

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação do ciclo de vida de um sistema aquapônico com duas
densidades de estocagem de *Oreochromis Niloticus***

Autor: Stefano Francisco Pereira Duarte

Professor Responsável: Dr. Thiago Libório Romanelli

Disciplina: Fluxos de Energia na Agricultura

Piracicaba

2023

Avaliação do ciclo de vida de um sistema aquapônico com duas densidades de estocagem de *Oreochromis Niloticus*

RESUMO

A aquaponia é um sistema de produção sustentável que integra a produção de peixes e plantas em um regime fechado de recirculação de água. Na aquaponia, as águas residuais ricas em nutrientes da aquicultura são redirecionadas para o componente hidropônico, mitigando a necessidade de fertilizantes químicos e reduzindo os impactos ambientais associados, como esgotamento de combustíveis fósseis, aquecimento global e acidificação ambiental. No entanto, sistemas aquapônicos demandam recursos não renováveis e eletricidade para funções essenciais, como aquecimento e iluminação, contribuindo para o impacto no aquecimento global. A mitigação desses impactos requer um planejamento cuidadoso da produção. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a pegada ambiental da produção de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis Niloticus*) em um sistema aquaponia comercial em duas densidades de estocagem (3 e 9 kg m⁻³) de peixes. A densidade de estocagem é crucial para a viabilidade da aquaponia, desempenhando um papel fundamental no aumento da produção de alimentos vegetais e animais. Uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) será conduzida para aprofundar a compreensão e fundamentar discussões sobre a densidade de estocagem de peixes em sistemas aquapônicos e sua relação com a sustentabilidade. A metodologia de ACV deste estudo está fundamentada nas normas padronizadas pela ISO 14040 e 14044. Serão avaliadas as categorias de impacto, sendo o potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq), potencial de acidificação (g SO₂-eq), potencial de eutrofização (g PO₄-eq), ecotoxicidade de água doce (CTUe) e a energia demandada (MJ). A unidade funcional utilizada será de 1 kg de tilápia. Espera-se com os resultados entender a dinâmica do impacto ambiental que diferentes densidades de estocagem de tilápias podem gerar em sistemas de aquaponia de maneira a identificar e melhorar o sistema, fazendo com que a produção aquapônica seja otimizada em todos os aspectos relacionados a sustentabilidade.

Palavras-chave: ACV; Sustentabilidade; Impacto; tilápia; alface

1. Introdução

Segundo dados da FAO (2018) em 2050 a população mundial será de mais de 9,5 bilhões de pessoas. Considerando esse cenário populacional e a necessidade de produção de alimentos de origem animal e vegetal que garantam os padrões de segurança alimentar e a sustentabilidade produtiva, tem-se um enorme desafio global para a produção de alimentos que minimizem os impactos ambientais (WONGKIEW et al., 2017). Questões ambientais, sociais e econômicas estão cada vez mais presentes em sistemas de produção de organismos aquáticos. Nesse contexto, a produção de peixes assume uma posição de destaque no cenário produtivo, dada a sua importância como fonte proteica na alimentação humana e a crescente demanda observada globalmente em relação aos índices produtivos. Entretanto, é importante considerar que a produção de peixes gera resíduos que podem ser prejudiciais tanto ao desenvolvimento desses organismos quanto ao meio ambiente (ABASS et al., 2016; LENNARD, 2012).

Para melhor aproveitar esses resíduos, tem-se a aquaponia, que é a junção da piscicultura com conceitos de agricultura sustentável, que é baseada na agricultura de produção de alimentos com redução da pegada hídrica e reciclagem de nutrientes, através da conversão de resíduos em nutrientes de valor agregado (WONGKIEW et al., 2017). Trata-se de um sistema ambientalmente sustentável, em que as lacunas ecológicas da produção de peixes e plantas são minimizadas de maneira a reduzir consideravelmente a necessidade de aportes de nutrientes e produção de efluentes, além de uma enorme redução da pegada hídrica (BREITENSTEIN; HICKS, 2022; CAVALLI et al., 2021; RAKOCY, 2012).

Na aquaponia, em contraposição à descarga convencional de águas residuais que frequentemente resulta em eutrofização e hipóxia em corpos d'água, as águas residuais enriquecidas com nutrientes, provenientes da aquicultura, são redirecionadas para o componente hidropônico (WONGKIEW et al., 2017; YANG; KIM, 2020), reduzindo consideravelmente o uso de fertilizantes químicos, que apresentam um enorme potencial de impacto ambiental. Esses impactos incluem o esgotamento de combustíveis fósseis, o aquecimento global e a acidificação do meio ambiente (TORRELLAS et al., 2012). Entretanto, é essencial notar que sistemas aquapônicos demandam consideráveis quantidades recursos não renováveis e de eletricidade para funções como aquecimento, iluminação e bombeamento de água, fundamentais para o controle ambiental (BAGANZ et al., 2020; YILDIZHAN; TAKI, 2018). Esse requisito elétrico significativo pode resultar em um considerável impacto no aquecimento global (BREITENSTEIN; HICKS, 2022; CHEN et al., 2020). No entanto, é imperativo identificar e mitigar esses impactos por meio de um planejamento adequado da produção, incorporando melhores práticas de gestão e aprimorando o controle do cultivo. Assim, a viabilidade desses projetos deve considerar o uso de recursos, análise de custo-benefício e ciclo de vida (LOVE et al., 2015).

Afim de analisar o impacto ambiental de um produto ao longo de sua vida útil, é comum empregar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ISO, 2006a). A ACV é uma ferramenta empregada para avaliar os aspectos ambientais e energéticos relacionados a bens e processos ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo desde a produção até o descarte. O processo para a ACV geralmente compreende uma estrutura metodológica normatizada internacionalmente pela ISO, em que são determinadas as fases e os procedimentos gerais da execução de um estudo de ACV. De acordo com a norma ISO 14044 (ISO, 2006b) existem quatro fases de estudo para a ACV: I- Definição do objetivo e escopo; II- Análise do inventário; III- Avaliação do impacto do ciclo de vida; IV- Interpretação dos resultados. Poucos trabalhos são encontrados sobre a temática da ACV

em sistemas de aquaponia (BREITENSTEIN; HICKS, 2022; COHEN et al., 2018; WU et al., 2019), mostrando que o sistema precisa ser melhor estudado e explorado em questões produtivas e ambientais. Os estudos disponíveis mostram divergências em termos de estruturas produtivas e falta de padronização de processos, o que dificulta as análises econômicas e ambientais (Wu et al., 2019).

Uma das principais vantagens da produção de peixes em sistemas fechados, é a possibilidade da otimização da produção através do aumento da densidade de estocagem de peixes por área (STATHOPOULOU et al., 2021). Entretanto, o aumento dessa densidade de animais pode aumentar a carga de poluentes no sistema, visto que aumentaria a quantidade de alimentos fornecidos no sistema, e consequentemente a carga de resíduos fosfatados e nitrogenados (CYRINO et al., 2010). Entender a dinâmica de produção e a carga ambiental do uso de sistemas aquapônicos com diferentes cargas de produção é fundamental para que o sistema ganhe visibilidade e atenção dos produtores de todo o mundo.

Assim, com base na viabilidade da criação de tilápias-do-Nilo em diferentes densidades de estocagem, o presente estudo visa preencher essa lacuna ao realizar uma avaliação abrangente do impacto ambiental associado aos fatores de produção, proporcionando assim uma compreensão mais completa da sustentabilidade e viabilidade do sistema aquapônico, condicionado a estocagem de peixes.

2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a pegada ambiental da produção de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis Niloticus*) em um sistema aquaponia comercial em duas densidades de estocagem de peixes.

3. Material e Métodos

3.1. Área de estudo, descrição do sistema aquapônico e densidade de estocagem

O experimento será realizado nas instalações do Setor de Piscicultura da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, localizado no município de Piracicaba – SP, com altitude aproximada de 576 metros. O clima da região é do tipo Cwa na classificação de Köppen, tropical de altitude, com temperatura média anual de 21,6°C.

Para a condução experimental, foi construído um módulo comercial de aquaponia, com seis tranques para produção de peixes, com volume de 1.000 litros cada, dois reatores biológicos, uma bancada de berçário para o desenvolvimento de mudas do sistema vegetal com capacidade de 750 mudas, e três bancadas hidropônicas de crescimento das plantas do tipo NFT com capacidade de 250 plantas por bancada, uma bomba de vazão de 2,8 m³ h⁻¹ (alimentação da água na piscicultura e hidroponia, além da oxigenação do sistema), um tanque de PVC de 1000L (reservatório intermediário). O módulo comercial foi construído dentro de uma estufa agrícola modelo Zanna Leve Z (Zannata®), com dimensões de 12,8 m x 12 m, 153,6 m² de área, 3,9 m de pé direito, com coberturas fixa

de filme plástico difusor de 150 μm , telas optinet 40 mesh (laterais e frontais) e aberturas zenitais com tela optinet de 25 mesh (Figura 1).

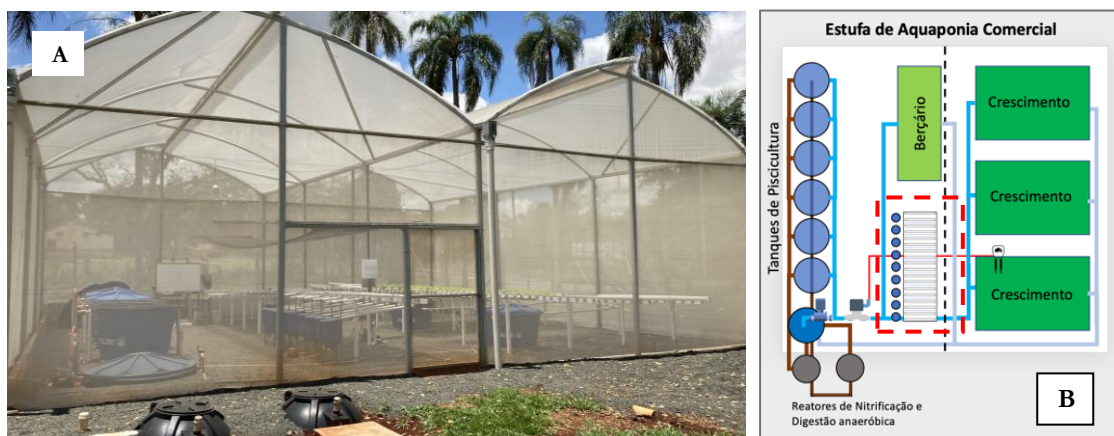


Figura 1. (A) Estufa agrícola e (B) Croqui da estufa comercial
Fonte: Própria autoria

O sistema de aquapônico possui volume total de 8 m^3 , sendo utilizados 6 m^3 para a produção de peixes e o restante varia nos reatores biológicos, caixa intermediária e sistema de hidroponia. O sistema funciona 24 horas dia^{-1} sendo que a bomba funciona com fluxo constante no mesmo período (renovação de água e oxigenação). O tanque de produção de peixes será povoado em um primeiro momento com 30 tilápias (peso inicial 0,100 kg peixe^{-1}) para a condução em baixa densidade de estocagem (3 kg m^{-3}), e 90 tilápias (peso inicial 0,100 kg peixe^{-1}) para a avaliação da alta densidade de estocagem (9 kg m^{-3}). O período das tilápias no sistema é de seis meses (ciclo de produção completo para despesca, peso 0,500 kg). Sendo assim cada experimento será realizado no intervalo de seis meses para o fechamento produtivo. Para um ciclo completo da produção de tilápias, tem-se quatro três ciclos completos da produção das alfaces, considerando um tempo médio de 40 dias ciclo^{-1} . O sistema tem capacidade de berçário e crescimento, de 750 plantas. A taxa de renovação de água dos tanques de piscicultura é de 2 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, e o fluxo de água nas bancadas hidropônicas é contínuo. Serão ofertados diariamente ração aos animais a uma taxa de arrazoamento de 3% da biomassa dos tanques. Macro e micronutrientes serão ofertadas as plantas em caso de necessidade nutricional do sistema.

Serão acompanhados os índices zootécnicos de desenvolvimento das tilápias (ganho de peso, taxa de conversão alimentar, índice de sobrevivência, taxa de crescimento específico), parâmetros de qualidade da água (pH, temperatura, amônia, nitrito, nitrato, fosfato, ferro, potássio e demais macros e micronutrientes), além de parâmetros de desempenho das alfaces (peso fresco e seco, número de folhas, comprimento das folhas e raiz).

A densidade de estocagem é um fator limitante para sistema de produção aquapônicos, sendo estas responsáveis pela viabilidade desse sistema, sendo um diferencial no aumento da produção de alimentos de origem vegetal e animal. Com o estudo (Alta e Baixa) densidade de peixes, espera-se compreender a carga ambiental gerada pela variação do kg de peixe produzido, e assim analisar os impactos que essa

carga pode gerar ao meio ambiente. Para auxiliar essa compreensão será realizada uma ACV para melhor compreender e embasar as discussões sobre a densidade de estocagem de peixes em sistemas aquapônicos e sua relação sustentável.

3.2. Análise do Ciclo de Vida (ACV)

A metodologia de ACV deste estudo está fundamentada nas normas padronizadas pela ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b), em que as quatro fases de estudo para a ACV serão realizadas, sendo consideradas a definição do objetivo e escopo, a análise do inventário, a avaliação do impacto do ciclo de vida, e a interpretação dos resultados.

3.2.1. Definição de objetivo e escopo

As especificações do modelo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) serão estabelecidas com o objetivo de avaliar a pegada ambiental relacionada à produção de tilápia-do-Nilo em um sistema aquapônico comercial, de modo a investigar o impacto de duas densidades de estocagem de peixes (Baixa ($3,00 \text{ kg m}^{-3}$) e Alta ($9,00 \text{ kg m}^{-3}$)). O sistema de produção de peixes está interligado ao sistema hidropônico de produção de alfaces, em que os resíduos da produção das tilápias são ofertados como nutrientes para a produção das alfaces. Nessas bases, será utilizado o modelo *gate-to-gate*, considerando as entradas, saídas e processos associados ao período do início ao final da produção, considerando os processos internos da instalação aquapônica (criação de peixes, materiais estufa aquapônica, água abastecimento e funcionamento do sistema, bombas, aeradores, energia elétrica, nutrientes, filtro biológico, mídias filtrantes (biobol)). Serão avaliadas cinco categorias de impacto, sendo o potencial de aquecimento global ($\text{kg CO}_2\text{-eq}$), potencial de acidificação ($\text{g SO}_2\text{-eq}$), potencial de eutrofização ($\text{g PO}_4\text{-eq}$), ecotoxicidade de água doce (CTUe) e a energia demandada (MJ). A unidade funcional utilizada será de 1 kg de tilápia, visto que é o produto de maior valor comercial do sistema. A produção vegetal (alfaces) será tratada como carga evitada, visto que serão produzidas de subprodutos (resíduos) da produção das tilápias.

3.2.2. Análise de inventário

Os limites do sistema de ACV (Figura 2) e a análise de inventário dos sistemas aquapônicos em baixa densidade de estocagem (3 kg m^{-3}) e alta densidade de estocagem (9 kg m^{-3}) da *Oreochromis niloticus* são apresentados conforme a entrada e saída de fluxos de materiais e energia (Tabela 1) do módulo aquapônico comercial estudado. Para a análise dos impactos gerados do sistema, serão utilizados cálculos de balanço de massa (Nutrientes, resíduos), base de dados da Ecoinvent® para o sistema produtivo (manutenção, energia elétrica).

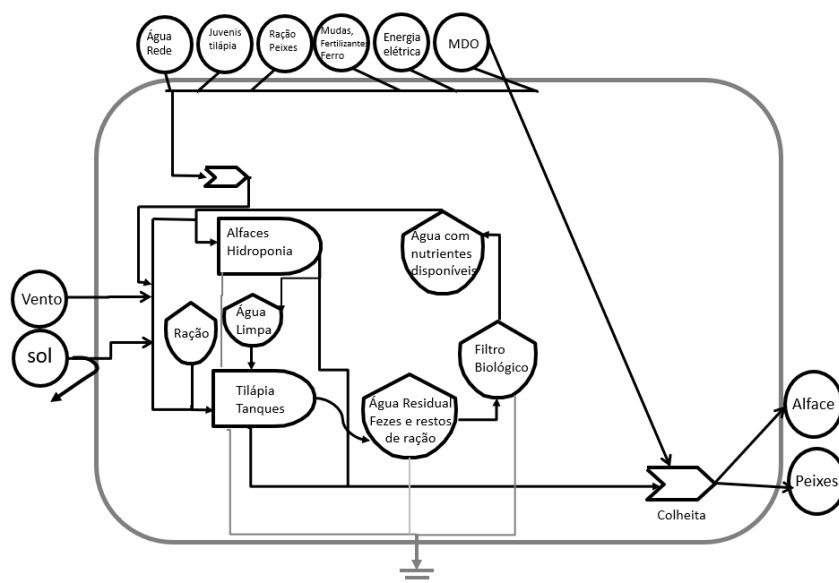


Figura 2. Diagrama do fluxo de materiais e energia do sistema aquapônico comercial

Tabela1 - Inventário do ciclo de vida da tilápia em duas densidades iniciais de estocagem de peixes e da alface produzidas em sistemas comerciais aquapônicos.

Variáveis do Sistema	Unidade	Densidade de peixes - Aquaponia	
		Baixa (3kg/m³)	Alta (9kg/m³)
Entradas			
Tilápia- do- Nilo	n	30	90
Ração para peixes	Kg	10	32,1
KH2PO4	Kg	1	1
MgSO4	Kg	0,7	0,7
Fe-ETDA	Kg	1	1
Micronutrientes	Kg	0,4	0,4
Filtro biológico/Biobol	Kg	6	6
Eletricidade	Kwh	396	396
Água tanques	m³	8	8
Água reposição	m³	6	6
Tanque, PVC	Kg	2	2
Estufa, plástico (153,6 m², uso: 120 d, tempo de vida: 15 anos)	m²	3,16	3,16
Saídas			
Nutriente liberado na água			
Amônia	g	2.0	2.9
Nitrato	Kg	1.14	1.51
Fosfato	Kg	0.31	0.39
Tilápia-do-Nilo	Kg	8,6	19,6
Alface	Kg	40,5	45

3.2.3. Avaliação de impacto

Para a avaliação do impacto do ciclo de vida da produção de tilápias em baixa e alta densidade de estocagem em sistemas de aquaponia comercial, será utilizado o software SimaPro®, em que se utilizará o método CML 2 baseline 2000 (GUINEE, 2002). Serão considerados os processos descritos no limite nas etapas anteriores e assim avaliados os impactos que as diferentes densidades de estocagem podem causar no sistema de aquaponia. Serão avaliados o potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq), potencial de acidificação (g SO₂-eq), potencial de eutrofização (g PO₄-eq), ecotoxicidade de água doce (CTUe) e a energia demandada (MJ).

3.2.4. Interpretação

A etapa de interpretação será realizada com foco na análise do perfil ambiental do sistema comercial em relação à produção de 1 kg de tilápia, em se irá identificar as etapas que apresentam piores índices de cada impacto e assim gerar eventuais planos de melhorias no sistema. Identificar os gargalos da produção e poder agir de maneira a minimizar os impactos e otimizar a produção, são aspectos fundamentais na interpretação dos resultados.

3.3. Análise estatística

Os valores médios dos parâmetros produtivos das tilápias e alfaces, além dos valores de impactos ambientais gerados, serão submetidos ao teste de comparação de médias, em cada um dos ensaios, por meio do teste t de Student, a um nível de significância de 5%. Será utilizado o software RStudio.

4. Resultados esperados

Espera-se com os resultados entender a dinâmica do impacto ambiental que diferentes densidades de estocagem de tilápias podem gerar em sistemas de aquaponia de maneira a identificar e melhorar o sistema, fazendo com que a produção aquapônica seja otimizada em todos os aspectos relacionados a sustentabilidade.

Espera-se que a produção de 1 kg de tilápias em sistema de alta densidade não cause aumento nos indicadores ambientais, visto que ao aumentar a carga de ração a tendência é aumentar o volume residual. Sabe-se na literatura que a maior carga de alimentos aumenta a carga de N e P em sistemas de piscicultura, entretanto ao se colocar a carga residual como nutrientes para as alfaces, espera-se que os índices produtivos aumentem e não gerem desequilíbrios ambientais. Além disso, espera-se para ambos os cenários, chegar em ofensores comuns, como alta demanda energética e assim, propor soluções como a utilização de outras fontes de energia.

Referências

- ABASS, O. K. et al. A novel MD-ZVI integrated approach for high arsenic groundwater decontamination and effluent immobilization. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, p. 190–203, jul. 2016.
- BAGANZ, G. et al. Profitability of multi-loop aquaponics: Year-long production data, economic scenarios and a comprehensive model case. **Aquaculture Research**, v. 51, n. 7, p. 2711–2724, 6 jul. 2020.
- BREITENSTEIN, M.; HICKS, A. Review and harmonization of the life cycle global warming impact of five United States aquaponics systems. **Aquacultural Engineering**, v. 96, p. 102224, fev. 2022.
- CAVALLI, L. S. et al. Major Sustainable Development Goals applied to Aquaculture. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 27, n. 1, p. 110–126, 14 jul. 2021.
- CHEN, P. et al. Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 122888, dez. 2020.
- COHEN, A. et al. Combined Fish and Lettuce Cultivation: An Aquaponics Life Cycle Assessment. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 551–556, 2018.
- CYRINO, J. E. P. et al. A piscicultura e o ambiente: o uso de alimentos ambientalmente corretos em piscicultura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. suppl spe, p. 68–87, jul. 2010.
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018 - Meeting the sustainable development goals. **FAO**, p. 1–227, 2018.
- GUINEE, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 5, p. 311, set. 2002.
- ISO. International Standards Organization. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework. ISO 14040. Genebra: **International Standards Organization**, 2006a.
- ISO. International Standards Organization. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. ISO 14044. Genebra: **International Standards Organization**, 2006b.
- LENNARD, W. Aquaponic system design parameters: fish to plant ratios (feeding rate ratios). **Aquaponic Solution**, v. 11, p. 1–11, 2012.
- LOVE, D. C. et al. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. **Aquaculture**, v. 435, p. 67–74, jan. 2015.
- RAKOCY, J. E. Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. Em: **Aquaculture Production Systems**. [s.l.] Wiley, 2012. p. 344–386.
- STATHOPOULOU, P. et al. Iron and Potassium Fertilization Improve Rocket Growth without Affecting Tilapia Growth and Histomorphology Characteristics in Aquaponics. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5681, 19 jun. 2021.

TORRELLAS, M. et al. LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almeria. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 7, p. 863–875, 1 ago. 2012.

WONGKIEW, S. et al. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. **Aquacultural Engineering**, v. 76, p. 9–19, jan. 2017.

WU, F. et al. Sustainable Seafood and Vegetable Production: Aquaponics as a Potential Opportunity in Urban Areas. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 15, n. 6, p. 832–843, 18 nov. 2019.

YANG, T.; KIM, H.-J. Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122619, nov. 2020.

YILDIZHAN, H.; TAKI, M. Assessment of tomato production process by cumulative exergy consumption approach in greenhouse and open field conditions: Case study of Turkey. **Energy**, v. 156, p. 401–408, ago. 2018.