008) A definition of carbon footprint. In: Ecological Economics Research Trends. **Nova Science Publishers**, Hauppauge NY, USA, 11 p.

Zarei MJ, Kazemi N, Marzban A (2019) Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Science** 18:249–255. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.07.001>