INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA, ANÁLISE ECONÔMICA E PEGADA DE CARBONO DO SISTEMA NA AQUAPONIA

THIAGO BERNARDO DE SOUZA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
OUTUBRO – 2025

INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA, ANÁLISE ECONÔMICA E PEGADA DE CARBONO DO SISTEMA NA AQUAPONIA

THIAGO BERNARDO DE SOUZA

"Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal"

Orientador: Alessandro Coutinho Ramos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
OUTUBRO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S729 Souza, Thiago Bernardo de.

INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA, ANÁLISE ECONÔMICA E PEGADA DE CARBONO DO SISTEMA NA AQUAPONIA / Thiago Bernardo de Souza. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

147 f. : il.
Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.
Orientador: Alessandro Coutinho Ramos.

1. aquaponia. 2. microrganismos. 3. viabilidade econômica. 4. sustentabilidade. 5. *Herbaspirillum seropedicae*. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA, ANÁLISE ECONÔMICA E PEGADA DE CARBONO DO SISTEMA NA AQUAPONIA

THIAGO BERNARDO DE SOUZA

"Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal"

Aprovada em 31 de Outubro de 2025.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA PAULA CANDIDO GABRIEL BERILLI
Data: 27/07/2026 14:14:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Ana Paula Cândido Gabriel Berilli (D.Sc. Genética e Melhoramento de Plantas) – IFES

Documento assinado digitalmente
gov.br DEUSELIO BASSINI FIORESI
Data: 23/07/2026 16:04:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Deusélio Bassini Fioresi (D.Sc. Produção Vegetal) – IFES

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCAS ZANCHETTA PASSAMANI
Data: 27/07/2026 19:20:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Lucas Zanchetta Passamani (D.Sc. Genética e Melhoramento de Plantas) – FAESA

Documento assinado digitalmente
gov.br ALESSANDRO COUTINHO RAMOS
Data: 12/08/2026 12:59:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Alessandro Coutinho Ramos (D.Sc. Produção Vegetal) – UVV
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bençãos e pela oportunidade de fazer o doutorado;
Ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) - Campus de Alegre;
À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF);
À Universidade Vila Velha (UVV);
À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES);
À Agência de Desenvolvimento em Rede do Espírito Santo (ADERES);
À Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca (SEAG);
Ao Dr. Emílio Mameri;
Ao Professor João Batista Meneguelli de Souza;
À banca examinadora por todo aprendizado e contribuição para conclusão desta pesquisa;
Ao meu Orientador, Alessandro Coutinho Ramos, gratidão pela parceria;
À minha família e amigos, muito obrigado por todo apoio e confiança em mim.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 13

2. REVISÃO DE LITERATURA 16

2.1 Características da rúcula (*E. sativa*) 17

2.2 Características da alface (*Lactuca sativa*) 18

2.3 Características da tilápia 19

2.4 Microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV) 19

2.4.1**.** *S. indica* 19

2.4.2*. H. seropedicae* 21

2.5 Cultivos de hortaliças em ambiente controlado 23

2.6 Sustentabilidade econômica da aquaponia 23

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 25

CAPÍTULO I 34

EFEITOS DA INOCULAÇÃO MICROBIANA NO CRESCIMENTO E NA NUTRIÇÃO DE PLANTAS CULTIVADAS EM SISTEMA DE AQUAPONIA 34

1. INTRODUÇÃO 36

2. MATERIAL E MÉTODOS 38

2.1 Desenvolvimento e manejo das culturas bacterianas 38

2.2 Desenvolvimento do fungo *S. indica* e preparo do inóculo 38

2.3 Inoculação das mudas de rúcula 39

2.4 Sistema de aquaponia e manejo experimental 40

2.5 Quantificação da colonização microbiana 40

2.6 Avaliação de crescimento e desenvolvimento vegetal 41

2.7 Análise nutricional do tecido vegetal 41

2.8 Avaliações fisiológicas e fotossintéticas 41

2.9 Análises estatísticas 41

3. RESULTADOS 43

3.1 Efeitos da inoculação microbiana nos parâmetros de crescimento e biomassa de *E. sativa* 43

3.2 Modulação da arquitetura do sistema radicular 45

3.3 Avaliações fisiológicas e teor de clorofila 47

3.4 Taxa de colonização microbiana nas raízes 50

3.5 Perfil de acúmulo de nutrientes na planta 52

3.6 Razão raiz/parte aérea e nitrogênio/fósforo 58

4. DISCUSSÃO 62

4.1 Efeitos da inoculação microbiana no crescimento e fisiologia 62

4.2 Modulação da arquitetura radicular 62

4.3 Colonização e mecanismos simbióticos 63

4.4 Redistribuição e acúmulo de nutrientes 64

4.5 Implicações para sistemas aquapônicos sustentáveis 64

5. CONCLUSÃO 66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

CAPÍTULO II 71

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE AQUAPONIA DE PEQUENA ESCALA: ANÁLISE DE CUSTOS, RENTABILIDADE E PEGADA DE CARBONO 71

1. INTRODUÇÃO 73

2. METODOLOGIA 75

2.1. Local e condições experimentais 75

2.2. Configuração do sistema de aquaponia 75

2.3. Avaliação econômica do sistema 76

2.4. Análise de pegada de carbono 78

2.4.1. Fontes de emissão consideradas 78

2.4.2 Análise de custo-efetividade ambiental 80

2.4.3. Retorno sobre investimento ambiental (EROI).....82

3. RESULTADOS.....84

4. DISCUSSÃO.....93

5. CONCLUSÃO.....100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....101

CAPÍTULO III.....106

AQUAPONIA E SUSTENTABILIDADE: AVANÇOS TECNOLÓGICOS, EFICIÊNCIA ECONÔMICA E DESAFIOS PARA A EXPANSÃO COMERCIAL.....106

1. INTRODUÇÃO.....108

2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E TECNOLÓGICOS DA AQUAPONIA.....110

3. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E EFICIÊNCIA DE RECURSOS.....115

4. MODELOS DE INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO EM SISTEMAS AQUAPÔNICOS.....118

5. ESTRUTURAS DE CUSTO E INDICADORES ECONÔMICOS EM SISTEMAS AQUAPÔNICOS.....122

5.1 Estrutura de custos fixos e variáveis.....122

5.2 Custos indiretos, depreciação e indicadores financeiros clássicos.....123

5.3 Fatores que influenciam a rentabilidade, análises de risco, sensibilidade e incerteza.....124

6. DESAFIOS DE ESCALABILIDADE E COMERCIALIZAÇÃO NA AQUAPONIA.....126

7. POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS À ECONOMIA VERDE NA AQUAPONIA.....129

8. ANÁLISES COMPARATIVAS: AQUAPONIA *VERSUS* SISTEMAS CONVENCIONAIS.....132

9. CONCLUSÃO.....136

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....137

APÊNDICE A.....144

APÊNDICE B 146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ultraestrutura do Clamidósporos de *S. indica*. 20
Figura 2. Micrografias eletrônicas de transmissão de células de *H. seropedicae* cultivadas em ágar nutriente. 22
Figura 3. Colonização de plantas por *H. seropedicae*. 22

CAPÍTULO I - EFEITOS DA INOCULAÇÃO MICROBIANA NO CRESCIMENTO E NA NUTRIÇÃO DE PLANTAS CULTIVADAS EM SISTEMA DE AQUAPONIA

Figura 1. Estrutura para o cultivo das mudas de rúcula (*Eruca sativa*) com iluminação artificial 39
Figura 2. Estrutura do sistema de aquaponia e seus componentes 40
Figura 3. Altura da planta (A), número de folhas (B), diâmetro do caule (C) e área foliar (D) de plantas de rúcula não inoculadas (Ctrl), inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio do fungo e da bactéria (Si + Hs) 44
Figura 4. Peso fresco da parte aérea (A), peso seco da parte aérea (B), peso fresco da raiz (C) e peso seco da raiz (D) de plantas de rúcula submetidas aos diferentes tratamentos: não inoculadas (Ctrl), inoculadas exclusivamente com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio entre fungo e bactéria (Si + Hs) 45
Figura 5. Comprimento de raiz (A), volume de raiz (B), área projetada da raiz (C) e área superficial da raiz (D) de plantas de rúcula submetidas aos tratamentos: não inoculadas (Ctrl), inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio entre fungo e bactéria (Si + Hs) 47
Figura 6. Análise de clorofila (A) e do índice SPADP (B), das plantas de rúcula não inoculadas (Ctrl); inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si); inoculadas apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou inoculadas com o consórcio do fungo com a bactéria (Si + Hs) 50
Figura 7. Visualização do crescimento das plantas de rúcula *(Eruca sativa*) 50
Figura 8. Microscopia de fluorescência representativas da colonização fúngica e bacteriana em raízes de plantas de rúcula (*Eruca sativa*) 51

CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE AQUAPONIA DE PEQUENA ESCALA: ANÁLISE DE CUSTOS, RENTABILIDADE E PEGADA DE CARBONO

Figura 1. Módulo de aquaponia. Legenda: 1 - Caixa de cultivo de tilápias; 2 - Decantador; 3 - Filtro mecânico; 4 - Biofiltro com bio balls; 5 - Perfis de cultivo de alface 76

Figura 2. Análise de sensibilidade entre o preço de venda da alface e o período de *payback* do investimento 90

Figura 3. Análise da pegada de carbono e do custo-efetividade ambiental de um sistema comercial de aquaponia 91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I - EFEITOS DA INOCULAÇÃO MICROBIANA NO CRESCIMENTO E NA NUTRIÇÃO DE PLANTAS CULTIVADAS EM SISTEMA DE AQUAPONIA

Tabela 1. Colonização de *S. indica* e *H. seropedicae* em plantas de rúcula (*Eruca sativa*) cultivadas em sistema de aquaponia.....51

Tabela 2. Teor de macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de plantas de rúcula (*Eruca sativa*) avaliadas aos 45 dias após a inoculação com diferentes tratamentos microbianos.....53

Tabela 3. Porcentagem de estimulação e inibição da absorção de macro e micronutrientes na parte aérea de plantas de rúcula após 45 dias de inoculação....55

Tabela 4. Teor de macronutrientes e micronutrientes nas raízes de plantas de rúcula (*Eruca sativa*) avaliadas aos 45 dias após a inoculação com diferentes tratamentos microbianos.....56

Tabela 5. Porcentagem de estimulação e inibição da absorção de macro e micronutrientes nas raízes de plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.....57

Tabela 6. Relação raíz/parte aérea (R/PA) em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.....59

Tabela 7. Relação de nitrogênio/fósforo (N/P) na parte aérea em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.....61

Tabela 8. Relação de nitrogênio/fósforo (N/P) nas raízes em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.....61

CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE AQUAPONIA DE PEQUENA ESCALA: ANÁLISE DE CUSTOS, RENTABILIDADE E PEGADA DE CARBONO

Tabela 1. Custo de implantação de um módulo comercial de aquaponia, discriminando componentes de infraestrutura, equipamentos e mão de obra, com valores unitários, quantidades, valores totais e participação percentual no investimento.....86

Tabela 2. Custo de produção anual de um módulo comercial de aquaponia, discriminando custos operacionais por categoria de insumo, com valores absolutos e participação percentual no custo total anual.....87
Tabela 3. Fluxo de caixa projetado para cinco anos de operação do sistema de aquaponia no Espírito Santo, considerando o Cenário 2 de comercialização (alface a R$ 4,00 e tilápia a R$ 18,00/kg), com discriminação de receitas, custos, resultado líquido anual e saldo acumulado.....88
Tabela 4. Indicadores econômicos calculados para três cenários distintos de comercialização da alface (CEASA, feiras tradicionais e feiras agroecológicas), incluindo Período Efetivo de Payback, Taxa Interna de Retorno, índice TMA/TIR, Valor Presente Líquido e relação Benefício/Custo.....89

CAPÍTULO III - AQUAPONIA E SUSTENTABILIDADE: AVANÇOS TECNOLÓGICOS, EFICIÊNCIA ECONÔMICA E DESAFIOS PARA A EXPANSÃO COMERCIAL

Tabela 1. Classificação das principais configurações tecnológicas de sistemas aquapônicos.....111
Tabela 2. Comparativo baseado em dados sintetizados por Goddek et al. (2019), Baiyin et al. (2020) e Amin et al. (2021), resumindo as principais diferenças entre os três sistemas mais comumente comparados: aquaponia, hidroponia e aquicultura convencional.....134

RESUMO

SOUZA, Thiago Bernardo de; D.Sc. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; outubro de 2025; INOVAÇÃO BIOTECNOLÓGICA, ANÁLISE ECONÔMICA E PEGADA DE CARBONO DO SISTEMA NA AQUAPONIA; Orientador: Prof. D.Sc. Alessandro Coutinho Ramos

A agricultura convencional intensiva tem contribuído para a degradação do solo, contaminação hídrica e aumento das emissões de gases de efeito estufa, cenário agravado pela projeção de 9,7 bilhões de habitantes em 2050. Torna-se urgente pesquisar sistemas produtivos capazes de conciliar produtividade, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental. A aquaponia destaca-se como alternativa estratégica, embora ainda existam lacunas na literatura relacionadas ao uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCVs), à avaliação financeira em módulos comerciais reais e à quantificação padronizada da pegada de carbono. Este trabalho integrou três capítulos complementares para responder a essas lacunas. No Capítulo I, avaliou-se o efeito de *Herbaspirillum seropedicae* e *Serendipita indica* na produção de rúcula em aquaponia NFT. Os resultados demonstraram que *H. seropedicae* aumentou altura (30%), número de folhas (45%) e teores de N, Ca e Mg, enquanto *S. indica* favoreceu raízes e acúmulo de P. O consórcio apresentou resposta intermediária, indicando interação simbiótica limitada, porém, com potencial agronômico relevante. No Capítulo II, realizou-se análise econômica prospectiva de um módulo comercial com alface e tilápias, revelando TIR 14,63–56%, *Payback* 1,8–3,6 anos, VPL positivo e relação B/C até 1,47, confirmando viabilidade financeira em pequena escala. Adicionalmente, mensurou-se a pegada de carbono via ISO 14064-1, registrando redução de 22,3% de CO_2 em relação ao sistema convencional, podendo atingir 52,2% com energia solar, além de economia hídrica de aproximadamente 90%. O Capítulo III contextualiza os resultados dentro da bioeconomia circular, discutindo avanços tecnológicos, automatização, integração energética e desafios para escalabilidade. Em conjunto, os achados demonstram que a aquaponia com inoculação microbiana representa um modelo produtivo integrado capaz de elevar eficiência nutricional, reduzir dependência de insumos, gerar retorno econômico atrativo e diminuir impactos ambientais, configurando-se como rota promissora para produção sustentável de alimentos em cenários tropicais. Os resultados fortalecem a base científica e operacional da aquaponia no Brasil, evidenciam o potencial de uso dos MPCVs como tecnologia de incremento produtivo e oferecem suporte técnico para políticas públicas e implementação de módulos comerciais replicáveis.

Palavras-chave: aquaponia; microrganismos; viabilidade econômica; sustentabilidade; *Herbaspirillum seropedicae*; *Serendipita indica*.

ABSTRACT

SOUZA, Thiago Bernardo de; Ph.D.; State University of Northern Fluminense Darcy Ribeiro; October 2025; BIOTECHNOLOGICAL INNOVATION, ECONOMIC ANALYSIS, AND CARBON FOOTPRINT OF THE AQUAPONICS SYSTEM; Advisor: Prof. Ph.D. Alessandro Coutinho Ramos

Conventional intensive agriculture has contributed to soil degradation, water contamination, and increased greenhouse gas emissions, a scenario aggravated by the projection of 9.7 billion inhabitants in 2050. It is urgent to research production systems capable of reconciling productivity, economic viability, and environmental responsibility. Aquaponics stands out as a strategic alternative, although gaps still exist in the literature related to the use of plant growth-promoting microorganisms (PGPMs), financial evaluation in real commercial modules, and standardized quantification of the carbon footprint. This work integrated three complementary chapters to address these gaps. In Chapter I, the effect of *Herbaspirillum seropedicae* and *Serendipita indica* on arugula production in NFT aquaponics was evaluated. The results demonstrated that *H. seropedicae* increased height (30%), number of leaves (45%), and N, Ca, and Mg content, while *S. indica* favored roots and P accumulation. The intercropping system showed an intermediate response, indicating limited symbiotic interaction, but with relevant agronomic potential. In Chapter II, a prospective economic analysis of a commercial module with lettuce and tilapia was carried out, revealing an IRR of 14.63–56%, a payback period of 1.8–3.6 years, a positive NPV, and a B/C ratio of up to 1.47, confirming financial viability on a small scale. Additionally, the carbon footprint was measured via ISO 14064-1, registering a 22.3% reduction in CO_2 compared to the conventional system, potentially reaching 52.2% with solar energy, in addition to water savings of approximately 90%. Chapter III contextualizes the results within the circular bioeconomy, discussing technological advances, automation, energy integration, and challenges to scalability. Taken together, the findings demonstrate that aquaponics with microbial inoculation represents an integrated production model capable of increasing nutritional efficiency, reducing dependence on inputs, generating attractive economic returns, and decreasing environmental impacts, thus establishing itself as a promising route for sustainable food production in tropical scenarios. The results strengthen the scientific and operational basis of aquaponics in Brazil, highlight the potential use of MPCVs (Microbial Production Control Modules) as a technology for increasing productivity, and offer technical support for public policies and the implementation of replicable commercial modules.

Keywords: aquaponics; microorganisms; economic viability; sustentability; *Herbaspirillum seropedicae; Serendipita indica*.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Desde o século XVIII as ações antrópicas têm provocado mudanças ambientais no planeta, interferindo diretamente em sua estabilidade (Holoceno), provocando mudanças significativas e o direcionando para uma nova era de instabilidade (Antropoceno), podendo gerar consequências catastróficas e irreversíveis (Crutzen, 2002; Rockström et al., 2009). A forma incorreta de produção de alimentos, baseada principalmente nos modelos agrícolas tradicionais, tem sido considerada um dos principais causadores de impactos ambientais em escala global, devido à contaminação da água e do solo por pesticidas e fertilizantes químicos, liberação de gases de efeito estufa e a perda de biodiversidade, sendo intensificada pelos efeitos das mudanças climáticas (Willett et al., 2019; Yang et al., 2024).

A necessidade de elevar a oferta de alimentos em resposta ao crescimento demográfico constitui um dos desafios centrais do cenário agrícola e alimentar nas próximas décadas. Nesse contexto, vamos necessitar de mais recursos naturais, como o nitrogênio, o fósforo e água doce, muitos dos quais já ultrapassamos os limites planetários (Persson et al., 2022; Van Dijk et al., 2021). Em relação a esta situação, há uma urgência premente de avançar para sistemas de produção de alimentos que sejam mais sustentáveis e resilientes ao clima.

A aquaponia destaca-se como uma escolha inovadora e científica, combinando o cultivo de vegetais e peixes em um sistema de reciclagem de nutrientes e recirculação de água: os resíduos de peixes derivados de micróbios tornam-se nutrientes para as plantas e as plantas, por sua vez, melhoram a qualidade da água para os peixes, sem gerar efluentes, com uso mínimo de água e fertilizantes químicos (Rakocy et al., 2006; Webb et al., 2020).

A aquaponia tem se desenvolvido rapidamente em escala global, consolidando-se como uma tecnologia promissora e sustentável, com potencial de aplicação em diversos setores produtivos (Manan et al., 2025). No entanto, ainda são necessárias pesquisas adicionais para promover a expansão da atividade e a otimização dos sistemas de produção.

Os estudos com microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV) é uma área emergente e ainda pouco estudada nos sistemas de aquaponia, principalmente quando comparado aos sistemas agrícolas tradicionais (Rudoy et al., 2025). A inoculação desses organismos é considerada uma prática inovadora e sustentável, podendo reduzir o impacto ambiental, perdas por doenças, aumentar o crescimento das plantas, reduzir a complementação com fertilizantes químicos, melhorar a absorção de nutrientes e o valor nutricional das plantas. Além disso, podem melhorar a qualidade de água, elevar a taxa de sobrevivência e desenvolvimento dos peixes, resultando em uma maior lucratividade, equilíbrio e eficiência no sistema de produção (Lobanov et al., 2025; Rudoy et al., 2025; Sanchez et al., 2019; Yep e Zheng, 2019). Até o presente momento, não foram encontrados estudos com microrganismos promotores de crescimento vegetal (*Serendipita indica* e *Herbaspirillum seropedicae*) em sistemas de aquaponia, ressaltando a importância da pesquisa para o sistema de produção aquapônico.

A sustentabilidade econômica da aquaponia é um desafio em nível global. Embora existam estudos internacionais referentes ao tema, eles demonstram resultados financeiros distintos, grandes variabilidades nos retornos e uma ausência de padronização metodológica dos sistemas de produção, gerando incertezas para os empreendedores e investidores (Lobanov et al., 2025). No Brasil, mais especificamente no estado do Espírito Santo, encontra-se uma lacuna cientÍfica em relação aos estudos sobre a viabilidade econômica aplicada a módulos reais de sistemas de aquaponia. Até o momento, não há registros de análises que levem em consideração a renda e os mercados locais, identificando as áreas mais adequadas à implantação de sistemas sob uma perspectiva de viabilidade e sustentabilidade econômica. Essa ausência limita o avanço da atividade, inviabiliza o planejamento setorial e restringe a elaboração de políticas públicas baseadas em evidências (Goddek et al., 2015).

Nesse sentido, o sistema de aquaponia alinha-se diretamente à Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, contribuindo de forma significativa para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente: ODS 1 (Erradicação da Pobreza), ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). Ademais, seu potencial como ferramenta didática e prática fortalece o ODS 4 (Educação de

Qualidade), ao promover a educação ambiental e fomentar a conscientização socioambiental por meio de abordagens interdisciplinares e experiências de aprendizagem ativas (Flores-Aguilar et al*.,* 2024; Hart et al*.,* 2014) .

Os objetivos do nosso trabalho são: 1. Investigar os efeitos isolados ou do consórcio de microrganismos promotores de crescimento (*S. indica e H. seropedicae*) sobre o crescimento e desenvolvimento da rúcula (*Eruca sativa*) no sistema de aquaponia, visando uma maior produtividade, fitossanidade e um menor tempo de cultivo. 2. Avaliar a sustentabilidade econômica de um módulo de aquaponia familiar para o Estado do Espírito Santo. 3. Avaliar a aquaponia quanto a viabilidade tecnológica, econômica e ambiental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A aquicultura destina-se à produção de organismos aquáticos que realizam todo o seu ciclo no ambiente aquático (peixes, camarões, moluscos, algas) ou apenas parte dele como (rãs, jacarés e tartarugas). A produção mundial de aquicultura foi de 130,9 milhões de toneladas em 2022, confirmando o crescimento contínuo do setor nas últimas décadas, ultrapassando a pesca de captura e fornecendo proteínas com segurança alimentar para mais de 3,4 bilhões de pessoas (FAO, 2024; Tacon et al., 2025; Wu et al., 2025). No entanto, essa atividade é dependente da superação de alguns desafios ambientais, como a eutrofização dos cursos hídricos, ocasionadas pelos efluentes da atividade, com níveis elevados de nitrogênio e fósforo, desequilibrando todo o ecossistema, além da necessidade e dependência de um consumo elevado de água (Hu et al., 2015; Ruben et al., 2025).

O sistema de aquaponia integra a piscicultura e a agricultura hidropônica em um ciclo fechado simbiótico, que tem por finalidade aproveitar os ciclos bacterianos naturais convertendo os resíduos dos peixes em nutrição para as plantas, onde os peixes atuam na produção de “fertilizantes” e as plantas como purificadores de água e, com isso, o sistema resulta em benefícios ambientais, econômicos e sociais (Bernstein, 2011; Matson, 2008; Rakocy, 2012).

A origem da aquaponia não apresenta uma teoria definitiva, surgindo algumas hipóteses. A primeira indica que ela teria surgido através de povos Babilônicos e Astecas, em ilhas agrícolas denominadas chinampas entre 1.150 e 1.350 d.C., em que as plantas eram cultivadas em estruturas fixas ou flutuantes em águas rasas. A segunda teria acontecido na China, nas plantações integradas de arroz com peixes (Espinal e Matulić, 2019; Rakocy et al., 2006).

Ainda que o crescimento global da aquaponia esteja em 34,23% ao ano, no Brasil os avanços estão mais lentos, com projetos ficando mais restritos em instituições de ensino e pesquisa, além de pequenos produtores para o cultivo em *hobby* para sua autossuficiência e/ou comercialização em pequena escala. Para a ampliação em nível comercial é necessária a qualificação e capacitação profissional, devido à complexidade do sistema e à dinâmica de interação em equilíbrio que devem ser proporcionados na interação entre peixes, hortaliças e bactérias

nitrificantes, em um sistema de recirculação de água e ciclagem de nutrientes (Carneiro et al., 2015; Faisal et al., 2025; Rocha et al., 2025).

A aquaponia vem sendo considerada uma alternativa inovadora para minimizar os impactos ambientais causados pelas atividades aquícolas, e é vista como uma agricultura sustentável, por combinar a produção de vegetais e animais aquáticos, integrando o fluxo de nutrientes com os ciclos biológicos através de processos simbióticos, sendo um método eficiente de cultivo (Rakocy, 2012; Tyson et al., 2011). Essa técnica de produção é considerada uma alternativa inovadora e sustentável para minimizar os impactos ambientais causados pelas atividades aquícolas, e é vista como uma forma de contribuir significativamente para diminuir o tempo de cultivo e elevar o valor nutricional das hortaliças (Yep e Zheng, 2019).

Essa técnica de produção de alimentos conecta a aquicultura com a hidroponia em um sistema de recirculação, em que o efluente proveniente da piscicultura é encaminhado para as bactérias que transformam a amônia em nitrato. Posteriormente, o efluente com nitrato segue para as plantas, que o utilizam como fonte de nitrogênio e acabam por melhorar a qualidade da água, antes de retornar para o cultivo dos peixes, não liberando resíduos para o ambiente (Somerville, 2014).

A dinâmica de produção é fundamentada na reutilização total da água, pois a partir do momento em que o sistema entra em funcionamento, não é necessário realizar as trocas de água, apenas repor a água perdida por evapotranspiração, tornando o volume de água utilizado neste sistema mais baixo em relação aos sistemas tradicionais de agricultura e aquicultura, evitando o desperdício e minimizando a liberação de efluentes no meio ambiente (Carneiro et al., 2015).

Portanto, este sistema de produção pode ser considerado ecologicamente correto quando comparado aos métodos tradicionais de produção aquícola, pois funciona com uso mínimo de água e nutrientes (Forchino et al., 2017; Kralik et al., 2022).

2.1 Características da rúcula (*E. sativa*)

A rúcula (*E. sativa*) é uma hortaliça de folha alongada, porte baixo e com nervuras verdes arroxeadas, pertencente à família da Brassicaceae. Com origem na região do Mediterrâneo e Ásia Ocidental, ela foi introduzida no Brasil através dos

imigrantes italianos e se difundiu para diversas regiões, com os principais consumidores localizados no Sul e Sudeste do país (Sousa Filho et al., 2021).

As folhas apresentam elevado teor de vitaminas A, C e K, além de minerais essenciais como cálcio (Ca) e ferro (Fe), sendo amplamente utilizadas em saladas, pizzas e molho para massas, devido ao sabor característico picante e aroma agradável (Da Silva et al., 2021; Garg e Sharma, 2014). Adicionalmente, possuem diversas propriedades terapêuticas, incluindo efeitos afrodisíacos, diuréticos e digestivos (Garg e Sharma, 2014). No contexto brasileiro, a produção tem demonstrado crescimento significativo ao longo do tempo, conforme dados do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), que indicam uma produção nacional de 40.527 toneladas, com o estado do Espírito Santo respondendo por 629 toneladas, devido à elevada aceitação por parte do mercado consumidor. O cultivo da rúcula apresenta variações sazonais decorrentes das condições climáticas, sobretudo, em função da exigência da espécie por temperaturas amenas, entre 15 °C e 18 °C. Apesar disso, a cultura tem sido conduzida ao longo de todo o ano em diferentes regiões do Brasil (Filgueira, 2013). No cultivo hidropônico, Genuncio et al. (2011) observaram aumento significativo da produtividade quando a temperatura da solução nutritiva foi mantida em 27 °C.

2.2 Características da alface (*Lactuca sativa*)

Esta hortaliça folhosa é a principal do Brasil e a mais importante do mundo. Sua produção nacional é de 671.509 toneladas, com valor de produção de R$ 1.204.557,00. No Espírito Santo, a produção em 2017 foi de 13.657 toneladas, com valor de produção de R$ 17.574,00 (IBGE, 2017; Sala e Costa, 2012). Ela pode ser consumida de forma *in natura* durante todo o ano, devido à facilidade de ser cultivada em várias formas. Apesar de apresentar baixo valor energético, é considerada fonte de vitamina B e C (De Vries, 1997).

Somerville et al. (2014) afirmam que espécies de vegetais que exigem poucas quantidades de nutrientes se adaptam melhor em sistemas aquapônicos, demonstrando que hortaliças como alface, cebolinha e manjericão podem ser cultivadas de forma segura. O cultivo dessas espécies apresenta curto período de desenvolvimento, exige pouca demanda nutricional e ainda é possível em águas concentradas com nitrogênio (Yep e Zheng, 2019).

2.3 Características da tilápia

A tilápia (*Oreochromis niloticus*) é a espécie de peixe mais produzida no país, atingindo 662.230 toneladas no ano de 2024, representando 68,36 % de toda a produção de peixes no país. No Espírito Santo, a produção foi de 20.410 ton., com um aumento de 7,25% em relação a 2023 (PEIXE BR, 2025). É uma espécie onívora que se adapta desde os sistemas de cultivo semi-intensivo a superintensivos, devido a sua rusticidade, além de um crescimento rápido e uma carne de excelente qualidade e aceitação pelo mercado consumidor (Hilsdorf, 1995).

2.4 Microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV)

A utilização de microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV) é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, diante os desafios das mudanças climáticas, redução na utilização de agroquímicos, ataques de pragas e doenças e limitações na disponibilidade hídrica (Al Raish et al., 2025; Hanif et al., 2024). Ressalta-se, também, a sua importância para o aumento do cultivo de uma variedade de plantas nos sistemas de aquaponia, pois permitem uma maior eficiência na absorção de nutrientes (Yep e Zheng, 2019).

É importante ressaltar, também, que vários aspectos precisam ser considerados na relação simbiótica entre os microrganismos promotores de crescimento e as raízes das plantas. Segundo Raaijmakers et al. (2009), na região da rizosfera existe uma grande diversidade de microrganismos interagindo, realizando uma disputa por espaço e nutrientes dos exsudatos das raízes das plantas. A interação entre os MPCV e as plantas, é direcionada pelos exsudatos radiculares, em que a assimilação por parte dos microrganismos constitui um mecanismo fundamental para o estabelecimento dessa associação.

Através dessa relação específica acontece a seleção de microrganismos que vão habitar a rizosfera (Sasse et al., 2018; Zhalnina et al., 2018). Nesse contexto, é importante ressaltar que a diversidade genética e fenotípica das plantas é um fator primordial na modulação dessas interações na rizosfera (Hanif et al., 2024).

2.4.1. *S. indica*

É um fungo endofítico, inicialmente classificado como *Piriformospora indica*, foi isolado pela primeira vez na década de 1990, a partir de estudos conduzidos no

deserto de Thar, na Índia, onde foi identificado na rizosfera e nas raízes de *Prosopis juliflora* e *Ziziphus nummularia*. Este microrganismo estabelece interações mutualísticas com diversas plantas, colonizando o sistema radicular e promovendo o crescimento vegetal mesmo sob condições de estresse nutricional e abiótico, sendo considerado um potencial bioinsumo para o aumento da resiliência e produtividade das plantas (Gill e Tuteja, 2016; Mensah et al., 2020; Verma et al., 1998). Eles formam hifas septadas e ramificações regulares, com clamidósporos piriformes (Figura 1). A atração com as raízes das plantas acontece através de complexa interação química e bioquímica, onde as plantas liberam exsudados radiculares (aminoácidos, açúcares, flavonoides, fenóis), que atraem os fungos. A colonização se inicia com a etapa de crescimento biotrófico, em que as células vivas hospedeiras são colonizadas e, posteriormente, mortas. Em seguida, acontece a germinação dos clamidósporos, formando uma rede de hifas nas regiões da rizoderme e do córtex, sem invadir a endoderme ou os tecidos aéreos da planta hospedeira (Jacoby et al., 2017; Qiang et al., 2012; Varma et al., 2012; Verma et al., 1998). Para que aconteça uma colonização eficiente é necessário que sejam suprimidas as respostas imunológicas da raiz, um processo mediado pelo aumento dos níveis de cálcio intracelular e por modificações na produção de fitohormônios, que atuam como sinalizadores cruciais no reconhecimento entre planta e microrganismo (Jacoby et al., 2017; Pérez-Alonso et al., 2022).

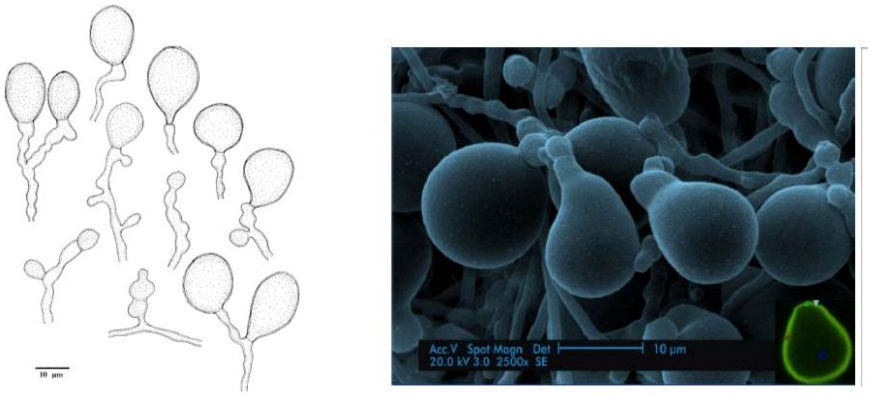


Figura 1. Ultraestrutura dos clamidósporos de *S. indica*. Fonte: Verma et al. (1998).

O fungo *S. indica* tem uma ampla capacidade de realizar associação simbiótica mutualística com uma diversidade de plantas briófitas, pteridófitas, gimnospermas e angiospermas (Oelmüller et al., 2009; Osman et al., 2020; Varma et al., 2012). Ao se associarem com as plantas através das raízes, eles estimulam seu crescimento (aumentam a biomassa, crescimento de raízes e de partes aéreas),

facilitam a absorção de fósforo e nitrogênio; induzem a resistência de estresses bióticos (pragas e doenças) e abióticos (seca, salinidade e metais pesados); além de poderem alterar a expressão gênica da planta, principalmente de genes relacionados a hormônios (citocininas, auxina e etileno), e ao transporte de nutrientes (Boorboori e Zhang, 2022; Chen et al., 2025; Fu et al., 2024; Jangir et al., 2021; Rong et al., 2023; Roylawar et al., 2023; Saleem et al., 2022).

Quando se refere aos estudos com hortaliças, vários benefícios foram encontrados na família Brassicaceae. A couve chinesa (*Brassica campestris* L. var. chinensis), inoculada com o fungo *S. indica,* apresentou aumento no crescimento da planta, ganho de biomassa e contribuiu para o desenvolvimento de pelos radiculares após 14 dias de inoculação e cultivo em meio de cultura semissólido estéril (Dong et al., 2013). Já ao avaliar os efeitos na colza (*Brassica napus*) foi possível verificar aumento no crescimento da planta, floração precoce e melhoria na qualidade do óleo, após 145 dias de inoculação em cultivo em vasos (Su et al., 2017).

2.4.2*. H. seropedicae*

É uma bactéria que foi descoberta no munícipio de Seropédica, estado do Rio de Janeiro, em 1986, em uma investigação de ocorrência de *Azospirillum spp* nas raízes de cereais (milho, sorgo e arroz). Ao verificar que as características das bactérias (genômicas, morfológicas e requisitos de crescimento), não eram similares a nenhuma outra existente, elas foram classificadas em um novo gênero *(Herbaspirillum*). Elas pertencem ao grupo de bactérias Gram-negativas, vibrioides, com formato de bastonetes, podendo ter de um a três flagelos (Figura 2). A espécie recebeu o nome de *H. seropedicae*, em referência ao local onde foi descoberta. Elas são bactérias endofíticas (endo=dentro e fito=planta), pois se desenvolvem no interior das plantas e podem melhorar seu crescimento e desenvolvimento em diversas condições (Kandel et al., 2017).

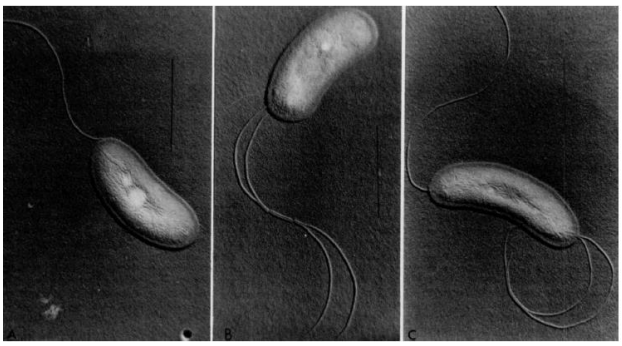


Figura 2. Micrografias eletrônicas de transmissão de células de *H. seropedicae* cultivadas em ágar nutriente. (A, B e C) Um, dois e três flagelos polares em um ou ambos os polos, respectivamente. Barras = 1 µm. Fonte: Baldani et al. (1986).

O início da interação dessas bactérias com as plantas acontece provavelmente devido à quimioatração às raízes, estimulada por meio da liberação de exsudados que servem de fonte de carbono para as bactérias. Esses compostos agem como sinalizadores e substratos, iniciando a colonização da rizosfera e fixação nas superfícies radiculares, e posteriormente, a penetração nos tecidos das raízes (Figura 3). Elas estabelecem uma relação mutualística facultativa com as plantas, fixando nitrogênio atmosférico e produzindo fitormônios (como ácido indolacético – AIA), que estimulam o crescimento das raízes e da parte aérea. Em contrapartida, recebem compostos orgânicos e proteção no interior das plantas (Baldani et al., 2014; 1986; Monteiro et al., 2012; Souza et al., 2015).

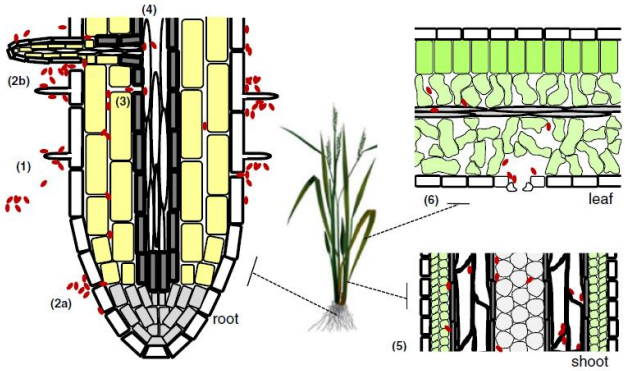


Figura 3. Colonização de plantas por *H. seropedicae*. A associação de *H. seropedicae* (manchas vermelhas) com plantas hospedeiras em condições de laboratório inicia-se com a quimiotaxia da bactéria para a raiz da planta e sua fixação nas superfícies radiculares, preferencialmente na zona dos pelos radiculares (1). A maioria das bactérias permanece nas superfícies radiculares, mas algumas herbaspirilas penetram através de descontinuidades da epiderme, como a zona de alongamento (2a) e fissuras radiculares laterais (FRL) (2b), e então ocorre uma rápida ocupação dos espaços intercelulares radiculares, juntamente com a colonização do aerênquima (no arroz) e do xilema (3). Algumas bactérias então se movem das raízes para as partes aéreas no xilema (4), eventualmente colonizando os brotos (5) e as folhas (6), onde podem se espalhar para os espaços intercelulares e cavidades subestomais. Fonte: Monteiro et al. (2012) traduzido pelo autor.

A maioria dos trabalhos em relação a inoculação de *H. seropedicae*, concentra-se principalmente na inoculação em monocotiledôneas de interesse agrícola, como arroz, milho, sorgo, trigo, cana de açúcar e sorgo (Leandro et al., 2019; Roncato-Maccari et al., 2003; Wiggins et al*.,* 2022) com poucos resultados avaliados em eudicotiledôneas, como erva-estrelada, feijão, soja e tomate (Botta et al., 2013; Canellas et al., 2023; Leandro et al., 2019; Schmidt et al., 2011).

A bactéria *H. seropedicae,* ao colonizar as raízes endofiticamente, geram diversos efeitos nas plantas, como a síntese de fitormônios (principalmente auxina e citocininas) na parte aérea e raízes das plantas, fixação de nitrogênio atmosférico, melhoria da tolerância ao estresse (principalmente em ambientes com limitação hídrica), que contribuem para o desenvolvimento e crescimento das plantas, além da resistência a metais pesados (Pedrosa et al., 2011).

2.5 Cultivos de hortaliças em ambiente controlado

A produção de hortaliças em ambientes controlados (Controlled Enviroment Agriculture – CEA), tem se destacado nas últimas décadas, devido aos desafios globais da produção sustentável de alimentos. O cultivo *indoor* com iluminação de leds surge como uma alternativa, possibilitando o cultivo em áreas urbanas, desertos e em lugares com solos impróprios para uma agricultura tradicional, permitindo uma produção constante, independente dos fatores climáticos, controlando temperatura, umidade, luminosidade e ventos, produzindo alimentos com maior segurança alimentar, sem utilização de agroquímicos e com uso mínimo de água. Nesse cenário, a produção de rúcula (*E. sativa*), possui características promissoras para esse sistema, pois apresenta um ciclo curto de produção, elevada concentração de nutrientes e uma crescente utilização no mercado de alimentos (Al-Kodmany, 2018; Azad et al., 2024; Benke e Tomkins, 2017; Carvalho e Folta, 2014).

2.6 Sustentabilidade econômica da aquaponia

Nas últimas décadas, a percepção em relação aos sistemas de aquaponia em escala comercial tem despertado interesse econômico, devido à conexão com a sustentabilidade ambiental, produção intensiva de alimentos e segurança alimentar (Verma et al., 2023). A utilização de indicadores econômicos como: PEP; TIR; TMA; Índice TMA/TIR; VPL e B/C são essenciais para validar a sustentabilidade

econômica e auxiliar na tomada de decisão do investimento (Pinho et al*.,* 2022; Somerville et al., 2014).

A eficiência do módulo de produção tem relação direta com o adequado dimensionamento das estruturas (decantador, filtro mecânico, biofiltro, tipo de mídia biológica; bombas submersas) e com o manejo dos parâmetros de qualidade de água, pois interferem no equilíbrio do sistema de produção e, consequentemente, na viabilidade econômica (Ghamkhar et al., 2022; Zappernick et al., 2022). Diversos estudos demonstram que os principais custos para a implantação do sistema de aquaponia, estão relacionados com infraestrutura e equipamentos (David et al*.,* 2021; Lobillo-Eguíbar et al., 2020). Já em relação aos custos de produção, destacam-se as despesas com mão de obra e energia elétrica (Ghamkhar et al., 2022). Dessa maneira, torna-se necessário a utilização de energias renováveis e qualificação da mão de obra, para otimizar o sistema de produção e reduzir os custos (Laidlaw e Magee, 2016).

Além disso, a viabilidade econômica da aquaponia está condicionada à escolha da forma de comercialização dos produtos e da estratégia de vendas. Segundo Tokunaga et al. (2015), os sistemas de aquaponia em pequena escala comercial precisam estar inseridos nos mercados locais e/ou regionais para gerar renda e elevar a lucratividade. É importante ressaltar que a sustentabilidade da aquaponia está além da geração de lucro, pois reduz a utilização de água e proporciona a ciclagem dos nutrientes, minimizando a geração e liberação de efluentes (Greenfeld et al., 2021). Conforme Ghamkhar et al. (2022), é necessário o reconhecimento financeiro desses benefícios para a estruturação e formulação de políticas públicas que possam incentivar e alavancar o desenvolvimento sustentável da aquaponia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Kodmany, K. (2018) The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8: 24. DOI doi.org/10.3390/buildings8020024.

Al Raish, S. M., Sourani, O. M., Abu-Elsaoud, A. M. (2025) Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents: Mechanisms, challenges, and future prospects. Applied Microbiology, 5:44. DOI doi.org/10.3390/applmicrobiol5020044.

Azad, M. O. K, Gruda, N. S., Naznin, M. T. (2024) Energy efficiency of glasshouses and plant factories for sustainable urban farming in the desert southwest of the United States of America. Horticulturae, v. 10:1055. DOI doi.org/10.3390/horticulturae10101055.

Baldani, V. L. D., Alvarez, M. D. B., Baldani, J. I., Döbereiner, J. (1986) Establishment of inoculated *Azospirillum* spp. in the rhizosphere and in roots of field grown wheat and sorghum. Plant and Soil, 90:35-46.
Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02277385.pdf>. Acesso em 30 de março de 2024.

Baldani, J. I., Reis, V. M., Videira, S. S., Boddey, L. H., Baldani, V. L. D. (2014) The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: a practical guide for microbiologists. Plant and soil, 384:413-431. DOI doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6.

Benke, K, Tomkins, B. (2017) Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: science, practice and policy, v. 13, n. 1, p. 13-26. DOI doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054.

Bernstein, S. (2011) Aquaponic gardening: a step-by-step guide to raising vegetables and fish together. Canadá. New society publishers. 296p.

Boorboori, M. R., Zhang, H. (2022) The role of *Serendipita indica* (*Piriformospora indica*) in improving plant resistance to drought and salinity stresses. Biology, 11:952. DOI doi.org/10.3390/biology11070952.

Botta, A. L., Santacecilia, A., Ercole, C., Cacchio, P., Del Gallo, M. (2013) *In vitro* and in vivo inoculation of four endophytic bacteria on *Lycopersicon esculentum*. New Biotechnology, 30:666–674 DOI.

Canellas, L. P., Silva, R. M., Barbosa, L. J. da S., Sales, F. S., Ribeiro, R. C. Mota, G. P., Olivares, F. L. (2023) Co-inoculation with Bradyrhizobium and humic substances combined with *Herbaspirillum seropedicae* promotes soybean vegetative growth and nodulation. Agronomy, 13:2660, DOI doi.org/10.3390/agronomy13102660.

Carneiro, P. C. F., Morais, C. A. R. dos S., Nunes, M. U. C., Maria, A. N., Fujimoto, R.Y**.** (2015) Aquaponia: produção sustentável de peixes e vegetais. Aquicultura no Brasil: novas perspectivas. São Carlos: Pedro e João Editores. 2:683-706.

Carvalho, S. D., Folta, K. M. (2014) Sequential light programs shape kale (*Brassica napus*) sprout appearance and alter metabolic and nutrient content. Horticulture research, 1: DOI doi.org/10.1038/hortres.

Chen, X., Sun, R., Hu, D., Yang, Y., Cheng, Z., Hu, P., Fei, Y. (2025) *Serendipita indica* enhances drought tolerance in *Phoebe sheareri* seedlings by improving photosynthetic efficiency, stimulating the antioxidant defense system, and modulating hormone synthesis. Journal of Fungi, 11:717. DOI doi.org/10.3390/jof11100717.

Crutzen, P. J. (2022) Geology of mankind. Nature, 415:23. DOI doi.org/10.1038/415023a.

Da Silva, C. P., Crivelari, A. D., Correa, J. S. (2021) Desenvolvimento de mudas de alface e rúcula tratadas com biofertilizante de extrato de algas. Científic@-Multidisciplinary Journal, 8 :1-10. DOI doi.org/10.37951/2358-260X.2021v8i1.5652.

David, L. H., Pinho, S. M., Agostinho, F., Costa, J. I., Portella, M. C., Keesman, K. J., Garcia, F. (2022) Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view. Journal of Cleaner Production, 331:129896. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129896.

De Vries, I. M. (1997) Origin and domestication of *Lactuca sativa* L. Genetic Resources and Crop Evolution, 44:165-174. DOI doi.org/10.1023/A:100861120072.

Dong, S., Tian, Z., Chen, P. J., Kumar, R. S., Shen, C. H., Cai, D., Oelmüller, R., Yeh, K. W. (2013) The maturation zone is an important target of *Piriformospora indica* in Chinese cabbage roots. Journal of experimental botany, v. 64:4529-4540. DOI doi.org/10.1093/jxb/ert265.

Espinal**,** C. A., Matulić, D**.** (2019) Recirculating aquaculture technologies. In: Goddek, Simon et al. (org.). Aquaponics food production systems. Cham: Springer. 1:35-76.

Faisal, A., Biswal, P., Bhattacharya, D., Kumar, S., Banerjee, M., Bhowmick, G. D., Swain, D. K. (2025) Towards sustainable aquaponics: a bibliometric analysis of trends, scientific developments, and thematic evolution. Aquaculture International, 33:1-29. DOI doi.org/10.1007/s10499-025-02100-x.

FAO. Informe da FAO: A produção mundial de pesca e aquicultura atinge novo recorde histórico. (2024) Disponível em: https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1696371/. Acesso em 27 de setembro 2024.

Filgueira, F. A. R. (2003) Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003. 412 p.

Flores-Aguilar, P. S., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, J. de J. (2024) Can aquaponics be utilized to reach zero hunger at a local level? Sustainability, 16:1130. DOI doi.org/10.3390/su16031130.

Forchino, A. A., Lourguioui, H., Brigolin, D., Pastres, R. (2017) Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life

Cycle Assessment (LCA). Aquacultural Engineering, 77:80-88. DOI

Fu, W. L., Wu, W. J., Xiao, Z. Y., Wang, F. L., Cheng, J. Y., Zou, Y. N., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Wu, Q. S. (2024) *Serendipita indica*: A promising biostimulant for improving growth, nutrient uptake, and sugar accumulation in Camellia oleifera. Horticulturae, 10:936, DOI doi.org/10.3390/horticulturae10090936.

Garg, G., Sharma, V. (2014) *Eruca sativa (L.)*: Botanical description, crop improvement, and medicinal properties. Journal of herbs, spices & medicinal plants, 20:171-182, DOI doi.org/10.1080/10496475.2013.848254.

Genuncio, G. D. C., Silva, R. A. C., Sá, N. M. E., Mary, W., Zonta, E. (2011) Produtividade de rúcula hidropônica cultivada em diferentes épocas e vazões de solução nutritiva. Horticultura Brasileira, 29:605-608. DOI doi.org/10.1590/S0102-05362011000400027.

Ghamkhar, R., Hartleb, C., Rabas, Z., Hicks, A. (2022) Evaluation of environmental and economic implications of a cold weather aquaponic food production system using life cycle assessment and economic analysis. Journal of Industrial Ecology, 26:862-874. DOI doi.org/10.1111/jiec.13230.

Gill, S. S., Gill, R., Trivedi, D. K, Anjum, N. A., Sharma, K. K., Ansari, M. W., Ansari, A. A., Johri, A. K., Prasad, R., Pereira, E., Varma, A., Tuteja, N. (2016). *Piriformospora indica*: potential and significance in plant stress tolerance. Frontiers in microbiology, 7:332. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2016.00332.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdóttir, K. V., Jijakli, H., Thorarinsdóttir, R. (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability, 7:4199-4224, 2015. DOI doi.org/10.3390/su7044199.

Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., Angel, D. L. (2021) Monetizing environmental impact of integrated aquaponic farming compared to separate systems. Science of the Total Environment, 792:148459. DOI doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148459.

Hanif, M. S., Tayyab, M., Baillo, E. H., Islam, M. M., Islam, W., Li, X. (2024) Plant microbiome technology for sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 15:1500260. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260.

Hart, E. R**.,** Webb, K. M**.**, O'Bryant, J. L**.**, Rhyne, A. J**.** (2014) Managing expectations for aquaponics in the classroom: enhancing academic learning and teaching an appreciation for aquatic resources. Fisheries, 39:525-530. DOI doi.org/10.1080/03632415.2014.96635.

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., Khanal, S. K. (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. Bioresource Technology, 188:92-98. DOI doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013.

Hilsdorf, A. W. S. (1995) Genética e cultivo de tilápias vermelhas - uma revisão. Boletim do Instituto de Pesca, 22:73-84. Disponível em: <https://institutodepesca.org/index.php/bip/article/view/B_22_1_73-84/B_22_1_73-

84>. Acesso em 10 de março de 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário. (2017) Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/ alface/br. Acesso em 04 de fevereiro de 2023.

Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., Kopriva, S. l. (2017) The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition-current knowledge and future directions. Frontiers in plant science, v. 8, p. 1617. DOI doi.org/10.3389/fpls.2017.01617.

Jangir, P., Shekhawat, P. K., Bishnoi, A., Ram, H., Soni, P. (2021) Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. Physiological and Molecular Plant Pathology, 116:101691. DOI doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101691.

Kandel, S. L., Joubert, P. M., Doty, S. L. (2017) Bacterial endophyte colonization and distribution within plants. Microorganisms, 5:77. DOI doi.org/10.3390/microorganisms5040077.

Kralik, B., Weisstein, F., Meyer, J., Neves, K., Anderson, D., Kershaw, J. (2022) From water to table: A multidisciplinary approach comparing fish from aquaponics with traditional production methods. Aquaculture, 552: 737953. DOI doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737953.

Laidlaw, J., Magee, L. (2014) Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne. Local Environment, 21 :573-590. DOI doi.org/10.1080/13549839.2014.986716.

Leandro, M. R., Rangel, P. L., Dos Santos, T. C., Borges, W. L., Baldani, J. I., Boddey, L. H., Boddey, R. M., Bressan, W. (2019) Colonization of *Arabidopsis thaliana* by *Herbaspirillum seropedicae* promotes its growth and changes its proteomic profile. Plant and Soil, 443:429–447, 2019. DOI doi.org/10.1007/s11104-019-04236-1.

Lobanov, V., Pate, J., Latrille, F., Joyce, A. (2025) Aquaponics and the crossroads of profitability and sustainability viewed through sensitivity and risk modeling. Journal of Cleaner Production, 528:146674. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146674.

Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V. M**.,** Bermejo, L. A**.** Pérez-Urrestarazu, L. (2020) Economic sustainability of small-scale aquaponic systems for food self-production. Agronomy, 10:1468-1486. DOI doi.org/10.3390/agronomy10101468.

Manan, N. A., Said, M. N. M., Noor, S. A. M., Rahman, N. H. A. (2025) Aquaponics: a sustainable technology for aquaculture and agriculture food security. Planetary Sustainability, 3: 33-44. DOI doi.org/10.46754/ps.2025.01.004.

Matson, J. (2008) Fisgando peixes e plantas. Scientific American Brasil, v. 89. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream /123456789/ 39 2/1/TCC-%20Marcos%20Daniel % 20PRONTO.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2024.

Mensah, R. A., Li, D., Liu, F., Tian, N., Sun, X., Hao, X., Lai, Z., Cheng, C. (2020) Versatile *Piriformospora indica* and its potential applications in horticultural crops. Horticultural Plant Journal, 6:111-121. DOI doi.org/10.1016/j.hpj.2020.01.002.

Monteiro, R. A., Balsanelli, E., Wassem, R., Marin, A. M., Brusamarello-Santos, L. C. C., Schmidt, M. A., Tadra-Sfeir, M. Z., Pankievicz, V. C. S., Cruz, L. M., Chubatsu, L. S., Pedrosa, F. O., Souza, E. M. (2012). *Herbaspirillum*-plant interactions: microscopical, histological and molecular aspects. Plant and Soil, 356:175-196. DOI doi.org/10.1007/s11104-012-1125-7.

Oelmüller, R., Sherameti, I., Tripathi, S., Varma, A. (2009) *Piriformospora indica*, a cultivable root endophyte with multiple biotechnological applications. Symbiosis, 49:1-17, 2009. DOI doi.org/10.1007/s13199-009-0009-y.

Osman, M., Stigloher, C., Mueller, M. J., Waller, F. (2020) An improved growth medium for enhanced inoculum production of the plant growth-promoting fungus *Serendipita indica*. Plant methods, v. 16:39, 2020. DOI doi.org/10.1186/s13007-020-00584-7.

Pedrosa**,** F. O., Monteiro**,** R. A.**,** Wassem, R., Cruz**,** L. M.**,** Ayub**,** R. A., Colauto**,** N. B.**,** Fernandez**,** M. A.**,** Monteiro, R. F.**,** Souza, E. M.**,** Olivares**,** F. G.**,** Baldani, L. S.**,** Baldani, V. L. D.**,** Baldani**,** J. I**.** (2011) Genome of *Herbaspirillum seropedicae* strain SmR1, a specialized diazotrophic endophyte of tropical grasses. PLOS Genetics, 7:e1002064. DOI doi.org/10.1371/journal.pgen.1002064.

Peixe BR – Associação Brasileira da Piscicultura. Anuário Peixe BR da Piscicultura. (2025) São Paulo: Peixe BR, 2025. Disponível em: https://www.peixebr.com.br. Acesso em 03 de dezembro de 2025.

Pérez-Alonso, M. M., Guerrero-Galán, C., González Ortega-Villaizán, A., Ortiz-García, P., Scholz, S. S., Ramos, P., Sakakibara, H., Kiba, T., Ludwig-Müller, J., Krapp, A., Oelmüller, R., Vicente-Carbajosa, J., Pollmann, S. (2022) The calcium sensor CBL7 is required for *Serendipita indica*-induced growth stimulation in Arabidopsis thaliana, controlling defense against the endophyte and K+ homoeostasis in the symbiosis. Plant, cell & environment, 45:3367-3382. DOI doi.org/10.1111/pce.14420.

Persson, L., Carney, B. M. A., Collins, C. D**.**, Cornell, S. E**.**, De Wit, C. A**.**, Diamond, M. L**.**, Fantke, P., Hassan, Y., Jones, K. C**.,** Kumar, P., Macleod, M., Selin, N. E**.**, Souza, M. J. (2022) Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. Environmental Science & Technology, 56:1510-1521. DOI doi.org/10.1021/acs.est.1c04158.

Pinho, S. M., Molinari, D., Tonini, G. C**.**, Love, D. C**.**, Ebeling, J. M., Verdegem, M. A. (2022) Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems. Aquaculture, 552:737987. DOI doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737987.

Qiang, X., Weiss, M., Kogel, K. H., Schäfer, P. (2012) *Piriformospora indica* - a mutualistic basidiomycete with an exceptionally large plant host range. Molecular plant pathology, 13:508-518, DOI doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00764.x.

Rakocy, J. E., Masser, M. P., Losordo, T. M. (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center, publication n^{o}. 454. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284496499_Recirculatingaquaculturetankproduction_systems_Aquaponics-Integrating_fish_and_plant_culture. Acesso em 07 de dezembro de 2024.

Rakocy, J. E. (2012) Aquaponics - integrating fish and plant culture. Aquaculture production systems. Ames: Wiley-Blackwell. p. 344-386.

Raaijmakers, J. M., Paulitz, T. C., Steinberg, C., Alabouvette, C., Moënne-Loccoz, Y. (2009) The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. Plant and Soil, 321:341–361 DOI doi.org/10.1007/s11104-008-9568-6.

Rocha, H. C., Nascimento, B. L. M., Gomes, B. R. A., Rodrigues, A. B., Sousa, L. B. S., Silva, J. M. V., Silva, B. A., Sousa, I. L. P. (2025) A aquaponia como sistema orgânico de produção de alface para a zona urbana. Revista Caderno Pedagógico, 22:01-20. DOI doi.org/10.54033/cadpedv22n6-028.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der L. S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., CorelL, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. J., Foley, J. A. (2009) A safe operating space for humanity. Nature, 461:472-475. DOI doi.org/10.1038/461472a.

Roncato-Maccari, L. D. B., Ramos, H. J. O., Pedrosa, F. O., Alquini, Y., Chubatsu, L. S., Yates, M. G., Steiner, A. A. (2003) Endophytic *Herbaspirillum seropedicae* expresses nif genes in gramineous plants. FEMS Microbiology Ecology, 45:39-47. DOI doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00108-9.

Rong, Z. Y., Lei, A. Q., Wu, Q. S., Srivastava, A. K., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Kuc, K., Yang, T. (2023) *Serendipita indica* promotes P acquisition and growth in tea seedlings under P deficit conditions by increasing cytokinins and indoleacetic acid and phosphate transporter gene expression. Frontiers in Plant Science, 14: 1146182, 2023. DOI doi.org/10.3389/fpls.2023.1146182.

Roylawar, P., Khandagale, K., Nanda, S., Soumia, P. S., Jadhav, S., Mahajan, V., Gawande, S. (2023) Colonization of *Serendipita indica* promotes resistance against Spodoptera exigua in onion (*Allium cepa L*.). Frontiers in Microbiology, 14:1190942. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2023.1190942.

Ruben, M. O., Akinyemi, O. A., Adebayo, A. A., Adeyemi, S. O. (2025) Emerging challenges in aquaculture: current perspectives and human health implications. Veterinary World, 18:15-28, 2025. DOI doi.org/10.14202/vetworld.2025.15-28.

Rudoy, D., Olshevskaya, A., Shevchenko, V., Prazdnova, E., Odabashyan, M., Teplyakova, S. (2025) Prospects for the application of probiotics to increase the efficiency of integrated cultivation of aquatic animals and plants in aquaponic

systems. *Fishes*, 10:251. DOI doi.org/10.3390/fishes10060251.

Sala, F. C., Costa, C. P. (2012) Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. Horticultura Brasileira, 30:187-194. DOI doi.org/10.1590/S0102-05362012000200002.

Saleem, S., Sekara, A, Pokluda, R. (2022) *Serendipita indica* - A review from agricultural point of view. Plants, 11:3417. DOI doi.org/10.3390/plants11243417.

Sanchez, F. A., Vivian-Rogers, V. R., Urakawa, H. (2019) Tilapia recirculating aquaculture systems as a source of plant growth promoting bacteria. *Aquaculture Research*, 50:2054-2065. DOI doi.org/10.1111/are.14072.

Sasse, J., Martinoia, E., Northen, T. (2018) Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome?. Trends in plant science, 23:25-41. DOI dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003.

Schmidt, M. A., Souza, E. M., Baura, V., Wassem, R., Yates, M. G., Pedrosa, F. O., Monteiro, R. A. (2011) Evidence for the endophytic colonization of *Phaseolus vulgaris* (common bean) roots by the diazotroph *Herbaspirillum seropedicae*. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 44:182–185, 2011. DOI doi.org/10.1590/S0100-879X2011007500004.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A ., Lovatelli, A. (2014) Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. 1. ed. Roma: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. 288p.

Sousa Filho, L. N., Ganzo, B. S., Kreutzfeld L. (2021) Desempenho agronômico de Rúcula (*Eruca sativa L*.) em diferentes manejos da cobertura de solo. Research, Society and Development, 10:e18610212176-e18610212176. DOI doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12176.

Souza, R. D., Ambrosini, A., Passaglia, L. M. (2015) Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. Genetics and molecular biology, 38: 401-419. DOI doi.org/10.1590/S1415-475738420150053.

Su, Z. Z., Wang, T., Shrivastava, N., Chen, Y. Y., Liu, X., Sun, C., Yin, Y., Gao, Q. K., Lou, B. G. (2017) *Piriformospora indica* promotes growth, seed yield and quality of Brassica napus L. Microbiological research, 199:29-39. DOI doi.org/10.1016/j.micres.2017.02.006.

Tacon, A. G. J., Metian, M., Hasan, M. (2025) Fish for health: role of fish in global food and animal protein supply. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 33:319-333. DOI doi.org/10.1080/23308249.2024.2420917.

Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., Leung, P. (2015) Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawai. Journal of the World Aquaculture Society, 46:20-32. DOI doi.org/10.1111/jwas.12173.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., Simonne, E. H. (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. HortTechnology, 21:6-13. DOI

doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6.

Varma, A., Bakshi, M., Lou, B., Hartmann, A., Oelmueller, R. (2016) *Piriformospora indica*: a novel plant growth-promoting mycorrhizal fungus. Agricultural Research, 1:117-131, 2012. DOI doi.org/10.1007/s40003-012-0019-5.

Van Dijk, M., Morley, T., Rau, H. (2021) A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010 - 2050. Nature Food, 2:494-501. DOI doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9.

Verma, A. K., Singh, R. K., Kumar, P., Kumar, N., Kumar, A. (2023) Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system: emerging trends and future prospects. Technological Forecasting and Social Change, 194:22709. DOI doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122709.

Verma, S.**,** Varma, A., Rexer, R., Kost, A., Sarbhoy, A., Bisen, P., Bütehorn, P., Franken, P. (1998) *Piriformospora indica*, gen. et sp. nov., a new root-colonizing fungus. Mycologia, 90:896-903, DOI doi.org/10.1080/00275514.1998.12026983.

Webb, P.**,** Tim, G. B., John, B., Derek, F., Niamh M. K., Sandy M. T. (2020) The urgency of food system transformation is now irrefutable. Nature Food, 1:584-586, DOI doi.org/10.1038/s43016-020-00161-0.

Wiggins, G., Thomas, J., Rahmatallah, Y., Deen, C. Haynes, A., Degon, Z., Glazko, G., Mukherjee, A. (2022) Common gene expression patterns are observed in rice roots during associations with plant growth-promoting bacteria, *Herbaspirillum seropedicae* and *Azospirillum brasilense*. Scientific Reports, 12;8827. DOI doi.org/10.1038/s41598-022-12285-3.

Willett, W., Rockstrom, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., Declerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Franzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Sibanda, L. M., Afhin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Augustina, R., Francesco, M. D. B., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., singh, S., Cornell, S. E., Reddy, K. S., Narain, S., Nishtar, S., Murray,C. J. L. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet, 393:447-492. DOI doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Wu, A. Q., Liu, Y., Wang, Z., Zhang, J., Chen, H. (2025) Deep learning for sustainable aquaculture: opportunities and challenges. Sustainability, 17:5084. DOI doi.org/10.3390/su17115084.

Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C. B., Zhu, Y. G., Burney, J., D'Odorico, P., Fantke, P., Fargione, J., Finlay, J. C., Rulli, M. C., Sloat, L., Groenigen, K. J. V., West, P. C., Ziska, L., Michalak, A. M., Team, C. A. (2024) Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. Science, 385:eadn3747. DOI doi.org/10.1126/science.adn3747.

Yep, B., Zheng, Y. (2019) Aquaponic trends and challenges - A review. Journal of Cleaner Production, 228:1586-1599. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290.

Zappernick, N., Nedunuri, K. V., Islam, K. R., Khanal, S., Worley, T., Laki, S. L., Shah, A. (2022) Techno-economic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system. Journal of Cleaner Production, 365:132753. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132753.

Zhalnina, K., Louie, C. B., ZhaoHao, Mansoori, N., Rocha, U. N. Shi, S. J., Heejung Cho, H., Karaoz, U., Loqué, D., Bowen, B. P., Firestone, M.K., Northen, T. R., Brodie, E. L. (2018) Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. Nature microbiology, 3:470-480. DOI doi.org/10.1038/s41564-018-0129-3.

CAPÍTULO I

EFEITOS DA INOCULAÇÃO MICROBIANA NO CRESCIMENTO E NA NUTRIÇÃO DE PLANTAS CULTIVADAS EM SISTEMA DE AQUAPONIA

RESUMO

O uso excessivo de fertilizantes sintéticos na agricultura tem afetado gravemente o meio ambiente, o que pode levar a ações sustentáveis capazes de equilibrar a produtividade e o manejo dos recursos naturais. Nesse contexto, os microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV) têm se destacado como ferramenta biotecnológica capaz de aumentar a eficiência nutricional das plantas e reduzir a dependência de adubação química, especialmente em sistemas de produção de base biológica. A aquaponia é uma dessas alternativas que diminui os insumos químicos e enriquece a reciclagem de nutrientes com um ciclo biológico fechado. Esta investigação avaliou o efeito de dois microrganismos promotores de crescimento de plantas, *Herbaspirillum seropedicae* e *Serendipita indica*, em plantas de rúcula (*Eruca sativa*) cultivadas sob luz ambiental artificial em um local de aquaponia. Os testes compreenderam quatro tratamentos: controle (sem inoculação), inoculação única com cada microrganismo e um consórcio de ambos. *H. seropedicae* aumentou a altura, o número de folhas, a área foliar, a biomassa seca da parte aérea, e *S. indica* promoveu o alongamento das raízes e o acúmulo de fósforo. O consórcio aumentou o volume radicular, mas sem aumentar a quantidade de biomassa, apontando para uma competição simbiótica parcial. Mudanças metabólicas correspondentes, em parte, ao efeito de diluição da clorofila e à transferência de nitrogênio para tecidos estruturais foram observadas através de estudo fisiológico. Nitrogênio, cálcio e magnésio foram mais assimilados pela inoculação bacteriana, enquanto a inoculação fúngica aumentou a absorção de fósforo. Sugere-se que *H. seropedicae* e *S. indica* se complementam em sistemas de aquaponia no que diz respeito ao crescimento e à eficiência nutricional, sendo assim ecologicamente corretos e diminuindo o uso de fertilizantes químicos.

Palavras-chave: aquaponia sustentável; *Herbaspirillum seropedicae*; *Serendipita indica;* bioinoculação; eficiência nutricional.

ABSTRACT

The excessive use of synthetic fertilizers in agriculture has generated severe environmental impacts, demanding sustainable approaches that reconcilie productivity and conservation of natural resources. In this context, plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) have stood out as a biotechnological tool capable of increasing the nutritional efficiency of plants and reducing dependence on chemical fertilization, especially in biologically based production systems. Aquaponics emerges as a viable alternative by reducing the use of chemical inputs and promoting the reuse of nutrients through closed biological cycles. This study evaluated the effect of two plant growth-promoting microorganisms, *Herbaspirillum seropedicae* and *Serendipita indica*, on arugula plants (*Eruca sativa*) grown in an aquaponic system with artificial lighting. Four treatments were tested: control (no inoculation), individual inoculation with each microorganism, and a consortium of both. The results demonstrated that *H. seropedicae* promoted significant increases in height, number of leaves, leaf area, and shoot dry biomass, while *S. indica* stimulated root elongation and phosphorus accumulation. The intercropping increased root volume, but without additional biomass gains, indicating partial symbiotic competition. Physiological analysis revealed metabolic adjustments related to the chlorophyll dilution effect and nitrogen redistribution to structural tissues. Bacterial inoculation resulted in greater assimilation of nitrogen, calcium, and magnesium, while fungal inoculation increased phosphorus absorption. It is concluded that *H. seropedicae* and *S. indica* act in a complementary manner, enhancing plant growth and nutritional efficiency in aquaponic systems, contributing to sustainability and reducing dependence on chemical fertilizers.

Keywords: sustainable aquaponics; *Herbaspirillum seropedicae; Serendipita indica*; bioinoculation; nutrient efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação da demanda global por alimentos e os impactos ambientais crescentes gerados pela agricultura convencional têm impulsionado a busca por sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes (Robinson, 2024).

O modelo agrícola tradicional, marcado pelo elevado uso de fertilizantes sintéticos, pesticidas e significativa exploração de recursos naturais, contribui para a degradação dos ecossistemas, manifestando-se na contaminação dos solos e corpos d'água, redução da biodiversidade e aceleração das mudanças climáticas (Crutzen, 2002; Rockström et al., 2009; Willett et al., 2019; Yang et al., 2024). Com a projeção de que a população mundial ultrapassará 9,7 bilhões de pessoas até 2050, intensifica-se a pressão sobre áreas agricultáveis e recursos hídricos, muitos já tecnicamente esgotados em sua capacidade de renovação (Persson et al., 2022; Van Dijk et al., 2021).

Neste contexto, a aquaponia destaca-se como alternativa inovadora, pois são sistemas integrados e circulares de produção de pescado e hortaliças, pautados na reciclagem interna de nutrientes e redução do consumo hídrico e de fertilizantes químicos (Manan et al., 2025; Rakocy et al., 2006; Somerville et al., 2014). Tais avanços reforçam o papel da aquaponia na segurança alimentar global e na mitigação dos impactos ambientais. Ainda assim, o sucesso desses sistemas depende do domínio de múltiplos fatores biotecnológicos, com ênfase nos microrganismos benéficos capazes de transformar resíduos aquáticos em nutrientes assimiláveis (Goddek et al., 2019; Tyson et al., 2011).

Nesse sentido, microrganismos promotores de crescimento vegetal (MPCV), com destaque para fungos endofíticos como *S. indica* e bactérias fixadoras como *H. seropedicae*, assumem papel central no incremento da performance vegetal. Suas funções envolvem a fixação biológica de nitrogênio, a síntese de fitormônios, a solubilização de nutrientes e a ativação de defesas em plantas hospedeiras (Baldani et al., 1986; Gill e Tuteja, 2016; Jacoby et al., 2017; Mensah et al., 2020; Verma et al., 1998). A relação simbiótica entre MPCVs e plantas pode impulsionar ganhos de produtividade, elevar a qualidade nutricional e conferir maior resistência a estresses abióticos e bióticos (Rocha et al., 2025; Yep e Zheng, 2019), especialmente em

sistemas controlados que otimizam o manejo de fatores abióticos e microbiota de interesse (Mourouzidou et al., 2023).

A integração entre avanços biotecnológicos e sistemas aquapônicos alinha-se aos diversos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável* (ODS) preconizados na Agenda 2030 da ONU, abrangendo segurança alimentar, agricultura sustentável, inovação e mitigação das mudanças climáticas (Flores-Aguilar et al*.,* 2024).

Diante disso, este estudo objetiva avaliar os efeitos isolados ou em consórcio de MPCVs (*S. indica e H. seropedicae*) sobre o crescimento, desenvolvimento e nutrição de plantas de rúcula (*E. sativa*) em sistema de aquaponia com iluminação artificial, visando maximizar produtividade, nutrir com eficiência e reduzir o ciclo de cultivo, ampliando as bases para a sustentabilidade alimentar e ambiental.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento e manejo das culturas bacterianas

A bactéria *H. seropedicae* cepa RAM10, marcada com o gene GFP via *transposon* Tn5, foi obtida do Laboratório de Microbiologia Ambiental e Biotecnologia (LMAB), Biopráticas, da Universidade Vila Velha (UVV), Brasil. Esta construção, gentilmente cedida pelo Dr. Fábio Lopes Olivares (UENF), deriva da cepa ZA95, isolada originalmente de raízes de arroz, conforme descrito por Baldani et al. (1986). As bactérias foram cultivadas em meio líquido DYGS (g L^{-1}: glicerol 2,5; extrato de levedura 4,0; peptona 5,0; K_2HPO_4 1,5; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,5; NaCl 2,0; pH 6,5) sob agitação (130 rpm), a 30 ºC por 24 horas, até atingirem densidade de, aproximadamente, 10^8 UFC mL^{-1}, seguindo as recomendações para maximizar viabilidade celular em inoculantes agrícolas. A concentração celular foi estimada por leitura de absorbância a 600 nm e ajustada por diluição em água estéril.

2.2 Desenvolvimento do fungo *S. indica* e preparo do inóculo

O isolado de *S. indica* foi obtido da coleção do Centro de Ecologia, Evolução e Mudanças Ambientais, da Universidade de Lisboa, e propagado segundo Varma et al. (1999), com adaptações para maior produção micelial. Discos de ágar (1 cm) de colônias ativas foram inoculados em frascos Erlenmeyer (250 mL), contendo 100 mL de meio líquido Kaefer (2 g L^{-1} peptona, 1 g L^{-1} caseína, 1 g L^{-1} extrato de levedura, 10 g L^{-1} glicose, 50 mL L^{-1} solução de macronutrientes: 12 g L^{-1} $NaNO_3$, 10,4 g L^{-1} KCl, 10,4 g L^{-1} $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 30,4 g L^{-1} KH_2PO_4; 10 mL L^{-1} solução de micronutrientes: 13,3 µM H_3BO_3, 7 µM $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, 2 µM $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,5 µM $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 0,086 µM $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$; 1 mL L^{-1} Fe-EDTA, 1 mL L^{-1} solução de vitaminas, pH ajustado 5,5-5,6). Os frascos foram incubados a 28 ºC a 100 rpm por 10 dias, para maximizar densidade micelial e viabilidade. Após coleta por filtração, o micélio foi macerado em almofariz com solução salina estéril até obtenção de suspensão homogênea (concentração final: 10 g micélio fresco/100 mL).

2.3 Inoculação das mudas de rúcula

As inoculações microbianas foram conduzidas no LMAB/UVV. Sementes de rúcula (*E. sativa*) foram semeadas em bandejas plásticas (66,4 × 33,4 × 4,35 cm) contendo substrato comercial esterilizado, com três sementes por célula. Quatro tratamentos foram estabelecidos: T1 (controle, 1 mL água estéril/célula); T2 (1 mL suspensão de *S. indica*/célula); T3 (1 mL suspensão de *H. seropedicae*/célula, 3 × 10^9 células/mL); e T4 (1 mL mistura das duas suspensões). Todas as inoculações foram feitas na semeadura, com volumes padronizados por célula e misturas feitas imediatamente antes da aplicação para garantir viabilidade. Após semeadura e inoculação, as bandejas foram mantidas no escuro (36 h, 27 ºC) para uniformizar emergência (Figura 1). Em seguida, mudas foram expostas à iluminação artificial contínua (16 h luz/8 h escuro) em bancadas equipadas com lâmpadas *full spectrum* (80 W, 120 LEDs, 78 vermelhos [640–660 nm], 24 azuis [430-450 nm], 6 brancos e 6 e UV), dispostas a 30 cm de altura e 25 cm entre lâmpadas. Após 15 dias, plântulas com aproximadamente 5 cm foram transplantadas para perfis NFT no sistema aquapônico (Figura 2), replicando as condições de iluminação foi realizada reinoculação na solução do sistema (32 mL de suspensão microbiana/100 L de água para cada tratamento). O ciclo de cultivo seguiu por 45 dias.



Figura 1. Estrutura para o cultivo das mudas de rúcula (*E. sativa*) com iluminação artificial. A) Projeto da mesa elaborado para o cultivo das mudas de rúcula com iluminação artificial. B) Mesa com mudas de rúcula em estágio pós-emergência. C) Mudas de rúcula em estágio final cultivadas com iluminação artificial.

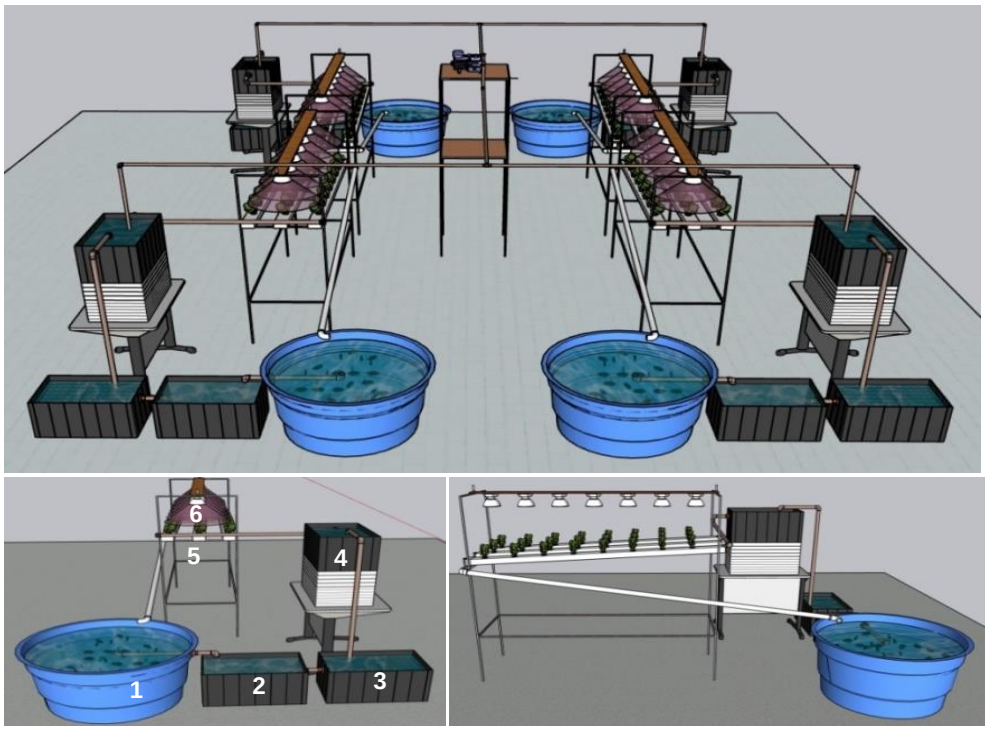


Figura 2. Estrutura do sistema de aquaponia e seus componentes. T_1 (controle): inoculadas com água destilada; T_2: inoculadas com *S. indica*; T_3: inoculadas com *H. seropedicae*; T_4: inoculadas com *H. seropedicae* e *S. indica*. 1 - Tanque de peixes; 2 - Decantador; 3 - Filtro mecânico; 4 - Biofiltro; 5 - Perfis de cultivo; 6 - Iluminação artificial; (A) Vista completa do experimento; (B) Vista frontal de um módulo; (C) Vista lateral de um módulo.

2.4 Sistema de aquaponia e manejo experimental

O dimensionamento seguiu a técnica *Nutrient Film Technique* (Somerville et al., 2014). O experimento, em delineamento inteiramente casualizado, utilizou quatro módulos idênticos (um por tratamento), com 24 repetições por módulo. Cada módulo compreendeu um tanque de 150 L contendo 3 tilápias de 200 g, conectado a sistemas de decantação (80 L), filtragem mecânica (60 L) e biofiltro (60 L). Uma bomba submersa de 1000 L h^{-1} proporcionou circulação constante. Nos perfis de cultivo (2 m cada, 3 por módulo), foram plantadas 8 mudas por perfil, espaçadas em 20 cm, totalizando 24 plantas/módulo e 96 plantas. Temperatura ambiente foi mantida em 27 ºC com monitoramento diário.

2.5 Quantificação da colonização microbiana

A colonização fúngica e bacteriana foi avaliada conforme Phillips e Hayman (1970), adaptado para marcadores modernos. Após colheita, raízes foram lavadas em água deionizada, clareadas por 24 h em KOH 10% (banho-maria 60 ºC), coradas por imersão em azul de tripano 0,02% por 10 min. Vinte segmentos radiculares (~1

cm) foram analisados em microscópio de fluorescência; esporos de fungos (autofluorescência) e colônias bacterianas marcadas (GFP) serviram como índice de colonização. Percentual foi calculado como: [(nº segmentos colonizados/nº total analisados) × 100%].

2.6 Avaliação de crescimento e desenvolvimento vegetal

Quarenta e cinco dias após o transplante foram mensurados: diâmetro do caule com paquímetro digital, altura com régua, comprimento, área projetada/superficial e volume radicular com o sistema *WinRhizo* (versão 2013d, *Regent Instruments*), área foliar com medidor LI-3100 (Li-Cor). Massa fresca das partes aérea/raiz foi registrada em balança analítica (AUW220D-Shimadzu); secagem ocorreu em estufa ventilada (Q314M-Quimis, 60 ºC, 72 h) e massa seca determinada posteriormente.

2.7 Análise nutricional do tecido vegetal

Amostras de parte aérea/raiz foram lavadas, secas, moídas e acondicionadas hermeticamente. O nitrogênio foi extraído/determinado por digestão sulfúrica e método de Nessler (Jackson, 1965). Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, S, B, Fe, Zn, Mn, Cu, Mo e Ni foram quantificados por ICP-OES após digestão com HNO_3 e H_2O_2, como descrito por Peters (2005). Parâmetros do ICP utilizaram: plasma 8,0 L min^{-1}, gás auxiliar 0,70 L min^{-1}, gás carreador 0,55 L min^{-1}.

2.8 Avaliações fisiológicas e fotossintéticas

As folhas foram analisadas pelo índice SPAD (SPAD-502-PLUS, Konica Minolta) e teor de clorofila com atLEAF CHL PLUS. Três leituras por folha (face adaxial) foram realizadas em seis plantas por parcela, padronizando horário e idade das folhas.

2.9 Análises estatísticas

Os dados obtidos nos experimentos foram submetidos inicialmente à verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, utilizando o teste de Shapiro-Wilk e o teste de Levene, respectivamente, com o objetivo de assegurar a validade das comparações paramétricas. Confirmados esses pressupostos, aplicou-se a Análise de Variância de uma via (*one-way* ANOVA) para

avaliar a existência de diferenças significativas entre os tratamentos avaliados. A one-*way* ANOVA permite comparar as médias de três ou mais grupos independentes para determinar se pelo menos uma média difere estatisticamente das demais, considerando a hipótese nula de igualdade entre os grupos. O nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

Quando a análise indicou diferenças significativas ($p < 0,05$), procedeu-se à comparação múltipla das médias por meio do teste de Tukey (HSD), que identifica quais pares de médias diferem entre si. Os resultados da ANOVA foram expressos pela estatística F com seus respectivos graus de liberdade e valores de p, de modo a descrever a magnitude e a significância dos efeitos observados. Os dados foram apresentados sob a forma de médias ± desvio-padrão (DP) e representados graficamente por meio de gráficos de barras contendo letras indicativas das diferenças estatísticas identificadas pelo teste de Tukey. Todas as análises foram conduzidas no *software* GraphPad Prism 7.0 (GRAPHPAD SOFTWARE, SAN DIEGO, EUA), utilizando distribuição de probabilidade gaussiana e assumindo variâncias homogêneas entre os grupos, conforme os procedimentos recomendados nas rotinas padrão do programa.

3. RESULTADOS

3.1 Efeitos da inoculação microbiana nos parâmetros de crescimento e biomassa de *E. sativa*

A análise dos parâmetros morfológicos aponta que a inoculação com *H. seropedicae* (Hs), isoladamente ou em consórcio com *S. indica* (Si + Hs), promoveu incrementos expressivos no desenvolvimento vegetativo da rúcula após 45 dias de cultivo. Em comparação ao tratamento controle, a inoculação bacteriana resultou em aumentos significativos na altura das plantas (Figura 3A), comportamento reproduzido nos parâmetros número de folhas e área foliar (Figuras 3B e 3D). Essa tendência confirma o papel de *H. seropedicae* como um microrganismo promotor de crescimento vegetal (PGPR) altamente eficiente, efeito amplamente relatado também em gramíneas e hortaliças.

A ausência de diferença estatística no diâmetro do caule (Figura 3C) indica que o estímulo bacteriano e do consórcio atuou preferencialmente sobre processos de expansão foliar e alongamento do eixo caulinar, não impactando a lignificação ou o espessamento estrutural do caule. Em termos fisiológicos, o incremento em altura e área foliar observado nas plantas tratadas com *H. seropedicae* correlaciona-se fortemente com o aumento da fixação biológica de nitrogênio e maior disponibilidade de cálcio e magnésio na parte aérea, elementos essenciais à expansão celular e à fotossíntese.

No que tange à biomassa acumulada, os resultados revelam diferenças seletivas. Embora o peso fresco da parte aérea, o peso fresco da raiz e o peso seco da raiz não tenham diferido entre os tratamentos (Figuras 4A, 4C e 4D), o peso seco da parte aérea foi significativamente maior nas plantas tratadas com *H. seropedicae* (Figura 4B). A maior conversão de biomassa seca na parte aérea sugere um aumento da eficiência metabólica, possivelmente ligado à fixação biológica de nitrogênio atmosférico, à produção de fitormônios como o ácido indolacético (AIA) e à modulação de enzimas antioxidantes, mecanismos clássicos relatados para rizobactérias diazotróficas.

A alta taxa de colonização de *H. seropedicae* (90%) implica que uma correlação estreita entre a colonização das raízes por bactérias e altura, folhas e peso pode ser mantida. Este resultado confirma a eficiência interativa do

tratamento, de modo que a colonização bem-sucedida refletirá na melhor absorção de nutrientes e na conversão ideal da energia fotossintética em biomassa. A colonização não foi fortemente associada com *S. indica*, embora tenha promovido o alongamento das raízes, juntamente com efeitos indiretos na diferenciação e alongamento das raízes como resultado de exsudatos e compostos sinalizadores. Isso resulta em uma complementaridade funcional para as cepas: *H. seropedicae* atua como um promotor aéreo e organismo de absorção de nutrientes, enquanto *S. indica* controla o desenvolvimento das raízes e promove a mobilização de fósforo. Embora o volume das raízes tenha aumentado entre os membros do grupo bacteriano, a biomassa total do consórcio foi menos consistente, o que pode explicar a competição simbiótica ou o desequilíbrio nas dinâmicas rizosféricas. Coletivamente, indicam a alta superioridade de *H. seropedicae* em relação ao consórcio na colonização e propagação, reforçando a posição de *H. seropedicae* como um candidato dominante para a utilização de bioestimulantes agronômicos em aquaponia.

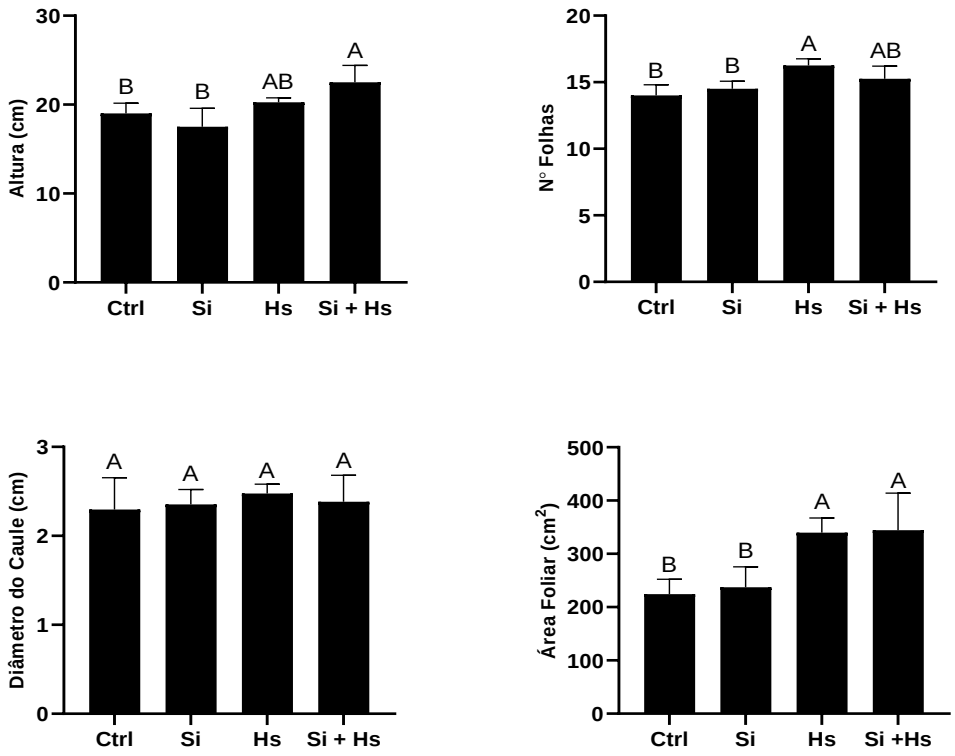


Figura 3. Altura da planta (A), número de folhas (B), diâmetro do caule (C) e área foliar (D) de plantas de rúcula não inoculadas (Ctrl), inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio do fungo e da bactéria (Si + Hs). Os dados foram avaliados por análise de variância (one-way ANOVA) e comparados pelo teste de Tukey. Médias que compartilham a mesma letra indicam ausência de diferença estatística significativa, conforme critério de Tukey adotado para $p < 0,05$.

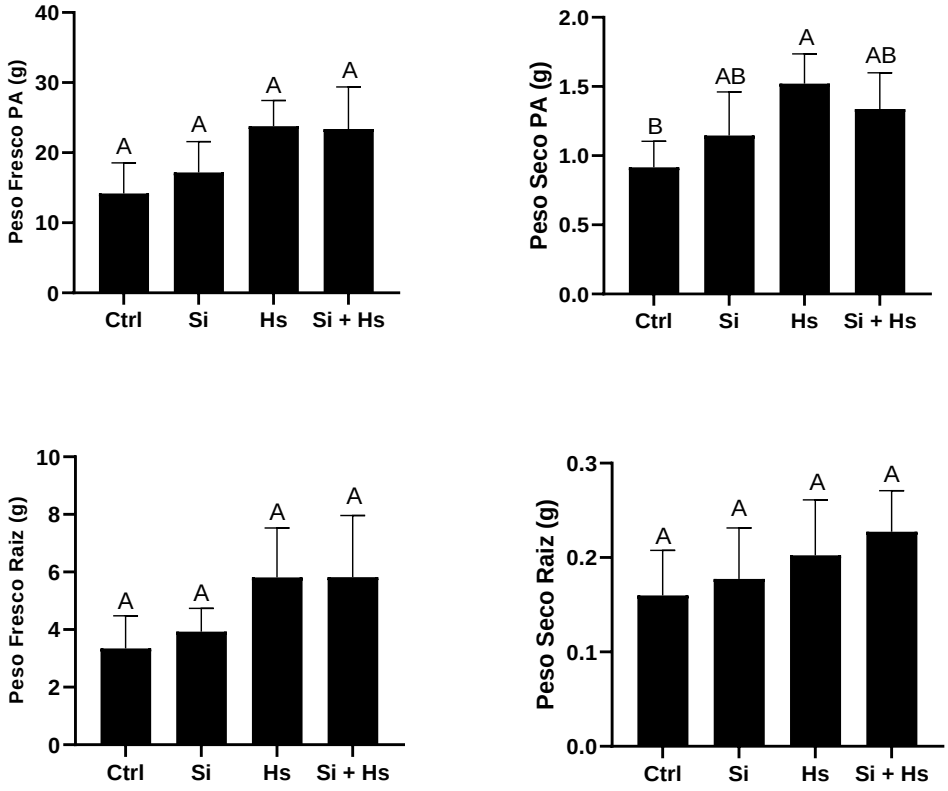


Figura 4. Peso fresco da parte aérea (A), peso seco da parte aérea (B), peso fresco da raiz (C) e peso seco da raiz (D) de plantas de rúcula submetidas aos diferentes tratamentos: não inoculadas (Ctrl), inoculadas exclusivamente com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio entre fungo e bactéria (Si + Hs). A análise estatística foi realizada por ANOVA seguida do teste de Tukey. Médias identificadas com as mesmas letras não diferem significativamente entre si, conforme o teste de Tukey adotado ao nível de $p < 0,05$.

3.2 Modulação da arquitetura do sistema radicular

A inoculação microbiana exerceu influência distinta sobre a morfologia do sistema radicular de *E. sativa*. O tratamento com o fungo *S. indica* (Si), isoladamente, resultou no maior comprimento de raízes (Figura 5A), diferindo significativamente do controle e do consórcio, o que sugere estímulo morfogênico de origem química, mesmo na ausência de colonização simbiótica efetiva. Tal efeito indica que *S. indica* pode atuar por meio da liberação de exsudatos e fitoreguladores (como AIA e giberelinas), que modulam a elongação celular e promovem o crescimento direcional das raízes.

O tratamento bacteriano com *H. seropedicae* apresentou comprimento radicular intermediário, enquanto o consórcio (Si + Hs) destacou-se pelo aumento expressivo do volume de raiz (Figura 5B), sem alteração significativa na área projetada ou na área superficial (Figuras 5C e 5D). Esse padrão morfológico indica

que *H. seropedicae* favorece a expansão lateral e o espessamento radicular, provavelmente associado ao aumento do acúmulo de cálcio e magnésio observados na análise nutricional, elementos diretamente relacionados à rigidez e ao desenvolvimento do tecido cortical e endodérmico.

A correlação entre o incremento volumétrico no consórcio e o aumento de manganês (Mn) e cálcio (Ca) nas raízes sugere um ajuste anatômico e fisiológico integrado, no qual a associação microbiana estimula a deposição de nutrientes estruturais, conferindo maior robustez e capacidade de condução hídrica. Apesar disso, a ausência de sinergia plena entre os microrganismos é evidenciada pelo fato de que o consórcio não potencializou o comprimento das raízes, mas apenas seu volume, indicando efeitos de competição simbiótica parcial e reconfiguração espacial dos tecidos radiculares.

Esses resultados permitem inferir três padrões funcionais distintos: (i) *S. indica* atua predominantemente na elongação radicular, possivelmente via modulação hormonal e aumento da mobilização de fósforo, elemento cuja absorção foi maior nesse tratamento; (ii) *H. seropedicae* influencia a arquitetura e o espessamento das raízes, em correlação com o acúmulo de Ca, Mg e Mn; (iii) o consórcio (Si + Hs) promove reorganização volumétrica e anatômica, sem ganhos proporcionais em comprimento, sugerindo que a interação simultânea pode modificar a plasticidade funcional da raiz, favorecendo o armazenamento e a condução, mas não o crescimento longitudinal.

A modulação da arquitetura radicular reflete a especialização funcional de cada microrganismo: *S. indica* otimiza a exploração do substrato e o acesso a nutrientes pouco móveis, enquanto *H. seropedicae* aprimora a estrutura e a densidade radicular, aumentando a eficiência fisiológica e a capacidade de suporte da parte aérea.

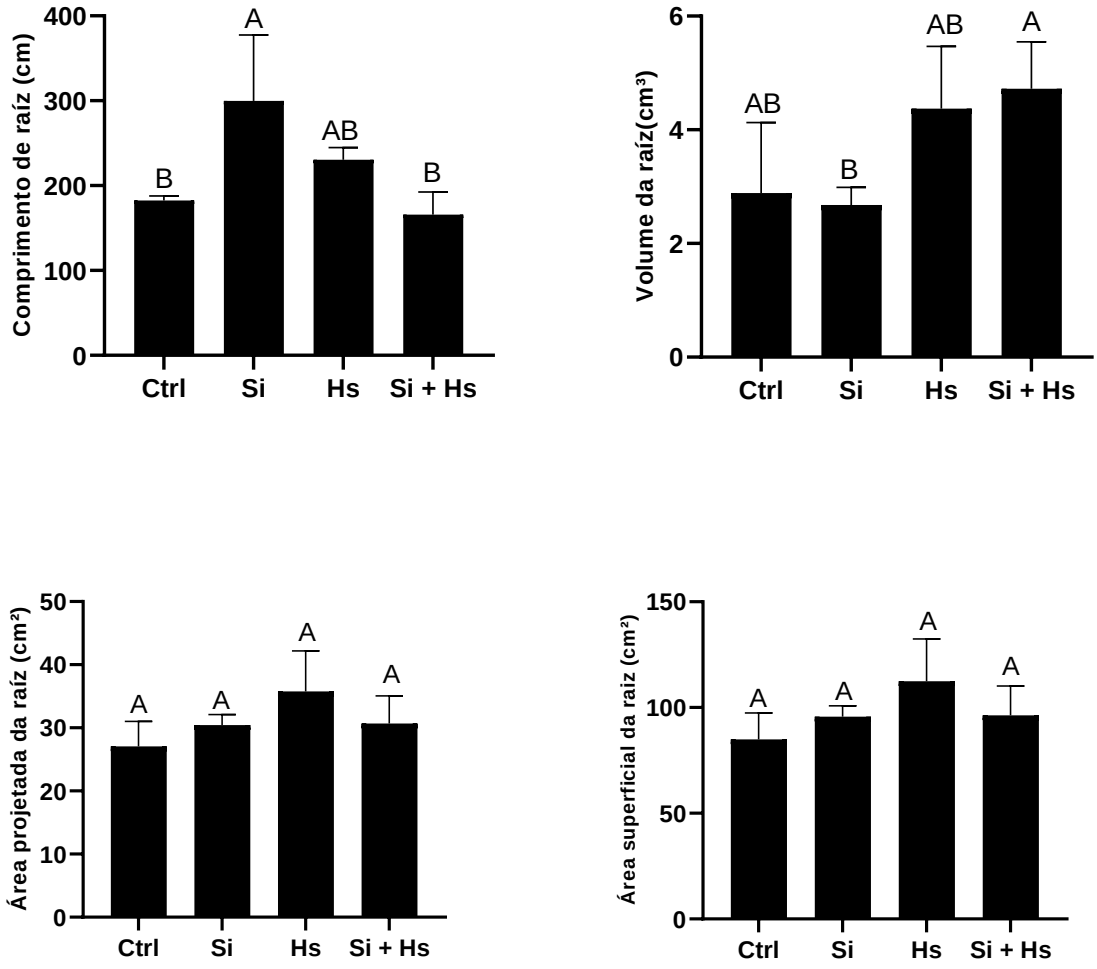


Figura 5. Comprimento de raiz (A), volume de raiz (B), área projetada da raiz (C) e área superficial da raiz (D) de plantas de rúcula submetidas aos tratamentos: não inoculadas (Ctrl), inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si), apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou com o consórcio entre fungo e bactéria (Si + Hs). A análise estatística foi realizada por ANOVA seguida do teste de Tukey. Médias representadas pelas mesmas letras não diferem significativamente entre si, conforme o teste de Tukey aplicado ao nível de $p < 0,05$.

3.3 Avaliações fisiológicas e teor de clorofila

Observações fisiológicas mostram uma tendência significativa de inversão entre o crescimento e o volume de pigmentos fotossintéticos, resultante em grande parte da interação entre plantas e microrganismos. Os índices de clorofila total e SPAD foram mais altos entre as plantas dos grupos de controle (Ctrl) e plantas inoculadas com *S. indica* (Figuras 6A e 6B), enquanto os tratamentos com *H. seropedicae* e o consórcio (Si + Hs) apresentaram os índices mais baixos. A supressão de pigmentos em plantas em expansão indica um efeito de diluição, impulsionado pelo rápido

crescimento das folhas, resultando em uma redução na quantidade relativa de clorofila por área da cultura, sem necessariamente diminuir a eficiência fotossintética.

Esses comportamentos sugerem que o estímulo de crescimento oferecido por *H. seropedicae* potencialmente corresponde a processos de redistribuição assimilativa e alterações no metabolismo pelos quais o nitrogênio é redirecionado de estruturas de pigmento (clorofilas) para moléculas estruturais e enzimáticas que requerem mais trabalho em um regime de crescimento rápido. Na verdade, ao comparar o perfil geral de adição de nitrogênio observado no segmento aéreo (Tabela 2), a bactéria não apenas fornece mais N por fixação biológica, mas também altera a alocação de N para alvos metabólicos de acordo com vários estados dentro de um compartimento celular.

Além disso, as plantas tratadas apresentaram uma grande quantidade de N na superfície fotossintética e, portanto, a eficiência de utilização de N ao nível da clorofila foi considerada relativamente alta, e isso se correlacionou com a redução relativa da clorofila juntamente com o aumento da capacidade fotossintética em comparação com o controle e potencialmente provou que a maior clorofila da planta influencia a eficiência do uso de N, uma vez que as plantas não poderiam obter N com a mesma eficiência.

Isso também pode ser corroborado por estudos de rizobactérias diazotróficas que adaptam a arquitetura fotossintética e o balanço de carbono e reduzem o conteúdo de pigmento por unidade de área, mas não a taxa de assimilação líquida. Por outro lado, as plantas inoculadas com *S. indica* mostraram conteúdo de clorofila e índices SPAD comparáveis às plantas de controle, e o maior comprimento da raiz representa um equilíbrio ou estado saudável em que a planta naquele ponto pode ser a mais eficaz fotossinteticamente e não promover grande crescimento. A redução nos pigmentos fotossintéticos foi estatisticamente significativa apenas para o consórcio (Si + Hs), um indicativo de que os microrganismos podem não compartilhar uma sinergia completa, podendo existir competição entre eles em termos de rivalidade simbiótica por nitrogênio assimilável ou cofatores metálicos (Fe e Mg) para a biossíntese de clorofila.

De modo geral, a análise integrada dos parâmetros fisiológicos e nutricionais indica que *H. seropedicae* atua como modulador do metabolismo fotossintético, induzindo um balanço dinâmico entre crescimento e acúmulo de pigmentos. Já *S. indica* mantém o aparato fotossintético em níveis estáveis, priorizando o desenvolvimento radicular e a aquisição de nutrientes, enquanto o consórcio promoveu desequilíbrio fisiológico moderado. Assim, as variações no teor de clorofila refletem não apenas diferenças de colonização e absorção de nutrientes, mas também estratégias metabólicas contrastantes de adaptação e uso de nitrogênio nas plantas associadas a microrganismos simbióticos.

A correlação entre o incremento volumétrico no consórcio e o aumento de manganês (Mn) e cálcio (Ca) nas raízes sugere um ajuste anatômico e fisiológico integrado, no qual a associação microbiana estimula a deposição de nutrientes estruturais, conferindo maior robustez e capacidade de condução hídrica. Apesar disso, a ausência de sinergia plena entre os microrganismos é evidenciada pelo fato de o consórcio não ter potencializado o comprimento das raízes, mas apenas seu volume, indicando efeitos de competição simbiótica parcial e reconfiguração espacial dos tecidos radiculares.

Em conjunto, os resultados revelam três padrões funcionais distintos: (i) *S. indica* atua predominantemente na elongação radicular, possivelmente por modulação hormonal e aumento da mobilização de fósforo (P), elemento cuja absorção foi superior nesse tratamento; (ii) *H. seropedicae* influencia a arquitetura e o espessamento das raízes, em correlação com o acúmulo de Ca, Mg e Mn; e (iii) o consórcio (Si + Hs) promove reorganização volumétrica e anatômica, sem ganhos proporcionais em comprimento, sugerindo que a interação simultânea pode modificar a plasticidade funcional da raiz, favorecendo o armazenamento e a condução, mas não o crescimento longitudinal. Assim, a modulação da arquitetura radicular reflete a especialização funcional de cada microrganismo: *S. indica* otimiza a exploração do substrato e o acesso a nutrientes pouco móveis, enquanto *H. seropedicae* aprimora a estrutura e a densidade radicular, aumentando a eficiência fisiológica e a capacidade de suporte da parte aérea. O consórcio, embora tenha ampliado o volume, apresentou resposta intermediária, possivelmente limitada pela competição simbiótica e pela incompatibilidade temporal na colonização.

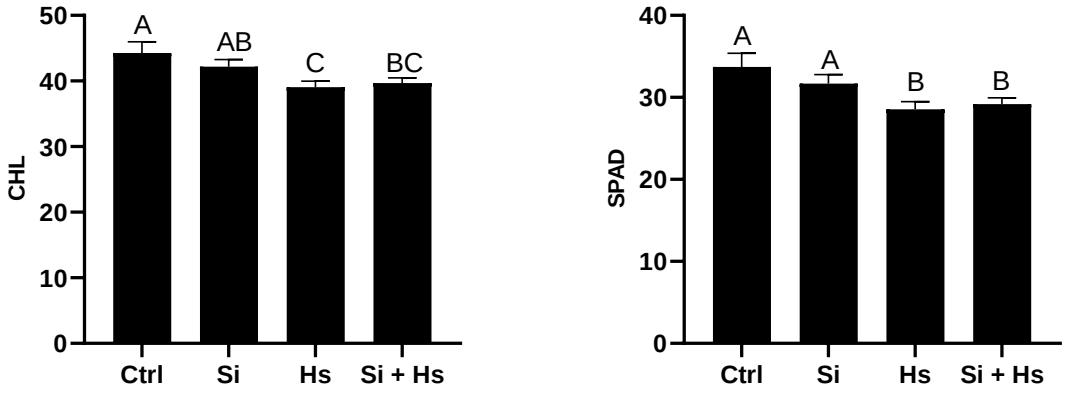


Figura 6. Análise de Clorofila (A) e do índice SPADP (B), das plantas de rúcula não inoculadas (Ctrl); inoculadas apenas com o fungo *S. indica* (Si); inoculadas apenas com a bactéria *H. seropedicae* (Hs) ou inoculadas com o consórcio do fungo com a bactéria (Si + Hs). Os dados foram analisados por one-way ANOVA, combinados com o teste de Tukey. Médias seguidas das mesmas letras não possuem diferença significativa pelo teste de Tukey a $p<0,05$.

A Figura 7 apresenta o crescimento das plantas de rúcula e seu sistema radicular, em relação aos diferentes tratamentos com microrganismos promotores de crescimento vegetal.



Figura 7. Visualização do crescimento das plantas de rúcula (*E. sativa*). (A) Não inoculada, (B) *S. indica*, (C) *H. seropedicae, (D) S. indica* + *H. seropedicae*.

3.4 Taxa de colonização microbiana nas raízes

A microscopia de fluorescência demonstrou colonização expressiva apenas para o tratamento bacteriano. As raízes tratadas com *H. seropedicae* (Hs)

apresentaram taxa de colonização de cerca de 90% (Tabela 1; Figura 8C), indicando um estabelecimento endofítico robusto e funcional. Em contrapartida, *S. indica* e o consórcio (Si + Hs) não apresentaram colonização visível (Tabela 1; Figuras 8B e 8D). Essa ausência de colonização fúngica, apesar dos efeitos fisiológicos observados em Si, sugere ação indireta, possivelmente mediada por compostos extracelulares ou interação inicial não estabilizada.

O comportamento competitivo no consórcio indica que a colonização bacteriana pode inibir a penetração fúngica, seja por competição por espaço na rizosfera, seja por incompatibilidade química entre os microrganismos simbiontes.

Tabela 1. Colonização de *S. indica* e *H. seropedicae* em plantas de rúcula (*E. sativa*) cultivadas em sistema de aquaponia.

Tratamentos	Ctrl	Si	Hs	Si+Hs
Colonização (%)	-	-	90	-

Os tratamentos incluem: controle (Ctrl) sem adição de microrganismos; inoculação do fungo *S. indica* (Si); inoculação da bactéria *H. seropedicae* (Hs) e o consórcio *S. indica* e *H. seropedicae* (Si+Hs).

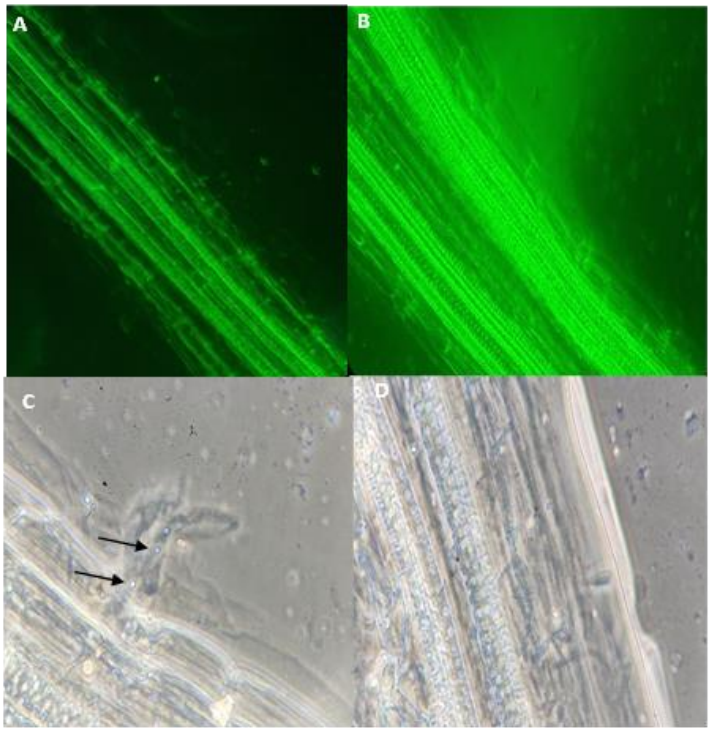


Figura 8. Microscopia de fluorescência representativas da colonização fúngica e bacteriana em raízes de plantas de rúcula (*E. sativa*). (A) Não inoculadas, (B) inoculadas com *S. indica*, (C) inoculadas com H. *seropedica*e e *(D)* consórcio de microrganismos *(S. indica* + *H seropedicae).*

3.5 Perfil de acúmulo de nutrientes na planta

Após 45 dias de cultivo, os teores de nutrientes na parte aérea das plantas de rúcula (*E. sativa)* inoculadas com *S. indica*, *H. seropedicae* e o consórcio, revelaram padrões distintos para cada elemento (Tabela 2). Entre os macronutrientes avaliados na parte aérea, a inoculação com *H. seropedicae* resultou em estimulação significativa dos teores de nitrogênio quando comparada ao consórcio, não havendo diferença em relação ao controle ou à inoculação com *S. indica*. Para cálcio e magnésio, observou-se uma clara elevação dos teores nas plantas inoculadas com *H. seropedicae* em comparação ao controle, *S. indica* e consórcio. A aplicação exclusiva de *S. indica* promoveu aumento do teor de fósforo na parte aérea frente aos outros tratamentos. Com relação ao enxofre, tanto *S. indica* quanto *H. seropedicae* induziram elevações dos teores na parte aérea em relação ao controle e ao consórcio. O potássio, por sua vez, permaneceu estável em todos os grupos, sem diferenças estatísticas relevantes (Tabela 2).

Tabela 2. Teor de macronutrientes e micronutrientes na parte aérea de plantas de rúcula (*E. sativa*) avaliadas aos 45 dias após a inoculação com diferentes tratamentos microbianos. Tratamento Controle - não inoculado, Si -inoculado com o fungo *S. indica,* Hs - inoculado com a bactéria *H. seropedicae*, e consórcio Si + Hs - inoculado com *S. indica e H. seropedicae*.

		Tratamentos			
Nutrientes		Controle	*S. indica*	*H. seropedicae*	Si + Hs
		g kg^{-1}			
Macronutrientes	N	71,53^{A}	74,50^{A}	76,71^{A}	63,81^{B}
	P	8,86^{C}	10,27^{A}	9,38^{B}	8,12^{D}
	K	86,60^{A}	90,88^{A}	90,01^{A}	72,52^{A}
	Ca	25,59^{C}	34,63^{B}	40,39^{A}	29,26^{C}
	Mg	3,96^{C}	4,78^{B}	5,38^{A}	4,07^{C}
	S	15,83^{B}	18,51^{A}	17,40^{AB}	13,84^{C}
		mg kg^{-1}			
Micronutrientes	Fe	109,82^{A}	114,01^{A}	116,53^{A}	113,56^{A}
	Cu	10,97^{A}	9,97^{A}	8,57^{A}	10,13^{A}
	Zn	71,90^{A}	46,56^{B}	67,37^{AB}	42,88^{B}
	Mn	32,85^{BC}	33,50^{B}	44,53^{A}	27,65^{C}
	B	79,16^{A}	82,37^{A}	83,77^{A}	72,93^{A}

Macronutrientes: N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio, S = enxofre. Micronutrientes: Fe = ferro; Cu = Cobre, Zn = Zinco, Mn = manganês; B = Boro. Médias seguidas das mesmas letras não possuem diferença significativa pelo teste de Tukey a $p<0,05$.

Entre os micronutrientes presentes na parte aérea, não foram observadas diferenças significativas para ferro, cobre e boro entre os tratamentos, sinalizando absorção estável desses elementos. Os grupos de controle e aqueles inoculados com *H. seropedicae* apresentaram elevação no teor de zinco quando comparados às plantas inoculadas com *S. indica* e com o consórcio, que apresentaram diminuição desse micronutriente (Tabela 2).

Para os macronutrientes, *S. indica* promoveu estimulação de 35,33% na absorção de cálcio, 20,71% para magnésio, 16,93% em enxofre e 15,91% em fósforo na parte aérea. Houve ainda estimulação de 4,94% em potássio e 4,15% em

nitrogênio (Tabela 3). A inoculação com *H. seropedicae* também resultou em estímulo, expressando aumento de 57,84% para cálcio e 35,86% para magnésio na parte aérea, acompanhados por estimulação de 9,92% para enxofre, 7,24% para nitrogênio, 5,87% para fósforo e 3,94% para potássio (Tabela 3). Em contraste, o consórcio resultou em inibição de 16,26% para potássio, 12,57% para enxofre, 10,79% para nitrogênio e 8,35% para fósforo, observando ainda pequenos estímulos residuais para cálcio (14,34%) e magnésio (2,78%) (Tabela 3).

Os micronutrientes na parte aérea, *S. indica* promoveu estimulação de 4,06% na absorção de boro, 3,82% para ferro e 1,98% para manganês, mas inibição considerável de 35,24% para zinco e uma leve inibição de 9,12% para cobre. *H. seropedicae* promoveu ainda estimulação de 35,56% em manganês na parte aérea, seguida por ferro (6,11%) e boro (5,82%), com inibição de 21,88% para cobre e 6,30% para zinco.

Por fim, o consórcio resultou em inibição generalizada para a maioria dos micronutrientes, tais como zinco (- 40,36%), manganês (- 15,83%), boro (- 7,87%) e cobre (- 7,66%); a única exceção positiva foi ferro, para o qual se observou uma estimulação de 3,41% (Tabela 3). Este padrão evidencia que a inoculação individual de cada microrganismo pode contribuir para a melhora seletiva dos teores de nutrientes na parte aérea, enquanto a combinação de ambos pode potencializar efeitos antagônicos, principalmente em relação a micronutrientes cruciais.

Tabela 3. Porcentagem de estimulação e inibição da absorção de macro e micronutrientes na parte aérea de plantas de rúcula após 45 dias de inoculação. Tratamento Controle - não inoculado, Si -inoculado com o fungo *S. indica*, Hs - inoculado com a bactéria *H. seropedicae,* e consórcio Si + Hs - inoculado com *S. indica* e *H. seropedicae*.

		Tratamentos					
Nutrientes		*S. indica*		*H. seropedicae*		Si + Hs	
		E	I	E	I	E	I
Macronutrientes	N	4,15		7,24			-10,79
	P	15,91		5,87			-8,35
	K	4,94		3,94			-16,26
	Ca	35,33		57,84		14,34	
	Mg	20,71		35,86		2,78	
	S	16,93		9,92			-12,57
Micronutrientes	**Fe**	3,82		6,11		3,41	
	Cu		-9,12		-21,88		-7,66
	Zn		-35,24		-6,30		-40,36
	Mn	1,98		35,56			-15,83
	B	4,06		5,82			-7,87

E = estimula; I = inibe. Macronutrientes: N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio, S = enxofre. Micronutrientes: Fe = ferro; Cu = Cobre, Zn = Zinco, Mn = manganês; B = Boro.

Análise dos teores de nutrientes nas raízes das plantas de rúcula (*E. sativa*) inoculadas com *S. indica*, *H. seropedicae* e o consórcio, após 45 dias de cultivo, demonstrou diferenças distintas em função do tratamento (Tabela 4).

Para os macronutrientes, as plantas não inoculadas e aquelas inoculadas com *H. seropedicae* apresentaram teores mais elevados de nitrogênio e fósforo nas raízes, enquanto *S. indica* e o consórcio exibiram menores valores desses elementos. Para potássio, verificou-se teor superior nas raízes de plantas não inoculadas e inoculadas com *H. seropedicae*, com inibição significativa observada para as plantas inoculadas com *S. indica* e consórcio.

O cálcio foi estimulado em todas as plantas inoculadas nas raízes, enquanto o magnésio apresentou elevação nas raízes inoculadas tanto com *S. indica* quanto com *H. seropedicae*, diferenciando-se dos demais tratamentos. Os teores de enxofre na raiz permaneceram estáveis independentemente do tratamento (Tabela 4).

Os micronutrientes, como o ferro, apresentaram maior teor em raízes de plantas não inoculadas, sendo inibidos nos tratamentos com *S. indica*, *H. seropedicae* e consórcio. O teor de cobre manteve-se constante entre todos os grupos. O zinco demonstrou maior teor nas raízes das plantas não inoculadas e sofreu inibição após qualquer inoculação. Os tratamentos com *H. seropedicae* e consórcio promoveram estimulação no teor de manganês, enquanto *S. indica* resultou nos menores valores. Para o boro, plantas não inoculadas, inoculadas com *H. seropedicae* e com o consórcio apresentaram teores superiores em relação ao tratamento exclusivo com *S. indica* (Tabela 4).

Tabela 4. Teor de macronutrientes e micronutrientes nas raízes de plantas de rúcula (*E. sativa*) avaliadas aos 45 dias após a inoculação com diferentes tratamentos microbianos. Tratamento Controle - não inoculado, Si -inoculado com o fungo *S. indica*, Hs - inoculado com a bactéria *H. seropedicae,* e consórcio Si + Hs - inoculado com *S. indica* e *H. seropedicae*.

		Tratamentos			
Nutrientes		Controle	*S. indica*	*H. seropedicae*	Si + Hs
		g kg^{-1}			
Macronutrientes	N	9,89^{A}	7,84^{C}	9,69^{AB}	8,43^{B}
	P	2,15^{A}	1,74^{B}	1,99^{A}	1,78^{B}
	K	4,87^{A}	4,41^{B}	4,90^{A}	4,64^{B}
	Ca	1,89^{B}	2,14^{A}	2,17^{A}	2,08^{A}
	Mg	0,39^{C}	0,57^{A}	0,57^{A}	0,50^{B}
	S	1,79^{A}	1,65^{A}	1,76^{A}	1,70^{A}
		mg kg^{-1}			
Micronutrientes	Fe	1160,20^{A}	799,73^{BC}	911,50^{B}	739,19^{D}
	Cu	9,74^{A}	6,33^{A}	10,83^{A}	7,28^{A}
	Zn	31,15^{A}	16,25^{C}	25,44^{B}	18,21^{C}
	Mn	197,02^{AB}	174,61^{B}	217,02^{A}	208,80^{A}
	B	15,89^{A}	12,54^{B}	15,44^{A}	16,72^{A}

Micronutrientes: N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio, S = enxofre. Micronutrientes: Fe = ferro; Cu = Cobre, Zn = Zinco, Mn = manganês; B = Boro. Médias seguidas das mesmas letras não possuem diferença significativa pelo teste de Tukey a $p<0,05$.

A análise baseada nas porcentagens de estimulação e inibição após cada inoculação detalha ainda mais esses padrões (Tabela 5). Entre os macronutrientes nas raízes, *S. indica* promoveu estimulação de 46,15% na absorção de magnésio e 13,21% para o cálcio; mas também inibição de 20,73% para nitrogênio, 19,07% para

o fósforo, 9,45% para o potássio e 7,82% em enxofre. *H. seropedicae* promoveu estimulação 46,15% para Mg, 14,81% cálcio e 0,62% para o potássio. O consórcio resultou na estimulação de 28,21% para o Mg e 10,05% para o cálcio, com inibição de 17,21% para o fósforo, 14,76% para o nitrogênio, 5,03% para o enxofre e 4,72% para o potássio.

Tabela 5. Porcentagem de estimulação e inibição da absorção de macro e micronutrientes nas raízes de plantas de rúcula após 45 dias de inoculação. Tratamento Controle - não inoculado, Si -inoculado com o fungo *S. indica*, Hs - inoculado com a bactéria *H. seropedicae,* e consórcio Si + Hs - inoculado com *S. indica* e *H. seropedicae*.

		Tratamentos					
Nutrientes		*S. indica*		*H. seropedicae*		Si + Hs	
		E	**I**	**E**	**I**	**E**	**I**
Macronutrientes	N		-20,73		-2,02		-14,76
	P		-19,07		-7,44		-17,21
	K		-9,45	0,62			-4,72
	Ca	13,23		14,81		10,05	
	Mg	46,15		46,15		28,21	
	S		-7,82		-1,68		-5,03
Micronutrientes	Fe		-31,07		-21,44		-36,29
	Cu		-35,01	11,19			-25,26
	Zn		-47,83		-18,33		-41,54
	Mn		-11,37	10,15		5,98	
	B		-21,08		-2,83	5,22	

E = estimula; I = inibe. Macronutrientes: N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio, S = enxofre. Micronutrientes: Fe = ferro; Cu = Cobre, Zn = Zinco, Mn = manganês; B = Boro.

Entre os micronutrientes nas raízes, *S. indica* proporcionou inibição de forma generalizada, com 47,83% para o zinco, 35,01% para o cobre, 31,07% para o ferro, 21,08% para o boro e 11,37% para o manganês. Nas plantas inoculadas com *H. seropedicae*, houve estimulação de 11,19% para o cobre e 10,15% para o manganês; porém, inibiu 21,44% de ferro, 18,33% de zinco e 2,83% de boro. O consórcio proporcionou estimulação de 5,98% para o manganês e 5,22% para o

boro; entretanto, inibiu 41,54% de zinco, 36,29% de ferro e 25,26% de cobre (Tabela 5).

3.6 Razão raiz/parte aérea e nitrogênio/fósforo

A relação raiz/parte aérea (R/S) de nutrientes entre plantas de rúcula (*E. sativa*) foi observada após 45 dias de inoculação para diferentes tratamentos (Tabela 6). Para o nitrogênio, a relação para macronutrientes foi mais alta (0,14) entre as plantas não inoculadas, refletindo que a quantidade desse nutriente nas raízes era maior do que na parte aérea. As plantas inoculadas com *H. seropedicae* e com o consórcio apresentaram valores intermediários (0,13), enquanto o valor mais baixo de 0,11 sendo obtido nas plantas contendo *S. indica.*

Para fósforo, novamente a maior razão esteve nas plantas não inoculadas (0,24), seguidas por plantas com *H. seropedicae* (0,21) e consórcio (0,22), sendo o menor valor observado em plantas inoculadas com *S. indica* (0,17). Para potássio, as razões foram estáveis entre todos os tratamentos, variando de 0,05 a 0,06. Quanto ao cálcio, as diferenças foram pequenas: plantas não inoculadas e as que receberam consórcio mostraram maior razão (0,07), seguidas por *S. indica* (0,06), enquanto *H. seropedicae* levou ao menor valor (0,05). O magnésio evidenciou maiores razões em plantas inoculadas com *S. indica* e consórcio (0,12), valor intermediário para *H. seropedicae* (0,11) e menor nas plantas não inoculadas (0,10).

Tabela 6. Relação raíz/parte aérea (R/PA) em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.

Nutrientes		Tratamentos			
		Controle	***S. indica***	***H. seropedicae***	**Si + Hs**
Macronutrientes	N	0,14	0,11	0,13	0,13
	P	0,24	0,17	0,21	0,22
	K	0,06	0,05	0,05	0,06
	Ca	0,07	0,06	0,05	0,07
	Mg	0,10	0,12	0,11	0,12
	S	0,11	0,09	0,10	0,12
Micronutrientes	Fe	10,56	7,01	7,82	6,51
	Cu	0,89	0,63	1,26	0,72
	Zn	0,43	0,35	0,38	0,42
	Mn	6,00	5,21	4,87	7,55
	B	0,20	0,15	0,18	0,23

Macronutrientes: N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio, S = enxofre. Micronutrientes: Fe = ferro; Cu = Cobre, Zn = Zinco, Mn = manganês; B = Boro.

Para enxofre, o consórcio resultou na maior razão (0,12), plantas não inoculadas e inoculadas com *H. seropedicae* apresentaram valores próximos (0,10 e 0,11). O menor valor foi detectado em plantas inoculadas apenas com S. indica (0,09).

Para os micronutrientes, o ferro apresentou a maior razão raiz/parte aérea em plantas não inoculadas (10,56), evidenciando retenção desse elemento nas raízes em relação à parte aérea. A razão foi reduzida para *H. seropedicae* (7,82), *S. indica* (7,01) e para o consórcio (6,51). Quanto ao cobre, o maior valor ocorreu em plantas inoculadas com *H. seropedicae* (1,26), valor intermediário no grupo controle (0,89) e consórcio (0,72) e menor para *S. indica* (0,63).

O zinco apresentou a maior razão para plantas não inoculadas (0,43) e consórcio (0,42), valores intermediários para *H. seropedicae* (0,38) e menor para *S. indica* (0,35). O manganês atingiu sua máxima razão raiz/parte aérea com o consórcio (7,55), seguido pelo controle (6,00), com os menores valores em *S. indica*

(5,21) e *H. seropedicae* (4,87). Para boro, o consórcio exibiu a maior razão (0,23), valor intermediário em plantas não inoculadas (0,20), e menor para *H. seropedicae* (0,18) e *S. indica* (0,15).

Esses resultados reforçam que, para a maioria dos nutrientes, a inoculação isolada com *S. indica* reduziu a transferência desses elementos para as raízes, enquanto a inoculação com *H. seropedicae* ou a aplicação do consórcio resultaram em valores intermediários e maior retenção de micronutrientes críticos. Todos os dados detalhados estão apresentados na Tabela 6.

Em relação aos micronutrientes, o ferro apresentou a maior razão raiz/parte aérea (10,56) nas plantas não inoculadas, enquanto a inoculação com *H. seropedicae*, *S. indica* e o consórcio reduziu intensamente esses valores para 7,82, 7,01 e 6,51, respectivamente. Para o cobre, a maior razão foi observada nas plantas inoculadas com *H. seropedicae* (1,26), enquanto valores intermediários foram detectados nas plantas não inoculadas (0,89) e no consórcio (0,72), sendo que a menor razão foi registrada nas plantas inoculadas apenas com *S. indica* (0,63). O zinco apresentou a razão mais elevada nas plantas não inoculadas (0,43) e no consórcio (0,42), enquanto valores inferiores foram observados nos tratamentos com *H. seropedicae* (0,38) e *S. indica* (0,35).

No caso do manganês, as plantas inoculadas com o consórcio apresentaram a maior razão raiz/parte aérea (7,55), valores intermediários ocorreram no controle (6,00) e, por fim, os menores valores nas inoculações isoladas com *S. indica* (5,21) e *H. seropedicae* (4,87). Para o boro, o consórcio resultou na maior razão (0,23), seguido por valores intermediários no controle (0,20); os menores valores foram observados nos tratamentos isolados com *H. seropedicae* (0,18) e *S. indica* (0,15) (Tabela 6).

A proporção nitrogênio/fósforo (N/P) na parte aérea das plantas variou entre 7,25 e 8,18, sendo relativamente mais alta para a inoculação com *H. seropedicae* (8,18), seguida do controle (8,07), consórcio (7,86) e *S. indica* (7,25) (Tabela 7). Já para a relação N/P nas raízes, a amplitude foi menor, variando de 4,51 a 4,87, com valor máximo observado na inoculação com *H. seropedicae* (4,87), valor intermediário no consórcio (4,74) e no controle (4,60), e valor mínimo em *S. indica* (4,51) (Tabela 8).

Tabela 7. Relação de nitrogênio/fósforo (N/P) na parte aérea em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.

	Tratamentos			
	Controle	*S. indica*	*H. seropedicae*	Si + Hs
Relação N/P	8,07	7,25	8,18	7,86

Já para a relação N/P nas raízes de plantas de rúcula (Tabela 8), a amplitude de variação foi menor entre os tratamentos, e oscilou entre (4,51 – 4,87), com valores mais elevados para as plantas inoculadas apenas com *H. seropedicae* (4,87), em comparação aos demais tratamentos: consórcio *S. indica* + *H. seropedicae* (4,74), controle (4,60) e *S. indica* (4,51).

Tabela 8. Relação de nitrogênio/ fósforo (N/P) nas raízes em plantas de rúcula após 45 dias de inoculação.

	Tratamentos			
	Controle	*S. indica*	*H. seropedicae*	Si + Hs
Relação N/P	4,60	4,51	4,87	4,74

4. DISCUSSÃO

4.1 Efeitos da inoculação microbiana no crescimento e fisiologia

H. seropedicae promoveu aumentos significativos na altura das plantas, número de folhas e área foliar em comparação ao controle, confirmando o papel dessa rizobactéria diazotrófica como promotora de crescimento vegetal por meio da fixação biológica de nitrogênio, da produção de fitormônios e da modulação da arquitetura foliar (Verma et al., 1998).

Resultados recentes reforçam que *H. seropedicae* pode remodelar o metaboloma da planta hospedeira e a composição de sua microbiota endofítica, induzindo um estado metabólico associado a maior eficiência assimilatória (Carril et al., 2021).

A redução dos teores de clorofila e dos índices SPAD observada nos tratamentos com *H. seropedicae* é consistente com estudos que relatam o “efeito de diluição” da clorofila em plantas de crescimento acelerado, nas quais a expansão foliar reduz a concentração relativa de pigmentos por unidade de área sem comprometer a eficiência fotossintética (Thiengo et al., 2025)

A correlação entre maior biomassa seca da parte aérea e teores mais altos de nitrogênio, cálcio e magnésio reforça a hipótese de que a bactéria favorece a redistribuição de nitrogênio para processos estruturais e enzimáticos. Essa reconfiguração metabólica é compatível com os achados de Thiengo et al. (2025), que observaram maior eficiência no uso de nitrogênio em gramíneas inoculadas com *H. seropedicae*. Dessa forma, o aumento de biomassa e o crescimento foliar vigoroso observados refletem um modo de crescimento otimizado, sustentado por ajustes na assimilação mineral e no balanço hormonal, característica desejável em cultivos aquapônicos de alta produtividade.

4.2 Modulação da arquitetura radicular

A inoculação com *S. indica* resultou no maior comprimento de raízes, enquanto *H. seropedicae* apresentou comprimento intermediário e o consórcio (*S. indica* + *H. seropedicae*) promoveu aumento no volume radicular, sem alteração da área superficial. Esse padrão indica que *S. indica* estimula elongação radicular possivelmente por ação de fitoreguladores e pela mobilização de fósforo, mesmo

sem colonização detectável (Li et al., 2023). A capacidade de modular o crescimento radicular foi confirmada em espécies como *Phoebe sheareri* e *Fagopyrum tataricum* (trigo), nas quais *S. indica* aumentou a biomassa e a tolerância ao estresse hídrico por meio da regulação de giberelinas e enzimas antioxidantes (Wang et al., 2023).

Nos tratamentos com *H. seropedicae* e no consórcio, o aumento do volume e do espessamento radicular sugere maior densidade e deposição de cálcio e magnésio, nutrientes essenciais para a rigidez da parede celular e o fortalecimento dos tecidos corticais. Essa característica é relevante em sistemas aquapônicos, onde a condução hídrica e a absorção de nutrientes dependem da integridade estrutural das raízes.

De forma geral, *S. indica* favorece a exploração longitudinal e o acesso a nutrientes pouco móveis, enquanto *H. seropedicae* amplia a capacidade de absorção por volume, e o consórcio apresenta resposta intermediária, possivelmente devido à competição simbiótica parcial (Jacoby et al*.,* 2017).

4.3 Colonização e mecanismos simbióticos

A colonização foi observada exclusivamente em plantas tratadas com *H. seropedicae*, com taxa próxima de 90%, confirmando o estabelecimento endofítico funcional (Pedrolo et al., 2024). Esse processo está associado à fixação biológica de nitrogênio, produção de sideróforos e modulação hormonal que favorecem o crescimento vegetal (Baldani et al., 1986). Estudos recentes revelaram que a colonização de *H. seropedicae* altera a expressão gênica da planta hospedeira e estimula vias associadas à parede celular e assimilação de nitrogênio (Wiggins et al*.,* 2022).

Nos tratamentos com *S. indica* e no consórcio, a ausência de colonização visível indica atuação indireta do fungo por meio de exsudatos e moléculas sinalizadoras na rizosfera, compatível com sistemas não simbióticos (Li et al., 2023). A dominância de *H. seropedicae* no consórcio pode ter limitado o estabelecimento fúngico pela competição por sítios de adesão e alterações químicas locais, como relatado em interações microbianas competitivas (Del Barrio-Duque et al*.,* 2019). Essa condição explica o desempenho intermediário do consórcio em crescimento e teor de nutrientes.

4.4 Redistribuição e acúmulo de nutrientes

A inoculação com *H. seropedicae* promoveu aumentos nos teores de nitrogênio e cálcio na parte aérea, enquanto *S. indica* favoreceu o incremento de fósforo, padrão coerente com os mecanismos de fixação biológica de N e solubilização de P relatados para esses microrganismos (Saleem et al., 2022). O aumento do volume radicular no consórcio, associado a maiores teores de manganês e cálcio nas raízes, indica ajustes anatômicos e deposição de nutrientes estruturais. Esse comportamento confirma observações de Carril et al. (2021) e Liu et al. (2019), que relatam um efeito complementar entre as duas espécies microbianas na absorção de macronutrientes. Em relação à propoção N/P, todos os valores foram menores que 10, sendo considerados baixos e demonstrando que houve limitação de nitrogênio em todos os tratamentos no sistema de aquaponia (Güsewell, 2004).

Em sistemas aquapônicos, a eficiência de absorção e translocação é determinante para o rendimento vegetal. A atuação diferenciada de *H. seropedicae* e *S. indica* revelou que a bactéria é mais eficiente para promover crescimento rápido e acúmulo de biomassa, enquanto o fungo aumenta a capacidade de absorção e resiliência fisiológica. Esses resultados corroboram os achados de Zhong et al. (2025), que destacaram o papel de *S. indica* na mobilização de nutrientes sob cultivo recirculante.

4.5 Implicações para sistemas aquapônicos sustentáveis

H. seropedicae e S. indica são confirmados através destes resultados como formas complementares de bioinoculantes, proporcionando assim a confirmação de sua viabilidade em sistemas aquapônicos. A alta compatibilidade de *H. seropedicae* com o ambiente aquático contribuiu para o crescimento e fixação de nitrogênio (Thiengo et al., 2025). Enquanto isso, mesmo sem colonização visível, *S. indica* mostrou propriedades benéficas na morfologia das raízes e absorção de fósforo, indicando uma aplicação ambiental em fases de estabelecimento ou baixa disponibilidade nutricional (Kumar bhuyan et al., 2015). A falta de sinergia clara no consórcio reflete a necessidade de assegurar qualidades ótimas como - mas não se limitando a - tempo e ordem de inoculação, densidade microbiana e compatibilidade bioquímica dos simbiontes. Essa evidência apoia abordagens de manejo

microbiano que levam à redução da necessidade de fertilizantes minerais, melhor produtividade hídrica e nutricional, e favorecem modelos produtivos com componentes de biotecnologia e sustentabilidade.

A interação entre os microrganismos evidencia papéis funcionais distintos e complementares. *H. seropedicae* atua como promotor direto do crescimento vegetativo e da nutrição nitrogenada, enquanto *S. indica* exerce papel modulador, otimizando a arquitetura radicular e absorção de fósforo. O consórcio apresenta comportamento competitivo que limita a sinergia esperada.

Esses resultados, aliados aos achados recentes (Carril et al., 2021; Chen et al., 2025; Rosman et al., 2024), confirmam que a integração de microrganismos promotores pode representar uma via promissora para ampliar a produtividade vegetal e assegurar a sustentabilidade ecológica dos sistemas aquapônicos.

5. CONCLUSÃO

A inoculação microbiana é uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho da rúcula em sistema de aquaponia. A bactéria *H. seropedicae* foi o microrganismo que apresentou os efeitos mais consistentes (promoveu o maior crescimento vegetativo, incremento de biomassa e maior absorção de nitrogênio, cálcio e magnésio). Já o fungo *S. indica*, embora não tenha estabelecido colonização detectável, modulou a arquitetura radicular e favoreceu a absorção de fósforo. O consórcio microbiano alterou o desenvolvimento das raízes, mas não resultou em ganhos adicionais de biomassa, indicando possível competição funcional.

Conclui-se que *H. seropedicae* é mais eficiente para acelerar o crescimento e aumentar a produtividade da rúcula em aquaponia, enquanto *S. indica* exerce efeitos específicos na morfologia radicular e no acúmulo de fósforo. Portanto, a bioinoculação se confirma como ferramenta promissora para fortalecer a sustentabilidade e reduzir a dependência de fertilizantes em sistemas aquapônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baldani, J. I., Baldani, V. L. D., Döbereiner, J. (1986) Establishment of inoculated *Azospirillum* spp. in the rhizosphere and roots of field-grown wheat and sorghum. Plant and Soil, 90:35-46. DOI doi.org/10.1007/BF02277385.

Carril, P., Cruz, J., DI Serio, A., Pieraccini, G., Ait bessai, M., Tenreiro, R., Cruz, C. (2021) Modulation of the wheat seed-borne bacterial community by *Herbaspirillum seropedicae* RAM10 and its potential effects for tryptophan metabolism in the root endosphere. Frontiers in Microbiology, 12:792921. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2021.792921.

Chen, X., Sun, R., Hu, D., Yang, Y., Cheng, Z., Hu, P., Fei, Y. (2025) *Serendipita indica* enhances drought tolerance in *Phoebe sheareri* seedlings by improving photosynthetic efficiency, stimulating the antioxidant defense system, and modulating hormone synthesis. Journal of Fungi, 11:717. DOI doi.org/10.3390/jof11100717.

Crutzen, P. J. Geology of mankind. Nature, 415:23. (2002) DOI doi.org/10.1038/415023a.

Del Barrio-Duque, A., Ley, J., Samad, A., Antonielli, L., Sessitsch, A., Compant, S. (2019) Beneficial endophytic bacteria-*Serendipita indica* interaction for crop enhancement and resistance to phytopathogens. Frontiers in Microbiology, 10:2888. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2019.02888.

Flores-Aguilar, P. S., Sánchez-Velázquez, J., Aguirre-Becerra, H., Peña-Herrejón, G. A., Zamora-Castro, S. A., Soto-Zarazúa, G. M. (2024) Can aquaponics be utilized to reach zero hunger at a local level? Sustainability, 16:1130. DOI doi.org/10.3390/su16031130.

Gill, S. S., Tuteja, N. (2016) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry, 112:348-361. DOI doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Gavin M. B. (2019) Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. 1.ed. Cham, Springer Nature, 620p.

Güsewell, S. (2004) N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 164:243-266. DOI doi.org/10.1111/j.1469-8137 .2004.01192.x.

Jackson, M. L. (1965) Soil chemical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 498p.

Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A. (2017) The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition - Current knowledge and future directions. Frontiers in Plant Science, 8:1617. DOI doi.org/10.3389/fpls.2017.01617.

Kumar Bhuyan, S., Bandyopadhyay, P., Kumar, P., Kumar Mishra, D., Prasad, R., Kumari, A., Kumar Yadava, P. (2015) Interaction of *Piriformospora indica* with *Azotobacter chroococcum*. Scientific Reports, 5:13911. DOI doi.org/10.1038/srep13911.

Li, L., Feng, Y., Qi, F., Hao, R. (2023) Research progress of *Piriformospora indica* in improving plant growth and stress resistance to plant. Journal of Fungi, 9:965. DOI doi.org/10.3390/jof9100965.

Liu, H., Senthilkumar, R., Ma, G., Zou, Q., Zhu, K., Shen, X., Yeh, K. W. (2019) *Piriformospora indica*-induced phytohormone changes and root colonization strategies are highly host-specific. Plant Signaling & Behavior, 4:1632688. DOI doi.org/10.1080/15592324.2019.1632688.

Manan, N. A., Mohamad, S. J., Kamaruzzan, A. S., Razman, M. M. A., Kasan, N. A., Abdullah, M. I. (2025) Aquaponics: A sustainable technology for aquaculture and agriculture food security. Planetary Sustainability, 3:33-44 DOI doi.org/10.46754/ps.2025.01.004.

Mensah, R. A., Li, D., Liu, F., Tian, N., Sun, X., Hao, X., Cheng, C. (2020) Versatile *Piriformospora indica* and its potential applications in horticultural crops. Horticultural Plant Journal, 6:111-121. DOI doi.org/10.1016/j.hpj.2020.01.002.

Mourouzidou, S., Ntinas, G. K., Tsaballa, A., Monokrousos, N. (2023) Introducing the power of plant growth promoting microorganisms in soilless systems: a promising alternative for sustainable agriculture. Sustainability, 15:5959. DOI doi.org/10.3390/su15075959.

Pedrolo, A. M., da Cunha, E. T., Gnecco, N., Arisi, A. C. M. (2024) Enumeration of plant-growth promoting bacteria *Herbaspirillum seropedicae* viable cells by a propidium monoazide combined with quantitative PCR (PMA-qPCR) assay. Microchemical Journal, 181:109820. DOI doi.org/10.1016/j.microc.2023.109820.

Persson, M., Kummu, M., Ward, F. (2022) Future food security and agricultural resource depletion under climate pressure. Nature Food Systems, 3:14-26.

Phillips, J. M., Hayman, D. S. (1970) Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 55:158-161. DOI doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3.

Rakocy, J. E., Masser, M. P., Losordo, T. M. (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics - Integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center Publication, 454:1-16.

Robinson, G. M. (2024) Global sustainable agriculture and land management systems. Geography and Sustainability, 5:637-646. DOI doi.org/10.1016/j.geosus.2024.09.001.

Rocha, H. C., Nascimento, B. L. M., Gomes, B. R. A., Rodrigues, A. B., Sousa, L. B. S., Silva, J. M. V., Silva, B. A., Sousa, I. L. P. (2025) A aquaponia como sistema orgânico de produção de alface para a zona urbana. Revista Caderno Pedagógico, 22:01-20. DOI doi.org/10.54033/cadpedv22n6-028.

Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., Wit, C. A., Hughes, T., Leeuw, S. V. D, Rodhe, S., Sorlin, S., Snyder, S., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Kalberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, C., Crutzen, P., Foley, J. A. (2009) A safe operating space for humanity. Nature, 461:472-475. DOI doi.org/10.1038/461472a.

Rosman, A. C., Urquiaga, M. C. O., Thiebaut, F., Silva, M. S., Ferreira, P. C. G., Alves-Ferreira, M., Baldani, J. I. (2024) Dual RNA-seq of maize and *Herbaspirillum seropedicae* ZAE94 association, in different doses of nitrate, reveals novel insights into plant-PGPB-environment relationship. Frontiers in Plant Science, 15:1346523. DOI doi.org/10.3389/fpls.2024.1346523.

Saleem, S., Sekara, A., Pokluda, R. (2022) *Serendipita indica* - A review from agricultural point of view. Plants, 11:3417. DOI doi.org/10.3390/plants11243417.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014) Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper N°. 589. Roma: FAO. 288p.

Thiengo, C. C., Galindo, F. S., Rodak, B. W., Bernardes, J. V. S., Rocha, L. O., Gaziola, S. A., Azevedo, R. A., Burak, D. L., Olivares, F. L., Lavres, J. (2025) Harnessing plant growth-promoting bacteria (*Herbaspirillum seropedicae*) from an optimal mineral nitrogen supply: A study on improving nitrogen use efficiency in marandu palisadegrass. Plant Physiology and Biochemistry, 220;109497. DOI doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109497.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., Simonne, E. H. (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. HortTechnology, 21:6-13. DOI doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6.

Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., Saghai, Y. (2021) A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. Nature Food, 2:494-501. DOI doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9.

Varma, A., Verma, S., Sudha, Sahay, N., Bütehorn, B., Philipp Franken, P. (1999) *Piriformospora indica*, a cultivable plant growth promoting root endophyte with similarities to arbuscular mycorrhizal fungi. Appl Environ Microbiol 65:2741-2744. DOI doi.org/10.1128/aem.65.6.2741-2744.1999.

Verma, S., Varma, A., Rexer, K. H., Hassel, A., Kost, G., Sarbhoy, A., Franken, P. (1998) *Piriformospora indica*, gen. et sp. nov., a new root-colonizing fungus. Mycologia, 90:896-903, 1998. DOI doi.org/10.1080/00275514.1998.12026983.

Wang, Y., Cao, J.-L., Hashem, A., Abd Allah, E. F., Wu, Q. S. (2023) *Serendipita indica* mitigates drought-triggered oxidative burst in trifoliate orange by stimulating

antioxidant defense systems. Frontiers in Plant Science, 14:247342. DOI 10.3389/fpls.2023.1247342.

Wiggins, G., Thomas, J., Rahmatallah, Y., Deen, C., Haynes, A., Degon, Z., Glazko, G., Mukherjee, A. (2022) Common gene expression patterns are observed in rice roots during associations with plant growth-promoting bacteria, *Herbaspirillum seropedicae* and *Azospirillum brasilense*. Scientific Reports, 12:8827. DOI 10.1038/s41598-022-12285-3.

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S.; Murray, C. J. L. (2019) Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet, 393:447-492. DOI doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C. B., Zhu, Y. G., Zhuang, M. (2024) Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. Science, 385:eadn3747. DOI doi.org/10.1126/science.adn3747.

Yep, B., Zheng, Y. (2019) Aquaponic trends and challenges - A review. Journal of Cleaner Production, 228:1586-1599. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2019 .04.290.

Zhong, S., Wang, W., Tang, W., Zhou, X., Bu, T., Tang, Z., Li, Q. (2025) *Serendipita indica*-dominated synthetic microbial consortia enhanced tartary buckwheat growth and improved its tolerance to drought stress. Frontiers in Microbiology, 16:1562341. DOI doi.org/10.3389/fmicb.2025.1562341.

CAPÍTULO II

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE AQUAPONIA DE PEQUENA ESCALA: ANÁLISE DE CUSTOS, RENTABILIDADE E PEGADA DE CARBONO

RESUMO

A mudança climática global e a escassez de recursos naturais estão aumentando a necessidade de sistemas de produção agrícola inovadores e sustentáveis para atender à crescente demanda global por alimentos. A aquaponia, integração entre piscicultura e hidroponia, poderia responder a esses requisitos, mas devido em grande parte à necessidade de viabilidade econômica, ainda é uma lacuna de conhecimento, particularmente no Brasil. O objetivo do estudo foi avaliar a viabilidade econômica de um módulo comercial de aquaponia no Estado do Espírito Santo, compreendendo o cultivo de tilápia (*Oreochromis niloticus*) e alface (*Lactuca sativa*), utilizando a análise de custos, receitas e indicadores financeiros de três cenários de comercialização distintos. O dimensionamento do sistema foi feito pela Técnica de Filme Nutriente (NFT), e os indicadores econômicos avaliados foram o Período de Retorno Efetivo (EPP), a Taxa Interna de Retorno (TIR), a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o Valor Presente Líquido (VPL) e a relação Benefício/Custo (B/C). Os resultados práticos indicaram que o custo de implementação foi de R$ 8.133,00, dos quais, 81,52% foram para infraestrutura e 14,12% para equipamentos, e os custos variáveis anuais foram de R$ 5.504,30; a mão de obra contribuiu com 32,16% do custo e a eletricidade com 26,66%. A viabilidade econômica do pacote foi encontrada para todos os cenários analisados: EPP no intervalo de 1 ano e 10 meses a 3 anos e 6 meses; TIR entre 14,63%–56%; índice TMA/TIR entre 0,16–0,55; VPL entre R$ 2.408,75 a R$ 16.718,62 e B/C entre 1,07 e 1,47, mostrando que este sistema é sustentável e atrativo para investimentos. Os resultados indicam que o preço de venda dos vegetais serve como determinante da sustentabilidade econômica do sistema e que a receita das plantas (87%) é muito superior à receita do produto (13%) proveniente dos peixes. Este estudo indica que a aquaponia é lucrativa e um modelo replicável para fornecer alimentos sustentáveis. No entanto, para facilitar o crescimento comercial e salvaguardar a sustentabilidade a longo prazo, é aconselhável formular políticas públicas direcionadas, emitindo incentivos financeiros para: facilitar os custos de implementação e produção, facilitar o acesso à energia renovável e desenvolver selos de certificação para maximizar a viabilidade de mercado dos produtos de aquaponia.

Palavras-chave: Análise econômica, Hortaliças, Peixes, Sustentabilidade, Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Global climate change and the scarcity of natural resources are increasing the need for innovative and sustainable agricultural production systems capable of meeting the growing global demand for food. Aquaponics—the integration of aquaculture and hydroponics—could meet these requirements, but due largely to questions surrounding its economic feasibility, it remains a knowledge gap, particularly in Brazil. The objective of this study was to evaluate the economic feasibility of a commercial aquaponics module in the state of Espírito Santo, involving the cultivation of tilapia (*Oreochromis niloticus*) and lettuce (*Lactuca sativa*), using cost and revenue analyses as well as financial indicators applied to three distinct marketing scenarios. The system was designed using the Nutrient Film Technique (NFT), and the economic indicators evaluated included the Effective Payback Period (EPP), Internal Rate of Return (IRR), Minimum Acceptable Rate of Return (MARR), Net Present Value (NPV), and the Benefit–Cost Ratio (B/C). Practical results indicated that implementation costs totaled R$ 8,133.00, of which 81.52% were allocated to infrastructure and 14.12% to equipment; annual variable costs amounted to R$ 5,504.30, with labor representing 32.16% and electricity 26.66% of this total. Economic feasibility was confirmed across all analyzed scenarios: the EPP ranged from 1 year and 10 months to 3 years and 6 months; the IRR varied between 14.63% and 56%; the MARR/IRR ratio ranged from 0.16 to 0.55; the NPV varied from R$ 2,408.75 to R$ 16,718.62; and the B/C ratio ranged from 1.07 to 1.47, demonstrating that this system is both sustainable and attractive for investment. The results indicate that the selling price of vegetables is a key determinant of the system's economic sustainability and that plant-based revenue (87%) is substantially higher than revenue derived from fish production (13%). This study shows that aquaponics is profitable and represents a replicable model for supplying sustainable food. However, to facilitate commercial growth and safeguard long-term sustainability, it is advisable to formulate targeted public policies: providing financial incentives to offset implementation and production costs, improving access to renewable energy, and developing certification labels to maximize the market viability of aquaponic products.

Keywords: Economic analysis, Economic viability, Fish, Sustainability, Vegetables,

1. INTRODUÇÃO

De acordo com as projeções para 2050, a população mundial poderá atingir 9,7 bilhões de habitantes, podendo chegar a 11 bilhões em 2100 (UN, 2021). Juntamente com o crescimento populacional, surge a necessidade de produzir mais alimentos, aumentando o uso de diversos recursos naturais, como solo, nutrientes e água. Além disso, as mudanças climáticas previstas têm o potencial de desencadear impactos significativos na segurança alimentar global, elevando a possibilidade de futuras crises de fome, a menos que sejam adotadas medidas alternativas para minimizar essa problemática (Boretti e Rosa, 2019; Crist et al., 2017; Dias et al*.,* 2024; Van Dijk et al*.,* 2021).

Com o propósito de atender às demandas globais urgentes, a Agenda 2030 foi elaborada para impulsionar o desenvolvimento sustentável através de um conjunto de metas e objetivos, em que se pode ressaltar a erradicação da pobreza, fome zero, agricultura sustentável, consumo e produção responsáveis e segurança alimentar (UN, 2021).

Nesse contexto, torna-se imperativa a adoção de tecnologias agrícolas alternativas que integrem produtividade elevada com sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, capazes de promover a segurança alimentar enquanto preservam os ecossistemas naturais e mitigam os efeitos das mudanças climáticas.

A aquaponia surge como uma técnica inovadora, capaz de integrar a piscicultura e a agricultura hidropônica em um único sistema através da recirculação de água e ciclagem de nutrientes, produzindo peixes e vegetais de forma menos impactante ao meio ambiente e favorecendo a integridade do planeta (Diver e Rinehart, 2006; Tyson et al., 2011). A produção via sistemas aquapônicos em escala comercial ainda está em fase de aperfeiçoamento, porém, este sistema já é considerado sustentável e de economia circular, com grande potencial de geração de renda e produção de alimentos saudáveis, tanto para uso de pequenos grupos de famílias carentes quanto para grandes empresas (Nair et al., 2024).

O mercado mundial da aquaponia foi estimado em US$ 1,2 bilhão em 2024, com uma projeção de crescimento médio de 13,5% até 2030, com uma geração de receita de US$ 2,3 bilhões. Já no Brasil, a receita foi de US$ 43,5 milhões em 2023, com perspectivas de alcançar US$ 97,7 milhões até 2030 (Aquaponics Market Size

e Trends, 2024). No entanto, a viabilidade econômica ainda representa um desafio crítico, necessitando de estudos e planejamentos financeiros rigorosos para alcançar o sucesso comercial e a sustentabilidade de longo prazo, visto que o preço de venda desses produtos pode apresentar valores superiores em relação aos sistemas convencionais (Abusin e Mandikiana, 2020; Goddek et al., 2019; Greenfeld et al., 2018; Greenfeld et al., 2021; Verma et al., 2023; Zappernick et al., 2022).

Diversas instituições de pesquisas e empresas privadas vêm realizando estudos referentes à viabilidade econômica da aquaponia em escala comercial, porém, nem sempre esses resultados estão disponíveis para serem consultados (Goddek et al., 2015; Nair et al., 2024). Estudos comparativos revelam que fatores como custos com mão de obra, energia elétrica e infraestrutura inicial representam os principais gargalos econômicos, enquanto a receita proveniente da comercialização de plantas determina significativamente a sustentabilidade econômica do sistema (Ghamkhar et al., 2022; Greenfeld et al., 2018; Tokunaga et al., 2015).

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo analisar a viabilidade econômica e as potencialidades comerciais de um módulo de aquaponia desenvolvido para a produção integrada de tilápias (*Oreochromis niloticus*) e alfaces (*Lactuca sativa*). Este sistema, instalado no Estado do Espírito Santo, foi dimensionado utilizando a técnica *Nutrient Film Technique* (NFT) (Somerville et al., 2014), buscando promover uma abordagem sustentável para a produção de alimentos, explorando a integração entre aquicultura e hidroponia.

Para avaliar a sustentabilidade econômica, foram calculados indicadores robustos como o Período Efetivo de *Payback* (PEP) (Morais et al*.,* 2024), Taxa Interna de Retorno (TIR) (Chen, 1998), Taxa Mínima de Atratividade (TMA), Valor Presente Líquido (VPL) (Vernimmen, 2005) e relação Benefício/Custo (B/C) (Andrade, 2018) em três cenários distintos de comercialização. Este estudo contribui significativamente para o desenvolvimento de modelos agrícolas inovadores, sustentáveis e economicamente viáveis no contexto brasileiro e tropical, fornecendo subsídios técnicos e econômicos essenciais para a formulação de políticas públicas específicas que incentivem a expansão comercial da aquaponia no Brasil (Horn et al., 2024).

2. METODOLOGIA

2.1. Local e condições experimentais

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologias Aquícolas Sustentáveis (LABTAS) do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, município de Alegre - ES (Latitude Sul 20º45'31" e Longitude Oeste 41°27'08"). Conforme a classificação de Köppen e Geiger, o clima da região é temperado quente (Cfa), sem estação seca no inverno, com temperatura média inferior a 18°C nos meses mais frios e precipitação média superior a 60 mm no mês mais seco (INCAPER, 2023). Essa localização foi escolhida por representar condições climáticas tropicais favoráveis à aquaponia, com temperaturas adequadas para o cultivo simultâneo de tilápias e hortaliças folhosas durante todo o ano.

2.2. Configuração do Sistema de Aquaponia

O sistema de produção foi dimensionado de acordo com a técnica *Nutrient Film Technique* (NFT) (Somerville et al., 2014), selecionada por sua eficiência no aproveitamento de nutrientes e menor consumo de água comparado a outros sistemas hidropônicos. O módulo de aquaponia integrou componentes de aquicultura e hidroponia em um circuito fechado de recirculação (Figura 1).

O sistema foi composto por uma caixa plástica de 2.000 L para o cultivo de 60 tilápias (*Oreochromis niloticus*), mantidas a uma densidade final de 30 kg/m³. A água era retirada do fundo da caixa através de um *overflow* e deslocava-se por gravidade para um decantador de 240 L, seguido por um filtro mecânico de 300 L. No filtro mecânico, uma bomba submersa com vazão de 4.000 L/h direcionava a água para dois biofiltros de 300 L cada, contendo 750 unidades de bio *balls* por biofiltro, responsáveis pela conversão biológica de amônia em nitrato. Após a biofiltração, a água seguia por gravidade para 40 perfis de hidroponia instalados como "cama de cultivo", onde foram inseridas 320 mudas de alface (*Lactuca sativa*). Após passar pelos perfis, a água retornava para a caixa de cultivo dos peixes, completando o ciclo do sistema. Um soprador de ar de 18 m³/h foi instalado na caixa de peixes e nos biofiltros para garantir níveis adequados de oxigênio dissolvido.

O período experimental teve duração de 12 meses, durante os quais foram

realizados oito ciclos de produção de alface (aproximadamente 45 dias por ciclo) e dois ciclos de cultivo de tilápias (aproximadamente 6 meses por ciclo).

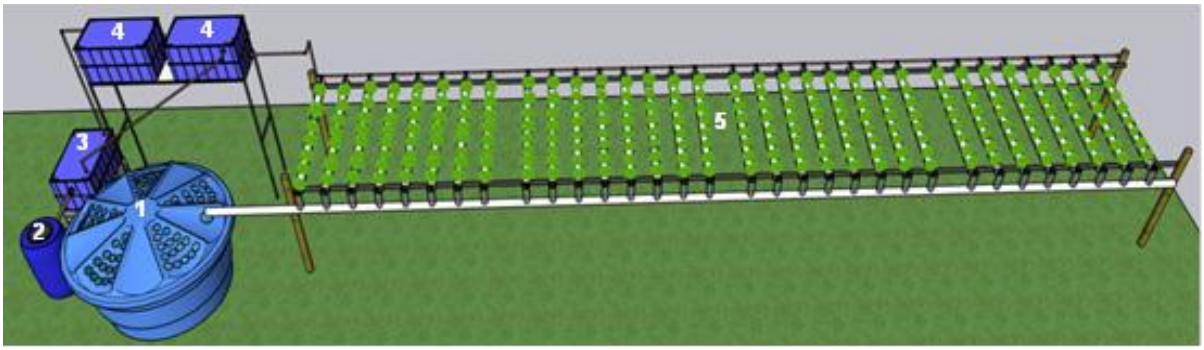


Figura 1. Módulo de aquaponia. Legenda: 1 - Caixa de cultivo de tilápias; 2 - Decantador; 3 - Filtro mecânico; 4 - Biofiltro com bio balls; 5 - Perfis de cultivo de alfaces.

2.3. Avaliação econômica do sistema

A avaliação econômica foi realizada em duas etapas: levantamento de custos (implantação e produção anual) e análise de indicadores econômicos. Foram considerados três cenários distintos de comercialização para avaliar a sensibilidade do sistema às variações de preço de mercado.

O PEP indica o tempo necessário para recuperar o investimento inicial considerando o valor do dinheiro no tempo (Morais et al., 2024). Este indicador foi selecionado por fornecer uma medida clara e intuitiva do risco de investimento. Foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$\boldsymbol{PEP = -I + \sum_{j}^{t} \frac{(Rj - Cj)}{(1+j)^{j}}} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

I: investimento inicial.

Rj: receita no período j.

Cj: custo no período j.

J: índice que representa o período de tempo.

A TIR representa a taxa de juros que torna uma série de recebimentos e desembolsos equivalentes na data presente, correspondendo à taxa que torna o VPL igual a zero (Chen, 1998). Este indicador foi escolhido por permitir comparação direta com outras oportunidades de investimento. Foi calculada conforme a Equação 2:

$$\boldsymbol{0 = VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{fluxos\ de\ caixa}{(1+i)^{n}}} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Em que:
TIR= taxa interna de retorno
n = período de tempo
Fluxos de caixa = fluxos de caixa no período de tempo.

A TMA representa a taxa de juros mínima utilizada para comparar o retorno de um investimento com as expectativas do investidor (Nogueira, 2007). Neste trabalho, foi considerada uma TMA de 8% ao ano, baseada nas taxas de juros reais disponíveis no mercado financeiro brasileiro para investimentos de médio e baixo risco.

O índice TMA/TIR avalia o risco financeiro do projeto através da relação entre a taxa mínima de atratividade e a taxa interna de retorno, variando em uma escala de 0 a 1, onde valores mais próximos de zero indicam menor risco (Souza e Clemente, 2008).

O VPL é utilizado para avaliar a rentabilidade de projetos de investimento, calculando o valor presente dos fluxos de caixa esperados descontados a uma taxa específica (Vernimmen, 2005). Este indicador foi selecionado por expressar em valores monetários absolutos a viabilidade do investimento. Foi calculado conforme a Equação 3:

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{fluxos\ de\ caixa}{(1+i)^n} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Em que:
n = período de tempo;
i = taxa de desconto;
fluxos de caixa = fluxos de caixa no período de tempo.

A relação B/C é uma técnica de análise de investimentos amplamente utilizada, obtida através da razão entre a receita total e o custo total de produção (Andrade, 2018). Foi calculada conforme a Equação 4:

$$B/C = RT/CTP \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde:

B/C: relação benefício/custo.

RT: receita total.

CTP: custo total de produção.

Para avaliar a sensibilidade econômica do sistema às variações de preço de mercado, foram estabelecidos três cenários distintos de comercialização para as alfaces: Cenário 1 - R$ 3,10 por unidade (CEASA, 2024); Cenário 2 - R$ 4,00 por unidade (preço médio praticado nas feiras tradicionais da região); Cenário 3 - R$ 4,50 por unidade (preço médio praticado nas feiras agroecológicas da região).

O preço do peixe foi fixado em R$ 18,00/kg para todos os cenários, correspondente ao preço médio praticado pelos consumidores nas feiras da região, considerando que a produção de peixes foi destinada ao consumo próprio devido à pequena quantidade produzida.

2.4. Análise de pegada de carbono

A análise de pegada de carbono foi conduzida para quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à operação do sistema de aquaponia e avaliar seu potencial de mitigação em comparação com sistemas convencionais de produção agrícola e aquícola.

A análise seguiu os princípios estabelecidos pela norma ISO 14064-1 (ISO, 2018) e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2019), considerando as emissões diretas e indiretas associadas à fase operacional do sistema. O escopo incluiu as emissões do tipo Escopo 2 (energia elétrica adquirida) e Escopo 3 (cadeia de suprimentos), conforme classificação do GHG Protocolo (WRI/WBCSD, 2011). As fronteiras do sistema abrangeram o período de um ano de operação, com projeção para cinco anos, correspondente ao horizonte temporal da análise econômica.

2.4.1. Fontes de emissão consideradas

As principais fontes de emissão de GEE identificadas e quantificadas foram:

a) *Consumo de energia elétrica:* o consumo anual de 2.190 kWh foi multiplicado pelo fator de emissão da matriz elétrica brasileira, obtido do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2023), que considera a composição das fontes de geração de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN). O fator de emissão utilizado foi de 0,0817 kg CO_2eq/kWh, referente ao ano de 2023.

b) *Produção de ração para tilápia:* as emissões associadas à produção de ração foram calculadas com base no consumo anual de 120 kg de ração comercial.

O fator de emissão de 1,8 kg CO_2eq/kg de ração foi obtido de estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) de rações para aquicultura, considerando o cultivo de ingredientes, *processamento industrial e embalagem (*Henriksson et al., *2015;* Pelletier et al*.,* 2009).

c) *Transporte de insumos:* as emissões do transporte rodoviário foram calculadas utilizando o fator de emissão de 0,12 kg CO_2eq/km.kg (IPCC, 2019), considerando as distâncias médias percorridas: 150 km para ração e 100 km para demais insumos (mudas, reagentes e embalagens). O peso total de insumos transportados anualmente foi estimado em 170 kg.

d) *Fabricação de equipamentos:* as emissões incorporadas (*embodied emissions*) na fabricação de equipamentos (bomba submersa, soprador de ar, estruturas metálicas e componentes plásticos) foram estimadas em 450 kg CO_2eq com base em estudos de ACV de equipamentos similares (Maucieri et al., 2018). Estas emissões foram amortizadas ao longo da vida útil estimada de 10 anos dos equipamentos, resultando em uma contribuição anual de 45 kg CO_2eq.

As emissões totais anuais do sistema de aquaponia (E_aquaponia) foram calculadas pela soma das emissões de cada fonte, conforme a Equação 5:

$$E_aquaponia = E_energia + E_ração + E_transporte + E_equipamentos \quad \text{(Eq. 5)}$$

Onde:

E_energia = Consumo de energia (kWh) × Fator de emissão da matriz elétrica (kg CO_2eq/kWh)

E_ração = Consumo de ração (kg) × Fator de emissão da ração (kg CO_2eq/kg)

E_transporte = Σ (Peso do insumo × Distância × Fator de emissão do transporte)

E_equipamentos = Emissões totais da fabricação/Vida útil (anos)

Para contextualizar o desempenho ambiental do sistema de aquaponia, foram estabelecidos três sistemas de referência:

a) *Agricultura convencional de alface:* considerou-se o cultivo em solo com irrigação por aspersão, fertilização mineral (NPK), aplicação de defensivos agrícolas e preparo mecanizado do solo. O fator de emissão utilizado foi de 0,30 kg CO_2eq/kg de alface, baseado em estudos de ACV de hortaliças folhosas (Bartzas et al*.,* 2015).

b) *Aquicultura convencional de tilápia:* considerou-se a criação em tanques escavados com renovação parcial de água, aeração mecânica e tratamento de efluentes. O fator de emissão utilizado foi de 4,5 kg CO_2eq/kg de peixe, conforme literatura sobre pegada de carbono de tilápia em sistemas convencionais (Henriksson et al., 2015; Macleod et al., 2020).

c) *Sistema separado:* as emissões do sistema separado foram calculadas pela soma das emissões da agricultura convencional de alface e da aquicultura convencional de tilápia, representando a produção independente das mesmas quantidades de produtos geradas pelo sistema de aquaponia.

O potencial de redução de emissões da aquaponia em relação ao sistema convencional foi calculado pela Equação 6:

$$\text{Redução (\%)} = [(E_{convencional} - E_{aquaponia})/E_{convencional}] \times 100. \quad \text{(Eq. 6)}$$

Adicionalmente, foi avaliado o potencial de mitigação através da integração de um sistema fotovoltaico. O dimensionamento considerou um sistema de 2,5 kWp, capaz de suprir 95% do consumo de energia elétrica do sistema de aquaponia. As emissões evitadas pela geração solar foram calculadas multiplicando-se a energia gerada pelo fator de emissão da matriz elétrica deslocada.

Como o sistema de aquaponia produz simultaneamente alface e tilápia, foi necessário alocar as emissões totais entre os dois produtos. A alocação foi realizada com base no critério econômico, proporcional à receita gerada por cada produto, conforme recomendado pela ISO 14044 (ISO, 2006) para sistemas multifuncionais. Considerando que a alface representa 87% da receita e o peixe 13%, as emissões foram distribuídas na mesma proporção.

2.4.2 Análise de custo-efetividade ambiental

A análise de custo-efetividade ambiental foi empregada para determinar a relação entre os custos econômicos e as vantagens ambientais do nosso sistema de aquaponia, a fim de alcançar uma avaliação integrada da sustentabilidade do projeto.

Calcularam-se três indicadores primários de custo-efetividade ambiental como medidas:

a) *Custo por kg de CO_2 evitado*: este indicador expressa o custo econômico necessário para evitar a emissão de um quilograma de CO_2 equivalente em comparação com o sistema convencional.

Foi calculado pela Equação 7:

$$CE_CO_2 = CT/\Delta E \qquad \text{(Eq. 7)}$$

Onde:

CE_CO_2 = Custo-efetividade de mitigação de carbono (R$/kg CO_2eq)

CT = Custo total do sistema em 5 anos (implantação + operação)

ΔE = Redução total de emissões em 5 anos (kg CO_2eq)

Este indicador permite comparar a eficiência econômica da mitigação de GEE da aquaponia com outras tecnologias de baixo carbono e com o preço de mercado dos créditos de carbono.

b) *Custo por m³ de água economizada:* quantifica o custo econômico por unidade de água economizada em relação à agricultura convencional. Foi calculado pela Equação 8:

$$CE_água = CT/\Delta A \qquad \text{(Eq. 8)}$$

Onde:

CE_água = Custo-efetividade hídrica (R$/m³)

CT = Custo total do sistema em 5 anos

ΔA = Volume total de água economizada em 5 anos (m³)

A economia de água foi calculada pela diferença entre o consumo específico da agricultura convencional (200 L/kg de alface) e da aquaponia (20 L/kg de alface), multiplicada pela produção total de alface em 5 anos.

c) *Custo por kg de fertilizante evitado:* expressa o custo econômico por quilograma de fertilizante sintético (NPK) não utilizado devido à ciclagem de nutrientes no sistema aquapônico. Foi calculado pela Equação 9:

$$CE_fert = CT/\Delta F \qquad \text{(Eq. 9)}$$

Onde:

CE_fert = Custo-efetividade de eliminação de fertilizantes (R$/kg NPK)

CT = Custo total do sistema em 5 anos

ΔF = Quantidade total de fertilizante NPK evitada em 5 anos (kg)

A quantidade de fertilizante evitado foi estimada com base na dose recomendada de NPK para cultivo convencional de alface (0,15 kg NPK/kg de alface), conforme literatura agronômica (Furlani et al., 2009).

2.4.3. Retorno sobre investimento ambiental (EROI)

O EROI (*Environmental Return on Investment*) foi calculado para quantificar o retorno em benefícios ambientais monetizados por unidade de investimento econômico. O EROI foi calculado pela Equação 10:

$$EROI = BA / CT \qquad \text{(Eq. 10)}$$

Onde:

EROI = Retorno sobre investimento ambiental (adimensional)

BA = Benefícios ambientais monetizados (R$)

CT = Custo total do sistema em 5 anos (R$)

Os benefícios ambientais foram monetizados considerando:

a) *Economia de água:* calculada multiplicando-se o volume de água economizada pela tarifa comercial de água (R$ 15,00/m³), representando o custo evitado com aquisição de água.

b*) Fertilizantes evitados:* este valor é calculado como o fertilizante NPK evitado multiplicado pelo preço de mercado do fertilizante NPK (R$ 4,50/kg), o que reflete o custo evitado de insumos.

c) *Créditos de carbono (potencial):* calculado multiplicando a quantidade de CO_2 evitada pelo preço médio dos créditos de carbono no mercado voluntário brasileiro (R$ 100,00/ton CO_2eq), representando a receita potencial da venda de créditos de carbono.

Para avaliar a robustez dos indicadores de custo-efetividade, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando variações de ± 20% nos principais parâmetros:

- Custo de implantação
- Custo operacional anual
- Fator de emissão da energia elétrica
- Preço da água
- Preço dos créditos de carbono

Esta análise permitiu identificar quais variáveis têm maior influência nos indicadores de custo-efetividade e avaliar a estabilidade dos resultados frente às incertezas.

Os indicadores de custo-efetividade foram comparados com *benchmarks* de referência:

Custo de mitigação de CO_2: comparado com o custo de outras tecnologias de mitigação (energia solar, reflorestamento) e com o preço de mercado dos créditos de carbono (R$ 80-150/tonelada CO_2eq no mercado voluntário brasileiro).

Custo da água: comparado com tarifas de água em diferentes regiões do Brasil e com o custo de tecnologias alternativas de economia de água (reúso, captação de água de chuva).

EROI: comparado com valores típicos de projetos de agricultura sustentável e tecnologias limpas reportados na literatura científica.

3. RESULTADOS

O custo total para implantação do sistema de aquaponia comercial, com capacidade de produção de 2.560 pés de alface por ano (8 ciclos anuais) e 84 kg de tilápias por ano (2 ciclos anuais), foi de R$ 8.133,00 (Tabela 1).

A estrutura de custos revelou que 81,52% do investimento correspondeu à infraestrutura física do sistema, incluindo perfis hidropônicos, caixas de cultivo, decantadores, filtros e sistema hidráulico. Os equipamentos eletromecânicos (bomba submersa e soprador de ar) representaram 14,19% do investimento, enquanto a mão de obra para montagem correspondeu a 3,69% (Tabela 1).

A análise detalhada dos componentes individuais identificou três itens de maior custo relativo: os perfis de hidroponia (80x40mm) representaram 18,38% do investimento total (R$ 1.495,20 para 80 metros); as caixas plásticas para filtro mecânico e biofiltros (300 L, 3 unidades) corresponderam a 12,91% (R$ 1.050,00); e a caixa d'água principal de cultivo de peixes (2.000 L) representou 12,30% (R$ 1.000,00) (Tabela 1). Estes três componentes, somados, totalizaram 43,59% do investimento inicial, evidenciando que a infraestrutura de contenção e cultivo constitui o principal gargalo econômico na fase de implantação.

Componentes de menor valor unitário, mas necessários em quantidade significativa, também contribuíram substancialmente para o custo total: os 320 net pots (vasos de cultivo) representaram 5,51% do investimento (R$ 448,00), enquanto as 40 tampas para os perfis hidropônicos corresponderam a 3,64% (R$ 296,00) (Tabela 1). O sistema de filtração biológica, composto por 1.000 bio balls distribuídos entre os dois biofiltros, representou 8,61% do investimento (R$ 700,00), ressaltando a importância do componente biológico para o funcionamento adequado do sistema aquapônico (Tabela 1).

O custo de produção anual do sistema foi de R$ 5.504,30, distribuído entre custos operacionais fixos e variáveis (Tabela 2). A mão de obra constituiu o componente mais representativo, correspondendo a 32,16% (R$ 1.770,00) dos custos totais, seguida pela energia elétrica com 26,66% (R$ 1.467,60) e pela ração para tilápias com 13,08% (R$ 720,00) (Tabela 2). Estes três componentes, em conjunto, representaram 71,90% dos custos de produção anual, demonstrando que

a operação do sistema é significativamente mais dependente de recursos humanos e energéticos do que de insumos materiais.

O consumo anual de energia elétrica foi de 15.216 kWh, considerando a operação contínua da bomba submersa (4.000 L/h, 65 W) e do soprador de ar (18 m³/h, 110 W) durante 24 horas por dia ao longo de 12 meses, resultando em um custo de R$ 1.467,60 baseado na tarifa média regional (Tabela 2). A ração comercial para tilápias, consumida a uma taxa média de 2% da biomassa diária, totalizou 180 kg anuais (considerando dois ciclos de produção de 60 peixes cada), gerando um custo de R$ 720,00 (Tabela 2).

Componentes de menor representatividade individual incluíram: substrato orgânico para produção de mudas (2,38%, R$ 131,00), sementes de alface (1,87%, R$ 103,00), calcário para correção de pH (1,04%, R$ 57,00), oxiteste para monitoramento da qualidade da água (0,96%, R$ 53,00) e reposição de água devido à evaporação e transpiração (0,73%, R$ 40,00) (Tabela 2). O item "outros" agrupou despesas administrativas, manutenção preventiva e insumos diversos, correspondendo a 21,12% dos custos (R$ 1.162,70) (Tabela 2).

Tabela 1. Custo de implantação de um módulo comercial de aquaponia, discriminando componentes de infraestrutura, equipamentos e mão de obra, com valores unitários, quantidades, valores totais e participação percentual no investimento.

Discriminação	Un.	Quant.	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)	%
Soprador de ar	un.	1	R$ 558,00	R$ 558,00	6,86
Bomba submersa	un.	1	R$ 645,00	R$ 645,00	7,93
*Rede hidráulica	-	-	-	R$ 707,40	8,70
Perfil Hidroponia (80x40mm)	m	80	R$ 18,69	R$ 1.495,20	18,38
Tampa saída do perfil (80x40mm)	un.	40	R$ 7,40	R$ 296,00	3,64
Net pot	un.	320	R$ 1,40	R$ 448,00	5,51
Microtubo sistema de injeção (7x9mm)	un.	40	R$ 4,70	R$ 188,00	2,31
Caixa d'água (2.000 L)	un.	1	R$ 1.000,00	R$1.000,00	12,30
Caixa 300L (filtro mecânico e biofiltros)	un.	3	R$ 350,00	R$1.050,00	12,91
Tambor (decantador)	un.	1	R$ 180,00	R$ 180,00	2,21
Pedra porosa	un.	12	R$ 2,80	R$ 33,60	0,41
Bio bals	un.	1000	R$ 0,70	R$ 700,00	8,61
Mangueira de silicone (4 mm)	m	10	R$ 2,70	R$ 27,00	0,33
Estaca de eucalipto tratado	un.	12	R$ 10,00	R$ 120,00	1,48
Perfil metalon (20x20mm)	m	24	R$ 8,34	R$ 200,16	2,46
Perfil metalon (25x25mm)	m	12	R$ 10,50	R$ 126,00	1,55
Parafuso	un.	20	R$ 0,50	R$ 10,00	0,12
Parafuso francês 3/8 12 cm	un.	16	R$ 3,04	R$ 48,64	0,60
Mão de obra (ajudante)	Diária	3	R$ 100,00	R$ 300,00	3,69
Total				**R$ 8.133,00**	**100,00**

* Rede hidráulica (Flanges, tubos de PVC, curvas, joelhos, caps e adaptadores rosqueáveis).

Tabela 2. Custo de produção anual de um módulo comercial de aquaponia, discriminando custos operacionais por categoria de insumo, com valores absolutos e participação percentual no custo total anual.

Discriminação	Un.	Quant.	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)	%
Ração	Saco	6	R$ 120,00	R$ 720,00	13,08
Alevinos	Un.	120	R$ 0,30	R$ 36,00	0,65
Energia	kWh	2190	R$ 0,67	R$ 1.467,30	26,66
Mudas	Un.	2560	R$ 0,15	R$ 384,00	6,98
Reagente	Kit	2	R$ 299,50	R$ 599,00	10,88
Embalagem	Mil	3	R$ 176,00	R$ 528,00	9,59
Mão de obra	Hora	300	R$ 5,90	R$ 1.770,00	32,16
Total				**R$ 5.504,30**	**100,00**

O fluxo de caixa foi projetado para um horizonte temporal de cinco anos, considerando o Cenário 2 com preço de venda da alface a R$ 4,00 por unidade e preço do peixe a R$ 18,00 por quilograma (Tabela 3). A receita bruta anual foi de R$ 11.751,90, composta por R$ 10.240,00 da comercialização de 2.560 pés de alface e R$ 1.511,90 da comercialização de 84 kg de tilápias (Tabela 3). Subtraindo os custos de produção anual de R$ 5.504,30, o resultado líquido anual foi de R$ 6.247,70 (Tabela 3).

O fluxo de caixa acumulado iniciou negativamente no Ano 0 com o investimento inicial de R$ 8.133,00, tornando-se menos negativo progressivamente: - R$ 1.885,30 ao final do Ano 1, + R$ 4.362,40 ao final do Ano 2, + R$ 10.610,10 ao final do Ano 3, + R$ 16.857,80 ao final do Ano 4, e atingindo um saldo acumulado final de R$ 23.105,50 ao término do Ano 5 (Tabela 3). O ponto de equilíbrio financeiro (fluxo de caixa acumulado positivo) foi atingido entre o Ano 1 e o Ano 2, mais especificamente após, aproximadamente, 16 meses de operação, caracterizando um período de *payback* relativamente curto para sistemas agrícolas (Tabela 3).

Tabela 3. Fluxo de caixa projetado para cinco anos de operação do sistema de aquaponia no Espírito Santo, considerando o Cenário 2 de comercialização (alface a R$ 4,00 e tilápia a R$ 18,00/kg), com discriminação de receitas, custos, resultado líquido anual e saldo acumulado.

Ano	Entrada (R$)	Saída (R$)	Investimento (R$)	Fluxo líquido (R$)	Saldo (R$)
0			13.337,30	- 13.337,30	-
1	11.752,00	5.504,30		6.247,70	- 7.089,60
2	11.752,00	5.504,30		6.247,70	- 841,90
3	11.752,00	5.504,30		6.247,70	5.405,80
4	11.752,00	5.504,30		6.247,70	11.653,50
5	11.752,00	5.504,30		6.247,70	17.901,20
Total	**58.760,00**	**27.521,50**	**13.337,30**	**44.575,80**	

Os indicadores econômicos foram calculados para três cenários distintos de comercialização, refletindo diferentes canais de venda para as alfaces: Cenário 1 (R$ 3,10/unidade, correspondente ao preço CEASA), Cenário 2 (R$ 4,00/unidade, preço médio em feiras tradicionais) e Cenário 3 (R$ 4,50/unidade, preço médio em feiras agroecológicas) (Tabela 4). O preço da tilápia foi mantido constante em R$ 18,00/kg em todos os cenários, refletindo o mercado local de venda direta ao consumidor (Tabela 4).

O PEP mostrou sensibilidade significativa ao preço de venda das hortaliças: no Cenário 1 (CEASA), o PEP foi de 3 anos e 6 meses; no Cenário 2 (feiras tradicionais), reduziu para 2 anos e 2 meses; e no Cenário 3 (feiras agroecológicas), atingiu o menor valor de 1 ano e 10 meses (Tabela 4). Esta amplitude de 20 meses entre os cenários extremos evidencia o impacto direto do canal de comercialização sobre o tempo de recuperação do investimento.

A TIR variou de 14,63% no Cenário 1 a 48,67% no Cenário 3, superando em todos os casos a TMA estabelecida em 8% ao ano (Tabela 4). O índice TMA/TIR, que quantifica o risco financeiro do projeto (quanto menor, menor o risco), foi de 0,55 no Cenário 1 (risco médio), 0,31 no Cenário 2 (risco baixo) e 0,16 no Cenário 3 (risco muito baixo) (Tabela 4), demonstrando que o acesso a mercados *premium* não apenas aumenta a rentabilidade, mas também reduz substancialmente o risco do investimento.

O VPL, calculado descontando os fluxos de caixa futuros à taxa de 8% ao ano, foi positivo em todos os cenários: R$ 2.408,75 no Cenário 1, R$ 9.734,36 no Cenário 2 e R$ 16.718,62 no Cenário 3 (Tabela 4), confirmando a viabilidade econômica do sistema mesmo no cenário menos favorável. A relação B/C apresentou valores de 1,07 (Cenário 1), 1,26 (Cenário 2) e 1,47 (Cenário 3) (Tabela 4), indicando que para cada real investido no sistema, o retorno varia de R$ 1,07 a R$ 1,47, dependendo do canal de comercialização adotado.

Tabela 4. Indicadores econômicos calculados para três cenários distintos de comercialização da alface (CEASA, feiras tradicionais e feiras agroecológicas), incluindo Período Efetivo de Payback, Taxa Interna de Retorno, índice TMA/TIR, Valor Presente Líquido e relação Benefício/Custo.

Indicadores	Comercialização da alface		
	R$ 3,10	R$ 4,00	R$ 4,50
PEP	3 anos e 6 meses	2 anos e 2 meses	1 ano e 10 meses
TIR (%)	14,63	37,21	48,67
TMA/TIR	0,55	0,21	0,16
VPL - R$	2.408,75	11.607,95	16.718,62
Relação B/C	1,07	1,33	1,47

Com base na comparação da estrutura de receita total do sistema, verificou-se que 13% da receita (aproximadamente R$ 1.511,90 por ano) consiste na venda de 84 kg de tilápia (Figura 2), e 87% da receita (aproximadamente R$ 10.240,00 por ano no Cenário 2) é devido à venda total de 2.560 cabeças de alface (Figura 2). Essa diferença de 13:87 mostra que a sustentabilidade econômica do sistema depende principalmente da comercialização de vegetais, enquanto o peixe desempenha um papel auxiliar, mas não essencial.

O estudo de sensibilidade entre o preço de venda da alface e o período de retorno caracterizou três zonas distintas (por exemplo, Figura 2): a Zona de Risco, onde os preços da alface estão abaixo de R$ 3,25/unidade, cujo tempo de retorno é superior a 3 anos (uma recuperação de investimentos mais incerta); a Zona Aceitável, na qual os preços variam de R$ 3,25 a R$ 4,15/unidade, com um período de retorno entre 2 e 3 anos, indicando

condições de viabilidade moderada; e a Zona Ótima, onde os preços são superiores a R$ 4,15/unidade, com um período de retorno inferior a 2 anos (alta qualidade para retorno financeiro; ver Figura 2).

O ponto de equilíbrio econômico, que além de ser o preço mínimo para alcançar um VPL de zero, foi identificado em R$ 2,87 por peça de alface (ver Figura 2).

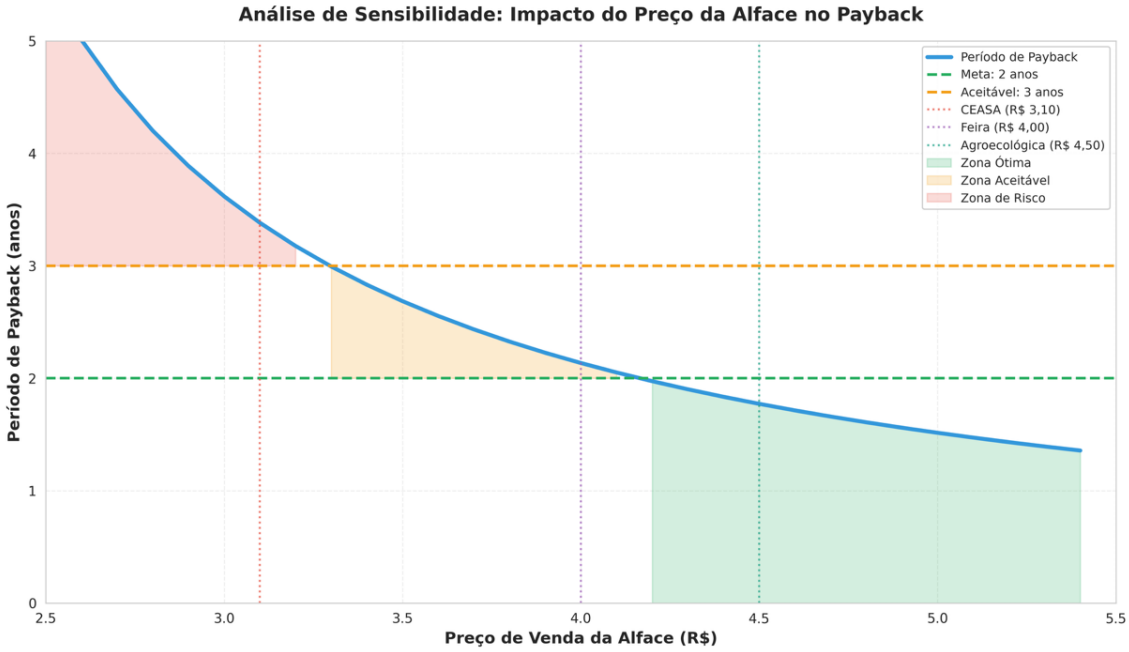


Figura 2. Análise de sensibilidade entre o preço de venda da alface e o período de *payback* do investimento. Destaca-se três zonas de retorno: Zona de Risco (vermelho), com preços inferiores a R$ 3,25 e *payback* superior a 3 anos; Zona Aceitável (amarelo), entre R$ 3,25 - R$ 4,15, com retorno entre 2 e 3 anos; e Zona Ótima (verde), acima de R$ 4,15, com *payback* inferior a 2 anos e alta atratividade econômica. O ponto de equilíbrio para viabilidade (VPL > 0) ocorre em R$ 2,87, valor a partir do qual o projeto torna-se economicamente viável, variando apenas o nível de segurança financeira.

Abaixo deste valor, o projeto torna-se economicamente inviável, pois as receitas não seriam suficientes para recuperar o investimento inicial e cobrir os custos operacionais durante o horizonte de análise de cinco anos. A identificação deste ponto crítico é fundamental para o planejamento estratégico de comercialização e para a definição de preços mínimos aceitáveis em negociações com compradores.

Sobre a análise de pegada de carbono e custo-efetividade ambiental, a Figura 3 apresenta os resultados obtidos para o sistema de aquaponia comercial em

comparação com sistemas agrícolas convencionais e com o modelo de aquaponia associado à energia solar.

A composição da pegada de carbono do sistema de aquaponia totalizou 443 kg CO_2 eq/ano, sendo 216,0 kg CO_2 eq/ano provenientes da produção de ração, 178,9 kg CO_2 eq/ano do consumo de energia elétrica, 45,0 kg CO_2 eq/ano de equipamentos amortizados e 2,8 kg CO_2 eq/ano do transporte. Na comparação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), o sistema de aquaponia apresentou valor total inferior (443 kg CO_2 eq/ano) ao sistema agrícola convencional (570 kg CO_2 eq/ano). A integração da energia solar reduziu as emissões para 273 kg CO_2 eq/ano. O potencial de mitigação de GEE foi de 22,3% para o sistema de aquaponia em relação ao convencional e de 52,2% quando associada à fonte solar.

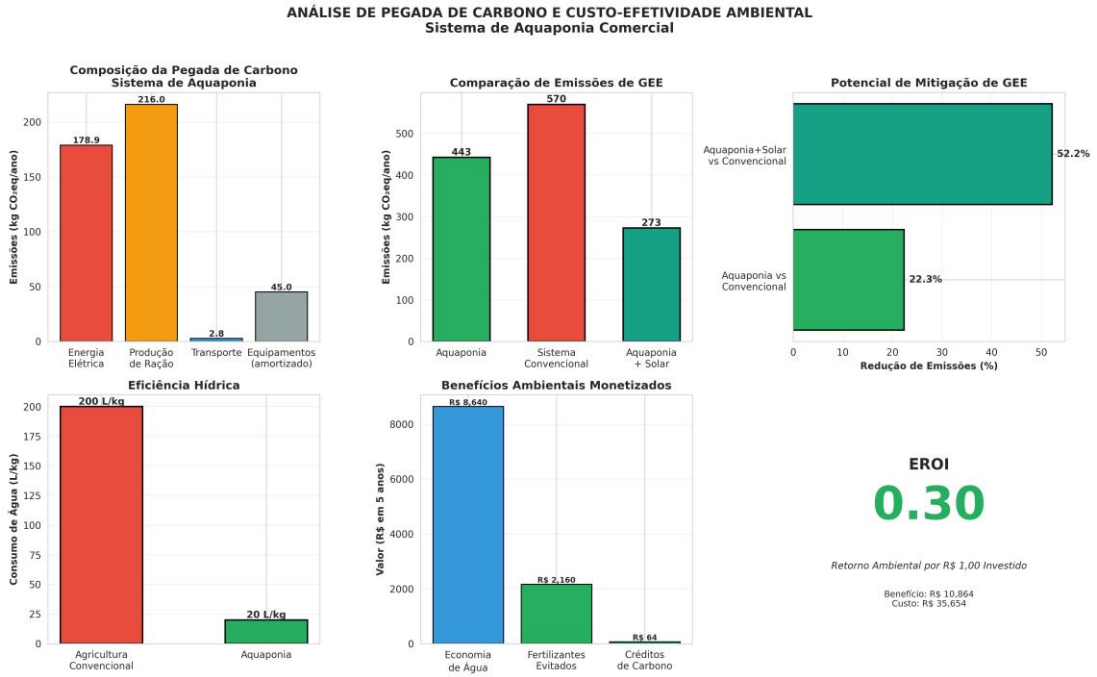


Figura 3. Análise da pegada de carbono e do custo-efetividade ambiental de um sistema comercial de aquaponia. Os gráficos apresentam (A) a composição da pegada de carbono do sistema, destacando a contribuição da produção de ração, energia elétrica, transporte e equipamentos amortizados; (B) a comparação das emissões anuais de gases de efeito estufa (GEE) entre os sistemas de aquaponia, aquaponia associada à energia solar e agricultura convencional; (C) o potencial de mitigação de GEE em relação ao sistema convencional; (D) a eficiência hídrica, expressa pelo consumo de água por quilograma de produto; (E) os benefícios ambientais monetizados em cinco anos, considerando economia de água, fertilizantes evitados e créditos de carbono; e (F) o índice de retorno ambiental por real investido (EROI), que indica benefício ambiental de R$ 0,30 para cada R$ 1,00 investido.

Quanto à eficiência hídrica, o consumo médio de água na aquaponia foi de 20 L/kg de produto, enquanto na agricultura convencional o consumo foi de 200 L/kg,

correspondendo a uma economia de 90% de água. Os benefícios ambientais monetizados totalizaram R$ 10.864,00 em cinco anos, sendo R$ 8.640,00 referentes à economia de água, R$ 2.160,00 à substituição de fertilizantes e R$ 64,00 aos créditos de carbono. O retorno ambiental por real investido (EROI) foi de 0,30, indicando benefício ambiental de R$ 10.864,00 frente a um custo total de R$ 35.654,00.

4. DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que sistemas aquapônicos de pequena escala comercial apresentam viabilidade econômica quando operados sob condições específicas de mercado e gestão otimizada de recursos. O investimento inicial de R$ 8.133,00 posiciona este sistema como alternativa economicamente acessível para produtores rurais de pequeno porte. Lobillo-Eguíbar et al. (2020), em análise de sustentabilidade econômica de sistemas aquapônicos de pequena escala para autoprodução de alimentos relataram custos iniciais variando entre €500 a €1.500, dependendo do volume e complexidade tecnológica, valores compatíveis com os observados neste estudo quando convertidos para a moeda local.

A predominância dos custos com infraestrutura física (81,52%) observada corrobora análises econômicas que identificaram a aquisição de componentes estruturais como principal barreira ao investimento em aquaponia de pequena escala (Andrade et al., 2018; Dalazen et al., 2020). A identificação de perfis hidropônicos (18,38%), caixas de filtração (12,91%) e reservatórios de cultivo (12,30%) como responsáveis por 43,59% do investimento total fornece orientação estratégica para futuras reduções de custos. Carvalho et al. (2024) demonstraram em sistema aquapônico confeccionado com materiais sustentáveis que a otimização de componentes estruturais pode reduzir custos de implantação mantendo desempenho produtivo adequado para agricultura familiar.

A análise dos custos operacionais anuais (R$ 5.504,30) revela configuração na qual mão de obra (32,16%), energia elétrica (26,66%) e ração (13,08%) constituem conjuntamente 71,90% dos custos totais. Esta distribuição contrasta significativamente com sistemas hidropônicos convencionais, onde fertilizantes minerais representam parcela majoritária dos custos variáveis (Morais et al., 2024). Goddek et al. (2015) advertem que a elevada dependência de recursos humanos e energéticos constitui um dos principais desafios à comercialização sustentável de empreendimentos aquapônicos, limitando competitividade frente a sistemas agrícolas convencionais.

O consumo energético de 15.216 kWh anuais representa vulnerabilidade econômica em cenários de tarifas elevadas. Ghamkhar et al. (2022) demonstraram mediante avaliação do ciclo de vida e análise econômica de sistema aquapônico em

clima frio, que energia elétrica constitui um dos principais contribuintes à pegada ambiental, sendo eletricidade e aquecimento parâmetros críticos para desempenho econômico (Ghamkhar et al., 2022). Zappernick et al. (2022) reportaram em análise técnico-econômica de sistema de recirculação tilápia-alface que custos energéticos representaram 18-25% dos custos operacionais totais, enfatizando a necessidade de estratégias de eficiência energética.

A ausência de automação explica a elevada demanda por mão de obra (300 horas anuais, R$ 1.770,00). Segundo Tokunaga et al. (2015), o trabalho manual constituiu fator limitante significativo à expansão produtiva, com requisitos de 20-25 horas semanais para sistemas de 190 m². Tecnologias de automação e monitoramento remoto apresentam potencial para reduzir requisitos de mão de obra em até 60%, com períodos de retorno de investimento inferiores a três anos quando considerada a redução de custos operacionais e minimização de perdas produtivas (Goddek et al., 2019).

Os indicadores econômicos calculados revelam sensibilidade expressiva ao canal de comercialização adotado. O Período Efetivo de *Payback,* variando de 3 anos e 6 meses (venda via CEASA) a 1 ano e 10 meses (feiras agroecológicas), demonstra que o acesso aos mercados com maior valor agregado reduz o tempo de recuperação do investimento em 56%. Para Greenfeld et al. (2018) a viabilidade econômica da aquaponia depende criticamente da capacidade de acessar mercados *premium* dispostos a pagar preços diferenciados por produtos sustentáveis, identificando este fator como lacuna crítica entre potencial teórico e realidade comercial atual.

A TIR, variando de 14,63% a 48,67%, superou em todos os cenários a Taxa Mínima de Atratividade estabelecida (8% ao ano), confirmando viabilidade econômica. Estes valores são superiores aos reportados por Tokunaga et al. (2015), que identificaram TIR de 6,8% para operações comerciais convencionais de aquaponia no Havaí, embora operações otimizadas com vendas diretas alcançassem TIR de 22,4%. Stadler et al. (2015) demonstraram em análise comparativa de viabilidade econômica e economia circular de sistemas aquapônicos sob condições holandesas que cenários urbanos, rurais e periurbanos apresentam viabilidades econômicas distintas, com TIR variando de 8,3% a 31,7% dependendo de estratégias de comercialização e integração com economia circular (Stadler et al., 2015).

O Valor Presente Líquido positivo em todos os cenários (R$ 2.408,75 a R$ 16.718,62) confirma a capacidade do sistema de gerar valor econômico ao longo do horizonte de cinco anos. A relação Benefício/Custo variando de 1,07 a 1,47 indica retornos financeiros competitivos. Em análise técnico-econômica VPL negativo para sistema comercial de 464 m² sem otimização de receitas, mas VPL positivo quando incorporadas estratégias de diversificação de produtos e acesso a mercados *premium* foram obtidos por Zappernick et al*.* (2022). Chen (1998) destaca que avaliação econômica simplificada de projetos deve considerar múltiplos cenários de sensibilidade para capturar variabilidade de condições de mercado.

A distribuição assimétrica das receitas, com 87% proveniente da comercialização de hortaliças e apenas 13% da produção de peixes, demonstra que sustentabilidade econômica é predominantemente dependente do componente vegetal. Esta proporção está alinhada com observações de Somerville et al*.* (2014), que em manual técnico da FAO sobre produção aquapônica de pequena escala documentaram que sistemas bem balanceados tipicamente derivam 70-85% da receita total de hortaliças, sendo este padrão economicamente mais sustentável que configurações com maior proporção de receita pesqueira.

Tyson et al. (2011) argumentam que esta assimetria não representa falha de design, mas sim, característica inerente à economia de sistemas aquapônicos, onde peixes funcionam primariamente como fonte de nutrientes subsidiada, enquanto vegetais representam produto comercial principal com ciclos mais curtos e menor risco de mercado. Por outro lado, Diver e Rinehart (2006) enfatizam que em sistemas integrados de hidroponia com aquicultura, a otimização econômica frequentemente favorece maximização da área de cultivo vegetal em detrimento da densidade pesqueira, contrariando intuições iniciais sobre balanceamento produtivo.

Estudos comparativos demonstram que a otimização de densidade de plantio e a aceleração de ciclos vegetais ampliam rentabilidade mais efetivamente que aumento de estocagem de peixes. Oladimeji et al. (2020b) reportaram em sistema *catfish*-abóbora que diferentes substratos de cultivo afetaram significativamente o rendimento vegetal (20-45% de variação) mas não alteraram o desempenho dos peixes, evidenciando que a otimização deve priorizar o componente vegetal. A diversificação mediante introdução de espécies de maior valor comercial poderia ampliar contribuição do componente aquícola, conforme demonstrado por Greenfeld et al*.* (2018) em análises de diferentes configurações de mercado.

A análise de sensibilidade identificou três zonas distintas de viabilidade econômica baseadas no preço de venda da alface: Zona de Risco (< R$ 3,25/unidade, *payback* > 3 anos), Zona Aceitável (R$ 3,25-4,15, *payback* 2-3 anos) e Zona Ótima (> R$ 4,15, *payback* < 2 anos). Esta categorização fornece orientação estratégica fundamental para gestão de riscos. O ponto de equilíbrio econômico em R$ 2,87 por unidade estabelece preço mínimo necessário para viabilidade, valor que requer margem de segurança adequada considerando volatilidade de mercado. Nogueira (2007) enfatiza que análise de investimentos em sistemas agropecuários deve incorporar múltiplos cenários de sensibilidade para capturar variabilidade de preços e custos ao longo do horizonte temporal.

Greenfeld et al. (2018) demonstram a atratividade econômica da aquaponia, argumentando que as incertezas em relação aos preços de mercado, custos de insumos e escalabilidade da produção constituem as principais barreiras para a adoção comercial, daí a necessidade de desenvolver modelos de negócios viáveis para enfrentar essas barreiras. Enquanto Laidlaw e Magee (2014) lidam com os desafios econômicos relacionados ao acesso ao mercado, volatilidade da demanda e concorrência com a indústria convencional, demonstrando que soluções sustentáveis a longo prazo exigirão uma combinação de múltiplas estratégias e uma integração com iniciativas de soberania alimentar urbana. A pegada de carbono total de 443 kg CO_2 eq/ano, 22,3% menor que os sistemas agrícolas convencionais (570 kg CO_2 eq/ano), reflete o potencial de proteção ambiental da aquaponia. A análise dessa pegada demonstra ainda que 48,8% dela é derivada de duas fontes principais, a saber, produção de ração e consumo de eletricidade. Ghamkhar et al. (2022) reportaram em avaliação do ciclo de vida de sistema aquapônico em clima frio que emissões totais variaram de 2,1 a 3,8 kg CO_2 eq por kg de alface produzida, dependendo de fonte energética e eficiência operacional, valores superiores aos observados neste estudo quando normalizados por unidade de produto.

A eficiência hídrica de 20 L/kg de produto, representando economia de 90% em relação à agricultura convencional (200 L/kg), posiciona aquaponia como tecnologia estratégica para regiões com escassez hídrica. Boretti e Rosa (2019) enfatizam mediante reavaliação de projeções de desenvolvimento hídrico mundial que tecnologias de produção de alimentos com alta eficiência hídrica serão críticas

para segurança alimentar global nas próximas décadas, particularmente em regiões sob estresse hídrico. Dias et al. (2024) demonstraram que restrição hídrica altera características de bancos de sementes e ecologia em florestas sazonais atlânticas sob mudanças climáticas, evidenciando urgência de sistemas produtivos resilientes à escassez de água.

Goddek et al. (2015) argumentam que o crescimento sustentável dos sistemas de aquaponia a longo prazo significa não apenas o uso eficiente dos recursos, mas também o fechamento do ciclo de nutrientes e a redução de insumos externos, o que é um princípio central da economia circular aplicada aos sistemas alimentares. No entanto, Nair et al. (2024) destacam que sustentabilidade requer integração de múltiplas dimensões: ambiental, econômica, social e tecnológica.

Os benefícios ambientais monetizados totalizando R$ 10.864,00 ao longo de cinco anos, compostos por economia de água (79,5%), substituição de fertilizantes (19,9%) e créditos de carbono (0,6%), representam contribuição significativa à viabilidade sistêmica. O índice de retorno ambiental por real investido (0,30) indica que para cada unidade monetária investida, gera-se R$ 0,30 em valor ambiental adicional aos retornos econômicos diretos. Greenfeld et al. (2021) produziram uma abordagem clara para monetizar os custos ambientais da agricultura aquapônica integrada, mostrando que a aquaponia reduz os custos ambientais em $2,45 por kg de produto em comparação com a produção separada de peixes e vegetais.

Esta análise integrada economia-ambiente reflete tendências contemporâneas de valorização de serviços ecossistêmicos na agricultura. Verma et al. (2023) sugerem que a aquaponia como um sistema agrícola integrado é uma nova tendência que corresponde à necessidade de transição dos sistemas alimentares para métodos mais sustentáveis, resilientes e eficientes em termos de recursos. Stentiford et al. (2020) destacam que a aquicultura sustentável, sob a perspectiva de “Uma Saúde”, deve enfatizar as inter-relações entre a saúde ambiental, animal e humana, sendo a aquaponia um modelo para essa abordagem integrativa. A contribuição marginal dos créditos de carbono (R$ 64,00, apenas 0,6%) indica que os mecanismos de precificação existentes não refletem com precisão o efeito de mitigação. Horn et al. (2024) argumentam que a realização do valor ecológico precisa incluir não apenas melhores métricas de impacto, mas também políticas públicas e

mecanismos de mercado que incorporem os benefícios das externalidades ambientais positivas associadas à aquaponia. Embora a viabilidade econômica seja vista como promissora, grandes barreiras de mercado para a comercialização em larga escala podem ser encontradas pelos sistemas de aquaponia.

Goddek et al. (2015) identificaram em análise sistemática múltiplas barreiras: complexidade operacional exigindo conhecimento multidisciplinar, altos custos iniciais de capital, necessidade de monitoramento contínuo de qualidade de água, vulnerabilidade a falhas sistêmicas e dificuldades de acesso a mercados *premium*.

De acordo com Tyson et al. (2011), as questões e oportunidades para a sustentabilidade dos sistemas de aquaponia estão inextricavelmente ligadas: a integração planta-aquicultura tem o potencial para eficiências sinérgicas, mas também introduz dificuldades operacionais que podem ameaçar a viabilidade dos sistemas, a menos que sejam bem geridas. Okomoda et al. (2023) observam problemas com a adoção na prática e notam que, mesmo com décadas de esforços de pesquisa, a aquaponia permanece, na prática, amplamente experimental e no domínio educacional, com crescimento comercial mínimo devido a razões econômicas, técnicas e institucionais.

Estes desafios enfatizam a necessidade de modelos de negócios inovadores que integrem a produção aquapônica com estratégias de agregação de valor, educação ambiental e economia solidária.

Os resultados indicam que a aquaponia de pequena escala apresenta viabilidade técnico-econômica sob condições de acesso a mercados diferenciados e gestão otimizada de recursos. Verma et al. (2023) argumentam que aquaponia como sistema agrícola integrado representa tendência emergente com perspectivas futuras promissoras, particularmente quando integrada com tecnologias digitais, agricultura urbana e economia circular.

Goddek et al. (2019) propõem em obra abrangente sobre sistemas de produção aquapônica que o futuro da tecnologia dependerá de: (i) desenvolvimento de sistemas desacoplados que otimizam independentemente componentes aquícola e hidropônico; (ii) integração com energias renováveis e sistemas de captura de carbono; (iii) desenvolvimento de cultivares vegetais e linhagens de peixes especificamente adaptadas a ambientes aquapônicos; (iv) estabelecimento de marcos regulatórios e sistemas de certificação que reconheçam benefícios

ambientais; e (v) construção de redes de conhecimento e comunidades de prática que acelerem inovação.

Abusin e Mandikiana (2020) demonstraram viabilidade de aquaponia em contexto do Qatar, evidenciando potencial de adaptação da tecnologia às condições climáticas adversas e escassez hídrica severa, particularmente relevante considerando projeções de mudanças climáticas. Somerville et al. (2014) enfatizam que aquaponia oferece oportunidade singular para agricultura familiar em contextos de recursos limitados, sendo manual técnico da FAO, ferramenta essencial para disseminação de conhecimento e capacitação técnica.

Políticas públicas de incentivo à agricultura urbana e periurbana, incluindo linhas de crédito subsidiado (Campos et al*.,* 2024), assistência técnica especializada (INCAPER, 2023) e programas de compras institucionais poderiam acelerar adoção comercial da aquaponia em contextos de agricultura familiar. Finalmente, aquaponia posiciona-se como tecnologia habilitadora para diversificação de sistemas produtivos rurais, segurança alimentar local e resiliência climática. A capacidade de produzir proteína animal e vegetais nutritivos com mínima demanda hídrica e terrestre oferece solução alinhada com necessidades civilizacionais contemporâneas, conforme enfatizado por Crist et al. (2017) em análise sobre interação entre população, produção de alimentos e proteção de biodiversidade.

O avanço científico e tecnológico na área dependerá de esforços integrados entre pesquisa aplicada, desenvolvimento de políticas públicas favoráveis e construção de capacidades técnicas de produtores, possibilitando transição da aquaponia de nicho experimental para sistema consolidado de produção sustentável de alimentos.

5. CONCLUSÃO

O estudo demonstra que a aquaponia de pequena escala é economicamente viável**,** apresentando retorno rápido do investimento, VPL positivo e TIR superior à taxa mínima de atratividade em todos os cenários avaliados. Os sistemas mostraram ainda redução significativa da pegada de carbono e alto uso eficiente da água, reforçando seu potencial ambiental. A maior contribuição econômica provém da produção vegetal, destacando a importância do acesso a mercados de maior valor agregado. Assim, a aquaponia se confirma como uma alternativa produtiva sustentável, com potencial para fortalecer a agricultura familiar e contribuir para sistemas alimentares resilientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abusin, S. A. A., Mandikiana, B. W. (2020) Towards sustainable food production systems in Qatar: Assessment of the viability of aquaponics. Global Food Security, 25:100349-10055. DOI doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100349.

Andrade, I. R. A., Silva, H. S., Souza, A. A., Costa, J. H. C. (2018) Metodologias para avaliação econômica de sistemas de produção agropecuários. Archivos de Zootecnia, 67:610-620. DOI doi.org/10.21071/az.v0i0.3894.

Aquaponics Market Size and Trends. (2024) Global Aquaponics Market Report. Grand View Research. Disponível em https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aquaponics-marketreport. Acesso em 3 de dezembro de 2024.

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

Boretti, A., Rosa, L. (2019) Reassessing the projections of the world water development report. NPJ Clean Water, 2:15-20. DOI doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9.

Campos, C., Perin, A. P., Francischini, A. S. N. (2024) Um estudo sobre a remuneração da poupança no Brasil no contexto da educação financeira crítica. Revista Educação Matemática em Foco, 12:1-14. DOI doi.org/10.29327/2283071.12.1-3.

Carvalho, S. W. S., Periard, L. R., Souza, T. B. (2024) Avaliação de um sistema de aquaponia para agricultura familiar confeccionado com materiais sustentáveis. Observatório de la Economía Latinoamericana, 22:e8166. DOI doi.org/10.55905/oelv22n12-098.

CEASA-RJ - Centrais de Abastecimento do Estado do Rio de Janeiro. (2024) Cotação de preços agrícolas – alface. Rio de Janeiro. Disponível em https://www.rj.gov.br/ceasa/sites/default/files/arquivos_paginas/Boletim%20de%20pre%C3%A7os%20%2010%2001%202024.pdf. Acesso em 13 de dezembro de 2024.

Chen, M. T. (1998) Simplified project economic evaluation. Cost Engineering, 40:31-36. 28p.

Crist, E., Mora, C., Engelman, R. (2017) The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. Science, 356:260-264. DOI doi.org/10.1126/science.aal201.

Dalazen, G. B., Sia, E.F., E., Mota, C. M., Bentes, J. R., Barros, I. B. A. (2020) A avaliação econômica do sistema de aquaponia familiar em Santarém, oeste do Pará. Revista Agroecossistemas, 11:40-56. DOI doi.org/10.18542/ragros.v11i2.9077.

Dias, P. B., Kunz, S. H., Pezzopane, J. E. M., Xavier, T. M. T., Zorzanelli, J. P. F., Toledo, J. V. Gorsani, R. G. (2024) Water restriction alters seed bank traits and ecology in Atlantic Forest seasonal forests under climate change. Global Change Biology, 30:17494. DOI doi.org/10.1111/gcb.17494.

Diver, S., Rinehart, L. (2006) Aquaponics: Integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA Publication No. IP 163. Butte, MT: National Sustainable Agriculture Information Service. 56: 1-28.

Furlani, P. R. (2009) Instruções para o cultivo de alface em hidroponia. Instituto Agronômico de Campinas, 20p.

Ghamkhar, R., Hartleb, C., Rabas, Z., Hicks, A. (2022) Evaluation of environmental and economic implications of a cold-weather aquaponic food production system using life cycle assessment and economic analysis. Journal of Industrial Ecology, 26:862-874. DOI doi.org/10.1111/jiec.13230.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R. (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability, 7:4199-4224. DOI doi.org/10.3390/su7044199.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G. M. (2019) Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer Nature. Cham, Switzerland, 620p.

Greenfeld, A., Becker, N., McIlwain, J., Fotedar, R., Bornman, J. F. (2018) Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. Reviews in Aquaculture, 11:848-862. DOI doi.org/10.1111/raq.12269.

Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., Angel, D. L. (2021) Monetizing environmental impact of integrated aquaponic farming compared to separate systems. Science of the Total Environment, 792:148459. DOI doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148459.

Henriksson, P. J. G., Rico, A., Zhang, W., Ahmad-Al-Nahid, S., Newton, R., Phan, L. T., Zhang, Z., Jaithiang, J., Dao, H. M., Phu, T. M., Little, d. C., Murray, F. J., Satapornvanit, K., Liu, L., Liu, Q., Haque, M. M., Kruijssen, F., Snoo, G. R., Heijungs, R., Bodegom, P. M., Guinée, J. B. (2015) Comparison of Asian aquaculture products by use of statistically supported life cycle assessment. Environmental Science & Technology, 49:14176-14183. DOI doi.org/10.1021/acs.est.5b04634.

Horn, E. K., Joyce, A., Chowdhury, R. B., Caputo, S., Jacobs, B., Winkler, M., Proksch, G. (2024) Translating environmental potential to economic reality: Assessment of commercial aquaponics through sustainability transitions theory. Circular Economy and Sustainability, 4:523-554. DOI doi.org/10.1007/s43615-023-00291-0.

INCAPER. Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural – Proater. (2023) Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Alegre.pdf. Acesso em 6 de novembro de 2024.

IPCC. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. (2019) Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/. Acesso em 6 de novembro de 2024.

ISO. International Organization For Standardization. 14064-1 (2018) Greenhouse gases - Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. Geneva: ISO, 2018.

Laidlaw, J., Magee, L. (2014). Towards urban food sovereignty: The trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne. Local Environment, 21:573-590. DOI doi.org/10.1080/13549839.2014.986716.

Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V. M., Bermejo, L. A., Pérez-Urrestarazu, L. (2020) Economic sustainability of small-scale aquaponic systems for food self-production. Agronomy, 10:1468-1486. DOI doi.org/10.3390/agronomy10101468.

MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H., Mamun-Ur-Rashid, M. (2020) Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. Scientific Reports, 10:11679. DOI doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8.

Maucieri, C., Forchino, A. A., Nicoletto, C., Junge, R., Pastres, R., Sambo, P., Borin, M. (2018) Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered material. Journal of Cleaner Production, 172:3119-3127. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.097.

MCTI. Fator de emissão de CO_2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. (2023) Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos. Acesso em 10 de novembro de 2024.

Morais, N. M., Peiter, M. X., Robaina, A. D., Parizi, A. R. C., Glasenapp, S., Guasque, M. A. F., Gerotto, N. M. (2024) Análise econômica em sistemas hidropônicos NFT para alface: um estudo de escalas comerciais de produção. Observatório de la Economía Latinoamericana, 22:7055-7071. DOI doi.org/10.55905/oelv22n10-051.

Nair, C. S., Manoharan, R., Nishanth, D., Subramanian, R., Neumann, E., Jaleel, A. (2024) Recent advancements in aquaponics with special emphasis on its sustainability. Journal of the World Aquaculture Society, 56:e13116. DOI doi.org/10.1111/jwas.13116.

Nogueira, E. (2007) Análise de investimentos. In Gestão Agroindustrial. São Paulo: Atlas. p. 223-224.

Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S. O., Ogah, S. I., Ikhwanuddin, M. (2023) *Aquaponics production system:* A review of historical

perspective, opportunities, and challenges of its adoption. Food Science & Nutrition, 11:1157-1165. DOI doi.org/10.1002/fsn3.3154.

Oladimeji, A. S., Olufeagba, S. O., Ayuba, V. O., Sololmon, S. G., Okomoda, V. T. (2020) Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system. Journal of King Saud University–Science, 32:60-66. DOI doi.org/10.1016/j.jksus.2018.02.00.

Pelletier, N., Tyedmers, P., Sonesson, U., Scholz, A., Ziegler, F., Flysjo, A., Kruse, S., Cancino, B., Silverman, H. (2009) Not all salmon are created equal: Life cycle assessment of global salmon farming systems. Environmental Science & Technology, 43:8730-8736. DOI doi.org/10.1021/es9010114.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014) Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper N°. 589. Roma: FAO. 288p.

Souza, A., Clemente, A. (2008) Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações. Atlas. 200p.

Stadler, M. M., Baganz, D., Vermeulen, T., Keesman, K. J. (2015) Circular economy and economic viability of aquaponic systems: Comparing urban, rural and peri-urban scenarios under Dutch conditions. ICESC2015: Hydroponics and Aquaponics at the Gold Coast, 1176:101-114. DOI doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1176.14.

Stentiford, G. D., Bateman, I. J., Hinchliffe, S. J., Bass, D. 1., Hartnell, R., Santos, E. M., Tyler, C. R. (2020) Sustainable aquaculture through the One Health lens. Nature Food, 1:468-474. DOI doi.org/10.1038/s43016-020-0127-5.

Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., Leung, P. (2015) Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawai'i. Journal of the World Aquaculture Society, 46:20-32. DOI doi.org/10.1111/jwas.12173.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., Simonne, E. H. (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. HortTechnology, 21:6-13. DOI doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6.

United Nations. Global population growth and sustainable development. (2021) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Retrieved from. Disponível em: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2022_global_population_growth.pdf. Acesso em 13 de dezembro de 2024.

Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., Saghai, Y. (2021) A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. Nature Food, 2:494-501. DOI doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9.

Verma, A. K., Chandrakant, M. H., John, V. C., Peter, R. M., John, I. E. (2023) Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and

future prospects. Technological Forecasting and Social Change, 194:122709. DOI doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122709.

Vernimmen, P., Quiry, P., Le Fur, Yann**;** Salvi, A. (2005) Corporate finance: theory and practice. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 1059p.

WRI/WBCSD. The Greenhouse Gas Protocol: Corporate Accounting and Reporting Standard. (2011) Revised Edition. DC: WRI and WBCSD. Disponível em: https://ghgprotocol.org/corporate-standard. Acesso em 6 de novembro de 2024.

Zappernick, N., Nedunuri, K. V., Islam, K. R., Khanal, S., Worley, T., Laki, S. L., Shah, A. (2022) Techno-economic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system. Journal of Cleaner Production, 365:132753. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132753.

CAPÍTULO III

AQUAPONIA E SUSTENTABILIDADE: AVANÇOS TECNOLÓGICOS, EFICIÊNCIA ECONÔMICA E DESAFIOS PARA A EXPANSÃO COMERCIAL

RESUMO

A aquaponia tem se consolidado como tecnologia estratégica para a transição a sistemas alimentares sustentáveis, ao integrar piscicultura em recirculação e hidroponia em um ciclo fechado de água e nutrientes. Este capítulo discute os fundamentos conceituais e tecnológicos da aquaponia, evidenciando sua capacidade de reduzir em até 90% o consumo hídrico e de converter a maior parte dos resíduos nitrogenados em biomassa vegetal, alinhando-se aos princípios da bioeconomia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. São apresentadas as principais configurações de sistemas (NFT, DWC e leitos de mídia), a importância de peixes como tilápias e de hortaliças de ciclo curto, além do papel dos microrganismos nitrificantes na manutenção do equilíbrio biogeoquímico. Avanços recentes em sensoriamento, Internet das Coisas, energias renováveis e automação apontam para uma “aquaponia 4.0”, com monitoramento em tempo real, otimização energética e uso de inteligência artificial para previsão de falhas e maximização da produtividade. Do ponto de vista econômico, o capítulo analisa a estrutura de custos fixos e variáveis, destaca a relevância de indicadores como VPL, TIR, B/C e payback e discute fatores de risco e incerteza que ainda limitam a escalabilidade comercial. Por fim, são examinados desafios regulatórios, gargalos de comercialização e a necessidade de políticas públicas específicas, financiamento verde e modelos de negócio padronizados que permitam comparar resultados entre regiões e consolidar a aquaponia como eixo da economia de baixo carbono.

Palavras-chave: aquaponia; bioeconomia circular; eficiência econômica; políticas públicas; sustentabilidade.

ABSTRACT

Aquaponics has consolidated itself as a strategic technology for the transition to sustainable food systems by integrating recirculating aquaculture and hydroponics in a closed cycle of water and nutrients. This chapter discusses the conceptual and technological foundations of aquaponics, highlighting its capacity to reduce water consumption by up to 90% and to convert most nitrogenous waste into plant biomass, thus aligning with the principles of circular bioeconomy and the Sustainable Development Goals. The main system configurations (NFT, DWC and media beds) are presented, as well as the importance of fish such as tilapia and short-cycle leafy vegetables, in addition to the role of nitrifying microorganisms in maintaining biogeochemical balance. Recent advances in sensing, Internet of Things, renewable energy and automation point to “Aquaponics 4.0”, with real-time monitoring, energy optimization and the use of artificial intelligence to predict failures and maximize productivity. From an economic perspective, the chapter analyzes the structure of fixed and variable costs, emphasizes the relevance of indicators such as NPV, IRR, B/C and payback, and discusses risk and uncertainty factors that still limit commercial scalability. Finally, regulatory challenges, commercialization bottlenecks and the need for specific public policies, green financing and standardized business models are examined, so that results can be compared across regions and aquaponics can be consolidated as a key axis of the low-carbon economy.

Keywords: aquaponics; circular bioeconomy; economic efficiency; public policies; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a aquaponia consolidou-se como um dos campos mais dinâmicos da grande área das Ciências Agrárias e Ambientais, ocupando posição estratégica na transição para modelos de produção de alimentos baseados na bioeconomia circular (FAO, 2024).

Ao integrar os princípios da ecologia de sistemas com as tecnologias de recirculação hídrica e recuperação de nutrientes, a aquaponia oferece respostas simultâneas a dois desafios estruturais da segurança alimentar global: o aumento da demanda por proteínas e vegetais frescos e a redução da disponibilidade de recursos naturais essenciais, como água doce e solos férteis (UN, 2021).

Conceitualmente, a aquaponia sintetiza a interdependência funcional entre três subsistemas bióticos, peixes, plantas e microrganismos, configurando um exemplo emblemático de simbiose tecnológica na agricultura moderna (Goddek et al., 2015; Stentiford et al., 2020). Suas origens remontam aos sistemas agrícolas integrados de civilizações pré-colombianas e asiáticas, onde peixes e plantas eram cultivados conjuntamente em arrozais inundados (Goddek et al., 2015).

Contudo, a transição desse conhecimento para a engenharia ecológica contemporânea foi impulsionada pelos trabalhos de Todd e Zweig (1978), que demonstraram a viabilidade de manejar processos ecológicos mediados por comunidades microbianas em mesocosmos artificiais, favorecendo a transformação biológica dos resíduos amoniacais em nitrito e nitrato, formas assimiláveis pelas plantas, promovendo a reciclagem de nutrientes, o tratamento biológico de efluentes e a modelagem de ecossistemas fechados.

O avanço tecnológico subsequente, especialmente com a introdução dos sistemas de recirculação aquícola (RAS) nas décadas de 1980 e 1990, permitiu a integração eficiente entre aquacultura e hidroponia em ambientes controlados (Somerville et al., 2014; Tyson et al., 2011).

Estudos recentes demonstram eficiências hídricas superiores a 90% em relação à agricultura convencional e forte adaptabilidade da aquaponia a ambientes urbanos, áridos ou de restrição hídrica (Baiyin et al., 2020; Ghamkhar et al., 2022). Essa expansão dialoga diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, sobretudo os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura

Sustentável), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Climática) (UN, 2021).

Do ponto de vista ecológico, a base operacional da aquaponia repousa em um equilíbrio biogeoquímico finamente calibrado. Os peixes geram resíduos nitrogenados (amônia) que são metabolizados por bactérias nitrificantes dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, convertendo-os em nitrito e nitrato, formas assimiláveis pelas plantas (Krastanova et al., 2022). Ao absorverem nitrato, as plantas depuram a água, completando um ciclo de purificação e recirculação (Amin et al., 2021). Esse processo reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e minimiza o consumo de água e energia, alcançando conversões de até 80% dos resíduos nitrogenados em biomassa vegetal (Wang et al., 2023; Yang e Kim, 2020; Yogev et al*.,* 2016).

Do ponto de vista tecnológico, o avanço recente de sensores e plataformas baseadas em Internet das Coisas (IoT) permitiu o monitoramento em tempo real de parâmetros críticos (pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, temperatura), reduzindo custos operacionais e perdas de produtividade (Agrawal et al*.*, 2023). Paralelamente, a integração entre energia fotovoltaica e sistemas recirculantes vem promovendo a emergência de modelos autossustentáveis com baixa emissão de carbono (Baiyin et al., 2020).

Apesar desses progressos, a literatura contemporânea identifica lacunas significativas na viabilidade econômica de sistemas aquapônicos, sobretudo em pequena escala comercial. Diversos estudos apontam para a falta de padronização de métricas de custo e retorno, inconsistências metodológicas e a ausência de séries históricas que permitam comparar modelos produtivos em diferentes contextos geográficos e socioeconômicos (Greenfeld et al., 2018; Horn et al., 2024). O futuro da aquaponia depende da integração entre eficiência ecológica e viabilidade econômica, articulando conhecimento técnico, inovação tecnológica e modelos de negócio inclusivos. Pesquisas orientadas à análise de custos reais, à otimização energética e à monetização dos serviços ecossistêmicos podem oferecer as bases necessárias para consolidar a aquaponia como eixo estratégico de uma agricultura resiliente às mudanças climáticas e socialmente sustentável. Nesse contexto, a geração de dados empíricos em sistemas comerciais operacionais, especialmente em regiões tropicais, constitui o passo decisivo para transformar o potencial científico da aquaponia em uma alternativa economicamente viável para o futuro da produção integrada de alimentos.

2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E TECNOLÓGICOS DA AQUAPONIA

A aquaponia é reconhecida como uma das tecnologias mais promissoras da agricultura sustentável contemporânea, integrando em um mesmo sistema a aquicultura de recirculação (RAS - *Recirculating Aquaculture System*) e a hidroponia (Krastanova et al., 2022).

Essa integração permite o aproveitamento sinérgico dos efluentes aquícolas, ricos em compostos nitrogenados excretados pelos peixes, convertendo-os em nutrientes assimiláveis pelas plantas. O resultado é um sistema fechado de produção que minimiza o desperdício de água, reduz o descarte de efluentes e maximiza o uso dos recursos biogênicos (Krastanova et al., 2022; Okomoda et al., 2023; Somerville et al., 2014).

Nas últimas duas décadas, a aquaponia tem ganhado relevância científica e tecnológica global ao responder simultaneamente a dois desafios estruturais da segurança alimentar mundial: o aumento da demanda por proteínas e vegetais frescos e o declínio da disponibilidade de recursos hídricos e solos férteis (FAO, 2024; UN, 2021). A técnica se insere como prática emblemática da bioeconomia circular, operando sob o princípio da interdependência entre subsistemas bióticos como peixe, planta e microrganismos, e representando uma alternativa ao modelo linear e intensivo de produção agroalimentar (Goddek et al., 2015; Stentiford et al., 2020).

O conceito de aquaponia tem raízes nos sistemas agrícolas integrados das civilizações pré-colombianas e asiáticas, onde peixes e plantas eram cultivados em conjunto em arrozais inundados (Goddek et al., 2015). Contudo, o desenvolvimento científico moderno da técnica remonta ao século XX, com as pesquisas pioneiras de Todd e Zweig (1978), que identificaram o papel ecológico dos microrganismos nitrificantes na transformação de resíduos amoniacais em íons nitrito e nitrato, essenciais à nutrição vegetal. Na década de 1990, o advento dos sistemas RAS impulsionou o avanço da aquaponia em centros de pesquisa norte-americanos e europeus (Somerville et al., 2014; Tyson et al., 2011).

Atualmente, o interesse global em aquaponia é respaldado por sua capacidade de maximizar a eficiência hídrica, com economias superiores a 90% em comparação à agricultura convencional, e sua aplicabilidade em áreas urbanas ou

regiões áridas (Baiyin et al., 2020; Ghamkhar et al., 2022). Tal expansão se vincula também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, especialmente os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) (UN, 2021).

A base operacional da aquaponia reside em um equilíbrio biogeoquímico entre os três principais componentes do sistema: peixes, plantas e microrganismos. Os peixes produzem resíduos nitrogenados (amônia, NH_3), provenientes da excreção e da decomposição de matéria orgânica. Esses rejeitos são metabolizados por colônias de bactérias nitrificantes, principalmente Nitrosomonas e Nitrobacter, que oxidam a amônia em nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-), composto assimilável pelas plantas (Krastanova et al., 2022). As raízes vegetais, ao absorverem o nitrato, purificam a água, permitindo seu recirculamento aos tanques de piscicultura (Amin et al., 2021; Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015;).

Esse mecanismo simbiótico não apenas reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos, mas também diminui a demanda de água e energia em comparação aos cultivos convencionais. Modelos de balanço ecológico demonstram que, quando devidamente calibrado, o sistema converte até 80% dos dejetos nitrogenados em biomassa vegetal útil (Endut et al., 2016; Hu et al., 2015; Yogev et al., 2016). A eficiência do sistema, entretanto, depende de fatores como densidade de estocagem de peixes, composição alimentar, temperatura da água, biomassa vegetal e manejo microbiano (Amin et al., 2021; Tokunaga et al., 2015).

Os sistemas aquapônicos podem ser classificados em três principais configurações tecnológicas (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação das principais configurações tecnológicas de sistemas aquapônicos.

Configuração Tecnológica	**Descrição**	**Referências**
NFT (*Nutrient Film Technique*)	Fluxos contínuos de fina lâmina d'água passam pelas raízes das plantas, sendo recomendados para espécies de ciclo curto, como *L. sativa*.	Somerville et al. (2014); Castilho-Barros et al. (2018)
DWC (*Deep Water Culture)*	Plantas flutuam em canais profundos, ideais para folhosas e hortaliças densas.	Ibrahim et al. (2023).
Media Bed Systems	Utiliza substratos inertes (brita, argila expandida) que exercem função de suporte radicular e biofiltração.	Maucieri et al. (2018)

Independente do modelo, a arquitetura do sistema é composta por tanques de cultivo de peixes, decantadores, filtros mecânicos e biológicos, leitos de plantas e bombas de recirculação. A eficiência da troca de nutrientes e o consumo energético são otimizados pelo equilíbrio entre o volume de água, taxa de alimentação e biomassa vegetal (Baiyin et al., 2020; Castilho-Barros et al., 2018).

No contexto global, tilápias (*Oreochromis niloticus*) destacam-se como a principal espécie aquícola empregada na aquaponia devido à sua rusticidade, rápida conversão alimentar e tolerância a variações físico-químicas da água (Okomoda et al., 2023). Entre as espécies vegetais, predominam folhosas de ciclo curto (alface, rúcula, espinafre), legumes (pepino, tomate) e ervas aromáticas de alto valor de mercado (Goddek et al., 2015). Pesquisas recentes expandem o uso do sistema para o cultivo de plantas ornamentais e fitoterápicas, ampliando o potencial comercial e industrial do setor (Nair et al., 2025; Stoyanova et al., 2024).

O recente avanço tecnológico vem potencializando a automação e digitalização da aquaponia. Sistemas de sensoriamento remoto e IoT permitem o monitoramento em tempo real de parâmetros essenciais como pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura, otimizando o controle de qualidade e o consumo energético (Agrawal et al., 2023). Além disso, pesquisas como de Baiyin et al. (2020) demonstram a viabilidade da integração entre energia fotovoltaica e aquaponia, resultando em sistemas autossustentáveis com baixos custos operacionais e emissões de carbono reduzidas.

Modelos híbridos, combinando sistemas recirculantes e fontes renováveis, despontam como eixo estratégico para a expansão da aquaponia em regiões de infraestrutura limitada, favorecendo tanto a agricultura familiar quanto empreendimentos de médio porte (Horn et al., 2024; Kodama et al., 2015).

Apesar das vantagens ecológicas e produtivas, o sistema apresenta complexidades técnicas e econômicas que dificultam sua adoção em larga escala. A necessidade de conhecimento multidisciplinar (engenharia hídrica, microbiologia, fisiologia vegetal e gestão zootécnica) aumenta os custos de implementação e o risco operacional (Greenfeld et al., 2018). Além disso, os custos fixos com infraestrutura de tanques, bombas, sistemas de filtração e controle automatizado, representam até 80% do investimento inicial (Castilho-Barros et al., 2018),

condicionando o retorno econômico à eficiência energética e à valorização comercial dos produtos.

O principal gargalo identificado pela literatura é a ausência de padronização de protocolos técnicos e econômicos, o que dificulta comparações entre estudos e impede a definição de parâmetros universais de rentabilidade (Aleksić e Šušteršič, 2020; Cammies et al., 2021; Greenfeld et al., 2018). Diversos projetos relatam inconsistências nos indicadores financeiros e na contabilização dos custos indiretos, como depreciação, manutenção e tempo de repovoamento (Horn et al., 2024; Kodama, 2015).

A tendência atual aponta para a consolidação de uma “aquaponia 4.0”, impulsionada por interfaces digitais, redes de dados integradas e manejo baseado em inteligência artificial (Agrawal et al., 2023; Karimanzira e Rauschenbach, 2021). Essa evolução permitirá prever flutuações de pH e nutrientes, automatizar correções e reduzir as despesas operacionais. Paralelamente, o alinhamento da aquaponia aos princípios da economia circular e da neutralidade climática deverá fortalecer seu papel como componente estratégico no combate à insegurança alimentar e na mitigação das mudanças climáticas (Maucieri et al., 2018; Nithya e Padma, 2023).

O desafio central, portanto, não reside apenas na otimização biotécnica do sistema, mas na transposição de modelos experimentais para estruturas comerciais economicamente sustentáveis. A estabilidade econômica do sistema depende de políticas de incentivo, ampliação da base de consumidores conscientes e sistematização técnica que permita reduzir custos sem comprometer a eficiência ecológica (Davis et al., 2025; Francisco et al., 2025).

A crescente demanda global por alimentos seguros e sustentáveis, impulsionada pelo aumento populacional baseado em projeções que apontam 9,7 bilhões de habitantes até 2050, o que tem exigido alternativas capazes de integrar produtividade agrícola, conservação de recursos naturais e redução dos impactos ambientais (Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015; Maucieri et al., 2018). Neste contexto, a aquaponia, que integra piscicultura e agricultura hidropônica em sistemas de recirculação e ciclagem de nutrientes, desponta como uma solução inovadora e promissora para a produção de proteínas e vegetais, com menor pegada ecológica e uso eficiente de água e nutrientes (Amin et al., 2021; Karimanzira e Rauschenbach, 2021; Oladimeji et al., 2020a).

Apesar desse potencial, a viabilidade econômica da aquaponia comercial ainda representa um desafio em diferentes escalas e contextos (Baiyin et al., 2020; Greenfeld et al., 2018). Questões como altos custos de implantação, dependência de energia e mão de obra qualificada, incertezas mercadológicas e barreiras de escalabilidade têm limitado a expansão e a replicação do modelo em diferentes realidades socioeconômicas (Castilho-Barros et al., 2018; Dos-Santos, 2019; Horn et al., 2024; Kodama, 2015). Pesquisas recentes apontam a escassez de dados sobre custos, receitas, *payback*, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e benefício-custo (BC) em módulos comerciais reais, com menções explícitas de que muitos resultados não são amplamente disponibilizados ao público científico, dificultando a consolidação de melhores práticas (Asciuto et al., 2019; Castilho-Barros et al., 2018; Kodama, 2015).

No plano teórico, a aquaponia envolve processos integrados de conversão biológica de resíduos nitrogenados dos peixes em nutrientes assimiláveis pelas plantas, favorecendo sistemas de produção em ciclo fechado mediados por comunidades bacterianas (Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015; Krastanova et al., 2022). Modelos contemporâneos enfatizam que a proporção ideal entre cultivo vegetal e animal impacta diretamente na rentabilidade do sistema, sendo observado um melhor desempenho econômico em projetos com maior participação das culturas vegetais (Babatunde et al., 2023; Love et al., 2015; Somerville et al., 2014; Tokunaga et al., 2015). Estudos internacionais e nacionais ressaltam variações regionais acentuadas e a importância da inovação tecnológica e da gestão integrada na sustentabilidade do sistema (Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015; Nithya e Padma, 2023; Oladimeji et al., 2020a).

3. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E EFICIÊNCIA DE RECURSOS

A aquaponia constitui um modelo produtivo inovador que opera em consonância com os princípios da sustentabilidade ambiental e da eficiência dos recursos naturais, especialmente água, energia e nutrientes. A gestão racional da água é um dos pilares da sustentabilidade aquapônica. Comparativamente à agricultura irrigada convencional, os sistemas de aquaponia podem economizar até 90% de água, graças à recirculação contínua e ao uso de biofiltros que purificam o efluente proveniente da piscicultura (Ibrahim et al., 2023; Lopchan Lama et al., 2025; Okomoda et al., 2023). Essa característica é especialmente relevante considerando que a agricultura é responsável por cerca de 72% da demanda global de água doce, sendo as perdas por evaporação e drenagem profundas as principais fontes de ineficiência (Okomoda et al., 2023; UN, 2021).

Um estudo brasileiro conduzido no Maranhão por Sousa Neto et al. (2025), validou empiricamente a eficiência hídrica de um módulo aquapônico experimental de 140 m², constatando redução de 85% no consumo de água em relação à irrigação convencional e manutenção estável do pH e condutividade elétrica. Os resultados confirmaram o potencial do sistema para múltiplos contextos climáticos, desde áreas rurais a ambientes urbanos, mediante ajustes em sombreamento e vazão hídrica (Sousa Neto et al., 2025; UN, 2021).

Além da eficiência hídrica, a aquaponia destaca-se pela otimização do uso de energia e pela mitigação de emissões. Estudos recentes analisam a integração de sistemas aquapônicos com tecnologias de energia renovável, como painéis solares fotovoltaicos, biogás e bombas de calor, cuja adoção tem reduzido significativamente os custos operacionais (Amin et al., 2021; Baiyin et al., 2020). Segundo estudos de Channa et al. (2025), foi possível reduzir em até 26,9% o consumo de energia no sistema de aquaponia através de um método inovador que utiliza a própria água para armazenar calor e utilizá-lo quando necessário. Esses resultados demonstram que a água do sistema pode ser utilizada para reduzir a pegada energética em relação aos sistemas convencionais.

O conceito de “aquaponia de baixo carbono” fundamenta-se na substituição parcial da matriz elétrica por fontes sustentáveis, contribuindo para a neutralidade climática e para o cumprimento de metas do Acordo de Paris. Em uma simulação

energética realizada por Baiyin et al. (2020), verificou-se que a incorporação de painéis fotovoltaicos em sistemas de aquaponia no clima semiárido apresentou economia de 60% no custo energético anual e ampliou a autonomia operacional, com balanço energético líquido positivo após o segundo ano de operação. Além disso, os sistemas híbridos de aquaponia integrada reduzem a emissão de CO_2 em até 45% em relação a sistemas convencionais de cultivo isolado (Estim et al., 2022; Nair et al., 2025; Ravani et al., 2024).

Por outro lado, a literatura aponta que os custos energéticos iniciais e o consumo elétrico contínuo de bombas de recirculação, oxigenação e climatização ainda representam desafios significativos para a consolidação econômica da aquaponia em larga escala (Castilho-Barros et al., 2018; Kodama, 2015). Assim, a pesquisa de soluções que conciliem eficiência energética e viabilidade financeira permanece como um dos principais focos de inovação do setor.

A integração entre aquicultura e hidroponia caracteriza a aquaponia como modelo funcional de economia circular, uma vez que transforma resíduos orgânicos e metabólitos nitrogenados em insumos produtivos. Diferentemente da hidroponia tradicional, onde os nutrientes são fornecidos por sais minerais de alto custo, a aquaponia baseia-se na reciclagem contínua de nutrientes biogênicos gerados pelos peixes (Amin et al., 2021; Maucieri et al., 2018).

Goddek et al. (2019) enfatizam que essa recirculação cria uma “cascata ecológica de valor”, em que o insumo residual de uma subcadeia torna-se recurso energético e nutricional de outra. Tal sinergia reduz perdas, aumenta a produtividade global e gera resíduos mínimos. Em modelos computacionais simulados, até 90% do nitrogênio e 70% do fósforo presentes nos efluentes aquícolas são assimilados pelas plantas (Yogev et al., 2016).

Um exemplo ilustrativo desse conceito é o estudo de Tokunaga et al. (2015), realizado no Havaí, que revelou que sistemas com relação de 70% de biomassa vegetal e 30% de peixes apresentaram maior eficiência econômica e menor perda nutricional no ciclo produtivo. Essa proporção confirma a importância da vegetação na sustentabilidade do balanço biogeoquímico, consolidando a aquaponia como técnica de compensação natural de nutrientes.

A bioeconomia circular aplicada à aquaponia abrange ainda a revalorização de subprodutos, como sedimentos de biofiltros, para produção de compostos orgânicos e biofertilizantes agrícolas. Essa reciclagem adicional amplia o valor

agregado da cadeia e reduz a dependência de insumos externos (Ghamkhar et al., 2022; Oladimeji et al., 2020b).

Além das dimensões técnicas e ambientais, a aquaponia possui impactos sociais relevantes. Por operar em espaços reduzidos e com baixo impacto ambiental, o sistema oferece oportunidades de geração de renda e autonomia alimentar em áreas urbanas e comunidades rurais de baixa renda (Abusin e Mandikiana, 2020; Dos-Santos, 2019). Iniciativas educativas e cooperativas de base agroecológica têm utilizado a aquaponia como ferramenta para ensino de sustentabilidade e inclusão produtiva, associando sua adoção a políticas públicas emergentes de segurança alimentar (Dos-Santos, 2019; Sousa Neto et al., 2025).

A sua capacidade de combinar produtividade, sustentabilidade e multifuncionalidade confere à aquaponia um papel estratégico na implementação dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente os ODS 2, 6 e 12, relacionados à erradicação da fome, ao uso sustentável da água e à produção responsável (FAO, 2024; UN, 2021).

A literatura converge em apontar a aquaponia como um sistema de produção multifuncional, cuja relevância ultrapassa resultados ecológicos pontuais. Ao alinhar os componentes técnicos de recirculação hídrica, reuso de nutrientes e eficiência energética, a aquaponia demonstra capacidade de regeneração ambiental, atuando simultaneamente na mitigação de efluentes, na conservação hídrica e na redução das emissões de carbono (Maucieri et al., 2018; Stentiford et al., 2020). Entretanto, a sustentabilidade plena desses sistemas depende da adoção de indicadores econômicos e operacionais transparentes, que garantam equilíbrio entre viabilidade financeira e benefícios ambientais, um ponto central da lacuna identificada nesta pesquisa.

O aprofundamento de investigações quantitativas que mensurem simultaneamente impactos ecológicos e retornos econômicos constitui, portanto, uma agenda prioritária para a consolidação da aquaponia como modelo tecnicamente eficiente e ambientalmente sustentável em escala comercial.

4. MODELOS DE INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO EM SISTEMAS AQUAPÔNICOS

O avanço tecnológico tem promovido uma reconfiguração dos sistemas aquapônicos, impulsionando a adoção de ferramentas digitais, energias renováveis e automação inteligente voltadas à otimização de processos produtivos. Essas inovações inserem a aquaponia no escopo da Indústria 4.0, caracterizada pela integração entre sensores, redes de dados e controle automatizado através da Internet das Coisas (IoT) e de sistemas ciberfísicos (Agrawal et al., 2023). O resultado é a consolidação de um novo paradigma de produção agroalimentar, com maior precisão no manejo, redução de desperdícios e aumento da eficiência energética.

A digitalização representa um dos eixos centrais da inovação tecnológica no setor. Por meio de sensores conectados a plataformas de monitoramento remoto, os sistemas automatizados permitem o controle contínuo de variáveis críticas, como pH, temperatura da água, condutividade elétrica, concentração de oxigênio dissolvido e nível de amônia (Amin et al., 2021; Baiyin et al., 2020). A Internet das Coisas (IoT) estabelece uma rede integrada de dispositivos que processam e transmitem dados em tempo real, oferecendo subsídios para decisões rápidas e eficientes no manejo (Agrawal et al., 2023; Karimanzira e Rauschenbach, 2021).

No contexto da aquaponia comercial, essas tecnologias têm ampliado a previsibilidade dos processos biológicos e a estabilidade operacional, permitindo a compatibilidade entre distintos subsistemas, aquicultura, biofiltragem e cultivo vegetal. Projetos-piloto relatados por Abusin e Mandikiana (2020) demonstram que sistemas equipados com sensores automatizados reduziram em 25% o consumo energético e aumentaram em 18% o crescimento vegetal, pela manutenção estável dos nutrientes e do oxigênio dissolvido.

A automação dos sistemas aquapônicos visa reduzir a intervenção manual e otimizar o equilíbrio dinâmico entre as variáveis físico-químicas e biológicas (Okomoda et al., 2023; Somerville et al., 2014). O controle automatizado, baseado em sensores de IoT, permite que atuadores e válvulas sejam acionados por algoritmos que ajustam o fornecimento de água, nutrientes e oxigenação sem interferência humana.

Recentemente, novas abordagens têm incorporado inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (*Machine Learning*) na previsão de padrões de crescimento e detecção precoce de anomalias. Segundo Horn et al. (2024), modelos preditivos podem antecipar flutuações metabólicas nos peixes ou deficiências nutricionais nas plantas com até 85% de precisão, possibilitando ajustes automáticos em tempo real. Além disso, a IA permite desenvolver algoritmos de otimização para determinar o ponto de máxima eficiência energética e de biomassa simultaneamente, reduzindo custos e desperdícios (Agrawal et al*.,* 2023).

O uso da automação também se estende à gestão energética, com integração de controladores fotovoltaicos e sistemas híbridos de energia. Baiyin et al. (2020) mostraram que a combinação de módulos solares com sistemas de recirculação automatizados reduziu a variabilidade térmica da água em até 35%, ampliando a produtividade dos peixes e diminuindo as perdas vegetais.

A integração da aquaponia às fontes renováveis de energia, como solar e eólica, representa uma das vertentes mais inovadoras e sustentáveis do setor. Esses sistemas híbridos respondem simultaneamente a duas demandas: redução dos custos elétricos e mitigação das emissões de carbono (Alam et al., 2022; Lubis et al., 2024; Zhao et al*.,* 2024).

Estudos em regiões semiáridas do Brasil e do Oriente Médio (Baiyin et al*.,* 2020; Ghamkhar et al*.,* 2022) demonstram que a introdução de painéis fotovoltaicos autônomos em módulos comerciais de aquaponia possibilita um retorno energético de até 120% ao longo de cinco anos, além de assegurar autossuficiência nas horas de pico de insolação. O uso de sistemas de *backup* híbridos integrando energia solar, biogás e micro-hidrogênio tem emergido como alternativa em regiões com instabilidade elétrica. Essas inovações favorecem a expansão da aquaponia em áreas rurais isoladas, reduzindo a dependência de redes elétricas centralizadas (Nithya e Padma, 2023).

Paralelamente, há tendência de acoplamento da aquaponia às infraestruturas urbanas inteligentes, como edifícios verdes e centros de agricultura vertical. Esses modelos integram painéis solares, reuso de águas cinzas e sistemas de controle climático automatizado, inserindo a produção de alimentos sustentáveis no contexto urbano (Dos-Santos, 2019).

A modularização tecnológica apresenta-se como estratégia para aumentar a escalabilidade e reduzir riscos financeiros nos sistemas aquapônicos. Protótipos

modulares permitem replicar unidades menores, interligadas em rede, formando estruturas de produção distribuída, facilmente adaptáveis às necessidades do mercado e à disponibilidade de espaço urbano (Lobillo-Eguíbar et al., 2020; Simeonidou et al., 2012).

De acordo com estudos descritos por Maucieri et al. (2018) e Oladimeji et al. (2020a), essa abordagem viabiliza uma economia de escala gradual, evitando altos investimentos únicos e oferecendo flexibilidade para manutenção e substituição de componentes. Sistemas modulares equipados com sensores integrados em rede (*wireless sensor networks*) comunicam-se por protocolos como LoRaWAN e MQTT, permitindo monitoramento remoto via aplicativos móveis (Agrawal et al., 2023).

Esses avanços tecnológicos também promovem transparência de dados e rastreabilidade produtiva, atributos cada vez mais valorizados pelos consumidores e pelo mercado internacional de alimentos sustentáveis, reforçando a certificação ambiental e a competitividade comercial (Cammies et al., 2021; Karimanzira et al., 2021).

Embora os benefícios da integração tecnológica sejam evidentes, os desafios de sua implementação ainda limitam a adoção em larga escala. Barreiras como alto custo inicial de sensores e automação, ausência de padronização de protocolos de comunicação, restrições de conectividade e carência de capacitação técnica persistem, principalmente, em países em desenvolvimento (Debroy et al., 2025; Kodama, 2015).

Além disso, a literatura aponta a necessidade de compatibilizar a automação com contextos de baixa infraestrutura, adotando tecnologias acessíveis, como microcontroladores de baixo custo (ARDUINO UNO, ESP8266 e RASPBERRY PI) e sistemas abertos (Baiyin et al., 2020). Pesquisas recentes (Agrawal et al., 2023; Karimanzira e Rauschenbach, 2021) destacam a importância de plataformas colaborativas e bancos de dados públicos para compartilhamento de parâmetros técnicos e econômicos.

As perspectivas futuras indicam a consolidação da chamada *Aquaponia Digital 4.0*, orientada pela integração de Big Data, aprendizado de máquina e automação sustentável. Além de aprimorar a eficiência ecológica e produtiva, essa transformação tecnológica visa reduzir a incerteza econômica nos módulos comerciais, preenchendo a lacuna científica aqui identificada: a ausência de dados sistematizados sobre desempenho financeiro e operacional sob variáveis

controladas (Debroy et al., 2025; Yanes et al., 2020).

5. ESTRUTURAS DE CUSTO E INDICADORES ECONÔMICOS EM SISTEMAS AQUAPÔNICOS

A avaliação econômica de sistemas aquapônicos é um dos campos mais sensíveis e determinantes para sua consolidação como alternativa sustentável de produção de alimentos. Diferentemente da literatura consolidada sobre os aspectos técnicos e ambientais, os estudos voltados à análise de custos, receitas e indicadores financeiros ainda apresentam grande heterogeneidade metodológica, dificultando a definição de parâmetros universais de viabilidade (Castilho-Barros et al., 2018; Greenfeld et al., 2018; Kodama, 2015). A compreensão dessa estrutura de custos é essencial não apenas para o planejamento empresarial, mas para o desenvolvimento de políticas públicas de incentivo e modelos escaláveis de produção sustentável.

5.1 Estrutura de custos fixos e variáveis

Em termos gerais, a estrutura econômica da aquaponia envolve custos fixos de infraestrutura e equipamentos e custos variáveis de operação. Os custos fixos compreendem construção de tanques, aquisição de sistemas hidráulicos, bombas, filtros e unidades de controle automático (Castilho-Barros et al., 2018). Estimativas globais sugerem que entre 75% e 85% do investimento inicial concentram-se em infraestrutura, sendo as bombas e sistemas de filtração os itens mais onerosos (Amin et al., 2021; Maucieri et al., 2018). Esses custos podem ser reduzidos com o uso de materiais recicláveis e soluções de baixo custo, conforme demonstrado por Carvalho et al., (2024), que relataram economia de até 40% com a utilização de bombonas plásticas e bambu em sistemas familiares.

Já os custos variáveis estão associados à aquisição de alevinos, ração, energia elétrica e mão de obra. Estudos realizados por Dalazen et al. (2020) e Ghamkhar et al. (2022) identificaram que a energia elétrica representa entre 25% e 30% dos custos operacionais anuais, seguida pela mão de obra (30% a 35%). A adoção de painéis fotovoltaicos integrados pode reduzir significativamente esse impacto, conforme apresentado por Baiyin et al. (2020), que registraram economia energética de 60% em módulos híbridos de aquaponia solar.

5.2 Custos indiretos, depreciação e indicadores financeiros clássicos

A literatura aponta ainda a necessidade de considerar custos indiretos, como licenciamento ambiental, manutenção periódica, reposição de equipamentos e depreciação, frequentemente negligenciados nas análises econômicas (Castilho-Barros et al., 2018; Kodama, 2015). Tais fatores influenciam diretamente a taxa de retorno e o fluxo de caixa do investimento, especialmente em sistemas comerciais de médio e longo prazo. A depreciação, quando corretamente projetada, contribui para formar um indicador mais realista de lucratividade líquida e sustentabilidade econômica (Vernimmen et al., 2005).

Os principais indicadores financeiros aplicados à avaliação da aquaponia incluem o VPL, a TIR, o B/C e o PEP (Andrade et al., 2018; Chen, 1998):

1) VPL: determina a lucratividade do projeto ao descontar os fluxos de caixa futuros a uma taxa de atratividade. Estudos de Castilho-Barros et al. (2018) e Dalazen et al. (2020) reportaram VPL positivo entre R$ 2.400 e R$ 16.700 para módulos comerciais de pequeno porte, considerando diferentes cenários de preço de mercado e taxas de juros de 8%.
2) TIR: expressa a rentabilidade percentual do investimento. No estudo de Ghamkhar et al. (2022), a TIR variou entre 14,6% e 48,7% conforme o valor de comercialização das hortaliças. Esses resultados confirmam a viabilidade sob determinadas condições de comercialização, embora o risco financeiro aumente em mercados com menor valorização de produtos sustentáveis.
3) B/C: mensura o retorno monetário por unidade de investimento. Em sistemas analisados por Syliver et al. (2025) e Estrada-Pérez et al. (2025) foram encontrados uma alta variabilidade nos resultados, com o índice B/C entre 0,66 (inviável) e 1,5 (viável), respectivamente. Essas variações são devido à proporção de peixe/planta no sistema, bem como o percentual de receita obtida com a espécie de peixe inserida no sistema.
4) PEP: estima o tempo necessário para recuperação do capital investido. Estudos divergem sobre o prazo médio: Dalazen et al. (2020) estimaram entre 2 e 8 anos, enquanto sistemas demonstrativos alcançaram resultados entre 1,8 e 3,5 anos, variando conforme o preço das hortaliças e o custo energético (Castilho-Barros et al., 2018).

A combinação desses indicadores fornece um perfil financeiro abrangente, mas a ausência de padronização metodológica dificulta comparações entre estudos,

representando uma das lacunas mais críticas da literatura contemporânea (Asciuto et al., 2019; Bosma et al., 2017; Greenfeld et al., 2018).

5.3 Fatores que influenciam a rentabilidade, análises de risco, sensibilidade e incerteza

A rentabilidade da aquaponia é fortemente condicionada por fatores externos e internos. Entre os internos, o dimensionamento técnico do sistema, a relação entre biomassa de peixes e área cultivada e a eficiência dos filtros biológicos são determinantes para o balanço econômico (Amin et al., 2021; Tokunaga et al., 2015). Em contrapartida, fatores externos como flutuações no preço da energia elétrica, custo da ração e volatilidade do mercado de hortaliças exercem influência direta sobre a receita líquida (Abusin e Mandikiana, 2020; Greenfeld et al., 2018).

Outra variável importante é o tipo de operação. Ghamkhar et al. (2022) destacam que sistemas voltados predominantemente para o cultivo vegetal possuem melhor custo-benefício do que os centrados na piscicultura. A proporção ideal estimada é de 70% de rendimento vegetal e 30% de rendimento aquícola, confirmando que as plantas são os principais geradores de receita nos sistemas híbridos (Lobillo-Eguíbar et al., 2020; Tokunaga et al., 2015).

Instrumentos quantitativos como a simulação de Monte Carlo vêm sendo aplicados para mensurar a incerteza associada aos retornos econômicos da aquaponia (Kodama, 2015). Esse método permite a criação de cenários probabilísticos, variando parâmetros como preço de insumo, produtividade e taxa de juros, fornecendo uma estimativa mais realista dos intervalos de viabilidade. Os resultados dessas simulações demonstram que a aquaponia se mantém economicamente viável em contextos de variação moderada de preços e custos operacionais, desde que a eficiência produtiva se mantenha acima de 80% (Kodama, 2015).

A literatura internacional destaca a falta de dados públicos e reprodutíveis sobre custos e resultados econômicos de sistemas comerciais de aquaponia, o que dificulta o avanço do campo e o desenvolvimento de modelos preditivos confiáveis (Aleksić e Šušteršič, 2020; Greenfeld et al., 2018). Muitos projetos permanecem restritos a relatórios institucionais ou estudos não indexados, inviabilizando comparações entre diferentes localidades e escalas de produção (Horn et al., 2024).

Essa limitação reforça a necessidade de criação de protocolos de avaliação econômica integrados, que considerem variáveis contextuais climáticas, socioeconômicas e tecnológicas, e permitam comparabilidade científica. Além disso, práticas de gestão com registros financeiros padronizados (custos unitários, consumo energético, rentabilidade líquida e amortização) seriam fundamentais para permitir análises inter-regionais e fomentar a transparência do setor (Dos-Santos, 2019).

As estruturas de custo e os indicadores financeiros da aquaponia revelam potencial promissor, porém, fortemente dependente de variáveis técnicas, energéticas e mercadológicas.

Embora resultados positivos tenham sido documentados em múltiplos estudos, a ausência de metodologias uniformes e bases comparativas limita a consolidação do conhecimento econômico do setor. Assim, a análise de custos e rentabilidade deve ser vista não apenas como ferramenta contábil, mas como parte de um sistema estratégico de sustentabilidade financeira e ambiental.

O desenvolvimento de modelos econômicos padronizados, contextualizados e abertos é essencial para reduzir a lacuna científica identificada, permitindo que a aquaponia avance de uma tecnologia experimental para um modelo comercial consolidado de produção sustentável.

6. DESAFIOS DE ESCALABILIDADE E COMERCIALIZAÇÃO NA AQUAPONIA

A expansão da aquaponia em escala comercial depende da superação de barreiras econômicas, tecnológicas e logísticas que ainda restringem a transição desse modelo do ambiente experimental para cadeias produtivas consolidadas. Embora reconhecida como tecnologia ecologicamente eficiente, a aquaponia enfrenta entraves em sua disseminação comercial, tanto em países desenvolvidos quanto em contextos tropicais emergentes (Cammies et al., 2021; Greenfeld et al., 2018; Horn et al., 2024). Esses desafios envolvem, simultaneamente, questões ligadas à estrutura de custos, complexidade técnica do manejo, falta de padronização regulatória e limitações de mercado para produtos sustentáveis.

Em sistemas comerciais de larga escala, essas exigências aumentam os custos de capacitação e dificultam a adoção por produtores independentes (Okomoda et al., 2023). Adicionalmente, a proporção entre as unidades de produção de peixes e plantas deve ser continuamente ajustada para manter o equilíbrio ecológico, o que amplia a necessidade de instrumentos automatizados e monitoramento digital (Karimanzira e Rauschenbach, 2021; Maucieri et al., 2018). A ausência de protocolos técnicos padronizados resulta em grande variabilidade nos rendimentos econômicos e ambientais, impedindo comparações diretas e comprometendo a segurança do investimento (Aleksić e Šušteršič, 2020).

Os altos custos iniciais de instalação e manutenção configuram uma das maiores barreiras para a ampliação da aquaponia comercial em países em desenvolvimento (Castilho-Barros et al., 2018; Dos-Santos, 2019). Sem linhas de crédito específicas e subsídios energéticos, a rentabilidade torna-se vulnerável às oscilações de preços de insumos e energia elétrica. Cammies et al. (2021) observaram que a falta de investimentos públicos e privados retardou a consolidação do setor em várias regiões da União Europeia, contexto que se repete no Brasil e na América Latina.

Ghamkhar et al. (2022) relataram que, embora a aquaponia apresente alta eficiência energética e hídrica, os retornos financeiros dependem de acesso a mercados estáveis e preços diferenciados para produtos sustentáveis. A carência de

incentivos fiscais e de políticas de fomento específicas inibe o investimento de empreendedores rurais e urbanos, limitando a diversificação de modelos produtivos.

Outro ponto crítico é a comercialização e distribuição dos produtos aquapônicos. A perecibilidade das hortaliças, associada à ausência de cadeias logísticas adaptadas e certificações específicas de origem sustentável, limita a expansão do setor (Abusin e Mandikiana, 2020; Dos-Santos, 2019). Mercados consumidores ainda carecem de informação sobre o diferencial dos produtos oriundos desse sistema, o que restringe o potencial de formação de nichos de consumo conscientes (Greenfeld et al., 2018; Dos-Santos, 2019).

A competitividade da aquaponia depende também da inclusão em programas institucionais de alimentação, como compras públicas e feiras agroecológicas, que podem aumentar a demanda e reduzir custos de intermediação. Experiências em economias em desenvolvimento indicam que a venda direta e o marketing ambiental podem fortalecer a rentabilidade dos pequenos produtores ao aproximar o consumidor do valor ecológico da produção (David et al., 2022; Ibrahim et al., 2023).

Um obstáculo adicional está na ausência de certificações regulatórias específicas, uma vez que o sistema não se enquadra integralmente nas normas de agricultura orgânica nem nas legislações de piscicultura convencional. Essa lacuna regulatória reduz a credibilidade mercadológica dos produtos e torna o processo de registro sanitário mais burocrático e oneroso (Dos-Santos, 2019).

A replicação de módulos comerciais bem-sucedidos enfrenta restrições decorrentes das condições climáticas regionais, infraestrutura elétrica e disponibilidade hídrica. Estudos conduzidos por Tokunaga et al. (2015) e Castilho-Barros et al. (2018) apontam que variações locais de temperatura e luminosidade afetam diretamente a produtividade, exigindo adaptações estruturais. Sistemas abertos e modulares têm se mostrado soluções promissoras para reduzir custos e simplificar a expansão progressiva, permitindo a agregação de unidades menores em redes cooperativas (Maucieri et al., 2018; Oladimeji et al., 2020a).

Além disso, a ausência de modelos de negócio escaláveis é um entrave recorrente. Muitas iniciativas permanecem atreladas a projetos de pesquisa ou demonstração, sem continuidade comercial. Horn et al. (2024) ressaltam que a falta de estratégia empresarial impede a integração do setor aquapônico às cadeias de valor agroindustriais, ampliando sua vulnerabilidade econômica.

Apesar dos desafios atuais, o mercado global de aquaponia apresenta tendência de crescimento anual superior a 13%, impulsionada pela demanda por alimentos de origem sustentável e pelo aumento do consumo urbano de produtos frescos (Aquaponics Market Size And Trends, 2024). Estima-se que o setor ultrapasse US$ 2,3 bilhões até 2030, com destaque para Ásia e América do Norte (FAO, 2024). No Brasil, o crescimento ainda incipiente da aquaponia comercial indica potencial de expansão mediante integração de políticas de fomento, capacitação técnica e difusão tecnológica (Castilho-Barros et al., 2018).

O fortalecimento de cadeias curtas de comercialização, a criação de selos de “produção regenerativa” e o desenvolvimento de modelos cooperativos regionais emergem como instrumentos promissores para viabilizar a aquaponia em escala comercial. Tais medidas, associadas à padronização técnica e à inovação logística, podem consolidar o setor como vetor estratégico na construção de sistemas alimentares resilientes e de baixo carbono (Horn et al., 2024).

7. POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS À ECONOMIA VERDE NA AQUAPONIA

A consolidação da aquaponia como setor produtivo viável e sustentável depende de um arcabouço de políticas públicas integradas e instrumentos regulatórios específicos que promovam a inovação tecnológica, reduzam barreiras de investimento e estimulem práticas de gestão ambiental. A adoção de marcos de incentivo à bioeconomia e à agricultura de baixo carbono (ABC+) é fundamental para alinhar a produção aquapônica às metas de desenvolvimento sustentável, segurança alimentar e mitigação de emissões (FAO, 2024; UN, 2021).

No Brasil, a aquaponia ainda não possui legislação própria que normatize sua operação no âmbito agropecuário, ambiental e sanitário. A atividade é atualmente classificada em uma zona híbrida entre setores regulados como aquicultura e hidroponia, o que gera insegurança jurídica e entraves para o licenciamento ambiental (Dos-Santos, 2019). O marco legal da Política Nacional de Aquicultura e Pesca (Lei nº 11.959/2009) e a Lei de Produção Orgânica (Lei nº 10.831/2003) não reconhecem explicitamente a prática integrada da aquaponia, o que inviabiliza certificações específicas ou rotulagem diferenciada de seus produtos.

Nos países da União Europeia, modelos regulatórios mais avançados têm buscado integrar a aquaponia ao conjunto de práticas reconhecidas da “produção integrada e sustentável de alimentos”, inserindo-a em políticas agrícolas verdes e ações climáticas (Cammies et al., 2021). Experiências em países como Alemanha, Holanda e Finlândia preveem incentivos fiscais e créditos de carbono para empreendimentos de recirculação hídrica e eficiência energética, constituindo paradigmas de políticas públicas que podem inspirar o contexto brasileiro (Horn et al., 2024).

O financiamento de tecnologias verdes e sustentáveis é um dos pilares da expansão da aquaponia comercial. Programas como o Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) promovido pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) oferecem linhas de crédito para práticas de economia circular, sistemas integrados e inovação ambiental, ainda que sem incluir explicitamente a aquaponia entre as modalidades elegíveis (Maucieri et al., 2018).

Nesse sentido, a criação de instrumentos financeiros específicos, como fundos verdes, linhas de microcrédito e incentivos tributários para tecnologias limpas, poderia viabilizar a implementação de módulos comerciais sustentáveis. Baiyin et al. (2020) destacam que o retorno econômico da integração entre energia renovável e aquaponia é potencializado quando há apoio institucional, como subsídios para painéis solares e programas de geração distribuída. Evidências internacionais sugerem que sistemas financiados por políticas de incentivo energético têm amortização entre três e cinco anos, o que torna o investimento atrativo mesmo em cenários de flutuação de custos (Ghamkhar et al., 2022).

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e instituições estaduais de fomento podem desempenhar papel crucial na mitigação de riscos de investimento por meio de garantias de crédito e incentivos à inovação tecnológica. Tais medidas podem alinhar a aquaponia à transição energética e climática em curso, fortalecendo o posicionamento do Brasil nas cadeias globais de bioeconomia regenerativa (Danner et al., 2019; Goddek e Keesman, 2020).

A aquaponia se insere diretamente nas estratégias de economia circular, contribuindo para o reuso de água, a reciclagem de nutrientes e a produção de alimentos com menores emissões e passivos ambientais (Lobillo-Eguíbar et al., 2020; Stentiford et al., 2020). No Brasil, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) e a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) oferecem bases legais que, embora gerais, podem sustentar políticas setoriais de apoio à produção integrada e ao manejo eficiente dos recursos naturais.

O fomento à economia circular dentro da aquaponia demanda mecanismos de valoração de externalidades positivas, como créditos de biodiversidade e PSA (Pagamentos por Serviços Ambientais), que recompensem produtores por práticas de reuso hídrico e substituição de fertilizantes minerais. Dos-Santos (2019) destaca que sistemas aquapônicos reduzem em até 80% o consumo de fertilizantes e eliminam descargas de efluentes, gerando benefícios ambientais ainda não internalizados nas políticas de incentivo.

A expansão da aquaponia também requer planejamento territorial e institucionalização de arranjos produtivos locais (APLs), capazes de integrar pesquisa, extensão e comercialização. A criação de redes cooperativas pode permitir que pequenos e médios produtores compartilhem infraestrutura e insumos,

reduzindo custos e aumentando a escala de produção (Castilho-Barros et al., 2018; Oladimeji et al., 2020a).

Modelos de governança multissetorial, como os implementados em programas de agroecologia (EMATER, 2023), demonstram que a articulação entre universidades, cooperativas e órgãos de fomento regional é decisiva para transferir tecnologias e promover capacitação técnica. No âmbito urbano, políticas de incentivo à agricultura circular e vertical podem integrar a aquaponia às estratégias municipais de segurança alimentar e revitalização de áreas degradadas (Abusin e Mandikiana, 2020; Dos-Santos, 2019).

Um dos principais gargalos para a consolidação da aquaponia como economia verde é o déficit de formação técnica e difusão tecnológica. Além disso, é essencial ampliar o investimento em pesquisa científica aplicada, por meio de editais, que estimulem a criação de modelos preditivos e de bancos de dados públicos sobre parâmetros econômicos, ambientais e tecnológicos. A ausência de dados sistematizados é mencionada por Greenfeld et al. (2018) e Aleksić e Šušteršič (2020) como a principal lacuna do campo, comprometendo o avanço de políticas baseadas em evidências.

No cenário global, a aquaponia integra-se a marcos internacionais, como o Acordo de Paris (2016), o Pacto Verde Europeu (European Green Deal, 2020) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O Brasil, ao alinhar sua política de agricultura regenerativa à transição verde global, pode beneficiar-se de cooperação técnica e financiamento climático internacional (Finizola e Silva e Van Passel, 2020; Horn et al., 2024).

Incentivos às cadeias produtivas sustentáveis voltadas à exportação, a exemplo dos mercados de hortaliças e peixes orgânicos certificados, representam oportunidade para inserir a aquaponia na diplomacia ambiental e na bioeconomia internacional. Nesse contexto, políticas públicas que articulem inovação, inclusão produtiva e segurança alimentar são fundamentais para sedimentar a aquaponia como componente estratégico da economia verde brasileira.

8. ANÁLISES COMPARATIVAS: AQUAPONIA *VERSUS* SISTEMAS CONVENCIONAIS

Uma análise comparativa entre sistemas aquapônicos e formas tradicionais de produção agrícola e aquícola nos permite avaliar, com base em evidências empíricas, o verdadeiro potencial da aquaponia como uma tecnologia de transição que pode contribuir para a sustentabilidade. Comparações ambientais, econômicas e produtivas dessas medidas incluem ganhos de eficiência e limitações operacionais em comparação com o cultivo convencional no solo e modelos de piscicultura intensiva (Amin et al., 2021; Goddek et al., 2015; Kloas et al., 2015; Lobillo-Eguíbar et al., 2020;).

Em termos de desempenho ambiental, a aquaponia se sobressai como um modelo de produção de ciclo fechado, com recirculação de água e reutilização de nutrientes, contrastando com o padrão linear dos sistemas convencionais, nos quais o rejeito líquido é descartado no meio ambiente. Estudos de Somerville et al. (2014) e Baiyin et al. (2020) demonstram que os módulos de aquaponia utilizam até 90% menos água do que as culturas hidropônicas ou agrícolas tradicionais, além de eliminar pesticidas e fertilizantes sintéticos. Outro benefício ambiental relacionado é a quase eliminação das descargas de efluentes de nitrogênio e fosfato, prevalentes na aquicultura convencional.

Em pesquisa conduzida por Ghamkhar et al. (2022), verificou-se que os efluentes de uma unidade de aquaponia apresentaram 94% de redução de nitrogênio total e 86% de fósforo em comparação com tanques de piscicultura convencional sem recirculação. Esse desempenho reforça o papel da aquaponia na mitigação da eutrofização, um dos principais problemas dos ecossistemas aquáticos ligados à piscicultura (Abusin e Mandikiana, 2020; Krastanova et al., 2022).

Além do uso eficiente da água e nutrientes, a integração com energias renováveis, como sistemas solares fotovoltaicos e bombas de baixo consumo, amplia a sustentabilidade do modelo. Baiyin et al. (2020) destacaram que a combinação entre geração solar e produção integrada pode reduzir a pegada de carbono em mais de 60% em comparação à aquicultura e hidroponia manejadas isoladamente.

Do ponto de vista produtivo, os sistemas aquapônicos exibem eficiências múltiplas: permitem colheita simultânea de vegetais e peixes, aproveitando integralmente o espaço e os recursos. Amin et al. (2021) observaram rendimentos equivalentes ou superiores aos da hidroponia para hortaliças folhosas, como *L. sativa* e *Spinacia oleracea*, enquanto Tokunaga et al. (2015) calcularam ganhos médios de 20% na biomassa total produzida em comparação com cultivos separados.

Entretanto, há limitações intrínsecas à composição ecológica da aquaponia. O equilíbrio do sistema depende da proporção entre a biomassa de peixes e de plantas, geralmente idealizada em torno de 30:70 (Ayipio et al., 2019; Lopchan Lama et al., 2025; Pinho et al., 2022). Quando esse equilíbrio é rompido, o acúmulo de amônia ou a escassez de nutrientes pode reduzir significativamente a produtividade vegetal, exigindo manejo sofisticado e automação contínua (Kloas et al., 2015).

Além disso, o volume total de produção em módulos aquapônicos tende a ser inferior em escala extensiva quando comparado a monocultivos convencionais, devido à limitação de densidade de peixes e ao controle rigoroso da qualidade da água (Okomoda et al., 2023). Por outro lado, a lucratividade por unidade de área é superior, refletindo o valor agregado de alimentos sustentáveis e de dupla origem, conforme demonstrado por Castilho-Barros et al. (2018) e Horn et al. (2024).

No que diz respeito à comparação de custo/retorno, há uma grande disparidade entre os custos iniciais e os retornos a longo prazo dos sistemas de aquaponia e dos sistemas tradicionais para a economia. Em média, o investimento inicial em aquaponia é de duas a três vezes o dos sistemas hidropônicos tradicionais; no entanto, análises de fluxo de caixa e valor presente líquido (VPL) demonstram que o sistema integrado gera lucro mais rapidamente em boas condições de mercado (Greenfeld et al., 2018; Kodama, 2015).

Castilho-Barros et al. (2018) observaram, em módulo comercial, que o período de *payback* variou entre 1,8 e 3,5 anos, dependendo da valorização de hortaliças sustentáveis. Estudos semelhantes de Dalazen et al. (2020) e Baiyin et al. (2020) confirmam margens líquidas positivas com tempos médios de retorno iguais ou inferiores aos de sistemas convencionais (Tabela 2). Já a piscicultura isolada apresentou menor rentabilidade devido aos altos custos com ração e energia

elétrica, além das perdas causadas por mortalidade animal e variações sazonais de temperatura (Greenfeld et al., 2018).

No entanto, os resultados econômicos da aquaponia permanecem altamente dependentes das condições de mercado e da localização geográfica. Regiões com custo energético elevado ou escassez de insumos sustentáveis podem apresentar menor competitividade em relação à agricultura convencional (Aleksić e Šušteršič, 2020; Cammies et al., 2021).

Tabela 2. Comparativo baseado em dados sintetizados por Goddek et al. (2019), Baiyin et al. (2020) e Amin et al. (2021), resumindo as principais diferenças entre os três sistemas mais comumente comparados: aquaponia, hidroponia e aquicultura convencional.

Indicador	**Aquaponia**	**Hidroponia**	**Aquicultura Convencional**
Uso de água (%)	Muito baixo (−90%)	Moderado	Muito alto
Uso de fertilizantes químicos	Nenhum	Alto	Médio
Emissão de efluentes	Mínima	Média	Alta
Custo inicial	Alto	Médio	Baixo
Retorno do investimento	Rápido (2-4 anos)	Variável	Longo (4-8 anos)
Complexidade técnica	Alta	Média	Média
Geração de valor agregado	Alta	Média	Baixa
Estabilidade ecológica	Elevada	Média	Baixa
Impacto social	Positivo (inclusão e autoconsumo)	Restrito	Limitado

Essa dependência reforça a necessidade de incentivos fiscais, políticas de certificação e financiamento público específicos (Sousa Neto et al., 2025). Além do desempenho técnico e econômico, a aquaponia apresenta impactos sociais superiores aos sistemas convencionais, especialmente em pequenas propriedades e contextos urbanos. Os estudos de Abusin e Mandikiana (2020) e Dos-Santos (2019) apontam que o modelo integrado favorece a autonomia alimentar, gerando ocupação produtiva em áreas de alta densidade populacional e reduzindo desperdícios logísticos.

Enquanto a agricultura e a aquicultura convencionais podem promover impactos negativos como degradação do solo, poluição de corpos d’água e emissão

de gases poluentes, a aquaponia opera em uma lógica de produção limpa e regenerativa, alinhada aos princípios da economia circular. Dela resulta uma sinergia positiva entre sustentabilidade ambiental e geração de renda, ampliando o potencial de inclusão social e a capacitação técnica em inovação agrícola (Castilho-Barros et al., 2018).

9. CONCLUSÃO

A aquaponia é uma tecnologia promissora para sistemas alimentares sustentáveis, integrando produção vegetal e aquícola com elevada eficiência hídrica, ciclagem de nutriente e mínima emissão de efluentes. Embora tenha apresentado avanços significativos com automação, uso de energias renováveis e desempenho ecológico, a viabilidade econômica ainda representa o principal desafio, marcada pela ausência de padronização de custos e indicadores financeiros. Dessa forma, para estruturar o setor, é necessário o desenvolvimento de políticas públicas específicas, incentivo tecnológico e geração de dados em escala comercial. Assim, a aquaponia será capaz de impulsionar a bioeconomia de baixo carbono, desde que apoiada por pesquisa aplicada, governança regulatória e metodologias econômicas comparáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abusin, S. A. A., Mandikiana, B. W. (2020) Towards sustainable food production systems in Qatar: Assessment of the viability of aquaponics. Global Food Security, 25:100349-10055. DOI doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100349.

Agrawal, A., Maganti, P., Maiti, R. R. (2023) Cyber Physical Aquaponic System (CyPhA): a CPS Testbed. arXiv preprint arXiv:2304.05132. 1:1-19 DOI doi.org/10.48550/arXiv.2304.05132.

Alam, M. N. H. Z., Kamaruddin, M. J., Adzila, S., Nordin, N., Othman, R. (2022) Solar-powered aquaponics prototype as sustainable approach for food production. Materials Today: Proceedings, 65:2953-2959. DOI doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.530.

Aleksić, N., Šušteršič, V. (2020) Analysis of application of aquaponic system as a model of the circular economy: a review. Recycling and Sustainable Development, 13:73-86. DOI doi.org/10.5937/ror2001073A.

Amin, M., Agustono, A., Prayugo, P., Ali, M., Hum, N. N. M. F. (2021) Comparison of total nutrient recovery in aquaponics and conventional aquaculture systems. Open Agriculture, 6:682-688. DOI doi.org/10.1515/opag-2021-0032.

Andrade, I. R. A., Silva, H. S., Souza, A. A., Costa, J. H. C. (2018) Metodologias para avaliação econômica de sistemas de produção agropecuários. Archivos de Zootecnia, 67:610-620. DOI doi.org/10.21071/az.v0i0.3894.

Asciuto, A., Schimmenti, E., Cottone, C., Borsellino, V. (2019) A financial feasibility study of an aquaponic system in a Mediterranean urban context. Urban Forestry & Urban Greening, 38:397-402. DOI doi.org/10.1016/j.ufug.2019.02.001.

Aquaponics Market Size and Trends. (2024) Global Aquaponics Market Report. Grand View Research. Disponível em https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aquaponics-marketreport. Acesso em 3 de dezembro de 2024.

Ayipio, E., Wells, D. E., McQuilling, A., Wilson, A. E. (2019) Comparisons between aquaponic and conventional hydroponic crop yields: A meta-analysis. Sustainability, 11:6511. DOI doi.org/10.3390/su11226511.

Babatunde, A., Deborah, R. A., Gan, M., Simon, T. (2023) Economic viability of a small scale low-cost aquaponic system in South Africa. Journal of Applied Aquaculture, 35:285-304, 2023. DOI doi.org/10.1080/10454438.2021.1958729.

Baiyin, B., Tagawa, K., Gutierrez, J. (2020) Techno-economic feasibility analysis of a stand-alone photovoltaic system for combined aquaponics on drylands. Sustainability, 12:9556. DOI doi.org/10.3390/su12229556.

Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., Yin, Y. (2017) The financial feasibility of producing fish and vegetables through

aquaponics. Aquacultural Engineering, 78:146-154. DOI doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002.

Cammies, C., Mytton, D., Crichton, R. (2021) Exploring economic and legal barriers to commercial aquaponics in the EU through the lens of the UK and policy proposals to address them. Aquaculture International, 29:1245-1263. DOI doi.org/10.1007/s10499-021-00690-w.

Carvalho, S. W. S., Periard, L. R., Souza, T. B. (2024) Avaliação de um sistema de aquaponia para agricultura familiar confeccionado com materiais sustentáveis. Observatório de la Economía Latinoamericana, 22:e8166. DOI doi.org/10.55905/oelv22n12-098.

Castilho-Barros, L., Almeida, F. H., Henriques, M. B., Seiffert, W. Q. (2018) Economic evaluation of the commercial production between Brazilian samphire and whiteleg shrimp in an aquaponics system. Aquaculture international, 26:1187-1206, 2018. DOI doi.org/10.1007/s10499-018-0277-8.

Channa, A. A., Munir, K., Hansen, M., Tariq, M. F. (2025) Energy optimisation in aquaponics - integrating renewable source and water as energy buffer for sustainable food production. Energy Science & Engineering, 13:2098-2111. DOI doi.org/10.1002/ese3.70038.

Chen, M. T. (1998) Simplified project economic evaluation. Cost Engineering, 40:31.

Dalazen, G. B., de Freitas Sia, E., Mota, C. M., Bentes, J. R., de Barros, I. B. A. (2020) A avaliação econômica do sistema de aquaponia familiar em Santarém, oeste do Pará. Revista Agroecossistemas, 11:40-56. DOI doi.org/10.18542/ragros.v11i2.9077.

Danner, R. I., Mankasingh, U., Anamthawat-Jonsson, K., Thorarinsdottir, R. I. (2019) Designing aquaponic production systems towards integration into greenhouse farming. Water, 11:2123, 2019. DOI doi.org/10.3390/w11102123.

David, L. H., Pinho, S. M., Agostinho, F., Costa, J. I., Portella, M. C., Keesman, K. J., Garcia, F. (2022) Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view. Journal of Cleaner Production, 331:129896. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129896.

Davis, J., Murray, R. R., Crichton, R., Starkey, F., Cammies, C. (2025) Bridging the gap: exploring consumer knowledge, perceptions, and willingness to pay for aquaponics products across the UK. Aquaculture International, 33:30. DOI doi.org/10.1007/s10499-024-01680-4.

Debroy, P., Majumder, P., Majumdar, P., Das, A., Seban, L. (2025) Analysis of opportunities and challenges of smart aquaponic system: a summary of research trends and future research avenues. Sustainable Environment Research. 35:18. DOI doi.org/10.1186/s42834-025-00255-z.

Dos-Santos, M. J. (2019) Sustainable and commercial development of aquaponics through the certification in Europe. Ecocycles, 5:12-18. DOI doi.org/10.19040/ecocycles.v5i2.140.

Empresa de assistência técnica e extensão rural de minas gerais (EMATER-MG). Relatório de Administração 2023. (2023). Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/doc/REL_ATIVIDADE/relatorio_de_administracao_2023.pdf?utm_source=chatgpt.com . Acesso em: 22 de junho de 2025.

Endut, A., Lananan, F., Hamid, S. H. A., Jusoh, A., Nik, W. N. W. (2016) Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system. Desalination and Water Treatment, 57:29531-29540. DOI doi.org/10.1080/19443994.2016.11845 93.

Estim, A., Shapawi, R., Shaleh, S. R. M., Saufie, S., Mustafa, S. (2022) Decarbonizing aquatic food production through circular bioeconomy of aquaponic systems. Aquaculture Studies, 23:1-12. DOI doi.org/10.4194/AQUAST963.

Estrada-Perez, N., Hernandez-Llamas, A., Ruiz-Velazco, J. M. (2025) Productive and economic comparison between aquaponics and hydroponics in different seasons. Revista Terra Latinoamericana, 43:1-13. DOI doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2048.

FAO. FAO Food Outlook – Global Market Analysis. (2024) Roma: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. 91p. Disponível em: https://openknowledge.fao.org/items/0f49f297-4c2e-42c8-a152-adb89a727a01. Acesso em 19 de janeiro de 2024.

Finizola e Silva, M., Van Passel, S. (2020) Climate-smart agriculture in the northeast of Brazil: An integrated assessment of the aquaponics technology. Sustainability, 12:3734, 2020. DOI doi.org/10.3390/su12093734.

Francisco, E. C., Freato, T. A., Piolli, A. L., Poz, M. E. S. D. (2025) Analysis of the aquaponic system sustainability via system dynamics modelling–FEW nexus approach. Circular Economy and Sustainability, 5:2577-2592. DOI doi.org/10.1007/s43615-024-00408-z.

Ghamkhar, R., Hartleb, C., Rabas, Z., Hicks, A. (2022) Evaluation of environmental and economic implications of a cold-weather aquaponic food production system using life cycle assessment and economic analysis. Journal of Industrial Ecology, 26:862-874. DOI doi.org/10.1111/jiec.13230.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R. (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability,7:4199-4224. DOI doi.org/10.3390/su7044199.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G. M. (2019) Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer Nature. 619p.

Goddek, S., Keesman, K. J. (2020) Improving nutrient and water use efficiencies in multi-loop aquaponics systems. Aquaculture International, 28:2481-2490. DOI doi.org/10.1007/s10499-020-00600-6.

Greenfeld, A., Becker, N., McIlwain, J., Fotedar, R., Bornman, J. F. (2018) Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. Reviews in Aquaculture, 11:848-862. DOI doi.org/10.1111/raq.12269.

Horn, E. K., Joyce, A., Chowdhury, R. B., Caputo, S., Jacobs, B., Winkler, M., Proksch, G. (2024) Translating environmental potential to economic reality: Assessment of commercial aquaponics through sustainability transitions theory. Circular Economy and Sustainability, 4:523-554. DOI doi.org/10.1007/s43615-023-00291-0.

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., Khanal, S. K. (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. Bioresource Technology, 188:92-98. DOI doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013.

Ibrahim, L. A., Shaghaleh, H., El-Kassar, G. M., Abu-Hashim, M., Elsadek, E. A., Alhaj Hamoud, Y. (2023) Aquaponics: a sustainable path to food sovereignty and enhanced water use efficiency. Water, 15:4310. DOI doi.org/10.3390/w15244310.

Karimanzira, D., Rauschenbach, T. (2021) An intelligent management system for aquaponics. at-Automatisierungstechnik, 69:345-350, 2021. DOI doi.org/10.1515/auto-2020-0036.

Karimanzira, D., Na, C., Hong, M., Wei, Y. (2021) Intelligent information management in aquaponics to increase mutual benefits. Intelligent Information Management: IIM. DOI doi.org/10.4236/iim.2021.131003.

Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., Orozova, P. (2022) Aquaponic systems: biological and technological parameters. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 36:305-316. DOI doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892.

Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Rennert, B. (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquaculture Environment Interactions, 7:179-192. DOI doi.org/10.3354/aei.

Kodama, G. Viabilidade financeira em sistema de aquaponia (2015) Dissertação (Mestrado em Ciências Animais). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 137p.

Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V. M., Bermejo, L. A., Pérez-Urrestarazu, L. (2020) Economic sustainability of small-scale aquaponic systems for food self-production. Agronomy, 10:1468-1486. DOI doi.org/10.3390/agronomy10101468.

Lopchan Lama, S., Marcelino, K. R., Wongkiew, S., Surendra, K. C., Hu, Z. Lee, J. W., Khanal, S. K. (2025) Recent advances in aquaponic systems: A critical review. Reviews in Aquaculture, 17:e70029. DOI doi.org/10.1111/raq.70029.

Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., Thompson, R. E. (2015) Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. Aquaculture, 435:67-74, 2015. DOI doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023.

Lubis, L. H., Mesyadi, M., Nasution, M. I. (2024) Integration of solar panels and arduino for aquaponic system automation and solar energy efficiency. Indonesian Physical Review: Universitas Mataram, 8:222-237. DOI doi.org/10.29303/ipr.v8i1.415.

Maucieri, C., Forchino, A. A., Nicoletto, C., Junge, R., Pastres, R., Sambo, P., Borin, M. (2018) Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered material. Journal of Cleaner Production, 172:3119-3127. DOI doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.097.

Nair, C. S., Manoharan, R., Nishanth, D., Subramanian, R., Neumann, E., Jaleel, A. (2025) Recent advancements in aquaponics with special emphasis on its sustainability. Journal of the World Aquaculture Society, 56:e13116. DOI doi.org/10.1111/jwas.13116.

Nithya, R., Padma, T. (2023) Water waste management technique in self-sustainable indoor aquaponics system. In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 455:01010. DOI doi.org/10.1051/e3sconf/202345501010.

Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S. O., Ogah, S. I., Ikhwanuddin, M. (2023) Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. Food Science & Nutrition, 11:1157-165. DOI doi.org/10.1002/fsn3.3154.

Oladimeji, S. A., Okomoda, V. T., Olufeagba, S. O., Solomon, S. G., Abol-Munafi, A. B., Alabi, K. I., Ikhwanuddin, M., Martins, C. O., Umaru, J., Hassan, A. (2020a) Aquaponics production of catfish and pumpkin: Comparison with conventional production systems. Food Science & Nutrition, 8:2307-2315. DOI doi.org/10.1002/fsn3.1512.

Oladimeji, A. S., Olufeagba, S. O., Ayuba, V. O., Sololmon, S. G., Okomoda, V. T. (2020b) Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system. Journal of King Saud University–Science, 32:60-66. DOI doi.org/10.1016/j.jksus.2018.02.001.

Pinho, S. M., Flores, R. M. V., David, L. H., Emerenciano, M. G., Quagrainie, K. K., Portella, M. C. (2022) Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems. Aquaculture, 552:737987. DOI doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737987.

Ravani, M., Chatzigeorgiou, I., Monokrousos, N., Giantsis, I. A., Ntinas, G. K. (2024) Life cycle assessment of a high-tech vertical decoupled aquaponic system for sustainable greenhouse production. Frontiers in Sustainability, 5:1422200. DOI doi.org/10.3389/frsus.2024.1422200.

Simeonidou, M., Paschos, I., Gouva, E., Kolygas, M., Perdikaris, C. (2012) Performance of a small-scale modular aquaponic system. Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation, 5:182-188. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/234052761_Performance_of_a_small-scale_modular_aquaponic_system>. Acesso em 12 de janeiro de 2024.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014) Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper N°. 589. Roma: FAO. 288p.

Sousa Neto, J. C. De, Sousa, J. M. S. De, Silva, C. M. da; Viana, J. dos S., Silva, W. A. Da, Sousa, P. F. C. (2025) Aquaponia: uma opção tecnológica para melhorar a qualidade de vida dos habitantes da Região Tocantina. Aracê, 7:30549-30561, 2025. DOI doi.org/10.56238/arev7n6-086.

Stentiford, G. D., Bateman, I. J., Hinchliffe, S. J., Bass, D., Hartnell, R., Santos, E. M., Tyler, C. R. (2020) Sustainable aquaculture through the one health lens. Nature Food, 1:468-474. DOI doi.org/10.1038/s43016-020-0127-5.

Stoyanova, S., Sirakov, I., Velichkova, K. (2024) Sustainable production: integrating medicinal plants with fish farming in aquaponics: a mini review. Sustainability (2071-1050), 16:6337. DOI doi.org/10.3390/su16156337.

Syliver, B., Limuwa, M., Semyalo, R. (2025) Economic performance and scalability of small-scale aquaculture systems: a comparative analysis of pond, cage, and aquaponics systems in the Lake Victoria basin, Uganda. Discover Sustainability, 6:1227-1240. DOI doi.org/10.1007/s43621-025-02147-z.

Todd, J., Zweig, R. (1978) Assessment of a semi-closed, renewable resource-based aquaculture system: a six-month progress report. Woods Hole, MA: New Alchemy Institute, 88 p.

Tokunaga, K., Tamaru, C., Ako, H., Leung, P. (2015) Economics of small-scale commercial aquaponics in Hawai‘i. Journal of the World Aquaculture Society, 46:20-32. DOI doi.org/10.1111/jwas.12173.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., Simonne, E. H. (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. HortTechnology, 21:6-13. DOI doi.org/10.21273/HORTTECH.21.1.6

UN – United Nations, Department of Economic and Social Affairs – Population Division. (2021) Global population growth and sustainable development. Nova York. 124p. Disponível em: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2022_global_population_growth.pdf. Acesso em 15 de janeiro de 2024.

Vernimmen, P., Quiry, P., Le Fur, Yann, Salvi, A. (2005) Corporate finance: theory and practice. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 1059p.

Wang, Y. J., Yang, T., Kim, H. J. (2023) pH dynamics in aquaponic systems: Implications for plant and fish crop productivity and yield. Sustainability, 15:7137. DOI doi.org/10.3390/su15097137.

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

Yang, T., Kim, H. J. (2020) Effects of hydraulic loading rate on spatial and temporal water quality characteristics and crop growth and yield in aquaponic systems. Horticulturae, 6:9. DOI doi.org/10.3390/horticulturae6010009.

Yogev, U., Barnes, A., Gross, A. (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. Water, 8:589, 2016. DOI doi.org/10.3390/w8120589.

Zhao, W., Liu, C., Li, D., Zheng, Y. (2024) Energy-saving techniques in urban aquaponics farms by optimizing equipment operating scheme. Aquaculture, 587:740873. DOI doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740873.

APÊNDICE A

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
REI - COMISSÃO DE ETICA NO USO DE ANIMAIS

CERTIFICADO Nº 14/2022 - REI-CEA (11.02.37.15.05)

Nº do Protocolo: 23147.003768/2022-90

Vitória-ES, 19 de maio de 2022.

COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

CERTIFICADO

Certificamos que a proposta intitulada "**Sustentabilidade Econômica de um sistema de Aquaponia Familiar",** registrada em processo nº **23149.001220/2022-95,** sob a responsabilidade de **Thiago Bernardo de Souza,** lotado(a) no Ifes Campus de Alegre, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica e/ou ensino, encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi **APROVADA** pela Comissão de Ética no Uso de Animais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ceua/Ifes, em reunião de 09/05/2022.

Finalidade: ( ) Ensino (X) Pesquisa Científica ( ) Extensão
Vigência da autorização: 19/05/2022 a 19/05/2023
Espécie/linhagem/raça: Oreochromis niloticus/Peixes; Hypostomus plecostomus /Peixes; Astyanax; spp./Peixes; Ictalurus punctatus /Peixes; Pangasius hypophthalmus/Peixes; Cyprinus carpio/Peixes; Carassius auratus auratus /Peixes; Paracheirodon innesi/Peixes; Betta splendens /Peixes
Nº de animais: 2.700
Peso/Idade: Média 0,05Kg / 2 meses
Sexo: machos
Origem: Setor de Aquicultura / IFES - Alegre; Associação de Aquicultores; Produtores

(Assinado digitalmente em 20/05/2022 10:57)
SHERRINE QUEIROZ FERMO
COORDENADOR - TITULAR
REI-CEA (11.02.37.15.05)
Matrícula: 1808515

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ifes.edu.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **14**, ano: **2022**, tipo: **CERTIFICADO**, data de emissão: **19/05/2022** e o código de verificação: **819a20aac3**

APÊNDICE B

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
REI - COMISSÃO DE ETICA NO USO DE ANIMAIS

CERTIFICADO Nº 19/2025 - REI-CEA (11.02.37.15.05)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Vitória-ES, 22 de abril de 2025.

COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

CERTIFICADO

Certificamos que a proposta intitulada "Utilização de microrganismos promotores de crescimento de plantas em sistema de aquaponia", registrada em processo nº 23149.001222/2025-27, sob a responsabilidade de Thiago Bernardo de Souza , lotado(a) no Ifes Campus de Alegre, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica e/ou ensino, encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi **APROVADA** pela Comissão de Ética no Uso de Animais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ceua/Ifes, em reunião de 14/04/2025.

Finalidade: ( ) Ensino (X) Pesquisa Científica ( ) Extensão
Vigência da autorização: 06/05/2025 a 06/05/2026
Espécie/linhagem/raça: Peixes (Oreochromis niloticus/ Astyanax spp/ Cyprinus carpio)
Nº de animais: Oreochromis niloticus: 100 / Astyanax spp: 500 / Cyprinus carpio: 100
Peso/Idade: 0,05 Kg/ 2 meses (Tilápias); 0,01Kg (lambari); 0,03Kg (Carpas).
Sexo: machos e fêmeas
Origem: Setor de Aquicultura – Ifes/Campus de Alegre; Produtores; Loja de Aquários.

(Assinado digitalmente em 22/04/2025 14:08)
GABRIEL DOMINGOS CARVALHO
COORDENADOR
REI-CEA (11.02.37.15.05)
Matrícula: 2821609

Processo Associado: 23149.001222/2025-27

Visualize o documento original em https://sipac.ifes.edu.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **19**, ano: **2025**, tipo: **CERTIFICADO**, data de emissão: **22/04/2025** e o código de verificação: **0cc6b60c24**