



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PESCA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PESCA**

**DANIELE FERREIRA MARQUES**

**UTILIZAÇÃO DE UM GERADOR DE BOLHAS ULTRAFINAS PARA**  
**OXIGENAÇÃO DE TANQUES DE CRIAÇÃO DE TILÁPIA DO NILO EM SISTEMA**  
**AQUAPÔNICO**

**FORTALEZA**  
**2022**

DANIELE FERREIRA MARQUES

UTILIZAÇÃO DE UM GERADOR DE BOLHAS ULTRAFINAS PARA OXIGENAÇÃO  
DE TANQUES DE CRIAÇÃO DE TILÁPIA DO NILO EM SISTEMA AQUAPÔNICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Pesca. Área de concentração: Aquicultura.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Carminda Sandra Brito Salmito-Vanderley.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M316u Marques, Daniele Ferreira.

Utilização de um gerador de bolhas ultrafinas para oxigenação de tanques de criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico / Daniele Ferreira Marques. – 2022.  
124 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Carminda Sandra Brito Salmito-Vanderley .

1. sistema de recirculação aquícola (SRA). 2. nanobolhas. 3. cavitação hidráulica. 4. *Oreochromis niloticus*. 5. *Lactuca sativa*. I. Título.

CDD 639.2

---

DANIELE FERREIRA MARQUES

UTILIZAÇÃO DE UM GERADOR DE BOLHAS ULTRAFINAS PARA OXIGENAÇÃO  
DE TANQUES DE CRIAÇÃO DE TILÁPIA DO NILO EM SISTEMA AQUAPÔNICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Pesca. Área de concentração: Aquicultura.

Aprovada em: 28/06/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Carminda Sandra Brito Salmito-Vanderley (Orientadora)  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

---

Prof. Dr. Aldeney Andrade Soares Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antonio Glaydson Lima Moreira  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) –  
*Campus Morada Nova*

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Célia Maria de Souza Sampaio  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

---

Prof. Dr. José William Alves da Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus*  
Aracati

Aos meus pais, Celso e Izeuda.

À minha filha Isis.

Ao meu marido Oscar.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Izeuda Marques e Celso Ferreira Marques, por tudo o que propiciaram a mim até hoje. Especialmente minha mãe, por cuidar da minha filha em todo o percurso desse doutorado e por ser meu pedacinho de Deus aqui na Terra.

Ao meu marido, Oscar Pacheco Passos Neto, por ser a pessoa que me incentiva e que tem procurado construir, nesses quase 15 anos de companheirismo, o meu desenvolvimento pessoal e profissional. E por todo apoio e tempo dedicado na realização de todas as etapas desta pesquisa.

À minha filha, Isis Marques Passos, que mesmo tão pequena compreendeu meus momentos de ausência nessa caminhada.

À minha orientadora, professora Carminda Sandra Brito Salmito-Vanderley, pela disponibilidade em me acolher em um momento de dificuldade e por toda paciência e compreensão com as minhas falhas.

Ao meu orientador, professor Manuel Antonio de Andrade Furtado Neto (*in memoriam*), pelas boas lembranças e ensinamentos.

Aos membros da banca de avaliação pela disponibilidade e tempo dedicado à correção deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

Aos idealizadores do gerador de bolhas ultrafinas, Manuel Pereira da Costa e Walber Cordeiro, pela parceria e oportunidade de usar o equipamento em pesquisas na Estação de Aquicultura da UFC.

Aos estagiários da Estação de Aquicultura por toda ajuda prestada na realização desta pesquisa, em especial: Jennifer Cacau, Rissette Pinheiro e Willame Quaresma.

Às alunas da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Ana Luíza Rocha e Janaína Carvalho, por todo o apoio prestado durante a realização da parte experimental deste trabalho.

À GUABI, na figura de Diego Wesley, pelo fornecimento da ração utilizada no experimento.

Ao colega Roberto Lima, pela presteza na realização das análises de qualidade de água e por sempre ser solícito nos momentos de tirar minhas dúvidas.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Pesca, professor Bartolomeu Warlene Silva de Souza, pela condução humana do seu cargo

e por sempre ser solícito e atencioso. E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste doutorado e desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Carry on, carry on and make our dreams  
come true...” (GAMMA RAY, 2015).

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de um gerador de bolhas ultrafinas para oxigenação de tanques de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico. A presente pesquisa foi desenvolvida na Estação de Aquicultura da Universidade Federal do Ceará e contou com a realização de duas etapas experimentais: 1) teste de saturação da água com oxigênio dissolvido (OD); 2) aplicação da tecnologia de bolhas ultrafinas para oxigenação de tanques de criação da tilápia do Nilo em sistema aquapônico. A primeira etapa experimental foi realizada em um tanque de 2 m<sup>3</sup>. Inicialmente a água foi completamente desoxigenada utilizando-se sulfito de sódio e cloreto de cobalto como catalizador. Após a concentração de OD atingir 0,0 mg/L, o sistema gerador de bolhas ultrafinas foi acionado e o teste de saturação iniciado com a medição dos valores de OD e de temperatura a cada minuto durante um intervalo de 60 minutos. A segunda etapa foi desenvolvida em uma unidade experimental composta por dois sistemas aquapônicos independentes. Cada sistema aquapônico foi composto por três tanques de 2 m<sup>3</sup>, um decantador de 500 L, um reator biológico de 500 L, uma torre desgaseificadora, um filtro mecânico pressurizado e quatro calhas hidropônicas. A um dos sistemas foi conectado um gerador de bolhas ultrafinas de oxigênio (tratamento BUF), enquanto que ao outro foi fornecida aeração convencional (tratamento AC). Em cada tanque foram estocadas 54 tilápias do Nilo com peso médio inicial de, aproximadamente, 60 ± 13,5 g e para cada calha hidropônica foram transplantadas entre 27 e 30 mudas de alface (*Lactuca sativa*). Após o acionamento do gerador de bolhas ultrafinas, na etapa 1, foram necessários 21 min para que a concentração OD na água atingisse 7,85 mg/L (100% de saturação). Ao final dos 60 min de teste a concentração de OD atingiu um valor de 21,8 mg/L (277,52%). Ao longo de todo o período experimental da etapa 2, foi observada diferença significativa (p<0,05) entre as concentrações de OD nos tratamentos BUF e AC. As maiores médias de OD em ambos os tratamentos foram observadas no período da manhã com 14,4 ± 3,1 mg/L para BUF e 7,5 ± 0,5 mg/L para AC. Dentre os parâmetros de desempenho zootécnicos avaliados, apenas o fator de condição alométrico apresentou diferença significativa (p<0,05) entre as tratamentos BUF e AC, 1,19 ± 0,11 e 1,12 ± 0,10, respectivamente. Foi observada diferença significativa

( $p < 0,05$ ) para a maior parte dos parâmetros de desempenho fitotécnico da alface, com o tratamento BUF apresentando maiores valores em quase todas as análises realizadas. Desta forma, pode-se concluir que o gerador de bolhas ultrafinas de oxigênio: 1) foi eficiente em elevar a concentração de OD em ambas as etapas experimentais; 2) não resultou em melhora significativa no desempenho zootécnico da tilápia; e 3) resultou em melhora significativa do desempenho fitotécnico da alface.

**Palavras-chave:** sistema de recirculação aquícola (SRA); nanobolhas; cavitação hidráulica; *Oreochromis niloticus*; *Lactuca sativa*.

## ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the use of an ultrafine bubble generator for oxygenation of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture tanks in an aquaponic system. The present research was carried out at the Estação de Aquicultura of the Universidade Federal do Ceará and was divided in 2 experiments: 1) water saturation test with dissolved oxygen (DO); 2) application of ultrafine bubble technology in the Nile tilapia culture in an aquaponic system. The first experiment was carried out in a 2 m<sup>3</sup> tank. Initially the water was completely deoxygenated using sodium sulfite and cobalt chloride as a catalyst. After the DO concentration reached 0.0 mg/L, the ultrafine bubble generator system was activated and the saturation test started with the measurement of DO and temperature values once every minute for an interval of 60 minutes. The second experiment was carried out in an experimental unit composed of two independent aquaponic systems. Each aquaponic system consisted of three 2 m<sup>3</sup> tanks, a 500 L clarifier, a 500 L biological reactor, a degassing tower, a pressurized mechanical filter and four hydroponic chutes. An ultrafine oxygen bubble generator (BUF treatment) was connected to one of the systems, while conventional aeration (AC treatment) was provided to the other. In each tank, 54 Nile tilapia were stored, with an average initial weight of approximately 60 ± 13,5 g, and about 27-30 lettuce (*Lactuca sativa*) seedlings were transplanted to each hydroponic chute. After starting the ultrafine bubble generator in experiment 1, it took 21 min for the OD concentration in the water to reach 7.85 mg/L (100% saturation). At the end of the 60 min test, the DO concentration reached a value of 21.8 mg/L (277.52%). Throughout the entire experimental period in experiment 2, a significant difference (p<0.05) was observed between the DO concentrations in the BUF and AC treatments. The highest DO means in both treatments were observed in the morning with 14.4 ± 3.1 mg/L for BUF and 7.5 ± 0.5 mg/L for AC. Among the zootechnical performance parameters evaluated, only the allometric condition factor showed a significant difference (p<0.05) between BUF and AC treatments, 1.19 ± 0.11 and 1.12 ± 0.10, respectively. A significant difference (p<0.05) was observed for most of the phytotechnical performance parameters of lettuce with the BUF treatment presenting higher values in almost all analyzes performed. Thus, it can be concluded that the ultrafine oxygen bubble generator: 1) was efficient in increasing the DO concentration in both experiments; 2) did not result

in a significant improvement in the zootechnical performance of tilapia; and 3) resulted in a significant improvement in the phytotechnical performance of lettuce.

**Keywords:** recirculating aquaculture system (RAS); nanobubbles; hydraulic cavitation; *Oreochromis niloticus*; *Lactuca sativa*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Representação esquemática das unidades que compõem um sistema de recirculação aquícola (SRA) .....	28
Figura 2	– Layout básico de um sistema aquapônico com diferentes arranjos dos componentes do sistema .....	36
Figura 3	– Exemplar da alface ( <i>L. sativa</i> ) crespa BRS Leila .....	42
Figura 4	– Categorização de bolhas com base nos diferentes tamanhos e propriedades .....	48
Figura 5	– Esquema dos três tipos de ocorrência de NBs .....	49
Figura 6	– Solução aquosa de aspecto leitoso provocado pela presença de microbolhas originadas no processo de produção de nanobolhas por cavitação hidráulica .....	52
Figura 7	– Vista aérea da Estação de Aquicultura da Universidade Federal do Ceará - <i>Campus do Pici</i> .....	54
Figura 8	– Sistema gerador de bolhas ultrafinas por cisalhamento mecânico e cavitação hidráulica utilizado nos experimentos 1 e 2 da presente pesquisa .....	55
Figura 9	– Mangueira porosa utilizada na aeração convencional dos tanques de criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico .....	56
Figura 10	– Tanques de criação de tilápia do Nilo ( <i>O. niloticus</i> ). A: aeração convencional por mangueiras porosas (AC) e B: oxigenação por bolhas ultrafinas (BUF) .....	57
Figura 11	– Unidades utilizadas no sistema aquapônico. A: reator com mídias biológicas utilizado em ambos sistemas (AC e BUF) e B: caixa receptora com água supersaturada de oxigênio (BUF) .....	57
Figura 12	– Calhas do componente hidropônico com estruturas para suporte das alfaces ( <i>Lactuca sativa</i> ) .....	58

Figura 13 – Vista lateral do sistema aquapônico coberto com tela do tipo sombrite .....	59
Figura 14 – Representação esquemática do sistema aquapônico utilizado na presente pesquisa evidenciando as circulações de água .....	59
Figura 15 – Aferição do comprimento total de um exemplar de tilápia do Nilo ( <i>O. niloticus</i> ) utilizando paquímetro durante a realização de biometria .....	61
Figura 16 – A: sementes de alface ( <i>L. sativa</i> ) semeadas em espuma fenólica e B: estufa de germinação .....	63
Figura 17 – Plântulas de alface ( <i>L. sativa</i> ) crespa cultivar BRS Leila fixas em espuma fenólica .....	64
Figura 18 – Calhas hidropônicas utilizadas no sistema aquapônico, com detalhe da plântula acoplada à copo plástico .....	64
Figura 19 – A: determinação do diâmetro da cabeça (cm) e B: medição da massa fresca total – MFT (g) de um exemplar de alface ( <i>L. sativa</i> ) ...	65
Figura 20 – Aumento da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo durante o teste de saturação de oxigênio .....	68
Figura 21 – Observação do efeito Tyndall. À esquerda: água com BUF e a dispersão do feixe laser, sendo possível observar o seu trajeto. À direita: água sem BUF e sem o espalhamento do feixe laser .....	70
Figura 22 – Valores médios semanais de oxigênio dissolvido no período da manhã e da tarde (OD manhã e OD tarde, respectivamente) e temperatura no período da manhã e da tarde, da água do sistema de criação de tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) em sistema aquapônico com alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) .....	78
Figura 23 – Valores médios semanais de salinidade, potencial hidrogeniônico (pH), dureza total, alcalinidade, dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), nitrogênio amoniacal total (NAT) e nitrito da água do sistema de	

criação de criação tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) em sistema aquapônico com alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) .....	78
Figura 24 – Flotação de sólidos dissolvidos e particulados observada no sistema com a utilização de bolhas ultrafinas de oxigênio .....	82
Figura 25 – Valores médios semanais de condutividade, cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ) e nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) da água do sistema de criação de criação de tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) em sistema aquapônico com alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) .....	83
Figura 26 – Acompanhamento do desenvolvimento de um exemplar de alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) cultivada com tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF). DAS: dias após semeadura. A: folhas e B: raiz .....	92
Figura 27 – Peso médio e comprimento total ao longo das biometrias da tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) criada em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) .....	95
Figura 28 – Curva da relação comprimento x peso para tilápia do Nilo ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) criadas em sistema aquapônico com alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ...	97

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens, desvantagens e absorção de nutrientes nos diferentes componentes hidropônicos utilizados em aquaponia .....	37
Quadro 2 – Espécies vegetais produzidas em aquaponia .....	38
Quadro 3 – Nutrientes essenciais requeridos para o ótimo crescimento vegetal. Elementos entre parênteses são nutrientes limitantes na aquaponia .....	40
Quadro 4 – As dez hortaliças mais produzidas no Brasil .....	41
Quadro 5 – Espécies de água doce e marinhas utilizadas em aquaponia .....	44
Quadro 6 – Criação de tilápia e culturas vegetais em aquaponia .....	46

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do oxigênio dissolvido no período da manhã e da tarde (OD manhã e OD tarde, respectivamente) e temperatura no período da manhã e da tarde (Temp. manhã e Temp. tarde, respectivamente) da água do sistema de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ... 72
- Tabela 2 – Valores médios (média  $\pm$  sd) de salinidade, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade (Alc.), dureza total (DT), nitrogênio amoniacal total (NAT) e nitrito da água do sistema de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ..... 76
- Tabela 3 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do diâmetro da cabeça (D), da altura da parte aérea (AA), da massa fresca total (MFT), da massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do caule, do número de folhas (NF), da massa seca total (MST), da massa seca da parte aérea (MSPA), da massa seca da raiz (MSR), da massa seca das folhas (MSF) e massa seca do caule (MSC) da alface (*Lactuca sativa*) cultivada com tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ..... 89
- Tabela 4 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do peso médio inicial (PMi), do comprimento total inicial (CTi), do peso médio final (PMf), do comprimento total final (CTf), do ganho de peso médio diário (GPMD), da biomassa inicial (BMi), da biomassa final (BMf), da densidade de estocagem inicial (DEi), da densidade de estocagem final (DEf), do ganho de biomassa (GBM), da taxa de crescimento

específico (TCE), da sobrevivência (S), do fator de conversão alimentar (FCA) e do fator de condição alométrico (Kn) para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criadas em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ..... 96

Tabela 5 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do peso médio corporal (PM), do comprimento corporal total (CT), do peso das vísceras totais (VT), do peso do fígado (PF), do comprimento do intestino (CI), do índice víscero-somático (IVS), do índice hepato-somático (IHS) e do quociente intestinal (QI) para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criadas em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC) ..... 98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Alc.	Alcalinidade
AA	Altura da parte aérea
AC	Aeração convencional
b	Coeficiente de alometria
BMi	Biomassa inicial
BMf	Biomassa final
BOA	Bactérias oxidantes de amônia
BON	Bactérias oxidantes de nitrito
BUF	Bolhas ultrafinas
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CE	Condutividade elétrica
CEUAP	Comissão de Ética no Uso de Animais de Produção
CI	Comprimento do intestino
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CoCl <sub>2</sub>	Cloreto de cobalto
CT	Comprimento total
CTi	Comprimento total inicial
CTf	Comprimento total final
Cu	Cobre
D	Diâmetro da cabeça
DEP	Departamento de Engenharia de Pesca
DAS	Dias após semeadura
DEi	Densidade de estocagem inicial
DEf	Densidade de estocagem final
DT	Dureza total
EDDHA	Ácido etilenodiamino – di [(orto-hidroxifenil) acético]
et al.	E outros
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations

FCA	Fator de conversão alimentar
Fe	Ferro
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de ferro
GIFT	Genetic Improvement of Farmed Tilapia
GBM	Ganho de biomassa
GPMD	Ganho de peso médio diário
H	Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
IHS	Índice hepatossomático
IVS	Índice víscero somático
Kn	Fator de condição alométrico
ln	Logaritmo natural
MFF	Massa fresca das folhas
MFPA	Massa fresca da parte aérea
MFR	Massa fresca da raiz
MFT	Massa fresca total
MSC	Massa seca do caule
MSF	Massa seca das folhas
MSPA	Massa seca da parte aérea
MSR	Massa seca da raiz
MgCO <sub>3</sub>	Carbonato de magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NBs	Nanobolhas
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Sulfito de sódio
NAT	Nitrogênio amoniacal total
NF	Número de folhas
NFT	Nutrient Film Technique
NH <sub>3</sub>	amônia
NH <sub>4</sub>	Íon amônio
NH <sub>4</sub> Cl	Cloreto de amônio

O <sub>2</sub>	Oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
PF	Peso do fígado
pH	Potencial hidrogeniônico
PM	Peso médio corporal
PMi	Peso médio inicial
PMf	Peso médio final
PVC	Policloreto de vinila
QI	Quociente intestinal
RAS	Recirculating aquaculture system
S	Sobrevivência
SOFIA	The State of World Fisheries and Aquaculture
SRA	Sistema de recirculação aquícola
TCE	Taxa de crescimento específico
Temp.	Temperatura
UFC	Universidade Federal do Ceará
UVI	University of the Virgin Islands
VT	Vísceras totais

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
mg/L	Miligrama por litro
L	Litro
nm	Nanômetro
L/h	Litro por hora
Kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
μm	Micrómetro
m	Metro
cv	Cavalo vapor
g	Gramma
cm	Centímetro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
ppt	Partes por mil
psi	Libra por polegada quadrada
μS/cm	Micro siemens por centímetro
Σ	Somatório

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Aquicultura</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>Sistemas de Recirculação Aquícola (SRA)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Remoção de sólidos em SRA</i></b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Compostos nitrogenados e reator biológico em SRA</i></b> .....	<b>31</b>
<b>2.3</b>	<b>Aquaponia</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Breve histórico</i></b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>Design do sistema aquapônico</i></b> .....	<b>35</b>
<b>2.3.3</b>	<b><i>Subsistemas hidropônico</i></b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.4</b>	<b><i>Seleção de plantas e requisitos de crescimento vegetal</i></b> .....	<b>38</b>
<b>2.3.4.1</b>	<b><i>Alface</i></b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.5</b>	<b><i>Seleção de espécies animais</i></b> .....	<b>43</b>
<b>2.3.5.1</b>	<b><i>Tilápia do Nilo</i></b> .....	<b>45</b>
<b>2.4</b>	<b>Bolhas ultrafinas</b> .....	<b>47</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Definição e classificação de bolha</i></b> .....	<b>47</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Evidências da existência</i></b> .....	<b>50</b>
<b>2.4.3</b>	<b><i>Geração de nanobolhas</i></b> .....	<b>50</b>
<b>2.4.4</b>	<b><i>Aplicações</i></b> .....	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1</b>	<b>Local de realização dos experimentos</b> .....	<b>54</b>
<b>3.2</b>	<b>Experimento 1 – Teste de saturação da água com oxigênio dissolvido</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3</b>	<b>Experimento 2 – Aplicação da tecnologia de produção de bolhas ultrafinas na criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico</b> .....	<b>56</b>

<b>3.3.1</b>	<b><i>Descrição do sistema aquapônico</i></b> .....	56
<b>3.3.2</b>	<b><i>Tilápia no Nilo (Oreochromis niloticus)</i></b> .....	60
3.3.2.1	<i>Parâmetros de desempenho zootécnico e índices viscerais</i> .....	61
<b>3.3.3</b>	<b><i>Alface (Lactuca sativa)</i></b> .....	63
3.3.3.1	<i>Parâmetros de desempenho fitotécnico</i> .....	65
<b>3.3.4</b>	<b><i>Qualidade da água</i></b> .....	66
<b>3.3.5</b>	<b><i>Análise estatística dos dados</i></b> .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	68
<b>4.1</b>	<b>Experimento 1 – Teste de saturação da água com oxigênio dissolvido</b> .....	68
<b>4.2</b>	<b>Experimento 2 – Aplicação da tecnologia de produção de bolhas ultrafinas na criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico</b> .....	70
<b>4.2.1</b>	<b>Qualidade da água</b> .....	70
4.2.1.2	<i>Requisitos de crescimento vegetal</i> .....	82
<b>4.2.2</b>	<b><i>Desempenho fitotécnico da alface (Lactuca sativa)</i></b> .....	89
<b>4.2.3</b>	<b><i>Parâmetros de desempenho zootécnico e índices viscerais da tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus)</i></b> .....	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	103
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	104

## 1 INTRODUÇÃO

A aquicultura pode ser definida como a criação de organismos aquáticos, incluindo peixes, moluscos, crustáceos e outros invertebrados, como equinodermos, ascídias, poliquetas, além de plantas aquáticas, répteis e anfíbios. Cultivar organismos aquáticos implica alguma forma de intervenção que vise à otimização da produção tais como, estocagens regulares, alimentação, monitoramento e manutenção da qualidade da água, proteção contra predadores etc. O cultivo também envolve a propriedade individual ou corporativa da unidade populacional a ser cultivada (FAO, 1998).

Os métodos tradicionais de produção utilizados na aquicultura se caracterizam, basicamente, por realizarem monocultivos em sistemas abertos, sem reuso da água e com descarte de efluentes ricos em nutrientes, sem tratamento adequado (BOYD, 2003). Estes métodos ou sistemas de produção não são considerados sustentáveis e tendem a causar vários impactos no ambiente (NAYLOR *et al.*, 2000). Embora seja difícil produzir sem provocar alterações ambientais, pode-se reduzir o impacto sobre o meio ambiente, de modo que não haja esgotamento ou comprometimento negativo de qualquer recurso natural, nem alterações significativas na estrutura do ecossistema (VALENTI, 2000). Nesse contexto, a aquicultura tem o desafio de desenvolver sistemas inovadores que otimizem a produção e aperfeiçoem o uso dos recursos, sendo a produção integrada de alimentos um modelo que atende esses requisitos (BOYD *et al.*, 2020).

Segundo Valenti (2002) os sistemas integrados são mais sustentáveis, pois otimizam o uso dos recursos naturais, realizando o cultivo de espécies com diferentes nichos ecológicos e permitindo a transformação de poluentes em biomassa de valor econômico. Dentre os sistemas integrados, a aquaponia surge como uma tecnologia promissora na produção de alimentos (KÖNIG *et al.*, 2018). A aquaponia pode ser definida como um sistema multitrófico integrado, que combina os elementos dos sistemas de recirculação em aquicultura com a hidroponia, onde a água proveniente do cultivo de peixes é utilizada para o desenvolvimento dos vegetais (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006).

A aquaponia moderna têm como base de funcionamento os sistemas de recirculação de água. Estes sistemas permitem que a maior parte da água seja reciclada por meio da utilização de tecnologias de tratamento (VAN RIJN, 2013). No

processo de reutilização da água em um sistema aquapônico, os nutrientes oriundos do cultivo dos peixes se acumulam em concentrações semelhantes às encontradas nas soluções nutritivas hidropônicas, sendo aproveitados por culturas secundárias que tenham valor econômico (GODDEK *et al.*, 2015). Diversas espécies de peixes e vegetais têm sido cultivadas em sistemas aquapônicos, entretanto, a tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) e a alface (*Lactuca sativa*) são as mais comumente utilizadas e bem-sucedidas (HAGER *et al.*, 2021; SOMERVILLE *et al.*, 2014). O sucesso da tilápia na aquaponia está relacionado a uma série de características, tais como: rápido crescimento, boa conversão alimentar, rusticidade ao manejo, adaptação à diferentes condições de qualidade de água, dentre outros (DANNER *et al.*, 2019; KUBTIZA, 2011). Já a alface por ser produzida em um curto período, ter relativamente menos problemas com pragas e doenças, ter grande parte da biomassa colhida comestível e alta produtividade, sendo uma excelente opção para produção em sistemas aquapônicos (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006).

Seja qual for o modelo de produção adotado é de fundamental importância a manutenção dos parâmetros de qualidade da água em limites aceitáveis, uma vez que proporciona condições ideais para o desenvolvimento, manutenção da boa saúde e sobrevivência dos animais (COLT, 2006). Dentre os parâmetros de qualidade de água a serem monitorados na aquicultura podemos citar: alcalinidade, dureza total, pH, amônia, nitrito e oxigênio dissolvido.

O oxigênio dissolvido (OD) pode ser considerado um dos fatores mais importantes na aquicultura. Em sistemas que utilizam recirculação de água este é geralmente o primeiro fator que limita a capacidade de carga (BADIOLA *et al.*, 2018). Na aquaponia, o OD é essencial aos três organismos que estão envolvidos no sistema: peixes, vegetais e bactérias nitrificantes (ESPINAL; MATULIĆ, 2019). Dessa forma, níveis adequados de OD na água permitem tanto condições adequadas de desenvolvimento das espécies produzidas, como mantém o pleno funcionamento do sistema de produção.

O oxigênio dissolvido pode ser incorporado na água de diversas formas, sendo por meio de oxigenação ou aeração mecânica (BOYD, 1998; TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009). Os métodos tradicionais de aeração (aeradores de pás, circuladores verticais e sistemas de ar difuso) são limitados em termos de quantidade de oxigênio dissolvido que podem incorporar na água. Além de utilizarem o ar atmosférico como fonte de oxigênio, as bolhas de ar geradas por estes sistemas

não apresentam elevada estabilidade e dissolução, o que impede que altas concentrações de OD sejam atingidas na água (TAKAHASHI; CHIBA; LI, 2007; TEMESGEN *et al.*, 2017; THI PHAN *et al.*, 2020).

Um método inovador de incorporação de oxigênio na água é por meio da utilização de bolhas ultrafinas. Estas bolhas apresentam tamanho nanométrico e possuem várias propriedades físico-químicas e mecânicas notáveis, tais como elevado tempo de residência e estabilidade (UCHIDA *et al.*, 2011; USHIKUBO *et al.*, 2010), grande área específica e maior solubilidade de gases na água (AGARWAL; NG; LIU, 2011; AHMED *et al.*, 2018a; TAKAHASHI *et al.*, 2003). Estas características têm ampliado o número de aplicações das bolhas ultrafinas em diversos campos da ciência e tecnologia: no tratamento de água (ATKINSON *et al.*, 2019; AZEVEDO; ETCHEPARE; RUBIO, 2017), na aceleração do metabolismo de animais e vegetais (DAHRAZMA *et al.*, 2019; EBINA *et al.*, 2013; IJIMA *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2013), na aquicultura, (GUNANTI; WULANSARI; KINZELLA, 2019; JHUNKEAW *et al.*, 2021; KURITA; CHIBA; KIJIMA, 2017), dentre outros.

Estudos mostram que o uso da tecnologia de bolhas ultrafinas é capaz de aumentar rapidamente a concentração de OD na água, além de melhorar o desempenho de peixes e camarões cultivados, e acelerar o metabolismo de vegetais (EBINA *et al.*, 2013; JAINONTEE *et al.*, 2019; MAHASRI *et al.*, 2018; RAHMAWATI *et al.*, 2021). Os resultados das pesquisas sugerem que as bolhas ultrafinas têm grande potencial de uso nos segmentos da aquicultura, contribuindo para a melhoria da qualidade da água de cultivo e aumentando a produtividade dos sistemas aquícolas por meio do aumento na densidade de estocagem dos indivíduos.

A aplicação da tecnologia de bolhas ultrafinas na aquicultura vem emergindo rapidamente ao redor do mundo. No Brasil, entretanto, não foram encontrados estudos publicados sobre a utilização de bolhas ultrafinas em sistemas aquícolas. Aplicar as propriedades notáveis destas bolhas na produção integrada de peixes e vegetais (aquaponia) poderia impulsionar a aquicultura nacional, inovando o método de produção, gerando renda e segurança alimentar.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de um gerador de bolhas ultrafinas, de fabricação própria, para oxigenação de tanques de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico. Especificamente: a) realizar um teste de saturação da água com oxigênio dissolvido, sob condição anóxica, utilizando o gerador de bolhas ultrafinas; b) comparar a incorporação de

oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas com aeração convencional em um sistema aquapônico; c) analisar o desempenho zootécnico e os índices viscerais da tilápia do Nilo criada sob as diferentes formas de incorporação de oxigênio e; d) determinar o desenvolvimento fitotécnico de cultivares de alfaces aquapônicas sob as diferentes formas de incorporação de oxigênio.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Aquicultura

A demanda mundial por pescado vem crescendo de forma acelerada nos últimos anos, não só pelo fato do aumento populacional, mas também em decorrência da busca por alimentos mais saudáveis. O pescado é uma excelente fonte de proteína animal, e de outros nutrientes essenciais, que contribui para a segurança alimentar em numerosas regiões. É por meio da aquicultura que o fornecimento dessa proteína de qualidade vem sendo assegurado às populações ao redor do mundo (FAO, 2022).

A aquicultura, desde a estagnação da produção pesqueira no final da década de 80, tem sido a responsável pelo contínuo crescimento no fornecimento de pescado para consumo humano. Esta atividade continua a crescer mais rapidamente do que outros setores de produção de alimentos, apresentando média de crescimento anual de 4,6% no período de 2010 a 2020 (FAO, 2022). De acordo com o documento intitulado “*The State of World Fisheries and Aquaculture – SOFIA*”, a produção aquícola mundial no ano de 2020 foi de 87,5 milhões de toneladas. Desse total, a aquicultura continental produziu 54,4 milhões de toneladas, representando 62,2% do total global da aquicultura (FAO, 2022).

Para atender à crescente demanda por peixes, a produção aquícola global precisará aumentar para 109 milhões de toneladas em 2030 (FAO 2018) e 140 milhões de toneladas em 2050 (WAITE *et al.*, 2014). Essa expansão pode ter efeitos ambientais prejudiciais, como destruição de habitats, poluição e eutrofização de corpos hídricos, dentre outros efeitos ecológicos (AHMED; THOMPSON; GLASER, 2019). Assim, a aplicação de novas técnicas visando à manutenção da qualidade da água, a sustentabilidade do cultivo e a preservação de recursos hídricos, levando-se em consideração a rentabilidade, torna-se necessária para o desenvolvimento responsável da aquicultura (FERRI; ROCHA; FILHO, 2018).

Sistemas aquícolas sustentáveis são aqueles que permitem a máxima produção por volume com o mínimo impacto ambiental negativo e menor uso de recursos (VAN RIJN, 2013). Nesse sentido, nos últimos anos, observou-se um aumento no número de pesquisas com foco em sistemas fechados de produção, que demandam baixo volume de água e minimizam o descarte de efluentes. Como exemplo, temos os sistemas de recirculação aquícola (SRA) e associado a esta



Várias são as vantagens reportadas pelos pesquisadores (BREGNBALLE, 2015; DAVIDSON *et al.*, 2016; EBELING; TIMMONS, 2012; SHARRER *et al.*, 2010) na utilização dos SRA:

- a) Ambiente de cultivo otimizado para atender as necessidades das espécies produzidas, permitindo o acompanhamento mais preciso das taxas de crescimento e previsões mais seguras de despescas;
- b) Maior biossegurança e controle de doenças;
- c) Maior produtividade por área e redução significativa da necessidade de captação de água;
- d) Maior controle sobre a população cultivada, evitando fugas de espécies exóticas, por exemplo;
- e) Possibilidade de agregação de valor por meio do cultivo de outras espécies, como por exemplo vegetais (aquaponia), que fazem a recuperação do nitrogênio;
- f) Possibilidade de aproximação da produção aquícola aos centros consumidores, pois é possível fazer a instalação dos SRA em várias localidades;
- g) É considerado como um dos métodos mais sustentáveis de produção de peixes;
- h) Geração de efluente mais concentrado e em menor volume, que podem ser efetivamente tratados para minimizar a poluição.

Apesar das inúmeras vantagens e da projeção mundial para as próximas décadas ser de um grande aumento da produção de pescados por meio dos SRA, no Brasil, esse processo deverá ser aplicado mais lentamente, principalmente pela dificuldade de competir com os custos de implementação e operação dos modelos tradicionais. Entretanto, a medida em que a aquicultura se torna um processo mais industrializado, competitivo e padronizado a produção em sistemas fechados com recirculação de água será mais difundida e empregada (SHEI, 2016).

Nos sistemas de recirculação aquícola a qualidade da água pode ser controlada para criar ambientes desejados ao cultivo dos organismos aquáticos, ao invés do ambiente definir quais animais podem ser produzidos. Várias espécies já são cultivadas em sistemas com recirculação de água, tais como trutas, tilápias, bagres, salmão, enguias, linguados, camarão, dentre outras (CALONE *et al.*, 2019; DALSGAARD *et al.*, 2013; FIMBRES-ACEDO *et al.*, 2019; SUANTIKA *et al.*, 2018).

Seja qual for a espécie produzida, os principais desafios nos SRA estão associados ao acúmulo de sólidos e de compostos nitrogenados no sistema.

### **2.2.1 Remoção de sólidos em SRA**

Os resíduos sólidos produzidos nos sistemas aquícolas são provenientes principalmente de ração não consumida e matéria fecal (AKINWOLE; DAUDA; OLOLADE, 2016). Esses resíduos influenciam na eficiência de todos os outros processos unitários do sistema de recirculação. Eles são uma importante fonte de demanda de oxigênio e entrada de nutrientes na água, podendo afetar diretamente a saúde dos animais dentro dos sistemas de recirculação. Dessa forma, os sólidos precisam ser removidos do ambiente de cultivo o mais rápido possível (EBELING; TIMMONS, 2012; LOSORDO; MASSER; RAKOCY, 1999; PFEIFFER; OSBORN; DAVIS, 2008).

Os sólidos são geralmente classificados em três categorias: sólidos sedimentáveis, em suspensão e dissolvidos. Em sistemas de recirculação, os dois primeiros são a principal preocupação (DALSGAARD; PEDERSEN, 2011). Enquanto os sólidos sedimentáveis decantam em um curto período de tempo e são facilmente removidos do sistema, os sólidos suspensos são partículas finas difíceis de remover, causando problemas em todos os tipos de cultivo (BECKE *et al.*, 2020; CRIPPS; BERGHEIM, 2000).

Várias opções de equipamentos/processos para a remoção de sólidos estão sendo utilizadas atualmente na aquicultura: decantadores, clarificadores de fluxo radial, filtros mecânicos, filtros granulares, filtro de tambor, fracionamento de espuma, ozônio, dentre outros. É importante salientar que o uso de saída de água dos tanques pelo fundo, a utilização de padrões de circulação e de tanques com formatos arredondados e sem agitação, tornam a tarefa de remoção dos sólidos mais fácil (TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009). A escolha do método de remoção de sólidos dependerá do grau de intensificação do cultivo. A intensificação da produção (altas densidades de estocagem e maiores taxas de alimentação), o maior volume de água e a criação de espécies mais sensíveis, exigem processos mais aprimorados e automatizados (THORARINSDOTTIR, 2015).

Tradicionalmente, os métodos de remoção de sólidos são posicionados a montante do reator biológico, o que reduz a carga orgânica que chega a este,

permitindo um melhor desenvolvimento do biofilme bacteriano e maximizando o processo de nitrificação (EDING *et al.*, 2006; MALONE; PFEIFFER, 2006).

### **2.2.2 Compostos nitrogenados e reator biológico em SRA**

Nos sistemas aquícolas, existem quatro fontes primárias de compostos nitrogenados: (1) uréia, ácido úrico e aminoácidos excretados pelos peixes; (2) detritos orgânicos de organismos; (3) alimentos não consumidos e fezes; e (4) gás nitrogênio da atmosfera (EBELING; TIMMONS, 2012). A decomposição desses compostos nitrogenados é particularmente importante devido à toxicidade que eles apresentam.

O nitrogênio amoniacal total (NAT) e o nitrito são compostos tóxicos capazes de promover alterações histológicas e bioquímicas, afetando o crescimento e a saúde dos organismos aquáticos (BRAZÃO *et al.*, 2021; DOS SANTOS SILVA *et al.*, 2018; MOLAYEMRAFTAR *et al.*, 2022). O nitrogênio amoniacal total possui duas formas em meio aquoso: amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) e íon amônio ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ). A forma não ionizada é considerada mais tóxica aos organismos aquáticos, pois difunde-se facilmente pelas membranas respiratórias. Por outro lado, o íon amônio pode ser considerado menos tóxico, pois as membranas são relativamente impermeáveis à esta forma (ARANA, 2004; SÁ, 2012). A concentração relativa das formas de NAT é influenciada diretamente pelo pH, além da temperatura, sendo que a elevação destes aumenta a proporção da forma não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) no meio aquoso e consequentemente a toxicidade (RANDALL; TSUI, 2002).

A remoção do nitrogênio amoniacal total em SRA pode ser obtida por meio dos processos de nitrificação e desnitrificação. Bactérias nitrificantes (*Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* etc.) oxidam a amônia a nitrato em condições aeróbias e o nitrato, composto menos tóxico aos organismos cultivados, pode ser simultaneamente reduzido para nitrogênio gasoso ( $\text{N}_2$ ) em condições anaeróbias. O nitrito é produto intermediário do processo de nitrificação bacteriana (DEL'DUCA *et al.*, 2019; EBELING; TIMMONS, 2012).

A nitrificação é um processo chave nos sistemas de recirculação aquícola, e ocorre em estruturas chamadas de reator biológico ou filtro biológico, ou ainda biofiltro (CRAB *et al.*, 2007). Os reatores biológicos são preenchidos com estruturas, que fornecem um ambiente adequado para o crescimento das bactérias nitrificantes, chamadas mídias biológicas (RIDHA; CRUZ, 2001). A capacidade de remoção de

amônia nos reatores biológicos está diretamente ligada à estas estruturas. Para máxima eficiência, a mídia biológica deve ter uma grande superfície específica disponível para o crescimento das bactérias. Areia, pequenas ou grandes esferas de material plástico ou anéis cerâmicos, são exemplos de mídias típicas usadas nos reatores biológicos de sistemas aquícolas com recirculação de água (EBELING; TIMMONS, 2012).

Os SRA são diretamente dependentes de reatores biológicos eficientes, que maximizem o processo de nitrificação, para o controle das concentrações dos compostos nitrogenados durante o cultivo. Este processo pode ser afetado por uma série de fatores, tais como o tipo de mídia utilizada como suporte biológico das bactérias, concentração de oxigênio dissolvido, quantidade de matéria orgânica, temperatura, pH e alcalinidade (CHEN; LING; BLANCHETON, 2006). Portanto, a qualidade da água é importante não apenas para manter condições adequadas às espécies produzidas, mas também para proporcionar condições ótimas de desenvolvimento e manutenção das comunidades bacterianas nitrificantes.

As tecnologias de remoção de sólidos e filtração biológica, além de outros princípios que são adotados nos sistemas de recirculação de água são utilizados como base para a concepção dos sistemas aquapônicos (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006).

### **2.3 Aquaponia**

Os sistemas multitróficos integrados são reconhecidos como um método de produção mais moderno e sustentável (BOYD *et al.*, 2020; GODDEK *et al.*, 2019). De uma forma geral, esses sistemas combinam o cultivo de animais que necessitam do fornecimento de alimento (como peixes, por exemplo) com espécies extrativistas que utilizam matéria orgânica e inorgânica, criando sistemas ambientalmente equilibrados (GUNNING; MAGUIRE; BURNELL, 2016). Dessa forma, os nutrientes e subprodutos acumulados da cultura alimentada são assimilados pelas espécies extrativistas, convertendo-os em outros produtos igualmente valorizados no mercado, permitindo a eliminação de desperdícios e aumentando a produtividade das explorações piscícolas de forma sustentável (HUGHES; BLACK, 2016). Um dos tipos de sistemas integrados de produção que combinam o uso da água e a integração de uma espécie secundária é a aquaponia (BAKSH *et al.*, 2015).

O termo aquaponia tem sido utilizado por diferentes autores ao longo dos anos para caracterizar o cultivo integrado de peixes e plantas em um ambiente aquático. Lennard (2015) definiu a aquaponia como sendo um sistema de cultivo integrado entre animais aquáticos e plantas hidropônicas, onde a maioria dos nutrientes necessários para o crescimento das plantas é proveniente dos resíduos derivados da alimentação dos peixes. Os organismos envolvidos nessa integração são designados como: o utilizador inicial (peixes que consomem a fonte inicial de nutrientes, o alimento); o conversor intermediário (bactérias); e o utilizador terciário (plantas). Pelo menos 50% em peso (e muitas vezes mais) dos nutrientes necessários para o crescimento ideal das plantas são derivados apenas dos resíduos gerados pela produção de peixes (PALM *et al.*, 2018).

A aquaponia também pode ser definida como um sistema multitrófico integrado, que combina os elementos dos sistemas de recirculação em aquicultura com a hidroponia, onde a água proveniente do cultivo de peixes, enriquecida em nutrientes, é utilizada para o desenvolvimento das plantas (RAKOCY, 1989).

A aquaponia possui diversas vantagens tais como: alta eficiência no uso da água; uso de quantidade mínima de fertilizantes sintéticos; elimina o uso de pesticidas/herbicidas; elimina a necessidade de uso do solo; produz simultaneamente plantas e peixes; minimiza a liberação de resíduos no ambiente e; possibilita a produção em ambientes urbanos, próximos aos centros de consumo (SOMERVILLE *et al.*, 2014).

Pesquisas ao redor do mundo demonstram o sucesso da aquaponia com diversas espécies sendo produzidas neste sistema integrado: tilápia, berinjela, tomate e pepino (GRABER; JUNGE, 2009); carpa e manjerição (FILEP *et al.*, 2016); carpa e alface (LUO *et al.*, 2021); tilápia e espinafre d'água (LIANG; CHIEN, 2013); tilápia e alface (EFFENDI; WAHYUNINGSIH; WARDIATNO, 2017); tilápia e manjerição (RAKOCY *et al.*, 2004; SELEK *et al.*, 2017); camarão e tomate (MARISCAL-LAGARDA *et al.*, 2012); tilápia, camarão, agrião e alface (BARBOSA *et al.*, 2022); tilápia e tomate (KLOAS *et al.*, 2015); tilápia, manjerona e manjerição (HUNDLEY *et al.*, 2018); bacalhau e alface (LENNARD, 2021) dentre outros.

Diversos países ao redor do mundo já praticam o cultivo integrado de peixes e plantas (LOVE *et al.*, 2014). No Brasil, a aquaponia de pequena escala já é uma realidade, entretanto, as iniciativas comerciais ainda são raras e com pouca divulgação a nível nacional. Este fato pode estar atrelado a diversos fatores, como a

desinformação, a falta de dados técnicos-econômicos sobre o sistema, aos relativos altos custos iniciais de implementação, dentre outros. Existem exemplos de sucesso em países não tão distantes e de aspectos político-econômicos relativamente similares ao Brasil, como é o caso do México e do Chile. Nesses países a impulsão do sistema se deu principalmente por problemas de ordem de escassez hídrica, similar ao que vem ocorrendo no Brasil, e de necessidades de diversificar e maximizar a produção agroalimentar (EMERENCIANO *et al.*, 2015; EMERENCIANO; PINHO; CARNEIRO, 2016).

A literatura científica brasileira ainda é escassa no que refere-se a aquaponia. Apenas nos últimos anos foi observado maior interesse sobre esse assunto e pesquisadores de algumas universidades brasileiras e da Embrapa iniciaram ensaios experimentais e revisões sobre o assunto (BREWER; ALFARO; MALHEIROS, 2021; CASTILHO-BARROS *et al.*, 2018; CARNEIRO *et al.*, 2015; DAVID *et al.*, 2022; E SILVA; VAN PASSEL, 2020; HUNDLEY; NAVARRO, 2013; JORDAN *et al.*, 2018; PINHO *et al.*, 2021; PINHO *et al.*, 2017, 2018; QUEIROZ *et al.*, 2017; SCHARDONG; MORO; BONILLA, 2020; SILVA *et al.*, 2019).

De uma forma geral, nos países sul-americanos, a aquaponia não é um sistema empregado para produzir alimentos (EMERENCIANO, 2016). Este fato pode estar atrelado a atual disponibilidade de água doce e terra na maioria desses países, o que resulta em uma impressão equivocada de que práticas sustentáveis em aquicultura não são necessárias (PINHO *et al.*, 2021b). Outro fator relevante é a falta de incentivo político, fiscalização ou punição severa aos produtores que degradam o meio ambiente (AZEVEDO *et al.*, 2020). Todos esses fatores, somados à atual situação econômica dos países, resultam em baixo investimento em tecnologias e a predominância de métodos convencionais de produção (viveiros e tanques-rede, por exemplo) (PINHO *et al.*, 2021b). Espera-se que nos próximos anos o número de iniciativas comerciais nesses países aumente, visto a grande relevância da aquaponia para a produção de alimentos.

### **2.3.1 Breve histórico**

Os cultivos integrados entre peixes e plantas datam do desenvolvimento inicial da aquicultura na China, há cerca de 2.000 anos, quando carpas eram criadas junto aos cultivos de arroz (FERNANDO, 1993). A aquaponia moderna foi

documentada cientificamente pela primeira vez por Naegel (1977). Neste estudo, foi realizada a combinação da produção de duas espécies de peixes, *Tilapia mossambica* e *Cyprinus carpio*, em um sistema de recirculação de água contendo alface e tomate hidropônicos, sem a adição de nutrientes extras para as plantas. Esse primeiro sistema aquapônico, já incluía um sistema de filtragem biológica e tanque de sedimentação. Estudos subsequentes em aquaponia foram desenvolvidos por Lewis *et al.* (1978) e Watten e Busch (1984). Entretanto, o pioneirismo na aquaponia moderna é atribuído aos pesquisadores da Universidade das Ilhas Virgens Americanas (criação do sistema UVI), em especial ao Dr. James Rakocy (RAKOCY, 1989). O sistema UVI tem servido como base para a implantação de diversos sistemas comerciais ao redor do mundo (THORARINSDOTTIR, 2015).

Até 1980, a maioria das tentativas de integrar a hidroponia com a aquicultura tinham sucesso limitado. Com o passar dos anos as inovações tecnológicas transformaram a aquaponia em um sistema viável de produção de alimentos e, atualmente, esses sistemas podem ser altamente bem-sucedidos, desde que um gerenciamento intensivo seja feito (DIVER, 2010; GODDEK *et al.*, 2019).

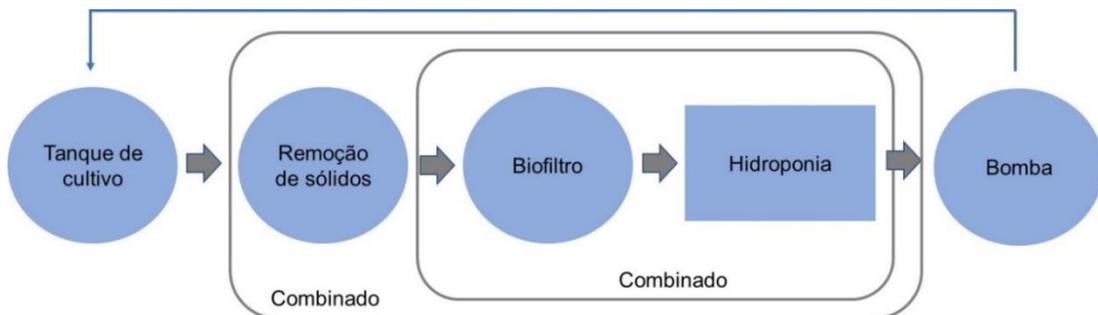
### **2.3.2 Design do sistema aquapônico**

A maioria dos sistemas aquapônicos segue um *layout* básico (FIGURA 2), onde os elementos essenciais são: tanque de cultivo, componente de remoção de sólidos (sedimentáveis e suspensos), filtragem biológica (biofiltro), componente hidropônico e reservatório de bomba (*sump*). Basicamente, a água recircula em um sistema fechado fluindo do tanque de cultivo para as unidades de filtragem (mecânica e biológica), antes de passar pelos leitos hidropônicos, retornando em seguida (bombeamento) para o tanque de cultivo de peixes (HAGER *et al.*, 2021; RAKOCY, J E; MASSER; LOSORDO, 2006).

Dependendo das características do sistema pode-se combinar a filtragem biológica e os componentes hidropônicos (FIGURA 2), usando substrato como suporte para as plantas (ex. cascalho ou areia), que também funcionarão como meio para o desenvolvimento de bactérias nitrificantes. A hidroponia realizada em estruturas flutuantes (*raft hydroponics*) também pode funcionar como biofiltro, desde que a área de produção de vegetais seja grande o suficiente. Combinar a biofiltração com a hidroponia é desejável, pois elimina custos. Um projeto alternativo combina a remoção

de sólidos, a biofiltração e a hidroponia em uma mesma unidade, sendo que o meio de suporte hidropônico captura os sólidos, além de fornecer área de superfície para as bactérias nitrificantes. É importante, nesse caso, não sobrecarregar a unidade com sólidos suspensos, devendo esse tipo de projeto ser evitado em operações de grande escala comercial (RAKOCY, 2012).

Figura 2 – *Layout* básico de um sistema aquapônico com diferentes arranjos dos componentes do sistema.



Fonte: Adaptado de Rakocy, Masser e Losordo (2006).

### 2.3.3 Subsistemas hidropônicos

Em aquaponia, três tipos principais de componentes hidropônicos são utilizados: sistemas com substrato (*media-filled bed* ou *gravel bed*), sistemas flutuantes (*floating*) e técnica do filme nutriente (*Nutrient Film Technique* - NFT) (MAUCIERI *et al.*, 2018).

Os sistemas com utilização de substratos (argila expandida, cascalho, perlita ou outro componente inerte) são baseados em regimes de inundação e drenagem. O uso desse tipo de componente hidropônico pode remover a necessidade de um biofiltro separado, já que este também atuará como meio para a fixação de bactérias nitrificantes. Além disso, promove suporte aos vegetais e pode atuar como meio filtrante de sólidos (SEAWRIGHT; STICKNEY; WALKER, 1998; YEP; ZHENG, 2019).

Nos sistemas flutuantes as plantas são apoiadas em placas de poliestireno, em orifícios espaçados entre si, de modo que as raízes fiquem permanentemente submersas na água. Além de fornecer máxima exposição das raízes à água de cultivo, as placas de isopor protegem a água da luz solar direta e mantêm a temperatura abaixo da temperatura ambiente, o que é uma característica benéfica nos sistemas

tropicais. Esse sistema necessita de aeração nos leitos hidropônicos e requer maior quantidade de água, quando comparado ao NFT (HAGER *et al.*, 2021; RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006).

A técnica do filme nutriente (NFT) consiste em expor as raízes das plantas a uma fina película de água, fornecendo nutrientes e oxigênio necessários ao desenvolvimento. Os vegetais são dispostos em várias canaletas por onde a água flui. As canaletas são leves e versáteis, podendo ser montadas sobre os tanques de criação para usar eficientemente o espaço vertical da área de cultivo. Em sistemas aquapônicos que utilizam o NFT, o excesso de sólidos deve ser removido para que não se acumule e prejudique as raízes. Essa técnica é amplamente utilizada em sistemas comerciais, devido ao seu baixo custo inicial de implantação, design simples e facilidade geral de operação (GOADA *et al.*, 2015; LENNARD; LEONARD, 2006).

A escolha do subsistema hidropônico, dentro do contexto da aquaponia, deve ser baseada nas vantagens e desvantagens conferidas por aquele componente hidropônico específico. Um resumo comparativo entre os diferentes sistemas hidropônicos é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens, desvantagens e absorção de nutrientes nos diferentes componentes hidropônicos utilizados em aquaponia.

	<b>Substrato</b>	<b>Flutuante</b>	<b>NFT</b>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biofiltração: o meio serve como substrato para bactérias nitrificantes;</li> <li>- Atua como meio filtrante de sólidos;</li> <li>- Colonização por ampla microbiota;</li> <li>- Mineralização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suprimento constante de água;</li> <li>- Facilidade de manutenção e limpeza;</li> <li>- Superfície adicional nas raízes para bactérias nitrificantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de manutenção e limpeza;</li> <li>- Requer menor volume de água;</li> <li>- Estrutura hidropônica leve.</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infraestrutura hidropônica pesada;</li> <li>- Manutenção e limpeza difíceis;</li> <li>- Colmatação do substrato: formação de caminhos preferenciais pela água.</li> <li>- Biofiltração ineficiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requer grande volume de água;</li> <li>- Dispositivo para aeração de raízes obrigatório;</li> <li>- Raízes das plantas mais suscetíveis às doenças</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adição de biofiltro separado;</li> <li>- Rendimentos mais baixos para alface;</li> <li>- Sistema menos estável, pois há menos água.</li> </ul>
<b>Absorção de nutrientes</b>	Alta	Alta	Baixa: menor área de contato da água com as raízes.

Fonte: Adaptada de Goddek *et al.* (2015).

### 2.3.4 Seleção de plantas e requisitos de crescimento vegetal

Mais de 150 diferentes espécies de vegetais já mostraram resultados positivos ao serem cultivadas na aquaponia, incluindo unidades de pesquisa, domésticas e comerciais (SOMERVILLE *et al.*, 2014) Em geral, as hortaliças folhosas têm sido a cultura preferida em sistemas aquapônicos, pois além de não possuírem alta exigência nutricional, possuem curto ciclo de produção e boa demanda no mercado consumidor (BAILEY; FERRAREZI, 2017; RAKOCY *et al.*, 2004; SAVIDOV; HUTCHINGS; RAKOCY, 2007).

É possível produzir uma grande variedade de espécies vegetais em aquaponia (QUADRO 2). De um modo geral, espécies adaptadas à hidroponia são sempre recomendadas para cultivo em sistema aquapônico, desde que sejam respeitadas as necessidades e limitações das plantas no que se diz respeito a espaço, nutrição, parâmetros de qualidade de água e luminosidade (SOMERVILLE *et al.*, 2014).

Quadro 2 – Espécies vegetais produzidas em aquaponia.

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Classificação</b>	<b>Referências</b>
<i>Abelmoschus esculentus</i>	Quiabo	Fruto	[1]
<i>Allium schoenoprasum</i>	Cebolinha	Erva	[2,3]
<i>Capsicum annum</i>	Pimentão	Fruto	[3]
<i>Cucumis sativus</i>	Pepino	Fruto	[2,4,5]
<i>Ipomoea aquatica</i>	Espinafre d'água	Folhosa	[2,6,7]
<i>Ipomea batatas</i>	Batata doce	Tubérculo	[8]
<i>Lactuca sativa</i>	Alface	Folhosa	[2,9,10,11]
<i>Nasturtium officinale</i>	Agrião	Folhosa	[2,11,12]
<i>Ocimum basilicum</i>	Manjeriço	Erva	[2,3,13,14]
<i>Origanum majorana</i>	Manjerona	Erva	[14]
<i>Petroselinum crispum</i>	Salsa/cheiro-verde	Erva	[2]
<i>Solanum lycopersicum</i>	Tomate-cereja	Fruto	[4,15]
<i>Solanum melongena</i>	Berinjela	Fruto	[2,4]
<i>Spinacia oleracea</i>	Espinafre	Folhosa	[2]

Referências: [1] Meena *et al.*, 2022; [2] Savidov, Hutchings e Rakocy (2007); [3] Love *et al.* (2015); [4] Graber e Junge (2009); [5] Tyson *et al.* (2008); [6] Liang e Chien (2013); [7] Lam *et al.* (2015); [8] Romano *et al.* (2022); [9] Trang, Schierup e Brix (2010); [10] Effendi, Wahyuningsih e Wardiatno (2017); [11] Barbosa *et al.* (2022); [12] Castellani, Camargo e Abimorad (2009); [13] Rakocy *et al.* (2004a); [14] Hundley *et al.* (2018); [15] Kloas *et al.* (2015).

A seleção das espécies que sejam adaptadas à hidroponia em sistemas aquapônicos, está diretamente relacionada com a densidade de estocagem dos peixes e, conseqüentemente, com a concentração de nutrientes no efluente aquícola.

Alface, ervas e verduras, como por exemplo o espinafre, cebolinha, manjeriço e agrião, têm baixa necessidade nutricional e se adaptam bem aos sistemas aquapônicos. Entretanto, plantas que produzem frutos e bulbos (tomate, morango, beterraba, pepino etc.) têm uma demanda nutricional mais alta e apresentam melhor desempenho em sistema aquapônicos bem dimensionados e estabelecidos (DIVER, 2010).

Um estudo conduzido por Love *et al.* (2015), mostrou que as espécies frequentemente produzidas comercialmente foram: manjeriço (*Ocimum basilicum*), tomate (*Solanum lycopersicum*), alface (*Lactuca sativa*), couve (*Brassica oleracea*), beterraba (*Beta vulgaris*), pak choi (*Brassica rapa* subsp *chinensis*), pimentão (*Capsicum annuum*) e pepino (*Cucumis sativus*).

Outras plantas que podem ser cultivadas em aquaponia são as ornamentais (*Dianthus*, *Chrysanthemum*, *Gerbera*, *Euphorbia*, *Anthurium*, *Alstromeria*, *Lilium*, *Rose*) (TORRES; REYES; ESPINOSA, 2021). O mercado de plantas ornamentais movimenta bilhões de dólares por ano, tendo países como Suíça, Japão e Estados Unidos como grande consumidores de flores (VAN UFFELEN; DE GROOT, 2005). Love *et al.* (2015), avaliando a utilização de peixes e plantas em sistemas aquapônicos ao redor do mundo, apontaram que 20% das plantas utilizadas em aquaponia eram ornamentais. Em outra pesquisa, Mchunu, Lagerwall e Senzanje (2018), constataram que na África do Sul dos 45 sistemas aquapônicos das principais cidades, 25% cultivavam plantas ornamentais. Apesar da importância das plantas ornamentais, poucos trabalhos foram feitos com a sua utilização em aquaponia. Estudos futuros devem investigar a aplicabilidade da aquaponia na floricultura (YEP; ZHENG, 2019).

Uma pesquisa realizada por Suárez-Cáceres *et al.* (2022), revelou que os tipos mais comuns de culturas produzidas em sistemas aquapônicos foram: hortaliças folhosas (alface, acelga, couve etc.), cultivadas por 81,1% dos entrevistados; hortaliças frutíferas (tomate, pepino, abobrinha etc.) (66,0%); ervas aromáticas (manjeriço, hortelã, coentro etc.) (60,4%) e; ornamentais ou medicinais (cravo, gérbera etc.) (17,0%).

As plantas necessitam para o seu máximo crescimento de 16 nutrientes essenciais (QUADRO 3), sendo divididos em macronutrientes, aqueles requeridos em quantidades relativamente grandes, e micronutrientes, aqueles requeridos em quantidades consideravelmente menores (GODDEK *et al.*, 2015).

Quadro 3 – Nutrientes essenciais requeridos para o ótimo crescimento vegetal. Elementos entre parênteses são nutrientes limitantes na aquaponia.

<b>Estrutural</b>	<b>Macronutrientes</b>	<b>Micronutrientes</b>
Carbono Hidrogênio Oxigênio	Nitrogênio Fósforo (Potássio) (Cálcio) Magnésio Enxofre	(Ferro) Manganês Boro Molibdênio Cobre Zinco Cloro

Fonte: Adaptado de Hager *et al.* (2021).

As soluções hidropônicas contêm proporções bem definidas desses elementos, que são adicionados às soluções na forma iônica (RESH, 2013). Nos sistemas aquapônicos, os nutrientes necessários ao crescimento dos vegetais são oriundos do cultivo dos peixes, que são ricos em nutrientes dissolvidos. Entretanto, alguns elementos essenciais não são fornecidos em quantidades adequadas na alimentação dos peixes e devem, sempre que necessário, ser suplementados (SEAWRIGHT; STICKNEY; WALKER, 1998).

Com exceção de  $Zn^{+2}$ , os micronutrientes  $Fe^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $B^{+3}$  e  $Mo^{+6}$  não se acumulam nos sistemas aquapônicos com a entrada cumulativa de ração. O  $Fe^{+2}$ , derivado da alimentação dos peixes, é insuficiente para a produção dos vegetais e deve ser suplementado para atingir uma concentração de 2,0 mg/L (RAKOCY, 2012). O cálcio e o potássio também são nutrientes limitantes, mas estes já são normalmente suplementados devido ao uso de produtos para correção/manutenção do pH da água de cultivo (QUEIROZ *et al.*, 2017).

#### 2.3.4.1 Alface

A alface (*Lactuca sativa*), pertencente à família Asteraceae, é uma das principais hortaliças cultivadas no mundo (LEI *et al.*, 2018). É uma planta herbácea, anual, de caule diminuto onde as folhas crescem em forma de roseta, fechando-se ou não na forma de uma “cabeça”. A coloração das plantas pode variar de diferentes tons de verde ou roxas, de acordo com a cultivar. A depender das condições climáticas, seu ciclo vegetativo dura em média de 40 a 70 dias (FIGUEIRA, 2008). Consumida preferencialmente *in natura*, a alface apresenta várias características desejáveis ao

consumidor como baixo índice de calorias, fonte de fibras, carboidratos, proteínas, vitaminas, minerais e antioxidantes (ESGUERRA; RAPUSAS; ROLLE, 2020; LLORACH *et al.*, 2008).

Por ser uma cultura originária de clima temperado, a alface possui dificuldades de adaptação em regiões com elevada temperatura e luminosidade, que dificultam o seu desenvolvimento (NETO *et al.*, 2005). Altas temperaturas estimulam o pendoamento precoce, o que causa o alongamento do caule, reduz o número de folhas, afeta a formação da cabeça e estimula a produção de látex, deixando as folhas amargas e inviabilizando a comercialização (HENZ; SUINAGA, 2009; LUZ *et al.*, 2009). Dessa forma, houve a necessidade de desenvolver cultivares adaptadas às condições tropicais (AQUINO *et al.*, 2014) e que fossem mais resistentes ao pendoamento precoce.

A alface é uma das espécies mais cultivadas em sistemas hidropônicos, sendo uma excelente opção para produção em sistemas aquapônicos, pois pode ser produzida em um curto período, tem relativamente menos problemas com pragas e doenças (ao contrário das culturas com frutos), tem grande parte da biomassa colhida comestível e possui alta produtividade (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006).

De acordo com o último Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geostatística e Educação (BRASIL, 2017), foram produzidas 671.509 toneladas de alfaces, em 108.382 estabelecimentos agrários no Brasil. Esses dados mostram sua relevância econômica, fazendo da alface uma das hortaliças mais produzidas no país (QUADRO 4).

Quadro 4 – As dez hortaliças mais produzidas no Brasil.

<b>Cultura</b>	<b>Volume de produção (t)</b>	<b>Nº de estabelecimentos</b>
Tomate	1.091.579	44.259
Alface	671.509	108.382
Cenoura	480.252	23.394
Repolho	467.622	38.178
Batata doce	350.512	70.860
Milho-verde (espiga)	348.904	71.045
Chuchu	271.344	16.160
Pimentão	224.286	32.507
Pepino	184.161	33.296
Couve	161.986	71.279

Fonte: BRASIL (2017).

As cultivares de alface podem ser agrupadas em cinco tipos: repolhuda lisa, repolhuda crespa ou americana, solta lisa, solta crespa e tipo romana (HENZ; SUINAGA, 2009). No Brasil, dentre estes diferentes segmentos, o tipo alface crespa é o mais importante tanto em termos de área cultivada quanto em volume de produção (BRASIL, 2018). Entretanto, a produção de cultivares desse segmento tem sido limitado em algumas regiões em função de altas temperaturas, o que acarreta os problemas já abordados.

Nesse contexto, foi desenvolvida a BRS Leila (FIGURA 3), uma cultivar de alface do tipo crespa que apresenta tolerância ao florescimento precoce, aumentando a sustentabilidade do cultivo dessa cultura em regiões tropicais. Esta variedade também possui tolerância a queima das bordas causada pela deficiência de cálcio. Além dessas características, BRS Leila apresenta ampla adaptação aos diferentes sistemas de produção, podendo ser cultivada tanto em campo aberto como em cultivo protegido e ainda, por apresentar um formato cônico, destaca-se na produção hidropônica (BRASIL, 2018). A folhagem de BRS Leila apresenta coloração verde-oliva brilhante, ornamentada com um vistoso padrão recortado das margens foliares. As plantas apresentam porte médio e caule grosso, conferindo facilidade na colheita e adequada manipulação pós-colheita (BOITEUX *et al.*, 2017).

Figura 3 – Exemplar da alface (*L. sativa*) crespa BRS Leila.



Fonte: Autora.

### 2.3.5 Seleção de espécies animais

A produção de animais aquáticos em sistema aquapônico está vinculada às mesmas condições químicas, físicas e biológicas que ocorrem nos sistemas de recirculação aquícola (ESPINAL; MATULIĆ, 2019). As espécies devem tolerar altas densidades de estocagem, bem como elevados níveis de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) e sólidos suspensos totais na água (YEP; ZHENG, 2019). Além disso, peixes de água doce ou eurialinos, que toleram variações e/ou salinidades próximas a zero, são boas opções para cultivo em sistemas aquapônicos (DIVER, 2006; EMERENCIANO *et al.*, 2015).

Várias espécies de peixes, tanto de clima tropical como de clima temperado, têm sido utilizadas em sistemas aquapônicos, tais como bagres (ENDUT *et al.*, 2010; PALM; BISSA; KNAUS, 2014), robalos (NOZZI *et al.*, 2016), trutas (FORCHINO *et al.*, 2017), pacus (PINHO *et al.*, 2018), carpas (HAQUE *et al.*, 2015; SHETE *et al.*, 2016), *snakehead* (BICH *et al.*, 2020), barramundi, bacalhau, tilápias, dentre outros (RAKOCY, 2012; SOMERVILLE *et al.*, 2014). Uma pesquisa realizada por Love *et al.* (2015) revelou que as espécies mais cultivadas em operações comerciais foram a tilápia (69%), os peixes ornamentais (43%) e os siluriformes (25%).

Pinho *et al.* (2021b), sugere que as espécies que poderiam ser interessantes para criação em sistemas aquapônicos de água doce, com base nas suas características, são o jundiá (*Rhamdia quelen*), o lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax lacustris* spp.), o tambaqui (*Colossoma macropomum*) e robalos (*Centropomus* spp.). Os pesquisadores destacam que o motivo da escolha dessas espécies, dentre várias outras cultivadas na América do Sul, deve-se ao seu valor de mercado, qualidade nutricional para consumo e/ou grande volume produzido em sistemas convencionais. Além disso, peixes híbridos como o tambacu (*C. macropomum* x *P. mesopotamicus*), o paqui (*P. mesopotamicus* x *C. macropomum*) e a tambatinga (*C. macropomum* x *Piaractus brachypomus*), também podem vir a ser considerados no futuro para criação em sistemas aquapônicos.

Peixes ornamentais vêm ganhando cada vez mais espaço na aquaponia. Love *et al.* (2014), avaliando a utilização de peixes em sistemas aquapônicos ao redor do mundo, apontaram que 48% dos sistemas tinham como organismo primário um peixe ornamental como carpas, peixes dourados ou outros peixes tropicais. Mchunu, Lagerwall e Senzanje (2018), constataram que na África do Sul dos 45 sistemas

aquapônicos das principais cidades, 16% cultivavam peixes ornamentais. Peixes ornamentais que tem potencial para cultivo em sistemas aquapônicos são as espécies: *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus*, *Pterophyllum scalare*, *Danio rerio*, *Poecilia reticulata*, *Puntius tetrazona*, *Gymnocorymbus* sp. e *Symphysodon* sp. (LOVE *et al.*, 2014). A produção de peixes ornamentais em sistemas aquapônicos é um segmento que só tende a crescer, visto o valor comercial desses peixes. Em 2010, o mercado de peixes ornamentais movimentou 10 bilhões de dólares, estando o Brasil entre os principais exportadores (BIONDO; BURKI, 2020).

Alguns crustáceos também vêm sendo inseridos na aquaponia, apesar de não serem muito comuns, como é o caso do lagostim australiano (*Cherax quadricarinatus*) (EFFENDI; UTOMO; DARMAWANGSA, 2015), dos camarões de água doce (*Macrobrachium rosenbergii*) (DUSCI *et al.*, 2022; SACE; FITZSIMMONS, 2013) e do camarão branco do Pacífico (*Penaeus vannamei*) (MARISCAL-LAGARDA *et al.*, 2012; PINHEIRO *et al.*, 2017).

O Quadro 5 contém um resumo com algumas espécies de água doce e marinhas que são utilizadas em aquaponia.

Quadro 5 – Espécies de água doce e marinhas utilizadas em aquaponia.

<b>Espécie</b>	<b>Nome popular</b>	<b>Nome internacional</b>
<i>Clarias gariepinus</i>	Bagre africano	African catfish
<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Carpa capim	Grass carp
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpa comum	Common carp
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Robalo europeu	European sea bass
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Carpa prateada	Silver carp
<i>Ictalurus punctatus</i>	Bagre do canal	Channel catfish
<i>Lates calcarifer</i>	Perca gigante	Barramundi
<i>Maccullochella peelii</i>	Bacalhau Murray	Murray cod
<i>Macrobrachium rosenbergii</i>	Camarão gigante da Malásia	Giant river prawn
<i>Micropterus salmoides</i>	Achigã	Largemouth bass
<i>Mugil cephalus</i>	Tainha	Flathead mullet
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truta arco-íris	Rainbow trout
<i>Oreochromis aureus</i>	Tilápia azul	Blue tilapia
<i>Oreochromis mossambicus</i>	Tilápia de Moçambique	Mozambique tilapia
<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilápia do Nilo	Nile tilapia
<i>Penaeus vannamei</i>	Camarão branco do pacífico	Whiteleg shrimp
<i>Scortum barcoo</i>	Perca de jade	Jade perch
<i>Sparus aurata</i>	Dourada	Gilt-head bream

Fonte: Adaptado de Spradlin e Saha (2022).

### 2.3.5.1 Tilápia do Nilo

A tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) é uma das espécies de água doce mais populares da aquicultura. De acordo com a FAO (2020), a tilápia tem sido cultivada em mais de 80 países e foi a terceira espécie mais produzida no mundo no ano de 2018 (4,5 milhões de toneladas), ficando atrás apenas da carpa capim (*C. idellus*) e da carpa prateada (*H. molitrix*).

O Brasil é atualmente o 13º maior país produtor de pescado do mundo (FAO, 2020), com uma produção de 841.005 toneladas de peixes (PEIXE BR 2022). Nesse cenário, a tilápia merece destaque por ser a espécie mais cultivada, representando 63,5% (534.005 toneladas) da piscicultura nacional (PEIXE BR, 2022). Fato que comprova sua viabilidade para as condições brasileiras.

O sucesso da tilápia na aquicultura mundial pode ser atribuído a uma série de características apresentadas pela espécie. São bastante tolerantes a baixos níveis de oxigênio dissolvido, suportam uma faixa bastante ampla de pH da água e toleram concentrações de metabólitos tóxicos melhor do que grande parte dos peixes cultivados (EL-SAYED, 2006). Além dessas características, apresentam rusticidade ao manejo, rápido crescimento, boa conversão alimentar, aceitam adensamento, possuem boa aceitação no mercado consumidor e vasta literatura científica disponível sobre a espécie (KUBTIZA, 2011). O conjunto desses atributos faz da tilápia uma excelente escolha tanto para produtores, quanto pelo mercado consumidor, visto a boa qualidade apresentada pela sua carne (sabor, textura e presença de poucos espinhos).

A tilápia do Nilo é a espécie mais comumente utilizada e bem sucedida na aquaponia (DANNER *et al.*, 2019), principalmente por se adaptar bem a diferentes condições de qualidade de água, como já abordado anteriormente. De origem africana, tem melhor desempenho em água com temperatura entre 25 – 30 °C (HAGER *et al.*, 2021). Apesar de serem bem tolerantes ao baixo oxigênio dissolvido, as tilápias têm crescimento ideal em concentrações acima de 5 mg/L (DALSGAARD *et al.*, 2013). A faixa ótima de pH para a espécie está compreendida entre 6,5 – 8,5 (THORARINSDOTTIR, 2015). A amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) e o nitrito ( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ) devem ser mantidos em níveis mínimos, em concentrações abaixo de 0,05 mg/L e 1,0 mg/L, respectivamente (TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009; WAMBUA *et al.*, 2021). Parâmetros de qualidade de água fora dessas faixas de conforto afetam

significativamente o crescimento, a conversão alimentar e tornam as tilápias mais suscetíveis a doenças.

Tilápias são tolerantes ao adensamento, suportando densidades de estocagem de até 120 kg/m<sup>3</sup> (DALSGAARD *et al.*, 2013). São onívoras podendo se alimentar de produtos de origem vegetal e animal nas rações formuladas, que devem ter um teor de proteína bruta de 28 – 32%, na fase de crescimento, e de 32 – 36%, para alevinos (RICHE; GARLING, 2003). Quando alimentadas de forma adequada e mantidas sob condições ambientais apropriadas, tilápias apresentam taxas de conversão alimentar (FCA) muito eficientes (1,4 – 1,8), sendo alguns dos melhores resultados da produção animal (DELONG; LOSORDO; RAKOCY, 2009). Em sistemas aquapônicos as tilápias cultivadas apresentaram boas taxas de sobrevivência, com valores acima de 95% (PALM; BISSA; KNAUS, 2014; RAKOCY *et al.*, 2004a; RAKOCY *et al.*, 2004b).

Uma revisão de literatura realizada por Yep e Zheng (2019), mostrou que 43% dos artigos publicados, relacionados à aquaponia, utilizaram alguma espécie de tilápia como organismo aquático primário. No Quadro 6 podem ser observadas algumas pesquisas envolvendo a criação de tilápias e o cultivo de vegetais em sistema aquapônico.

Quadro 6 – Criação de tilápia e culturas vegetais em aquaponia.

Referência	Espécies integradas
[1]	Tilápia + Berinjela
[2]	Tilápia + Espinafre d'água
[3,4]	Tilápia + Alface
[5,6]	Tilápia + Manjericão
[7]	Tilápia + Tomate
[8]	Tilápia + Manjerona + Manjericão
[9]	Tilápia + Agrião + Alface
[10]	Tilápia + Carpa + Alface
[11]	Tilápia + Alface + Manjericão + Tomate + Pepino
[12]	Tilápia + Vetiver

Referências: [1] Graber e Junge (2009); [2] Liang e Chien (2013); [3] Effendi, Wahyuningsih e Wardiatno (2017); [4] Ani *et al.* (2022); [5] Rakocy *et al.* (2004); [6] Selek *et al.* (2017); [7] Kloas *et al.* (2015); [8] Hundley *et al.* (2018); [9] Barbosa *et al.* (2022); [10] Hasan *et al.* (2017); [11] Palm; Bissa; Knaus (2014); [12] Effendi *et al.* (2015).

## 2.4 Bolhas ultrafinas

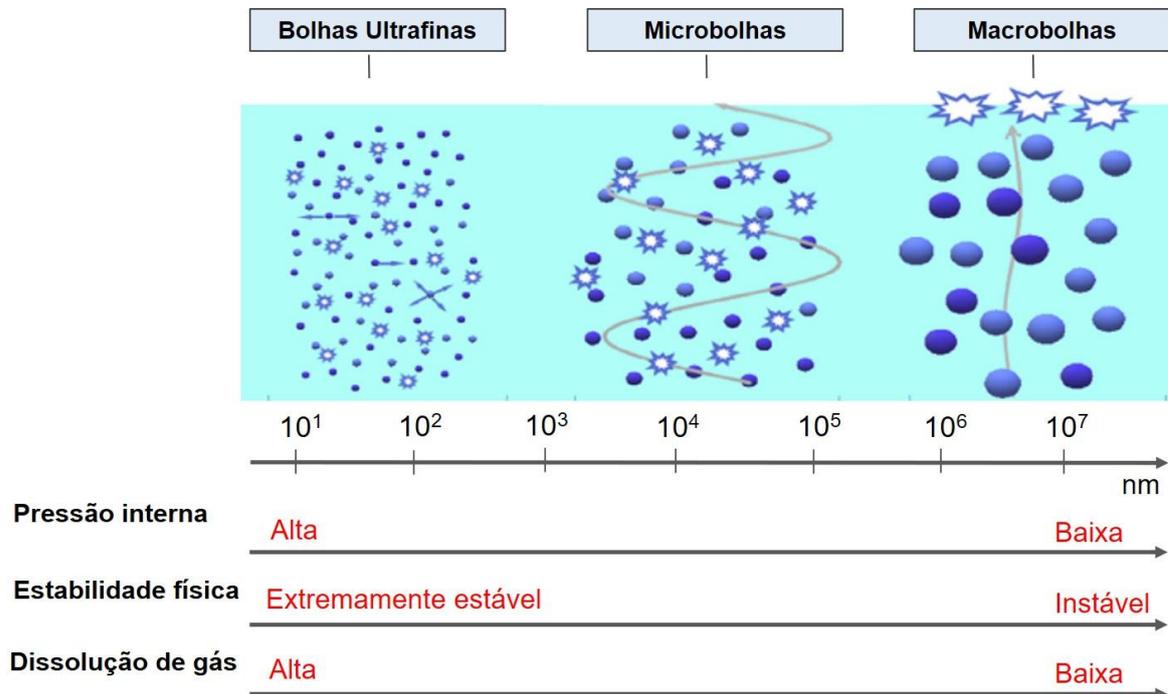
São domínios gasosos, com tamanho entre dezenas e centenas de nanômetros de raio de curvatura, não sendo possível visualizá-las utilizando microscópios ópticos convencionais (ETCHEPARE, 2016). O termo bolhas ultrafinas é uma nomenclatura alternativa e equivalente ao termo nanobolhas. Uma motivação para usar o termo bolhas ultrafinas, ao invés de nanobolhas, é que o termo “nano” tem associações negativas à saúde em algumas culturas. Além disso, no campo das nanopartículas o prefixo “nano” é geralmente utilizado para partículas com tamanho de 1 – 100 nm (ALHESHIBRI *et al.*, 2016) e as bolhas ultrafinas, que foram caracterizadas pelo comitê técnico da *International Standards Organization* (ISO TC/281), possuem tamanho inferior a 1  $\mu\text{m}$  ( $10^3$  nm). Nesta tese, será empregado o termo bolhas ultrafinas. Entretanto, para descrever resultados e procedimentos utilizados em outras pesquisas será utilizada a nomenclatura empregada pelos autores dos respectivos trabalhos, que em sua maioria usa o termo nanobolhas (NBs).

### 2.4.1 Definição e classificação de bolhas

Bolhas podem ser definidas como porções gasosas cercadas por um líquido ou sólido, ou como gases em meio fechado por uma interface. Uma bolha é formada quando a pressão total do gás dissolvido na água excede a pressão hidrostática do ambiente (LEKANG, 2013). A categorização das bolhas pode ser feita de acordo com as diferenças apresentadas por seus tamanhos. Com base nessas categorias estudos definiram as bolhas como macrobolhas, microbolhas e bolhas ultrafinas ou nanobolhas (AGARWAL; NG; LIU, 2011; TEMESGEN *et al.*, 2017; THI PHAN *et al.*, 2020). Existe ainda uma categoria chamada de sub-microbolhas que apresentam propriedades situadas entre as microbolhas e as nanobolhas. É importante ressaltar que, embora os pesquisadores concordem sobre as propriedades apresentadas pelas diferentes categorias de bolhas, não existe um consenso sobre o limite de tamanho para os diferentes tipos de bolhas (THI PHAN *et al.*, 2020).

Na Figura 4 pode ser observado um resumo das categorias de bolhas com base nas faixas de tamanho e suas principais propriedades.

Figura 4 – Categorização de bolhas com base nos diferentes tamanhos e propriedades.



Fonte: Adaptado de Thi Phan *et al.* (2020).

Macrobolhas apresentam tamanho maior que  $10^5$  nm. Estas bolhas possuem menor estabilidade e tempo de residência, pois tendem a subir rapidamente e estourarem na superfície da água (TAKAHASHI; CHIBA; LI, 2007; TEMESGEN *et al.*, 2017). Ademais, macrobolhas também possuem baixa taxa de dissolução de gases (THI PHAN *et al.*, 2020), o que impede que altas concentrações de gás, como por exemplo o oxigênio, sejam atingidas na água.

Microbolhas possuem tamanho na faixa de 1 – 100  $\mu\text{m}$  (ISO, 2017). Estas bolhas apresentam boa estabilidade, entretanto, tendem a diminuir gradualmente de tamanho devido à dissolução dos gases interiores pela água circundante e, subsequentemente, colapsam (TAKAHASHI *et al.*, 2003). Os radicais livres gerados a partir do colapso das microbolhas é útil em várias aplicações técnicas, incluindo a decomposição de produtos químicos orgânicos e tratamento de águas residuais (TAKAHASHI; CHIBA; LI, 2007).

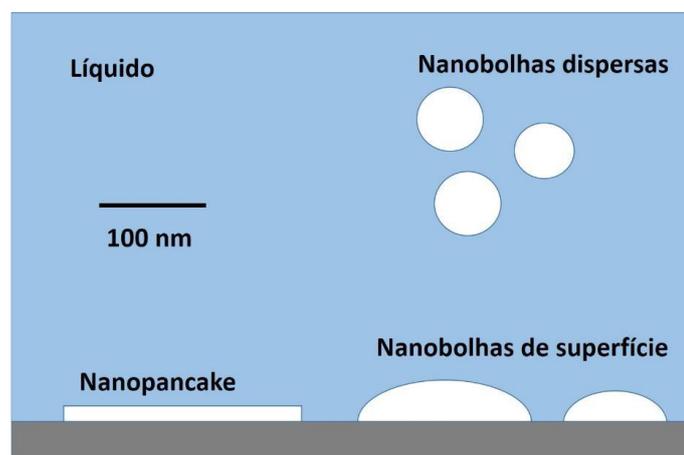
Bolhas ultrafinas (BUF) são bolhas de gás em solução aquosa que apresentam diâmetro inferior a 1  $\mu\text{m}$  (ISO, 2017). As BUFs possuem várias propriedades físico-químicas e mecânicas notáveis, tais como elevado tempo de residência e estabilidade (UCHIDA *et al.*, 2011; USHIKUBO *et al.*, 2010), alta pressão

interna do gás (TYRRELL; ATTARD, 2001), grande área específica, maior solubilidade de gases na água (AGARWAL; NG; LIU, 2011; AHMED *et al.*, 2018a; TAKAHASHI *et al.*, 2003), geração de radicais livres e liberação de alta energia por explosão ou colapso (DEMANGEAT, 2015). O movimento horizontal destas bolhas em soluções aquosas, bem como a elevada relação superfície/volume, as impede de subir à superfície e estourar, conferindo elevada estabilidade às BUFs (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018; USHIKUBO *et al.*, 2010). Dessa forma, após a geração, estas bolhas ainda podem ser encontradas em soluções aquosas por vários dias (AZEVEDO *et al.*, 2016).

De acordo com Etchepare (2016), as nanobolhas apresentam-se basicamente sob três formas distintas (FIGURA 5):

1. Nanobolhas de superfície, formadas na interface sólido-líquido como “calotas” esféricas, e com raios de curvatura entre 100 – 1000 nm;
2. *Nanopancakes*, como estruturas quase-bidimensionais em uma interface sólido-líquido, com largura de centenas de nanômetros, mas com altura inferior a 2 nm;
3. Nanobolhas dispersas (*bulk*), no seio de soluções aquosas, com forma praticamente esférica e raios de curvatura entre 50 – 100 nm, e afetadas pelo movimento Browniano. Estas nanobolhas podem ser estáveis por horas, dias ou até mais de um mês após sua geração (OH *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

Figura 5 – Esquema dos três tipos de ocorrência de NBs.



Fonte: Etchepare (2016).

### **2.4.2 Evidências da existência**

A existência das nanobolhas foi especulada pela primeira vez em 1994 por Parker, Claesson e Attard (1994), para medir a força de atração e separação entre duas superfícies hidrofóbicas imersas em água. Com o advento de técnicas de varredura por sonda, particularmente a microscopia de força atômica em modo intermitente (MFA-MI), pode-se fazer a visualização direta das nanobolhas de superfície.

A primeira evidência experimental das nanobolhas de superfície foi reportada por Ishida *et al.* (2000) e Lou *et al.* (2000), que publicaram imagens de NBs em diferentes substratos utilizando MFA-MI. Esses primeiros estudos estabeleceram que a forma das NBs de superfície se assemelhava a uma tampa esférica. Alguns anos depois, Ishida e Higashitani (2006) demonstraram que as forças de interação de longo alcance entre duas superfícies hidrofóbicas eram, de fato, relacionadas à presença de NBs de superfície.

Atualmente, as NBs de superfície podem ser detectadas utilizando diferentes técnicas de microscopia, incluindo a microscopia de força atômica (MFA) (HAMPTON; NGUYEN, 2010; LOU *et al.*, 2000) e a microscopia de fluorescência de reflexão interna total (MFRIT) (CHAN; OHL, 2012). Outras técnicas de caracterização de nanobolhas incluem dispersão dinâmica de luz (DLS), análise de rastreamento de nanopartículas (NTA), medição de massa de ressonância, microscopia confocal de varredura à laser, crio-microscopia eletrônica, dentre outros (CHEN *et al.*, 2020; FAVVAS *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2022; TAN; AN; OHL, 2020; ZHANG; GUO; ZHANG, 2020).

### **2.4.3 Geração de nanobolhas**

Diversos métodos têm sido empregados na geração de nanobolhas (NBs), dentre eles: cavitação, eletrólise e nanomembranas (AHMED *et al.*, 2018a; DEMANGEAT, 2015; GURUNG; DAHL; JANSSON, 2016; ZIMMERMAN; TESAŘ; BANDULASENA, 2011). A cavitação é uma das técnicas mais conhecidas e empregadas na produção de nanobolhas (WU *et al.*, 2012).

A cavitação é o processo de formação, crescimento e subsequente colapso de cavidades de gás e/ou vapor em um fluido líquido (WESTWATER, 1964). De

acordo com sua origem, a geração de bolhas por cavitação pode ser classificada em quatro categorias: cavitação acústica (cavitação originada de um campo acústico); cavitação induzida por partículas; cavitação ótica (cavitação como resultado da dissipação de energia local, como por fótons de um laser) e; cavitação hidrodinâmica (AGARWAL; NG; LIU, 2011).

A eficiência e escalabilidade são características importantes a serem observadas na aplicação dos métodos de geração de NBs. Atualmente, existem vários geradores de NBs disponíveis comercialmente para emprego em escala laboratorial e piloto (THI PHAN *et al.*, 2020). Segundo Fan *et al.* (2010), dentre os tipos de cavitação, a hidrodinâmica é uma das mais fáceis de operar e escalonar, sendo também um dos métodos mais baratos e energeticamente eficientes de gerar cavitação com equipamentos simples e de baixo custo de manutenção. Para aplicações na área de engenharia, como flotação e tratamento de águas residuais, a cavitação hidrodinâmica ou acústica é o método mais popular para produzir nanobolhas em grande escala (TAO, 2022).

A cavitação hidrodinâmica pode ser alcançada por diferentes dispositivos hidráulicos (tubos de cavitação), como por exemplo, discos de orifício, válvulas de agulha, bocais e tubo Venturi. Este último tem sido amplamente utilizado devido a sua facilidade de operação, controle e desempenho (AGARWAL; NG; LIU, 2011; AHMADI *et al.*, 2014; FAN *et al.*, 2010). Durante a produção de nanobolhas por cavitação hidrodinâmica, a solução aquosa torna-se leitosa devido à presença de um grande número de microbolhas (FIGURA 6). A solução volta a ficar transparente à medida que as microbolhas ascedem por flutuabilidade e colapsam na superfície, logo após cessar o processo de cavitação (TAO, 2022). Entretanto, as NBs continuam em solução.

O tamanho das bolhas geradas na cavitação hidrodinâmica pode ser governado, por exemplo, pelo controle de pressão e temperatura do fluido. NBs com diâmetro médio de 130 – 529 nm foram geradas em água via tubo venturi (FAN *et al.*, 2010; AHMADI; DARBAN, 2013). Etchepare *et al.* (2017) relataram a geração de NBs com diâmetro médio de 150 – 200 nm aplicando o fenômeno de cavitação hidrodinâmica em bombas multifásicas. Pesquisas têm sido realizadas para investigar o efeito de diferentes tipos de gases (ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) na geração de NBs. Os resultados mostram que os tamanhos das bolhas ultrafinas estavam correlacionados

com a solubilidade do gás em água (FAN *et al.*, 2010; MICHAILIDI *et al.*, 2020; POURKARIMI; REZAI; NOAPARAST, 2017).

Figura 6 – Solução aquosa de aspecto leitoso provocado pela presença de microbolhas originadas no processo de produção de nanobolhas por cavitação hidráulica.



Fonte: Manuel Pereira da Costa.

Uma forma de identificar se nanobolhas foram produzidas é por meio da observação do efeito Tyndall (MICHAILIDI *et al.*, 2020). O efeito Tyndall, característico dos coloides ou soluções coloidais, consiste na dispersão da luz pelas partículas coloidais ou partículas em suspensão. A dispersão da luz deve-se ao fato do tamanho das partículas ( $10^{-9}$  a  $10^{-6}$  m) ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação visível (entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$  m) (LIMA, 2014). De acordo com este fenômeno, uma solução aquosa contendo NBs espalha a luz do feixe de laser indicando a existência destas (LIU *et al.*, 2016; NAJAFI *et al.*, 2007).

#### **2.4.4 Aplicações**

As propriedades e particularidades apresentadas pelas bolhas ultrafinas, tais como elevada estabilidade, longevidade e rápida fixação em superfícies hidrofóbicas (AZEVEDO *et al.*, 2016), têm ampliado o número de aplicações nos diversos campos da ciência e tecnologia.

Nanobolhas são capazes de remover proteínas que são adsorvidas em substratos, funcionando como agentes de limpeza que não são quimicamente perigosos ou que oferecem risco de danificar superfícies (LIU; CRAIG, 2009; LIU; WU; CRAIG, 2008). NBs também podem ser utilizadas no tratamento de água e efluentes

devido à sua capacidade de gerar radicais livres (AGARWAL; NG; LIU, 2011). Flotação, aeração, desinfecção e oxidação avançada têm sido os processos mais conhecidos no tratamento de água com a aplicação da tecnologia de NBs (ATKINSON *et al.*, 2019; AZEVEDO, A.; ETCHEPARE; RUBIO, 2017; TEMESGEN *et al.*, 2017). Hu e Xia (2018) evidenciaram a viabilidade de remediar águas subterrâneas usando micro e nanobolhas de ozônio. Senthilkumar *et al.* (2018), relatam melhora da qualidade da água por meio da redução na concentração de determinados compostos (nitrato, cromo, sulfito, fosfatos e sólidos) quando nanobolhas são utilizadas.

Na área médica as NBs têm sido utilizadas como agentes de contraste em ultrasonografia (MAI *et al.*, 2013; PERERA *et al.*, 2014; XING *et al.*, 2010), carreadores de drogas em células cancerígenas (LUKIANOVA-HLEB *et al.*, 2014b; LUKIANOVA-HLEB; MUTONGA; LAPOTKO, 2012), detecção de malária (LUKIANOVA-HLEB *et al.*, 2014a) e tratamento periodontal (HAYAKUMO *et al.* 2013; 2014).

Nos últimos anos, a aplicação da tecnologia de NBs em processo biológicos tem ganhado espaço. O uso de NBs na água mostrou-se eficaz na aceleração do metabolismo de animais e vegetais (DAHRAZMA *et al.*, 2019; EBINA *et al.*, 2013; IJIMA *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2016). Alfaces cultivadas em solução contendo NBs apresentaram melhor crescimento que as culturas em meio tradicional (PARK; KURATA, 2009). Sementes de diferentes plantas, incluindo tomate, cenoura e alface, tiveram maior taxa de germinação quando água contendo NBs foi utilizada (AHMED *et al.*, 2018b).

No campo da aquicultura algumas pesquisas também vêm sendo realizadas. Estudos mostram que o uso da tecnologia de NBs é capaz de aumentar rapidamente a concentração de OD na água, além de melhorar o desempenho de peixes e camarões cultivados (EBINA *et al.*, 2013; JAINONTEE *et al.*, 2019; MAHASRI *et al.*, 2018; RAHMAWATI *et al.*, 2021; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018). A utilização de bolhas ultrafinas de oxigênio em sistemas aquícolas, pode contribuir para a melhoria da qualidade da água de cultivo e aumentar a produtividade por meio do aumento na densidade de estocagem dos indivíduos.

Apesar de todos os aspectos positivos apresentados por esta tecnologia, a utilização de bolhas ultrafinas de oxigênio em sistemas aquícolas no Brasil ainda não é uma realidade. Esta é uma área que vem emergindo rapidamente ao redor do mundo, incluindo aplicações comerciais. A utilização de bolhas ultrafinas pode ser considerada a nova fronteira na produção de alimentos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local de realização dos experimentos

A pesquisa foi desenvolvida na Estação de Aquicultura Prof. Dr. Raimundo Saraiva da Costa (FIGURA 7), do Departamento de Engenharia de Pesca, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará (DEP/CCA/UFC), *Campus do Pici*, e aprovada pela Comissão de Ética no Uso de Animais de Produção (CEUAP/UFC) sob protocolo n° 2211202101. A pesquisa constitui de duas etapas experimentais (1 e 2).

Figura 7 – Vista aérea da Estação de Aquicultura da Universidade Federal do Ceará - *Campus do Pici*.



Fonte: Universidade Federal do Ceará (UFC).

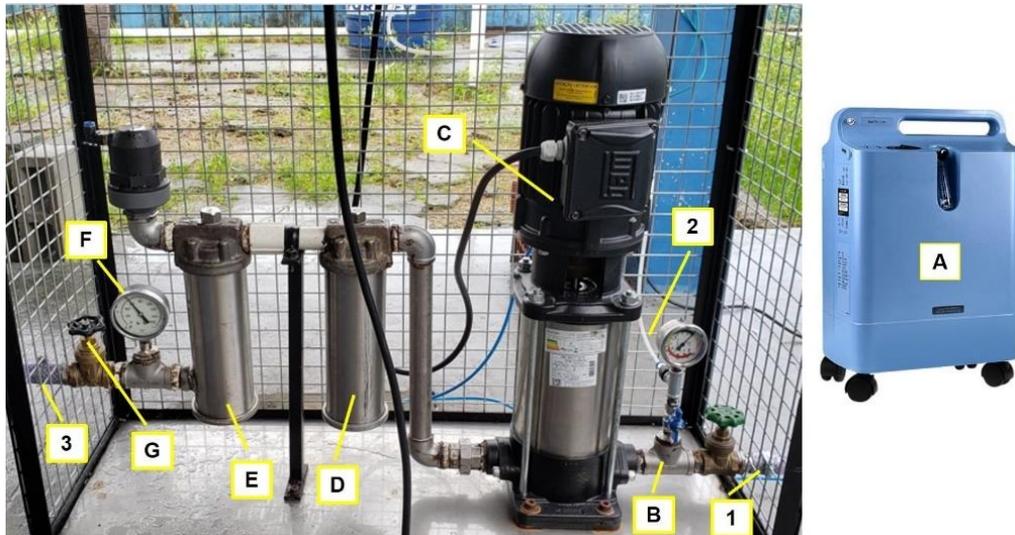
#### 3.2 Experimento 1 – Teste de saturação da água com oxigênio dissolvido

Um teste de saturação foi realizado, sob condição anóxica, para demonstrar a capacidade que o gerador de bolhas ultrafinas possui em incorporar o oxigênio na água. Este primeiro experimento, foi realizado em um tanque de alvenaria (tanque de teste) com volume útil de 2,0 m<sup>3</sup> abastecido com água limpa proveniente da companhia estadual de abastecimento. Para a completa desoxigenação da água do tanque de teste utilizou-se a proporção de 10 mg/L de sulfito de sólido (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)

para cada 1 mg/L de oxigênio dissolvido, juntamente com 0,1 mg do catalisador cloreto de cobalto ( $\text{CoCl}_2$ ) para cada litro de água do tanque de teste (VINATEA; CARVALHO, 2007). Após a concentração de OD atingir o valor de 0,0 mg/L, a temperatura da água foi aferida, o sistema gerador de bolhas ultrafinas foi acionado e o teste de saturação iniciado. Com o auxílio de uma sonda multiparâmetros (Aquaread AP-800) os valores de OD e de temperatura foram aferidos a cada minuto durante um intervalo de 60 minutos. A comprovação da existência das bolhas foi verificada por meio da observação da dispersão da luz laser causada pela presença das bolhas ultrafinas na solução (efeito Tyndall).

Foi utilizado um gerador de bolhas ultrafinas do tipo multiestágio, que atua segundo os princípios do cisalhamento mecânico e da cavitação hidráulica (FIGURA 8).

Figura 8 – Sistema gerador de bolhas ultrafinas por cisalhamento mecânico e cavitação hidráulica utilizado nos experimentos 1 e 2 da presente pesquisa.



Fontes: Autora e A: <https://www.philips.com.br/>

(1) entrada de água no gerador, (2) admissão de oxigênio oriundo do concentrador, (3) saída de água supersaturada, (A) concentrador de oxigênio (Philips everflo 5 L/min), (B) sistema de sucção de gás pelo efeito Venturi, (C) bomba hidráulica de eixo vertical (3 cv), (D) misturador estático de água e gás, (E) sistema de eliminação de macrobolhas, (F) manômetro e (G) registro para controle de pressão e vazão.

### 3.3 Experimento 2 – Aplicação da tecnologia de produção de bolhas ultrafinas na criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico.

#### 3.3.1 Descrição do sistema aquapônico

No segundo experimento, foram avaliadas duas formas de incorporação de oxigênio dissolvido (tratamentos) na água de criação da tilápia do Nilo em sistema aquapônico: 1) aeração convencional realizada por um compressor de ar do tipo radial (1,5 cv), ligado a mangueiras porosas (AC) (FIGURA 9); 2) injeção de oxigênio por meio do gerador de bolhas ultrafinas (BUF) (FIGURA 8).

Figura 9 – Mangueira porosa utilizada na aeração convencional dos tanques de criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico.

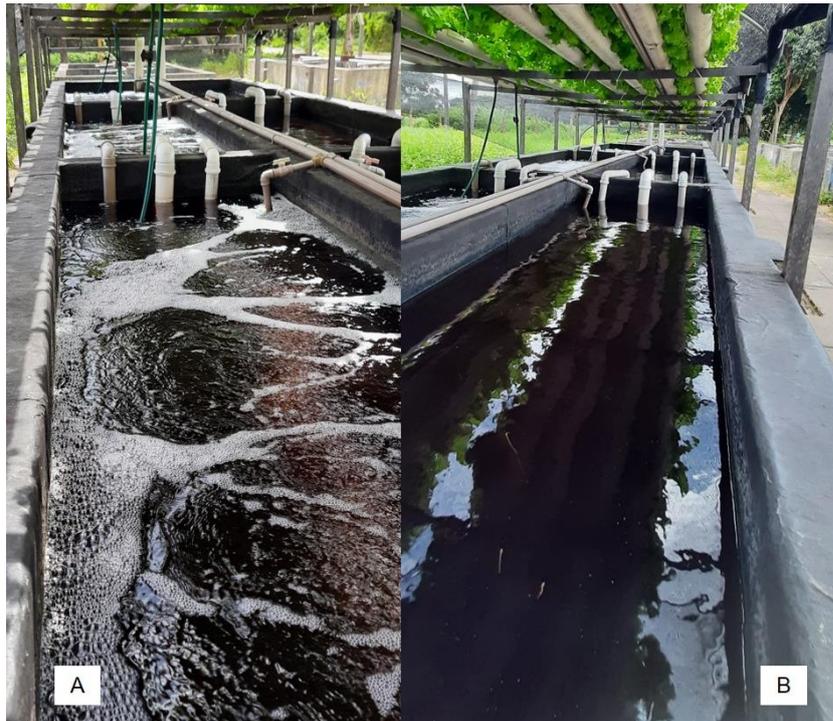


Fonte: <https://altamar.com.br/>

As formas de incorporação de oxigênio dissolvido foram testadas em dois sistemas aquapônicos independentes (FIGURA 10). Cada sistema operava em regime de recirculação de água (24 horas/dia) e contava com: um componente hidropônico; três tanques retangulares de alvenaria de aproximadamente 2,0 m<sup>3</sup> (repetições); um decantador circular de polietileno com volume total de 500 L contendo 10 escovas filtrantes; um reator biológico circular de polietileno com volume total de 500 L, contendo 300 L de mídia biológica (BIOTECH 500) (FIGURA 11A); uma torre desgaseificadora; um filtro mecânico pressurizado (CUBOS) ligado a uma bomba submersa de 0,5 cv; uma bomba submersa de 10.000 L/h para circulação da água entre as unidades; e suas respectivas formas de incorporação de oxigênio dissolvido. O sistema com a utilização de bolhas ultrafinas contava ainda com uma unidade adicional (tanque circular de polietileno de 500 L) que recebia a água supersaturada

em oxigênio que saía do sistema gerador de bolhas ultrafinas (caixa incorporadora) (FIGURA 11B). Desta unidade, a água rica em oxigênio era distribuída aos tanques de criação de tilápia. O volume de água (m<sup>3</sup>) de cada sistema foi ajustado para que não houvesse diferença.

Figura 10 – Tanques de criação de tilápia do Nilo (*O. niloticus*). A: aeração convencional por mangueiras porosas (AC) e B: oxigenação por bolhas ultrafinas (BUF).



Fonte: Autora.

Figura 11 – Unidades utilizadas no sistema aquapônico. A: reator com mídias biológicas utilizado em ambos sistemas (AC e BUF) e B: caixa receptora com água supersaturada de oxigênio (BUF).



Fonte: Autora.

O dimensionamento do reator biológico de cada sistema foi realizado conforme Timmons, Ebeling e Piedrahita (2009), considerando uma taxa média de remoção de amônia da ordem de 0,4 g/m<sup>2</sup>/dia, uma biomassa final estimada de 15 kg/tanque, uma taxa de arraçoamento diária de 5%, uma ração contendo 32% de proteína bruta e a superfície específica da mídia biológica de 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> informada pelo fabricante.

Anteriormente à montagem do sistema, foi realizada a maturação das mídias biológicas. Com este objetivo, 600 L desta mídia foram estocadas em um tanque de 2,0 m<sup>3</sup> e mantidas sobre forte aeração. Inicialmente, foram adicionados 5,9 g de cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl) ao tanque de maturação de modo a alcançar uma concentração de 1 mg/L de nitrogênio amoniacal total (NAT). Foi realizada, então, a medição diária da concentração de NAT e nitrito, fazendo-se, sempre que necessário, a reposição de cloreto de amônio de modo que a concentração se elevasse novamente para 1 mg de NAT/L. As mídias biológicas foram consideradas maturadas quando a concentração de NAT e de nitrito atingiram 0,0 mg/L em 24 h.

Os componentes hidropônicos do tipo NFT ficavam localizados acima dos tanques de criação das tilápias do Nilo. Cada componente foi composto por 4 calhas feitas de tubos PVC de 100 mm cortados longitudinalmente. As alfaces ficavam fixas ao componente hidropônico por meio de uma estrutura de PVC que ficava acoplada às calhas de modo que permitissem o ajuste da distância entre as plantas na medida em que estas se desenvolviam (FIGURA 12).

Figura 12 – Calhas do componente hidropônico com estruturas para suporte das alfaces (*Lactuca sativa*).



Fonte: Autora.

Os tanques de criação da tilápia no Nilo, bem como os componentes hidropônicos, foram cobertos com tela do tipo sombrite (50%) para proteção contra radiação solar direta e predadores (FIGURA 13).

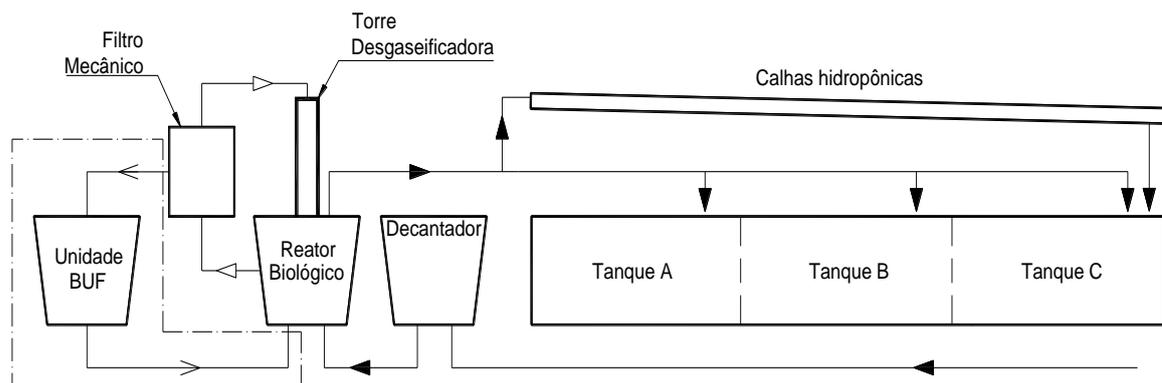
Figura 13 – Vista lateral do sistema aquapônico coberto com tela do tipo sombrite.



Fonte: Autora.

Na Figura 14 podemos observar uma representação esquemática das várias circulações de água existentes no sistema aquapônico utilizado na presente pesquisa.

Figura 14 – Representação esquemática do sistema aquapônico utilizado na presente pesquisa evidenciando as circulações de água.



— — — Unidade incorporadora de bolhas ultrafinas de oxigênio. Presente apenas no tratamento BUF.

Fonte: Autora.

As setas cheias representam a grande circulação (reator biológico – tanques aquícolas e calhas hidropônicas – decantador – reator biológico); as setas vazadas representam a pequena circulação (reator biológico – filtro mecânico – torre desgaseificadora – reator biológico); as setas abertas representam a pequena circulação para admissão de bolhas ultrafinas de oxigênio (presente somente no tratamento BUF).

As duas circulações descritas a seguir são comuns aos tratamentos BUF e AC. Considerando como ponto de partida o reator biológico, foram implementadas a grande circulação e a pequena circulação. Na primeira, uma bomba submersa de 10.000 L/h foi conectada a uma tubulação que sofria derivações para alimentar as 4 calhas hidropônicas e os 3 tanques aquícolas individualmente. As calhas hidropônicas presentes em cada tratamento vertiam sua água para o Tanque C, a partir do qual percorria os Tanques B e A até chegar ao decantador. Após passar pelas escovas filtrantes desta última unidade, a água retornava ao reator biológico. Na pequena circulação, uma bomba submersa de 0,5 cv bombeava a água recém chegada ao reator biológico, advinda do decantador (grande circulação), e a forçava contra o material filtrante do filtro mecânico pressurizado. Após filtrada, a água percorria verticalmente, no sentido descendente, a torre desgaseificadora localizada sobre o reator biológico.

Adicionalmente, para o tratamento BUF, uma segunda pequena circulação foi implementada derivando a água do filtro mecânico para a caixa incorporadora do gerador de bolhas ultrafinas. A água supersaturada em oxigênio retornava ao reator biológico de onde era bombeada (bomba de 10.000 L/h) para os tanques e para as calhas hidropônicas na grande circulação.

Na manutenção do sistema, os filtros mecânicos pressurizados foram retravados diariamente para a retirada do excesso de material particulado retido pelo meio filtrante. Duas vezes por semana, os decantadores foram limpos para retirar os sólidos decantados. Durante o período experimental não houve renovação de água, de modo que apenas o volume perdido pela limpeza dos filtros e decantadores, evaporação e evapotranspiração das plantas foi repostado.

### **3.3.2 Tilápia no Nilo (*Oreochromis niloticus*)**

Foram utilizados juvenis masculinizados da espécie tilápia do Nilo (*O. niloticus*), linhagem GIFT (*Genetic Improvement of Farmed Tilapia*), provenientes de um criatório comercial localizado no município de Cascavel – CE.

Os juvenis de tilápia foram transportados do criatório até a estação em sacos plásticos contendo água e oxigênio (95%). Os peixes foram aclimatados e distribuídos em 3 tanques retangulares (2 m<sup>3</sup> cada), com aeração constante (compressor de ar) e mantidos nesse sistema por 7 dias para que se adaptassem às

condições laboratoriais. Durante esse período foram alimentados com ração comercial, contendo 32% de proteína bruta, ao nível de 5,5% da biomassa estocada.

Para a pesquisa (experimento 2) utilizou-se um total de 324 peixes com peso médio de  $61,7 \pm 13,5$  g. Cada unidade experimental foi estocada com 54 peixes que foram criados por 7 semanas. Os indivíduos foram alimentados quatro vezes ao dia (9:00, 12:00, 14:00 e 16:00 h) com ração comercial contendo 32% de proteína bruta. O cálculo da oferta diária de ração foi efetuado de acordo com os resultados das biometrias e da indicação do fabricante. Nas biometrias realizadas a cada 7 dias foram aferidos peso e comprimento total, de uma amostra de 15 peixes de cada tanque, utilizando balança digital (0,01 g) e paquímetro (FIGURA 15), respectivamente.

Figura 15 – Aferição do comprimento total de um exemplar de tilápia do Nilo (*O. niloticus*) utilizando paquímetro durante a realização de biometria.



Fonte: Autora.

### 3.3.2.1 Parâmetros de desempenho zootécnico e índices viscerais

Ao final do período experimental os parâmetros zootécnicos da tilápia do Nilo foram avaliados. A partir dos dados de peso (g), comprimento total (cm), ração consumida (kg) e número de indivíduos, foram calculados (EQUAÇÕES 1 – 8):

$$\text{Peso médio (g)} = \frac{\Sigma \text{ pesos individuais (g)}}{n^{\circ} \text{ de indivíduos}} \quad (1)$$

$$\text{GPMD (g)} = \frac{\text{peso médio final (g)} - \text{peso médio inicial(g)}}{\text{n}^\circ \text{ de dias}} \quad (2)$$

$$\text{Biomassa (g)} = \text{Peso médio (g)} \times \text{n}^\circ \text{ de indivíduos} \quad (3)$$

$$\text{Ganho de biomassa (kg)} = \text{Biomassa final (kg)} - \text{Biomassa inicial (kg)} \quad (4)$$

$$\text{TCE (\%/dia)} = \left[ \frac{\ln \text{ peso médio final (g)} - \ln \text{ peso médio inicial (g)}}{\text{n}^\circ \text{ de dias}} \right] \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Sobrevivência (\%)} = \frac{\text{n}^\circ \text{ final de indivíduos}}{\text{n}^\circ \text{ inicial de indivíduos}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Fator de conversão alimentar (FCA kg/kg)} = \frac{\text{Consumo total de ração (kg)}}{\text{Ganho de biomassa (kg)}} \quad (7)$$

$$\text{Fator de condição alométrico (\%)} = \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Comprimento total}^b \text{ (cm)}} \times 100 \quad (8)$$

Nas quais, GPMD = ganho de peso médio diário; TCE = taxa de crescimento específico; b = coeficiente de alometria obtido pela equação de regressão da relação comprimento/peso (LE CREN, 1951). Para obtenção da regressão da relação comprimento/peso, as medidas de comprimento total e peso foram plotadas no eixo x e y respectivamente, gerando uma curva que representou a dispersão dos pontos de intersecção entre os eixos x e y, descrito pela equação:  $y = a x^b$ .

Para a avaliação dos índices viscerais (EQUAÇÕES 9 - 11) 15 tilápias de cada tratamento (BUF e AC) foram eutanasiadas por meio de imersão em uma solução contendo água e eugenol (óleo de cravo) na concentração de 400 mg/L (tanque de anestesia) (MOREIRA, 2009). Após a ausência de batimentos operculares, a falta de reação a estímulos e o afundamento dos animais no tanque de anestesia, foi aguardado um período de 15 minutos para assegurar a morte dos animais. Após a eutanásia, os peixes foram eviscerados sendo aferidos o peso do fígado e das vísceras usando balança digital de precisão (0,001 g) e o comprimento do intestino usando régua (0,1 cm). Anteriormente ao processo de abate, as tilápias foram mantidas em jejum por 24 horas.

$$\text{Índice hepatossomático (IHS \%)} = \frac{\text{peso do fígado (g)}}{\text{peso total do peixe (g)}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Índice víscero somático (IVS \%)} = \frac{\text{peso das vísceras (g)}}{\text{peso total do peixe (g)}} \times 100 \quad (10)$$

$$\text{Quociente intestinal (QI)} = \frac{\text{comprimento do intestino (cm)}}{\text{comprimento total do peixe (cm)}} \quad (11)$$

### 3.3.3 Alface (*Lactuca sativa*)

As alfaces foram produzidas na própria estação a partir de sementes peletizadas adquiridas em loja especializada. A cultivar de alface utilizada foi a do tipo verde crespa variedade BRS Leila, tolerante ao pendoamento.

A germinação das sementes foi realizada em células (1,9 x 1,9 x 2,0 cm) de espuma fenólica (*Green-up*) que é um substrato inerte, de pH neutro, indicado para a semeadura de cultivares folhosas (FIGURA 16A). Foram semeadas um total de 240 sementes, uma por célula, levando em consideração a porcentagem de germinação de 95% indicada pelo fabricante. As placas de espuma já semeadas foram acondicionadas em bandejas plásticas, irrigadas com água desclorada, mantidas sob temperatura ambiente e abrigadas da luz solar direta por 24 h. Após este período, foi observado o rompimento do pélete e as bandejas plásticas foram transferidas para uma estufa de germinação (FIGURA 16B), onde ficaram por 48 h.

Figura 16 – A: sementes de alface (*L. sativa*) semeadas em espuma fenólica e B: estufa de germinação.



Fonte: Autora.

Três dias após a semeadura as plântulas de alface (FIGURA 17), que possuíam duas folhas, foram transferidas para os sistemas aquapônicos com seus respectivos métodos de incorporação de oxigênio (AC e BUF). Cada componente hidropônico (10,24 m<sup>2</sup> de área) recebeu 114 alfaces, resultando em 27 a 30 plantas por calha hidropônica (aproximadamente 11 plantas/m<sup>2</sup>).

Figura 17 – Plântulas de alface (*L. sativa*) cresspa cultivar BRS Leila fixas em espuma fenólica.



Fonte: Autora.

Para prover sustentação às plântulas nas calhas hidropônicas, estas foram inseridas em copos plásticos perfurados (FIGURA 18). Além da sustentação, os copos também evitavam que as plântulas fossem arrastadas pela corrente de água que fluía pelas calhas hidropônicas.

Figura 18 – Calhas hidropônicas utilizadas no sistema aquapônico, com detalhe da plântula acoplada à copo plástico.



Fonte: Autora.

### 3.3.3.1 Parâmetros de desempenho fitotécnico

Para a avaliação do desempenho fitotécnico, foram selecionadas aleatoriamente 20 cultivares de alfaces de cada tratamento (5 de cada calha). Os parâmetros de desenvolvimento avaliados foram:

- 1) Massa fresca total – MFT (g);
- 2) Massa fresca da parte aérea – MFPA (g);
- 3) Massa fresca da raiz – MFR (g);
- 4) Massa fresca das folhas – MFF (g);
- 5) Diâmetro da cabeça (cm) (maior distância entre extremidades da planta);
- 6) Altura (cm) da parte aérea e;
- 7) Número total de folhas (maiores que cinco centímetros).

Os parâmetros de massa foram mensurados utilizando-se balança digital (0,01 g) e as medidas em centímetros aferidas utilizando uma régua (0,1 cm) (FIGURA 19). Também foi observado o aspecto das folhas no que se refere à presença de defeitos físicos (rugosidades e queimaduras) e/ou coloração anormal (amarelada). Além disso, foi feita a contagem do número total de plantas para a estimativa da sobrevivência após o final do ciclo de produção.

Figura 19 – A: determinação do diâmetro da cabeça (cm) e B: medição da massa fresca total – MFT (g) de um exemplar de alface (*L. sativa*).



Fonte: Autora.

As folhas, caules e raízes foram posteriormente submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, durante 72 horas, para a determinação das massas secas: massa seca das folhas – MSF (g); massa seca do caule – MSC (g) e massa seca da raiz – MSR (g). Pelo somatório da MSF e MSC foi

determinada a massa seca da parte aérea – MSPA e somando MSPA e MSR, obteve-se a massa seca total – MST (g). Os pesos secos foram determinados usando balança digital de precisão (0,001 g).

### **3.3.4 Qualidade da água**

Diariamente foram aferidos, nos períodos da manhã (8:00 h) e da tarde (16:00 h), a concentração de oxigênio dissolvido (mg/L) e a temperatura (°C) da água com auxílio de um oxímetro (AKSO AK-87).

Semanalmente foram analisados: pH (medidor de pH mPA210 - MS Tecnopon), nitrogênio amoniacal total (NAT), amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ), salinidade (refratômetro), condutividade elétrica (CE, condutivímetro CD-850), dióxido de carbônico ( $\text{CO}_2$ ), alcalinidade total, dureza total, cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e fosfato ( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ). Estas análises foram realizadas no Laboratório de Ciência e Tecnologia Aquícola (LCTA) vinculado ao Departamento de Engenharia de Pesca (DEP/CCA/UFC). As determinações dos parâmetros de qualidade de água semanais foram realizadas de acordo com as metodologias descritas por Sá (2015). A concentração de amônia não-ionizada foi obtida de maneira indireta por meio do cruzamento dos dados obtidos de NAT e os valores de pH e temperatura tabelados.

Para manutenção da alcalinidade total da água nos tanques de criação de tilápia do Nilo foi aplicado calcário dolomítico, composto por  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , sempre que necessário. Para manter concentrações de ferro que não limitassem o desenvolvimento das hortaliças, quelato de ferro (Fe 6% – EDDHA 50%) foi adicionado na água dos sistemas na concentração de 2 mg  $\text{Fe}^{2+}/\text{L}$ .

Na apresentação dos resultados, os valores obtidos para condutividade, cálcio, magnésio, ferro, fosfato e nitrato serão apresentados separadamente dos demais. Estes estarão agrupados como sendo requisitos de crescimento vegetal (seção 4.2.1.2).

### **3.3.5 Análise estatística dos dados**

Para a análise dos dados relativos ao teste de saturação da água com oxigênio dissolvido (etapa 1), foi utilizada a análise de regressão linear:  $y = ax + b$ .

Os dados obtidos na etapa 2 da presente pesquisa foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e quanto à homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Posteriormente, foram avaliados estatisticamente aplicando-se o teste  $t$  de Student para amostras independentes para comparação entre suas médias. Esta análise foi realizada utilizando-se o Programa de Aplicações Estatísticas nas Áreas das Ciências Biomédicas (BioEstat, versão 5.3) ao nível de significância de 5% (AYRES; AYRES JÚNIOR, 2007).

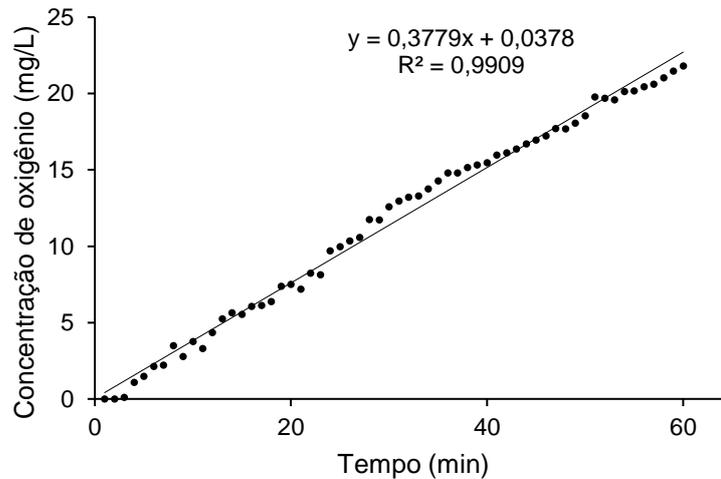
Os dados de sobrevivência, expressos em porcentagem, foram convertidos para arco seno antes de serem estatisticamente analisados. Os gráficos e as tabelas foram elaborados utilizando-se planilhas eletrônicas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimento 1 – Teste de saturação da água com oxigênio dissolvido

Durante toda a execução do experimento 1, a temperatura da água do tanque de teste permaneceu constante em 27,8 °C. Conforme pode ser observado na Figura 20, a concentração de OD apresentou comportamento aproximadamente linear ( $R^2=0,9909$ ) durante 60 min. Neste período, o OD aumentou sua concentração de 0,0 mg/L para 21,8 mg/L, que corresponde a uma saturação de 277,52%. Foram necessários aproximadamente 21 min para que o gerador de bolhas ultrafinas atingisse 100% da saturação de oxigênio, 7,8552 mg/L para a temperatura de 27,8 °C.

Figura 20 – Aumento da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo durante o teste de saturação de oxigênio.



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos no teste de saturação evidenciam a elevada capacidade que as bolhas ultrafinas possuem em solubilizar e estabilizar o oxigênio na água, aumentando rapidamente a concentração de OD. Outros pesquisadores também demonstraram uma rápida incorporação de oxigênio na água usando nanobolhas (NBs). Ebina *et al.* (2013) elevaram a concentração do oxigênio em água destilada de 7,7 mg/L para 31,7 mg/L após 30 minutos de funcionamento de um gerador de NBs. Mahasri *et al.* (2018), usando a tecnologia de NBs por 30 min, observaram um aumento na concentração de 6,5 mg/L para 25,0 mg/L de OD.

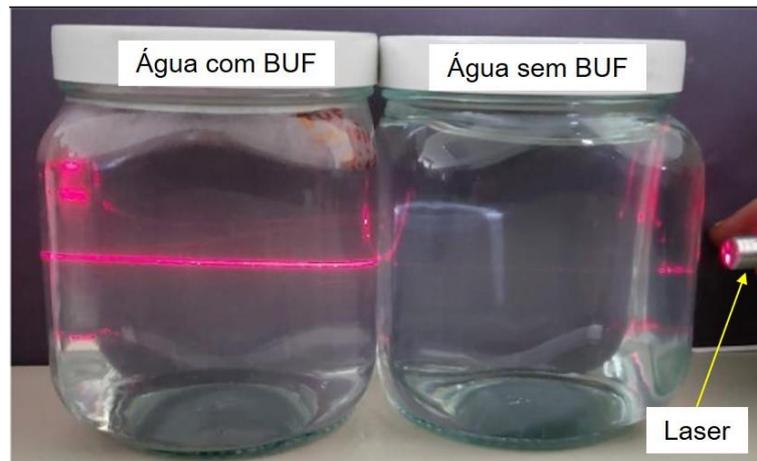
Ushikubo *et al.* (2010), utilizando um gerador de micro e nanobolhas, obtiveram uma concentração de 36,9 mg/L de OD em água ultrapura à 20 °C, utilizando oxigênio com pureza de 99,999%.

As diferenças observadas nas concentrações de OD para os diferentes estudos deve-se à fatores como: características apresentadas pelo gerador de bolhas (potência, método gerador de bolhas etc.); características e volume da água utilizada (temperatura, matéria orgânica etc.); e pureza do oxigênio (%) incorporado. Na presente pesquisa, o concentrador de oxigênio utilizado produz oxigênio concentrado ( $93\% \pm 3\%$ ) a partir do ar ambiente e a temperatura da água do tanque de teste foi de 27,8 °C. Maiores concentrações de OD poderiam ser obtidas no teste de saturação se fosse utilizado um oxigênio de maior pureza e se a temperatura da água fosse mais baixa, já que esta influencia na solubilidade do oxigênio (BOYD, 1998).

A alta concentração de oxigênio dissolvido observada durante o teste de saturação, pode ser explicada pelas várias propriedades físico-químicas e mecânicas notáveis que as bolhas ultrafinas apresentam. Por possuírem tamanho diminuto ( $< 1 \mu\text{m}$ ) (ISO, 2017) estas bolhas exibem um movimento horizontal em soluções aquosas, o que as impede de subir à superfície e estourar (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018). Além disso, as bolhas ultrafinas também possuem uma alta taxa de dissolução de gás e grande área específica (AGARWAL; NG; LIU, 2011; AHMED *et al.*, 2018a; TAKAHASHI *et al.*, 2003; UCHIDA *et al.*, 2011), o que promove maiores concentrações de OD na água.

A presença de bolhas ultrafinas durante o teste de saturação foi confirmada não apenas pela alta concentração de oxigênio presente na água, mas também por meio da observação do efeito Tyndall. Este é um fenômeno bastante observado em soluções coloidais e é usado como prova para sustentar a presença de bolhas ultrafinas em soluções aquosas (MICHAILIDI *et al.*, 2020). A água contendo bolhas ultrafinas (BUF) dispersou a luz, sendo facilmente visualizado o trajeto do feixe laser, enquanto na água sem BUF não é possível observar este trajeto, já que não há espalhamento da luz (FIGURA 21). Esta observação também foi descrita por outros pesquisadores e é tida como válida para identificar a presença de bolhas ultrafinas na água (LIU *et al.*, 2016; MICHAILIDI *et al.*, 2020 NAJAFI *et al.*, 2007; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

Figura 21 – Observação do efeito Tyndall. À esquerda: água com BUF e a dispersão do feixe laser, sendo possível observar o seu trajeto. À direita: água sem BUF e sem o espalhamento do feixe laser.



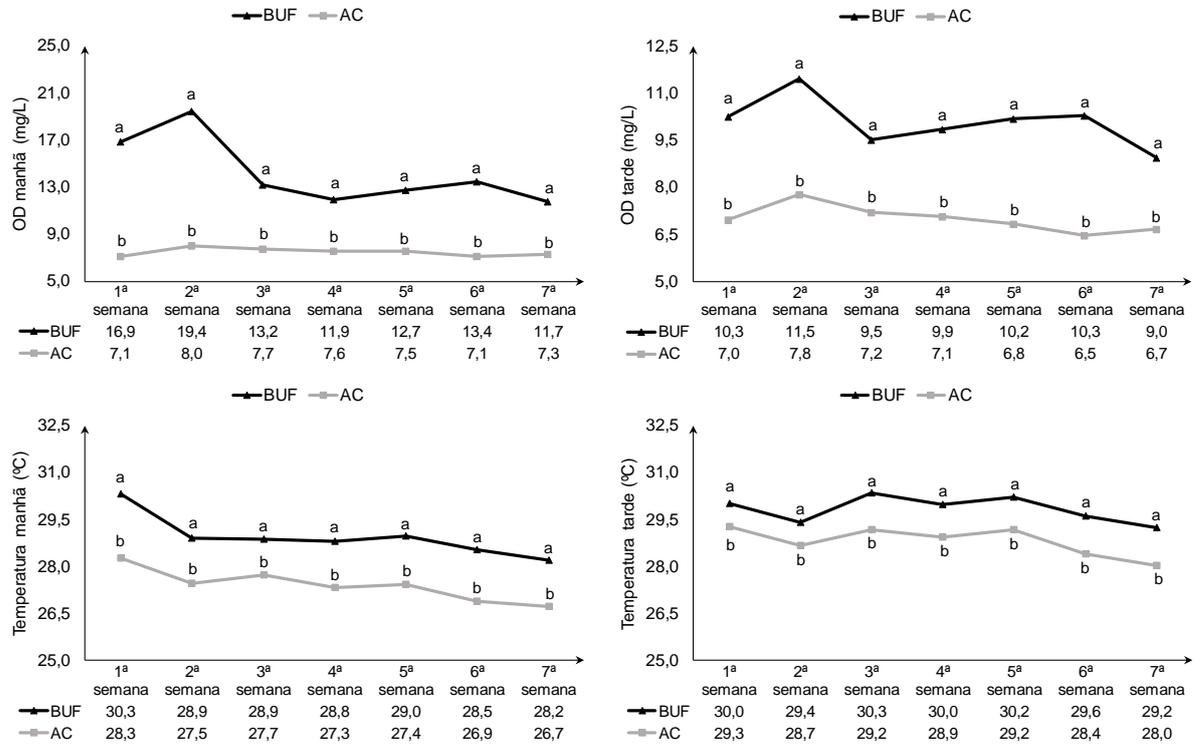
Fonte: Manuel Pereira da Costa.

## 4.2 Experimento 2 – Aplicação da tecnologia de produção de bolhas ultrafinas na criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico.

### 4.2.1 Qualidade da água

É possível observar na Figura 22 que os valores médios semanais da concentração de oxigênio dissolvido (OD), no período da manhã e da tarde, apresentaram valores significativamente maiores ( $p < 0,05$ ) para o tratamento com oxigenação por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF), quando comparado ao tratamento com aeração convencional (AC) ao longo de todo o período experimental. O maior valor médio de oxigênio observado em BUF foi de  $19,4 \pm 3,50$  mg/L (2ª semana) e o menor foi de  $11,9 \pm 1,59$  mg/L (4ª semana) no período da manhã. No período da tarde, para este mesmo tratamento, os valores máximo e mínimo foram, respectivamente, de  $11,5 \pm 4,20$  mg/L (2ª semana) e  $9,0 \pm 1,22$  mg/L (7ª semana). O tratamento AC, por outro lado, apresentou no período da manhã valor máximo de  $8,0 \pm 0,22$  mg/L (2ª semana) e mínimo de  $7,1 \pm 0,58$  mg/L (6ª semana). No período da tarde, ainda para o tratamento AC, o maior valor foi  $7,8 \pm 0,46$  mg/L (2ª semana) e menor de  $6,5 \pm 0,40$  mg/L (6ª semana).

Figura 22 – Valores médios semanais de oxigênio dissolvido no período da manhã e da tarde (OD manhã e OD tarde, respectivamente) e temperatura no período da manhã e da tarde, da água do sistema de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).



Fonte: Autora

Comportamento semelhante foi observado para a temperatura (FIGURA 22), com valores significativamente maiores ( $p < 0,05$ ) para BUF ao longo de todo o período experimental quando comparado ao tratamento AC, tanto no período da manhã quanto da tarde. Os valores máximo e mínimo da temperatura no período da manhã para o tratamento BUF foram, respectivamente, de  $30,3 \pm 0,43$  °C (1ª semana) e  $28,2 \pm 0,26$  °C (7ª semana). No período da tarde, a temperatura média no tratamento BUF atingiu o maior valor na 3ª semana ( $30,3 \pm 0,40$  °C) e menor na 7ª semana ( $29,2 \pm 0,35$  °C). No período da manhã para o tratamento AC, os valores máximo e mínimo foram de  $28,3 \pm 0,49$  °C (1ª semana) e  $26,7 \pm 0,22$  °C (7ª semana), respectivamente. No período da tarde, para este mesmo tratamento, a maior média semanal foi de  $29,3 \pm 0,26$  °C na 1ª semana e a menor de  $28,0 \pm 0,24$  °C na 7ª semana.

Na Tabela 1, é possível observar os valores médios de OD e temperatura nos períodos da manhã e da tarde considerando todo o período experimental (7

semanas). Observa-se diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) para todas combinações possíveis entre tratamentos e períodos avaliados.

Tabela 1 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do oxigênio dissolvido no período da manhã e da tarde (OD manhã e OD tarde, respectivamente) e temperatura no período da manhã e da tarde (Temp. manhã e Temp. tarde, respectivamente) da água do sistema de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).

	BUF	AC	p-valor (linha)
OD manhã (mg/L)	14,4 $\pm$ 3,1 <sup>A,a</sup>	7,5 $\pm$ 0,5 <sup>A,b</sup>	< 0,0001
OD tarde (mg/L)	10,1 $\pm$ 3,6 <sup>B,a</sup>	7,0 $\pm$ 0,6 <sup>B,b</sup>	< 0,0001
p-valor (coluna)	< 0,0001	< 0,0001	-
Temp. manhã (°C)	28,9 $\pm$ 1,1 <sup>C,a</sup>	27,4 $\pm$ 0,6 <sup>C,b</sup>	< 0,0001
Temp. tarde (°C)	29,8 $\pm$ 0,6 <sup>D,a</sup>	28,8 $\pm$ 0,6 <sup>D,b</sup>	< 0,0001
p-valor (coluna)	< 0,0001	< 0,0001	-

Valores com letras maiúsculas diferentes sobrescritas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para um mesmo parâmetro (OD e Temp.) entre os períodos da manhã e da tarde. Valores com letras minúsculas diferentes sobrescritas na mesma linha indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

No período da manhã os valores médios da concentração de OD para os tratamentos BUF e AC foram, respectivamente, de 14,4  $\pm$  3,1 mg/L e 7,5  $\pm$  0,5 mg/L ( $p < 0,0001$ ). Também foi observada diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) entre OD no período da tarde, cujos valores foram de 10,1  $\pm$  3,6 mg/L para BUF e 7,0  $\pm$  0,5 mg/L para AC. Além das diferenças entre os tratamentos, também foram observadas diferenças nos valores médios de OD ( $p < 0,0001$ ) entre os períodos da manhã e da tarde dentro um mesmo tratamento com maiores valores pela manhã.

Os valores médios de temperatura no período da manhã apresentaram diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) entre os tratamentos BUF (28,9  $\pm$  1,1 °C) e AC (27,4  $\pm$  0,6 °C). A diferença observada pela manhã foi mantida também no período da tarde ( $p < 0,0001$ ) com valores médios de 29,8  $\pm$  0,6 °C para o tratamento BUF e 28,8  $\pm$  0,6 °C para AC. Da mesma forma como observado para o OD, a temperatura também apresentou diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) quando comparados os períodos da manhã e da tarde dentro de um mesmo tratamento. Entretanto, os maiores valores de temperatura foram observados à tarde.

Maiores valores de temperatura foram observados no sistema com a utilização do gerador de bolhas ultrafinas (BUF) em ambos os períodos monitorados (manhã e tarde). Essa diferença observada entre os tratamentos ( $p < 0,0001$ ), deve-se ao fato do gerador de BUF funcionar acoplado a uma bomba hidráulica de 3,0 cv

(FIGURA 8C), que opera a uma pressão de 40 psi. Este fato, implica em uma liberação acentuada de calor, o que conseqüentemente eleva a temperatura da água.

Peixes são poiquilotérmicos, isto significa que mudanças na temperatura da água alteram a sua temperatura corporal (SCHMIDT-NIELSEN, 2013). Dessa forma, a temperatura desempenha um papel importante nos processos biológicos dos peixes, afetando diretamente a velocidade de reações químicas, o consumo de oxigênio e a atividade alimentar (ISLAM *et al.*, 2022). Além disso, muitos fatores químicos da água são afetados pela temperatura, como por exemplo a quantidade de amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) e a solubilidade do oxigênio na água (BOYD, 1998; RANDALL; TSUI, 2002). Nos vegetais, a alta temperatura pode reduzir a absorção de nutrientes essenciais, como o cálcio, induzir a floração precoce nas cultivares e aumentar o risco de contaminação por patógenos nas raízes (HAGER *et al.*, 2021; PINTO *et al.*, 2011).

Os valores médios de temperatura observados em ambos os tratamentos (BUF e AC) foram adequados aos três organismos envolvidos na aquaponia: peixes, vegetais e bactérias (TABELA 1). A tilápia do Nilo é uma espécie que apresenta melhor desempenho em água com temperatura entre 20 e 30 °C (DALSGAARD *et al.*, 2013). A faixa de temperatura ideal para o crescimento das bactérias e nitrificação é de 17 a 34 °C (THORARINSDOTTIR, 2015). Os vegetais, de uma forma geral, podem ser cultivados em água na faixa de 18 – 30 °C (SOMERVILLE *et al.*, 2014). Bliska Júnior e Honório (1996), recomendam que na hidroponia convencional a temperatura da solução nutritiva não deve ultrapassar os 30 °C. Valor que também deve ser levado em consideração nos sistemas aquapônicos.

O oxigênio dissolvido (OD) é um dos parâmetros de qualidade de água mais importantes e sua disponibilidade é geralmente o primeiro fator que limita a capacidade de carga em sistemas de recirculação aquícola (TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009). A manutenção de concentrações ideais de OD permite condições adequadas de crescimento dos animais, bom desempenho do reator biológico e uma maior biomassa de peixes no sistema (BADIOLA *et al.*, 2018).

No presente estudo, quando comparadas as duas formas de incorporação de oxigênio (BUF e AC), pode-se observar que a concentração de OD monitorada foi maior nos tanques com oxigenação por meio do gerador de bolhas ultrafinas (TABELA 1). As bolhas geradas pelo sistema convencional de aeração são em parte compostas por bolhas de maior tamanho (macrobolhas), que possuem menor estabilidade e

tempo de residência, pois tendem a subir rapidamente e estourarem na superfície da água (TAKAHASHI; CHIBA; LI, 2007; TEMESGEN et al., 2017). As macrobolhas também possuem baixa taxa de dissolução de gases (THI PHAN et al., 2020), o que impede que altas concentrações de OD sejam atingidas na água. Ademais, os métodos tradicionais de aeração são limitados na incorporação de OD, pois utilizam o ar atmosférico como fonte de oxigênio, que contém cerca de 21% de O<sub>2</sub> (BOYD, 1998). No sistema gerador de bolhas ultrafinas, o tamanho nanométrico das bolhas geradas confere uma alta estabilidade devido ao seu movimento horizontal em soluções aquosas, o que as impede de subir à superfície e estourar (SENTHILKUMAR et al., 2018; USHIKUBO et al., 2010). As bolhas ultrafinas também possuem uma alta taxa de dissolução de gás e uma maior área superficial, o que promove maiores concentrações de OD na água. Podemos inferir, então, que quanto menor o tamanho da bolha gerada mais eficiente o sistema aerador será. Dessa forma, o sistema gerador de BUF é mais eficiente na incorporação e estabilização do oxigênio na água que o sistema convencional de aeração (AC). Fato que explica a maior concentração de OD observada no sistema com utilização de BUF.

Após a 2ª semana do período experimental (FIGURA 22) pode-se observar que o oxigênio dissolvido no sistema com a utilização do gerador de BUF sofreu uma diminuição na sua concentração. A produção de BUF teve que ser ajustada, diminuindo-se a vazão do oxigênio do concentrador, para que níveis muito altos de OD não fossem alcançados e se tornassem prejudiciais. Além disso, adotou-se a prática de desligar o sistema gerador de BUF sempre que a concentração de OD excedia 15 mg/L. De acordo com Sá (2012), considera-se que a supersaturação de oxigênio dissolvido na água, até cerca de 300%, não causa males aos peixes cultivados. Acima desse nível, entretanto, os animais podem vir a morrer por embolia gasosa. Os níveis de oxigênio nos tanques com a utilização de BUF ficaram abaixo de 300% de saturação.

O acompanhamento da concentração de OD ao longo do experimento sugere que não é necessário que o sistema gerador de BUF funcione ininterruptamente. Para manter níveis constantes e desejáveis de oxigênio nos tanques de criação, o uso de sensores para monitoramento do oxigênio em tempo real seria uma boa alternativa. Os sensores indicariam quando o gerador de BUF precisaria ser acionado ou desligado, o que poderia gerar uma diminuição dos custos de produção, já que o sistema gerador de BUF só funcionaria quando necessário.

A diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) observada na concentração de OD nos períodos da manhã e da tarde (TABELA 1), em ambos os tratamentos (BUF e AC), deve-se à diferença significativa ( $p < 0,0001$ ) também observada na temperatura da água entre estes períodos. A elevação da temperatura diminui a solubilidade do oxigênio na água (BOYD, 1998), sendo esperado, dessa forma, maiores concentrações de OD em temperaturas mais baixas.

Para a obtenção do ótimo desempenho dos peixes os níveis de OD em sistemas aquapônicos e de recirculação devem ser mantidos próximos da saturação ou acima de 5 mg/L (DALSGAARD *et al.* 2013; MASSER; RAKOCY; LOSORDO, 1992; THORARINSDOTTIR, 2015). A concentração crítica de oxigênio dissolvido para a respiração radicular das alfaces é de 2,5 mg/L (CHUN; TAKAKURA, 1994). Baixas concentrações de OD afetam o crescimento e a saúde dos peixes, bem como reduz a eficiência das bactérias nitrificantes (ABDEL-TAWWAB *et al.*, 2014; ESPINAL; MATULIĆ, 2019). O processo de nitrificação deixa de ocorrer se concentrações abaixo de 2 mg/L forem observadas. Baixos níveis de oxigênio também podem prejudicar as raízes dos vegetais e interferir na absorção de nutrientes (SOMERVILLE *et al.*, 2014). Com base nesses valores, pode-se inferir que a concentração mínima de OD em sistemas aquapônicos deve ser definida pelo requisito de OD dos peixes. Dessa forma, no presente estudo, os valores de oxigênio dissolvido observados ao longo do período experimental (FIGURA 22) foram adequados ao desenvolvimento dos organismos, bem como para o bom funcionamento do reator biológico.

Conforme pode ser observado da Tabela 2, não foi observada diferença significativa entre os tratamentos BUF e AC para: salinidade,  $0,54 \pm 0,13$  ppt e  $0,53 \pm 0,14$  ppt ( $p = 0,3960$ ); dureza total,  $206,99 \pm 72,94$  mg CaCO<sub>3</sub>/L e  $194,39 \pm 69,62$  mg CaCO<sub>3</sub>/L ( $p = 0,2717$ ); e nitrogênio amoniacal total (NAT),  $0,13 \pm 0,05$  mg/L e  $0,13 \pm 0,07$  mg/L ( $p = 0,4908$ ), respectivamente.

Foi observada diferença significativa para os valores médios de dióxido de carbono ( $p = 0,0003$ ). A concentração deste composto foi de  $5,75 \pm 3,58$  mg/L para o tratamento BUF e  $2,80 \pm 0,94$  mg/L para o tratamento AC. Ambas as concentrações estão na faixa tolerável pela tilápia do Nilo, ficando bem abaixo do limite superior que é de 50 mg/L (DALSGAARD *et al.*, 2013), não acarretando prejuízo ao desenvolvimento dos animais. Apesar de ambos os tratamentos contarem com torre desgaseificadora, o tratamento AC apresentava maior agitação da superfície da água devido à presença intensa de macrobolhas nos tanques dos peixes, o que possibilitou

maior escape de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. No tratamento BUF, por outro lado, a ausência de agitação na superfície dos tanques (FIGURA 10) possibilitou um maior acúmulo deste gás.

O acúmulo de CO<sub>2</sub> em sistemas com troca mínima de água é bastante comum. Tanto a respiração dos peixes como o processo de nitrificação bacteriana aumentam os níveis de CO<sub>2</sub> no ambiente de cultivo. Durante o processo de nitrificação são formados 5,85 g de dióxido de carbono para cada grama de nitrogênio amoniacal oxidado à nitrato (TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009). Os níveis de CO<sub>2</sub> devem ser controlados nos ambientes de produção, pois a presença desse composto tanto tem a capacidade de alterar o pH da água (EQUAÇÃO 12), como de prejudicar os peixes por meio da diminuição da capacidade do sangue transportar oxigênio.

Tabela 2 – Valores médios (média ± sd) de salinidade, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade (Alc.), dureza total (DT), nitrogênio amoniacal total (NAT) e nitrito da água do sistema de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).

	BUF	AC	p-valor
Salinidade (ppt)	0,54 ± 0,13	0,53 ± 0,14	0,3960
CO <sub>2</sub> (mg/L)	5,75 ± 3,58 <sup>a</sup>	2,80 ± 0,94 <sup>b</sup>	0,0003
pH	7,38 ± 0,27 <sup>a</sup>	7,53 ± 0,22 <sup>b</sup>	0,0154
Alc. (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	58,90 ± 15,00 <sup>a</sup>	48,35 ± 13,52 <sup>b</sup>	0,0069
DT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	206,99 ± 72,94	194,39 ± 69,62	0,2717
NAT (mg/L)	0,13 ± 0,05	0,13 ± 0,07	0,4908
Nitrito (mg/L)	1,31 ± 0,58 <sup>a</sup>	0,96 ± 0,45 <sup>b</sup>	0,0122

Valores com letras diferentes sobrescritas na mesma linha indicam diferença significativa (p<0,05).

A maior concentração de CO<sub>2</sub> no tratamento BUF, influenciou diretamente o comportamento do pH e da alcalinidade. Devido este fato, foi observada diferença significativa (p<0,05) para ambos os parâmetros. Os valores médios para o pH foram de 7,38 ± 0,27 para o tratamento BUF e 7,53 ± 0,22 para o tratamento AC (p = 0,0154). Já os valores constatados para alcalinidade foram de 58,90 ± 15,00 mg CaCO<sub>3</sub>/L e 48,35 ± 13,52 mg CaCO<sub>3</sub>/L (p = 0,0069), respectivamente, para os tratamentos BUF e AC.

Conforme pode ser observado no equilíbrio químico abaixo (EQUAÇÃO 12), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em meio aquoso gera como produto o ácido carbônico

( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que, por sua vez, se dissocia em íon  $\text{H}^+$ , baixando o valor do pH, e íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), aumentando a alcalinidade (SÁ, 2012).



Também foi observada diferença significativa ( $p = 0,0122$ ) para os valores médios da concentração de nitrito. O tratamento BUF apresentou média de  $1,31 \pm 0,58$  mg/L, enquanto que no tratamento AC a média foi de  $0,96 \pm 0,45$  mg/L. Ao longo do período experimental a concentração de amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) permaneceu em 0,00 mg/L.

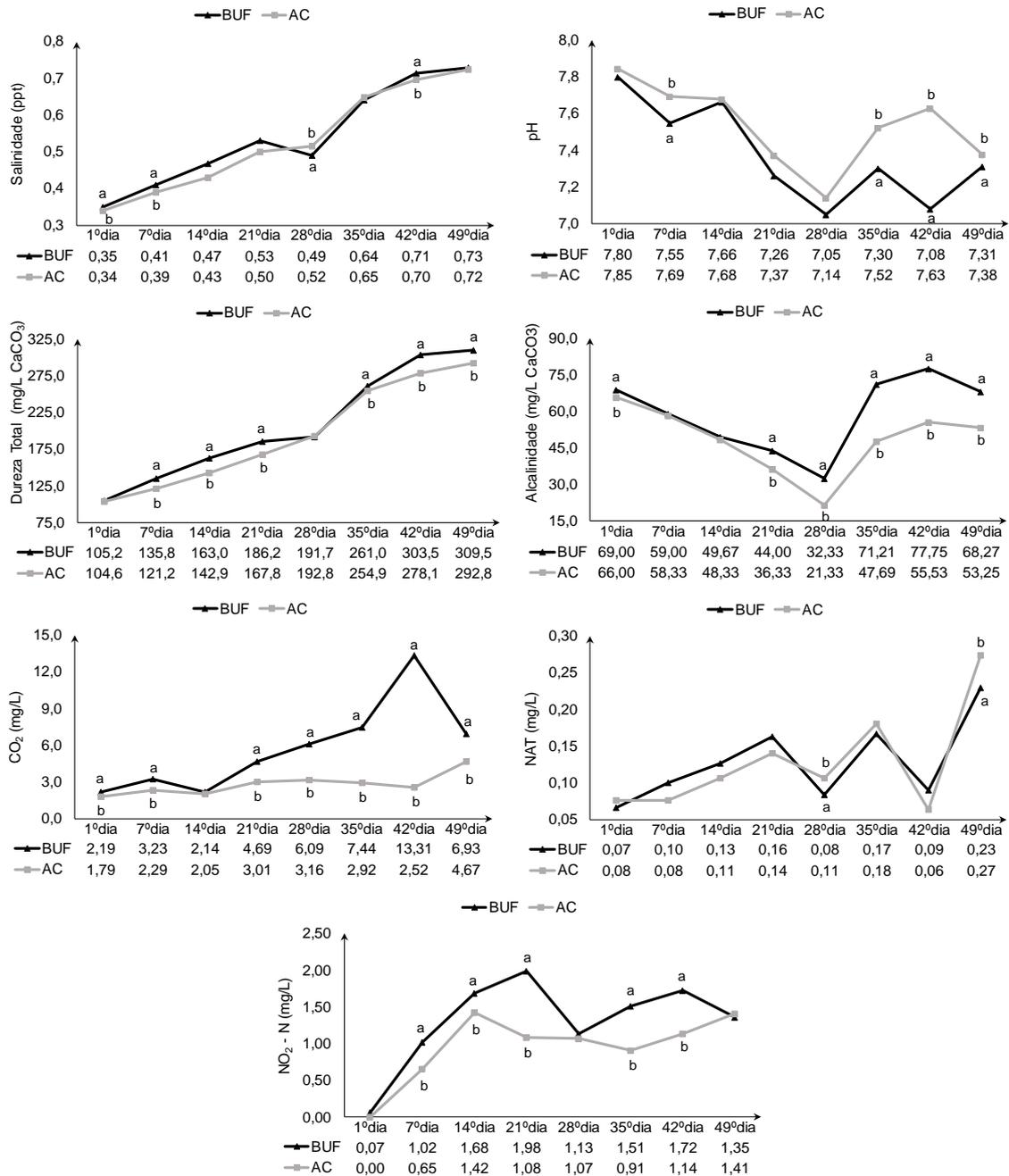
Na Figura 23 pode-se observar o comportamento semanal de alguns dos parâmetros de qualidade de água avaliados na presente pesquisa.

Salinidade e dureza total apresentaram tendência de crescimento contínuo durante todo o período experimental (FIGURA 23). Foi observada diferença significativa ( $p < 0,05$ ) nas concentrações médias de salinidade entre os tratamentos nos dias 1, 7, 28 e 42. A dureza total, por outro lado, apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ) em todos os dias de análise desse parâmetro com exceção do dia 28 ( $p = 0,3280$ ). O sistema aquapônico é uma modalidade de produção de alimentos em que se trabalha com troca de água mínima, o que ocasiona o acúmulo de certos sais. Além disso, as sucessivas correções de alcalinidade com a utilização de calcário dolomítico ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ) ocasionaram o aumento da concentração de cálcio e magnésio. Experimentos futuros avaliando a utilização de outros compostos para a correção da alcalinidade, como por exemplo o bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), poderão ser conduzidos a fim de evitar que a concentração de um único elemento químico na água possa, eventualmente, se tornar prejudicial aos organismos aquáticos e aos vegetais.

A concentração de dióxido de carbono na água apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos BUF e AC em todas as análises semanais, com exceção do dia 14 ( $p = 0,4185$ ). A partir deste último dia, observou-se um descolamento entre os valores das concentrações de  $\text{CO}_2$  dos dois tratamentos, sendo o valor máximo atingido no tratamento BUF com  $13,31 \pm 1,35$  mg/L no dia 42. Com o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  em BUF a partir do 14º dia, é possível observar uma diminuição acentuada do pH neste mesmo tratamento até atingir um valor próximo do mínimo de  $7,08 \pm 0,05$  também no dia 42. Ao mesmo tempo em que se pode observar uma concentração máxima de dióxido de carbono

(dia 42) no tratamento BUF, é possível observar um valor máximo de alcalinidade de  $77,75 \pm 0,57$  mg CaCO<sub>3</sub>/L.

Figura 23 – Valores médios semanais de salinidade, potencial hidrogeniônico (pH), dureza total, alcalinidade, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrogênio amoniacal total (NAT) e nitrito da água do sistema de criação de criação tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).



Fonte: Autora.

O nitrogênio amoniacal total apresentou comportamento crescente aproximadamente linear em ambos os tratamentos até o dia 21. A partir deste dia, as concentrações de NAT passam a oscilar, encerrando com seus valores máximos no dia 49 ( $p = 0,0448$ ),  $0,23 \pm 0,03$  mg/L em BUF e  $0,27 \pm 0,02$  mg/L em AC. Da mesma forma, o nitrito apresentou comportamento crescente aproximadamente linear até o 14º dia para ambos os tratamentos. Entretanto, a partir desse dia houve tendência de estabilização das concentrações de nitrito para o tratamento AC, enquanto que no tratamento BUF a tendência de alta permaneceu até o 21º dia, passando a oscilar a partir de então.

O pH é um dos parâmetros de qualidade de água mais importantes para as plantas cultivadas em aquaponia, pois influencia diretamente na disponibilidade dos nutrientes na água (GODDEK *et al.*, 2015). A faixa de pH recomendada para produção hidropônica tende a ser ácida (5,5 – 6,5) de forma a garantir alta disponibilidade de nutrientes às plantas (TYSON *et al.*, 2004). Os macros e micronutrientes estão mais disponíveis para as plantas em pH entre 6,0 – 6,5. Valores fora desse intervalo fazem com que certos nutrientes tenham baixa disponibilidade, como por exemplo ferro e manganês, que tem sua disponibilidade afetada em pH acima de 7,5. Por outro lado, um baixo pH pode ter impactos negativos sobre as bactérias nitrificantes: abaixo de 6,0 a capacidade de converter amônia em nitrato é bastante reduzida (SOMERVILLE *et al.*, 2014). Nos peixes, a atividade catalítica das enzimas biológicas e do sistema tampão dos fluidos corporais é influenciada pelo pH (SÁ, 2012), sendo importante manter valores entre 6 – 8,5 para peixes tropicais. Essa faixa de pH (6 – 8,5) corresponde aos valores ideais para o bom desempenho da tilápia do Nilo (THORARINSDOTTIR, 2015). Ademais, o pH também influencia na concentração de amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ), sendo esta mais elevada em pH alcalino. Geralmente, o pH é um fator complicativo na aquaponia, pois o valor ótimo para peixes e plantas não são tão correspondentes (RAKOCY *et al.*, 2004a).

O objetivo é manter um ambiente saudável com parâmetros de qualidade da água que satisfaçam, simultaneamente, os requisitos para o cultivo de peixes e vegetais, e o desenvolvimento e manutenção das bactérias nitrificantes. É recomendado que o pH em sistemas aquapônicos seja mantido próximo da neutralidade (pH 7), o que representa um compromisso entre os valores ótimos de desempenho dos organismos envolvidos e a disponibilidade de nutrientes (RAKOCY, 2012). Na presente pesquisa, os valores de pH observados ao longo do período

experimental, em ambos tratamentos (BUF e AC), ficaram próximos da neutralidade recomendada para sistemas aquapônicos.

A alcalinidade é um aspecto essencial para manter o sistema aquapônico estável. Sendo esta uma medida da capacidade da água de neutralizar ácidos, águas com boa alcalinidade tem maior resistência à mudanças no pH (SÁ, 2012). Os compostos mais comuns da alcalinidade são os carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e os bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) (WURTS; DURBOROW, 1992). O processo de nitrificação bacteriana gera ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) que é dissociado na água em dois compostos, íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sendo este último utilizado como fonte de nutrientes para as plantas (SOMERVILLE *et al.*, 2014). A liberação de íons  $\text{H}^+$  em água com boa alcalinidade, não provoca grandes oscilações de pH, já que os carbonatos presentes na água se ligam aos íons  $\text{H}^+$  livres evitando a queda do pH do sistema. Dessa forma, o processo de nitrificação é um grande consumidor da alcalinidade no sistema aquapônico, fato que explica a queda observada para este parâmetro até o 28º dia de experimento, para ambos os tratamentos, e as flutuações de pH observadas (FIGURA 23). A partir do 28º dia, houve sucessivas correções utilizando calcário dolomítico ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ), na tentativa de manter a alcalinidade próxima à 60 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , já que este é o valor mínimo recomendado para manter a capacidade de tamponamento no sistema (HAGER *et al.*, 2021). Observou-se que o calcário dolomítico apresenta baixa solubilidade em água, prejudicando a manutenção de maiores níveis de alcalinidade no sistema. Além disso, a baixa solubilidade do composto deixava a água dos sistemas ligeiramente turva nos dias da aplicação. Dessa forma, sugere-se que outros compostos de maior solubilidade sejam utilizados para fornecer aumento da alcalinidade.

O ciclo do nitrogênio na aquaponia inicia-se com a proteína bruta presente na ração ofertada aos peixes. Aproximadamente 30% da proteína presente no alimento é retida pelos peixes, sendo o restante (70%) digerido e liberado como resíduo sólido ou excretado como amônia pelas brânquias ou como uréia (TIMMONS; EBELING, 2013). O nitrogênio amoniacal total possui duas formas em meio aquoso: amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) e íon amônio ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ). A concentração relativa das formas de NAT é influenciada diretamente pelo pH, além da temperatura, sendo que a elevação destes aumenta a proporção da forma não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) no meio aquoso (RANDALL; TSUI, 2002). As plantas utilizam principalmente nitrogênio na forma de amônio ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ), sendo este último produto do processo

da nitrificação bacteriana (HAGER *et al.*, 2021; ZOU *et al.*, 2016). A amônia e o nitrito são muitas vezes mais tóxicos para os peixes do que o nitrato (ARANA, 2004), sendo capazes de promover alterações histológicas e bioquímicas, afetando o crescimento e a saúde dos organismos aquáticos (BRAZÃO *et al.*, 2021; DOS SANTOS SILVA *et al.*, 2018; MOLAYEMRAFTAR *et al.*, 2022). A amônia não ionizada ( $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) e o nitrito ( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ) devem ser mantidos em níveis mínimos, em concentrações abaixo de 0,05 mg/L e 1,0 mg/L, respectivamente (TIMMONS; EBELING; PIEDRAHITA, 2009; WAMBUA *et al.*, 2021). Em sistemas aquapônicos com funcionamento adequado do reator biológico, os níveis de amônia e nitrito devem ser próximos de zero ou no máximo de 0,25 – 1,0 mg/L para ambos. Este comportamento foi observado na presente pesquisa para NAT, entretanto, podem ser observados valores de nitrito acima de 1,0 mg/L ao longo das semanas de cultivo para ambos os tratamentos (FIGURA 23).

A nitrificação é uma oxidação sequencial em duas etapas mediada por grupos bacterianos distintos (HARGREAVES, 1998). As bactérias oxidantes de amônia (BOA) oxidam amônia à nitrito, enquanto as bactérias oxidantes de nitrito (BON) convertem o nitrito em nitrato (EBELING; TIMMONS; BISOGNI, 2006). No presente estudo, apesar de não haver registro de medição para a concentração de sólidos foi visualmente perceptível, em ambos tratamentos (BUF e AC), o seu acúmulo no reator biológico e entre as superfícies das mídias biológicas. Timmons, Ebeling e Piedrahita (2009), ressaltam que bactérias heterotróficas crescem significativamente mais rápido que as nitrificantes, prevalecendo sobre estas ao competir por espaço e oxigênio, quando a concentração de matéria orgânica no reator biológico é alta. Dessa forma, o relativo acúmulo de nitrito nos sistemas pode estar relacionado ao baixo desenvolvimento de comunidades bacterianas oxidantes de nitrito no reator biológico. Este fato evidenciou a necessidade de implementar mudanças no *design* do sistema, fazendo melhorias para evitar o acúmulo de sólidos no reator biológico.

Durante a condução do experimento observou-se que no sistema com a utilização de bolhas ultrafinas houve flotação de sólidos na caixa receptora de água supersaturada de oxigênio (BUF), sendo possível removê-los facilmente (FIGURA 24). Esta propriedade notável já foi reportada em vários trabalhos sobre tratamento de água (AGARWAL; NG; LIU, 2011; AZEVEDO, A.; ETCHEPARE; RUBIO, 2017; GURUNG; DAHL; JANSSON, 2016; TEMESGEN *et al.*, 2017). Logo, o uso de bolhas ultrafinas na produção de organismos aquáticos, além de aumentar a concentração

de oxigênio dissolvido, poderá vir a contribuir com a melhoria da qualidade da água por meio da retirada de sólidos suspensos totais e dissolvidos do ambiente de cultivo quando integrado a um filtro espumador (*skimmer*).

Figura 24 – Flotação de sólidos dissolvidos e particulados observada no sistema com a utilização de bolhas ultrafinas de oxigênio.



Fonte: Autora.

#### 4.2.1.2 Requisitos de crescimento vegetal

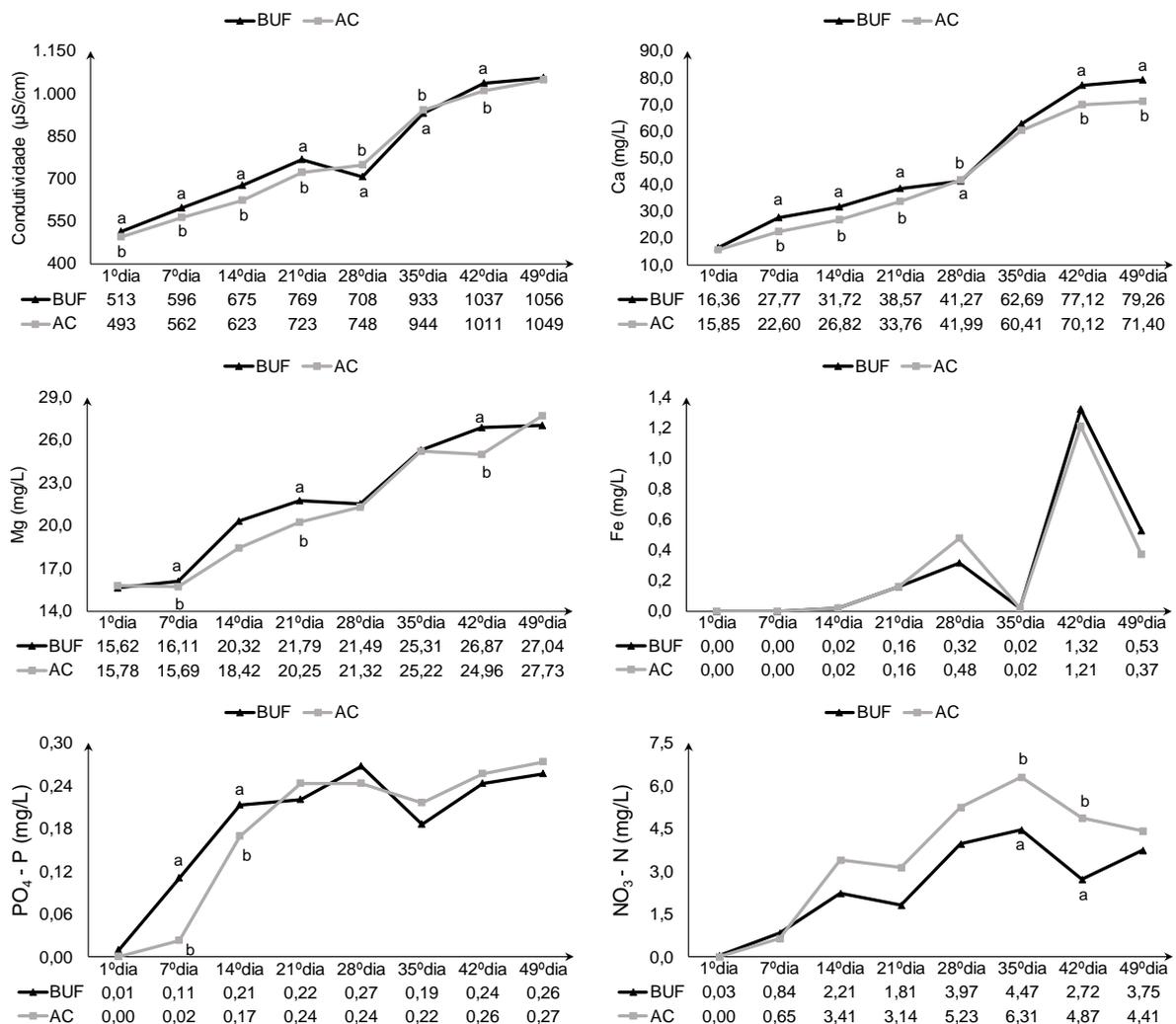
Na Figura 25 é possível observar os valores médios semanais para os nutrientes aferidos. De maneira geral, estes parâmetros apresentaram comportamento crescente ao longo de todo o período experimental.

Os valores médios da condutividade elétrica (FIGURA 25) apresentaram o mesmo padrão crescente da salinidade (FIGURA 23). Foi observada diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as leituras da condutividade entre os tratamentos em todas as análises, com exceção do 49º dia ( $p = 0,0736$ ). Apesar da condutividade não ser uma medida direta da concentração de um nutriente específico o conhecimento deste valor é importante, pois reflete a concentração de íons em solução.

A concentração média de cálcio apenas não apresentou diferença significativa nos dias 1 ( $p = 0,1373$ ) e 35 ( $p = 0,1186$ ). Os valores iniciais (1º dia) foram de  $16,36 \pm 0,38$  mg/L e  $15,85 \pm 0,58$  mg/L para BUF e AC, respectivamente, e os finais (49º dia) de  $79,26 \pm 0,43$  mg/L e  $71,40 \pm 0,89$  mg/L ( $p < 0,0001$ ).

Foi observada diferença significativa para as concentrações médias de magnésio nas análises dos dias 7 ( $p = 0,0334$ ), 21 ( $p = 0,0023$ ) e 42 ( $p = 0,0360$ ). A concentração média de magnésio para os tratamentos BUF e AC foram, respectivamente, no 1º dia de  $15,62 \pm 0,27$  mg/L e  $15,78 \pm 0,13$  mg/L ( $p = 0,2054$ ), enquanto que no 49º dia foi de  $27,04 \pm 0,26$  mg/L e  $27,73 \pm 1,33$  mg/L ( $p = 0,2134$ ).

Figura 25 – Valores médios semanais de condutividade, cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), fosfato ( $\text{PO}_4$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3$ ) da água do sistema de criação de criação de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) e incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).



Fonte: Autora.

O ferro apresentou concentrações indetectáveis nas duas primeiras análises (1º e 7º dias). Após esse período, quelato de ferro passou a ser adicionado na água dos sistemas. Nos dias 14 ( $p = 0,5000$ ), 21 ( $p = 0,5000$ ) e 28 ( $p = 0,0506$ )

houve aumento progressivo da concentração de ferro em ambos os tratamentos. Neste último dia as concentrações atingiram  $0,32 \pm 0,09$  mg/L em BUF e  $0,48 \pm 0,09$  mg/L em AC. A concentração máxima deste elemento foi observada no 42º dia com valores de  $1,32 \pm 0,32$  mg/L e  $1,21 \pm 0,40$  mg/L para BUF e AC, respectivamente ( $p = 0,3670$ ). Não foi observada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) em nenhuma das análises feitas para o ferro durante todo o experimento.

As concentrações de fosfato apresentaram valores indetectáveis no 1º dia em ambos os tratamentos. Para o tratamento BUF o maior valor médio encontrado foi de  $0,27 \pm 0,02$  mg/L no 28º dia, enquanto que para o tratamento AC o máximo foi observado no 49º dia,  $0,27 \pm 0,02$  mg/L. Foi constatada diferença significativa para o fosfato apenas no 7º ( $p = 0,0003$ ) e no 14º ( $p = 0,0203$ ) dias.

Para os valores médios da concentração de nitrato foi observada diferença significativa apenas nas análises do 35º ( $p = 0,0024$ ) e do 42º ( $p = 0,0051$ ) dias. A concentração de nitrato foi indetectável no 1º dia para ambos os tratamentos e atingiu valor máximo no 35º dia com média de  $4,47 \pm 0,44$  mg/L para BUF e  $6,31 \pm 0,35$  mg/L para AC.

Os vegetais necessitam para o seu máximo crescimento de vários nutrientes essenciais (QUADRO 3), sendo estes divididos em macro e micronutrientes. Três dos macronutrientes (C, O e H) são fornecidos pela água ( $H_2O$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ), e os demais são absorvidos quando presentes na água (GODDEK *et al.*, 2015). Vários fatores determinam o desempenho da absorção de nutrientes pelas plantas, incluindo a disponibilidade de todos os nutrientes essenciais, sua presença em proporções adequadas, além de fatores favoráveis, tais como pH, temperatura,  $O_2$  e  $CO_2$  (DELAIDE *et al.*, 2016).

Na hidroponia, as soluções utilizadas para a nutrição dos vegetais possuem proporções bem definidas desses elementos, que são adicionados às soluções na forma iônica (RESH, 2013). Na aquaponia, a fonte principal responsável pelo aporte de nutrientes é a ração (GODDEK *et al.*, 2015). As concentrações de nutrientes em sistemas aquapônicos normalmente diferem daquelas observadas nos cultivos hidropônicos. Apesar disso, pesquisadores relatam um desempenho de crescimento dos vegetais em aquaponia semelhante àquelas cultivadas em sistemas hidropônicos (BITTSÁNSZKY *et al.*, 2016; DELAIDE *et al.*, 2016; LENNARD; WARD, 2019; PANTANELLA *et al.* 2012). No presente estudo, a entrada de nutrientes no sistema aquapônico em ambos os tratamentos não se deu exclusivamente pela ração, mas

também pela suplementação de ferro (quelato de ferro) e pela entrada de cálcio e magnésio via adição de calcário dolomítico para correção da alcalinidade.

A ração utilizada na alimentação dos peixes, não contém proporções adequadas de alguns nutrientes necessários ao desenvolvimento dos vegetais (SEAWRIGHT; STICKNEY; WALKER, 1998). Dessa forma, a depender das exigências nutricionais dos vegetais cultivados, pode haver deficiência de nutrientes essenciais para o seu bom desenvolvimento, sendo necessário fazer suplementação (RAKOCY, 2012; VILLARROEL; ALVARIÑO; DURAN, 2011).

De acordo com Rakocy (2012), o ferro derivado da alimentação dos peixes, é insuficiente para a produção dos vegetais. Além disso, é um micronutriente que não se acumula nos sistemas aquapônicos com a entrada cumulativa de ração. Este fato foi observado na presente pesquisa, já que a entrada diária de ração não promoveu aumento da concentração desse elemento na água de cultivo dos peixes. Como o ferro apresentou concentrações indetectáveis nas duas primeiras semanas de experimento (FIGURA 25), este passou a ser adicionado na água dos sistemas aquapônicos (2 mg de  $\text{Fe}^{2+}/\text{L}$ ), para que não houvesse uma possível limitação no desenvolvimento das hortaliças. O ferro é necessário para a síntese de clorofila e é uma parte essencial dos citocromos, que atuam como transportadores de elétrons na fotossíntese e na respiração (RESH, 2013). Quando em deficiência, provoca clorose (falta de produção de clorofila) deixando as folhas com coloração diferente, além de poder causar necrose foliar (GOMES JUNIOR *et al.*, 2019). As concentrações de ferro observadas na presente pesquisa, em ambos tratamentos, foram similares à reportadas por Pinho *et al.* (2021), que compararam a produção integrada de juvenis de tilápia do Nilo e alface em sistemas aquapônico convencional e *FLOCponics* (bioflocos).

Na hidroponia, a absorção e o acúmulo de nutrientes pelas plantas dependem, dentre outros fatores, da condutividade elétrica (CE) cujos valores são proporcionais à concentração dos vários íons presentes na solução (GONDIM *et al.*, 2010). Apesar da CE não quantificar quais nutrientes estão disponíveis aos vegetais, ela pode ser usada como um guia geral para a quantidade total de nutrientes disponíveis para as plantas em um sistema aquapônico (LENNARD 2017). Os principais íons que aumentam a CE são: nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ),  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006). Em sistemas criando apenas peixes, a condutividade aumenta continuamente devido ao acúmulo de íons

que são produzidos como subprodutos do metabolismo dos peixes (RAKOCY; HARGREAVES, 1993; TIMMONS *et al.*, 2002). Na presente pesquisa, a CE teve comportamento crescente ao longo do período experimental, indicando que houve acúmulo dos nutrientes na água do sistema aquapônico, em ambos os tratamentos (FIGURA 25). Comportamento este similar ao observado por Lennard (2021). Este fato também pode ser observado pela concentração dos nutrientes avaliados, que tiveram sua concentração final mais elevada que a concentração inicial. Os valores médios de CE observados para os tratamentos testados foram superiores aos reportados por Lennard e Leonard (2006), pesquisando diferentes tipos de componentes hidropônicos (substrato, *floating* e NFT) na aquaponia.

O cálcio é um elemento essencial para as membranas celulares, tendo impacto no desenvolvimento de caules, raízes e folhas (RESH, 2013). A queima das bordas (*tip burn*) das folhas de alfaces pode indicar que há deficiência de cálcio no sistema aquapônico (THORARINSDOTTIR, 2015). Neste estudo, as concentrações de cálcio observadas ao longo do período experimental ficaram abaixo dos valores reportados em cultivos hidropônicos: 146 mg/L (SEAWRIGHT; STICKNEY; WALKER, 1998); 170 mg/L (GONNELLA *et al.*, 2004); e 180 mg/L (SONNEVELD; VOOGT, 2009). Apesar disso, não foram observados sinais de deficiência de cálcio nas alfaces cultivadas. O aspecto físico das plantas, em ambos os tratamentos (BUF e AC), não tinha indicativos de deficiência nutricional, tais como queimaduras e/ou coloração anormal. É importante ressaltar que a alface utilizada na presente pesquisa (BRS Leila) é uma cultivar que possui tolerância a queima das bordas que são causadas por deficiência de cálcio.

As concentrações médias de magnésio observadas nos tratamentos ao longo do período experimental variaram de 15,62 – 27,73 mg/L (FIGURA 25). Valores estes superiores ao observado por Villarroel, Alvariño e Duran (2011), que relataram concentrações em torno de 4 mg/L em sistema aquapônico, e Hundley *et al.* (2018) que obtiveram uma concentração máxima de 1,60 mg/L. Concentrações de 24 e 50 mg/L têm sido reportadas para o cultivo de alface em sistema hidropônico (RESH, 2012; SONNEVELD; VOOGT, 2009). O magnésio é um elemento chave na fotossíntese, sendo o aceptor central de elétrons nas moléculas de clorofila. Deficiências deste elemento podem ser notadas por meio do amarelamento das folhas entre as nervuras, especialmente em folhas mais velhas da planta (RESH, 2013; THORARINSDOTTIR, 2015). As concentrações de magnésio em sistemas

aquapônicos são geralmente baixas (RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006). O aporte desse elemento na aquaponia, de modo geral, é feito via aplicação de produtos para correção/manutenção do pH e da alcalinidade da água de cultivo (QUEIROZ *et al.*, 2017). Manejo este utilizado na presente pesquisa (aplicação de calcário).

O fósforo, depois do nitrogênio, é o macronutriente mais essencial na aquaponia, podendo ser absorvido sob as seguintes formas:  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  (PRABHU *et al.* 2007; RESH 2013). Crucial para o crescimento das plantas, o fósforo está presente nos ácidos nucléicos, nas membranas fosfolipídicas e como adenosina trifosfato (ATP; componente para armazenar energia nas células). É fundamental tanto para a fotossíntese quanto para a formação de açúcares e óleos. Deficiências de fósforo geralmente causam baixo desenvolvimento das raízes e plantas, além de provocar alterações na coloração (SOMERVILLE *et al.*, 2014; THORARINSDOTTIR, 2015). As concentrações de fósforo observadas nos tratamentos ao longo do período experimental (FIGURA 25) foram mais baixas do que as observadas na produção de alfaces (*L. sativa*) em outros sistemas de aquaponia (ANDRIANI *et al.*, 2017; HASAN *et al.*, 2017; LENNARD, 2021; LIANG; CHIEN, 2013; PALM; BISSA; KNAUS, 2014; RAKOCY *et al.*, 2004a). Entretanto, Bakhsh e Chopin (2012) também observaram baixa concentração de fósforo no cultivo integrado de tilápias e alfaces (0,19 – 0,25 mg/L). Essa diferença observada nos estudos pode ser explicada por vários fatores. A entrada de fósforo nos sistemas aquapônicos é feita via alimentação dos peixes (ração), dessa forma a densidade de estocagem e a taxa de arraçoamento interferem diretamente nas concentrações de fósforo que estão presentes na água. Além disso, a qualidade da ração ofertada também é um fator a ser considerado, já que estas apresentam diferentes composições de nutrientes a depender da espécie cultivada e da fase de crescimento. O tipo de filtragem mecânica também interfere no teor de fósforo presente no sistema. Boa parte do fósforo contido na ração é fixado nas excreções sólidas dos peixes (SCHNEIDER *et al.*, 2005), que são removidas do sistema por meio da filtragem mecânica. Dessa forma, a depender do tipo de filtragem utilizada, mais ou menos material orgânico pode ser retirado da água, o que afeta o teor dos nutrientes, incluindo o fósforo. Outro fato relevante é que o fósforo pode se ligar ao ferro na forma de hidróxido de ferro  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ , que é insolúvel em água (SÁ, 2012). Na presente pesquisa, a partir do 14º dia de experimento, ferro foi adicionado na água dos sistemas aquapônicos. Nota-se, observando a curva de acúmulo de fósforo (FIGURA 25), que até o 14º dia este nutriente apresentava aumento crescente

em ambos os tratamentos (BUF e AC). Com a entrada de ferro no sistema, essa taxa de acúmulo passou a ser menor, indicando haver precipitação do fósforo.

Na aquaponia, o ciclo do nitrogênio inicia-se com a proteína bruta presente na alimentação dos peixes. Cerca de 30% da proteína presente no alimento é retida pelos peixes e o restante é digerido e liberado como resíduo sólido ou excretado como amônia pelas brânquias ou como ureia (TIMMONS; EBELING, 2013). Como a maior parte do nitrogênio ofertado é liberado no ambiente, a água de criação dos peixes é rica nesse nutriente. O nitrogênio é um dos elementos absorvidos em maior quantidade pelas plantas e apresenta resposta positiva sobre a produção de biomassa (MAIA, 1998). Deficiências em nitrogênio causam clorose, baixo índice de crescimento e estiolamento das plantas (HAGER *et al.*, 2021). As fontes preferidas de nitrogênio para a alface são o íon amônio e o nitrato (JONES; BENTON, 1997; SIMONNE; SIMONNE; WELLS, 2001), sendo este último produto do processo da nitrificação bacteriana (HAGER *et al.*, 2021; ZOU *et al.*, 2016). As concentrações de nitrato observadas nos tratamentos ao longo do período experimental variaram de 0,0 – 6,1 mg/L. Hasan *et al.* (2017) pesquisando a produção integrada de peixes (tilápia e bagre) e hortaliças (alface e espinafre), relataram concentrações de nitrato entre 10 – 50,7 mg/L. Em outro estudo, uma concentração de 50,31 mg/L de nitrato foi reportada para um sistema aquapônico com produção de alfaces (DELAIDE *et al.*, 2016). Sikawa e Yakupitiyage (2010) utilizando a água de criação de bagres na produção hidropônica de alface, observaram níveis de nitrato de 3,06 – 3,63 mg/L. Effendi, Wahyuningsih e Wardiatno (2017), reportaram valores ainda mais baixos (0,91 – 1,52 mg/L) na integração de tilápia e alface romana. Baixos valores de nitrato (< 2,5 mg/L) também foram reportados por (DESWATI *et al.*, 2018). Somerville *et al.* (2014) recomenda manter níveis de nitrato de 5 – 150 mg/L em sistemas aquapônicos. Essas diferenças observadas nos estudos estão relacionadas com a densidade de estocagem, taxa de arroçamento dos peixes, qualidade do alimento ofertado, além das características apresentadas pelo reator biológico. Os valores relativamente baixos de nitrato observados na presente pesquisa em ambos tratamentos (FIGURA 25) podem ser explicados pelo problema, relatado anteriormente, do acúmulo de sólidos no reator biológico.

Apesar de alguns nutrientes estarem em concentrações inferiores às relatadas por outros pesquisadores, o desempenho fitotécnico (TABELA 9) e o excelente aspecto visual apresentado pelas alfaces em ambos os tratamentos, sugere

que a concentração de nutrientes observada na presente pesquisa não foi um fator limitante. Cultivares folhosas como a alface, são espécies vegetais que apresentam baixa necessidade nutricional e se adaptam bem às concentrações de nutrientes encontradas nos variados tipos de sistemas de aquapônicos.

#### 4.2.2 Desempenho fitotécnico da alface (*Lactuca sativa*)

A Tabela 3 apresenta o desempenho fitotécnico das alfaces cultivadas em sistema aquapônico com tilápia do Nilo. É possível observar que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para a maior parte dos parâmetros avaliados, o que indica que a utilização das bolhas ultrafinas de oxigênio influencia no desenvolvimento desta espécie de vegetal.

Tabela 3 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do diâmetro da cabeça (D), da altura da parte aérea (AA), da massa fresca total (MFT), da massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca da raiz (MFR), massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do caule, do número de folhas (NF), da massa seca total (MST), da massa seca da parte aérea (MSPA), da massa seca da raiz (MSR), da massa seca das folhas (MSF) e massa seca do caule (MSC) da alface (*Lactuca sativa*) cultivada com tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).

	BUF	AC	p-valor
D (cm)	40,50 $\pm$ 2,79 <sup>a</sup>	42,69 $\pm$ 2,35 <sup>b</sup>	0,0054
AA (cm)	26,89 $\pm$ 2,04 <sup>a</sup>	28,20 $\pm$ 1,88 <sup>b</sup>	0,0212
MFT (g)	308,08 $\pm$ 57,68 <sup>a</sup>	281,83 $\pm$ 38,20 <sup>b</sup>	0,0489
MFPA (g)	276,20 $\pm$ 44,99	257,68 $\pm$ 33,87	0,0748
MFR (g)	29,20 $\pm$ 7,48 <sup>a</sup>	20,04 $\pm$ 6,69 <sup>b</sup>	0,0001
MFF (g)	237,44 $\pm$ 47,92	226,97 $\pm$ 27,98	0,2028
MFC (g)	34,55 $\pm$ 7,75	31,07 $\pm$ 5,35	0,0540
NF	28,90 $\pm$ 4,02 <sup>a</sup>	26,75 $\pm$ 2,97 <sup>b</sup>	0,0310
MST (g)	13,46 $\pm$ 2,30 <sup>a</sup>	10,63 $\pm$ 1,63 <sup>b</sup>	< 0,0001
MSPA (g)	12,30 $\pm$ 2,04 <sup>a</sup>	9,74 $\pm$ 1,38 <sup>b</sup>	< 0,0001
MSR (g)	1,16 $\pm$ 0,29 <sup>a</sup>	0,88 $\pm$ 0,27 <sup>b</sup>	0,0017
MSF (g)	11,15 $\pm$ 1,76 <sup>a</sup>	8,70 $\pm$ 1,24 <sup>b</sup>	< 0,0001
MSC (g)	1,15 $\pm$ 0,33	1,04 $\pm$ 0,21	0,1168

Valores com letras sobrescritas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa para o teste estatístico aplicado ( $p < 0,05$ ).

Não foi observada diferença estatística apenas para os parâmetros massa fresca da parte aérea (MFPA;  $p = 0,0748$ ), massa fresca das folhas (MFF;  $p = 0,2028$ ), massa fresca do caule (MFC;  $p = 0,0540$ ) e massa seca do caule (MSC;  $p = 0,1168$ ).

Os valores médios encontrados para MFPA foram  $276,20 \pm 44,99$  g para BUF e  $257,68 \pm 33,87$  g para AC. A MFF apresentou  $237,44 \pm 47,92$  g e  $226,97 \pm 27,98$  g para BUF e AC, respectivamente. O tratamento BUF apresentou valor médio de MFC de  $34,55 \pm 7,75$  g, enquanto que no tratamento AC o valor foi de  $31,07 \pm 5,35$  g. A MSC apresentou valores médios de  $1,15 \pm 0,33$  g para BUF e  $1,04 \pm 0,21$  g para AC.

Dentre os parâmetros que apresentaram diferença significativa, apenas para o diâmetro da cabeça (D;  $p = 0,0054$ ) e para a altura da parte aérea (AA;  $p = 0,0212$ ), o tratamento AC apresentou valores médios maiores quando comparados ao tratamento BUF. O valor médio de D para AC foi de  $42,69 \pm 2,35$  g e de  $40,50 \pm 2,79$  g para BUF. As médias de AA, por sua vez, apresentaram valores de  $28,20 \pm 1,88$  g e  $26,89 \pm 2,04$  g para os tratamentos AC e BUF, respectivamente. As alfaces cultivadas no tratamento BUF apresentaram maior número de folhas que o tratamento AC ( $p = 0,0310$ ), respectivamente,  $28,90 \pm 4,02$  e  $26,75 \pm 2,97$ . Apesar de não ter havido diferença significativa na MFPA e na MFF ( $p > 0,05$ ), foi constatada diferença estatística na massa fresca da raiz (MFR;  $p = 0,0001$ ) e na massa fresca total (MFT;  $p = 0,0489$ ). As alfaces cultivadas no tratamento BUF apresentaram raízes aproximadamente 1,5 vez mais pesada que as das alfaces do tratamento AC, com valores, respectivamente, de  $29,20 \pm 7,48$  g e  $20,04 \pm 6,69$  g. Tamanha discrepância apresentou reflexos na MFT ( $p = 0,0489$ ) com valores médios de  $308,08 \pm 57,68$  g para BUF e  $281,83 \pm 38,20$  g para AC.

Com exceção da MSC, todos os demais parâmetros de desempenho fitotécnico oriundos da desidratação das partes das alfaces apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) com valores médios maiores para o tratamento BUF.

Assim como para suas respectivas massas frescas, massa total e raiz mantiveram a diferença significativa. A massa seca total (MST) apresentou média de  $13,46 \pm 2,30$  g para o tratamento BUF e  $10,63 \pm 1,63$  g para AC ( $p < 0,0001$ ). Assim como para MFR, a massa seca da raiz (MSR) apresentou valor expressivamente maior ( $p = 0,0017$ ) para o tratamento BUF em relação ao tratamento AC,  $1,16 \pm 0,29$  g e  $0,88 \pm 0,27$  g, respectivamente.

A massa seca do caule (MSC) não apresentou diferença estatística ( $p = 0,1168$ ) entre os tratamentos BUF ( $1,15 \pm 0,33$  g) e AC ( $1,04 \pm 0,21$ ), da mesma forma como observado para sua respectiva massa fresca (MFC).

Por outro lado, parte aérea e folhas, que não haviam apresentado diferença para suas massas frescas, apresentaram diferença estatística para suas massas

secas. Os valores médios encontrados para a massa seca da parte aérea (MSPA) foram  $12,30 \pm 2,04$  g e  $9,74 \pm 1,38$ , respectivamente, para BUF e AC ( $p < 0,0001$ ). A massa seca das folhas (MSF) no tratamento BUF apresentou média de  $11,15 \pm 1,76$  g, enquanto que para o tratamento AC o valor foi de  $8,70 \pm 1,24$  g ( $p < 0,0001$ ). A partir destes dados pode-se inferir que uma parte considerável das massas frescas da parte aérea e das folhas era composta por água e não por tecido vegetal.

As alfaces cultivadas em sistema aquapônico, sob diferentes formas de incorporação de oxigênio dissolvido (BUF e AC), apresentaram 100% de sobrevivência 39 dias após a semeadura (DAS). As cultivares apresentaram folhagem com coloração verde brilhante, ornamentada por um padrão recortado das margens foliares, apresentando características das alfaces do tipo solta crespa. As plantas apresentaram porte médio e caule grosso, o que conferiu facilidade no momento da colheita das amostras. As alfaces foram colhidas no intervalo de tempo indicado pelo produtor das sementes, que informa um ciclo de produção de 35 – 45 dias. As cultivares de ambos os tratamentos (BUF e AC) apresentaram excelente aspecto físico, sem deformidades e rugosidades, ou alteração de coloração nas folhas e caules, além das raízes apresentaram-se íntegras e bem desenvolvidas (FIGURA 26 A-B). O consumo das alfaces pela comunidade acadêmica (comunicação pessoal) mostrou que as cultivares apresentaram sabor agradável sem a presença de amargor.

No tratamento com a utilização de bolhas ultrafinas (BUF) foi observada uma produtividade de  $3,43$  kg/m<sup>2</sup>, totalizando uma produção total de  $35,12$  kg de alfaces. Para o tratamento utilizando aeração convencional, houve uma produtividade de  $3,14$  kg/m<sup>2</sup> e uma produção total de  $32,15$  kg de alfaces.

Quando comparados os dois tratamentos, as alfaces BUF apresentaram menor altura (AA) e diâmetro da cabeça (D), e maior número de folhas (NF) e massa fresca de folhas (MFF) em relação às alfaces AC (TABELA 3), indicando que as alfaces BUF ficaram mais compactas. Este fato pode ser desejável na comercialização por impor menos dificuldades durante o processo de embalagem e armazenamento. No caso da altura da planta um maior valor pode vir a ser um aspecto negativo. Plantas que tendem a crescer em altura alongando o caule, reduzem a capacidade de investir na produção e crescimento de folhas, o que acaba reduzindo a produção, além de deixar um aspecto visual indesejável.

Figura 26 – Acompanhamento do desenvolvimento de um exemplar de alface (*Lactuca sativa*) cultivada com tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF). DAS: dias após sementeira. A: folhas e B: raiz.



Fonte: Autora.

Ambos os tratamentos apresentaram valores de MFPA maiores que os observados para outras cultivares de alface. Blat *et al.* (2011) avaliando diferentes tipos de cultivares crespas em produção hidropônica, observaram melhores valores de MFPA para as cultivares Crespona gigante (179,17 g) e Verônica (118,72 g). Valores estes inferiores a BRS Leila, deste estudo, cultivada em sistema aquapônico (276,20 g – BUF e 257,68 – AC). Nesta mesma pesquisa, Blat *et al.* (2011) ainda reporta MFPA abaixo de 90 g para outras variedades de alfaces. Santos *et al.* (2005) obtiveram para alface Verônica valor de 104,16 g para MFPA, além de 12,7 cm de altura e média de 15 folhas por planta. Kano *et al.* (2012), obtiveram MFPA de 130 – 181 g para diversas alfaces crespas, além de um número de 14 – 21 folhas. Abbey *et*

*al.* (2019) e Palm, Bissa e Knaus (2014), avaliando diferentes cultivares em sistemas aquapônicos, também obtiveram menor massa fresca nas alfaces cultivadas que as do presente estudo. Como o interesse da alface é a parte aérea (expressa na MFPA), baixos valores deste parâmetro prejudicam a comercialização. Ao comparar esses resultados, devemos levar em consideração as características agrônômicas apresentadas pelas cultivares, como porte e número de folhas, que são fatores que afetam a MFPA, além das condições climáticas do cultivo.

Os valores médios de MSPA e MSF das alfaces em ambos os tratamentos deste estudo (TABELA 3), também foram superiores aos reportados para outras variedades de alfaces. Blat *et al.* (2011) obtiveram valores de MSPA de 3,47 – 8,31 g para diferentes alfaces crespas cultivadas em sistema hidropônico, além de valores entre 2,92 – 7,39 g para MSF. Kano *et al.* (2012), observaram valores de 5,43 – 7,72 g para MSF e 6,13 – 8,32 g para MSPA em diferentes cultivares. Todos esses dados são inferiores as MSF e MSPA das alfaces aquapônicas de ambos os tratamentos avaliados na presente pesquisa. Quando comparadas as duas formas de incorporação de oxigênio na água (BUF e AC) dos sistemas aquapônicos, nota-se que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para quase todos os parâmetros de massa seca avaliados (MSF, MSPA, MSR e MST). A quantidade de matéria seca está diretamente relacionada ao acúmulo de nutrientes nas alfaces (BENINNI *et al.*, 2005), os quais são absorvidos do ambiente pelas raízes das plantas (RESH, 2013). As alfaces do tratamento com a utilização de bolhas ultrafinas (BUF) apresentaram a massa fresca da raiz (MFR) consideravelmente maior ( $p < 0,05$ ) que as do tratamento com aeração convencional. Esta maior área radicular de absorção influenciou nos valores de massas secas, indicando que as alfaces BUF tinham maior capacidade de retirar os nutrientes da água e incorporá-los nos tecidos.

Park e Kurata (2009), também observaram um maior desenvolvimento das raízes de alfaces hidropônicas quando microbolhas de ar foram utilizadas. Além disso, o experimento realizado sob concentrações semelhantes de oxigênio, relevou que as amostras tratadas com microbolhas de ar, apresentaram MSF 1,7 vez e MFF 2,1 vezes maiores que as alfaces cultivadas com macrobolhas de ar. Ademais, houve diferenças significativas para o número e tamanho das folhas, sendo estes parâmetros melhores nas microbolhas. Na presente pesquisa, também foi observado um maior número de folhas ( $p < 0,05$ ) na alfaces cultivadas na presença de bolhas ultrafinas (BUF).

Outros estudos também demonstraram que houve promoção do crescimento em outras espécies com a utilização de bolhas ultrafinas. Ebina *et al.* (2013) cultivando *Brassica campestris* hidroponicamente por 4 semanas, reportaram maiores valores para o comprimento das folhas e massa fresca aérea, quando nanobolhas de ar foram utilizadas. Ahmed *et al.* (2018b), utilizando quatro tipos de nanobolhas (ar, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>) na germinação e no crescimento de plantas (alface, cenoura, fava e tomate), obtiveram taxas mais altas de germinação e crescimento, a depender do tipo de nanobolha, quando comparado ao grupo controle sem a utilização destas. Os pesquisadores atribuíram os resultados à maior eficiência de fixação ou utilização dos nutrientes. Xiao e Xu (2020), demonstraram aceleração no crescimento do biofilme bacteriano aeróbico com a utilização de aeração por nanobolhas no tratamento de efluentes. Iijima *et al.* (2020), concluíram que bolhas ultrafinas de ar melhoraram efetivamente o crescimento de mudas de soja sob estresse por déficit de nutrientes.

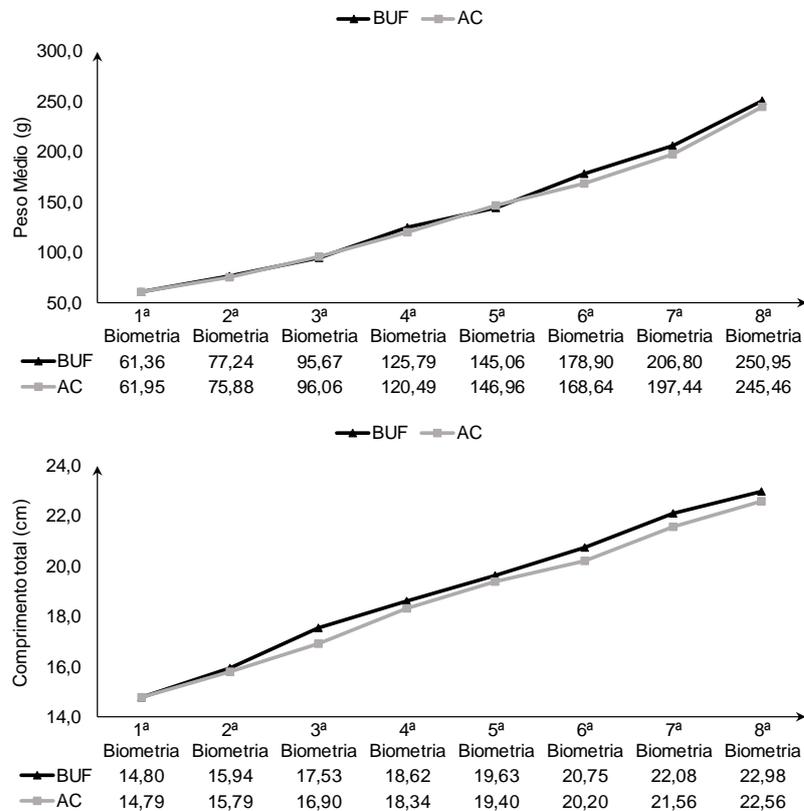
As condições ambientais fornecidas às plantas nos sistemas aquapônicos, de ambos os tratamentos, foram adequadas ao desenvolvimento das alfaces. Fato corroborado pelos índices de desempenho fitotécnico e exuberância das cultivares. Os resultados também mostraram que o sistema utilizado na presente pesquisa é viável para produzir alfaces aquapônicas. Apesar de não haver diferença significativa entre os tratamentos para MFPA, que é o parâmetro comercialmente importante, a maior massa seca das alfaces no tratamento BUF indica uma maior formação de tecido vegetal.

#### **4.2.3 Parâmetros de desempenho zootécnico e índices viscerais da tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*)**

Não foi observada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para os pesos e os comprimentos totais da tilápia do Nilo, quando comparadas as médias dos tratamentos nas oito biometrias semanais (FIGURA 27).

Na 1ª biometria os indivíduos do tratamento BUF apresentaram peso médio de  $61,36 \pm 13,03$  g e comprimento total médio de  $14,80 \pm 0,98$  cm. Ao final de um período de crescimento de 7 semanas os indivíduos atingiram peso médio de  $250,95 \pm 59,92$  g e comprimento total médio de  $22,82 \pm 2,35$  cm. O tratamento AC apresentou comportamento semelhante, partindo de  $61,95 \pm 14,07$  g para  $245,46 \pm 56,69$  g e de  $14,79 \pm 1,09$  cm para  $22,56 \pm 1,59$  cm.

Figura 27 – Peso médio e comprimento total ao longo das biometrias da tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criada em sistema aquapônico com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).



Não foi observada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para nenhum dos demais parâmetros de desempenho zootécnico avaliados com exceção do fator de condição alométrico (TABELA 4).

A biomassa inicial (B<sub>Mi</sub>) no tratamento BUF foi de  $3,31 \pm 0,03$  kg, o que resultou em uma densidade de estocagem inicial (DE<sub>i</sub>) de  $1,66 \pm 0,02$  kg/m<sup>3</sup> (tanques de 2 m<sup>3</sup>). O fator de conversão alimentar (FCA) para os peixes deste tratamento foi de  $1:1,35 \pm 0,06$ , gerando um ganho de peso médio diário (GPMD) de  $3,64 \pm 0,16$  g/dia e uma taxa de crescimento específico (TCE) de  $2,71 \pm 0,07$  %/dia. Ao final do período experimental de 7 semanas foi verificado um ganho de biomassa (GBM) de  $9,89 \pm 0,59$  kg, uma biomassa final (B<sub>Mf</sub>) de  $13,21 \pm 0,61$  kg, uma densidade de estocagem final (DE<sub>f</sub>) de  $6,60 \pm 0,31$  kg/m<sup>3</sup> e uma sobrevivência (S) de  $96,91 \pm 2,83$ %.

Os parâmetros iniciais de desempenho zootécnico observados no tratamento AC foram B<sub>Mi</sub> de  $3,35 \pm 0,11$  kg e DE<sub>i</sub> de  $1,67 \pm 0,05$  kg/m<sup>3</sup>. O FCA para este tratamento foi de  $1:1,35 \pm 0,05$ , o GPMD de  $3,53 \pm 0,34$  g/dia e a TCE de  $2,65 \pm$

0,13 %/dia. Após o período experimental constatou-se GBM de  $9,75 \pm 0,80$  kg, BMf de  $13,09 \pm 0,84$  kg, DEf de  $6,55 \pm 0,42$  kg/m<sup>3</sup> e S de  $98,77 \pm 1,07\%$ .

Tabela 4 – Valores médios (média  $\pm$  sd) do peso médio inicial (PMi), do comprimento total inicial (CTi), do peso médio final (PMf), do comprimento total final (CTf), do ganho de peso médio diário (GPMD), da biomassa inicial (BMi), da biomassa final (BMf), da densidade de estocagem inicial (DEi), da densidade de estocagem final (DEf), do ganho de biomassa (GBM), da taxa de crescimento específico (TCE), da sobrevivência (S), do fator de conversão alimentar (FCA) e do fator de condição alométrico (Kn) para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criadas em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).

	BUF	AC	p-valor
PMi (g)	61,36 $\pm$ 13,03	61,95 $\pm$ 14,07	0,3492
CTi (cm)	14,80 $\pm$ 0,98	14,79 $\pm$ 1,09	0,4795
PMf (g)	250,95 $\pm$ 59,92	245,46 $\pm$ 56,69	0,2021
CTf (cm)	22,82 $\pm$ 2,35	22,56 $\pm$ 1,59	0,1249
GPMD (g/dia)	3,64 $\pm$ 0,16	3,53 $\pm$ 0,34	0,3147
BMi (kg)	3,31 $\pm$ 0,03	3,35 $\pm$ 0,11	0,3304
BMf (kg)	13,21 $\pm$ 0,61	13,09 $\pm$ 0,84	0,4276
DEi (kg/m <sup>3</sup> )	1,66 $\pm$ 0,02	1,67 $\pm$ 0,05	0,3148
DEf (kg/m <sup>3</sup> )	6,60 $\pm$ 0,31	6,55 $\pm$ 0,42	0,4296
GBM (kg)	9,89 $\pm$ 0,59	9,75 $\pm$ 0,80	0,4052
TCE (%/dia)	2,71 $\pm$ 0,07	2,65 $\pm$ 0,13	0,2667
S (%)	96,91 $\pm$ 2,83	98,77 $\pm$ 1,07	0,2868
FCA	1,35 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,05	0,4724
Kn	1,19 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>	1,12 $\pm$ 0,10 <sup>b</sup>	< 0,0001

Valores com letras sobrescritas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa para o teste estatístico aplicado ( $p < 0,05$ ).

O fator de condição alométrico (TABELA 4) apresentou valores médios de  $1,19 \pm 0,11$  para o tratamento BUF e  $1,12 \pm 0,10$  para o tratamento AC, apresentando diferença significativa ( $p < 0,0001$ ).

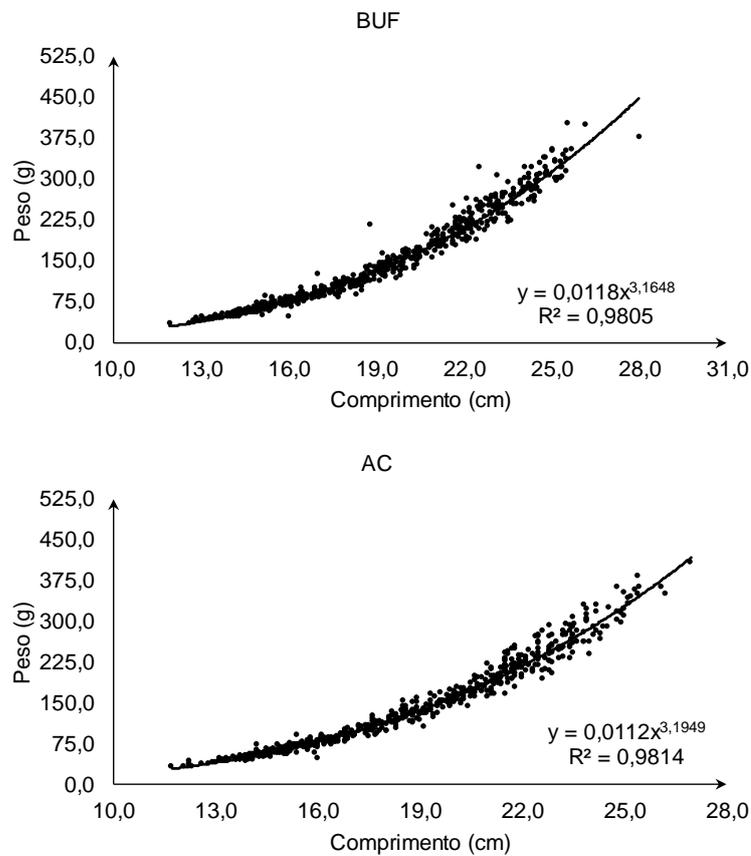
De acordo com Vazzoler (1996), o fator de condição é uma variável importante a ser considerada, pois é um indicador quantitativo do grau de hígidez ou de bem-estar do peixe, refletindo as condições alimentares recentes e/ou gasto de reservas em atividades cíclicas, influenciados pelas condições ambientais e aspectos comportamentais da espécie. Dessa forma, o fator de condição corporal é um parâmetro muito importante na criação de peixes, indicando se as condições e os manejos empregados estão adequados à espécie (PAREDES-TRUJILLO *et al.*, 2021).

Embora o ganho de peso e o comprimento total não tenham apresentado diferença significativa ( $p > 0,05$ ), os valores de Kn obtidos sugere que as tilápias criadas

com oxigenação por bolhas ultrafinas apresentavam uma melhor condição de bem-estar que as do tratamento com aeração convencional. Tavares-Dias *et al.* (2000), avaliando o fator de condição em teleósteos de água doce, observaram Kn de 1,15 em tilápias. Medina *et al.* (2022), estudando as relações peso-comprimento e fatores de condição em quatro espécies de peixes tropicais, relataram valor de 1,00 para o Kn em tilápias cultivadas em sistema de recirculação. Resultados estes próximos aos observados em ambos os tratamentos do presente estudo. Fatores como a oferta de alimento e a qualidade da água do cultivo, interferem nos valores do Kn.

A Figura 28 apresenta os gráficos das relações comprimento x peso para a tilápia do Nilo avaliada na presente pesquisa com suas respectivas equações, valores dos coeficientes de alometria (b) e dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Figura 28 - Curva da relação comprimento x peso para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criadas em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).



Fonte: Autora.

Pode-se observar que b apresentou valores de 3,1648 e 3,1949 para os peixes dos tratamentos BUF e AC, respectivamente. Também é possível perceber os valores de R<sup>2</sup> de 0,9805 (BUF) e 0,9814 (AC).

Os valores do coeficiente de alometria (b) encontrados na presente pesquisa estão dentro da faixa de 2,5 a 4,0 citada por Le Cren (1951) para a maioria das espécies de peixes. Valores de b maiores que 3 indicam um crescimento alométrico positivo, havendo um maior incremento em comprimento quando comparado ao peso, o que resulta em um fator de condição com valor menor. Por outro lado, valores de b menores que 3 indicam um crescimento alométrico negativo, o que significa um maior incremento do peso quando comparado ao comprimento, resultando em um valor do fator de condição maior. Quando os valores do coeficiente de alometria se aproximam de 3, tem-se um crescimento do tipo isométrico, no qual ocorre um igual incremento em peso e em comprimento (VAZZOLER, 1996). Dessa forma, as relações comprimento-peso revelaram que o padrão de crescimento das tilápias, em ambos os tratamentos, foi alométrico positivo.

Na Tabela 5 é possível observar os índices viscerais obtidos na presente pesquisa para a tilápia do Nilo, bem como o peso médio e o comprimento total dos indivíduos utilizados para a obtenção de tais índices.

Tabela 5 – Valores médios (média ± sd) do peso médio corporal (PM), do comprimento corporal total (CT), do peso das vísceras totais (VT), do peso do fígado (PF), do comprimento do intestino (CI), do índice víscero somático (IVS), do índice hepatossomático (IHS) e do quociente intestinal (QI) para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) criadas em sistema aquapônico com alface (*Lactuca sativa*) com incorporação de oxigênio dissolvido por bolhas ultrafinas de oxigênio (BUF) e aeração convencional (AC).

	BUF	AC	p-valor
PM (g)	250,05 ± 60,02	251,05 ± 35,77	0,5000
CT (cm)	22,91 ± 1,63	22,49 ± 1,04	0,2075
VT (g)	31,35 ± 10,23	32,89 ± 7,10	0,3175
PF (g)	8,18 ± 2,77 <sup>a</sup>	6,64 ± 1,40 <sup>b</sup>	0,0353
CI (cm)	144,91 ± 19,87	149,60 ± 20,50	0,2650
IVS (%)	12,20 ± 1,61	13,01 ± 1,40	0,0779
IHS (%)	3,23 ± 0,69 <sup>a</sup>	2,63 ± 0,34 <sup>b</sup>	0,0033
QI	6,34 ± 0,84	6,65 ± 0,83	0,1621

Valores com letras sobrescritas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa para o teste estatístico aplicado (p<0,05).

Não foi observada diferença significativa ( $p = 0,3175$ ) para o peso total das vísceras (VT) que apresentou valor médio de  $31,35 \pm 10,23$  g para o tratamento BUF e  $32,89 \pm 7,10$  g para AC. Da mesma forma, não foi observada diferença estatística ( $p = 0,0779$ ) para o índice víscero somático (IVS) cujos valores médios foram de  $12,20 \pm 1,61\%$  e  $13,01 \pm 1,40\%$  para BUF e AC, respectivamente.

O comprimento do intestino (CI) apresentou valor médio de  $144,91 \pm 19,87$  cm para o tratamento BUF e  $149,60 \pm 20,50$  cm para o tratamento AC, não havendo diferença significativa ( $p = 0,2650$ ) entre esses valores. Também não foi observada diferença estatística ( $p = 0,1621$ ) para o quociente intestinal (QI) entre os tratamentos BUF e AC que apresentaram valores médios, respectivamente, de  $6,34 \pm 0,84$  e  $6,65 \pm 0,83$ .

Os dados coletados relativos ao fígado apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) quando comparadas as médias entre os tratamentos. O peso do fígado (PF) apresentou maior valor médio ( $p = 0,0353$ ) em BUF, com valor de  $8,18 \pm 2,77$  g, em relação ao PF observado em AC,  $6,64 \pm 1,40$  g. Esta diferença se refletiu no índice hepatossomático (IHS), com maior valor médio ( $p = 0,0033$ ) para tratamento BUF ( $3,23 \pm 0,69\%$ ) quando comparado ao tratamento AC ( $2,63 \pm 0,34\%$ ).

PINHO *et al.* (2021), avaliando a produção de tilápias em diferentes sistemas aquapônicos, obtiveram um valor de 2,5% para IHS. Suloma *et al.* (2022), ofertando diferentes dietas na alimentação de tilápias, obtiveram valores de 2,79 – 3,14% para IHS. Valores estes próximos aos reportados na presente pesquisa. As diferenças observadas nos diferentes estudos, deve-se às variações na quantidade de gordura estocada no fígado, que tem influência significativa sobre o peso do órgão, alterando assim a relação hepatossomática. O fígado, dentre várias funções, possui a capacidade de assimilar e armazenar nutrientes, além de ser um indicador do estado nutricional e fisiológico em peixes (CABALLERO *et al.*, 1999). A deposição lipídica pode ser uma expressão de um estado bem alimentado, em vez de indicar uma patologia (SEGNER; WITT, 1990). Dessa forma, os maiores valores de PF e IHS observados nos peixes do tratamento BUF, quando aliados ao maior valor de Kn, sugerem que os peixes aproveitaram de forma diferente o alimento oferecido. Talvez, a hiperóxia possa induzir um estado hipermetabólico, modificando a taxa de digestão do alimento e a absorção dos nutrientes.

Os parâmetros zootécnicos avaliados (TABELA 4) demonstram que a tilápia do Nilo criada em sistema aquapônico, em ambos os tratamentos, tiveram bom

desempenho. Observou-se que a tilápia apresentou facilidade de adaptação aos sistemas aquapônicos utilizados, apresentando boa taxa de sobrevivência em ambos os tratamentos, não sendo observados sinais de lesões provocadas por infecções ou parasitos. O que corrobora que os parâmetros de qualidade de água estavam em níveis adequados ao desenvolvimento da espécie (TABELAS 1 e 2).

A facilidade de adaptação e o bom desempenho da tilápia ao cultivo aquapônico também já foram reportados por diversos outros pesquisadores (DIVER, 2010; HAGER *et al.*, 2021; PINHO *et al.*, 2021; RAKOCY; MASSER; LOSORDO, 2006; SOMERVILLE *et al.*, 2014; THORARINSDOTTIR, 2015). Este sucesso pode ser atribuído a uma série de características apresentadas pela espécie. Tilápias apresentam bastante rusticidade ao manejo, rápido crescimento, boa conversão alimentar e aceitam adensamento (KUBTIZA, 2011). Além disso, são bastante tolerantes à variações nos parâmetros de qualidade de água e toleram concentrações de metabólitos tóxicos melhor que maioria dos peixes cultivados (EL-SAYED, 2006).

O fator de conversão alimentar (FCA) é um importante índice na produção animal. As estimativas de FCA nos permite determinar a eficácia da alimentação no cultivo, sendo fundamental para avaliar a relação custo/benefício das rações comerciais utilizadas. O fornecimento de ração tem um grande impacto financeiro no custo total da produção de peixes. Dessa forma, o objetivo na aquicultura é obter menores índices de FCA para que os custos de produção sejam reduzidos.

Quando alimentadas de forma adequada e mantidas sob condições ambientais apropriadas, tilápias apresentam FCA entre 1,4 – 1,8, sendo alguns dos melhores resultados da produção animal (DELONG; LOSORDO; RAKOCY, 2009). Em sistemas aquapônicos as tilápias cultivadas apresentam boas taxas de sobrevivência, com valores acima de 95% (PALM; BISSA; KNAUS, 2014; RAKOCY *et al.*, 2004a; RAKOCY *et al.*, 2004b). Na presente pesquisa, os valores observados para estes parâmetros, em ambos os tratamentos (TABELA 4), estão na faixa ótima de desempenho reportada para a espécie. Bakhsh e Chopin (2012), cultivando juvenis de tilápia Nilo em sistema aquapônico por um período de 45 dias, obtiveram FCA e sobrevivência de 1,6 e 86%, respectivamente. Effendi, Wahyuningsih e Wardiatno (2017), utilizando a integração da produção de juvenis de tilápia e alface romana, relataram sobrevivência de 94% e 1,7 para FCA após 6 semanas de cultivo. Resultados estes inferiores aos observados no presente estudo tanto para BUF (FCA: 1,35 e S: 96,9%), como para AC (FCA: 1,35 e S: 98,7%). Essas diferenças

observadas nos estudos podem estar relacionadas a diversos fatores, tais como qualidade da água, qualidade da dieta, manejo alimentar e linhagem genética dos peixes.

Ao final do período experimental (7 semanas) foram produzidas tilápias do Nilo maiores que 240 g, em ambos os tratamentos testados (TABELA 4). As tilápias do tratamento BUF apresentaram um incremento de peso de 308%, enquanto as do tratamento AC tiveram 296% de incremento. Estes resultados são superiores aos reportados por Jainontee *et al.* (2019), que avaliando o desempenho de tilápias (peso inicial: 62 g) em diferentes sistemas de incorporação de oxigênio, aeração e bolhas ultrafinas, obtiveram pesos de 128 e 155 g, respectivamente, após 6 semanas.

Na presente pesquisa, ambos sistemas apresentaram uma densidade final de 6,6 kg de tilápias por m<sup>3</sup>. Se for levada em consideração apenas a concentração de OD mantida nos tanques com oxigenação por BUF, podemos inferir que uma biomassa muito maior de peixes poderia ser estocada se comparada à aeração convencional (TABELA 1), levando em consideração que o oxigênio é o principal fator limitante da capacidade de carga nos sistemas. Logo, a utilização das bolhas ultrafinas em sistemas de produção poderá, em primeira instância, possibilitar aumento no ganho do produtor pelo aumento da densidade de estocagem, elevando a produtividade no sistema. É importante salientar, entretanto, que o referido aumento da densidade de estocagem deverá ser acompanhado do correto dimensionamento das demais unidades de tratamento de água, como por exemplo, a remoção de sólidos (decantador e filtro mecânico) e o reator biológico.

Diferentemente do reportado em outros estudos, não foi observado efeito promotor de crescimento nas tilápias criadas sob oxigenação por bolhas ultrafinas. Rahmawati *et al.* (2020), reportaram que o uso de um gerador de nanobolhas em sistema raceway manteve níveis ideais de OD na água de cultivo do camarão branco (*Penaeus vannamei*), além de promover aumento no ganho de peso e crescimento quando comparado a aeração utilizando aeradores de pás. Ebina *et al.* (2013), observaram maior ganho de peso em peixes (*sweetfish* e truta arco-íris) quando nanobolhas de ar foram utilizadas. Resultado similar ao relatado por Senthilkumar *et al.* (2018).

Podemos observar que o efeito em si da supersaturação de oxigênio na água, quando comparada às condições normais de saturação (tratamento AC), também não melhorou os índices de desempenho zootécnico da tilápia do Nilo.

Pesquisas conduzidas para avaliar o efeito de alta concentração de oxigênio na água, mostraram que o estado de hiperóxica não melhora significativamente o crescimento dos peixes mantidos nesta condição. Foss, Vollen e Øiestad (2003), observaram que a supersaturação da água com oxigênio dissolvido (14,5 mg/L) não favoreceu o crescimento dos peixes cultivados (*Anarhichas minor*). Entretanto, os pesquisadores observaram que a tolerância à amônia foi maior nos peixes sob condições de supersaturação. Em outro estudo, quando peixes (*Scophthalmus maximus*) foram criados por 30 dias em água contendo O<sub>2</sub> a 147% ou 223% de saturação de ar, não houve diferenças significativas na ingestão de alimentos, crescimento, conversão alimentar ou utilização de proteínas em comparação com peixes expostos a normóxia (100% de saturação de ar) (PERSON-LE RUYET *et al.*, 2002).

Diante do exposto, a utilização da tecnologia de bolhas ultrafinas nos sistemas de produção aquícola, incluindo a aquaponia, não deve ter por objetivo manter condições de supersaturação de oxigênio na água, mas de manter níveis constantes e desejáveis de oxigênio em condições de elevada estocagem de biomassa de peixes.

## 5 CONCLUSÃO

Diante do acima exposto, pode-se concluir que o gerador de bolhas ultrafinas, atuando pelos princípios do cisalhamento mecânico e da cavitação hidráulica, ligado a um concentrador de oxigênio foi:

- Eficiente em transferir oxigênio para a coluna d'água, sendo capaz de elevar a concentração de oxigênio dissolvido de um tanque de 2,0 m<sup>3</sup> de 0,0 mg/L para 21,8 mg/L, atingindo 100% de saturação após 21 minutos e concentração acima de 250% em 1 hora de funcionamento;
- Eficiente em manter alta a concentração de oxigênio dissolvido na água de tanques de criação de tilápia do Nilo em sistema aquapônico com produção de alfaces, mesmo com o aumento da biomassa dos peixes e da variação de temperatura ao longo do período experimental;
- Capaz de promover aumento para a maioria dos parâmetros de desempenho fitotécnico avaliados, por meio da maior formação de tecido vegetal, o que refletiu em um maior número folhas, maior área radicular, maior produtividade e aumento das massas secas das alfaces aquapônicas cultivadas com bolhas ultrafinas;
- Embora não tenha sido observada melhoria para os principais parâmetros de desempenho zootécnico de interesse produtivo (peso final, por exemplo), a manutenção de concentrações de oxigênio dissolvido acima do ponto de saturação indica que uma maior biomassa de peixes poderá ser satisfatoriamente mantida no sistema, desde que as demais unidades de tratamento de água (reator biológico, filtro mecânico etc.) sejam corretamente dimensionadas.

## REFERÊNCIAS

- ABBEY, M. *et al.* Lettuce (*Lactuca sativa*) Production in Northern latitudinal aquaponic growing conditions. **HortScience**, [s.l.], v. 54, n. 10, p. 1757–1761, 2019.
- ABDEL-TAWWAB, M. *et al.* Dissolved oxygen level and stocking density effects on growth, feed utilization, physiology, and innate immunity of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. **Journal of Applied Aquaculture**, [s.l.], v. 26, n. 4, p. 340–355, 2014.
- ANDRIANI, Y. *et al.* The effect of stocking density ratio of fish on water plant productivity in aquaponics culture system. **Nusantara Bioscience**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 31–35, 2017.
- AGARWAL, A.; NG, W. J.; LIU, Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. **Chemosphere**, [s.l.], v. 84, n. 9, p. 1175–1180, 2011.
- AHMADI, R. *et al.* Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcocopyrite particles. **International Journal of Mining Science and Technology**, [s.l.], v. 24, n. 4, p. 559–566, 2014.
- AHMADI, R.; DARBAN, A. K. Modeling and optimization of nano-bubble generation process using response surface methodology. **Int. J. Nanosci. Nanotechnol**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 151–162, 2013.
- AHMED, A. K. A. *et al.* Generation of nanobubbles by ceramic membrane filters: The dependence of bubble size and zeta potential on surface coating, pore size and injected gas pressure. **Chemosphere**, [s.l.], v. 203, p. 327–335, 2018a.
- AHMED, A. K. A. *et al.* Influences of Air, Oxygen, Nitrogen, and Carbon Dioxide Nanobubbles on Seed Germination and Plant Growth. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v. 66, n. 20, p. 5117–5124, 2018b.
- AHMED, N.; THOMPSON, S.; GLASER, M. Global Aquaculture Productivity, Environmental Sustainability, and Climate Change Adaptability. **Environmental Management**, [s.l.], v. 63, n. 2, p. 159–172, 2019.
- ALHESHIBRI, M. *et al.* A History of Nanobubbles. **Langmuir**, [s.l.], v. 32, p. 11086–11100, 2016.
- AKINWOLE, A. O.; DAUDA, A. B.; OLOLADE, A. O. Haematological response of *Clarias gariepinus* juveniles reared in treated wastewater after waste solids removal using alum or *Moringa oleifera* seed powder. **International Journal of Acarology**, [s.l.], v. 6, n. 11, p. 1–8, 2016.
- ANI, J. S. *et al.* 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**, [s.l.], v. 7, n. 3, p. 328–335, 2022.

ARANA, L. V. **Princípios químicos de qualidade da água em aquicultura: uma revisão para peixes e camarões**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2004. 231 p.

AQUINO, C. R. *et al.* Produção e tolerância ao pendoamento de alface-romana em diferentes ambientes. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 4, p. 558-566, 2014.

ATKINSON, A. J. *et al.* Nanobubble Technologies Offer Opportunities to Improve Water Treatment. **Accounts of Chemical Research**, [s.l.], n. 52, p. 1196–1205, 2019.

AYRES, M.; AYRES JR., M. **Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas**. Manual do Programa BioEstat. Belém, 2007. 339 p.

AZEVEDO, A. *et al.* Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 94, p. 29–37, 2016.

AZEVEDO, A.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. Raw water clarification by flotation with microbubbles and nanobubbles generated with a multiphase pump. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 75, n. 10, p. 2342–2349, 2017.

AZEVEDO, S. G. *et al.* Climate change and sustainable development: the case of Amazonia and policy implications. **Environmental Science and Pollution Research**, [s.l.], v. 27, n. 8, p. 7745–7756, 2020.

BADIOLA, M. *et al.* Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 81, n. March, p. 57–70, 2018.

BAILEY, D. S.; FERRAREZI, R. S. Valuation of vegetable crops produced in the UVI Commercial Aquaponic System. **Aquaculture Reports**, [s.l.], v. 7, n. June, p. 77–82, 2017.

BAKSH, H. K.; CHOPIN, T. A variation on the IMTA theme: a land-based, closed-containment freshwater IMTA system for tilapia and lettuce. **Aquaculture Canada**, [s.l.], v. 22, p. 57–60, 2012.

BAKSH, H. K. *et al.* Adapting the concepts of tropical integrated agriculture-aquaculture (IAA) and aquaponics to temperate-cold freshwater integrated multi-trophic aquaculture (FIMTA). **Bulletin of the Aquaculture Association of Canada**, Canadá, p. 17–25, 2015.

BARBOSA, P. T. L. *et al.* Nile tilapia production in polyculture with freshwater shrimp using an aquaponic system and biofloc technology. **Aquaculture**, [s.l.], v. 551, p. 737916, 2022.

BECKE, C. *et al.* Shape characteristics of suspended solids and implications in different salmonid aquaculture production systems. **Aquaculture**, [s.l.], v. 516, p. 734631, 2020.

BENINNI, E. R. Y. *et al.* Concentração e acúmulo de macronutrientes em alface cultivada em sistemas hidropônico e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**,

Londrina, v. 26, n. 3, p. 273–282, 2005.

BICH, T. T. N. *et al.* Productivity and economic viability of snakehead *Channa striata* culture using an aquaponics approach. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 89, n. June 2019, p. 102057, 2020.

BIONDO, M. V.; BURKI, R. P. A systematic review of the ornamental fish trade with emphasis on coral reef fishes - an impossible task. **Animals**, [s.l.], v. 10, n. 11, p. 1–21, 2020.

BITTSÁNSZKY, A. *et al.* Nutrient supply of plants in aquaponic systems. **Ecocycles**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 17–20, 2016.

BLAT, S. F. *et al.* Desempenho de cultivares de alface crespa em dois ambientes de cultivo. **Horticultura Brasileira**, [s.l.], v. 29, p. 135–138, 2011.

BLISKA JR., A.; HONÓRIO, S. L. **Cartilha tecnológica: hidroponia**. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1996. 51p.

BOITEUX, L. S. *et al.* Alface BRS Leila: tipo crespa tolerante ao pendoamento. **Embrapa hortaliças**. 2017. Folders. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1070799/brs-leila-alface>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BOYD, C. E. *et al.* Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, [s.l.], v. 51, n. 3, p. 578–633, 2020.

BOYD, C. E. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. **Aquaculture**, [s.l.], v. 226, n. 1–4, p. 101–112, 2003.

BOYD, C. E. Pond water aeration systems. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 9–40, 1998.

BRAZÃO, C. C. *et al.* Combined and isolated effects of ammonia and nitrite on Amazon River prawn *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862) juveniles. **Aquaculture**, [s.l.], v. 533, p. 736204, 2021.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geostatística e Educação**. 2017.

Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html?=&t=resultados>. Acesso em: 02 jan. 2022.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Alface BRS Leila**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4224/alface-brs-leila>. Acesso em: 18 jan. 2018.

BREGNBALLE, J. **A Guide to Recirculation Aquaculture**. Hungary: The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organisation, 2015. 100 p.

BREWER, A.; ALFARO, J. F.; MALHEIROS, T. F. Evaluating the capacity of small farmers to adopt aquaponics systems: Empirical evidence from Brazil. **Renewable Agriculture and Food Systems**, [s.l.], v. 36, p. 375–383, 2021.

CABALLERO, M. J. *et al.* Combined effect of lipid level and fish meal quality on liver histology of gilthead seabream (*Sparus aurata*). **Aquaculture**, [s.l.], v. 179, n. 1–4, p. 277–290, 1999.

CALONE, R. *et al.* Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 687, p. 759–767, 2019.

CARNEIRO, P. C. F. *et al.* **Produção Integrada de Peixes e Vegetais em Aquaponia**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 27 p.

CASTELLANI, D.; CAMARGO, A. F. M.; ABIMORAD, E. G. Aquaponia: aproveitamento do efluente do berçário secundário do Camarão-da-Amazônia (*Macrobrachium amazonicum*) para produção de alface (*Lactuca sativa*) e agrião (*Rorippa nasturtium aquaticum*) hidropônicos. **Bioikos**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 67–75, 2009.

CASTILHO-BARROS, L. *et al.* Economic evaluation of the commercial production between Brazilian samphire and whiteleg shrimp in an aquaponics system. **Aquaculture International**, [s.l.], v. 26, n. 5, p. 1187–1206, 2018.

CHAN, C. U.; OHL, C. D. Total-internal-reflection-fluorescence microscopy for the study of nanobubble dynamics. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 109, p. 1–5, 2012.

CHEN, Y. *et al.* A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s.l.], v. 60, p. 104739, 2020.

CHEN, S. ; LING, J.; BLANCHETON, J. P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 179–197, 2006.

CHUN, C.; TAKAKURA, T. Rate under of root respiration oxygen of lettuce concentrations various dissolved in hydroponics. **Environmental Control in Biology**, [s.l.], v. 32, n. 2, p. 125–135, 1994.

COLT, J. Water quality requirements for reuse systems. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 143–156, 2006.

CRAB, R. *et al.* Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. **Aquaculture**, [s.l.], v. 270, n. 1–4, p. 1–14, 2007.

CRIPPS, S. J; BERGHEIM, A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems: review. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 22, p. 33–56, 2000.

- DAHRAZMA, B. *et al.* Morphological and Physiological Responses of *Cucumis sativus* L. to Water with Micro-Nanobubbles. **Journal of Agricultural Science and Technology**, [s.l.], v. 21, n. 1, p. 181–192, 2019.
- DALSGAARD, J. *et al.* Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 53, p. 2–13, 2013.
- DALSGAARD, J. ; PEDERSEN, P. B. Solid and suspended/dissolved waste (N, P, O) from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Aquaculture**, [s.l.], v. 313, n. 1–4, p. 92–99, 2011.
- DANNER, R. I. *et al.* Designing aquaponic production systems towards integration into greenhouse farming. **Water**, [s.l.], v. 11, n. 10, p. 1–21, 2019.
- DAVID, L. H. *et al.* Sustainability of urban aquaponics farms: An emergent point of view. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 331, p. 129896, 2022.
- DAVIDSON, J. *et al.* Production of market-size North American strain Atlantic salmon *Salmo salar* in a land-based recirculation aquaculture system using freshwater. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 74, p. 1–16, 2016.
- DEL'DUCA, A. *et al.* Variability of the nitrifying bacteria in the biofilm and water column of a recirculating aquaculture system for tilapia (*Oreochromis niloticus*) production. **Aquaculture Research**, [s.l.], v. 50, n. 9, p. 2537–2544, 2019.
- DELAIDE, B. *et al.* Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucrine*) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. **Water**, [s.l.], v. 8, n. 10, p. 1–11, 2016.
- DELONG, D. P; LOSORDO, T. M; RAKOCY, J. E. Tank Culture of Tilapia. **South Regional Aquaculture Center (SRAC)**, [s.l.], n. 282, p. 1–8, 2009.
- DEMANGEAT, J. L. Gas nanobubbles and aqueous nanostructures: The crucial role of dynamization. **Homeopathy**, [s.l.], v. 104, n. 2, p. 101–115, 2015.
- DESWATI *et al.* Applications of aquaponics on pakcoy (*Brassica rapa* L) and Nila fish (*Oreochromis niloticus*) to the concentration of ammonia, nitrite and nitrate. **Oriental Journal of Chemistry**, [s.l.], v. 34, n. 5, p. 2447–2455, 2018.
- DIVER, S.; Aquaponics - Integration of Hydroponics with Aquaculture. **National Sustainable Agriculture Information Service (ATTRA)**, [s.l.], p. 1–28, 2010.
- DOS SANTOS SILVA, M. J. *et al.* Biological responses of Neotropical freshwater fish *Lophosilurus alexandri* exposed to ammonia and nitrite. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 616–617, p. 1566–1575, 2018.
- DUSCI, J. C. *et al.* Evaluation of freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*, for biological solids control in raft aquaponic systems and the protective effectiveness of root guards. **Journal of the World Aquaculture Society**, [s.l.], v. 53, n. 1, p. 290–

308, 2022.

E SILVA, M. F.; VAN PASSEL, S.. Climate-smart agriculture in the northeast of Brazil: An integrated assessment of the aquaponics technology. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 9, 2020.

EBELING, J. M.; TIMMONS, M. B. Recirculating Aquaculture Systems. In: TIDWELL, J. H. (org.) **Aquaculture Production Systems**. Wiley-Blackwell; 2012, cap. 11, 245-277.

EBELING, J. M.; TIMMONS, M. B.; BISOGNI, J. J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. **Aquaculture**, [s.l.], v. 257, n. 1–4, p. 346–358, 2006.

EBINA, K. *et al.* Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the Growth of Plants, Fishes, and Mice. **PLoS ONE**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 2–8, 2013.

EDING, E. H. *et al.* Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 234–260, 2006.

EFFENDI, H. *et al.* The Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides*) concurrently cultivated in aquaponic system. **Advances in Environment Biology**, [s.l.], v. 9, n. 24, p. 382–388, 2015.

EFFENDI, H.; UTOMO, B. A.; DARMAWANGSA, G. M. Phytoremediation of freshwater crayfish (*Cherax quadricarinatus*) culture wastewater with spinach (*Ipomoea aquatica*) in aquaponic system. **AAEL Bioflux**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 421–430, 2015.

EFFENDI, H.; WAHYUNINGSIH, S.; WARDIATNO, Y. 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**, [s.l.], v. 7, n. 6, p. 3055–3063, 2017.

EL-SAYED, A. F. M. **Tilapia culture**. Oxfordshire: CABI Publishing, 2006. 277 p.

EMERENCIANO, M. *et al.* Aquaponia: uma alternativa de diversificação na Aquicultura. **Panorama da Aquicultura**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 147, p. 24-35, 2015.

EMERENCIANO, M. Aquaponics in South America: state of art and perspectives. **International Conference “Aquaponics Research Matters”**, Slovenia, 2016. 80 p.

EMERENCIANO, M.; PINHO, S. M.; CARNEIRO, P. S. F. Aquaponia no Brasil: o que o future nos aguarda? **Aquaculture Brasil**, Santa Catarina, ed. 2, set/out, p. 34-41, 2016.

ENDUT, A. *et al.* A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 5, p.

1511–1517, 2010.

ESGUERRA, E.; RAPUSAS, R.; ROLLE, R. **Post-harvest management of lettuce to ensure quality and safety - Guidance for stakeholders in the horticultural supply chain**. Rome: FAO, 2020. 20 p.

ESPINAL, C. A.; MATULIĆ, D. Recirculating Aquaculture Technologies. *In*: GODDEK, S. *et al.* (org.). **Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future**. Switzerland AG: Springer Nature, 2019. cap. 3, p. 35-76.

ETCHEPARE, R. *et al.* Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 112, n. July, p. 19–26, 2017.

FAN, M. *et al.* Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions. **Mining Science and Technology**, [s.l.], v. 20, n. 1, p. 1–19, 2010.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Rural Aquaculture: Overview and Framework for Country Reviews**. 1998. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/003/x6941e/x6941e04.htm#TopOfPage>. Acesso em: 02 nov. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals**. Roma: 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i9540en/i9540en.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action**. Roma: 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca9229en>. Acesso em: 02 nov. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation**. Roma: 2022.

FAVVAS, E.P. *et al.* Bulk nanobubbles, generation methods and potential applications. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 54, p. 101455, 2021.

FERNANDO, C. H. Rice field ecology and fish culture - an overview. **Hydrobiologia**, [s.l.], v. 259, n. 2, p. 91–113, 1993.

FERRI, L. S.; ROCHA, W. S.; FILHO, M. S. O. B. Tendências e tecnologias sustentáveis na aquicultura: recirculação, aquaponia e bioflocos. **Incaper em Revista**, Vitória, v. 9, p. 66–78, 2018.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, 2008. 402 p.

- FILEP, R. M. *et al.* Pilot Aquaponic Growing System of Carp (*Cyprinus Carpio*) and Basil (*Ocimum Basilicum*). **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [s.l.], v. 10, p. 255–260, 2016.
- FIMBRES-ACEDO, Y. E. *et al.* Performance of *Oreochromis niloticus* in recirculating aquaculture systems at different levels of daily protein intake. **Aquaculture Research**, [s.l.], v. 50, n. 11, p. 3326–3342, 2019.
- FORCHINO, A. A. *et al.* Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 77, p. 80–88, 2017.
- FOSS, A.; VOLLEN, T.; ØIESTAD, V. Growth and oxygen consumption in normal and O<sub>2</sub> supersaturated water, and interactive effects of O<sub>2</sub> saturation and ammonia on growth in spotted wolffish (*Anarhichas minor* Olafsen). **Aquaculture**, [s.l.], v. 224, n. 1–4, p. 105–116, 2003.
- GOADA, A. M. A. S. *et al.* Bio economic features for aquaponic systems in Egypt. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, [s.l.], v. 15, p. 525 – 532, 2015.
- GODDEK, S. *et al.* Challenges of sustainable and commercial aquaponics. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 4, p. 4199–4224, 2015.
- GODDEK, S. *et al.* **Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future**. Cham: Springer Open, 2019. 620 p.
- GOMES JR., F. A. *et al.* Cultivo de alface americana (cv. tainá) em solução nutritiva com omissão de micronutrientes. **Informe Econômico (UFPI)**, Piauí, v. 38, n. 1, p. 34–39, 2019.
- GONÇALVES, A. A.; GAGNON, G. A. Ozone application in recirculating aquaculture system: An overview. **Ozone: Science and Engineering**, [s.l.], v. 33, n. 5, p. 345–367, 2011.
- GONDIM, A. R. O. *et al.* Condutividade elétrica na produção e nutrição de alface em sistema de cultivo hidropônico NFT. **Bioscience Journal**, [s.l.], v. 26, n. 6, p. 894–904, 2010.
- GONNELLA, M. *et al.* Production and nitrate content in lamb's lettuce grown in floating system. **Acta Horticulture**, [s.l.], n. 644, p. 61–68, 2004.
- GRABER, A.; JUNGE, R. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. **Desalination**, [s.l.], v. 246, n. 1–3, p. 147–156, 2009.
- GUNANTI, M.; WULANSARI, P. D.; KINZELLA, K. The erythrocyte and leucocyte profile of saline tilapia (*Oreochromis Niloticus*) in a cultivation system with nanobubbles. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 236, n. 1, 2019.

GUNNING, D.; MAGUIRE, J.; BURNELL, G. The development of sustainable saltwater-based food production systems: A review of established and novel concepts. **Water**, [s.l.], v. 8, n. 12, 2016.

GURUNG, A.; DAHL, O.; JANSSON, K. The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies. **Geosystem Engineering**, [s.l.], v. 19, n. 3, p. 133–142, 2016.

HAGER, J. *et al.* **Aquaponics Production Manual**. Kentucky: School of Aquaculture and Aquatic Sciences College of Agriculture, 2021. 68 p.

HAMPTON, M. A.; NGUYEN, A. V. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. **A Advances in Colloid and Interface Science**, [s.l.] v. 154, p. 30–55, 2010.

HAQUE, M. M. *et al.* Integrated floating cage aquageoponics system (IFCAS): An innovation in fish and vegetable production for shaded ponds in Bangladesh. **Aquaculture Reports**, [s.l.], v. 2, p. 1–9, 2015.

HARGREAVES, J. A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. **Aquaculture**, [s.l.], v. 166, p. 181–212, 1998.

HASAN, Z. *et al.* Short Communication: Water quality improvement of Nile tilapia and catfish polyculture in aquaponics system. **Nusantara Bioscience**, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 83–85, 2017.

HAYAKUMO, S. *et al.* Effects of ozone nano-bubble water on periodontopathic bacteria and oral cells - in vitro studies. **Science and Technology of Advanced Materials**, [s.l.], v. 15, n. 055003, p. 1–7, 2014.

HENZ, G. P.; SUINAGA, F. Tipos de alface cultivados no Brasil. **Embrapa Hortaliças - Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, Brasília, v. 75, n. 36477, p. 1–7, 2009.

HU, L.; XIA, Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 342, p. 446–453, 2018.

HUGHES, A. D.; BLACK, K. D. Going beyond the search for solutions: Understanding trade-offs in European integrated multi-trophic aquaculture development. **Aquaculture Environment Interactions**, [s.l.], v. 8, p. 191–199, 2016.

HUNDLEY, G. C. *et al.* Integration of nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) production *Origanum majorana* l. and *Ocimum basilicum* L. using aquaponics technology. **Acta Scientiarum - Technology**, [s.l.], v. 40, p. 1–7, 2018.

HUNDLEY, G. C.; NAVARRO, R. D. Aquaponia: a Integração Entre Piscicultura e a Hidroponia. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, [s.l.], v. 3, n. 2, p. 52–61, 2013.

IJIMA, M. *et al.* Ultrafine bubbles effectively enhance soybean seedling growth under

nutrient deficit stress. **Plant Production Science**, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 366–373, 2020.

ISHIDA, N. *et al.* Nano Bubbles on a Hydrophobic Surface in Water Observed by Tapping-Mode Atomic Force Microscopy. **Langmuir**, [s.l.], v. 16, n. 16, p. 6377–6380, 2000.

ISLAM, S. M. M. *et al.* Alterations of oxygen consumption and gills morphology of Nile tilapia acclimatized to extreme warm ambient temperature. **Aquaculture Reports**, [s.l.], v. 23, n. January, p. 101089, 2022.

ISHIDA, N.; HIGASHITANI, K. Interaction forces between chemically modified hydrophobic surfaces evaluated by AFM - The role of nanoscopic bubbles in the interactions. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 19, p. 719–725, 2006.

ISO. International Standards Organization. **Fine bubble technology** - General principles for usage and measurement of fine bubbles - part 1: terminology. ISO 20480-22017, 2017. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20480:-1:ed-1:v1:en>. Acesso em: 01 maio 2022.

JAINONTEE, K. *et al.* Preliminary study of the effects of air-fine (Micro/nano) bubbles (fb) on the growth rate of tilapia in phan district, Chiang Rai, Thailand. **International Journal of Plasma Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 84–88, 2019.

JHUNKEAW, C. *et al.* Ozone nanobubble treatment in freshwater effectively reduced pathogenic fish bacteria and is safe for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture**, [s.l.], v. 534, n. December 2020, p. 736286, 2021.

JONES, J.; BENTON, J. **Hydroponics: A practical Guide for the Soilless Grower**. Boca Raton: St Lucie Press, Florida, 1997. 230 p.

JORDAN, R.A. *et al.* Produtividade da alface cultivada em sistema de hidroponia e aquaponia utilizando diferentes substrates. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 525–529, 2018.

KANO, C. *et al.* Avaliação de cultivares de alface crespa sob cultivo protegido no município de Iranduba/AM. **Embrapa Hortaliças**, [s.l.], p. 390–394, 2012.

KLOAS, W. *et al.* A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. **Aquaculture Environment Interactions**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 179–192, 2015.

KÖNIG, B. *et al.* Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 180, p. 232–243, 2018.

KUBITZA, F. **Tilápia: Tecnologia e planejamento na produção comercial**. Jundiá, São Paulo, 2011. 316 p.

KURITA, Y.; CHIBA, I.; KIJIMA, A. Physical eradication of small planktonic crustaceans from aquaculture tanks with cavitation treatment. **Aquaculture**

**International**, [s.], v. 25, n. 6, p. 2127–2133, 2017.

LAM, S. S. *et al.* Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic and rearing tank components. **International Biodeterioration and Biodegradation**, [s.], v. 102, p. 107–115, 2015.

LE CREN, E. D. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). **Journal of Animal Ecology**, [s.], v. 20, n. 2, p. 201-219, 1951.

LEI, B. *et al.* The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, [s.], v. 17, n. 4, p. 837–846, 2018.

LEKANG, O. I. Protein Skimming, Flotation, Coagulation and Flocculation. *In*: LEKANG, O. I (org.). **Aquaculture Engineering**. 2. ed. Norway: Wiley-Blackwell, 2013. cap 7, p. 66–95.

LENNARD, W. A. A comparison of buffering species and regimes applied within a research-scale, recirculating aquaponics system. **Aquaculture and Fisheries**, [s.], v. 6, n. 5, p. 495–505, 2021.

LENNARD, W. A. Aquaponics: a nutrient dynamic process and the relationship to fish feeds. **World aquaculture Society**, [s.], v. 46, n. 3, p. 20–23, 2015.

LENNARD, W. Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production. p. 1–9, 2017. Disponível em: <http://www.aquaponic.com.au/Commercial%20Aquaponic%20Systems%20-%20Intro%20&%20TOC.pdf>. Acesso em: 24 abril 2022.

LENNARD, W. A.; LEONARD, B. V. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. **Aquaculture International**, [s.], v. 14, n. 6, p. 539–550, 2006.

LENNARD, W.; WARD, J. A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system. **Horticulturae**, [s.], v. 5, n. 2, 2019.

LEWIS, W. M. *et al.* Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. **Transactions of the American Fisheries Society**, [s.], v.107, n. 1, p. 92–99, 1978.

LI, M. *et al.* Cryo-EM Visualization of Nanobubbles in Aqueous Solutions. **Langmuir**, [s.], v. 32, n. 43, p. 11111–11115, 2016.

LIANG, J. Y.; CHIEN, Y. H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. **International Biodeterioration and Biodegradation**, [s.], v. 85, p. 693–700, 2013.

LIMA, L. S. Efeito Tyndall. **Revista de Ciência Elementar**, [s.], v. 2, n. 3, p. 1–2, 2014.

LIU, G.; CRAIG, V. S. J. Improved cleaning of hydrophilic protein-coated surfaces using the combination of nanobubbles and SDS. **ACS Applied Materials and Interfaces**, [s.l], v. 1, n. 2, p. 481–487, 2009.

LIU, G; WU, Z.; CRAIG, V. S. J. Cleaning of protein-coated surfaces using nanobubbles: An investigation using a Quartz Crystal Microbalance. **Journal of Physical Chemistry C**, [s.l], v. 112, n. 43, p. 16748–16753, 2008.

LIU, S. *et al.* Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles. **Chemical Engineering Science**, [s.l], v. 93, p. 250–256, 2013.

LIU, S. *et al.* Oxidative Capacity of Nanobubbles and Its Effect on Seed Germination. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, [s.l], v. 4, n. 3, p. 1347–1353, 2016.

LLORACH, R. *et al.* Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. **Food Chemistry**, [s.l], v. 108, n. 3, p. 1028–1038, 2008.

LOSORDO, T. M; MASSER, M. P; RAKOCY, J. E. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems A Review of Component Options. **Southern Regional Aquaculture Center (SRAC)**, [s.l], n. 453, p. 1–12, 1999.

LOU, S. T. *et al.* Nanobubbles on solid surface imaged by atomic force microscopy. **Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena**, [s.l], v. 18, n. 5, p. 2573–2575, 2000.

LOVE, D. C. *et al.* An international survey of aquaponics practitioners. **PLoS ONE**, [s.l], v. 9, n. 7, p.1–14, 2014.

LOVE, D. C. *et al.* Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. **Aquaculture**, [s.l], v. 435, p. 67–74, 2015.

LUKIANOVA-HLEB, E. Y. *et al.* Hemozoin-generated vapor nanobubbles for transdermal reagent- and needle-free detection of malaria. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s.l], v. 111, n. 3, p. 900–905, 2014a.

LUKIANOVA-HLEB, E. Y. *et al.* On-demand intracellular amplification of chemoradiation with cancer-specific plasmonic nanobubbles. **Nature Medicine**, [s.l], v. 20, n. 7, p. 778–784, 2014b.

LUKIANOVA-HLEB, E. Y.; MUTONGA, M. B.G.; LAPOTKO, D. O. Cell-specific multifunctional processing of heterogeneous cell systems in a single laser pulse treatment. **ACS Nano**, [s.l], v. 6, n. 12, p. 10973–10981, 2012.

LUO, X. L. *et al.* Influence of dietary Se supplementation on aquaponic system: Focusing on the growth performance, ornamental features and health status of Koi

carp (*Cyprinus carpio* var. Koi), production of Lettuce (*Lactuca sativa*) and water quality. **Aquaculture Research**, [s.l.], v. 52, n. 2, p. 505–517, 2021.

LUZ, A. O. *et al.* Resistência ao pendoamento de genótipos de alface em ambientes de cultivo. **Agrarian**, [s.l.], v. 2, n. 6, p. 71–82, 2009.

MAHASRI, G. *et al.* Development of an aquaculture system using nanobubble technology for the optimization of dissolved oxygen in culture media for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 137, n. 1, 2018.

MAI, L. *et al.* Cyanine 5.5 Conjugated Nanobubbles as a Tumor Selective Contrast Agent for Dual Ultrasound-Fluorescence Imaging in a Mouse Model. **PLoS ONE**, [s.l.], v. 8, n. 4, p. 1–10, 2013.

MAIA, N. B. Efeito da nutrição mineral na qualidade do óleo essencial da menta (*Mentha arvensis* L.) cultivada em solução nutritiva. *In*: MING, L.C. *et al.* (org.) **Plantas medicinais aromáticas e condimentares: avanços na pesquisa agrônoma**. Botucatu: UNESP, 1998. v. 2, p.81–96.

MALONE, R. F.; PFEIFFER, T. J. Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 3, p. 389–402, 2006.

MARISCAL-LAGARDA, M. M. *et al.* Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: Management and production. **Aquaculture**, [s.l.], v. 366–367, p. 76–84, 2012.

MARTINS, C. I. M. *et al.* New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 43, n. 3, p. 83–93, 2010.

MAUCIERI, C. *et al.* Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. **Italian Journal of Agronomy**, [s.l.], v. 13, n. 1, p. 1–11, 2018.

MCHUNU, N.; LAGERWALL, G.; SENZANJE, A.. Aquaponics in South Africa: Results of a national survey. **Aquaculture Reports**, [s.l.], v. 12, n. August, p. 12–19, 2018.

MEDINA, L. S. *et al.* Sistema de recirculação aquícola: relações peso-comprimento e fatores de condição de quatro espécies de peixes tropicais. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. e52811427368, 2022.

MEENA, L. L. *et al.* Effect of foliar application of potassium with aquaculture wastewater on the growth of okra (*Abelmoschus esculentus*) and *Pangasianodon hypophthalmus* in recirculating aquaponic system. **Scientia Horticulturae**, [s.l.], v. 302, n. January, p. 111161, 2022

MASSER, M. P.; RAKOCY, J.; LOSORDO, T. M. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems Management of Recirculating Systems. **Southern Regional Aquaculture Center (SRAC)**, [s.l.], n. 452, p. 1–12, 1992.

MICHAILIDI, E. D. *et al.* Bulk nanobubbles: Production and investigation of their formation/stability mechanism. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 564, p. 371–380, 2020.

MOLAYEMRAFTAR, T. *et al.* Single and combined effects of ammonia and nitrite on common carp, *Cyprinus carpio*: Toxicity, hematological parameters, antioxidant defenses, acetylcholinesterase, and acid phosphatase activities. **Aquaculture**, [s.l.], v. 548, p. 737676, 2022.

MOREIRA, A. G. L. **Eficácia do Eugenol e Mentol como anestésicos em tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus***. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia de Pesca) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

NAEGEL, L. C. A. Combined production of fish and plants in recirculating water. **Aquaculture**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 17–24, 1977.

NAJAFI, A. S. *et al.* A novel method of measuring electrophoretic mobility of gas bubbles. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 308, n. 2, p. 344–350, 2007.

NAYLOR, R. L. *et al.* Effect of aquaculture on world fish supplies. **Nature**, [s.l.], v. 405, n. 6790, p. 1017–1024, 2000.

NETO, F. B. *et al.* Produtividade de alface em função de condições de sombreamento e temperatura e luminosidade elevadas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 2, p. 189–192, 2005.

NOZZI, V. *et al.* Evaluation of *Dicentrarchus labrax* meats and the vegetable quality of *Beta vulgaris* var. Cicla farmed in freshwater and saltwater aquaponic systems. **Water**, [s.l.], v. 8, n. 10, p. 1–14, 2016.

OH, S. H.; HAN, J. G.; KIM, J. M. Long-term stability of hydrogen nanobubble fuel. **Fuel**, [s.l.], v. 158, p. 399–404, 2015.

OLIVEIRA, H.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J. Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube. **Minerals Engineering**, [s.l.], v. 116, p. 32–34, 2018.

PALM, H. W. *et al.* Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. **Aquaculture International**, [s.l.], v. 26, n. 3, p. 813–842, 2018.

PALM, H. W.; BISSA, K.; KNAUS, U. Part II : fish and plant growth. **AAFL Bioflex**, [s.l.], v. 7, n. 3, p. 162–175, 2014.

PANTANELLA, E. *et al.* Aquaponics vs hydroponics: production and quality of lettuce crop. **ActaHorticulturae**, [s.l.], n. 927, p. 887–894, 2012.

PAREDES-TRUJILLO, A. *et al.* Negative effect of ectoparasite burdens on the condition factor from farmed tilapia *Oreochromis niloticus* in the Yucatan, Mexico. **Veterinary Parasitology**, [s.l.], v. 292, p. 109393, 2021.

PARK, J. S.; KURATA, K. Application of Microbubbles to Hydroponics Solution Promotes Lettuce Growth. **Hort Technology**, [s.l.], v. 19, n. March, p. 2012–2015, 2009.

PARKER, J. L., CLAESSEON, P. M., ATTARD, P. Bubbles, Cavities, and the Long- Ranged Attraction between Hydrophobic Surfaces. **The Journal of Physical Chemistry**, [s.l.], v. 98, n. 34, p. 8468–8480, 1994

PEIXE BR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA (São Paulo). **Anuários Peixe BR da Piscicultura**. 2022. 140 p.

PERERA, R. H. *et al.* Nanobubble ultrasound contrast agents for enhanced delivery of thermal sensitizer to tumors undergoing radiofrequency ablation. **Pharmaceutical Research**, [s.l.], v. 31, n. 6, p. 1407–1417, 2014.

PERSON-LE RUYET, J. *et al.* Effects of O<sub>2</sub> supersaturation on metabolism and growth in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). **Aquaculture**, [s.l.], v. 205, n. 3–4, p. 373–383, 2002.

PFEIFFER, T. J.; OSBORN, A.; DAVIS, M.. Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 24–29, 2008.

PINHEIRO, I. *et al.* Production of the halophyte *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 100, p. 261–267, 2017.

PINHO, S. M. *et al.* Integrated production of Nile tilapia juveniles and lettuce using biofloc technology. **Aquaculture International**, [s.l.], v. 29, n. 1, p. 37–56, 2021a.

PINHO, S. M. *et al.* South American fish species suitable for aquaponics: a review. **Aquaculture International**. **Aquaculture International**, [s.l.], v. 29, n. 4, p. 1427–1449, 2021b.

PINHO, S. M. *et al.* Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 103, p. 146–153, 2017.

PINHO, S. M. *et al.* 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**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 99–112, 2018.

PINTO, Z. V. *et al.* Podridão de raízes causada por *Pythium aphanidermatum* em

cultivares de alface produzidas em sistema hidropônico. **Summa Phytopathologica**, [s.], v. 37, n. 4, p. 180–186, 2011.

POURKARIMI, Z.; REZAI, B.; NOAPARAST, M. Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, [s.], v. 53, n. 2, p. 920–942, 2017.

PRABHU, A. S *et al.* Phosphorus and plant disease. *In*: DATNOFF, L. E.; ELMER W. H.; HUBER, D. M. (org.). **Mineral nutrition and plant disease**. Saint Paul: The American Phytopathological Society, 2007. p. 45–55.

QUEIROZ, J. F. *et al.* **Boas práticas de manejo para sistemas de aquaponia**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 113 p.

RAHMAWATI, A. I. *et al.* Enhancement of *Penaeus vannamei* shrimp growth using nanobubble in indoor raceway pond. **Aquaculture and Fisheries**, [s.], v. 6, n. 3, p. 277–282, 2021.

RAKOCY, J. E. Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. **Virgin Islands Agri Experiment Station, Island Perspectives**, [s.], v. 3. p. 4–10, 1989.

RAKOCY, J. E. Aquaponics - Integrating Fish and Plant Culture. *In*: TIDWELL, J. (org.). **Aquaculture Production Systems**. New Delhi: Wiley-Blackwell, 2012. cap. 14, p. 343–383.

RAKOCY, J. E.; HARGREAVES, J. A. Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. *In*: Techniques for modern aquaculture. **Proceedings of an aquacultural engineering conference**, Washington, 1993. p. 112–136.

RAKOCY, J. E. *et al.* Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. **Acta Horticulturae**, [s.], v. 648, p. 63–69, 2004a.

RAKOCY, J. E. *et al.* Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. New dimensions on farmed tilapia. **Proceedings from the 6th International Symposium on Tilapia in Aquaculture**, [s.], p. 1–15, 2004b.

RAKOCY, J. E.; MASSER, M. P.; LOSORDO, T. M. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture. **SRAC Publication - Southern Regional Aquaculture Center**, [s.], n. 454, p. 16, 2006.

RANDALL, D.J.; TSUI, T.K.N. Ammonia toxicity in fish. **Marine Pollution Bulletin**, [s.], v. 45, p. 17–23, 2002.

RESH, H. M. **Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener**. United States: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 513 p.

RICHE, M.; GARLING, D. Feeding tilapia in intensive recirculating systems. **North Central Regional Aquaculture Center Fact Sheet Series**, [s.], n. August, p. 1–4,

2003.

RIDHA, M. T.; CRUZ, E. M. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 157–166, 2001.

ROMANO, N. *et al.* Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea: Effects on the production and composition of sweetpotato slips and sweet banana peppers. **Aquaculture**, [s.l.], v. 555, n. March, p. 738160, 2022.

SÁ, M. V. C. **Limnocultura: limnologia para Aquicultura**. Fortaleza: Edições UFC, 2012. 218 p.

SÁ, M. V. C. **Manual de práticas laboratoriais em limnocultura - água e solo**. 1. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015. v. 1. 56p.

SACE, C. F; FITZSIMMONS, K. M. Vegetable production in a recirculating aquaponic system using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). **Academia Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 1, n. 12, p. 236–250, 2013.

SANTOS, F. N. *et al.* Avaliação de cultivares de alface sob as condições de cultivos a ambiente protegido e a campo. **Horticultura Brasileira**, [s.l.], v. 23, n. 2, Suplemento, Resumos, agosto, 2005.

SAVIDOV, N. A.; HUTCHINGS, E.; RAKOCY, J. E. Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in canada. **Acta Hortic.**, [s.l.], v. 742, p. 209-221, 2007.

SCHARDONG, R. M. F; MORO, M. F.; BONILLA, O. H. Aquaponic system with white shrimp *Litopenaeus vannamei* rearing and production of the plants *Batis maritima*, *Sarcocornia neei* and *Sporobolus virginicus*. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s.l.], v. 63, p. 1–12, 2020.

SCHMIDT-NIELSEN, K. **Fisiologia animal: adaptação e meio ambiente**. Tradução: OPPIDO, T.; FINGER, C. São Paulo: Santos Editora, 2013. 4. reimpressão. 611 p.

SCHNEIDER, O. *et al.* Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 32, n. 3–4, p. 379–401, 2005.

SEAWRIGHT, D. E.; STICKNEY, R. R.; WALKER, R. B. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. **Aquaculture**, [s.l.], v. 160, n. 3–4, p. 215–237, 1998.

SEGNER, H.; WITT, U. Weaning experiments with turbot (*Scophthalmus maximus*): Electron microscopic study of liver. **Marine Biology**, [s.l.], v. 105, n. 3, p. 353–361, 1990.

SELEK, M. *et al.* The integration of fish and plant production: Nile tilapia

(*Oreochromis niloticus*) and basil (*Ocimum basilicum*) culture in recirculating and aquaponic systems. **Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 28–43, 2017.

SENTHILKUMAR, G. *et al.* An investigation of nanobubbles in aqueous solutions for various applications. **Applied Nanoscience**, [s.l.], v. 8, n. 6, p. 1557–1567, 2018.

SHARRER, M. *et al.* The cost and effectiveness of solids thickening technologies for treating backwash and recovering nutrients from intensive aquaculture systems. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 17, p. 6630–6641, 2010.

SHEI, M. **O que é Aquicultura em Sistema de Recirculação de Água**. 01 de agosto de 2016. Disponível em <http://www.aquaculturebrasil.com/2017/01/30/o-que-e-aquicultura-em-sistema-de-recirculacao-de-agua/>. Acesso em: 30 out. 2021.

SHETE, A. P. *et al.* Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with Common carp (*Cyprinus carpio*) and Mint (*Mentha arvensis*). **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 72–73, p. 53–57, 2016.

SIKAWA, D. C.; YAKUPITIYAGE, A. The hydroponic production of lettuce (*Lactuca sativa* L) by using hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) pond water: Potentials and constraints. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 97, n. 9, p. 1317–1325, 2010.

SILVA, J. P. R. *et al.* Postharvest quality of yellow pear tomato cultivated in aquaponic system. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v. 11, n. 15, p. 227, 2019.

SIMONNE, E.; SIMONNE, A.; WELLS, L. Nitrogen source affects crunchiness, but not lettuce yield. **Journal of Plant Nutrition**, [s.l.], v. 24, n. 4–5, p. 743–751, 2001.

SOMERVILLE, C. *et al.* **Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming**. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, n. 589, 2014. 262 p.

SONNEVELD, C.; VOOGT, W. Nutrient management in substrate systems. *In: Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Netherlands: Springer, 2009. p. 277 - 312.

SPRADLIN, A.; SAHA, S. Saline aquaponics: A review of challenges, opportunities, components, and system design. **Aquaculture**, [s.l.], v. 555, n. March, p. 738173, 2022.

SUANTIKA, G. *et al.* Application of Indoor Recirculation Aquaculture System for White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Growout Super-Intensive Culture at Low Salinity Condition. **Journal of Aquaculture Research & Development**, [s.l.], v. 09, n. 04, 2018.

SUÁREZ-CÁCERES, G. P. *et al.* Characterisation of aquaponic producers and small-scale facilities in Spain and Latin America. **Aquaculture International**, [s.l.], v. 30, n. 2, p. 517–532, 2022.

SULOMA, A. *et al.* The efficiency of washout strategy on decreasing the deposit linoleic acid of tilapia fillet and viscera. **Aquaculture Reports**, [s.], v. 23, n. february, p. 101094, 2022.

SUN, L. *et al.* Research progress on bulk nanobubbles. **Particuology**, [s.], v. 60, p. 99–106, 2022.

TAKAHASHI, M. *et al.* Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation. **Journal of Physical Chemistry B**, [s.], v. 107, n. 10, p. 2171–2173, 2003.

TAKAHASHI, M.; CHIBA, K.; LI, P. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus. **Journal of Physical Chemistry B**, [s.], v. 111, n. 6, p. 1343–1347, 2007.

TAN, B. H.; AN, H.; OHL, C. D. How Bulk Nanobubbles Might Survive. **Physical Review Letters**, [s.], v. 124, n. 13, p. 134503, 2020.

TAO, D. Recent advances in fundamentals and applications of nanobubble enhanced froth flotation: A review. **Minerals Engineering**, [s.], v. 183, n. February, p. 107554, 2022.

TAVARES-DIAS, M. *et al.* Condition factor, hepatosomatic and splenosomatic relation of freshwater fishes naturally parasitized. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, [s.], v. 22, n. 2, p. 533–537, 2000.

TEMESGEN, T. *et al.* Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s.], v. 246, n. June, p. 40–51, 2017.

THI PHAN, K. K. *et al.* Nanobubbles: Fundamental characteristics and applications in food processing. **Trends in Food Science and Technology**, [s.], v. 95, n. November 2019, p. 118–130, 2020.

THORARINSDOTTIR, R. I. **Aquaponics Guidelines**. Iceland: European Union, 2015. 68 p.

TIMMONS, M. B. *et al.* **Recirculating aquaculture systems**. 2. ed. Ithaca: Cayuga Aqua Ventures, 2002. 769 p.

TIMMONS, M. B.; EBELING, J. M. **Recirculating Aquaculture**. 3. ed. Northeastern Regional Aquaculture Center Publication, 2013. 788 p.

TIMMONS, M. B.; EBELING, J. M.; PIEDRAHITA, R. H. **Acuicultura en Sistemas de Recirculación**. 1. ed. New York: Cayuga Aqua Ventures, LLC, 2009. 959 p.

TORRES, L. C; REYES, G. C.; ESPINOSA, L. G. M. Can Reclaimed Water Be Used for Sustainable Food Production in Aquaponics? **Frontiers in Plant Science**, [s.], v. 12, n. June, p. 1–10, 2021.

TRANG, N. T. D.; SCHIERUP, H. H.; BRIX, H. Leaf vegetables for use in integrated

hydroponics and aquaculture systems: Effects of root flooding on growth, mineral composition and nutrient uptake. **African Journal of Biotechnology**, [s.l.], v. 9, n. 27, p. 4186–4196, 2010.

TYRRELL, J. W.G.; ATTARD, P. Images of nanobubbles on hydrophobic surfaces and their interactions. **Physical Review Letters**, [s.l.], v. 87, n. 17, p. 1–4, 2001.

TYSON, R. V. *et al.* Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. **HortScience**, [s.l.], v. 43, n. 3, p. 719–724, 2008.

TYSON, R. V. *et al.* Reconciling Water Quality Parameters Impacting Nitrification in Aquaponics: the pH Levels. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, [s.l.], v. 117, p. 79–83, 2004.

UCHIDA, T. *et al.* Transmission electron microscopic observations of nanobubbles and their capture of impurities in wastewater. **Nanoscale Research Letters**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 1–9, 2011.

USHIKUBO, F. Y. *et al.* Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 361, n. 1–3, p. 31–37, 2010.

VALENTI, W. C. **Aquicultura no Brasil: bases para um desenvolvimento sustentável**. Brasília: CNPQ/ Ministério da Ciência e Tecnologia, 2000. 399 p.

VALENTI, W. C. **Aquicultura sustentável**. In: 12º Congresso de Zootecnia, Portugal, Vila Real: Associação Portuguesa dos Engenheiros Zootécnicos. Anais... p.111-118, 2002.

VAN RIJN, J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 53, p. 49–56, 2013.

VAN UFFELEN, R. L. M.; DE GROOT, N. S. P. Floriculture world wide; production, trade and consumption patterns show market opportunities and challenges. **LEI Wageningen UR**, [s.l.], p. 1–11, 2005.

VAZZOLER, A. E. A. M. **Biologia da reprodução de peixes teleósteos: teoria e prática**. Maringá: EDUEM, 1996. 169 p.

VILLARROEL, M.; ALVARIÑO, J. M. R.; DURAN, J. M. Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. **Spanish Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 9, n. 2, p. 537, 2011.

VINATEA, L.; CARVALHO, J. W. Influence of water salinity on the SOTR of paddlewheel and propeller-aspirator-pump aerators, its relation to the number of aerators per hectare and electricity costs. **Aquacultural Engineering**, [s.l.], v. 37, n. 2, p. 73–78, 2007.

WAITE, R. *et al.* Improving productivity and environmental performance of

aquaculture. **Creating a Sustainable Food Future**, [s.l], n. June, p. 1–60, 2014.

WAMBUA, D. M. *et al.* Environmental and energy requirements for different production biomass of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in recirculating aquaculture systems (RAS) in Kenya. **Aquaculture and Fisheries**, [s.l], v. 6, n. 6, p. 593–600, 2021.

WATTEN, B. J.; BUSCH, R. L. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system. **Aquaculture**, [s.l], v. 41, n. 3, p. 271–283, 1984.

WESTWATER, J. W. Measurement of bubble growth during mass transfer. In: Davis, R. (org.). **Cavitation in Real Liquids**. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1964. p 34–54.

WU, C. *et al.* Generation and characterization of submicron size bubbles. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s.l], v. 179–182, p. 123–132, 2012.

WURTS, W. A; DURBOROW, R. M. Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds. **Southern Regional Aquaculture Center (SRAC)**, [s.l], n. 464, p. 1–4, 1992.

XIAO, W.; XU, G. Mass transfer of nanobubble aeration and its effect on biofilm growth: Microbial activity and structural properties. **Science of the Total Environment**, [s.l], v. 703, p. 134976, 2020.

XING, Z. *et al.* The fabrication of novel nanobubble ultrasound contrast agent for potential tumor imaging. **Nanotechnology**, [s.l], v. 21, n. 14, p. 1–8, 2010.

YEP, B.; ZHENG, Y. Aquaponic trends and challenges – A review. **Journal of Cleaner Production**, [s.l], v. 228, p. 1586–1599, 2019.

ZHANG, X. *et al.* An experimental study on size distribution and zeta potential of bulk cavitation nanobubbles. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, [s.l], v. 27, n. 2, p. 152–161, 2020.

ZHANG, H.; GUO, Z.; ZHANG, X. Surface enrichment of ions leads to the stability of bulk nanobubbles. **Soft Matter**, [s.l], v. 16, n. 23, p. 5470–5477, 2020.

ZIMMERMAN, W. B.; TESAŘ, V.; BANDULASENA, H. C. H. Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, [s.l], v. 16, n. 4, p. 350–356, 2011.

ZOU, Y. *et al.* Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. **Bioresource Technology**, [s.l], v. 210, n. 3, p. 81–87, 2016.