

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 02/03/2028

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

***Benchmarking e desenvolvimento de protocolo para
avaliação de tecnologias de monitoramento limnológico
em sistemas aquícolas***

*Benchmarking and Development of a Protocol for Evaluating
Limnological Monitoring Technologies in Aquaculture Systems*

Brennda Ramos Cheretti

Jaboticabal, São Paulo
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP

***Benchmarking e desenvolvimento de protocolo para avaliação
de tecnologias de monitoramento limnológico em sistemas
aquícolas***

*Benchmarking and Development of a Protocol for Evaluating
Limnological Monitoring Technologies in Aquaculture Systems*

Brennda Ramos Cheretti

Orientador: Dr. Guilherme Wolff Bueno

Coorientador: Dra. Fernanda Garcia Sampaio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Aquicultura do Centro de Aquicultura da UNESP – CAUNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Jaboticabal, São Paulo

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

C521b	Cheretti, Brennda Ramos Benchmarking e desenvolvimento de protocolo para avaliação de tecnologias de monitoramento limnológico em sistemas aquícolas / Brennda Ramos Cheretti. -- Jaboticabal, 2026 130 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Centro de Aquicultura da Unesp, Jaboticabal Orientador: Guilherme Wolff Bueno Coorientadora: Fernanda Garcia Sampaio 1. Aquicultura de Precisão. 2. Inovação. 3. Protocolo Tecnológico. 4. Monitoramento Ambiental. 5. Revisão Sistemática. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

ATESTADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: *Benchmarking* e desenvolvimento de protocolo para avaliação de tecnologias de monitoramento limnológico em sistemas aquícolas

AUTOR: Brennda Ramos Cheretti

ORIENTADOR: Prof. Dr. Guilherme Wolff Bueno

COORDENADOR: Dra. Fernanda Garcia Sampaio

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS/AQUICULTURA, pela Comissão Examinadora:

Dr. Guilherme Wolff Bueno
Centro de Aquicultura da Unesp – Caunesp
Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, FCAVR, Registro, São Paulo
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME WOLFF BUENO**
Data: 31/03/2026 15:50:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Thiago Dias Trombeta
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV)
Universidade de Brasília - UnB

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO DIAS TROMBETA**
Data: 27/03/2026 16:33:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Érico Tadao Teramoto
Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, FCAVR, Registro, São Paulo
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Registro, São Paulo

Documento assinado digitalmente
 **ERICO TADAO TERAMOTO**
Data: 27/03/2026 21:23:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 02 de março de 2026.

Sumário

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	1
LISTA DE TERMOS EM INGLÊS.....	4
AGRADECIMENTO INSTITUCIONAL	7
AGRADECIMENTOS	8
GERAL ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
CAPÍTULO I	16
ARTIGO DE REVISÃO: Tecnologias e inovações no monitoramento limnológico e climático na aquicultura: uma revisão sistemática.....	16
1. INTRODUÇÃO	18
2. METODOLOGIA.....	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1. Análise Comparativa de Soluções por Região	27
3.2. Tecnologias e Métodos Propostos	29
3.2.1. Controle Operacional Multiparâmetros	31
3.2.2. Monitoramento Integrado à Automação	36
3.2.3. Sensoriamento leve	41
3.2.4. Percepção do Nível de Maturidade Tecnológica	50
4. CONCLUSÃO	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
CAPÍTULO II: ARTIGO CIENTÍFICO	59
1. INTRODUÇÃO	60
2. OBJETIVO.....	62
2.1. Objetivos Específicos.....	62
3. MATERIAL E MÉTODOS	63
3.1. Estrutura do Protocolo	63
3.1.1. Pontuação e Descrição dos itens do Sistema de <i>Score</i> por Radar de Prontidão (SRP).....	64

3.2.	Aplicação do Protocolo	65
3.2.1.	Delineamento e Justificativa do Objeto de Estudo (MVP).....	65
3.2.2.	Procedimentos de Aquisição e Validação Sequencial por Ambiente (TRL)	67
3.2.3.	Delineamento Experimental e Coleta de Dados	71
3.2.4.	Procedimento de Avaliação e Validação do MVP (Protocolo SRP) 73	
3.3.	Consolidação dos Dados e Etapas Subsequentes	74
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1.	Resultados do <i>Benchmarking</i> e Caracterização do MVP.aqua.....	75
4.2.	Resultados da Aplicação do Protocolo SRP por Ambiente de Teste .	82
4.2.1.	Desempenho no Ambiente 1 - Laboratório (TRL 4)	82
4.2.2.	Desempenho em Ambiente 2 – Viveiro Escavado (TRL 5).....	89
4.2.3.	Desempenho em Ambiente 3 – Reservatório (TRL 6)	95
4.3	Resultados da Consolidação dos Dados e Análise (SRP)	101
4.4.	Avaliação Final da Prontidão Tecnológica (TRL 4, TRL 5 e TRL 6).....	104
5.	CONCLUSÃO	108
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	114
	ANEXOS	116

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ADC / A-D: Conversor Analógico-Digital

ADCP: Perfilador de Corrente Acústico *Doppler*

AEI: *Aqua-Enviro Index* (índice utilizado em modelos de predição)

ANN-MLR: Redes Neurais Artificiais – Regressão Linear Múltipla

ANOVA: Análise de Variância

API: Interface de Programação de Aplicações

BP: *Back Propagation* (referente a Redes Neurais)

CAUNESP: Centro de Aquicultura da UNESP

CE: Condutividade Elétrica

Chl-a / CHL470: Clorofila-a

CLP: Controlador Lógico Programável

CNN: Rede Neural Convolucional

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CoAP: Protocolo de Aplicação Restrita

DL: *Deep Learning*

DOM: Matéria Orgânica Dissolvida

EEMD: Decomposição em Modo Empírico de Conjunto

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESP32: Microcontrolador de baixo custo

FAO: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FAPED: Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento

FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FCAVR: Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira

GA: Algoritmo Genérico

GPS: Sistema de Posicionamento Global

GSM: Sistema Global de Comunicações Móveis

GPRS: Serviço Geral de Pacotes de Dados

GUI: Interface Gráfica de Usuário

HF: Alta Frequência

IoT: Internet das Coisas

IP65 / IP66 / IP68: Índices de proteção contra água e poeira

JSON: *JavaScript Object Notation*

LoRa / LoRaWAN: Rede de Longo Alcance e baixo consumo de energia

LF: Baixa Frequência

LSTM: Memória de Longo/Curto Prazo

MAE: Erro Médio Absoluto

MCU: Unidade de Microcontrolador

MGD: Maturidade da Governança de Dados

ML: Aprendizado de Máquina

MLR: Múltipla Regressão Linear

MQTT: *Message Queuing Telemetry Transport*

MVP: Produto Mínimo Viável

NASA: Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

NB-IoT: Internet das Coisas de Banda Estreita

NDWI: Índice de Diferença Normalizada de Água

NH3: Amônia

NO3: Nitrato

NTU: Unidade Nefelométrica de Turbidez

OD: Oxigênio Dissolvido

OEM: Fabricante Original do Equipamento

ORP: Potencial de Óxido-redução

PCBA: Placa de Circuito Montada

PCA-BP: Análise de Componentes Principais com Rede Neural treinada por *Backpropagation*

PD&I: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

pH: Potencial Hidrogeniônico

POF: Fibra Óptica Plástica

PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*

R²: Coeficiente de Determinação

RAS: Sistema de Recirculação Aquícola

RF: *Random Forest*

RSME: Raiz do Erro Quadrático Médio

RRSS: *Readiness Radar Scoring System*

RTC: Relógio de Tempo Real

SaaS: *Software* como Serviço

SCM: Método de Correção Espectral

SCTI: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de São Paulo

SD: Cartão de Memória

SHAP: *SHapley Additive exPlanations*

SPAI: Sistema Paulista de Ambientes de Inovação

SRP: Sistema de Score por Radar de Proximidade

SVR: *Regressão de Vetores de Suporte*

TAN: Nitrogênio Amônia Total

TCO: Custo Total de Propriedade

TDS: Sólidos Totais Dissolvidos

TEMP: Temperatura

TFN: *Temporal FlexNet*

TRL: Nível de Maturidade Tecnológica

VANT / UAV: Veículo Aéreo Não Tripulado

VPN: Rede Privada Virtual

WQI: Índice de Qualidade da Água

WTD: Remoção de Ruído por Limiarização de Wavelet

WSN: Rede de Sensores Sem Fio

ZEE: Zona Econômica Exclusiva

LISTA DE TERMOS EM INGLÊS

ADC / A-D: *Analog-to-Digital Converter*
ADCP: *Acoustic Doppler Current Profiler*
AEI: *Aqua-Enviro Index (index used in prediction models)*
ANN-MLR: *Artificial Neural Networks – Multiple Linear Regression*
ANOVA: *Analysis of Variance*
API: *Application Programming Interface*
BP: *Back Propagation*
CAUNESP: *Aquaculture Center of UNESP*
CE: *Electrical Conductivity*
Chl-a / CHL470: *Chlorophyll-a*
CLP: *Programmable Logic Controller*
CNN: *Convolutional Neural Network*
CNPq: *National Council for Scientific and Technological Development*
CoAP: *Constrained Application Protocol*
DL: *Deep Learning*
DOM: *Dissolved Organic Matter*
EEMD: *Ensemble Empirical Mode Decomposition*
EMBRAPA: *Brazilian Agricultural Research Corporation*
ESP32: *Low-cost microcontroller*
FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*
FAPED: *Foundation for Research and Development Support*
FAPESP: *São Paulo Research Foundation*
FCAVR: *School of Agrarian Sciences of Vale do Ribeira*
GA: *Genetic Algorithm*
GPS: *Global Positioning System*
GSM: *Global System for Mobile Communications*
GPRS: *General Packet Radio Service*
GUI: *Graphical User Interface*
HF: *High Frequency*
IoT: *Internet of Things*
IP65 / IP66 / IP68: *Ingress Protection ratings (protection against water and dust)*

JSON: *JavaScript Object Notation*

LoRa / LoRaWAN: *Long Range / Long Range Wide Area Network*

LF: *Low Frequency*

LSTM: *Long Short-Term Memory*

MAE: *Mean Absolute Error*

MCU: *Microcontroller Unit*

MGD: *Data Governance Maturity*

ML: *Machine Learning*

MLR: *Multiple Linear Regression*

MQTT: *Message Queuing Telemetry Transport*

MVP: *Minimum Viable Product*

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*

NB-IoT: *Narrowband Internet of Things*

NDWI: *Normalized Difference Water Index*

NH3: *Ammonia*

NO3: *Nitrate*

NTU: *Nephelometric Turbidity Unit*

OD: *Dissolved Oxygen*

OEM: *Original Equipment Manufacturer*

ORP: *Oxidation-Reduction Potential*

PCBA: *Printed Circuit Board Assembly*

PCA-BP: *Principal Component Analysis with Backpropagation-trained Neural Network*

PD&I: *Research, Development, and Innovation*

pH: *Potential of Hydrogen*

POF: *Plastic Optical Fiber*

PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*

R²: *Coefficient of Determination*

RAS: *Recirculating Aquaculture System*

RF: *Random Forest*

RMSE: *Root Mean Square Error*

RRSS: *Readiness Radar Scoring System*

RTC: *Real-Time Clock*

SaaS: *Software as a Service*

SCM: *Spectral Correction Method*

SCTI: *Secretary of Science, Technology, and Innovation of the State of São Paulo*

SD: *Memory Card*

SHAP: *SHapley Additive exPlanations*

SPAI: *São Paulo System of Innovation Environments*

SRP: *Readiness Radar Scoring System*

SVR: *Support Vector Regression*

TAN: *Total Ammoniacal Nitrogen*

TCO: *Total Cost of Ownership*

TDS: *Total Dissolved Solids*

TEMP: *Temperature*

TFN: *Temporal FlexNet*

TRL: *Technology Readiness Level*

VANT / UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*

VPN: *Private Virtual Network*

WQI: *Water Quality Index*

WTD: *Wavelet Threshold Denoising*

WSN: *Wireless Sensor Network*

ZEE: *Exclusive Economic Zone*

AGRADECIMENTO INSTITUCIONAL

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo fornecimento das bolsas de pesquisa científica que possibilitaram a realização do presente trabalho (CNPq n. 303653/2022-1). A Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento - FAPED e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Meio Ambiente, Processo 951854/2023, pela bolsa de pesquisa concedida.

Este estudo também contou com recursos de apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2022/02756-4, do Programa sobre Mudanças Climáticas Globais. Além do apoio da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo do Estado de São Paulo – SCTI, por meio dos Projetos CETMA e EcoHostel Lab., Programa avançado de apoio a projetos iniciais de *startups* científicas e empreendedorismo em EcoInovação, no âmbito do Sistema Paulista de Ambientes de Inovação (SPAI), processos nº 008.00000262/2024-34 e.

Agradecemos também as Pisciculturas Cristalina, em Fartura, e S3, no Vale do Ribeira, ambas no estado de São Paulo. Além do Centro de Aquicultura da Unesp (CAUNESP), pelo apoio institucional ao longo do desenvolvimento desta dissertação. E ao "Aquário de Ideias", Incubadora de Empresa de Base Científica e Tecnológica no Vale do Ribeira e no Litoral Sul de São Paulo, e ao Laboratório de Bioeconomia da UNESP, Campus de Registro, pelos seus inestimáveis apoios operacionais e de infraestrutura durante todo o desenvolvimento deste trabalho científico e tecnológico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, pela força, equilíbrio e persistência ao longo desta trajetória, que foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Guilherme Wolff Bueno, e à minha coorientadora, Dra. Fernanda Garcia Sampaio, por toda a orientação, apoio e contribuições fundamentais ao longo deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte deste processo, meu sincero agradecimento. Cada apoio, conversa e incentivo teve seu papel nessa trajetória.

À minha família, especialmente aos meus pais, Marcos e Eliedna, e ao meu irmão Júnior, por serem minha base, meu ponto de apoio, minha fé e meu norte. Obrigada pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos amigos que estiveram presentes mesmo à distância, Tayná, Michele e Lívia, por todo carinho, escuta e apoio ao longo dessa caminhada, mostrando que, mesmo na ausência física, é possível se fazer presente.

Aos amigos que dividiram o dia a dia comigo, Andressa e Moranne, pela companhia, pelas risadas e por tornarem esse percurso mais leve. Em especial, à Esthefany, meu braço direito em mais uma etapa da minha vida. Obrigada por tanto, amiga.

E, por fim, aos membros da Incubadora Aquário de Ideias, em especial à Johanna Marcela e ao professor Dr. Érico Tadao Teramoto, pelas trocas, aprendizados e apoio ao longo dessa jornada. A Roberto Naoe e Henrique Baccarin, meus companheiros do dia a dia, que, mais do que colegas, se tornaram amigos. Obrigada, meninos.

RESUMO GERAL

O crescimento exponencial da aquicultura nos últimos anos evidencia que, para atender de forma sustentável à crescente demanda por proteína aquática, o setor dependerá cada vez mais de inovações tecnológicas orientadas à eficiência produtiva, previsão operacional, automação e gestão ágil. Essas soluções tornam-se essenciais diante dos desafios globais emergentes, como as mudanças climáticas, os impactos ambientais e a escassez de mão de obra qualificada. Neste contexto, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos complementares. No primeiro, realizou-se um *benchmarking* de tecnologias e inovações de baixo custo aplicadas ao monitoramento climático, meteorológico e limnológico em empreendimentos aquícolas comerciais, por meio de uma revisão sistemática, segundo o protocolo PRISMA (*Web of Science*, 2020–2025). Dos 187 estudos identificados, 26 atenderam aos critérios de inclusão. Observou-se predominância de pesquisas na Ásia (69,23%), com baixa representatividade latino-americana (7,69%), o que reforça as oportunidades regionais para a adoção tecnológica. Destacaram-se tendências relacionadas à Internet das Coisas (IoT), sensores inteligentes, aprendizado de máquina e plataformas acessíveis como Arduino e ESP32. No segundo capítulo, desenvolveu-se um protocolo para a validação e o aprimoramento das tecnologias empregadas pelas empresas do setor da aquicultura. Este foi baseado em um sistema de radar de prontidão (SRP), com oito dimensões avaliadas em cinco níveis (1 a 5). Para validação, um MVP foi testado em três ambientes relevantes de maturidade tecnológica (TRL 4 - laboratório, 5 – viveiro de terra em piscicultura e 6 – tanques-rede em reservatório), com cinco réplicas por ambiente e comparação a instrumentos profissionais (controle). O protocolo desenvolvido constitui uma ferramenta robusta para a validação de produtos tecnológicos voltados à aquicultura, contribuindo para o aprimoramento de processos produtivos e para o desenvolvimento de soluções inovadoras no setor.

Palavras-chave: aquicultura de precisão, inovação, protocolo tecnológico.

GERAL ABSTRACT

The exponential growth of aquaculture in recent years demonstrates that, to sustainably meet the increasing global demand for aquatic protein, the sector will increasingly depend on technological innovations focused on production efficiency, operational forecasting, automation, and agile management. These solutions are essential in the face of emerging global challenges such as climate change, environmental impacts, and the availability of qualified labor. In this context, this dissertation was structured into two complementary chapters. The first chapter presents a benchmarking analysis of low-cost technologies and innovations for climatic and limnological monitoring in commercial aquaculture operations, conducted through a systematic review following the PRISMA protocol (Web of Science, 2020–2025). Of the 187 studies identified, 26 met the inclusion criteria. Most research was concentrated in Asia (69.23%), with low representation in Latin America (7.69%), highlighting regional opportunities for technological adoption. Key trends included the Internet of Things (IoT), smart sensors, machine-learning-based systems, and accessible platforms such as Arduino and ESP32. In the second chapter, a protocol was developed to validate and improve technologies used by companies in the aquaculture sector. This protocol was based on a Readiness Radar Scoring System (RRSS) comprising eight dimensions assessed on a five-level scale (1 to 5). For validation, a Minimum Viable Product (MVP) was tested in three relevant environments corresponding to progressive Technology Readiness Levels (TRLs): TRL 4 – laboratory, TRL 5 – earthen pond aquaculture facility, and TRL 6 – cage-culture system in a reservoir, with five replications per environment and comparison against professional reference instruments (control). The developed protocol proved to be a robust tool for validating aquaculture technological products, contributing to the improvement of production processes and the development of innovative solutions for the sector.

Keywords: benchmarking, innovation, precision aquaculture, technological protocol.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui uma das maiores bacias hidrográficas do mundo, abrigando aproximadamente 12% de toda a água doce superficial do planeta e mais de 4 milhões de hectares de represas artificiais, como hidrelétricas e reservatórios de água (Valenti et al., 2021). Além disso, o país possui uma extensão de litoral de cerca de 8.700 km, com vários estuários, e uma zona econômica exclusiva (ZEE) no Oceano Atlântico, com 4.500 km² (Bueno et al., 2015). Segundo Valenti et al. (2021), a maior parte do território brasileiro apresenta temperaturas quentes o ano todo, além de contar com um grande mercado consumidor e uma sólida comunidade científica para apoiar a exploração sustentável dos ecossistemas aquáticos.

Portanto, o país tem condições excepcionais para desenvolver a produção de organismos aquáticos. No entanto, esse setor enfrenta desafios significativos, incluindo os efeitos adversos das mudanças climáticas e as complexidades que envolvem a gestão ambiental de empreendimentos, instalados no ecossistema aquático. As mudanças climáticas – caracterizadas por variações nas temperaturas, nas precipitações e nos eventos climáticos extremos – têm impacto direto na produção aquícola. Essas alterações podem afetar a qualidade da água, a disponibilidade de alimentos e a saúde dos organismos aquáticos, resultando em diminuição da produtividade e aumento da mortalidade (Maulu et al., 2021). Além disso, a gestão do ambiente aquático, que envolve o estudo e o controle das características físicas, químicas e biológicas dos corpos d'água, é crucial para assegurar um ambiente aquático saudável para a aquicultura (Sampaio et al., 2021). Produtos e tecnologias, que oferecem soluções para esses desafios, são, portanto, essenciais para a sustentabilidade e a resiliência desse setor.

A adoção de produtos inovadores para mitigação dos impactos climáticos e gestão eficiente dos ecossistemas aquáticos podem melhorar significativamente a produtividade e a sustentabilidade da aquicultura (Bueno et al., 2021). Apesar do avanço na oferta de produtos e soluções inovadoras para o monitoramento climático e limnológico, há uma lacuna significativa no mapeamento e na avaliação dessas soluções no contexto brasileiro (De Camargo et al., 2023). Produtores e gestores aquícolas têm demandado

informações sobre quais seriam as melhores inovações e tecnologias a serem adquiridas, considerando o custo-benefício em relação ao preço, precisão nos resultados, facilidade de uso e manutenção.

Dentre várias metodologias de análise de produtos, empresas e tecnologias, temos a aplicação do *Benchmarking*. Esse método permite comparar o desempenho de uma organização ou de produtos com outros grupos ou padrões aceitáveis (Giacomini, 2008; Mcdougall, 2012). Essa abordagem permite identificar os pontos fortes e fracos em uma operação ou tecnologia, melhorando os resultados ou o desempenho incrementalmente ao longo do tempo (Fialho et al., 2021), auxiliando usuários, investidores e afins na escolha mais assertiva e viável de processos e produtos.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo atingiu seu objetivo geral ao desenvolver e validar um protocolo inovador para a qualificação de tecnologias aquícolas. A aplicação da metodologia proposta, fundamentada no Sistema de *Score* por Radar de Prontidão (SRP), demonstrou-se uma ferramenta eficaz para superar as limitações das avaliações subjetivas tradicionais, fornecendo um diagnóstico padronizado e robusto em relação a maturidade tecnológica de novos produtos.

Em resposta ao primeiro objetivo específico, o mapeamento do panorama tecnológico e comercial permitiu classificar as soluções de monitoramento disponíveis (n=25), evidenciando uma lacuna de mercado para dispositivos de baixo custo que ofereçam precisão científica. Essa análise fundamentou a seleção do MVP.aqua como objeto de estudo representativo, validando sua pertinência para os testes de viabilidade técnica e econômica propostos.

A execução do protocolo experimental, por meio dos níveis TRL 4, 5 e 6, revelou uma disparidade crítica no desempenho do protótipo selecionado. A metodologia SRP identificou que, enquanto o “cérebro” do sistema (*software* e usabilidade) atingiu maturidade elevada (nível 4), a “estrutura física” (*hardware* e robustez) regrediu ao enfrentar a complexidade do ambiente de campo. Essa constatação confirma a hipótese de que a validação em ambiente controlado (laboratório) é insuficiente para garantir a resiliência operacional exigida pelos sistemas de produção aquícola.

A análise final dos resultados comprovou a robustez e a aplicabilidade do protocolo como ferramenta de gestão tecnológica. O método evitou que o sucesso das funcionalidades lógicas mascarasse as falhas estruturais de vedação e de autonomia energética, atuando como um “filtro de realidade” necessário antes da comercialização. Conclui-se, portanto, que o protocolo validado preenche uma lacuna metodológica no setor, oferecendo um roteiro seguro para transformar protótipos acadêmicos em produtos de mercado confiáveis.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão deste protocolo para incluir dimensões de sustentabilidade e ciclo de vida do produto. No caso específico do MVP avaliado, indica-se o redesenho da arquitetura de potência para inclusão de *energy harvesting* e a migração para invólucros industriais, visando superar o platô de desenvolvimento identificado e atingir a prontidão comercial plena.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, A. F. et al. *Charting the aquaculture internet of things impact: Key applications, challenges, and future trend*. **Aquaculture Reports**, v. 39, 102358, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102358>.
- ABU SAMAH, A. et al. *Aquaculture Entrepreneurs' Adaptation Strategies to Climate Change*. **Sustainability**, v. 13, n. 11410, 2021.
- ARASU, I. M. et al. *AQUASENSE — aquaculture water quality monitoring framework using autonomous sensors*. **Aquaculture International**, v. 32, p. 9119–9135, 2024.
- AREPALLI, P. G. et al. *An IoT based smart water quality assessment framework for aqua-ponds management using Dilated Spatial-temporal Convolution N*. [S. l.: s. n.], 2023.
- BRANDE, M. R. et al. Economic and financial risks of commercial tilapia cage culture in a neotropical reservoir. *Heliyon*, v. 9, e16336, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16336>.
- BUENO, G. W. et al. *Agricultural Transformation with 5.0 Technologies: The Digitization of Aquaculture*. **The Lector E. V.**, [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n3-110>.
- BUENO, G. W. et al. *Challenges to Advance Aquaculture 4.0 in Brazil*. **World Aquaculture**, [S. l.], p. 37-42, out. 2021.
- CHEN, C. H. et al. *Article on sensors and water quality monitoring*. **Sensors**, v. 22, 6700, 2022.
- CHEN, G. X. et al. *Estimating water quality parameters of freshwater aquaculture ponds using UAV-based multispectral images*. **Agricultural Water Management**, v. 304, 109088, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109088>.
- DE CAMARGO, E. T. et al. *Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review*. **Sensors**, v. 23, n. 9, 4424, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23094424>.
- EZE, E.; AJMAL, T. et al. *Aquaculture 4.0 hybrid neural network multivariate water quality parameters forecasting model*. [S. l.: s. n.], 2023.
- EZE, E.; AJMAL, T.; SMITH, S. L. A. K. *Developing a Novel Water Quality Prediction Model for a South African Aquaculture Farm*. [S. l.: s. n.], 2021.
- FENG, D. et al. *Paper on ecological data modeling*. **Ecological Informatics**, v. 80, 102501, 2024.
- FIALHO, N. S. et al. *Environmental sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a neotropical region*. **Ecological Indicators**, v. 129, 108008, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108008>.

- FUENTES-PÉREZ, J. F.; SANZ-RONDA, F. J. *A Custom Sensor Network for Autonomous Water Quality Assessment in Fish Farms*. **Electronics**, v. 10, n. 18, 2192, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics10182192>.
- GALAPPATHTHI, E. K. et al. *Climate change adaptation in aquaculture*. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 4, p. 2160–2176, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/raq.12427>.
- GIACOMINI, P. *Use of the dairy records database to establish benchmarks and estimates for potential economic improvements of individual herds*. In: ICAR BIENNIAL SESSION, 36., 2008, Niagara Falls, USA. *Proceedings.....* (ICAR Technical Series No. 13). [S. l.: s. n.], 2008. p. 221-225.
- HOSSAIN, M. S. et al. *Paper on Climate Change Adaptation in Aquaculture*. **Aquaculture International**, v. 33, 330, 2025.
- HUAN, J. et al. *Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT*. **Aquacultural Engineering**, v. 90, 102088, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>.
- INDERAJA, B. M. et al. *Observability-based sensor selection in fish ponds: Application to pond aquaculture in Indonesia*. **Aquacultural Engineering**, v. 98, 102258, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102258>.
- JAMROEN, C. et al. *Paper on smart agricultural monitoring technology*. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, 100072, 2023.
- LIN, J. Y.; LIN, W. H.; TSENG, H. L. *An Integrated Wireless Multi-Sensor System for Monitoring the Water Quality of Aquaculture*. **Sensors**, v. 21, n. 24, 8179, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21248179>.
- LIU, X. Y. et al. *Monitoring water quality parameters of freshwater aquaculture ponds using UAV-based multispectral images*. **Ecological Indicators**, v. 167, 112644, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112644>.
- MANOHARAN, H. et al. *Examining the effect of aquaculture using sensor-based technology with machine learning algorithm*. **Aquaculture Research**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/are.14821>.
- MOHD JAIS, N. A. et al. *Improved accuracy in IoT-Based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensor–s - Asian seabass fish farming*. **Heliyon**, v. 10, e29022, 2024.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). **Applied statistics and probability for engineers** (6th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- MORESI, Eduardo Amadeu Dutra; BRAGA FILHO, Mário de Oliveira; BARBOSA, Jair Alves. *Modelo de análise de prontidão para inovação para empresas nascentes*. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 5, p. 40685-40704, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n5->

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **NASA Systems Engineering Handbook**. Rev. 2. Washington, D.C.: NASA, 2016. (NASA SP-2016-6105). Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170001761>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA (FAO). **The State of World Fisheries and Aquaculture 2024**: Blue Transformation in action. Rome: FAO, 2024.
- PUTRA, F. P. E. et al. *Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds*. **Brilliance: Jurnal Riset dan Konseptual**, v. 4, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.4231>.
- R Core Team. (2023). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.r-project.org/>
- SAMPAIO, F. G. et al. *Unveiling low-to-high-frequency data sampling caveats for aquaculture environmental monitoring and management*. **Aquaculture Reports**, v. 20, 100764, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aqirep.2021.100764>.
- SASIKUMAR, R. et al. *Design, development, and deployment of a sensor-based aquaculture automation system*. **Aquaculture International**, v. 32, p. 6431–6447, 2024.
- SHETE, R. P.; BONGALE, A. M.; DHARRAO, D. *IoT-enabled effective real-time water quality monitoring method for aquaculture*. **MethodsX**, v. 13, 102906, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102906>.
- SILVA, E. M. et al. Climatologia e Mudanças Climáticas: Avaliação da Produção Bibliográfica no Período de 2009 a 2019. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 (Suplemento), p. 551–562, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630017>.
- SINGH, M.; SAHOO, K. S.; NAYYAR, A. *Sustainable IoT Solution for Freshwater Aquaculture Management*. **IEEE Sensors Journal**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3188639>.
- STOJANOVIC, N.; CHAUDHARY, S. *Real Time Water Quality Monitoring in Aquaculture using IoT Sensors and Cloud-Based Analytics*. **Research Journal of Computer Systems and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 174–187, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.52710/rjcse.86>.
- SU, X. *Paper on contaminant detection in aquaculture*. [S. l.: s. n.], 2020.
- TSAI, K. L. et al. *IoT based Smart Aquaculture System with Automatic Aerating and Water Quality Monitoring*. **Journal of Internet Technology**, v. 23, n. 1, p. 184, 2022.
- VALENTI, W. C. et al. *Aquaculture in Brazil: past, present and future*. **Aquaculture Reports**, v. 19, 100611, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>.

- WIRANTO, G. et al. *Design and Implementation of Wireless Sensors and Android Based Application for Highly Efficient Aquaculture Management System*. **EMITTER International Journal of Engineering Technology**, v. 8, n. 2, p. 355–371, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24003/emitter.v8i2.520>.
- YADAV, N. K. et al. *Climate change effects on aquaculture production and its sustainable management through climate-resilient adaptation strategies: a review*. [S. l.: s. n.], 2024.
- ZAMORA-GARCIA, I. et al. *Mobile digital colorimetry for the determination of ammonia in aquaculture applications*. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 181, 105960, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105960>.
- Zar, J. H. (2010). **Biostatistical analysis** (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.