CAPÍTULO 10

Paraprobióticos e pós-bióticos na aquicultura: fundamentos, mecanismos e perspectivas

Maurício Antônio Paz Martins[1], Stéfane Silva Sauzem[1], Gregorio Cargnin[1], Diuly Bortoluzzi Falcone[1], Leila Picolli da Silva[1]

https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-50-3.c1

Resumo

As restrições ao uso de promotores de crescimento antimicrobianos intensificaram a busca por alternativas seguras e sustentáveis, que garantam a saúde e a produtividade animal. Neste cenário, os paraprobióticos e os pós-bióticos despontam como estratégias promissoras para a aquicultura, combinando vantagens tecnológicas ao processamento de rações a múltiplos efeitos imunomoduladores e metabólicos. Os paraprobióticos compreendem células microbianas não viáveis e seus constituintes estruturais, capazes de estimular respostas fisiológicas e imunológicas no hospedeiro, sem a exigência de viabilidade celular. Por sua vez, os pós-bióticos constituem preparações de microrganismos inanimados, suas frações e metabólitos funcionais associados. Ambas as intervenções atuam na modulação da microbiota intestinal, no fortalecimento imunológico e na otimização da absorção de nutrientes, com reflexos positivos sobre o desempenho dos peixes, mesmo em condições de estresse e desafio sanitário. Este capítulo aborda os principais avanços sobre a aplicação de paraprobióticos e pós-bióticos na aquicultura, explorando seus conceitos, métodos de obtenção, mecanismos de ação e seus impactos sobre a produtividade zootécnica. Por fim, discutem-se as perspectivas e necessidades de pesquisas futuras voltadas à padronização dos processos de obtenção desses aditivos, à validação de seus efeitos sob estresse produtivo e à sua viabilidade econômica em escala comercial.

[1]Departamento de Zootecnia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

© 2024 Mérida Publishers CC-BY 4.0

Palavras-chave: aditivos alimentares, compostos bioativos, microbiota, nutrição animal, piscicultura.

1. Introdução

A expansão da aquicultura mundial passa por uma mudança de paradigma, impulsionada por crescentes preocupações com a resistência antimicrobiana, a segurança alimentar e a sustentabilidade (FAO, 2026). As elevadas densidades de estocagem, inerentes à intensificação produtiva, expõem os peixes a condições de estresse, comprometendo suas respostas imunológicas e aumentando a suscetibilidade a enfermidades (Pavanelli *et al.* 2002; Urbinati; Carneiro, 2004). Por décadas, antibióticos foram utilizados como promotores de crescimento antimicrobianos (PCAs) para o controle de patógenos, a manutenção da saúde e a otimização do desempenho zootécnico. No entanto, o seu uso prolongado em doses subterapêuticas acelerou o surgimento de bactérias multirresistentes, representando uma ameaça à saúde animal e à saúde pública (Aidara-Kane *et al*. 2018; Saeed *et al.* 2021).

Diante desse cenário, e sob a pressão de mercados internacionais - encabeçados pela União Europeia, que baniu os PCAs em 2006 (European Commission, 2005) - marcos regulatórios internacionais tornaram-se cada vez mais rigorosos. Seguindo a mesma tendência, o Brasil promoveu a eliminação gradual de uso dos PCAs, culminando recentemente na sua proibição completa pela Portaria SDA/MAPA nº 1.617, de 24 de abril de 2026 (Brasil, 2026).

Nessa evolução regulatória, intensificaram-se as buscas por alternativas seguras, eficazes e sustentáveis, capazes de preservar a integridade da microbiota, da saúde e do desempenho animal, além de assegurar a sustentabilidade ambiental. Neste contexto, intensificaram-se os estudos com probióticos e prebióticos, bem como, surgiram novos bioativos nessa linha protetiva, como os paraprobióticos e os pós-bióticos, que representam categorias distintas, porém complementares, de produtos microbianos (Wang *et al*. 2026).

Os paraprobióticos são constituídos por microrganismos inativados, ou por seus componentes celulares, capazes de promover efeitos benéficos ao hospedeiro sem a necessidade de viabilidade celular, diferentemente dos probióticos convencionais (Choudhury; Kamilya, 2019). Por sua vez, os pós-bióticos correspondem aos metabólitos funcionais e subprodutos secretados por microrganismos específicos (Liu, 2023), incluindo um complexo de neurotransmissores, peptídeos e ácidos orgânicos, ácidos graxos de cadeia curta, bacteriocinas e vitaminas (Sharafi *et al*. 2024). Estes compostos destacam-se por demonstrar propriedades antimicrobianas, antioxidantes, anti-inflamatórias, imunomoduladoras, antiproliferativas e hepatoprotetoras (Kaur *et al*. 2021).

Considerando a relevância dessa temática, apresentamos este capítulo com vistas a explorar os avanços científicos relacionados ao uso de paraprobióticos e pós-bióticos na aquicultura. Para tanto, serão abordados o enquadramento conceitual e os seus métodos de obtenção, destacando suas vantagens de estabilidade no processamento de rações; seus principais mecanismos de ação nas respostas metabólicas e de imunidade dos peixes, bem como suas implicações no desempenho zootécnico e nas perspectivas para a nutrição aquícola sustentável.

2. Aditivos funcionais e enquadramento conceitual dos paraprobióticos e pós-bióticos

Os aditivos funcionais são substâncias incorporadas às formulações para modificar as suas características físico-químicas, influenciar o desempenho dos animais ou melhorar a qualidade do produto final (Dawood *et al*., 2018). Essa categoria engloba uma ampla diversidade de compostos, os probióticos, prebióticos, simbióticos, fitobióticos, nucleotídeos, enzimas e ácidos orgânicos, que atuam no fortalecimento da integridade da barreira intestinal, na restrição de patógenos oportunistas e no estímulo às enzimas digestivas, com reflexos positivos sobre desempenho geral (Mohammadi *et al*., 2021). Contudo, a eficácia destes aditivos varia de acordo com a espécie cultivada, o sistema de produção,

o estágio de desenvolvimento, a dosagem e as condições ambientais (Merrifield *et al*., 2010; Ringø *et al*., 2018). Além disso, a inclusão desses aditivos atenua os efeitos nocivos de fatores antinutricionais decorrentes do uso crescente de fontes proteicas vegetais, favorecendo a digestibilidade dos nutrientes, a qualidade e a aceitabilidade das rações (Avella *et al*., 2011; He *et al*., 2020; Zarantoniello *et al*., 2021).

Entre as diferentes categorias, destacam-se os paraprobióticos e pós-bióticos, que têm despertado crescente interesse como alternativas promissoras aos PCAs na aquicultura. Esses aditivos exercem múltiplos efeitos benéficos ao hospedeiro, como modulação imune; atividades antioxidante, anti-inflamatória e antiestresse, além de contribuírem para a redução dos impactos ambientais associados à produção intensiva (Liu *et al.*, 2023). Embora compartilhem propriedades funcionais, os paraprobióticos e pós-bióticos possuem particularidades conceituais que requerem distinção, com vistas à adequada compreensão de seus mecanismos de ação e potenciais aplicações.

Os paraprobióticos são definidos como células microbianas não viáveis e seus constituintes celulares estruturais, capazes de estimular respostas imunológicas e fisiológicas, trazendo benefícios ao hospedeiro (Taverniti; Guglielmetti, 2011; Siciliano *et al.*, 2021). Embora destituídos de capacidade multiplicativa ou atividade metabólica ativa, conservam componentes capazes de interagir com o hospedeiro e desencadear respostas biológicas (TavernitI; Guglielmetti, 2011). Entre esses componentes estão proteínas, peptidoglicanos, lipídios de membrana, ácidos nucleicos, polissacarídeos e outros constituintes da superfície celular (TavernitI; Guglielmetti, 2011; De Almada *et al*., 2016).

Os pós-bióticos, por sua vez, apresentam um conceito mais amplo e atualmente são definidos como preparações de microrganismos inanimados, suas frações e metabólitos funcionais associados (ácidos graxos de cadeia curta, peptídeos e exopolissacarídeos) que conferem benefício à saúde do hospedeiro (Salminen *et al*., 2021).

Em contraste com os probióticos convencionais — definidos como microrganismos vivos (Hill *et al*., 2014) —, os paraprobióticos e pós-bióticos não

dependem da viabilidade celular para atuar. Essa característica confere vantagem tecnológica no processamento e armazenamento das rações, eliminando a dependência da sobrevivência microbiana até o local de ação no trato digestivo (TavernitI; Guglielmetti, 2011; De Almada *et al*., 2016; Siciliano *et al*., 2021). Assim, a correta caracterização da matriz (seja biomassa inativada ou extrato metabólico) permite relacionar a composição do aditivo aos seus mecanismos específicos de ação e aos efeitos biológicos esperados.

Em síntese, a principal distinção entre probióticos, paraprobióticos e pós-bióticos reside na natureza da preparação e nos critérios utilizados para sua classificação, aspectos que orientam a escolha dos métodos de obtenção e a caracterização dos produtos finais (De Almada *et al*., 2016; Salminen *et al*., 2021). Dessa forma, a compreensão dos processos industriais de inativação, lise e conservação torna-se importante para assegurar a integridade desses compostos bioativos e viabilizar sua aplicação nas rações.

3. Métodos de obtenção e composição bioativa

A obtenção de paraprobióticos e pós-bióticos envolve encadeadas de bioprocessamento, que incluem a seleção de cepas, o cultivo em condições controladas, a recuperação da biomassa e a aplicação de tratamentos de inativação celular ou de extração de metabólitos (Siciliano *et al*., 2021). A escolha do método adequado depende da composição desejada para o produto final e dos efeitos biológicos que se pretende alcançar (De Almada *et al*., 2016; Zhu *et al*., 2025).

3.1 Tratamentos de inativação microbiana

Os tratamentos térmicos são amplamente utilizados para inativar microrganismos por meio da exposição a temperaturas elevadas durante determinado período (De Almada *et al*., 2016; Sun *et al*., 2023). Técnicas como a pasteurização e o aquecimento controlado podem comprometer a viabilidade

celular, apresentando vantagens relacionadas à simplicidade e à facilidade de aplicação (Almahbashi; Güneş Altuntaş, 2025). Contudo, o binômio tempo-temperatura exige especial atenção, para inativar as células sem comprometer a bioatividade das moléculas. Em estudo com *Lacticaseibacillus paracasei* e *Bifidobacterium lactis*, tratamentos de 70 a 121 °C por 10 minutos inativaram as células, com rompimento da estrutura celular e liberação de conteúdo intracelular. As atividades antioxidante e anti-inflamatória foram mantidas em temperaturas inferiores a 100 °C, ao passo que o aquecimento a 121 °C reduziu a atividade antioxidante e alterou de forma significativa o perfil químico do pós-biótico (Sun *et al*., 2023). Por isso, a temperatura e o tempo de exposição devem ser ajustados conforme a resistência do microrganismo e as características desejadas para o produto final. A resposta ao tratamento térmico também varia entre as cepas: em comparação envolvendo *Lactiplantibacillus plantarum*, *Leuconostoc mesenteroides* e *Pediococcus pentosaceus*, o tratamento térmico eliminou as células viáveis e a eficácia do produto obtido diferiu conforme a cepa (Almahbashi; Güneş Altuntaş, 2025).

Entre os métodos físicos, destacam-se a alta pressão hidrostática (atua sobre a integridade das membranas e causa desnaturação das proteínas), a radiação ultravioleta (danifica o material genético) e a ultrassonicação (promove inativação, lise e liberação de compostos intracelulares) (De Almada *et al*., 2016; Siciliano *et al*., 2021). No entanto, ao comparar métodos de preparo de pós-bióticos a partir de bactérias láticas, Almahbashi e Güneş Altuntaş (2025) observaram que o tratamento enzimático combinado à ultrassonicação foi menos eficaz na remoção de células viáveis do que o tratamento térmico.

A inativação química utiliza substâncias ou alterações no meio capazes de comprometer a integridade e as funções celulares (De Almada *et al*., 2016; Siciliano *et al*., 2021). Ao comparar cinco tratamentos de inativação em bactérias láticas recombinantes (calor, etanol, ultrassom, radiação UV e radiação gama), Zahirović *et al*. (2025) demonstraram que o etanol e o calor foram os métodos mais efetivos em tornar as células não viáveis. Porém, a aplicação de agentes químicos exige atenção à presença de resíduos, para garantir a segurança de uso do produto obtido nas rações (Salminen *et al*., 2021).

3.2 Ruptura celular, frações bioativas e caracterização química

Para a obtenção de preparações enriquecidas em constituintes específicos, aplicam-se técnicas de ruptura celular como ultrassonicação, homogeneização sob alta pressão e moagem mecânica (Middelberg, 1995) que desorganizam as estruturas celulares e a liberam majoritariamente proteínas, polissacarídeos e lipídios.

Ao revisar os métodos de extração de peptidoglicano, Yao *et al*. (2025) observaram que as lises químicas tradicionais apresentam baixo rendimento, maior tempo de processamento e risco de degradação ou modificação da estrutura do composto. Em comparação, técnicas assistidas por processos mecânicos, como moagem e ultrassonicação, aumentam o rendimento e reduzem o tempo de extração, embora possam exigir equipamentos específicos e etapas adicionais de purificação. Os métodos biológicos, como a extração enzimática, apresentam maior seletividade e melhor preservação da integridade estrutural do peptidoglicano, mas sua eficiência depende das condições empregadas. Assim, a escolha do método deve considerar o rendimento, a pureza e a preservação das características estruturais do composto (Yao *et al*., 2025). Após a lise celular, processos de centrifugação, filtração e purificação são empregadas para isolar e concentrar frações bioativos de interesse, a exemplo de exopolissacarídeos e peptídeos funcionais (Sørensen *et al*., 2022).

A composição final das preparações reflete a linhagem microbiana, as condições de cultivo e os métodos de processamento utilizados (Salminen *et al.*, 2021; Zhu *et al*., 2025). A parede celular representa uma importante fonte de componentes bioativos em preparações de microrganismos inativados. Entre seus constituintes estão o peptidoglicano, os ácidos teicoicos e lipoteicoicos, presentes principalmente em bactérias Gram-positivas, e os lipopolissacarídeos (LPS), característicos da membrana externa de bactérias Gram-negativas. A composição e a proporção desses elementos variam conforme o grupo microbiano (Chapot-Chartier; Kulakauskas, 2014).

Outros componentes incluem proteínas de superfície, como as da camada S, que reveste a superfície externa de muitas bactérias (Hynönen; Palva, 2013;

Mercier-Bonin; Chapot-Chartier, 2017). Ainda fazem parte desse grupo os polissacarídeos capsulares e exopolissacarídeos (Chapot-Chartier; Kulakauskas, 2014; Sørensen *et al*., 2022), proteínas intracelulares, enzimas e ácidos nucleicos (Scott *et al*. 2022). A quantidade e a disponibilidade desses constituintes dependem da integridade das células e do grau de ruptura promovido durante o processamento (Sun *et al*., 2023; Zhu *et al*., 2025). Assim, preparações contendo células inteiras inativadas apresentam composição distinta daquelas obtidas por desintegração celular e separação de frações (Zhu *et al*., 2025).

Além dos componentes celulares, determinadas preparações podem conter metabólitos produzidos durante o crescimento e a fermentação microbiana. Entre os principais estão os ácidos orgânicos (ácido lático, acético e outros) e ácidos graxos de cadeia curta, incluindo propionato e butirato; acompanhados de bacteriocinas, peptídeos, enzimas e vitaminas (Scott *et al*. 2022; Amobonye *et al*., 2025). A síntese dessas frações e exopolissacarídeos varia segundo o pH, a temperatura, o meio de cultura e as demais condições de cultivo (Souza *et al*., 2017; Correa Deza *et al*., 2023; Sørensen *et al*., 2022)

A permanência destes metabólitos na preparação final depende das etapas de recuperação: quando a biomassa é extensivamente lavada, os metabólitos podem ser removidos da matriz (Vinderola *et al*., 2025). Por isso, a caracterização química das preparações é importante para identificar os compostos presentes e determinar sua concentração no produto final (Salminen *et al*., 2021).

É importante distinguir, entretanto, a presença de metabólitos em uma preparação de microrganismos inanimados da utilização de substâncias isoladas. Conforme o consenso da Associação Científica Internacional para Probióticos e Prebióticos (ISAPP), pós-bióticos são preparações de microrganismos inanimados e/ou seus componentes que conferem benefício à saúde do hospedeiro. Portanto, metabólitos purificados isoladamente não se enquadram automaticamente nessa definição (Salminen *et al*., 2021; Scott *et al*. 2022).

A caracterização dessas preparações deve considerar a identificação das cepas utilizadas, a descrição do processo de inativação e a quantificação de componentes funcionais relevantes, permitindo maior consistência e reprodutibilidade entre produtos. Como os pós-bióticos podem apresentar composição complexa, nem sempre é viável identificar e quantificar individualmente todos os seus constituintes. A avaliação da viabilidade microbiana residual e da contaminação também é importante para o controle de qualidade e a segurança das preparações (Vinderola *et al*., 2025).

4. Mecanismos de ação

Os paraprobióticos e pós-bióticos exercem efeitos biológicos por diferentes mecanismos, incluindo a modulação da resposta imune, a manutenção da integridade da barreira intestinal, a interação com a microbiota e a regulação de vias associadas à inflamação e ao metabolismo (Salminen *et al*., 2021; MA *et al*. 2023).

No caso dos paraprobióticos, sua ação está relacionada majoritariamente com a interação entre suas estruturas celulares e as células do hospedeiro. Componentes como peptidoglicanos, ácidos lipoteicoicos e proteínas de superfície são detectados por receptores de reconhecimento de padrões (PRRs), incluindo os Toll-like (TLRs), presentes em células do sistema imunológico e do trato gastrointestinal. Essas interações desencadeiam vias de sinalização envolvidas na regulação da resposta inflamatória, na manutenção da barreira intestinal e na atividade das células imunológicas (Taverniti; Guglielmetti, 2011; Siciliano *et al*., 2021).

A participação desses mecanismos de ação tem sido evidenciados em estudos com diferentes espécies de peixes. Ao compararem *Bacillus pumilus* SE5 viável e inativado por calor em dietas para juvenis de *Epinephelus coioides*, observaram respostas expressivas da forma inativada sobre parâmetros imunológicos e de crescimento. Esses resultados indicam que componentes estruturais preservados após a inativação participam ativamente de interações

com o hospedeiro (Yan *et al*. 2016). Ainda, ao verificaram que a inclusão de 200 mg/kg de *Lactiplantibacillus plantarum* VSG3 inativado termicamente em dietas para juvenis de *Cyprinus carpio* reduziu a expressão de IL-1β e TNF-α e aumentou a expressão de IL-10 (Giri *et al*. 2024). A redução dos marcadores pró-inflamatórios associada ao aumento da expressão de uma citocina com função reguladora, sugere a modulação da resposta imunológica, ao invés de uma estimulação inflamatória. Essa interpretação é compatível com o aumento da sobrevivência observado após o desafio com *Aeromonas hydrophila*. Por sua vez, Sousa *et al*. (2022) demonstraram, por ensaio *in vitro*, que a adição de biomassa inativada pelo calor de *Pseudoalteromonas rubra* modulou a comunidade do bacterioplâncton na água de cultivo, favorecendo o crescimento de bactérias predadoras naturais e reduzindo a abundância de patógenos oportunistas, por controle predatório e exclusão competitiva.

Os pós-bióticos atuam por meio de metabólitos funcionais e fatores solúveis, que são subprodutos secretados pelos microrganismos. Esses compostos participam da modulação da resposta imunológica e da regulação de processos inflamatórios e oxidativos, influenciando a expressão de citocinas e a atividade de enzimas antioxidantes (Salminen *et al*., 2021; Sumon *et al*., 2025). Em *Oncorhynchus mykiss,* a utilização de uma preparação pós-biótica derivada de *Weissella cibaria* promoveu alterações na expressão de citocinas, caracterizadas pelo aumento de IL-1β e redução de TNF-α e IL-8, acompanhadas pelo aumento de contagem de bactérias ácido-láticas intestinais e maior resistência à infecção por *Yersinia ruckeri* (Quintanilla-Pineda *et al*., 2024).

Em estudo com garoupas híbridas, a inclusão dietética de pós-bióticos obtidos da fermentação por *Lactobacillus acidophilus* e *Saccharomyces cerevisiae* atenuou as alterações inflamatórias induzidas pelo estresse amoniacal, caracterizados pela redução da expressão de IL-1, IL-6 e NF-KB e pelo aumento de TGF-β. Essas respostas foram acompanhadas pela redução da peroxidação lipídica e por alterações na atividade de enzimas antioxidantes, evidenciando a associação entre a modulação inflamatória e a proteção contra danos oxidativos (Cheng *et al*., 2026).

Em conjunto, estes achados evidenciam que os mecanismos de ação desencadeados pelos paraprobióticos e pós-bióticos se traduzem em respostas fisiológicas e imunológicas sistêmicas, fundamentando o interesse por sua aplicação prática na nutrição e produção aquícola.

5. Aplicações, respostas zootécnicas e perspectivas futuras

Os efeitos zootécnicos dos paraprobióticos e pós-bióticos estão associados às características das preparações, as concentrações utilizadas e as espécies avaliadas.

A resistência térmica e física constituem as principais vantagens operacionais destes bióticos sobre as cepas de probióticos vivos (Dahmouni *et al*., 2026). Como o potencial funcional dessas matrizes não está condicionado à viabilidade celular, sua inclusão proporciona maior flexibilidade de formulação para a indústria da nutrição animal. Durante a fabricação de rações o processo de extrusão submete a matriz alimentar a condições severas de temperatura e pressão. Enquanto probióticos convencionais demonstram elevada taxa de mortalidade quando expostos a pressões de 15 a 40 bar e altas temperaturas, os preparados não viáveis contornam completamente essa barreira física e térmica (Linh *et al*., 2026). Essa estabilidade permite que o aditivo seja incorporado diretamente na mistura inicial, reduzindo custos operacionais ao eliminar a necessidade de sistemas de injeção líquida ou recobrimento pós extrusão.

Paralelamente à integridade durante o processamento, a substituição de células vivas por esses bióticos estende significativamente o tempo de prateleira dos produtos finais. Devido à sua estabilidade molecular, essas matrizes dispensam exigências de refrigeração ou o uso de embalagens com barreiras físicas ao longo do transporte e armazenamento (Oprisanu *et al*., 2026). Adicionalmente, a utilização de probióticos vivos em rações comerciais levanta preocupações relativas à instabilidade microbiológica e ao risco de contaminações oportunistas. Em contrapartida, os paraprobióticos e pós-bióticos

anulam esse risco por serem incapazes de se replicar na matriz alimentar (Ranjbar *et al.*, 2026).

Alguns pós-bióticos — em especial os ácidos graxos de cadeia curta e as bacteriocinas — atuam como preservativos ativos nas rações. Esses componentes promovem a desestabilização de membranas bacterianas e a acidificação citoplasmática de patógenos, inibindo a formação de biofilmes de *Salmonella spp., Escherichia coli e Listeria spp*., tanto nas linhas de produção industrial quanto no trato gastrintestinal dos animais (Zavisic *et al*., 2024).

Em se tratando de efeitos sobre o desempenho zootécnico, a inclusão de bactérias inativadas pelo calor demonstrou resultados positivos sobre o ganho de peso, a conversão alimentar e a eficiência da utilização da proteína em *Epinephelus coioides*, *Paralichthys olivaceus* e *Larimichthys crocea* (Yan *et al*., 2016; Hasan *et al*., 2019). No entanto, os efeitos dessas respostas variam conforme o nível de inclusão. Em juvenis de *Larimichthys crocea,* a inclusão de 0,2% de *Lactobacillus acidophilus* inativado apresentou efeitos mais expressivos sobre o crescimento, além de melhorias na atividade de enzimas digestivas, na capacidade antioxidante e na integridade da barreira intestinal, em comparação aos demais níveis avaliados (0,1%; 0,4% e 0,8%) (He *et al*., 2024). Além dos efeitos sobre o desempenho, a utilização de bactérias inativadas também tem demonstrado resultados positivos sobre a resistência a desafios sanitários. Em *Miichthys miiuy,* células vivas e inativadas de *Clostridium butyricum* aumentaram indicadores de resposta imune e a sobrevivência após desafios com patógenos. Entretanto, o sobrenadante da cultura não promoveu respostas equivalentes, indicando que os efeitos podem estar associados à presença das células e de seus componentes, e não necessariamente aos metabólitos extracelulares.

6. Considerações finais

Como visto, o emprego de paraprobióticos e pós-bióticos desponta como uma estratégia promissora para a nutrição e a sanidade na aquicultura, combinando vantagens tecnológicas de estabilidade ao processamento de

rações a múltiplos efeitos imunomoduladores e metabólicos. A intensidade das respostas desencadeadas pelo uso desses bióticos está diretamente vinculada à composição das preparações, aos métodos de inativação empregados, às dosagens administradas e às características fisiológicas da espécie-alvo. Nesse sentido, a elucidação detalhada de seus mecanismos de ação requer investigações integradas que correlacionem a caracterização físico-química dos componentes bioativos às respostas fisiológicas, metabólicas, imunológicas e zootécnicas, considerando as particularidades das espécies e as condições de aplicação.

Diante da complexidade dessas matrizes e das exigências da indústria de nutrição animal, as pesquisas futuras devem priorizar a padronização dos processos de obtenção e purificação desses aditivos, a validação de seus efeitos sob estresses de cultivo e a avaliação de sua viabilidade econômica em escala comercial. Dessa forma, a expansão do conhecimento sobre esses compostos contribuirá para a consolidação de estratégias nutricionais seguras, estáveis e eficientes na aquicultura.

7.Referências bibliográficas

AIDARA-KANE A. *et al*. World Health Organization (WHO) guidelines on use of medically important antimicrobials in food-producing animals. **Antimicrobial Resistance & Infection Control**, 7, 7, 1-8, 2018. DOI: https://doi.org/10.1186/s13756-017-0294-9.

ALMAHBASHI, A. and GUNES A. E. From Preparation to Bioactivity: A Comparative Study on Preparation Methods and Characterization of Postbiotics. **Food Science & Nutrition**, 13, 70294, 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/fsn3.70294.

AMOBONYE, A. *et al.* Postbiotics: an insightful review of the latest category in functional biotics. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 41, 293, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-025-04483-8.

AVELLA, M. A. *et al*. Use of Enterococcus faecium to improve common sole *(Solea solea)* larviculture. **Aquaculture**, 315, 384–393, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.02.046.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Portaria SDA/MAPA nº 1.617, de 24 de abril de 2026.** Proíbe, em todo o território nacional, a importação, a fabricação, a comercialização e o uso de aditivos melhoradores de desempenho que contêm antimicrobianos classificados como importantes na medicina humana ou veterinária, e cancela os registros dos produtos correspondentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 77, p. 3, 27 abr. 2026.

CHAPOT-CHARTIER, M. P. and KULAKAUSKAS, S. Cell wall structure and function in lactic acid bactéria. **Microbial Cell Factories***,* 13, 2014. DOI: https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-S1-S9.

CHENG, Z. *et al*. Positive effects of dietary postbiotics on growth, intestinal health, immunity, and ammonia nitrogen tolerance in hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂). **Comparative Immunology Reports**, 10, 200264, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirep.2025.200264

CHOUDHURY, T. G. and KAMILYA, D. Paraprobiotics: an aquaculture perspective. **Reviews in Aquaculture**, 11, 4, 1258–1270, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/raq.12290.

CORREA DEZA, M. A. *et al*. Effect of culture parameters on the heat tolerance and inorganic polyphosphate accumulation by *Lacticaseibacillus rhamnosus* CRL1505, a multifunctional bacterium. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, 39, 7, 182, 2023. DOI: 10.1007/s11274-023-03625-0.

DAHMOUNI, S. *et al*. Postbiotics and paraprobiotics in food biochemistry mechanisms stability and nutritional applications. **NPJ Science of Food**, 10, 242, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41538-026-00838-z.

DAWOOD, M. A. O. *et al*. Beneficial roles of feed additives as immunostimulants in aquaculture: A review. **Reviews in Aquaculture**, 10, 950–974, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/raq.12209.

DE ALMADA, C. N. *et al.* Paraprobiotics: Evidences on their ability to modify biological responses, inactivation methods and perspectives on their application in foods. **Trends in Food Science & Technology**, 58, 96-114, 2016. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.09.011.

EUROPEAN COMMISSION. **Ban on antibiotics as growth promoters in animal feed.** Brussels, 22 Dec. 2005. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_05_1687.

FACHRI, M. F. *et al*. Probiotics and paraprobiotics in aquaculture: a sustainable strategy for enhancing fish growth, health and disease prevention—a review. **Frontiers in Marine Science**, 11, 1499228, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1499228.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). The State of World Fisheries and Aquaculture 2026 (SOFIA) - Blue Transformation Turning Vision Into Impact. Rome: FAO, 2026.

GIRI, S. S. et al. Effect of dietary heat-killed *Lactiplantibacillus plantarum* VSG3 on growth, immunity, antioxidant status, and immune-related gene expression in pathogen-aggravated Cyprinus carpio. **Fish & Shellfish Immunology**, 149, 109547, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109547.

HASAN, M. T. *et al*. Heat-killed Bacillus sp. SJ-10 probiotic acts as a growth and humoral innate immunity response enhancer in olive flounder *(Paralichthys olivaceus)*. **Fish & Shellfish Immunology**, 88, 424–431, 2019. DOI: 10.1016/j.fsi.2019.03.018.

HE, M. *et al*. An evaluation of replacing fish meal with fermented soybean meal in the diets of largemouth bass (*Micropterus salmoides*): Growth, nutrition utilization and intestinal histology. **Aquaculture Research**, 51, 4302–4314, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/are.14774.

HE, W. *et al*. Effects of dietary supplementation with heat-killed Lactobacillus acidophilus on growth performance, digestive enzyme activity, antioxidant capacity, and inflammatory response of juvenile large yellow croaker *(Larimichthys crocea)*. **Fish & Shellfish Immunology**, 151, 109651, 2024. DOI: 10.1016/j.fsi.2024.109651.

HILL, C. *et al*. Expert consensus document. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, 11, 8, 506-14, 2014. DOI: 10.1038/nrgastro.2014.66.

HYNÖNEN, U.; PALVA, A. *Lactobacillus* surface layer proteins: structure, function and applications. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 97, 12, 5225-43, 2013. DOI: 10.1007/s00253-013-4962-2.

HE, W. *et al*. Effects of dietary supplementation with heat-killed *Lactobacillus acidophilus* on growth performance, digestive enzyme activity, antioxidant capacity, and inflammatory response of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*). **Fish and Shellfish Immunology**. v. 151, art. 109651, 2024.

JAFARZADEH, F. *et al*. Harnessing paraprobiotics and postbiotics for enhanced immune function in Asian seabass (Lates calcarifer): Insights into pattern recognition receptor signaling. **Fish Shellfish Immunology**, 151, 109725, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109725.

KAUR, S. *et al*. Perturbations associated with hungry gut microbiome and postbiotic perspectives to strengthen the microbiome health. **Future Foods**, 4, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100043.

KHAKPOUR, M. *et al*. Feasibility of *lactiplantibacillus plantarum* postbiotics production in challenging media by different techniques. **AMB Express**, 14, 47, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s13568-024-01704-5.

LEE, J-Y. *et al*.Valorization of leftover green tea residues through conversion to bioactive peptides using probiotics-aided anaerobic digestion. **Microbial Biotechnology**, 16, 418–431, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/1751-7915.14155

LINH, N. V. *et al*. Postbiotics and Paraprobiotics as Next-Generation Gut Microbiome Modulators in Sustainable Aquaculture Health. **Antibiotics**, 15, 887, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/antibiotics15090887.

LIU, S. *et al*. Ammonia nitrogen stress damages the intestinal mucosal barrier of yellow catfish (Pelteobagrus fulvidraco) and induces intestinal inflammation. **Frontiers in Physiology**, 14, 1279051, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1279051.

LIU, Z. Y. *et al*. Paraprobiotic and postbiotic forms of *Bacillus siamensis* improved growth, immunity, liver and intestinal health in Lateolabrax maculatus fed soybean meal diet. **Fish Shellfish Immunology**, 145, 109370, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109370.

MA, L. *et al*. Postbiotics in Human Health: A Narrative Review. **Nutrients**, 15, 291, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/nu15020291.

MERCIER-BONIN, M., CHAPOT-CHARTIER, M. P. Surface Proteins of *Lactococcus lactis:* Bacterial Resources for Muco-adhesion in the Gastrointestinal Tract. **Frontiers in Microbiology**, 23, 8, 2247, 2017. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02247.

MERRIFIELD, D. L. *et al*. The current status and future focus of probiotic and prebiotic applications for salmonids. **Aquaculture**, 302, 1–18, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.02.007.

MIDDELBERG, A. P. Process-scale disruption of microorganisms. **Biotechnology Advances**, 13, 3, 491-551, 1995. DOI: 10.1016/0734-9750(95)02007-p

MOGHADAM, S. K. *et al.* Postbiotics in food, feed, and culture media: mechanisms and applications of microbial metabolites in sustainable systems. **Food Production, Processing and Nutrition**, 8, 5, 2026. DOI: https://doi.org/10.1186/s43014-025-00356-7.

MOHAMMADI, G. *et al*. The enrichment of diet with beneficial bacteria (single- or multi-strain) in biofloc system enhanced the water quality, growth performance, immune responses, and disease resistance of Nile tilapia *(Oreochromis niloticus)*. **Aquaculture**, 539, 736640, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736640.

OPRISANU, M. *et al*. Postbiotics functionality and safety evaluation of LAB and spore-forming probiotics. **Journal of Functional Foods**, 143, 107411, 2026. DOI: 10.1016/j.jff.2026.107411.

PAVANELLI, G. C. *et al*. **Doenças de peixes: profilaxia, diagnóstico e tratamento.** In: Doenças de peixes: profilaxia, diagnóstico e tratamento, 2022.

QUINTANILLA-PINEDA, M. *et al*. A novel postbiotic product based on Weissella cibaria for enhancing disease resistance in rainbow trout: aquaculture application. **Animals**, 14, 5, 744, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ani14050744.

RAETZ, C. R.; WHITFIELD, C. Lipopolysaccharide endotoxins. **Annual Review of Biochemistry**, 71, 635-700, 2002. DOI: 10.1146/annurev.biochem.71.110601.135414.

RANJBAR, S. *et al.* Safety Assessment of Probiotics and Postbiotics: A Critical Review. **Current Pharmaceutical Biotechnololy**, 2026 DOI: 10.2174/0113892010419857251208064650

RINGØ, E. *et al*. Lactic acid bacteria in finfish—An update. **Frontiers in Microbiology**, 9, 1818, 2018. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01818.

SAEED, M. *et al.* A comprehensive review on the health benefits and nutritional significance of fucoidan polysaccharide derived from brown seaweeds in human, animals and aquatic organisms. **Aquaculture Nutrition**, 27, 633-654, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/anu.13233

SALMINEN, S. *et al.* The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, 18, 649–667, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6.

SCOTT, E. *et al*. Postbiotics and Their Health Modulatory Biomolecules. **Biomolecules**, 4, 12, 1640, 2022. DOI: 10.3390/biom12111640

SHARAFI, H. *et al*. The potential of postbiotics as a novel approach in food packaging and biopreservation: a systematic review of the latest developments. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 64, 12524–12554, 2024. DOI: .https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2253909.

SICILIANO, R. A. *et al.* Paraprobiotics: A New Perspective for Functional Foods and Nutraceuticals. **Nutrients**, 13, 1225, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/nu13041225.

SØRENSEN, H. M. *et al.* Exopolysaccharides of Lactic Acid Bacteria: Production, Purification and Health Benefits towards Functional Food. **Nutrients**, 14, 2938, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/nu14142938.

SOUSA, J. M. G. *et al*. *In vitro* study of the modulatory effects of heat-killed bacterial biomass on aquaculture bacterioplankton communities. **Scientific Reports**, 12, 19699, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-23439-8.

SOUZA, E. C. *et al*. Influencia de la temperatura y pH en la producción de biosurfactantes, bacteriocinas y ácido láctico por *Lactococcus lactis* CECT-4434. CyTA - **Journal of Food**, 15, 4, 525–530, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1306806.

SUMON, M. A. A. *et al.* Epigenetics and postbiotics in aquaculture: Unlocking sustainable solutions through innovation. **Fish & Shellfish Immunology**, 166, 110598, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110598.

SUN, Z. *et al*. Effect of Thermal Inactivation on Antioxidant, Anti-Inflammatory Activities and Chemical Profile of Postbiotics. **Foods**, 12, 3579, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12193579.

TAVERNITI V.; GUGLIELMETTI S. The immunomodulatory properties of probiotic microorganisms beyond their viability (ghost probiotics: proposal of paraprobiotic concept). **Genes & Nutrition**, 6, 3, 261-74, 2011. DOI: 10.1007/s12263-011-0218-x

TRAN, N. T. *et al*. Application of heat-killed probiotics in aquaculture. **Aquaculture**, 548, 737700, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737700.

URBAN, J. *et al.* Postbiotics, a natural feed additive for growth performance, gut microbiota and quality of poultry products. **Current Research in Biotechnology**, 8, 100247, 2024. DOI: 10.1016/j.crbiot.2024.100247.

URBINATI, E. C.; CARNEIRO, P. C. F. **Práticas de manejo e estresse dos peixes em piscicultura intensiva.** In: CYRINO J. E. P, URBINATI E. C., CASTAGNOLLI N. Tópicos especiais em piscicultura de água doce tropicas intensiva. TecArt, São Paulo, p. 171-194, 2004.

VINDEROLA, G. et al. Postbiotics: a perspective on their quantification. **Frontiers in Nutrition**, 12, 1582733, 2025. DOI: 10.3389/fnut.2025.1582733.

WANG, X. *et al*. Paraprobiotics in Modern Broiler Production: Stability, Safety, and Multifunctional Benefits - a Comprehensive Review. **Probiotics and**

Antimicrobial Proteins, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s12602-026-11069-9.

YAN, Y.-Y. *et al*. Effects of dietary live or heat-inactivated autochthonous *Bacillus pumilus* SE5 on growth performance, immune responses and immune gene expression in grouper Epinephelus coioides. **Aquaculture Nutrition**, 22, 3, 698–707, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/anu.12297.

YAO, X. *et al.* A Review on the Extraction, Structural Characterization, Function, and Applications of Peptidoglycan. **Macromolecular Rapid Communications**, 46, 2400654, 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/marc.202400654.

ZAHIROVIĆ, A. *et al.* Postbiotics derived from recombinant lactic acid bacteria exhibit high IL6-binding capacity and suppress IL6-induced STAT3 signaling. **Frontiers in Microbiology**, 16, 1657810, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1657810.

ZARANTONIELLO, M. *et al*. Application of laboratory methods for understanding fish responses to black soldier fly (Hermetia illucens) based diets. **Journal of Insects as Food and Feed**, 8, 1173–1195, 2021. DOI: https://doi.org/10.3920/jiff2020.0135.

ZAVIŠIĆ, G. *et al.* Microbial Contamination of Food: Probiotics and Postbiotics as Potential Biopreservatives. **Foods**, 13, 2487, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13162487.

ZHU, Y. *et al.* The Role of Inactivation Methods in Shaping Postbiotic Composition and Modulating Bioactivity: A Review. **Foods**, 14, 2358, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/foods14132358.