



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos - ICTA  
Graduação em Engenharia de Alimentos

Laura Diettrich

**Avaliação preliminar da emissão de gases de efeito estufa  
na produção de alimentos**

Porto Alegre-RS

Maio de 2022

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos - ICTA  
Graduação em Engenharia de Alimentos

Laura Diettrich

**Avaliação preliminar da emissão de gases de efeito estufa  
na produção de alimentos**

Trabalho de conclusão de curso submetido a Comissão de Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos

Orientador: Professor Dr. Marco Antônio Záchia Ayub

Porto Alegre-RS

Maio de 2022

Laura Diettrich

## Avaliação preliminar da emissão de gases de efeito estufa na produção de alimentos

Trabalho de conclusão de curso submetido a Comissão de Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos

Aprovado em 19 de maio de 2022.

### Comissão Examinadora

---

Professor Dr. Marco Antônio Záchia Ayub

Orientador – UFRGS

---

Professor Dr. Plinho Francisco Hertz

Docente – ICTA/UFRGS

---

Ma. Flávia Aparecida Nunes

Examinador Externo – IFRS

*A todos aqueles que acreditam na construção  
de um sistema alimentar mais sustentável,  
justo e acessível, dedico.*

# Agradecimentos

A minha mãe, Marilene, que me deu a vida e possibilitou que eu abraçasse meus sonhos. As minhas irmãs, Marijane e Maristela, que sempre me apoiaram incondicionalmente.

Aos meus amigos: Vinícius, que esteve comigo nos anos finais de graduação, amigo de faculdade, do estágio e da vida; Tatiane, que acompanhou o meu sonho de estudar alimentos desde o início; Tábata, que cresceu comigo nesses últimos anos e sempre esteve presente, mesmo que a vida tenha nos afastado fisicamente; Camila, que nunca me deixou baixar a cabeça e sempre acreditou em mim; e Thayane e Antônio, que me acolheram e acompanharam de perto o nascimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ayub, que ficou entusiasmado ainda antes desse projeto tomar forma e me mostrou o caminho diversas vezes.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial o Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, que me proporcionaram esses anos de estudo gratuito e de qualidade.

E aos outros tantos que me acompanharam nessa jornada, obrigada!

“Quando o último peixe estiver nas águas e a  
última árvore for removida da terra, só então  
o homem perceberá que não é capaz de  
comer seu dinheiro”  
Autor desconhecido

# Resumo

A produção de alimentos é responsável por cerca de um terço da emissão total de gases de efeito estufa (GEE) no mundo. A longo prazo, a emissão contínua de GEEs contribui para as mudanças climáticas e aumenta a probabilidade de impactos irreversíveis. Desta forma, o desafio para os próximos anos é reduzir o impacto ambiental e uso de recursos relacionados à produção de alimentos ao mesmo tempo em que se aumenta a oferta de alimentos para atender às demandas relacionadas ao crescimento populacional. Com isso, este estudo teve por objetivo avaliar a emissão de gases de efeito estufa provenientes da produção de alimentos de origem animal e vegetal, comparando as categorias alimentares e discutindo estratégias de mitigação de impactos. Para tal, foram avaliados 16 estudos da literatura atual que aplicam a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em 21 alimentos. A unidade funcional escolhida foi 1 kg de proteína. Os resultados apresentaram uma tendência de maiores emissões de GEEs pelos alimentos de origem animal, em especial os ruminantes, em função da fermentação entérica. Carnes de animais monogástricos, como suínos e aves, apresentaram valores intermediários de emissão de gases. Já os alimentos de origem vegetal estiveram associados a valores mais baixos de emissão, demonstrando uma melhor eficiência proteica. A etapa de cultivo, tanto de alimentos vegetais voltados para ração animal como para consumo direto, mostrou-se a principal contribuinte na emissão de gases, sobretudo pelas emissões atribuídas ao uso de fertilizantes. Observadas as tendências, é possível discutir e propor estratégias de redução da emissão de gases, através de mudanças nos padrões de produção e consumo de alimentos.

**Palavras-Chave:** Avaliação de Ciclo de Vida (ACV); Gases de Efeito Estufa; Impacto Ambiental; Proteína; Produção de Alimentos.

# Abstract

Food production is responsible for about a third of the world's total greenhouse gas (GHG) emissions. In the long term, the continuous emission of GHGs contributes to climate change and increases the probability of irreversible impacts. Thus, the challenge for the coming years is to reduce the environmental impact and the use of resources related to food production while increasing the food supply to meet the demands related to population growth. Thus, this study aimed to evaluate the emission of greenhouse gases from the production of food of animal and vegetal origin, comparing food categories and discussing strategies to mitigate impacts. With this aim, 16 life cycle assessment (LCAs) studies in the current literature were evaluated, which were applied to 21 foods. The chosen functional unit was 1 kg of protein. The results showed a trend towards higher GHGs emissions from food of animal origin, especially ruminants, due to enteric fermentation. Meat from monogastric animals, such as pigs and poultry, showed intermediate values of GHGs emission. On the other hand, foods of vegetal origin were associated with lower emission values, demonstrating better protein efficiency. The cultivation stage, both for plant foods for animal feed and for direct consumption, proved to be the main contributor to the emission of gases, mainly due to the emissions attributed to the use of fertilizers. Once this trends are observed, it is possible to discuss and propose strategies to reduce gas emissions, through changes in food production and consumption patterns.

**Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Greenhouse Gases; Environmental Impact; Protein; Food Production.**

## Lista de Figuras

- 4.1 Emissão de gases de efeito estufa por categoria. . . . . 27
- 4.2 Emissão de gases de efeito estufa por categoria, exceto ruminantes. . . . . 28

## Lista de Tabelas

3.1	Fatores de rendimento nas cadeias de carne. . . . .	19
3.2	Conteúdo de proteína por alimento. . . . .	19
4.1	Emissão de gases de efeito estufa por alimento em kg CO <sub>2</sub> eq/kg proteína. .	20

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GEE	Gás de Efeito Estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
PAG	Potencial de Aquecimento Global
TACO	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>14</b>
2.1	Gases de efeito estufa . . . . .	14
2.1.1	Dados de emissão de gases . . . . .	15
2.2	Avaliação de Ciclo de Vida . . . . .	16
2.2.1	Unidade Funcional . . . . .	16
2.2.2	Entradas e Saídas . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>20</b>
4.1	Análise por categoria . . . . .	22
4.1.1	Ruminantes . . . . .	22
4.1.2	Monogástricos . . . . .	23
4.1.3	Laticínios . . . . .	23
4.1.4	Ovos . . . . .	24
4.1.5	Leguminosas . . . . .	25
4.1.6	Cereais . . . . .	26
4.2	Comparativo entre as categorias . . . . .	26
4.3	Estratégias de Mitigação . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>33</b>
5.1	Perspectivas . . . . .	34
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>35</b>

# 1 Introdução

A produção de alimentos é responsável por cerca de um terço da emissão de gases de efeito estufa (GEE) no mundo, o que se deve ao desmatamento de florestas tropicais, emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) a partir do gado de corte e do cultivo de arroz e emissões de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) advindas da aplicação de fertilizantes no solo (FOLEY *et al.*, 2011). É também responsável pela maior parte do uso de terras e água, além de impactar os ecossistemas pelo uso de pesticidas, mudanças no uso da terra e emissões locais de nutrientes como nitrogênio e fósforo (SONESSON *et al.*, 2017). Em resumo, os impactos ambientais relacionados à agropecuária são causados pela expansão de novas áreas de pastagens e cultivares, assim como a intensificação, através do uso de fertilizantes, irrigação e mecanização, para se obter terras mais produtivas (BURNEY *et al.*, 2010).

Nas últimas décadas, a intensificação da produção agrícola têm aumentado drasticamente, superando as taxas de expansão agrícola, através da aplicação massiva de inovações tecnológicas no campo com o objetivo de maximizar a produtividade (FOLEY *et al.*, 2011). No entanto, mesmo com os ganhos de produtividade, dados da FAO *et al.* (2021) estimam que cerca de 811 milhões de pessoas estiveram subalimentadas em 2020, e mais de 2,3 bilhões de pessoas, ou 30 % da população global, não tiveram acesso à alimentação adequada no mesmo ano. Além disso, a expectativa é de que o crescimento populacional continue aumentando a demanda por alimentos, já que se estima uma população de aproximadamente 10 bilhões de pessoas em 2050, de forma que será necessário que a agricultura produza quase 50 % mais alimentos em relação a 2012 (FAO, 2017).

De forma a reconhecer o compromisso com o desenvolvimento sustentável, em 2015 foi adotada pelos Estados Membro da ONU a Agenda 2030, um plano de ação composto por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que abrangem as esferas econômica, social e ambiental (ONU, 2015). Dentre os ODSs, destacam-se o ODS 2, que visa “acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável”; o ODS 12, que objetiva “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”; e o ODS 13 que alerta sobre a necessidade de “tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”. Para que os objetivos sejam alcançados, serão necessários esforços adicionais para reduzir as emissões de GEEs, evitar o esgotamento de recursos, gerenciar a demanda por produtos alimentares

intensivos em recursos e reduzir a perda de alimentos e resíduos, entre outros desafios (FAO, 2018).

Em suma, é um fato largamente reconhecido pela literatura que o sistema alimentar atual não é sustentável, principalmente por ser composto majoritariamente por alimentos que geram um grande impacto ambiental. O desafio para os próximos anos é aumentar a oferta de alimentos, diminuindo simultaneamente os impactos e o uso de recursos (SONESSON *et al.*, 2017). O crescimento futuro na produção deve ser acomodado dentro da crescente escassez de recursos naturais, incluindo terra, água e nutrientes, e as emissões de resíduos e GEE devem ser reduzidas na busca por um sistema alimentar ambientalmente sustentável e economicamente viável, justo e acessível (GERBER *et al.*, 2013).

Nesse cenário de crescente preocupação com o sistema alimentar, e com a finalidade de avaliar a sustentabilidade da cadeia de alimentos, estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) têm sido amplamente realizados, cujos resultados podem formar a base para a tomada de decisões. Aliado a isso, diversos estudos têm relatado que a substituição de carne e demais produtos de origem animal por proteínas vegetais é a maneira mais eficiente de melhorar a sustentabilidade ambiental do consumo de alimentos, já que a conversão da proteína vegetal à proteína animal é bastante ineficiente em comparação com o consumo humano direto de proteínas vegetais (ZHU; IERLAND, 2004).

Com isso, este estudo tem por objetivo avaliar e comparar a emissão de gases de efeito estufa oriundos da produção de alimentos de origem animal e vegetal, além de discutir estratégias de mitigação. A pesquisa se baseia em estudos da literatura atual que aplicam a metodologia de ACV e usa kg de proteína como unidade funcional.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Gases de efeito estufa

Os gases de efeito estufa (GEE) são constituintes gasosos da atmosfera, tanto naturais quanto antropogênicos, que absorvem e emitem radiação dentro do espectro infravermelho, no processo que é a causa fundamental do efeito estufa. Os GEEs primários na atmosfera da Terra são vapor d' água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ) (GERBER *et al.*, 2013). Existem diversos outros gases de efeito estufa antropogênicos na atmosfera, como os halocarbonetos e outras substâncias contendo bromineantes, que são controlados pelo protocolo de Montreal, e os hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorocarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), cuja emissão é controlada pelo Protocolo de Kyoto.

O efeito estufa é fundamental para a existência de vida na Terra como a conhecemos, já que mantém o planeta por volta de  $33^\circ\text{C}$  mais quente do que seria sem a atuação do fenômeno. No entanto, o aumento de GEEs na atmosfera provoca maior retenção da radiação solar, fazendo com que a temperatura média da superfície terrestre se eleve acima do esperado (KWEKU *et al.*, 2018). As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso têm aumentado significativamente desde 1750, a partir da revolução industrial, e atualmente excedem em muito os valores pré-industriais. O aumento nas emissões de gases são relacionados principalmente com o uso de combustíveis fósseis e a agricultura, assim como pelas mudanças de uso da terra (IPCC, 2007).

A emissão contínua de GEEs, além de ser causa das mudanças climáticas e do aquecimento global, deve contribuir para alterações de longa duração no sistema climático, aumentando a probabilidade de impactos severos, invasivos e irreversíveis para os ecossistemas e a população (IPCC, 2007). Com isso, a capacidade de produzir alimentos também será impactada, pois o aumento da temperatura global e do nível do mar, juntamente com a mudança dos padrões de precipitação, afetarão o crescimento das culturas e rendimento do gado e da pesca. Além disso, a ocorrência de eventos climáticos extremos deve aumentar a volatilidade da produção e dos preços (GODFRAY *et al.*, 2011).

### 2.1.1 Dados de emissão de gases

As emissões geradas pelos sistemas alimentares representam 34 % do total de emissões de GEEs. Desta fração, 71 % se deve à agricultura e atividades de uso e mudanças de uso da terra, e o restante está relacionado a atividades da cadeia de suprimentos: varejo, transporte, consumo, produção de combustíveis, gestão de resíduos, processos industriais e embalagens (CRIPPA *et al.*, 2021).

As emissões de GEEs são tratadas em equivalentes de CO<sub>2</sub>, a medida padrão para comparar as emissões de diferentes gases (IPCC, 2007). A medida se baseia no Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada um dos gases em relação ao CO<sub>2</sub>, sendo expressa pela quantidade de emissões de uma mistura de gases durante um determinado horizonte de tempo, em geral 100 anos, que causaria o mesmo impacto que o CO<sub>2</sub>. De modo geral, o cálculo considera as emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, por serem mais expressivas.

A maior parte das emissões de metano é produzida por fermentação entérica durante os processos digestivos de animais ruminantes, e também pelo cultivo de arroz submerso. As emissões de óxido nitroso se originam principalmente da aplicação de fertilizantes à base de nitrogênio e pelo manejo de dejetos animais, já as emissões de dióxido de carbono estão relacionadas ao desmatamento (FAO, 2017).

De acordo com dados da FAO (2021), as emissões globais em função da agricultura e incluindo o uso da terra foram de 10,7 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq) em 2019. As atividades agropecuárias dentro do portão da fazenda foram responsáveis por 7,2 Gt CO<sub>2</sub>eq, o que corresponde a mais da metade do total, e um aumento de 10 % em relação aos dados de 1990. Destas emissões, 2,8 Gt CO<sub>2</sub>eq são relacionadas à pecuária, através da emissão de metano devido à fermentação entérica.

As atividades de uso e mudança de uso da terra geraram uma emissão de 3,5 Gt CO<sub>2</sub>eq. em 2019 (FAO, 2021), o que considera a interação de diversos fatores diretos e indiretos, como pastoreio, cultivo, abandono e rebrota de floresta secundária (IPCC, 2007). No entanto, a maior contribuição na emissão de GEE é o desmatamento, com cerca de 2,9 Gt de CO<sub>2</sub>eq (FAO, 2021).

Mais da metade das emissões globais em função da agricultura no ano de 2019 foram atribuídas ao Brasil, Indonésia e China. No caso do Brasil, estima-se uma emissão de aproximadamente 1,2 Gt CO<sub>2</sub>eq, cuja maior fração se deve ao desmatamento (FAO, 2021). É demonstrado que, embora o setor agropecuário venha quebrando recordes de produção e reduzindo a intensidade das emissões, em números absolutos as emissões continuam a subir. Albuquerque *et al.* (2020) aponta para um aumento de 9,6 % nas emissões brutas de GEEs no Brasil em 2019, quando o país teve sua governança federal de clima desmontada, além do engavetamento dos planos de prevenção e controle do desmatamento (PPCDAm e

PPCerrado), demonstrando uma reversão na tendência de redução das emissões, observada entre 2004 e 2010.

## 2.2 Avaliação de Ciclo de Vida

Um dos métodos mais utilizados na análise do impacto ambiental de um determinado produto é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), sendo uma ferramenta importante no setor agroalimentar na identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos alimentos. A metodologia segue padrões determinados pelas ISO 14040 e 14044 e consiste na avaliação dos potenciais de impacto ambiental de processos, produtos ou serviços, através da avaliação dos fluxos mássicos e energéticos ao longo do ciclo de vida (ISO 14040), considerando o uso de recursos e a emissão de poluentes.

A abrangência de um estudo de ciclo de vida pode variar, podendo avaliar apenas o processo de extração de matéria-prima até a obtenção do produto beneficiado, estudo chamado “do berço ao portão” (*cradle to gate*), ou ainda mais abrangente, considerando também as etapas de distribuição e uso do produto e disposição final dos resíduos, conhecido como “do berço ao túmulo” (*cradle to grave*) (NUNES, 2015).

Embora os estudos de ACV quantifiquem as emissões relacionadas a uma determinada cadeia, possuem finalidade qualitativa e de comparação, ao invés de fornecerem valores absolutos sobre o impacto ambiental relacionado ao produto (ZHU; IERLAND, 2004). Dessa forma, neste estudo serão discutidas as variações nos valores de emissão de gases entre os grupos de alimentos estabelecidos, assim como dentro de um mesmo grupo.

### 2.2.1 Unidade Funcional

A metodologia de ACV requer a escolha de uma unidade funcional, em geral relacionada com a função principal do sistema em termos quantitativos. Uma análise baseada em kg de alimento como unidade funcional não representa de forma adequada as necessidades reais de nutrição humana (GONZÁLEZ *et al.*, 2011). Nesse sentido, alguns autores têm considerado kg de proteína como unidade funcional (ZHU; IERLAND, 2004; VRIES; BOER, 2010; NIJDAM *et al.*, 2012; NUNES *et al.*, 2016).

As proteínas são importantes por diversas razões, já que, para além de serem um importante nutriente na alimentação humana, quando o acesso à proteína é adequado, é possível assumir que o acesso a outros nutrientes é satisfatório, já que alimentos ricos em proteína em geral também são boas fontes de micronutrientes e minerais (SONESSON *et al.*, 2017). A qualidade de uma proteína está relacionada com o conteúdo de aminoácidos essenciais e a biodisponibilidade (DAMODARAN; PARKIN, 2018), o que é avaliado por

Sonesson *et al.* (2017), que argumenta a respeito da necessidade de se desenvolver uma unidade funcional que possa ser aplicada a produtos únicos, porém considerando o contexto alimentar.

Nos alimentos de origem animal, a proteína é o macronutriente de maior relevância. Já nos alimentos de origem vegetal, embora possa haver deficiência de determinado aminoácido essencial, é comum a combinação com outra proteína vegetal, como é o caso da combinação de arroz e feijão, fornecendo um nível completo e balanceado de aminoácidos essenciais. Tendo em vista que uma análise completa considerando a composição de aminoácidos seria inviável neste trabalho, a unidade funcional escolhida para fins de comparação foi 1kg de proteína.

### 2.2.2 Entradas e Saídas

De modo geral, os estudos de ACV incluem como entradas agrícolas as emissões associadas à produção, transporte e aplicação de produtos químicos e fertilizantes, manejo do esterco dos animais, materiais de embalagem, combustível e energia usados para irrigação e maquinário de cultivo, colheita, processamento e abate, além do transporte e refrigeração para o centro de distribuição regional, quando aplicável. As saídas incluem as emissões liberadas de solos pelos fertilizantes nitrogenados, resíduos de plástico e papel, resíduos biológicos e relacionados com a deposição de fezes e águas residuais.

No caso dos ruminantes, porcos e da produção de leite, também são consideradas as emissões de CH<sub>4</sub> relacionadas à fermentação entérica dos animais. Para as fazendas de frango, Skunca *et al.* (2018) considera a produção de ração, que consiste em milho, soja e trigo, água doce, eletricidade, combustíveis fósseis, além dos demais itens já citados. A produção de ovos possui entradas e saídas similares, levando em conta também o processo de embalagem.

### 3 Metodologia

Foram coletados dados de 16 estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) publicados entre 2008 e 2020. Os dados selecionados foram classificados pela origem da matriz alimentar, tendo sido divididos entre 6 grupos: 4 de produtos de origem animal (ruminantes, monogástricos, laticínios e ovos) e 2 de origem vegetal (leguminosas e cereais). Para estudos que consideraram diferentes cenários na análise, apresentando mais de um valor para um mesmo alimento, foram considerados o maior e menor valor.

Embora os estudos selecionados tenham diferenças metodológicas, assume-se que as mesmas causem impacto limitado nos resultados, o que justifica a comparação. Em geral, escolhas e suposições semelhantes foram usadas, além da aplicação de procedimentos de cálculo padronizados e executados em softwares especiais para ACV.

Em relação aos limites de avaliação do ciclo de vida, todos estudos apresentaram o mesmo limite inferior de avaliação, o berço (*cradle*). Já os limites superiores divergiram, sendo a maior parte até o portão (*gate*), e 3 dos autores consideram até o túmulo (*grave*). Estudos que compreendem os limites "do berço ao túmulo" ("*cradle to grave*") são mais completos, pois fornecem uma visão mais ampla e detalhada do impacto ambiental. No entanto, em razão da escassez de estudos com essa abordagem e para fins de comparação dos dados, assumiu-se homogeneidade nas etapas posteriores ao portão, ou seja, transporte, comercialização e, quando aplicável, cadeia do frio. Desta forma, assume-se que o impacto é essencialmente o mesmo para todas as cadeias, e portanto não exerce influência sobre os resultados.

Para que fosse possível realizar a comparação, os valores coletados foram convertidos para uma unidade em comum. Os estudos envolvendo produtos cárneos, que em geral apresentam valores em peso da carcaça ou peso vivo do animal foram convertidos para carne sem osso de acordo com os fatores de rendimento descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Fatores de rendimento nas cadeias de carne.

	Bovinos	Ovinos	Suínos	Frango	Peixe
Peso vivo	1:0,485	1:0,43	1:0,43	1:0,54	1:0,625
Carcaça	1:0,695	1:0,66	1:0,59	1:0,77	-

Fonte: (CLUNE *et al.*, 2017)

Uma vez que a maioria dos estudos utilizados apresenta dados em kg CO<sub>2</sub>eq por kg de alimento, e a unidade funcional adotada neste estudo foi kg CO<sub>2</sub>eq por kg proteína, se fez necessária a conversão. Os valores de proteína em 100 g de alimento para cada uma das matrizes alimentares são descritos na Tabela 3.2. A maior parte dos valores foram obtidos da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011). Quando não descritos pela TACO, outras referências foram utilizadas.

Tabela 3.2: Conteúdo de proteína por alimento.

	g proteína/100g alimento	Referência
Carne bovina	20,8	(TACO, 2011)
Carne ovina	16,1	(USDA, 2018)
Carne suína	22,6	(TACO, 2011)
Frango	16,4	(TACO, 2011)
Peixe	20,7	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Leite	3,3	(USDA, 2018)
Queijo	22,6	(TACO, 2011)
Iogurte	4,1	(TACO, 2011)
Ovos	13,0	(TACO, 2011)
Soja	36,5	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Feijão carioca	20,0	(TACO, 2011)
Ervilha	24,5	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Arroz integral	7,3	(TACO, 2011)
Arroz branco	7,2	(TACO, 2011)
Grão de bico	21,2	(TACO, 2011)
Aveia	13,9	(TACO, 2011)
Trigo	13,7	(USDA, 2018)
Amendoim	27,2	(TACO, 2011)
Pasta de amendoim	22,5	(TACO, 2011)
Lentilha	23,2	(TACO, 2011)

## 4 Resultados e Discussão

Dos 16 artigos selecionados, foram coletados 50 dados de 21 alimentos, que estão dispostos na Tabela 4.1. No caso de estudos que apresentaram mais de um valor para um mesmo alimento, o maior e o menor valor foram dispostos. Pode se considerar que, diante da apresentação de um grande número de dados de emissão de gases, a variação nos métodos e condições de cultivo tem um impacto mais significativo nos valores apresentados do que escolhas metodológicas (CLUNE *et al.*, 2017).

Tabela 4.1: Emissão de gases de efeito estufa por alimento em kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína.

	Emissão (kg CO <sub>2</sub> eq/kg proteína)	Referência
<b>RUMINANTES</b>		
Carne bovina	125,90 - 468,32	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)
	198,25 - 422,28	(RUVIARO <i>et al.</i> , 2015)
	195,07	(CEDERBERG <i>et al.</i> , 2009)
	139,42	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Carne ovina	219,82	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)
<b>MONOGÁSTRICOS</b>		
Carne suína	45,75	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)
	36,28	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Frango	17,82 - 20,45	(JÚNIOR <i>et al.</i> , 2008)
	22,07	(SKUNCA <i>et al.</i> , 2018)
	42,76	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)
	28,66	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Peixe	14,98	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
<b>LATICÍNIOS</b>		
Leite	84,85	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)

---

Leite pasteurizado	37,88 - 50,61	(DJEKIC <i>et al.</i> , 2014)
Leite UHT	37,57 - 41,82	(DJEKIC <i>et al.</i> , 2014)
Queijo	38,94	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
	29,78 - 41,90	(DJEKIC <i>et al.</i> , 2014)
Iogurte	34,63 - 64,15	(DJEKIC <i>et al.</i> , 2014)
<hr/> OVOS <hr/>		
Ovos	12,00	(COSTANTINI <i>et al.</i> , 2020)
	23,08	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
	28,46	(GERBER <i>et al.</i> , 2013)
	42,92	(ESTRADA-GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2020)
<hr/> LEGUMINOSAS <hr/>		
Soja	0,27 - 48,77	(CASTANHEIRA; FREIRE, 2013)
	0,28 - 0,95	(RAUCCI <i>et al.</i> , 2015)
	0,96 - 8,60	(MACIEL <i>et al.</i> , 2016)
	1,97	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Ervilha	2,00	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
	0,61	(AUDSLEY <i>et al.</i> , 2009)
Grão de bico	3,63 - 3,77	(AUDSLEY <i>et al.</i> , 2009)
Feijão carioca	4,30	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Lentilha	4,57	(AUDSLEY <i>et al.</i> , 2009)
Amendoim	1,14	(NIKKHAH <i>et al.</i> , 2015)
Pasta de amendoim	12,80	(MCCARTY <i>et al.</i> , 2014)
<hr/> CEREAIS <hr/>		
Aveia	3,38	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
Trigo	4,23	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)
	4,82	(AUDSLEY <i>et al.</i> , 2009)
Arroz	15,80 - 35,53	(NUNES <i>et al.</i> , 2016)
	16,67	(GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2011)

---

---

## 4.1 Análise por categoria

### 4.1.1 Ruminantes

A categoria de ruminantes inclui a criação de gado bovino e ovino e se diferencia pela presença de estômago compartimentado nos animais (rúmen), onde ocorre a fermentação do material vegetal ingerido, um processo anaeróbico efetuado pela população microbiana ruminal que realiza a conversão em energia e em consequência libera metano (LIMA *et al.*, 2010).

O menor e maior valor foram encontrados por Gerber *et al.* (2013), sendo 125,90 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína atribuídos ao rebanho leiteiro e 468,32 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína ao rebanho bovino de corte, o que é justificado pelo fato de as emissões do rebanho leiteiro serem atribuídas à produção do leite e da carne. Cederberg *et al.* (2009) indica que 76 % das emissões de GEEs são de metano, devido à fermentação entérica, enquanto 22 % são de óxido nitroso, e as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao uso de combustíveis fósseis são de menor relevância para a carne bovina.

Diferenças entre os valores podem ser atribuídas à alimentação, como no caso de Ruviaro *et al.* (2015), que analisa 7 cenários com regimes de alimentação diferente, dentre os quais os menores valores de emissão de GEEs são os sistemas com capim natural melhorado e de azevém e sorgo cultivados e o maior valor se deve ao sistema com capim natural. Clune *et al.* (2017) também aponta para a influência da localização geográfica, sendo que a carne bovina produzida na América do Sul apresenta os valores mais altos, o que pode estar relacionado com a inclusão do parâmetro de mudança de uso da terra nos cálculos de ACV.

De forma similar à carne bovina, mais da metade das emissões da criação de ovinos, que apresentam um valor intermediário, provêm da fermentação entérica, e pouco mais de 35 % são da produção de ração. Além da fração comestível, ovelhas também produzem coprodutos não comestíveis importantes, como a lã. Sendo assim, as emissões foram divididas entre produtos comestíveis (carne e leite) e não comestíveis (fibra natural), considerando o valor econômico relativo, de forma que a parcela das emissões atribuídas a produção de carne acaba por ser reduzida (GERBER *et al.*, 2013).

### 4.1.2 Monogástricos

Os animais monogástricos, também conhecidos como não-ruminantes, são aqueles que possuem estômago simples. Neste estudo foram considerados suínos, frangos e peixes. Os processos considerados na ACV incluem a criação, produção de ração e uso de fertilizantes, uso de energia nas granjas incluindo aquecimento, bem como transporte, processamento e refrigeração.

O menor valor entre os monogástricos foi relatado para os peixes no trabalho de González *et al.* (2011), que considerou salmão criado em cativeiro e atum, com uma emissão de 14,98 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína. Valores intermediários foram demonstrados para as aves, variando de 17,82 a 42,76 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína. Júnior *et al.* (2008), que comparou a produção nas regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil, mostrou que a etapa de produção de ração causou cerca de 63 % do impacto da criação de aves, dos quais 94 % foram devido às emissões de CO<sub>2</sub>, 5 % das emissões de N<sub>2</sub>O e 1 % das emissões de CH<sub>4</sub> na região Sul. Embora várias diferenças na cadeia de cada região possam ser citadas, como o emprego de tecnologia e uso do transporte, as principais diferenças nos valores de emissão de GEEs são atribuídas à produção e transporte de grãos devido às diferentes condições climáticas do Brasil, além das distâncias percorridas (JÚNIOR *et al.*, 2008). As conclusões estão de acordo com o estudo feito por Skunca *et al.* (2018), que realizou uma ACV do berço ao túmulo e demonstrou que a etapa de criação de galinhas teve o mesmo impacto que todas as etapas sucessivas juntas, tendo como maior contribuinte a alimentação. Já nas demais etapas, o uso de recursos foi o fator predominante, considerando o uso de água e de todos os tipos de energia.

A produção de suínos apresentou valores um pouco mais altos em relação aos demais, com emissões relacionadas principalmente com a alimentação, devido à produção e uso de fertilizantes, e também com o processamento de esterco. Gerber *et al.* (2013) cita a influência da localização geográfica nos valores de emissão, atribuindo as diferenças às variações de matéria-prima da ração, de produtividade e do clima.

### 4.1.3 Laticínios

O estudo de Djekic *et al.* (2014) mostrou valores similares de emissão para o leite pasteurizado e o UHT. Foram avaliados três subsistemas na produção de laticínios: 'fazenda leiteira', 'fábrica de laticínios' e a 'gestão de resíduos sólidos e tratamento de águas residuais', constatando que o maior contribuinte na emissão de GEEs é a produção de leite na fazenda, em consequência do alto consumo de água e energia e da emissão de CH<sub>4</sub> derivado do manejo de esterco e fermentação entérica. Gerber *et al.* (2013) apresentou o valor mais alto para o leite, no entanto não foi especificado o grau de processamento e

os limites de avaliação.

Valores mais altos são esperados para o iogurte e queijo, devido à quantidade de leite utilizada por kg em sua produção. De fato, quando compara-se a emissão em kg CO<sub>2</sub>eq por kg de alimento, tem-se 1,39 para o leite, 8,10 para o queijo e 2,03 para o iogurte, considerando os valores médios relatados por Djekic *et al.* (2014). No entanto, quando a unidade funcional passa a ser kg de proteína, a emissão do queijo apresenta valores muito próximos ao leite, uma vez que possui um conteúdo de proteína aproximadamente 7 vezes maior (Tabela 3.2).

De modo geral, as contribuições relativas são diferentes dependendo do tipo de produtos lácteos, sendo impactadas pelas demandas de energia e de combustível ligadas ao processamento, a variar conforme localização e tamanho da planta, nível de automação e uso de energia elétrica ou térmica (DJEKIC *et al.*, 2014).

#### 4.1.4 Ovos

A produção de ovos orgânicos, abordada por Costantini *et al.* (2020), foi a que apresentou a menor emissão de GEEs (12,0 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína), enquanto Estrada-González *et al.* (2020) relatou um valor aproximadamente 3,5 vezes mais alto (42,92 kg CO<sub>2</sub>eq/kg proteína) em uma produção convencional. Por se tratar de uma produção orgânica, no estudo de Costantini *et al.* (2020) não foram contabilizados os insumos de fertilizantes minerais e as respectivas operações de distribuição, assim como os pesticidas, que foram substituídos por capinas mecânicas. Neste e nos demais estudos foram considerados todos os insumos relacionados ao ciclo de criação, como alimentação, água e eletricidade.

Costantini *et al.* (2020) aponta a produção de ração como o maior contribuinte para o impacto ambiental, cerca de 72 %, seguido pelas emissões relacionadas ao esterco, criação de galinhas e eletricidade. O impacto é causado principalmente pelas emissões de CO<sub>2</sub> (58 %), nas operações de campo mecanizadas e processamento de ração. Já as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, que contribuem 34 % e 8 %, respectivamente, são atribuídas ao armazenamento, manuseio e distribuição de fertilizantes orgânicos nos campos, além do manejo do esterco. De modo similar, Estrada-González *et al.* (2020) indica que a fase de postura de ovos é a que concentra a maior parte da emissão de gases.

Mesmo com as diferenças metodológicas entre os estudos selecionados, é possível observar a melhor performance do cultivo orgânico em termos de emissão de GEEs. No entanto, o impacto depende em grande parte das escolhas de manejo dos agricultores, e não do sistema de criação adotado, de forma que existem oportunidades de mitigação relacionadas às estratégias de alimentação, manejo de esterco ao sistema de alojamento que podem ser adotadas em qualquer sistema (COSTANTINI *et al.*, 2020), a serem discutidas

nas próximas seções .

#### 4.1.5 Leguminosas

As leguminosas selecionadas para avaliação foram soja, ervilha, grão de bico, feijão carioca, lentilha, amendoim e pasta de amendoim, por serem importantes fontes de proteína na alimentação humana no Brasil e no mundo.

A produção de soja apresenta os menores valores de emissão de GEEs, entretanto há um aumento no impacto ambiental quando são consideradas as mudanças de uso da terra associadas à plantação, podendo representar mais de 70 % das emissões, de acordo com Castanheira e Freire (2013). Em seu estudo, as maiores emissões de GEE foram calculadas para a região tropical úmida, onde há a conversão da floresta tropical em plantações de soja (sistema de plantio direto), enquanto as menores emissões foram calculadas para pastagens já severamente degradadas na região temperada quente seca. É similar o que ocorre com os valores encontrados por Maciel *et al.* (2016), sendo que o menor valor não considera as mudanças de uso da terra, e o maior considera uma conversão de 100 % de floresta para plantação, o que se considera uma superestimativa, já que não há registros de desmatamento significativo para o plantio de soja no Rio Grande do Sul, região avaliada no estudo. No entanto, as transformações não devem ser omitidas nos cálculos, pois mesmo ao considerar uma fração de 15,4 % de transformações da terra, houve um aumento de 205 % nas emissões relacionadas ao cultivo de soja (MACIEL *et al.*, 2016).

De modo geral, as atividades relacionadas ao preparo do solo foram as maiores contribuintes na emissão de GEEs no cultivo da soja, sobretudo em razão da aplicação de calcário e fertilizantes, seguidas das emissões oriundas da decomposição de resíduos da lavoura e uso de combustíveis. A produção e transporte de sementes de soja representaram apenas 7,8 % segundo Raucci *et al.* (2015), que também aponta para uma tendência de menores emissões em áreas de maior produtividade.

Em relação às demais leguminosas, as entradas e saídas são essencialmente as mesmas, de forma que as variações podem estar relacionadas com as diferenças de fertilizantes aplicados e demanda de transporte, assim como as diferenças metodológicas entre os estudos, uma vez que podem ser considerados cenários com diferentes sistemas de cultivo e uso prévio da terra, características do clima e do solo. No caso da pasta de amendoim, foi adotado um estudo “do berço ao túmulo”, o que pode justificar o alto valor encontrado, sobretudo quando comparado ao amendoim. A maior parcela das emissões está relacionada ao processamento, em função do uso de eletricidade para as operações da planta, seguido pelo subsistema consumidor e pelo varejo, principalmente devido à produção de embalagens e transporte (MCCARTY *et al.*, 2014). A etapa agrícola é responsável por uma emissão de cerca de 0,4 kg de CO<sub>2</sub>/kg de alimento, valor próximo ao encontrado por Nikkhah *et al.*

(2015) para o amendoim.

#### 4.1.6 Cereais

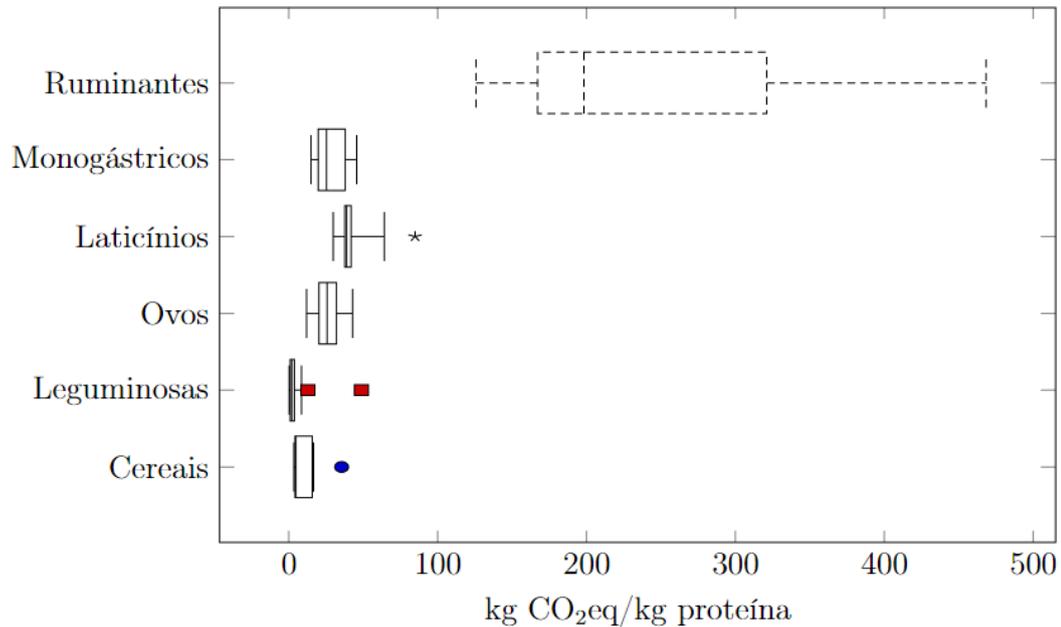
Para a categoria de cereais, foram avaliados estudos de ACV de aveia, trigo e arroz. Observa-se que o arroz apresenta valores de emissão de gases cerca de 4 vezes mais altos em relação aos demais cereais, o que possui diversas justificativas. Uma delas se deve ao fato de o arroz possuir pouco mais da metade do conteúdo de proteína que a aveia e o trigo, conforme dados da Tabela 3.2. Além disso, o sistema de cultivo inundado está associado à altas emissões de metano biogênico, favorecido pelo longo tempo de material orgânico em decomposição anaeróbica e ambiente reduzido (NUNES *et al.*, 2016).

No estudo de Nunes *et al.* (2016) foram avaliados dois sistemas de cultivo de arroz diferentes, mínimo e orgânico, de arroz branco e integral, sendo o cultivo mínimo o mais utilizado nas lavouras da região Sul. O arroz do sistema de cultivo mínimo apresentou os menores valores de emissão de GEEs (15,8 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína), enquanto o arroz de cultivo orgânico apresentou os maiores valores, em especial o arroz branco (35,5 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína). No caso do arroz orgânico, a maior parte das emissões está relacionada com a etapa de cultivo, sobretudo em função do maior período de inundação. Já no cultivo mínimo, são mais expressivas as emissões relacionadas aos fertilizantes sintéticos. Embora alguns estudos relatem o potencial de redução dos impactos ambientais na agricultura orgânica, os benefícios acabam sendo reduzidos devido ao baixo rendimento obtido neste sistema (BLENGINI; BUSTO, 2009). Contudo, o desempenho da agricultura orgânica também é afetado por outros fatores, como a topografia e o gerenciamento agrícola, tornando necessários estudos mais detalhados e uso de técnicas que favoreçam a obtenção de maiores rendimentos.

## 4.2 Comparativo entre as categorias

A partir de uma visão geral ampla, é possível identificar uma hierarquia dentro dos valores de emissão de GEEs, que está de acordo com tendências já identificadas na literatura. Considerando os alimentos de origem animal, os valores variaram de 12 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína para os ovos orgânicos até 468,32 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína para a carne bovina especializada. Já entre os alimentos de origem vegetal, a variação vai de 0,27 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína para a soja a 35,53 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína para o arroz, de forma que se pode observar uma forte tendência de menor impacto ambiental na entrega de proteínas entre os alimentos de origem vegetal. Para facilitar a compreensão da magnitude dos valores para cada uma das categorias, foi elaborado o gráfico bloxpot abaixo.

Figura 4.1: Emissão de gases de efeito estufa por categoria.

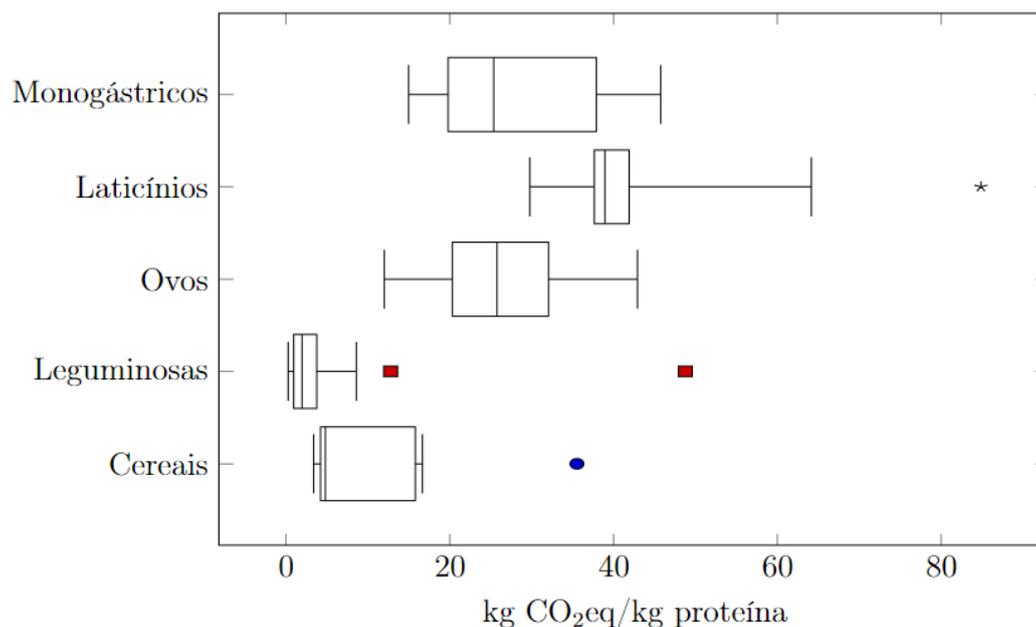


Dentre os alimentos de origem animal, destacam-se os valores elevados e o grande intervalo de emissões para os ruminantes, já discutido anteriormente. A maior parte das emissões da categoria são atribuídas à fermentação entérica, o que também contribui em grande parte nas emissões dos laticínios, que aparecem como a segunda categoria com maiores valores de emissão. Observa-se ainda que o valor mínimo para os ruminantes supera os valores máximos de todas as demais categorias. De acordo com Clune *et al.* (2017), quando os intervalos dos valores de emissão de gases estão longe de se sobrepor, os números exatos são menos importantes, demonstrando que a conversão de proteínas a partir de ruminantes é de fato pouco eficiente e necessita mais atenção quanto à emissão de GEEs e também de outros parâmetros, como uso de terra e água. Desta forma, para fins de melhoramento de escala, foi elaborado um gráfico apenas com as demais categorias (Figura 4.2).

Dentre os cárneos, os animais monogástricos apresentam valores de emissão menores em relação aos ruminantes. A criação de suínos e aves possui como maior contribuinte na emissão de gases a produção de ração, seguido pelo manejo do esterco, sofrendo impacto direto dos regimes de alimentação e métodos de cultivo adotados, assim como da localização geográfica. O mesmo ocorre com a produção de ovos, que apresenta valores razoáveis de emissão de gases em relação aos demais produtos de origem animal, com um valor médio de 25,77 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína, inferior ao valor mínimo dos laticínios.

Em relação aos laticínios, apesar da grande amplitude dos resultados, apresenta baixa dispersão, indicando que, mesmo para produtos com diferentes tipos de processamento, o maior contribuinte para a emissão de gases ainda está na produção de leite cru.

Figura 4.2: Emissão de gases de efeito estufa por categoria, exceto ruminantes.



Além disso, embora a emissão absoluta para o queijo e o iogurte sejam maiores em relação ao leite, observa-se a homogeneidade nas emissões em relação a 1 kg de proteína.

Excluindo o impacto relacionado à fermentação entérica, a produção de ração é o elemento de maior relevância nos produtos de origem animal, de forma que aumentar a eficiência da conversão alimentar é um meio importante de reduzir esses impactos.

Os grupos que abrangem alimentos de origem vegetal apresentam os menores valores relativos, exceto pelos *outliers*, representados por valores individuais de soja e pasta de amendoim nas leguminosas e arroz nos cereais. Ambos grupos apresentam baixa amplitude em relação aos demais, sendo que a categoria de leguminosas possui baixa dispersão, com os valores mais baixos dentre todas as categorias, indicando que os alimentos da categoria possuem boa eficiência de conversão proteica com relação à emissão de gases.

Quando não são consideradas áreas desmatadas, e com exceção do arroz, o cultivo de vegetais é impactado sobretudo por emissões oriundas dos fertilizantes. Nesse sentido, a agricultura orgânica surge como alternativa, embora, conforme já mencionado, os benefícios podem ser reduzidos em razão do menor rendimento, o que abre espaço para discussão e busca por formas otimizadas de cultivo.

De modo geral, as tendências encontradas estão de acordo com a declaração no estudo de Zhu e Ierland (2004) de que “a conversão de proteína vegetal em proteína animal é bastante ineficiente em comparação com o consumo humano direto de proteínas vegetais”, dado que as proteínas de origem animal apresentam maiores valores de emissão de GEEs.

Além disso, González *et al.* (2011) aponta para uma tendência interessante: quanto

maior o teor de proteína no alimento, maior a eficiência proteica (g proteína/kg CO<sub>2</sub>eq), o que pode ser observado na soja, alimento de maior eficiência, que possui 36,5 g proteína em 100 g de alimento (Tabela 3.2) e apresenta um valor médio de 0,96 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de proteína, o que corresponde a uma eficiência de 1036,9 g proteína/kg CO<sub>2</sub>eq. Ou seja, a cada quilograma de CO<sub>2</sub>eq emitido, são obtidos 1036,9 g de proteína. Em contraposição está o arroz, que dentre os alimentos de origem vegetal é o menos proteico, e entrega uma eficiência de 61,6 g proteína/kg CO<sub>2</sub>eq. Tendência contrária é observada nos produtos cárneos, a exemplo da carne suína, que apesar do elevado teor de proteínas, entrega somente 24,4 g proteína/kg CO<sub>2</sub>eq emitido, em concordância com os valores calculados por (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

Os valores apresentados neste estudo não devem ser tomados como absolutos, em razão das variações discutidas, e sim como um indicativo de quais são os *hotspots*, pontos de maior impacto em relação à emissão de gases, e o que deve receber atenção na criação de estratégias para a redução de emissões, a serem abordadas a seguir.

## 4.3 Estratégias de Mitigação

Existe um grande potencial de redução da emissão de gases de efeito estufa da produção e consumo de alimentos através da adoção de estratégias de mitigação, que podem ser direcionadas com base nas diferenças de impacto ambiental dos vários alimentos discutidos. Essas estratégias devem ser pensadas tendo-se em vista a sustentabilidade ambiental e segurança alimentar, atendendo às crescentes demandas de alimentação da população.

De modo geral, Foley *et al.* (2011) aponta para a necessidade de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa do uso da terra e da agricultura em pelo menos 80%; reduzir as perdas de biodiversidade; reduzir as retiradas insustentáveis de água e eliminar gradualmente a poluição da água por produtos químicos agrícolas. Para tal, são traçadas quatro estratégias principais: parar a expansão agrícola, uma vez que, além da redução da biodiversidade, a expansão representa poucos benefícios, sendo a maioria dos ganhos de produção de alimentos alcançada através da intensificação; reduzir as lacunas de rendimento, aumentando o potencial produtivo dessas áreas através de reformas na agricultura convencional e a adoção de lições de sistemas orgânicos e agricultura de precisão; aumentar a eficiência dos recursos agrícolas, com a redução do uso excessivo de fertilizantes, melhoria do manejo de esterco e captura de nutrientes em excesso por meio de reciclagem, reduzindo danos e mantendo os benefícios da agricultura intensiva; e, por fim, aumentar a entrega de alimentos mudando dietas e reduzindo o desperdício, priorizando o consumo de proximidade, desviando a produção agrícola da alimentação animal e de outras aplicações não alimentares. Foley *et al.* (2011) sugere que a implantação simultânea das 4 medidas descritas deve aumentar a disponibilidade de alimentos entre 100 e 180%, atendendo às demandas projetadas e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, perdas de biodiversidade, uso e poluição da água.

Dado que o uso de fertilizantes no cultivo de vegetais, tanto voltados para ração animal como para consumo direto, mostrou-se um importante contribuinte na emissão de GEEs, a adoção de técnicas de otimização da dosagem de fertilizantes e agricultura orgânica devem ser consideradas. Embora os benefícios do cultivo orgânico possam ser reduzidos em função do menor rendimento, a não utilização de pesticidas provoca menores impactos já que gera uma menor perda de biodiversidade (BLENGINI; BUSTO, 2009). Sendo assim, o modelo ideal deve ser capaz de proporcionar mínimo impacto ambiental e, ao mesmo tempo, bons rendimentos de produção. No cultivo de arroz, Bayer *et al.* (2013) sugere a adoção de cultivo mínimo, a redução da aplicação de água através do sistema de irrigação intermitente e a rotação de culturas como estratégias eficientes na mitigação das emissões de metano, ao mesmo tempo em que há um aumento no rendimento.

Na criação de animais ruminantes, Gerber *et al.* (2013) indica que a redução de

emissões pode ser alcançada pela redução de produção e consumo, aliada à redução da intensidade das emissões atribuídas à produção. O estudo ainda aponta para os fatores com potencial de mitigação, dentre eles mudanças na alimentação dos animais e aditivos usados na produção de ração, com o objetivo de reduzir as emissões relacionadas à fermentação entérica e do estrume, sugerindo também técnicas de manejo otimizado do estrume, como a digestão anaeróbia.

A economia de energia aparece como alternativa de redução de impacto em diversos setores, como no processamento de carnes (CEDERBERG *et al.*, 2009), aves e ovos (ESTRADA-GONZÁLEZ *et al.*, 2020) e laticínios (DJEKIC *et al.*, 2014). De fato, a redução do uso de eletricidade tem benefícios ambientais e econômicos, devido à redução nas emissões e melhor custo-benefício, respectivamente. A economia de energia pode ser alcançada através da utilização de sistemas ecoeficientes em fazendas, matadouros e plantas de processamento de carne, bem como equipamentos de refrigeração energeticamente eficientes no varejo (CEDERBERG *et al.*, 2009). Estrada-González *et al.* (2020) aponta para uma redução de 49,5 % no consumo total de energia da fazenda sem comprometer o processo produtivo atual com a implantação de um esquema ecoeficiente e com o ajuste da relação consumo/potência nos equipamentos utilizados na produção de ovos, assim como com o uso de LEDs. Além disso, o aumento das capacidades de processamento também pode resultar em economia.

Diversos estudos (NIJDAM *et al.*, 2012; GONZÁLEZ *et al.*, 2011; YUE *et al.*, 2017; WESTHOEK *et al.*, 2011) sugerem mudanças na dieta humana, sobretudo a redução do consumo de carne vermelha com substituição por fontes de proteína vegetal e alimentos de origem animal de menor impacto, como carnes brancas ou ovos, considerando também os benefícios à saúde de uma dieta com menor consumo de carne vermelha. Embora as proteínas vegetais possuam uma composição de aminoácidos menos digerível para humanos do que as proteínas de origem animal, de forma que uma dieta vegetariana demanda uma ingestão de cerca de 20 % mais proteínas (WESTHOEK *et al.*, 2011), uma dieta majoritariamente baseada em vegetais, diversificada e bem projetada poderia fornecer proteína com o menor custo ambiental possível (GONZÁLEZ *et al.*, 2011). Dessa forma, deve haver incentivo ao aumento do consumo de fontes de proteína vegetal, além da ampliação de ofertas de produtos *plant-based* substitutos de carne. Dados reunidos pela Sociedade Vegetariana Brasileira (SVB, 2018) apontam que 63 % dos brasileiros gostariam de reduzir o consumo de carne, enquanto 14 % da população brasileira se declara vegetariana, representando um crescimento de 75% entre 2012 e 2017, o que indica uma tendência importante de transição de consumo.

Além disso, a redução de perdas e desperdício de alimentos nas etapas de pós-colheita, transporte, processamento e relacionadas ao varejo e uso doméstico é de alta importância e deve ser discutida, no sentido de otimizar a entrega de alimentos. Em

suma, devemos encontrar alternativas sustentáveis que aumentem a produção agrícola e reduzam o uso insustentável de água, nutrientes e produtos químicos agrícolas, contribuindo com a mitigação dos impactos ambientais resultantes da emissão de GEEs. Embora sejam discutidas globalmente, é importante que a adoção de estratégias considere as particularidades locais, de modo que se fazem necessários estudos de produção de alimentos a nível regional.

## 5 Conclusões

Este estudo teve por objetivo avaliar a emissão de gases de efeito estufa oriundos da produção de alimentos de origem animal e vegetal, comparando as categorias alimentares e discutindo estratégias de mitigação de impactos. A pesquisa teve por base estudos da literatura atual que aplicam a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida. Embora este estudo tenha algumas limitações em termos de escopo e dados, representa uma avaliação abrangente do impacto da produção de alimentos, indicando também quais setores devem receber maior atenção no sentido de revisar os processos agrícolas.

Os resultados apresentaram uma clara hierarquia entre as categorias estabelecidas, com uma tendência de maiores emissões de gases de efeito estufa pelos alimentos de origem animal, em especial os ruminantes, em função da fermentação entérica. Carnes de animais monogástricos, como porcos e galinhas, apresentaram valores intermediários de emissão de gases, enquanto os alimentos de origem vegetal apresentaram os valores mais baixos, demonstrando uma melhor eficiência proteica.

Na abordagem de estratégias de mitigação de impactos ambientais, a adoção de técnicas de cultivo que priorizem o aumento do rendimento em detrimento da expansão agrícola, a redução do uso excessivo de fertilizantes e a economia de energia aparecem como alternativas importantes. A transição para dietas com menor consumo de carnes, priorizando o consumo de vegetais de maior conteúdo proteico, também é uma alternativa relevante e tem se mostrado uma tendência, porém não deve ser o único meio, de modo que diversas medidas devem ser adotadas em conjunto, incluindo mudanças nos padrões produtivos.

Os apontamentos apresentados neste trabalho são úteis na identificação de tendências e de lacunas existentes na literatura, fazendo um direcionamento para a realização de novos estudos na área. Além disso, os resultados indicam a necessidade de se adotar um conjunto de estratégias de redução de danos ambientais, que devem ser avaliadas e aplicadas conforme a realidade de cada região. O desafio para os próximos anos é alinhar a produção de alimentos para atender às demandas relacionadas ao crescimento populacional, ao mesmo tempo em que os impactos ambientais e o uso de recursos são reduzidos. Para tal, políticas de redução de danos devem ser adotadas, de forma a alcançar um sistema alimentar ambientalmente sustentável e economicamente viável, justo e acessível.

## 5.1 Perspectivas

A partir dos estudos selecionados para esta análise, foram identificadas lacunas que podem ser exploradas em estudos futuros, tendo por base a Avaliação de Ciclo de Vida, tais como:

- Realização de ACV contemplando alimentos de maior consumo regional e produzidos no Rio Grande do Sul;
- Avaliação do perfil nutricional dos alimentos, permitindo uma melhor comparação;
- Avaliação de outros parâmetros de impacto ambiental além da emissão de gases de efeito estufa, como uso e mudanças de uso da terra, uso de água e energia, acidificação e potencial de eutrofização;
- Inclusão de análise econômica e social na produção de alimentos, assim como aspectos culturais relacionados ao consumo.

## Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, I.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T.; BARCELLOS, F.; COLUNA, I.; JUNIOR, C. C.; CREMER, M.; PIATTO, M.; POTENZA, R. *et al.* **SEEG 8 Análise Das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações Para as Metas de Clima Do Brasil 1970–2019**. [S.l.]: SEEG, 2020.

AUDSLEY, E.; BRANDER, M.; CHATTERTON, J.; MURPHY-BOKERN, D.; WEBSTER, C.; WILLIAMS, A. How low can we go? an assessment of greenhouse gas emissions from the uk food system and the scope for to reduction them by 2050. **Food Clim. Res. Netw. (FCRN) WWF-UK**, 2009.

BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; SOUSA, R. O.; SILVA, L. S. da; SCIVITTARO, W. B.; SILVA, P. R. da; GIACOMINI, S. J.; CARMONA, F. d. C. Strategies to mitigate methane emissions in lowland rice fields in south brazil. **Embrapa Clima Temperado-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, Better Crops, v. 97, n. 1, p. 27-29, 2013., 2013.

BLENGINI, G. A.; BUSTO, M. The life cycle of rice: Lca of alternative agri-food chain management systems in vercelli (italy). **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 90, n. 3, p. 1512–1522, 2009.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. **Proceedings of the national Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 107, n. 26, p. 12052–12057, 2010.

CASTANHEIRA, G.; FREIRE, F. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 49–60, 2013. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003442>>.

CEDERBERG, C.; MEYER, D.; FLYSJÖ, A. Life cycle inventory of greenhouse gas emissions and use of land and energy in brazilian beef production. **Biosystems**, 2009.

CLUNE, S.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 140, p. 766–783, 2017.

COSTANTINI, M.; LOVARELLI, D.; ORSI, L.; GANZAROLI, A.; FERRANTE, V.; FEBO, P.; GUARINO, M.; BACENETTI, J. Investigating on the environmental sustainability of animal products: The case of organic eggs. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123046, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620330912>>.

CRIPPA, M.; SOLAZZO, E.; GUIZZARDI, D.; MONFORTI-FERRARIO, F.; TUBIELLO, F.; LEIP, A. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic ghg emissions. **Nature Food**, Nature Publishing Group, v. 2, n. 3, p. 198–209, 2021.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. **Química de alimentos de Fennema**. [S.l.]: Artmed Editora, 2018.

DJEKIC, I.; MIOCINOVIC, J.; TOMASEVIC, I.; SMIGIC, N.; TOMIC, N. Environmental life-cycle assessment of various dairy products. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 64–72, 2014. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613009086>>.

ESTRADA-GONZÁLEZ, I. E.; TABOADA-GONZÁLEZ, P. A.; GUERRERO-GARCÍA-ROJAS, H.; MÁRQUEZ-BENAVIDES, L. Decreasing the environmental impact in an egg-producing farm through the application of lca and lean tools. **Applied Sciences**, v. 10, n. 4, 2020. ISSN 2076-3417.

FAO. The future of food and agriculture: Trends and challenges. **Annual Report**, FAO, Rome, v. 296, p. 1–180, 2017.

FAO. The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050. **Summary version**, FAO, Rome, 2018.

FAO. Emissions from agriculture and forest land. global, regional and country trends 1990–2019. **FAOSTAT Analytical Brief Series**, FAO, Rome, n. 25, 2021.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. **The state of food security and nutrition in the world 2021: transforming food systems for affordable healthy diets**. [S.l.]: FAO, 2021.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

GERBER, P. J.; STEINFELD, H.; HENDERSON, B.; MOTTET, A.; OPIO, C.; DIJKMAN, J.; FALCUCCI, A.; TEMPIO, G. Book. **Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities**. [S.l.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. ISBN 925107920X.

GODFRAY, C.; PRETTY, J.; THOMAS, S.; WARHAM, E.; BEDDINGTON, J. Linking policy on climate and food. **Science (New York, N.Y.)**, v. 331, p. 1013–4, 02 2011.

GONZÁLEZ, A. D.; FROSTELL, B.; CARLSSON-KANYAMA, A. Protein efficiency per unit energy and per unit greenhouse gas emissions: Potential contribution of diet choices to climate change mitigation. **Food Policy**, v. 36, n. 5, p. 562–570, 2011. ISSN 0306-9192. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030691921100090X>>.

IPCC. Climate change 2007: Mitigation. contribution of working group iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [metz, b and davidson, o.r. and bosch, p.r. and dave, r. and meyer l.a. (eds)]. 2007.

JÚNIOR, V. P. da S.; SOARES, S.; ALVARENGA, R. de. Cradle to gate study of two differing brazilian poultry production systems. **Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector**, 2008.

KWEKU, D. W.; BISMARCK, O.; MAXWELL, A.; DESMOND, K. A.; DANSO, K. B.; OTI-MENSAH, E. A.; QUACHIE, A. T.; ADORMAA, B. B. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. **Journal of Scientific research and reports**, v. 17, n. 6, p. 1–9, 2018.

LIMA, M. de; PESSOA, M.; NEVES, M.; CARVALHO, E. de. Emissões de metano por fermentação entérica e manejo de dejetos de animais. **Embrapa Meio Ambiente**, Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010., 2010.

MACIEL, V. G.; ZORTEA, R. B.; GRILLO, I. B.; UGAYA, C. M. L.; EINLOFT, S.; SEFERIN, M. Greenhouse gases assessment of soybean cultivation steps in southern brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 747–753, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616303766>>.

MCCARTY, J.; SANDEFUR, H.; MATLOCK, M.; THOMA, G.; KIM, D. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions associated with production and consumption of peanut butter in the u.s. **Transactions of the ASABE**, v. 57, p. 1741–1750, 2014.

NIJDAM, D.; ROOD, T.; WESTHOEK, H. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. **Food Policy**, v. 37, n. 6, p. 760–770, 2012. ISSN 0306-9192. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306919212000942>>.

NIKKHAH, A.; KHOJASTEHPOUR, M.; EMADI, B.; TAHERI-RAD, A.; KHORRAMDEL, S. Environmental impacts of peanut production system using life cycle assessment methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 84–90, 2015. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614013444>>.

NUNES, F. A. Avaliação do potencial de aquecimento global do arroz branco, integral, parboilizado e parboilizado integral obtidos em sistemas de cultivo mínimo e orgânico. 2015.

NUNES, F. A.; SEFERIN, M.; MACIEL, V. G.; FLÔRES, S. H.; AYUB, M. A. Z. Life cycle greenhouse gas emissions from rice production systems in brazil: A comparison between minimal tillage and organic farming. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 799–809, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616312549>>.

ONU. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>.

RAUCCI, G. S.; MOREIRA, C. S.; ALVES, P. A.; MELLO, F. F. C.; FRAZÃO, L. d. A.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Greenhouse gas assessment of brazilian soybean production: a case study of mato grosso state. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 418–425, 2015. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614002261>>.

RUVIARO, C. F.; LÉIS, C. M. de; LAMPERT, V. d. N.; BARCELLOS, J. O. J.; DEWES, H. Carbon footprint in different beef production systems on a southern brazilian farm: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 435–443, 2015. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261400050X>>.

SKUNCA, D.; TOMASEVIC, I.; NASTASIJEVIC, I.; TOMOVIC, V.; DJEKIC, I. Life cycle assessment of the chicken meat chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 440–450, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306061>>.

SONESSON, U.; DAVIS, J.; FLYSJÖ, A.; GUSTAVSSON, J.; WITTHÖFT, C. Protein quality as functional unit – a methodological framework for inclusion in life cycle assessment of food. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 470–478, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616307946>>.

SVB. Sociedade vegetariana brasileira - mercado vegano. 2018. Disponível em: <<https://www.svb.org.br/vegetarianismo1/mercado-vegetariano>>.

VRIES, M. de; BOER, I. J. M. de. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. **Livestock Science**, v. 128, n. 1, p. 1–11, 2010. ISSN 1871-1413. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871141309003692>>.

WESTHOEK, H.; ROOD, T.; BERG, M. Van den; JANSE, J.; NIJDAM, D.; REUDINK, M.; STEHFEST, E. The protein puzzle. **The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency**, v. 221, 2011.

YUE, Q.; XU, X.; HILLIER, J.; CHENG, K.; PAN, G. Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 1011–1019, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617303980>>.

ZHU, X.; IERLAND, E. C. van. Protein chains and environmental pressures: A comparison of pork and novel protein foods. **Environmental Sciences**, v. 1, n. 3, p. 254–276, 2004. ISSN 1569-3430. Doi: 10.1080/15693430412331291652. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15693430412331291652>>.