

## Desempenho agrônomo de alface cultivada em sistema aquapônico sob diferentes densidades de estocagem de tilápia

### Lettuce agronomic yield in aquaponic system under different tilapia storage densities

Lucas da Silva ALVES<sup>1\*</sup>; Lucas José Coneglian BARBOSA<sup>2</sup>; Bruno Rafael de Almeida MOREIRA<sup>3</sup>; Victor Hugo CRUZ<sup>4</sup>; Leonardo Susumu TAKAHASHI<sup>5</sup>; Celso Tadao MIYASAKI<sup>6</sup>; Paulo Renato Matos LOPES<sup>7</sup>

1 Autor correspondente. Mestre em Microbiologia Agropecuária. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (Unesp). Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, CEP 14884-900, Jaboticabal, São Paulo, Brasil. lucasagro@live.com

2 Engenheiro Agrônomo. Egresso da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Dracena. lucas\_coneglian@hotmail.com

3 Mestre em Agronomia. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal. b.moreira@unesp.br

4 Engenheiro Agrônomo. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira. hugo.cruz@unesp.br

5 Doutor em Zootecnia. Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Dracena. leonardo.takahashi@unesp.br

6 Doutor em Engenharia Elétrica. Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Dracena. celso.t.miyasaki@unesp.br

7 Doutor em Ciências Biológicas. Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Dracena. prm.lopes@unesp.br

Recebido em: 30-04-2022; Aceito em: 10-05-2023

#### Resumo

A cultura da alface representa a hortaliça folhosa mais cultivada e preferida no Brasil. Todavia, há escassez de informações científicas que atestem o potencial produtivo desta cultura em sistemas aquapônicos. Portanto, objetivou-se avaliar o desempenho de variedades de alface cultivada em sistema aquapônico Nutrient Film Technique (NFT) sob diferentes densidades de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*). O experimento foi realizado em esquema fatorial 4x3, contendo três repetições, correspondente a: variedades de alface (A – Lídia, B – Elisa, C – Vanda e D – Milena) e densidades de estocagem (D1 – 30, D2 – 60 e D3 – 90 peixes m<sup>-3</sup>). Após a colheita, avaliaram-se os indicadores de desempenho agrônomo: altura de planta (AP), diâmetro de parte aérea (DPA), número de folhas (NF), massa fresca foliar (MFF) e radicular (MFR), massa seca foliar (MSF) e radicular (MSR) e produtividade (PDT). Também foram monitorados os parâmetros de água como oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), N-amoniaco (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), temperatura da água (Ta) e da casa de vegetação (ΔT). Foram aplicados aos conjuntos de dados, testes de normalidade, homocedasticidade, variância e comparações múltiplas (todos a 5% de probabilidade). As variedades lisas (Lídia e Elisa) apresentaram maiores valores de DPA e NF, conferindo uma característica relevante ao consumo in natura. As variedades crespas (Vanda e Milena) conferiram maior PDT, características relevantes para o processamento agroindustrial. A densidade de estocagem intermediária (D2) proporcionou melhor desempenho das alfaces e uma qualidade de água apropriada. Logo, concluiu-se que as variedades de alface cultivadas em sistema aquapônico apresentaram diferentes aptidões mercadológicas e que a densidade de estocagem de 60 peixes m<sup>-3</sup> proporcionou maior rendimento agrônomo às alfaces.

**Palavras-chave adicionais:** Aquaponia, Hidroponia, *Lactuca sativa*, *Oreochromis niloticus*.

#### Abstract

Lettuce is the most cultivated and preferred leafy vegetable in Brazil. However, there is a lack of scientific information attesting the productive potential of this crop in aquaponic systems. Therefore, the objective was to evaluate the performance of lettuce varieties grown in Nutrient Film Technique (NFT) aquaponic system under different stocking densities of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The experiment was carried out in a

4x3 factorial scheme, containing three replications, corresponding to lettuce varieties (A – Lídia, B – Elisa, C – Vanda, and D – Milena) and stocking densities (D1 – 30, D2 – 60, and D3 – 90 fish m<sup>-3</sup>). After harvesting, the following agronomic performance indicators were evaluated: plant height (AP), shoot diameter (DPA), number of leaves (NF), leaf fresh mass (MFF) and root fresh mass (MFR), leaf dry mass (MSF) and root dry mass (MSR), and productivity (PDT). Water parameters such as dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (EC), hydrogen potential (pH), ammoniacal N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), water temperature (Ta), and greenhouse temperature ( $\Delta T$ ) were also monitored. Tests of normality, homoscedasticity, variance and multiple comparisons (all at 5% probability) were applied to the data sets. Smooth varieties (Lídia and Elisa) had higher DPA and NF values, giving a relevant characteristic to fresh consumption. Curly varieties (Vanda and Milena) provided higher PDT, a relevant characteristic for agro-industrial processing. Intermediate stocking density (D2) provided better lettuce performance and appropriate water quality. Therefore, it was concluded that the lettuce varieties cultivated in an aquaponic system presented different marketing aptitudes and that the stocking density of 60 fish m<sup>-3</sup> provided greater lettuce agronomic yield.

**Additional keywords:** Aquaponics, Hydroponics, *Lactuca sativa*, *Oreochromis niloticus*.

## Introdução

A população mundial está cada vez mais alerta a respeito dos riscos pertinentes à qualidade de alimentos derivados de sistemas intensivos de produção, caracterizados pelo emprego abusivo de agroquímicos. Portanto, em objeção ao cenário contextualizado, surge o conceito da “Aquaponia”, caracterizado pela produção integrada de espécies vegetais e organismos aquáticos, preferencialmente olerícolas de ciclo curto e peixes de fácil cultivo, gastronomicamente apreciados e acessíveis aos consumidores (Jordan et al., 2018; Palm et al., 2018; Pinho et al., 2018).

Sistemas aquapônicos são elaborados por meio de unificação da aquicultura e hidroponia (Monsees et al., 2019) e apresentam-se como simbióticos devido à funcionalidade biodinâmica: os resíduos predominantemente nitrogenados da produção de peixes são convertidos por bactérias desnitrificantes em formas de nutrientes prontamente assimiláveis às plantas que, ao absorvê-las via sistema radicular, nutrem-se e filtram a água, mantendo as concentrações de metabólitos tóxicos aquém de limiares críticos aos peixes. Assim, permite o desenvolvimento e a produção conjunta em ambiente destituído de fatores estressores (Abbey et al., 2019; Pinho et al., 2022).

Complementarmente, o fluxo de água recirculante confere interação entre os organismos, resultando em gerenciamento eficiente dos recursos de produção (naturais e financeiros), na prevenção de impactos ambientais negativos, na derivação direta e/ou indireta de empregos e, primordialmente, na geração de alimentos sustentáveis e rastreáveis (Bosma et al., 2017; Kasozi et al., 2019; Greenfeld et al., 2021; Zhang et al., 2022). Dada essas representativas vantagens, é sensivelmente perceptível a importância dos sistemas aquapônicos para a sociedade e o meio ambiente. Em suma, o desenvolvimento e expansão desse modelo produtivo é atualmente promissor. As projeções da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura indicaram que, impulsionado pela diversificação de espécies piscícolas e pelo surgimento de sistemas produtivos mais eficientes, a expansão dos ramos da aquicultura, principalmente da aquaponia, será intensificada ao longo dos anos (FAO, 2020).

Globalmente, a maioria dos sistemas aquapônicos operam com cultivos em pequenas escalas utilizando a alface (*Lactuca sativa* L.), hortaliça economicamente rentável e com elástico sistema produtivo (Ajitama et al., 2018), e a tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus* L.), espécie piscícola de rápido desenvolvimento, resistência a doenças e tolerância a altas densidades de estocagens, cujas características lhe asseguram o posto de líder no ranking nacional de peixe mais consumido entre a população brasileira (Hernández-Naranjo et al., 2021). Além das espécies mencionadas, há estudos científicos sobre outros vegetais hidropônicos: alecrim, berinjela, cebolinha, espinafre, hortelã, manjeriço, melão, morango, pepino e tomate (Maucieri et al., 2018); e diferentes organismos aquáticos: bagre, camarão dulcícola, carpa, peixes ornamentais, robalo e truta (Estrada-Perez et al., 2018).

Sabendo que o desempenho da aquaponia é estritamente influenciado por fatores bióticos e abióticos (qualidade de água, consumo de energia elétrica, atividade microbiana de filtro biológico, produtividade vegetal etc.), a densidade de estocagem dos peixes afeta diretamente o manejo nutricional, a sobrevivência e o hábito comportamental destes animais (Ani et al., 2021; Colt & Schuur, 2021). Portanto, ajustar a quantidade de animais por volume ou área de cultivo é fundamental para otimizar o desempenho de peixes e vegetais sem comprometer a qualidade da água e os retornos econômicos associados ao sistema (Ani et al., 2022).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho agrônômico de quatro variedades de alface cultivada em sistema aquapônico Nutrient Film Technique<sup>®</sup> (NFT) sob diferentes densidades de estocagem de tilápia-do-Nilo, por meio de indicadores vegetais e de parâmetros da qualidade da água.

## Material e métodos

Inicialmente, a pesquisa foi aprovada pela Comissão de Ética em Uso de Animais da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Estadual Paulista (Protocolo CEUA-FCAT 17/2015). O experimento foi conduzido no setor de Piscicultura (FCAT/Unesp – campus de Dracena) em uma casa de vegetação com dimensões de 10 x 7 x 3 m, durante os meses de outubro a novembro de 2016. As coordenadas geográficas locais de referência são: 21°29' S e 51°52' W, a 421 m de altitude. Segundo Köppen-Geiger, o clima regional é classificado como Aw, com predominância de duas estações bem definidas: inverno seco e verão úmido.

O delineamento experimental inteiramente casualizado foi adotado em esquema fatorial 4x3 a partir de: quatro variedades de alface – *Lactuca sativa* (Lídia – A, Elisa – B, Vanda – C e Milena – D) e três densidades de estocagem de tilápia-do-Nilo - *Oreochromis niloticus* (D1 – 30, D2 – 60 e D3 – 90 peixes m<sup>-3</sup>). Cada densidade de peixes foi composta por três repetições, distribuídas aleatoriamente, totalizando nove

unidades experimentais (sistema aquapônico) com 60 plantas cada, alocadas ao acaso, sendo 15 plantas de cada uma das quatro variedades (Diem et al., 2017; Pinho et al., 2017).

Nove sistemas aquapônicos NFT (Nutrient Film Technique) foram utilizados na pesquisa (Figura 1). Cada sistema foi integrado por cinco componentes: (1) caixa d'água com capacidade volumétrica de 1000 L para viveiro dos peixes, equipada com tubulação de PVC (0,05 x 0,4 m); (2) reservatório com capacidade volumétrica de 150 L para decantação de sólidos orgânicos, provido de sistemas de abastecimento e vazão d'água, dispostos a 0,2 e 0,7 m acima do nível deste compartimento, respectivamente; (3) caixa de polietileno rígido com capacidade volumétrica de 120 L para filtração e nitrificação bacteriana, ocupada com seixo rolado; (4) reservatório com capacidade volumétrica de 150 L para recirculação da água, contendo uma bomba submersa com capacidade de adução de 1,2 m (Sarlo 650); (5) módulo hidropônico: seis perfis coextrusados (3 m), espaçados a 0,15 m, sustentados por cavaletes de metalon (1,8 x 0,9 m). Por ocasião de manutenção, efetuou-se remoção de materiais particulados dos tanques de criação e decantação, semanalmente, via sifonagem (Castillo-Castéllanos et al., 2016). Também foram alocadas acima das caixas d'água utilizadas como viveiro, telas de sombreamento termo refletoras (50%), para evitar proliferação de algas durante o período de condução experimental.



**Figura 1.** Arranjo espacial de baterias de sistema aquapônico *Nutrient Film Technique* (NFT): (1) viveiro de criação de animais aquáticos; (2) tanque de decantação de sólidos orgânicos; (3) caixa de filtração e desnitrificação bacterianas; (4) reservatório de recirculação d'água; (5) módulo hidropônico. *The spatial arrangement of the Nutrient Film Technique (NFT) aquaponics system: (1) aquatic animal nursery; (2) decantation tank for organic solids; (3) bacterial filtration and denitrification box; (4) water recirculation tank; (5) hydroponic module.*

O experimento iniciou-se com 540 juvenis de *O. niloticus*, linhagem GIFT, sexualmente revertidos para machos e aclimatados durante uma semana e com peso médio e comprimento médio corporais iniciais de  $21,97 \pm 4,96$  g e  $10,95 \pm 0,86$  cm, respectivamente. Portanto, a biomassa inicial das densidades D1, D2 e D3 em cada repetição foram  $660,23 \pm 42,31$  g,  $1.308,21 \pm 76,45$  g,  $1.977,33 \pm 124,54$  g, respectivamente. Durante a fase de cultivo, alimentaram-se os animais com ração extrusada (42% proteína bruta) fornecida diariamente na proporção de 4% de peso vivo em dois turnos: manhã (10h00) e tarde (16h00).

As mudas de alface foram adquiridas de viveiro comercial e transplantadas aos perfis aos 21 dias após a sementeira, em furos espaçados em 0,25 m. As mudas de alface foram alocadas nos sistemas na densidade de 26,67 plantas m<sup>-2</sup>. Após 28 dias do transplante, foi realizada a colheita das hortaliças e avaliados os seguintes indicadores agrônômicos: altura de planta (AP), diâmetro de parte aérea (DPA), número de folhas (NF), massa fresca foliar (MFF) e radicular (MFR), massa seca foliar (MSF) e radicular (MSR), e produtividade (PDT).

O monitoramento diário da qualidade da água a partir do potencial hidrogeniônico (pH), da temperatura (Ta) e da concentração de oxigênio dissolvido (OD) também foi realizado em dois pontos no sistema: viveiro de peixes e reservatório de recirculação (Figura 1). A amplitude térmica ( $\Delta T$ ) da casa de vegetação ao longo do cultivo também foi mensurada diariamente no momento da alimentação dos peixes (10h00 e 16h00) (Geisenhoff et al., 2016; Sreejariya et al., 2016; Jordan et al., 2018).

Aos 0, 5, 10, 15, 20 e 25 dias após a aplicação dos tratamentos (DAT) foi mensurado a condutividade elétrica da água (CE), seguindo a metodologia de Doncato & Costa (2023). Também foi coletado e avaliado os teores de N-amoniaco ( $\text{NH}_4^+$ ) da água aos 0, 14 e 28 DAT. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-VIS, de acordo com a metodologia de Zhang et al. (2022).

Ao conjunto de dados, aplicaram-se análises inferenciais, normalidade (Shapiro-Wilk), variância (Fisher) e comparações múltiplas (Tukey) ao nível de 5% de probabilidade, utilizando-se pacotes estatísticos do Software R Versão 3.3.1.

## Resultados e discussão

### Desempenho agrônomo de diferentes variedades de alfaces

Os dados distribuíram-se normalmente, conferindo segurança à interpretação da análise de variância, a qual revelou não ocorrência de rejeição de hipótese de nulidade, ao fator interação entre as causas de variação, variedade e densidade de estocagem, a todos os indicadores de rendimento agrônomo. Entretanto, ao nível de efeitos isolados, os parâmetros DPA, NF, MSR e PDT sofreram influência significativa do fator variedade de alface, enquanto MSF do fator densidade de peixes.

**Tabela 1** – Análise de variância dos efeitos de variedade de alface (*Lactuca sativa*) e densidade de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) nos indicadores de desempenho agrônomo de alface. *Analysis of variance for the effects of lettuce variety (Lactuca sativa) and stocking density of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) on lettuce agronomic performance indicators*

Fontes de variação	F <sub>calculado</sub>							
	AP	DPA	NF	MFF	MFR	MSF	MSR	PDT
Variedade (A)	1,86 <sup>ns</sup>	3,21*	82,51*	14,93*	4,80*	0,72 <sup>ns</sup>	5,21*	4,12*
Densidade (B)	0,32 <sup>ns</sup>	0,37 <sup>ns</sup>	1,12 <sup>ns</sup>	3,55*	3,62*	3,80*	2,82 <sup>ns</sup>	2,02 <sup>ns</sup>
Interação (A x B)	0,25 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,63 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	0,78 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	1,97 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>
CV (%)	18,31	13,42	17,91	26,87	27,92	35,20	21,91	35,80

AP: Altura de planta; DPA: diâmetro de parte aérea; NF: número de folhas; MFF: massa fresca foliar e MFR: radicular, MSF: massa seca foliar e MSR: radicular; PDT: produtividade. Códigos de significância: \* $p < 0,05$  e <sup>ns</sup> $p \geq 0,05$ . AP: Plant height; DPA: head diameter; NF: number of leaves; MFF: fresh mass of leaves and MFR: of roots; MSF: dry mass of leaves and MSR: of roots; and PDT: yield. Significance codes: \* $p < 0.05$  and <sup>ns</sup> $p \geq 0.05$

Complementarmente, MFF e MFR corresponderam aos únicos indicadores influenciados por ambos os fatores (Tabela 1). Os efeitos isolados dos fatores densidade de estocagem e variedade de alface nos parâmetros AP, DPA, NF e MFF são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Efeitos isolados de densidade de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) e variedade de alface (*Lactuca sativa*) na altura de planta, diâmetro de parte aérea, número de folhas e massa fresca foliar da cultura da alface cultivada em sistema aquapônico *Nutrient Film Technique* (NFT). *Isolated effects of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) stocking density and lettuce variety (*Lactuca sativa*) on plant height, head diameter, number of leaves and fresh mass of leaves of lettuce cultivated in Nutrient Film Technique (NFT) aquaponic system*

Densidades	Variedades				Efeito simples
	A – Lídia	B – Elisa	C – Vanda	D – Milena	
Altura de planta (cm)					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	25,89	26,33	24,89	24,22	25,33 a
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	27,56	27,33	25,89	24,00	26,19 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	26,22	27,67	24,44	25,22	25,86 a
Efeito simples	26,56 A	27,11 A	25,07 A	24,44 A	
Média	26,83		24,76		
Diâmetro de parte aérea (cm)					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	33,11	34,00	33,89	29,33	32,58 a
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	35,00	34,67	32,44	31,44	33,39 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	34,33	33,11	33,56	31,56	33,14 a
Efeito simples	34,15 A	33,93 AB	33,30 AB	30,78 B	
Média	34,04		32,04		
Número de folhas (folhas planta <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	28,89	30,22	18,33	18,67	24,28a
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	32,67	32,78	19,56	18,22	25,81a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	33,11	33,22	17,78	17,44	25,39a
Efeito simples	31,89 A	32,07 A	18,56 B	18,11 B	
Média	31,98		18,33		
Massa fresca foliar (g planta <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	72,89	69,39	110,67	105,81	89,69 b
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	105,33	75,01	121,59	117,49	104,86 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	81,18	76,60	111,64	102,38	92,95 ab
Efeito simples	86,47 B	73,67 B	114,63 A	108,56 A	
Média	80,07		111,60		

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, na linha, e minúsculas, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). *Means followed by the same uppercase letters in the line and lowercase letters in the column do not differ by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).*

A variedade de alface Lídia associou-se às maiores médias obtidas para DPA (34,15 cm), sendo cerca de 11% maior que a variedade Milena, diferindo estatisticamente. Ainda, a variedade Lídia destaca-se em condições adequadas de cultivos hidropônicos, aquapônicos e/ou convencionais por possuir maior vigor e folhas grossas que suportam o ataque de pragas, doenças e outras intempéries (Otto et al., 2010; Lavres et al., 2019; Casadei et al., 2020).

Ressalta-se também que a média geral obtida para DPA obtida (32,22 cm) foi 10,73% superior às plantas de alface cultivadas por Sreejariya et al. (2016) em sistema aquapônico, com densidade populacional de plantas de 16 plantas m<sup>-2</sup>. Perfis hidropônicos mais adensados tendem a originar plantas com menor valor de DPA, devido à restrição de espaço físico hábil à evolução morfológica radial da parte aérea de hortaliças folhosas (Gashaw & Haile, 2020). Portanto, esta condição não correspondeu à presente pesquisa, visto que se empregaram aproximadamente 26,67 plantas m<sup>-2</sup>, ou seja, 11 plantas a mais por m<sup>2</sup> que Sreejariya et al. (2016).

O desempenho agrônômico de *L. sativa* ainda revelou que as variedades de folhas lisas (Lídia e Elisa) superaram às crespas (Vanda e Milena) para o número de folhas (NF), com incrementos observados superiores a 77% entre Elisa e Milena. Independentemente do sistema de produção, o NF representa um dos principais parâmetros de qualidade avaliados em alface, pois agrega valor comercial ao produto (Al-Tawaha et al., 2018) e determina a aceitação dos consumidores (Vannucchi-Decicino et al., 2017). Portanto, quanto

maior o valor de NF, mais benefícios econômicos são gerados aos produtores. Nesse sentido, torna-se preferível o cultivo de variedades de folhas lisas em sistema aquapônico NFT.

Em relação à massa fresca foliar (MFF), as variedades crespas apresentaram médias estatisticamente superiores comparadas às lisas. Observou-se que, somados os grupos varietais distintos, os incrementos observados para as crespas foram 31,53 g planta<sup>-1</sup> maiores que as lisas. Este resultado inverso ao NF possivelmente se justifica devido ao efeito de diluição da biomassa e nutrientes ocorrido aos vegetais, que induz um mecanismo de compensação para a alface (Sosa et al., 2012; Hu et al., 2022).

No contexto geral, as variedades crespas cultivadas exibiram médias de MFF (111,60 g planta<sup>-1</sup>) consideravelmente acima dos rendimentos em outros sistemas aquapônicos obtidos por Effendi et al. (2017) (59,67 g planta<sup>-1</sup>), Pinho et al. (2017) (52,10 g planta<sup>-1</sup>) e Abbey et al. (2019) (107,13 g planta<sup>-1</sup>). Apresentar maior MFF é uma característica desejável para a agroindústria, pois resulta em maior eficiência do processamento com menor aquisição de plantas (Brzezinski et al., 2017). Portanto, o sistema aquapônico com o cultivo de alfaces crespas sob as condições experimentais descritas sugerem uma maior aptidão ao mercado agroindustrial.

Em relação à densidade de estocagem intermediária (D<sub>2</sub>), notou-se que a presença de 60 peixes m<sup>-3</sup> proporcionou as maiores médias de MFF para as plantas. Esse valor é superior cerca de 16% à D<sub>1</sub> e não difere estatisticamente de D<sub>3</sub>. Rayhan et al. (2018), avaliando diferentes densidades de tilápia-do-Nilo em sistema aquapônico integrado com espinafre, também obtiveram melhores resultados com uma biomassa inicial intermediária (aproximadamente 0,96 kg m<sup>-3</sup>), biomassa inicial semelhante à densidade D<sub>2</sub> deste trabalho (1,3 kg m<sup>-3</sup>).

Logo, acredita-se que a oxigenação da água foi relevante para não se obter maiores incrementos de MFF na maior densidade de animais (D<sub>3</sub>), pois se trata do principal fator ambiental que afeta a qualidade de água nestes sistemas produtivos (Ren et al., 2018). Contudo, investimentos para otimizar a oxigenação da água são elevados e podem prejudicar a rentabilidade financeira de pequenos produtores (Bosma et al., 2017).

Os efeitos isolados dos fatores densidade de estocagem de peixes e variedade de hortaliças para os parâmetros MFR, MSF, MSR e PDT são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Efeitos isolados de densidade de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) e variedades de alface (*Lactuca sativa*) na massa fresca radicular, massa seca foliar e radicular, e produtividade da cultura da alface cultivada em sistema aquapônico *Nutrient Film Technique* (NFT). *Isolated effects of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) stocking density and lettuce variety (*Lactuca sativa*) on root fresh mass, leaf and root dry mass, and yield of lettuce cultivated in Nutrient Film Technique (NFT) aquaponic system*

Densidades	Variedades				Efeito simples
	A – Lídia	B – Elisa	C – Vanda	D – Milena	
Massa fresca radicular (g planta <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	22,87	23,72	24,32	19,98	22,72 b
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	31,74	28,59	25,39	22,47	27,05 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	28,83	25,54	22,71	20,49	24,39 ab
Efeito simples	27,81 A	25,95 A	24,14 AB	20,98 B	
Média	26,88		22,56		
Massa seca foliar (g planta <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	5,09	5,23	6,43	6,65	5,85 b
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	7,94	6,13	7,06	7,37	7,12 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	5,98	5,90	6,08	5,59	5,89 b
Efeito simples	6,34 A	5,75 A	6,52 A	6,53 A	
Média	6,04		6,53		
Massa seca radicular (g planta <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	3,09	3,28	2,98	3,04	3,10 a
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	3,38	4,04	2,73	3,47	3,40 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	4,09	3,60	3,08	3,13	3,48 a
Efeito simples	3,52 A	3,64 A	2,93 B	3,21 AB	
Média	3,58		3,07		
Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )					
D <sub>1</sub> – 30 peixes m <sup>-3</sup>	26,02	25,28	36,69	36,00	31,00 a
D <sub>2</sub> – 60 peixes m <sup>-3</sup>	38,32	28,88	39,48	39,17	36,46 a
D <sub>3</sub> – 90 peixes m <sup>-3</sup>	29,91	28,65	36,54	34,56	32,42 a
Efeito simples	31,42 AB	27,61 B	37,57 A	36,58 A	
Média	29,52		37,08		

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, na linha, e minúsculas, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). *Means followed by the same uppercase letters in the line and lowercase letters in the column do not differ by Tukey's test ( $p < 0.05$ ).*

Quanto à massa fresca radicular (MFR), as variedades lisas Lídia e Elisa apresentaram médias estatisticamente superiores comparadas à Milena. Somadas, o grupo Lisa foi 28% superior à variedade Milena para esta característica. A variedade crespa Vanda apresentou valor de MFR intermediário (24,14 g planta<sup>-1</sup>), não diferindo das demais variedades. Efeito similar também foi observado para a variável massa seca radicular (MSR), visto que as variedades lisas apresentaram as maiores médias (3,58 g planta<sup>-1</sup>), com significância estatística em relação à variedade Vanda.

Valores superiores de MFR e MSR indicam uma maior superfície de contato estabelecida entre raízes funcionais e solução nutritiva, possibilitando às plantas efetividade em absorção de água e nutrientes, além de maior filtração biológica de metabólitos tóxicos aos peixes (Pattillo, 2017). Entretanto, sistemas radiculares volumosos podem ser prejudiciais à plena funcionalidade da aquaponia, pois obstruem os perfis hidropônicos internamente e inviabilizam o fluxo d'água (Pattillo, 2017). Ainda quanto à MFR, a densidade de estocagem intermediária (D2) proporcionou significativo acúmulo em relação à D1, mas não diferente à D3.

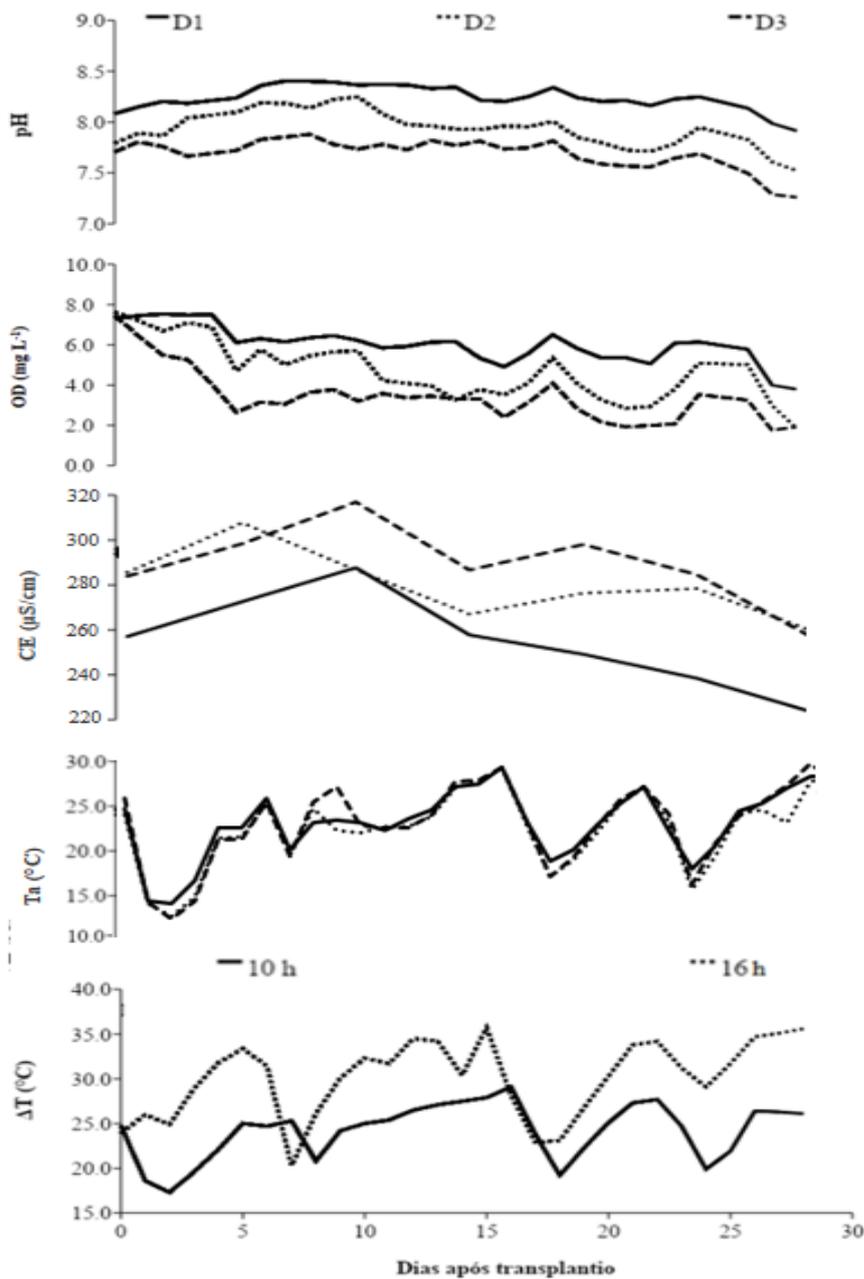
Os valores obtidos de MSF também indicaram que a presença de 60 peixes m<sup>-3</sup> (D2) foi mais favorável ao acúmulo de biomassa seca em folhas de plantas de alface com resultados 21,7% e 20,8% maiores que D1 e D3, respectivamente. Comparativamente, Pinho et al. (2017) relataram MSF correspondente a 1,95 g por planta, valor consideravelmente inferior à média geral das variedades cultivadas nesta pesquisa (6,28 g planta<sup>-1</sup>).

Por fim, a produtividade (PDT) das variedades Vanda e Milena exibiram rendimentos estatisticamente superiores comparadas à Elisa. A variedade Lídia apresentou-se com resultados de PDT intermediários, na

ordem de 31,42 t ha<sup>-1</sup>. Em média, as variedades exibiram valores de produtividade entre 20,00 e 39,90 t ha<sup>-1</sup>, corroborando com os resultados obtidos por Jordan et al. (2018). Esses autores cultivaram *L. sativa* cv. Pira Verde, pertencente ao grupo das alfaces crespas, em sistema aquapônico com densidade de estocagem de tilápia-do-Nilo correspondente a 100 peixes m<sup>-3</sup>.

PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

A evolução dos parâmetros de qualidade de água, isto é, pH, OD, CE e temperatura da água e da casa de vegetação ( $\Delta T$ ) são apresentadas na Figura 2.



**Figura 2.** Evolução diária dos parâmetros de qualidade de água: pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), temperatura da água (Ta) e amplitude térmica ( $\Delta T$ ) da casa de vegetação, ao longo do período efetivo do cultivo de alface (*Lactuca sativa*) em sistema aquapônico *Nutrient Film Technique* (NFT) sob densidades de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Daily evolution of water quality parameters: pH, dissolved oxygen (OD), electrical conductivity (CE), water temperature (Ta), and thermal amplitude ( $\Delta T$ ) of the greenhouse throughout the effective period of lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation in*

*Nutrient Film Technique (NFT) aquaponic system under stocking densities of Nile tilapia (Oreochromis niloticus).*

Notou-se que, independentemente da densidade de estocagem de peixes, a água do sistema aquapônico NFT apresentou-se levemente alcalina, ocorrendo decréscimos no pH ao longo do ciclo de experimentação. A presença de menor quantidade de peixes em D<sub>1</sub> (30 peixes m<sup>-3</sup>) exibiu níveis de pH um pouco superior em relação à D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> (60 e 90 peixes m<sup>-3</sup>, respectivamente). No entanto, o comportamento desta variável foi relativamente padronizado durante o período. Respectivamente, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> apresentaram médias de pH iguais a 8,24, 7,94 e 7,69, indicando relação direta entre a densidade de estocagem e a acidificação de água. Valores médios de pH semelhantes (entre 7,5 e 8,5) também foram obtidos em outras pesquisas em sistemas aquapônicos (Sreejariya et al., 2016; Diem et al., 2017; Pinho et al., 2018; Zhang et al., 2022).

Atribuiu-se a acidificação da água à geração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a partir da respiração dos peixes e à síntese de íons de hidrogênio (H<sup>+</sup>) pela oxidação bacteriana de amônia (NH<sub>3</sub>) a nitrato e nitrito, cujos processos influenciam na redução de pH (Effendi et al., 2017). O pH é determinante à sustentabilidade de sistemas aquapônicos, pois peixes e bactérias preferem valores de pH alcalinos (7,00 a 9,00). Contudo, a maioria das espécies vegetais se desenvolvem melhor em ambientes ligeiramente ácidos (5,80 a 6,80). Por esse motivo, recomenda-se a seleção de componentes, animal e vegetal, que exijam índices de pH próximos, a fim de facilitar o manejo da aquaponia (Castillo-Castéllanos et al., 2016).

Salienta-se também que valores de pH superiores a 8,00 podem comprometer o desempenho vegetal em função da toxicidade da amônia, da deficiência de outros minerais, das anomalias fisiológicas e do declínio no seu rendimento agrônomico (Heise et al., 2021). Baseado neste pressuposto, constatou-se que a menor densidade de estocagem (D<sub>1</sub>) apresentou média de pH acima do limite desejado ao cultivo de vegetais aquapônicos, enquanto D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> culminaram em valores aceitáveis e, conseqüentemente, no benefício de uma maior densidade de estocagem para o sistema aquapônico.

Relativo ao oxigênio dissolvido (Figura 2), observou-se que a água com a menor quantidade de peixes (D<sub>1</sub>) obteve OD acima dos sistemas com estocagens maiores. Em média, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> exibiram OD iguais a 6,02, 4,72 e 3,44 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Este resultado indicou que, quanto maior a densidade de tilápias-do-Nilo, é mais acentuado o declínio de oxigênio dissolvido. Como já citado anteriormente, o oxigênio dissolvido é a principal característica na qualidade da água em sistemas aquapônicos (Ren et al., 2018), e a demanda financeira para obtenção de melhores valores de OD pode inviabilizar o processo a pequenos produtores (Bosma et al., 2017). Porém, salienta-se que concentrações próximas a 5,00 mg L<sup>-1</sup> são suficientes para um bom funcionamento do sistema aquapônico na manutenção do componente vegetal e no desenvolvimento dos peixes (Rakocy, 2007; Moya et al., 2014). Logo, por oferecer maior rendimento agrônomico que D<sub>1</sub>, sem causar grande prejuízo com formação de metabólitos tóxicos como D<sub>3</sub>, a densidade intermediária de estocagem de tilápias (D<sub>2</sub>) seria a mais indicada para este modelo de produção aquapônica.

A evolução da condutividade elétrica (CE) (Figura 2) demonstra que durante a maior parte do cultivo experimental, as densidades D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> se mantiveram com valores médios superiores a D<sub>1</sub>. O maior valor de CE foi observado para D<sub>1</sub> e D<sub>3</sub> aos 10 DAT (288,3 e 319,8 μS cm<sup>-1</sup>, respectivamente), e para D<sub>2</sub> aos 5 DAT (312,6 μS cm<sup>-1</sup>). A CE é uma das medidas utilizadas para mensurar o equilíbrio osmótico para os peixes (Yanes et al., 2020) e avaliar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Oliveira et al., 2010). A CE na solução aquapônica comumente se encontra baixa (<1.000 μS cm<sup>-1</sup>) (Yanes et al., 2020) e a literatura sugere, para o cultivo de plantas, CE entre 1.000 e 3.000 μS cm<sup>-1</sup> (Wortman, 2015). Portanto, considera-se que as densidades D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> são mais adequadas para fornecer nutrientes para o componente vegetal no sistema aquapônico.

Em relação à temperatura da água (Ta) e temperatura atmosférica da casa de vegetação (ΔT), observa-se que a água possui menor variação térmica, porém, correlaciona com a temperatura do ambiente (Figura 2). Aos 2 DAT foram verificados os menores valores de Ta (12,4 °C) e ΔT (17,3 °C). As maiores temperaturas foram verificadas aos 12 DAT, com valores máximos de 29,3 °C para Ta e 35,7 °C para ΔT.

Ressalta-se que avaliar a temperatura da água e do ambiente em sistemas aquapônicos, é tão importante quanto monitorar parâmetros de qualidade de água, pois a ocorrência de variações bruscas induz os componentes animal e vegetal à redução ou perda total de apetite e estresse comportamental, e baixo saldo de fotossíntese líquida, respectivamente, dentre outros efeitos antagônicos mais severos, como a mortalidade (O'Gorman et al., 2016; Ahmed et al., 2020).

De acordo com Effendi et al. (2017), valores de temperatura da água entre 25,0 e 30,0 °C são desejáveis ao cultivo de tilápia-do-Nilo, pois conferem adequado conforto térmico aos animais, permitindo-lhes atingir máximo potencial produtivo a 28,0 °C. Em relação à alface, esta cultura é recomendada para agroecossistemas com predominância de temperaturas atmosféricas amenas (20,0 a 25,0 °C); entretanto, é capaz de produzir, satisfatoriamente, em ambientes com mínima de 15,0 °C e máxima de 30,0 °C (Resende et al., 2017).

Falovo et al. (2009) ainda revelaram que, mesmo em ambientes quentes, é possível obter satisfatória produtividade de alface em cultivo aquapônico, pois o contato ininterrupto entre sistema radicular e fluxo de água ameniza efeitos ambientais adversos, condição que não ocorre para o cultivo convencional. Portanto, com base nestes valores, constatou-se que, ao decorrer da condução experimental, o ambiente de produção exibiu  $T_a$  e  $\Delta T$  adequadas ao cultivo integrado de tilápia-do-Nilo e alface.

Os valores de N-amoniaco aos 0, 14 e 28 DAT são apresentados na Tabela 4. Observa-se que os teores de N-amoniaco foram significativos para as fontes de variação Densidade e Tempo, além da significância para a interação dos fatores (Tabela 4).

**Tabela 4** – Efeitos isolados de densidade de estocagem de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) para os teores de N-amoniaco da água ( $\text{mg L}^{-1}$ ) em sistema aquapônico Nutrient Film Technique (NFT). *Isolated effects of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) stocking density on water N-ammoniacal content ( $\text{mg L}^{-1}$ ) in Nutrient Film Technique (NFT) aquaponic system*

Densidades	Tempo (DAT)			Efeito simples
	0	14	28	
	N-amoniaco ( $\text{mg L}^{-1}$ )			
D <sub>1</sub> – 30 peixes $\text{m}^{-3}$	0,078 a	0,086 ab	0,090 b	0,082 b
D <sub>2</sub> – 60 peixes $\text{m}^{-3}$	0,080 a	0,073 b	0,093 b	0,084 b
D <sub>3</sub> – 90 peixes $\text{m}^{-3}$	0,073 Ca	0,106 Ba	0,140 Aa	0,106 a
Efeito simples	0,076 B	0,088 B	0,107 A	
Fontes de variação	F calculado			
Densidade (A)	7,22*			
Tempo (B)	9,70*			
Densidade x Tempo (A x B)	3,46*			
C.V. (%)	16,56			

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, na linha, e minúsculas na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Códigos de significância: \* ( $p < 0,05$ ) e <sup>ns</sup> ( $p \geq 0,05$ ). *Means followed by the same uppercase letters in the line and lowercase letters in the column do not differ by Tukey's test ( $p < 0.05$ ). Significance codes: \* ( $p < 0.05$ ) and <sup>ns</sup> ( $p \geq 0.05$ )*

Em sistemas aquapônicos, diversas formas de nitrogênio são transformadas por meio de processos bioquímicos, incluso a forma de N-amoniaco ( $\text{NH}_4^+$ ) (Wongkiew et al., 2017). Nota-se que, para efeitos simples, a densidade D<sub>3</sub> apresentou o maior teor médio de N-amoniaco ( $0,106 \text{ mg L}^{-1}$ ), valor médio cerca de 25% mais elevado que a menor densidade de estocagem (D<sub>1</sub>) (Tabela 4). Ressalta-se também que os teores de N-amoniaco aos 28 DAT ( $0,107 \text{ mg L}^{-1}$ ) foram os superiores aos valores obtidos aos 0 e 14 DAT ( $0,076$  e  $0,088 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente).

O monitoramento de N-amoniaco é importante pois elevados teores de  $\text{NH}_4^+$  podem ser tóxicos para os peixes, ocasionando prejuízos e mortalidade dos animais (Effendi et al., 2017). Para que a água tenha uma boa qualidade, recomenda-se que os teores de N-amoniaco se mantenham abaixo de  $0,100 \text{ mg L}^{-1}$  (Lima et al., 2013). Considerando os níveis mais elevados obtidos pelo maior adensamento de peixes em um período de 28 dias, pondera-se que D<sub>3</sub> possui a pior qualidade de água no cultivo.

Sistemas aquapônicos com alta taxa de adensamento de peixes tendem a ser vulneráveis a bruscas variações dos principais parâmetros de qualidade de água, tais como pH, OD e N-amoniaco (Zhang et al., 2022). Foram observados aumentos contínuos significativos para D<sub>3</sub> aos 0, 14 e 28 DAT. O contrário se faz verdadeiro para D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>, que não apresentaram diferenças significativas ao tempo para efeitos desdobrados (Tabela 4).

## Conclusões

As variedades lisas de alface (*Lactuca sativa*), Lídia e Elisa, apresentaram maior diâmetro de parte aérea e produziram maiores quantidades de folhas por planta, enquanto as variedades crespas Vanda e Milena exibiram maiores produtividades.

A densidade de estocagem inicial de tilápia-do-Nilo de 60 peixes  $\text{m}^{-3}$  (biomassa de  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$ ) proporcionou maior rendimento agrônomico às variedades de alface no sistema conjunto de produção.

Em relação aos parâmetros de qualidade da água no sistema aquapônico, o aumento na densidade de tilápia-do-Nilo piora as condições para o bom desenvolvimento de peixes e plantas.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) pela concessão de suporte financeiro à pesquisa.

## Referências

- Abbey M, Anderson NO, Yue C, Schermann M, Phelps N, Venturelli P, Vickers Z (2019) Lettuce (*Lactuca sativa*) production in northern latitudinal aquaponic growing conditions. *HortScience* 54(10):1757-1761. doi: 10.21273/HORTSCI14088-19
- Ahmed HA, Yu-Xin T, Qi-Chang Y (2020) Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: a review. *South African Journal of Botany* 130:75-89. doi: 10.1016/j.sajb.2019.12.018
- Ajitama P, Effendi H, Hariyadi S (2018) Usage of fisheries rearing waste for butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) cultivation in recirculation. *Nature Environment and Pollution Technology* 17(1):145-151.
- Al-Tawaha AR, Al-Karaki G, Al-Tawaha AR, Sirajuddin SN, Makhadmeh I, Wahab PEM, Youssef RA, Al Sultan W, Massadeh, A (2018) Effect of water flow rate on quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in nutrient film technique (NFT) under hydroponics conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 24:793-800.
- Ani JS, Manyala JO, Masese FO, Fitzsimmons K (2022) Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*). *Aquaculture and Fisheries* 7(3):328-335. doi: 10.1016/j.aaf.2021.03.002
- Ani JS, Masese FO, Manyala JO, Fitzsimmons K (2021) Assessment of the performance of aquaponics and its uptake for integrated fish and plant farming in Sub-Saharan Africa. *Africa Environmental Review Journal* 4(2):123-138.
- Bosma RH, Lacambra L, Landstra Y, Perini C, Poulie J, Schwaner MJ, Yin Y (2017) The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering* 78:146-154. doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.07.002
- Brzezinski CR, Abati J, Geller A, Werner F, Zucareli C (2017) Production of cultivars of iceberg lettuce under two cropping systems. *Revista Ceres*, 64(1), 83-89. doi: 10.1590/0034-737x201764010012
- Casadei E, Bacha AL, Rodrigues JS, Santos RT, Alves PLCA, Filho ABC (2020) Redroot pigweed interference with lettuce crop. *Planta Daninha* 38:e020222945. doi: 10.1590/s0100-83582020380100058
- Castillo-Castéllanos D, Leal-Zavala I, Ruiz-Velasco JMJ, Radilla-Garcia A, Nieto-Navarro JT, Romero-Bañuelos CA, González-Hernández J (2016) Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International* 24:637-646. doi: 10.1007/s10499-015-9954-z
- Colt J, Schuur AM (2021) Comparison of nutrient costs from fish feeds and inorganic fertilizers for aquaponics systems. *Aquacultural Engineering* 95:102205-102214. doi: 10.1016/j.aquaeng.2021.102205
- Diem TNT, Konnerup D, Brix H (2017) Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. *Aquacultural Engineering* 78:95-104. doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.05.002
- Doncato KB, Costa CSB (2023) Macronutrients of brown and green water types of bft systems may behave differently during recirculation in saline aquaponics. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 66: e23210542. doi: 10.1590/1678-4324-2023210542
- Effendi H, Wahyuningsih S, Wardiatno Y (2017) The use of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) in water recirculation system. *Applied Water Science* 7(6):3055-3063. doi: 10.1007/s13201-016-0418-z

- Estrada-Perez N, Hernandez-Llamas A, Ruiz-Velazco JMJ, Zavala-Leal I, Romero-Bañuelos CA, Cruz-Crespo E, Juárez-Rossete C, Domínguez-Ojeda D, Campos-Mendoza A (2018) Stochastic modelling of aquaponic production of tilapia (*Oreochromis niloticus*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*). *Aquaculture Research* 49(12):3723-3734. doi: 10.1111/are.13840
- Falovo C, Rouphael Y, Rea E, Battistelli A, Colla G (2009) Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *Acephala* in floating raft culture. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89(10):1682-1689. doi: 10.1002/jsfa.3641
- Gashaw B, Haile S (2020) Effect of different rates of N and intrarow spacing on growth performance of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Gurage Zone, Wolkite University, Ethiopia. *Advances in Agriculture* 2020:7364578-7364583. doi: 10.1155/2020/7364578
- Geisenhoff LO, Jordan RA, Santos RC, Oliveira FCD, Gomes EP (2016) Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Engenharia Agrícola* 36(2):291-299. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p291-299/2016
- Greenfeld A, Becker N, Bornman JF, Angel DL (2021) Identifying potential adopters of aquaponic farming. *Journal of Environmental Planning and Management* 1(1):1-19.
- Heise J, Müller H, Probst AJ, Meckenstock RU (2021) Ammonium Removal in Aquaponics Indicates Participation of *Comammox Nitrospira*. *Current Microbiology* 78:894-903. doi: 10.1007/s00284-021-02358-3
- Hernández-Naranjo R, Neri-Ramírez E, Astudillo-Sánchez C, Delgado-Martínez R, Rivera-Ortíz P, Vázquez-Sauceda M (2021) Producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigada con efluentes de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico, *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 8:69-76.
- Hu J, Jia W, Wu X, Zhang H, Wang Y, Liu J, Yang Y, Tao S, Wang X (2022) Carbon dots can strongly promote the photosynthesis in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environmental Science:Nano*. doi: 10.1039/D1EN00948F
- Jordan RA, Geisenhoff LO, Oliveira FC, Santos RC, Martins EAS (2018) Yield of Lettuce grown in aquaponic system using different substrates. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental* 22(1):27-31. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p27-31
- Kasozzi N, Tandlich R, Fick M, Kaiser H, Wilhelmi B (2019) Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Reports* 15:100221-100230. doi: 10.1016/j.aqrep.2019.100221
- Lavres J, Rabêlo FHS, Capaldi FR, Reis AR, Rossi ML, Franco MR, Azevedo RA, Abreu-Júnior CH, Nogueira NL (2019) Investigation into the relationship among Cd bioaccumulation, nutrient composition, ultrastructural changes and antioxidative metabolism in lettuce genotypes under Cd stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 170:578-589. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.033
- Lima AF, Silva AP, Rodrigues APO, Bergamin G, Torati L, Pedroza Filho MX, Maciel P (2013) Qualidade da água: piscicultura familiar. *Embrapa Pesca e Aquicultura-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)*.
- Maucieri C, Nicoletto C, Junge R, Schmutz Z, Sambo P, Borin M. (2018) Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1-11. doi: 10.4081/ija.2017.1012
- Monsees H, Suhl J, Paul M, Kloas W, Dannehl D, Würtz S (2019) Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLOS ONE* 14(6):e0218368- e0218390. doi: 10.1371/journal.pone.0218368
- Moya EAE, Sahagún CAA, Carrillo JM, Alpuche PJA, Álvarez-González CA, Martínez-Yáñez R (2014) Herbaceous plants as part of biological filter for aquaponics system. *Aquaculture Research* 47:1716-1726. doi: 10.1111/are.12626

- O'Gorman EJ, Ólafsson ÓP, Demars BO, Friberg N, Guðbergsson G, Hannesdóttir ER, Jackson MC, Johansson LS, Mclaughlin OB, Olafsson JS, Woodward G, Gíslason GM (2016) Temperature effects on fish production across a natural thermal gradient. *Global Change Biology* 22:3206-3220. doi: 10.1111/gcb.13233
- Oliveira RPC, Silva PC, Brito PP, Gomes JP, Silva RF, Silveira Filho PR, Roque R.S. (2010) Variáveis hidrológicas físico-químicas na criação da tilápia-do-nilo no sistema raceway com diferentes renovações de água. *Ciência Animal Brasileira*, 11(3):482-487. doi: 10.5216/cab.v11i3.3847
- Otto RF, Reghin MY, Niesing PC, Rezende BLA (2010) Yield response of lettuce under protect cultivation with no woven films. *Bragantia* 69:855-860. doi: 10.1590/S0006-87052010000400010
- Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam JM, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International* 26(3):813-842. doi: 10.1007/s10499-018-0249-z
- Pattillo DA (2017) An overview of aquaponic systems: hydroponic components. *NCRAC Technical Bulletins* 123:1-10.
- Pinho SM, Flores RMV, David LH, Emerenciano MGC, Quagrainie KK, Portella MC (2022) Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems. *Aquaculture* 552:737987-737994. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.737987
- Pinho SM, Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MGC (2018) Integrated production of fish (pacu *Piaractus mesopotamicus* and red tilapia *Oreochromis* sp.) with two varieties of garnish (scallion and parsley) in aquaponics system. *Aquaculture International* 26(1):99-112. doi: 10.1007/s10499-017-0198-y
- Pinho SM, Molinari D, Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MGC (2017) Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering* 103:146-153. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.03.009
- Rakocy JE (2007) Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J* 46: 14-17.
- Rayhan MZ, Rahman MA, Hossain MA, Akter T, Akter T. (2018) Effect of stocking density on growth performance of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) with Indian spinach (*Basella alba*) in a recirculating aquaponic system. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 3(2): 239073. doi: 10.22161/ijeab/3.2.5
- Ren Q, Zhang L, Wei Y, Li D (2018) A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system. *Computers and electronics in agriculture* 151:384-391. doi: 10.1016/j.compag.2018.06.013
- Resende GM, Costa ND, Yuri JE, Mota JH (2017) Adaptação de genótipos de alface crespa em condições semiáridas. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 11(1):1145 - 1154. doi: 10.7127/rbai.v11n100553
- Sosa A, Padilla J, Ortiz J, Etchevers JD (2012) Biomass accumulation and its relationship with the demand and concentration of nitrogen, phosphorus, and potassium in lettuce. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43:121-133. doi: 10.1080/00103624.2012.634695
- Sreejariya P, Raynaud T, Dabbadie L, Yakupitiyage A (2016) Effect of water recirculation duration and shading on lettuce (*Lactuca sativa*) growth and leaf nitrate content in a commercial aquaponic system. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 16(2):311-319. doi: 10.4194/1303-2712-v16\_2\_11
- The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: FAO, 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9229en>> (Acesso em 25 fev 2022).
- Vannucchi-Decicino M, Sala FC, Ferreira MD, Spoto MHF, Verruma-Bernardi MR (2017) Physical-chemical analysis and preference of Rubinela and Pira Roxa lettuces. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais* 19:241-245.

Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, Lee JW, Khanal SK (2017) Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquacultural Engineering* 76:9-19. doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.01.004

Wortman SE (2015) Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 194:34-42. doi: 10.1016/j.scienta.2015.07.045

Yanes AR, Martinez P, Ahmad R (2020) Towards automated aquaponics: a review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production*, 263:121571. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121571

Zhang Y, Zhang Y, Li Z (2022) A new and improved aquaponics system model for food production patterns for urban architecture. *Journal of Cleaner Production* 342:130867-130878. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130867