

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Veterinária**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal**

Laura Coelho Kiel de Oliveira

**INFLUÊNCIA DA EMBALAGEM EM ATMOSFERA MODIFICADA E  
TECNOLOGIAS ASSOCIADAS NA SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA DE  
PEIXES: REVISÃO SISTEMÁTICA.**

Belo Horizonte

2025

Laura Coelho Kiel de Oliveira

**INFLUÊNCIA DA EMBALAGEM EM ATMOSFERA MODIFICADA E  
TECNOLOGIAS ASSOCIADAS NA SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA DE  
PEIXES: REVISÃO SISTEMÁTICA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Escola de Veterinária da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Débora Cristina Sampaio de Assis

Belo Horizonte

2025

O48i Oliveira, Laura Coelho Kiel de, 1999 -  
Influência da embalagem em atmosfera modificada e tecnologias associadas na segurança microbiológica de peixes: revisão sistemática/ Laura Coelho Kiel de Oliveira.- 2025.  
155f: il.

Orientadora: Débora Cristina Sampaio de Assis  
Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola de Medicina Veterinária da UFMG, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.  
Bibliografia: f. 130 a 155.

1. Peixe - Teses - 2. Pescado - Teses - I. Assis, Débora Cristina Sampaio de - II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária - III. Título.

CDD - 639.2

Bibliotecária responsável Cristiane Patrícia Gomes CRB 2569  
Biblioteca da Escola de Veterinária, UFMG.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

**LAURA COELHO KIEL DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em **CIÊNCIA ANIMAL**, como requisito para obtenção do grau de **MESTRE** em **CIÊNCIA ANIMAL**, área de concentração **Tecnologia e Inspeção de Produtos de Origem Animal**. Defesa da dissertação intitulada: "**INFLUÊNCIA DA EMBALAGEM EM ATMOSFERA MODIFICADA E TECNOLOGIAS ASSOCIADAS NA SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA DE PEIXES: REVISÃO SISTEMÁTICA.**"

Aprovado(a) em 05 de maio de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Dr.(a). Debora Cristina Sampaio de Assis - Orientador(a)

Dr.(a). Carla Ferreira Soares

Dr.(a). Thaís Michelle Liziere da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Debora Cristina Sampaio de Assis, Professora do Magistério Superior**, em 05/05/2025, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carla Ferreira Soares, Professora do Magistério Superior**, em 05/05/2025, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thaís Michelle Liziere da Silva, Usuária Externa**, em 05/05/2025, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4157952** e o código CRC **AF798A29**.

À minha mãe, por ser luz nos meus caminhos,  
por acreditar em mim mesmo quando eu  
duvidei e por me lembrar todos os dias do  
quanto sou capaz.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente a Deus, que me acompanha e olha por mim em todos os momentos da minha vida, sem Ele nada disso seria possível. À minha mãe, minha grande incentivadora e exemplo de excelência. Obrigada por estar sempre ao meu lado e pelo seu amor incondicional. À minha orientadora, pela paciência, dedicação e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos amigos que, de alguma forma, contribuíram com palavras de incentivo, trocas de conhecimento e momentos de descontração nos dias difíceis. À minha família, por sempre acreditar em mim e torcer pelo meu sucesso. Por fim, agradeço a mim mesma, por não desistir nos dias difíceis, por seguir em frente mesmo diante das incertezas.

## RESUMO

O pescado é um alimento altamente perecível, sujeito à deterioração mesmo sob refrigeração. Para garantir sua segurança e prolongar sua vida útil, diversas tecnologias de conservação têm sido estudadas, com destaque para a embalagem em atmosfera modificada e a embalagem a vácuo. A associação dessas embalagens com tecnologias antimicrobianas naturais, revestimentos comestíveis e tratamentos físicos ou químicos compõe o conceito de tecnologia de barreiras, que busca controlar a microbiota deteriorante e patogênica por meio da combinação de obstáculos ao crescimento bacteriano. Esta dissertação teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a qualidade microbiológica de peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo, isoladamente ou em associação com outras tecnologias. A pesquisa foi conduzida nas bases de dados PubMed Central, Scopus, Web of Science e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), abrangendo publicações de 2015 até 2025. Foram incluídos 116 estudos que atenderam aos critérios de elegibilidade. As informações extraídas abrangeram o tipo de embalagem, espécie de peixe, local de coleta, tratamentos aplicados, tecnologias associadas, microrganismos investigados, métodos de identificação e conclusão de cada experimento. Os resultados mostraram que a associação de atmosfera modificada ou vácuo com outras tecnologias promove maior eficácia na inibição de microrganismos como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas* spp. e *Enterobacteriaceae*. Tecnologias como óleos essenciais, nanopartículas, culturas protetoras e ácidos orgânicos apresentaram desempenho satisfatório. Observou-se também o uso crescente de métodos moleculares complementares à cultura microbiológica como método de identificação microbiológica. Conclui-se que a aplicação da tecnologia de barreiras, em conjunto com sistemas de embalagem, constitui uma estratégia promissora para a conservação de pescado, aliando segurança microbiológica e viabilidade industrial.

Palavras-chave: atmosfera modificada; conservação de alimentos; *Listeria monocytogenes*; pescado; tecnologia de barreiras; vácuo.

## ABSTRACT

Seafood is a highly perishable food product, subject to deterioration even under refrigeration. To ensure its safety and extend its shelf life, several preservation technologies have been studied, with special emphasis on modified atmosphere packaging and vacuum packaging. The association of these packaging systems with natural antimicrobial agents, edible coatings, and physical or chemical treatments constitutes the concept of hurdle technology, which aims to control spoilage and pathogenic microbiota through the combination of multiple barriers to bacterial growth. This dissertation aimed to conduct a systematic literature review on the microbiological quality of fish packaged under modified atmosphere or vacuum, either alone or in combination with other technologies. The research was carried out using the databases PubMed Central, Scopus, Web of Science e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) covering publications from 2015 to 2025. A total of 116 studies that met the eligibility criteria were included. Extracted information included packaging type, fish species, sampling location, applied treatments, associated technologies, investigated microorganisms, identification methods, and the overall conclusion of each experiment. The results showed that the combination of modified atmosphere or vacuum packaging with other technologies was more effective in inhibiting microorganisms such as *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas* spp., and Enterobacteriaceae. Technologies such as essential oils, nanoparticles, protective cultures, and organic acids demonstrated satisfactory performance. A growing use of molecular methods, complementary to traditional microbiological culture, was also observed as a tool for microbial identification. It is concluded that the application of hurdle technology, in combination with packaging systems, represents a promising strategy for fish preservation, combining microbiological safety with industrial feasibility.

Keywords: food preservation; hurdle technology; *Listeria monocytogenes*; modified atmosphere; seafood; vacuum.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Critérios de elegibilidade e exclusão dos artigos encontrados .....	77
Figura 2 – Número de publicações de acordo com o ano de publicação (2015–2024).....	109
Figura 3 – Número de estudos por país de acordo com a distribuição por continente.....	110
Figura 4 - Comércio internacional de produtos pesqueiros (2005–2022) em bilhões de dólares .....	112
Figura 5 – Número de estudos por tipo de embalagem utilizada .....	117
Figura 6 - Distribuição dos tipos de tecnologias associadas à conservação de peixes.....	118

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos com embalagem a vácuo e uso de tecnologia associada .....	78
Quadro 2 - Estudos com embalagem a vácuo sem tecnologia associada .....	90
Quadro 3 - Estudos com embalagem em atmosfera modificada e uso de tecnologia associada. .....	93
Quadro 4 - Estudos com embalagem em atmosfera modificada sem tecnologia associada....	99
Quadro 5 – Estudos com embalagem combinada (vácuo e atmosfera modificada) e uso de tecnologia associada. ....	101
Quadro 6 – Estudos com embalagem combinada (vácuo e atmosfera modificada) sem tecnologia associada. ....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AAN – Aditivos Antimicrobianos Naturais  
AEW – *Acidic Electrolyzed Water* (Água Eletrolisada Ácida)  
AH – Armazenagem Hiperbárica  
AITC – *Allyl Isothiocyanate* (Isotiocianato de Alila)  
AM – Atmosfera Modificada  
ATP – *Adenosine 5`-Triphosphate* (Adenosina 5`-Trifosfato)  
A/E - *Attaching and Effacing* (adesão e apagamento)  
BAL – Bactérias Ácido-Láticas  
BHT – Butil-hidroxitolueno  
BIO – Testes Bioquímicos  
BMP – Bioconservação por Microorganismos Protetores  
BVT-N - Bases Voláteis Totais Nitrogenadas  
CETEA - Centro de Tecnologia de Embalagem  
CH – Quitosana  
CM – Cultura Microbiológica  
CNPS – Nanopartículas de Quitosana  
CO – Monóxido de Carbono  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono  
CVT – Contagens Viáveis Totais  
CZ – Zeína  
DHA – *Docosaheanoic Acid* (Ácido Docosaheanoico)  
DTHA – Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar  
EAM – Embalagem em Atmosfera Modificada  
EBI – *Electron Beam Irradiation* (Irradiação por Feixe de Elétrons)  
EFSA – *European Food Safety Authority* (Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar)  
ECDC – *European Centre for Disease Prevention and Control* (Centro Europeu de Prevenção e Controle de Doenças)  
ELISA – *Enzyme-Linked Immunosorbent Assay* (Ensaio de Imunoabsorção Enzimática)  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EPA – Ácido eicosapentaenoico  
EVL – Extrato de Verbena de Limão  
EUA – Estados Unidos da América  
FA – Filme Ativado  
FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação)  
FDA – *Food and Drug Administration* (Agência de Administração de Alimentos e Medicamentos dos EUA)  
FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier)  
GEN – Caracterização Genotípica  
HPP – *High Pressure Processing* (Processamento por Alta Pressão)  
IFN- $\gamma$  – Interferon Gama  
IMP – Inosina Monofosfato  
ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Padronização)  
ITAL – Instituto de Tecnologia de Alimentos  
LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

LLO – Listeriolisina O  
LPS – Lipopolissacarídeo  
MAC – Sequenciamento por Macrogenômica  
MALDI-TOF MS – *Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry*  
MBHIB – *Modified Buffered Heart Infusion Broth* (Caldo Infusão Coração Tamponado Modificado)  
MET – Sequenciamento por Metagenômica  
MIC – *Minimum Inhibitory Concentration* (Concentração Inibitória Mínima)  
MHC – *Major Histocompatibility Complex* (Complexo Principal de Histocompatibilidade)  
MRSA - *Methicillin-resistant Staphylococcus aureus* (*S. aureus* resistente à meticilina)  
NE – Não Especificado  
NTAP – *Non-Thermal Atmospheric Plasma* (Plasma Atmosférico Não Térmico)  
OE – Óleo Essencial  
OEL – Óleo Essencial de Louro  
OEVL – Óleo Essencial de Verbena de Limão  
OMS – Organização Mundial da Saúde  
OU – Outros  
PA – Pressão Atmosférica  
PCR – *Polymerase Chain Reaction* (Reação em Cadeia da Polimerase)  
PCR (16S) – *Polymerase Chain Reaction* (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16S rRNA  
PHBA – p-Hidroxibenzoico  
PLA – *Polylactic Acid* (Ácido Polilático)  
ppm – Parte por Milhão  
PVC – *Polyvinyl Chloride* (Policloreto de Vinila)  
RCB – Revestimentos Comestíveis Bioativos  
RTE – *Ready-to-Eat* (Pronto para Consumo)  
SE - *Staphylococcal enterotoxin* (Enterotoxina estafilocócica)  
SGS – *Soluble Gas Stabilisation* (Estabilização de Gás Solúvel)  
SOR – Sorotipagem  
SNC – Sistema Nervoso Central  
TF – Tecnologias Físicas  
TMA – *Trimethylamine* (Trimetilamina)  
OTMA – *Trimethylamine N-oxide* (Óxido de Trimetilamina)  
TNF- $\alpha$  – *Tumor Necrosis Factor-alpha* (Fator de Necrose Tumoral Alfa)  
TQ – Tecnologias Químicas  
TVCs – *Total Viable Counts* (Contagens Totais de Viáveis)  
UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama  
UV – Ultravioleta  
UV-C – Radiação Ultravioleta tipo C  
WHO – *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)  
WAEW – *Weakly Acidic Electrolyzed Water* (Água Eletrolisada Fracamente Ácida)  
WPI – *Whey Protein Isolate* (Proteína Isolada do Soro do Leite)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
3.1	Histórico da Utilização de Atmosfera Modificada para preservação de alimentos ...	15
3.2	Vida de prateleira e processos de deterioração de peixes em aerobiose .....	18
3.2.1	Autólise enzimática .....	19
3.2.2	Oxidação.....	20
3.2.3	Deterioração bacteriana.....	22
3.3	Embalagem com atmosfera modificada (EAM) e vácuo .....	25
3.3.1	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	26
3.3.2	Oxigênio (O <sub>2</sub> ) .....	29
3.3.3	Nitrogênio (N <sub>2</sub> ).....	30
3.3.4	Monóxido de Carbono (CO) .....	30
3.3.5	Outros gases .....	33
3.3.6	Deterioração em Atmosfera modificada .....	34
3.3.7	Limitações e desafios do uso de frente a microrganismos patogênicos.....	36
3.4	Microrganismos patogênicos relevantes em peixes em EAM.....	38
3.4.1	<i>Listeria monocytogenes</i> .....	38
3.4.1.1	Patogenicidade e manifestações clínicas	39
3.4.1.2	Dados epidemiológicos	45
3.4.1.3	<i>Listeria monocytogenes</i> em peixes e produtos de pesca	47
3.4.2	<i>Salmonella</i> spp.....	48
3.4.2.1	Patogenicidade e manifestações clínicas	49
3.4.2.2	Dados epidemiológicos	51
3.4.2.3	<i>Salmonella</i> spp. em peixes e produtos de pesca	53
3.4.3	<i>Escherichia coli</i> .....	55
3.4.3.1	Patogenicidade e manifestações clínicas	56
3.4.3.2	Dados epidemiológicos	58
3.4.3.3	<i>Escherichia coli</i> em peixes e produtos de pesca	59
3.4.4	<i>Staphylococcus aureus</i> .....	61
3.4.4.1	Patogenicidade e manifestações clínicas	62
3.4.4.2	Dados epidemiológicos	63
3.4.4.3	<i>Staphylococcus aureus</i> em peixes e produtos de pesca	65
3.5	Métodos de Identificação microbiológica .....	66
3.5.1	Métodos Convencionais .....	66
3.5.2	Métodos Moleculares .....	68
3.5.3	Métodos Imunológicos .....	69
3.6	Tecnologias de barreiras aplicadas à conservação de pescado.....	70
3.6.1	Bioconservação por microrganismos protetores .....	71
3.6.2	Aditivos antimicrobianos naturais.....	71
3.6.3	Revestimentos comestíveis bioativos.....	72
3.6.4	Tecnologias físicas .....	72

3.6.5	Tecnologias químicas .....	73
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>73</b>
4.1	Estratégia de pesquisa .....	73
4.2	Prescritores .....	74
4.3	Seleção dos estudos .....	75
4.4	Extração e seleção .....	76
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>76</b>
5.1	Ano e local da coleta .....	109
5.2	Espécies e forma de apresentação .....	113
5.3	Tipo de embalagem .....	116
5.4	Tecnologias associadas à conservação de pescado .....	118
5.4.1	Aditivos antimicrobianos naturais.....	119
5.4.2	Revestimentos comestíveis bioativos.....	120
5.4.3	Tecnologias físicas .....	120
5.4.4	Bioconservação por microrganismos protetores .....	121
5.4.5	Tecnologias químicas complementares.....	123
5.5	Tratamentos realizados nos estudos .....	124
5.6	Microrganismos de interesse analisados .....	126
5.7	Análise da conclusão dos experimentos.....	127
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>128</b>
<b>7</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>128</b>
<b>8</b>	<b>LIMITAÇÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>130</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção global de pescado tem apresentado crescimento expressivo nas últimas décadas, consolidando-se como uma das principais fontes de proteína animal para o consumo humano (FAO, 2024). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, a aquicultura é atualmente o setor alimentício que mais cresce no mundo, sendo responsável por mais de 50% da oferta global de pescado (FAO, 2024). Tal crescimento é impulsionado não apenas por seu alto valor nutricional, mas também pela mudança no perfil de consumo da população, que busca alimentos saudáveis, frescos, minimamente processados e com reduzido uso de aditivos (Porpino & Bolfe, 2020; Sloan, 2023).

Essa ampliação no consumo e na oferta de pescado, no entanto, impõe desafios significativos à cadeia produtiva, especialmente no que se refere à manutenção da qualidade e da segurança microbiológica dos produtos. A segurança de alimentos envolve um conjunto de normas, práticas e procedimentos destinados a controlar perigos biológicos, químicos e físicos ao longo de toda a cadeia produtiva, e é considerada um dos pilares da saúde pública (FAO, 2022).

Entre as alternativas tecnológicas disponíveis, a embalagem em atmosfera modificada e a embalagem a vácuo têm sido amplamente utilizadas pela indústria alimentícia como ferramentas para prolongar a vida útil de produtos perecíveis. Quando associadas a outras abordagens, como o uso de antimicrobianos naturais, culturas protetoras, revestimentos comestíveis bioativos e tratamentos físicos ou químicos, essas tecnologias se enquadram ao conceito de tecnologia de barreiras (Pivetta *et al.*, 2023; Duarte *et al.*, 2023). Essa estratégia busca limitar o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos por meio da combinação de obstáculos ao desenvolvimento microbiano (Pivetta *et al.*, 2023; Duarte *et al.*, 2023).

Diante da relevância sanitária e econômica do pescado e da necessidade de aprimorar os métodos de conservação, esta dissertação teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre o uso de embalagem em atmosfera modificada ou vácuo, isoladamente ou em associação com outras tecnologias, com foco na qualidade e segurança microbiológica de peixes. A investigação busca identificar a presença de determinados microrganismos, as estratégias empregadas para controle microbiológico e os resultados obtidos, contribuindo com subsídios técnicos e científicos para o setor pesqueiro e a segurança dos consumidores.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar, por meio de uma revisão sistemática, como a embalagem em atmosfera modificada ou embalagem a vácuo influencia a segurança e a qualidade microbiológica de peixes, bem como analisar o impacto de tecnologias antimicrobianas associadas na preservação desses produtos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar os efeitos da atmosfera modificada e embalagem a vácuo sobre a qualidade microbiológica dos produtos de peixe, conforme descrito nos estudos revisados.
- Investigar as tecnologias antimicrobianas utilizadas em associação com as embalagens e seu impacto relatado.
- Avaliar os métodos de análise microbiológica mais utilizados nos estudos incluídos na revisão.
- Comparar a eficácia das diferentes combinações tecnológicas na conservação e segurança dos peixes, com base nas evidências encontradas.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Histórico da Utilização de Atmosfera Modificada para preservação de alimentos**

A utilização da atmosfera modificada em embalagens constitui uma tecnologia empregada para prolongar a vida de prateleira dos alimentos, preservando seus aspectos de qualidade por meio da alteração da composição dos gases no interior da embalagem. Essa modificação ocorre em relação à atmosfera ambiente, sendo os gases mais comumente utilizados nas embalagens com atmosfera modificada (EAM) o dióxido de carbono, o nitrogênio e o oxigênio (Sandhya, 2010).

Os efeitos da atmosfera modificada sobre os alimentos é um tema que tem sido amplamente discutido na literatura científica. O primeiro artigo científico que relatou o efeito do gás carbônico na preservação da carne bovina foi publicado em 1882 por Kolbe, na Alemanha (Kolbe, 1882, apud Filho, 2006). Entretanto, apenas entre as décadas de 1920 e 1930 as pesquisas sobre o uso da atmosfera modificada em alimentos começaram a ser mais intensamente desenvolvidas (Parry, 2012).

A pesquisa inicial que impulsionou os estudos sobre a utilização da atmosfera modificada foi conduzida por Brown (1922), na qual o efeito de diferentes concentrações de

oxigênio e dióxido de carbono sobre a germinação e o crescimento de fungos em diferentes temperaturas foi estudado. Em 1927, Kidd e West direcionaram a aplicação da atmosfera modificada mais especificamente para o setor alimentício, investigando os efeitos da relação entre as concentrações de oxigênio e dióxido de carbono no tempo de armazenamento de maçãs. Esses estudos pioneiros resultaram na primeira utilização comercial da atmosfera modificada para armazenamento de maçãs, na Inglaterra, em 1929 (Kidd & West, 1927, apud Parry, 2012).

A partir dessas pesquisas, a aplicação da atmosfera modificada expandiu-se para além das frutas, passando a ser utilizada também em produtos de origem animal. Em 1930, Killefer relatou que amostras de carne e peixe fresco armazenadas em uma atmosfera contendo 100% de dióxido de carbono permaneceram conservadas por um período de duas a três vezes maior do que quando expostas ao ar na mesma temperatura (Killefer, 1930). Outros estudos, como os de Callow (1932), Moran *et al.* (1932) e Tomkins (1932), também relataram os efeitos positivos da atmosfera modificada sobre o armazenamento de carne suína e bovina. No que se refere aos peixes, Coyne (1933) observou um aumento de duas vezes na vida de prateleira de peixes armazenados a 0 °C em atmosferas contendo 50% de dióxido de carbono. Esses estudos, juntamente com outros que demonstraram o efeito inibidor do dióxido de carbono sobre a multiplicação bacteriana, possibilitaram a aplicação comercial da atmosfera modificada em determinados ambientes.

Em 1938, essa tecnologia foi utilizada em câmaras e contêineres de navios para o transporte de carcaças bovinas provenientes da Austrália e Nova Zelândia. Utilizando-se 10% de dióxido de carbono e temperatura de -1 °C, foi relatado que as carcaças permaneceram de 40 a 50 dias sem sinais de deterioração (Robertson, 2005; Parry, 2012).

Houve, então, um período de ausência significativa de estudos sobre o uso da atmosfera modificada na preservação de alimentos. Esse tema foi retomado apenas em 1951, quando Ogilvy e Ayres realizaram um estudo nos Estados Unidos da América (EUA), no qual identificaram uma relação linear entre a vida de prateleira e a concentração crescente de dióxido de carbono em relação ao ar atmosférico. Essa relação foi observada até a concentração de 25% de dióxido de carbono (Ogilvy & Ayres, 1951 apud Mullan & McDowell, 2011).

Entretanto, apenas na década de 1970 essa tecnologia começou a ser aplicada comercialmente para aumentar a vida de prateleira de produtos alimentícios. Na Alemanha, França e Dinamarca, essa tecnologia passou a ser utilizada em 1973, 1974 e 1978, respectivamente (Parry, 2012).

No Brasil, os primeiros estudos sobre essa tecnologia aplicada à preservação da carne bovina fresca foram iniciados em 1987, com o objetivo de viabilizar e facilitar a criação de

centrais regionais de distribuição (ITAL, 2013). Essas pesquisas foram desenvolvidas em parceria com empresas de gases, fabricantes de equipamentos e embalagens, indústrias alimentícias, produtores, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e universidades federais (ITAL, 2013). Os resultados foram aproveitados pelo setor privado (ITAL, 2013).

A consolidação da embalagem com atmosfera modificada como uma solução comercialmente viável, permitindo sua ampla distribuição ao consumidor final, deveu-se, em grande parte, ao desenvolvimento e aperfeiçoamento das embalagens capazes de atender às especificidades dessa tecnologia (Parry, 2012). Nesse contexto, a embalagem termoformada, semi-rígida, horizontal e do tipo “*form-fill-seal*”, projetada para a inserção de gases, foi passou a ser utilizada apenas em 1963 (Parry, 2012). No Brasil, o desenvolvimento das embalagens plásticas com propriedades de barreira de gases, inicialmente realizado pelo Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), foi um fator determinante para a implementação dessa tecnologia no mercado varejista nacional (ITAL, 2013).

Dessa forma, embora os efeitos do dióxido de carbono sobre a inibição microbiana já fossem conhecidos desde o século XIX (Robertson, 2005) e houvesse evidências empíricas de sua contribuição para a preservação dos alimentos desde 1889 (Kolbe, 1882; Daniels *et al.*, 1984), o uso comercial da EAM ocorreu de forma relativamente tardia. Esse atraso pode ser justificado por diversos fatores, incluindo a necessidade de maior conhecimento técnico, o desenvolvimento de filmes poliméricos adequados, a criação de equipamentos para inserção de gás e a implementação de uma cadeia de frio eficiente nos sistemas produtivos (Parry, 2012). Essas condições foram essenciais para o sucesso comercial da tecnologia (Parry, 2012). Em um contexto histórico, também se faz relevante mencionar a presença de duas guerras mundiais neste intervalo, o que interferiu no foco das pesquisas científicas, podendo justificar tal atraso.

Atualmente, a EAM é amplamente utilizada não apenas em carnes bovinas, suínas, de aves e pescado, mas também em vegetais, frutas, saladas prontas, flores, pães, entre outros produtos (McMillin, 2008; Parry, 2012). Embora haja uma demanda crescente pelo aprimoramento dessa técnica, como a incorporação de embalagens ativas e inteligentes associadas à atmosfera modificada (Mkhari *et al.*, 2025), ainda existem lacunas de pesquisa relacionadas à padronização da técnica e à composição ideal dos gases para cada tipo de produto.

Esse aspecto é particularmente relevante, pois as características individuais dos produtos determinam a escolha do gás ou da mistura de gases mais adequada (Ruiz & Gonçalves, 2021).

No caso dos peixes, por exemplo, fatores como percentual de gordura, tendência à formação de histamina, microbiota residente e coloração influenciam diretamente a seleção dos gases, sendo necessário definir composições específicas que garantam a qualidade sensorial, físico-química e microbiológica do produto (Ruiz & Gonçalves, 2021). Nesse sentido, ainda há grande potencial para pesquisas futuras sobre o aprimoramento dessa tecnologia.

### **3.2 Vida de prateleira e processos de deterioração de peixes em aerobiose**

O desenvolvimento de diferentes tecnologias de embalagem no setor alimentício está diretamente relacionado à necessidade de preservação dos alimentos, com o objetivo de prolongar sua vida de prateleira. A vida de prateleira, ou *shelf-life*, refere-se ao período durante o qual um produto pode ser armazenado em condições ambientais específicas, como temperatura, umidade relativa, luminosidade e concentração de oxigênio, sem comprometer sua segurança e mantendo suas características sensoriais, químicas, físicas e microbiológicas dentro dos padrões estabelecidos (Ruiz & Gonçalves, 2021). Além disso, a manutenção desses atributos deve garantir o cumprimento das informações declaradas no rótulo, desde que respeitadas as condições de armazenamento recomendadas (Ruiz & Gonçalves, 2021).

Embora reações de deterioração possam ocorrer ao longo desse período, elas são previamente conhecidas e, em certa medida, controladas, de modo a garantir que o produto permaneça em conformidade com as legislações vigentes e atenda às preferências dos consumidores até a data de validade estipulada (Ruiz & Gonçalves, 2021). Dessa forma, o entendimento dos processos de deterioração é fundamental para a aplicação de tecnologias eficazes na preservação dos alimentos. Em especial, no caso dos peixes e seus derivados, torna-se essencial a compreensão aprofundada dos mecanismos e fatores que influenciam e aceleram sua deterioração, uma vez que esse conhecimento é indispensável para o desenvolvimento de estratégias que assegurem sua qualidade e segurança ao longo do armazenamento e comercialização (Ruiz & Gonçalves, 2021).

A deterioração dos peixes ocorre predominantemente por três mecanismos principais: autólise enzimática, oxidação e deterioração bacteriana (Hussain *et al.*, 2021; Nie *et al.*, 2022). No contexto regulatório, os aspectos microbiológicos são considerados de grande relevância, especialmente no que se refere a produtos perecíveis, cuja vida útil é inferior a 30 dias (Ruiz & Gonçalves, 2021).

No caso dos peixes, algumas características intrínsecas contribuem para a rápida deterioração desse alimento, tornando-o altamente perecível. Entre essas características, destacam-se a rápida instalação da fase de rigidez *post-mortem*, o pH próximo da neutralidade,

a presença de uma microbiota residente e transitória, a camada de muco sobre a pele, a elevada atividade de água nos tecidos musculares, a estrutura frouxa do tecido conjuntivo e a composição nutricional rica em proteínas, fosfolípidios e ácidos graxos poli-insaturados, que podem servir como substrato para o crescimento microbiano, incluindo microrganismos patogênicos (Masniyom, 2011; Ruiz & Gonçalves, 2021).

Além das características intrínsecas, existem fatores extrínsecos que influenciam a deterioração dos peixes, tais como condições inadequadas de conservação, armazenamento e manipulação (Ruiz & Gonçalves, 2021). Nesse contexto, a manutenção de uma cadeia de frio eficiente ao longo de toda a cadeia produtiva é essencial para mitigar os processos de degradação e assegurar a qualidade e segurança do produto final.

A seguir, serão detalhados os três principais mecanismos de deterioração dos peixes, com o intuito de elucidar de forma abrangente esses processos e suas implicações na qualidade do produto.

### **3.2.1 Autólise enzimática**

O processo de deterioração dos peixes tem início com a autólise enzimática dos tecidos, fenômeno que ocorre após a conclusão da fase de *rigor mortis* (Hussain *et al.*, 2021; Nie *et al.*, 2022). A instalação do *rigor mortis* em peixes é rápida, manifestando-se algumas horas após a morte do animal. Esse estágio é caracterizado pelo enrijecimento dos músculos que ocorre após a morte, devido à falta de adenosina 5'-trifosfato (ATP) para relaxamento das fibras musculares. Neste momento pode ocorrer a produção de ácido láctico devido ao consumo das reservas de glicogênio muscular, quando elas existem, resultando na redução do pH (Ruiz & Gonçalves, 2021).

As reservas de glicogênio nos peixes são limitadas e podem ser significativamente reduzidas em função do esforço muscular empregado durante a captura, o que atenua a queda do pH pós-morte (Filho & Mesquita, 2018; Kontominas *et al.*, 2021). Como resultado, o pH da carne dos peixes mantém-se próximo à neutralidade (Filho & Mesquita, 2018; Kontominas *et al.*, 2021), valor que favorece tanto a atividade de diversas proteases endógenas quanto o crescimento bacteriano (Nie *et al.*, 2022). Essa característica intrínseca contribui diretamente para a elevada pericibilidade dos peixes.

No contexto da autólise enzimática, proteases e lipases específicas desempenham um papel fundamental na degradação pós-morte do músculo e de outros tecidos dos peixes, ocasionando alterações sensoriais iniciais, particularmente na textura do tecido muscular

(Kontominas *et al.*, 2021). Essa fase ainda não está associada à produção de metabólitos que conferem odores e sabores desagradáveis aos produtos (Kontominas *et al.*, 2021).

Dessa forma, após a degradação enzimática de ATP e de seus derivados (Tavares *et al.*, 2021; Nie *et al.*, 2022), ocorre a ativação de uma série de enzimas, incluindo enzimas envolvidas na degradação de nucleotídeos, calpaínas (que atuam sobre proteínas miofibrilares), colagenases (que degradam o tecido conjuntivo), óxido de trimetilamina (OTMA) demetilase e um conjunto de proteases, como catepsinas, quimotripsina, tripsina e carboxipeptidases (Tavares *et al.*, 2021; Nie *et al.*, 2022). Estas últimas são responsáveis pela hidrólise de proteínas e peptídeos, contribuindo para modificações estruturais significativas no músculo dos peixes (Tavares *et al.*, 2021; Nie *et al.*, 2022).

Outro processo relevante é a hidrólise enzimática, ou lipólise, na qual os glicerídeos são degradados pela ação de lipases, resultando na liberação de ácidos graxos livres (Tavares *et al.*, 2021). Esses compostos estão associados ao desenvolvimento de sabor desagradável, conhecido como "ranço", além de contribuírem para a desnaturação de proteínas sarcoplasmáticas e miofibrilares (Tavares *et al.*, 2021). A rancificação pode ser intensificada por diversos fatores ambientais, como alta concentração de oxigênio, exposição à luz, presença de metais, umidade elevada, temperatura e grau de insaturação dos lipídios, os quais aceleram a taxa de oxidação e reduzem a qualidade dos produtos alimentícios (Masniyom, 2011).

A deterioração lipídica pode ainda ser influenciada por outros fatores, incluindo variações no pH, intensidade luminosa, temperatura e atividade de água (Masniyom, 2011). Em embalagens com alta concentração de oxigênio, a oxidação dos lipídios é acelerada, intensificando a rancificação e resultando na formação de odores indesejáveis (Masniyom, 2011). Além disso, microrganismos presentes nos alimentos podem contribuir para a deterioração oxidativa, uma vez que muitas espécies bacterianas são capazes de sintetizar lipases, promovendo a hidrólise lipídica e agravando a perda de qualidade (Masniyom, 2011; Nie *et al.*, 2022).

De maneira geral, a autólise enzimática leva à liberação de peptídeos, aminoácidos e ácidos graxos livres, resultantes da degradação das proteínas musculares, bem como na formação de aminas biogênicas através da ação das descarboxilases (Kontominas *et al.*, 2021).

### **3.2.2 Oxidação**

A oxidação é um dos principais processos responsáveis pela deterioração de alimentos, impactando negativamente diversas características sensoriais e nutricionais. Entre os efeitos adversos, destacam-se a perda de qualidade relacionada ao sabor, cor, textura e atributos

nutricionais (Jos & Veld, 1996; Tavares *et al.*, 2021). Esse fenômeno ocorre devido à interação das moléculas do alimento com o oxigênio, promovendo reações químicas que levam à degradação de componentes essenciais (Amit *et al.*, 2017). No caso dos aminoácidos, a oxidação resulta na conversão desses compostos em ácidos orgânicos e amônia (Amit *et al.*, 2017).

A oxidação lipídica, em particular, desempenha um papel central na alteração da qualidade sensorial dos alimentos. Os lipídios podem ser oxidados por diferentes mecanismos, incluindo foto-oxidação, oxidação térmica, oxidação enzimática e auto-oxidação, sendo esta última a mais comum (Hussain *et al.*, 2021). A auto-oxidação refere-se à reação espontânea entre lipídios e o oxigênio atmosférico (Hussain *et al.*, 2021). Esse processo ocorre principalmente devido à interação do oxigênio com as ligações duplas dos ácidos graxos insaturados (Laorenza *et al.*, 2022). Os peixes, por exemplo, apresentam elevados níveis de ácidos graxos poli-insaturados, o que os torna particularmente suscetíveis à oxidação, especialmente as espécies com maior teor desses ácidos graxos, como o Salmão (Ruiz & Gonçalves, 2021; Laorenza *et al.*, 2022). Como consequência, a qualidade nutricional dos alimentos é comprometida, uma vez que ácidos graxos essenciais, como o ácido eicosapentaenoico (EPA) e o ácido docosahexaenoico (DHA), que são de grande importância à saúde cardiovascular e neurológica (Swanson *et al.*, 2012); são altamente suscetíveis à degradação oxidativa (Laorenza *et al.*, 2022).

Os hidroperóxidos lipídicos, produtos primários da auto-oxidação, são compostos instáveis que se decompõem rapidamente, originando uma série de produtos secundários, como malondialdeído, 4-hidroxinonanal, hidrocarbonetos e ácidos orgânicos voláteis (Ghaly *et al.*, 2010; Nie *et al.*, 2022). A formação desses compostos está diretamente relacionada à desnaturação de proteínas, especialmente devido à interação com proteínas miofibrilares e sarcoplasmáticas (Ghaly *et al.*, 2010; Nie *et al.*, 2022). Além disso, há um consumo acelerado de antioxidantes endógenos e uma redução do valor nutricional do alimento, em razão da degradação de vitaminas lipossolúveis. O efeito final dessas reações inclui alterações indesejáveis no odor, sabor e textura dos produtos alimentícios (Ghaly *et al.*, 2010; Nie *et al.*, 2022).

Além dos lipídios, a oxidação também afeta compostos de hematina, como hemoglobina, mioglobina e citocromos (Fraser & Sumar, 1998). A mioglobina, presente em carnes vermelhas, como a do atum, desempenha um papel essencial na coloração dos tecidos, conferindo-lhes tonalidades vermelho-escuro (Fraser & Sumar, 1998). O alto teor de mioglobina nesses alimentos contribui para a aparência marrom-avermelhada típica. A

oxidação da mioglobina leva à formação de metamioglobina, pigmento responsável pela descoloração indesejada da carne, tornando-a marrom (Laorenza *et al.*, 2022). Esse fenômeno é um dos principais desafios na conservação da aparência de carnes frescas e pode impactar a aceitação do produto pelo consumidor (Fraser & Sumar, 1998).

Diante do exposto, observa-se que a oxidação representa um desafio significativo na conservação de alimentos, afetando sua qualidade sensorial e nutricional. A compreensão dos mecanismos envolvidos nesse processo é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle, permitindo a adoção de tecnologias e abordagens que minimizem a deterioração oxidativa e prolonguem a vida útil dos produtos alimentícios.

### 3.2.3 Deterioração bacteriana

A deterioração bacteriana é o fator que mais afeta a qualidade do peixe fresco. Inicialmente, a musculatura saudável do peixe é estéril (Sivertsvik *et al.*, 2002). Esse cenário, associado à fragilização dos tecidos decorrente da deterioração autolítica, propicia a contaminação da musculatura (Sivertsvik *et al.*, 2002). Além disso, fatores intrínsecos dos peixes estão diretamente relacionados ao crescimento e manutenção da contaminação bacteriana, pois estes fornecem um ambiente favorável ao crescimento microbiano (Ruiz & Gonçalves, 2021).

As alterações bacteriológicas têm início após a fase do *rigor mortis*, e, como já mencionado anteriormente, nos peixes, a instalação da fase de *rigor mortis* se dá de forma acelerada se comparado às outras espécies de animais. Este fato está relacionado à perecibilidade do pescado, pois, como é de curta duração em peixes e propicia um pH próximo à neutralidade, influencia a rapidez do início dos processos e consequente susceptibilidade à deterioração bacteriana, tornando sua vida útil menor se comparada às outras proteínas de origem animal (Ruiz & Gonçalves, 2021).

Neste contexto, a presença da microbiota residente e transitória passa a desempenhar um papel crucial na deterioração. Presente principalmente nas brânquias, intestino e pele dos animais (Sivertsvik *et al.*, 2002; Ruiz & Gonçalves, 2021), esses microrganismos passam a utilizar os aminoácidos e outras substâncias não proteicas disponibilizadas pela autólise enzimática para metabolismo e multiplicação (Ruiz & Gonçalves, 2021). Além disso, a composição do muco presente na pele, o frouxo tecido conjuntivo, que opõe pouca resistência à translocação bacteriana, e a alta atividade de água, que permite a realização das funções metabólicas (FDA, 2014), também são fatores que atuam como catalisadores desta fase de deterioração (Ruiz & Gonçalves, 2021).

Diante do fornecimento de determinados nutrientes e das características físico-químicas do meio, ocorre então o desenvolvimento seletivo de bactérias, que passa a depender também da temperatura à qual o pescado está exposto, propiciando o crescimento das bactérias que se encontram em sua temperatura ótima de crescimento ou próxima a ela, e inibindo bactérias que não possuem crescimento estimulado naquela faixa de temperatura (Ruiz & Gonçalves, 2021).

Com o crescimento bacteriano, ocorre a intensa utilização do substrato presente, que em determinado momento desencadeia a redução da disponibilidade de aminoácidos, o que causa a interrupção da repressão da síntese de proteases, tendo em vista que essas enzimas podem ser reprimidas pela presença de várias fontes de nitrogênio, o que inclui os aminoácidos (Sharma & Singh, 2016). Dessa forma, inicia-se uma nova etapa na decomposição das proteínas, resultando na reposição e disponibilidade de aminoácidos como substrato e continuidade do crescimento bacteriano (Ruiz & Gonçalves, 2021). Neste ponto, há aumento nos produtos oriundos da decomposição dos aminoácidos, como amônia e ácidos graxos voláteis (Liston, 1980 apud Ruiz & Gonçalves, 2021).

As maiores alterações químicas associadas aos produtos de deterioração bacteriana estão relacionadas à produção de bases voláteis totais nitrogenadas (BVT-N), dentre elas, um importante produto originado deste processo de deterioração é a trimetilamina (TMA) (Kontominas *et al.*, 2021). Esta pode ser gerada por enzimas endógenas, mas é principalmente um produto da ação das enzimas bacterianas denominadas TMA oxidase, que provocam a redução do OTMA formando então a TMA (Kontominas *et al.*, 2021).

Nos peixes o OTMA é encontrado principalmente no tecido muscular, especialmente em espécies que vivem em águas frias e profundas, como por exemplo, bacalhau e merluza, onde participa do metabolismo energético e ajuda a proteger componentes celulares de baixas temperaturas, alta salinidade e alta pressão hidrostática no ambiente circundante (Ilyas *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023).

De forma geral, o OTMA é utilizado por uma série de bactérias deteriorantes, como *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas* spp., *Enterobacteriaceae* psicrotolerantes e *Vibrio* spp. para obter energia, e como resultado deste processo é formado o TMA, responsável pelo popular “cheiro de peixe”, que é característico do pescado deteriorado (Kontominas *et al.*, 2021).

As aminas biogênicas também são produtos da degradação bacteriana provenientes da descarboxilação dos aminoácidos, e dentre estas podemos citar a cadaverina, histamina, putrescina, espermidina, espermina, triptamina e tiramina. A quantificação desses metabólitos também é utilizada como índice para avaliar a qualidade de conservação e vida útil (Masniyom, 2011). Assim, um aumento na concentração de aminas biogênicas pode refletir o grau de

decomposição de aminoácidos, porém, a tendência à formação desses compostos pode variar de acordo com diversos fatores, como espécie do peixe, concentrações de substratos nos tecidos, procedimentos de manuseio e condições de armazenamento (Masniyom, 2011).

Ao final de todo esse processo, outros compostos também podem ser liberados, como o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e metanotiol (CH<sub>3</sub>SH), juntamente com ácidos graxos, aminas voláteis, ácidos orgânicos, outros sulfetos, álcoois, aldeídos e cetonas, que apresentam sabores desagradáveis, além de interferirem diretamente e negativamente na aparência, textura e odor do produto (Tavares *et al.*, 2021; Ruiz & Gonçalves, 2021; Laorenza *et al.*, 2022).

Após a descrição deste mecanismo, é digno de nota mencionar que a deterioração muscular dos peixes não coincide necessariamente com a presença de patógenos ou toxinas, assim como o oposto também é verdadeiro, a qualidade sensorial do pescado não garante a segurança do alimento (Kontominas *et al.*, 2021). Ademais, é importante também pontuar que apenas um pequeno percentual dos microrganismos presentes na microbiota dos peixes são as denominadas bactérias deteriorantes específicas, responsáveis por metabolizar os substratos e gerar os produtos responsáveis pelo *off-flavor* (sabores/odores desagradáveis) e implicações na textura e aparência (Hussain *et al.*, 2021). A maior parte das bactérias presentes no pescado não desempenham este papel e não podem ser classificadas como tal (Hussain *et al.*, 2021).

Em relação às bactérias deteriorantes específicas, o tempo necessário para atingir uma concentração dessas bactérias, cerca de 10<sup>6</sup> UFC/g, capaz de desencadear a presença dos metabólitos a ponto de se observar a presença do *off-flavor* varia de acordo com alguns aspectos, sendo os principais deles a contaminação inicial do pescado, propriedades físico-químicas do alimento (atividade de água, pH, presença de conservantes), o ambiente externo do alimento (composição de gás), temperatura à qual o produto é exposto e condições de armazenagem; sendo a temperatura de armazenagem um fator crítico, pois interfere diretamente com a dinâmica do crescimento bacteriano (Ruiz & Gonçalves, 2021).

No que diz respeito à qualidade dos microrganismos responsáveis pela deterioração do pescado, esta também é influenciada pelos fatores aos quais o pescado está exposto durante o processo de deterioração, que atuam de forma seletiva. Foi observado que peixes não conservados em baixas temperaturas são geralmente deteriorados como resultado do crescimento de bactérias fermentativas Gram-negativo (como *Vibrionaceae*), enquanto peixes resfriados são deteriorados por bactérias Gram-negativo psicrotólicas aeróbias, como *Pseudomonas* spp. e *Shewanella* spp. em condições de aerobiose (Nie *et al.*, 2022).

A presença de bactérias deteriorantes específicas varia em diferentes espécies de peixes, influenciada pela temperatura da água, grau de salinidade, alimentação dentre outros fatores, e

é afetada também pelo tipo de práticas de conservação que foram empregadas. Por exemplo, enquanto foi observado que *Aeromonas* spp. foi a principal bactéria deteriorante em filés de carpa cabeçuda (*Aristichthys nobilis*) sem sal armazenados a 4 °C, *Pseudomonas* spp. foi a principal bactéria encontrada em filés de carpa cabeçuda com 2% de sal (Liu *et al.*, 2017).

Em relação à temperatura da água, a microbiota de peixes de água fria tende a ser dominada por bactérias psicrotróficas, aeróbicas ou anaeróbicas facultativas, Gram-negativo, pertencentes aos gêneros *Pseudomonas*, *Moraxella*, *Acinetobacter*, *Shewanella* e *Flavobacterium*, enquanto nos peixes de água tropical costumam apresentar bactérias Gram-positivo (Ruiz & Gonçalves, 2021).

Em resumo, o peixe em condições de aerobiose está exposto a diversos fatores que propiciam sua deterioração, seja por processos autolíticos, onde enzimas atuam em condições de pH e temperatura ótimas, seja pela presença de oxigênio que resulta na oxidação de lipídios e formação de sabor rançoso, ou na predisposição à deterioração bacteriana, que gera diversos produtos responsáveis pelo *off-flavor* e prejuízo, em todos esses casos, às características sensoriais de aparência, textura, odor, sabor e também nutricionais. Posto isso, é perceptível que a alteração em condições de temperatura, pH e composição dos gases são fatores capazes de influenciar as diversas formas de deterioração, limitando os processos autolíticos, oxidativos e bacterianos, responsáveis pela diminuição da vida de prateleira do peixe, assim como a microbiota presente.

### **3.3 Embalagem com atmosfera modificada (EAM) e vácuo**

A embalagem com atmosfera modificada pode ser definida como o tipo de embalagem no qual ocorre a remoção do ar, seguida da substituição deste por um único gás ou uma mistura de gases pré-selecionados ou ainda apenas a remoção do ar, em que o vácuo causa uma alteração na composição de gases dentro da embalagem em relação à composição atmosférica (Parry, 2012; Gonçalves *et al.*, 2021). Dessa forma, embora a embalagem a vácuo possa ser tecnicamente considerada uma forma de atmosfera modificada, uma vez que envolve alteração na composição gasosa em torno do alimento, neste trabalho ela é tratada separadamente da EAM. Essa distinção se justifica pelas diferenças nos princípios de funcionamento, composição gasosa residual e efeitos sobre o produto.

Os princípios de utilização da atmosfera modificada, tanto para peixes quanto para outros produtos de origem animal, baseiam-se nos processos de deterioração que ocorrem em condições de aerobiose, ou seja, na presença de oxigênio e demais gases nas concentrações típicas da composição atmosférica (Tabela 1).

Tabela 1– Composição gasosa do ar seco à nível do mar.

Gás	Percentual
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	78,03
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	20,99
Argônio (Ar)	0,94
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0,03
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,01

Fonte: Adaptado de Parry, 2012

Com o objetivo de aumentar a vida de prateleira e garantir a oferta de um produto de qualidade ao consumidor, a composição dos gases dentro da embalagem é alterada. Através da inserção ou remoção desses gases, observam-se os mecanismos de inibição das reações microbiológicas e químicas. A atmosfera específica aplicada dependerá da composição da microbiota predominante no produto, da sensibilidade do produto a cada componente gasoso e da necessidade de preservar características como a coloração do produto, especialmente no caso do pescado (Nie *et al.*, 2022).

Diante disso, serão discutidos a seguir os principais gases utilizados nas EAM e as justificativas para sua incorporação nas embalagens.

### 3.3.1 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

O dióxido de carbono, também denominado gás carbônico, é o principal gás utilizado nas embalagens com atmosfera modificada, devido principalmente às suas propriedades bacteriostáticas e fungistáticas (Eklund, 1984; Taniwaki *et al.*, 2009; Bouletis *et al.*, 2017).

Embora sua utilização em EAM seja amplamente reconhecida, os mecanismos pelos quais o dióxido de carbono exerce seus efeitos sobre os microrganismos são complexos e ainda não foram completamente esclarecidos. Inicialmente, acreditava-se que o efeito bacteriostático do gás carbônico estivesse diretamente relacionado à exclusão do oxigênio do ambiente (Callow, 1932 *apud* Daniels *et al.*, 1984). No entanto, em 1932, foi conduzido um estudo no qual o ar foi substituído por uma atmosfera composta por 100% de nitrogênio. Nesse experimento, não foi observada a mesma taxa de inibição do crescimento bacteriano que ocorre na presença de dióxido de carbono (Callow, 1932 *apud* Daniels *et al.*, 1984).

A influência do dióxido de carbono sobre o pH também foi identificada como um mecanismo potencialmente relacionado à sua atividade na preservação de alimentos. Isso se deve ao fato de que o dióxido de carbono, ao se dissolver na água presente no alimento, reage formando o ácido carbônico, conforme demonstrado na Reação 1:

Reação 1 - Formação do ácido carbônico por meio da reação do dióxido de carbono com água



Dessa forma, o dióxido de carbono é capaz de induzir uma queda acentuada do pH do produto, principalmente pela formação do ácido carbônico e pela alteração da faixa ótima de crescimento da maioria das bactérias, o que retarda o crescimento bacteriano. No entanto, foi demonstrado que esse fator isoladamente não é suficiente para explicar o efeito total de inibição do dióxido de carbono (Coyne, 1933).

Em um estudo conduzido por Coyne (1933), o pH do meio de cultura bacteriano foi ajustado para aproximadamente 5,8, e culturas dos gêneros *Achromobacter*, *Pseudomonas* e *Bacillus* foram cultivadas sob atmosferas de ar e sob atmosferas com predominância de dióxido de carbono. Os resultados mostraram que, em todos os ensaios, os tratamentos com dióxido de carbono produziram um grau significativamente maior de inibição do crescimento bacteriano (Coyne, 1933 *apud* Daniels *et al.*, 1984).

É importante observar que a Reação 1, conforme descrita anteriormente, ocorre de maneira inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, menor a taxa de solubilidade do dióxido de carbono e, conseqüentemente, menor será a formação de ácido carbônico (Parry, 2012; Silva *et al.*, 2017). Por outro lado, em temperaturas mais baixas, a solubilidade do gás carbônico aumenta, potencializando o efeito bacteriostático. A solubilidade do dióxido de carbono é de 179,7 mL/100g de água a 0°C, enquanto a 20°C essa solubilidade é de apenas 90,1 mL/100g de água (Parry, 2012; Silva *et al.*, 2017). Portanto, além dos efeitos típicos da refrigeração na preservação dos alimentos, a refrigeração exerce um efeito sinérgico com o dióxido de carbono, destacando a importância da manutenção da cadeia de frio ao longo de toda a cadeia produtiva.

Outra hipótese sugerida é que o dióxido de carbono, devido à sua elevada capacidade de difusão através de membranas celulares, possa se dissolver no ambiente intracelular e influenciar diretamente a estrutura e a funcionalidade de membrana (Daniels *et al.*, 1984). Essa alteração ocorre por meio da interação entre os lipídios e a água na interface celular, o que resulta em interferência na tensão superficial e no fluxo de água (Daniels *et al.*, 1984). Isso, por sua vez, aumenta a permeabilidade da membrana às espécies iônicas, afetando o equilíbrio interno e, conseqüentemente, os processos metabólicos (Daniels *et al.*, 1984).

Reação 2 - Formação do íon bicarbonato a partir do ácido carbônico.



Por fim, estudos (Daniels *et al.*, 1984; Parry, 2012) observaram a ação do dióxido de carbono sobre a inibição, seja de maneira direta ou indireta, de determinadas enzimas,

resultando na interferência da formação de alguns produtos. De acordo com estes, o gás carbônico exerce um efeito específico sobre enzimas específicas, embora o mecanismo pelo qual essa interação ocorre ainda não tenha sido completamente detalhado (Daniels *et al.*, 1984; Parry, 2012).

Em síntese, as hipóteses sobre a ação bacteriostática do dióxido de carbono podem ser agrupadas da seguinte forma: (a) Exclusão de oxigênio pela substituição por dióxido de carbono, que pode contribuir de maneira sutil para o efeito geral, desacelerando a taxa de crescimento de bactérias aeróbicas, (b) Facilidade com que o dióxido de carbono penetra nas células, causando alterações químicas e nos processos metabólicos internos, (c) Capacidade para promover uma rápida acidificação do pH do meio e internamente nas células, com possíveis implicações nas atividades metabólicas e (d) Efeito sobre enzimas.

Ademais, é importante mencionar que as consequências práticas desses mecanismos não parecem ser uniformes entre as espécies bacterianas, e que a ação simultânea de todos esses fatores é responsável pelos resultados observados, sendo relevante também que esses fatores estão inter-relacionados (Daniels *et al.*, 1984; Katsouli *et al.*, 2022). É possível, inclusive, que se observe um efeito residual limitado após a embalagem ser aberta (Sivertsvik *et al.*, 2002).

Outros fatores externos também podem estar associados, como o crescimento de bactérias ácido lácticas (BAL), que é estimulado pela alta concentração de dióxido de carbono, desencadeando o aumento da concentração de ácido lático e bacteriocinas, que atuam como antimicrobianos naturais, resultando na inibição de outras bactérias (Masniyom, 2011).

Por meio desses mecanismos, o dióxido de carbono é particularmente eficaz contra bactérias Gram-negativo e aquelas envolvidas na deterioração aeróbica, como espécies de *Pseudomonas*, que são principais responsáveis pela deterioração do peixe em condições de aerobiose e refrigeração, provocando alterações na qualidade dos produtos pesqueiros (Masniyom, 2011; Zhuang *et al.*, 2022). Contudo, o dióxido de carbono não retarda o crescimento de todos os tipos de microrganismos.

O crescimento das BAL, como mencionado anteriormente, é favorecido em altas concentrações de dióxido de carbono e baixas concentrações de oxigênio, e o gás carbônico também exerce pouco efeito nas células de levedura (Masniyom, 2011; Zhuang *et al.*, 2022). Em geral, o que ocorre é uma redução na taxa de crescimento bacteriano como um todo, especialmente quando associado a baixas temperaturas, resultando na substituição da microbiota deteriorante dominante por microrganismos resistentes a altas concentrações de dióxido de carbono, como as BAL e as bactérias do gênero *Photobacterium* (Masniyom, 2011; Zhuang *et al.*, 2022).

Para que seja observado tal efeito bacteriostático, é essencial que uma quantidade adequada de dióxido de carbono esteja dissolvida no produto (Ohlsson e Bengtsson, 2022). Para garantir que essa concentração do gás esteja efetivamente dissolvida, a relação entre o volume de gás e o produto (G/P) deve ser cuidadosamente considerada. A literatura recomenda que a relação seja de 2:1 ou 3:1, mas é imprescindível realizar um estudo de caso para cada tipo de produto (Ohlsson e Bengtsson, 2022).

Apesar dos grandes benefícios bacteriostáticos e fungistáticos apresentados pela utilização do dióxido de carbono, alguns defeitos tecnológicos podem ser observados devido à sua aplicação. Dentre eles, podemos destacar o fenômeno conhecido como “colapso da embalagem”.

Como mencionado anteriormente, a dissolução do dióxido de carbono é altamente dependente da umidade e do teor de gordura do produto. Assim, alimentos com alto teor de umidade e/ou gordura, como algumas espécies de peixe, são mais propensos à absorção excessiva de dióxido de carbono, o que pode reduzir a pressão ou o volume da embalagem devido à alta solubilidade do gás, causando um desequilíbrio nas pressões entre o espaço interno e o ambiente externo da embalagem, resultando no colapso da embalagem (Parry, 2012; Lee, 2016). Esse efeito é especialmente perceptível em temperaturas baixas, uma vez que a temperatura também influencia diretamente o grau de dissolução do dióxido de carbono (Parry, 2012; Lee, 2016), bem como em embalagens que não possuem uma relação G/P adequada (Ohlsson e Bengtsson, 2022).

Outro defeito tecnológico está relacionado ao gotejamento excessivo na embalagem, que ocorre devido à dissolução do gás na superfície dos alimentos musculares frescos, o que reduz o pH o suficiente para reduzir a capacidade de retenção de água das proteínas (Katsouli *et al.*, 2022). A perda de líquidos durante o armazenamento é indesejável, pois torna o produto menos atraente para o consumidor, favorece o crescimento de microrganismos devido ao excesso de água no recipiente e resulta na perda de qualidade sensorial, especialmente pela redução da suculência (Katsouli *et al.*, 2022). Além disso, altas concentrações de dióxido de carbono podem induzir um sabor ácido nas carnes e promover descoloração, sendo esta última causada pela conversão da oximioglobina em metamioglobina (Luño *et al.*, 1999; Parry, 2012).

### **3.3.2 Oxigênio (O<sub>2</sub>)**

Usualmente, o recomendado para embalagens com atmosfera modificada é que a concentração de oxigênio seja a mínima possível. Esse procedimento se justifica devido ao fato de que a ausência de oxigênio, ou o vácuo, inibe o crescimento de bactérias aeróbias

deteriorantes, enquanto sua presença está diretamente associada aos processos de oxidação lipídica (Gonçalves *et al.*, 2021). Dessa forma, a concentração de oxigênio é especialmente reduzida em peixes gordurosos, como o salmão e a cavala (Gonçalves *et al.*, 2021).

No entanto, o O<sub>2</sub> pode ser utilizado em baixas concentrações em produtos pesqueiros, com o objetivo de retardar as condições anaeróbicas e evitar o crescimento de microrganismos estritamente anaeróbicos, entre os quais se encontra o patógeno *Clostridium botulinum*. É importante observar que a simples diminuição da concentração de O<sub>2</sub> pode favorecer a proliferação de microrganismos psicrotróficos e anaeróbicos facultativos, como *Listeria monocytogenes* e *Shewanella putrefaciens* (Gonçalves *et al.*, 2021).

Além disso, o uso de O<sub>2</sub> em embalagens com atmosfera modificada contribui para a manutenção da coloração vermelha da carne de determinadas espécies de peixe, como o atum, por exemplo. Isso ocorre porque o oxigênio modifica a mioglobina para sua forma oxigenada, a oximioglobina, conferindo à carne uma coloração vermelha, visivelmente atrativa ao consumidor (Masniyom, 2011; Gonçalves *et al.*, 2021).

### **3.3.3 Nitrogênio (N<sub>2</sub>)**

Devido às suas características inodoras, insípidas e de ser um gás inerte e de baixa solubilidade tanto em água quanto em gordura, a utilização do nitrogênio apresenta diversas vantagens no uso em EAM (Parry, 2012). Entre essas vantagens, podem ser citadas a capacidade de deslocar o oxigênio, o que contribui para retardar o processo de oxidação e prevenir o ranço oxidativo; a influência de forma indireta a inibição do crescimento de microrganismos deteriorantes aeróbicos e, finalmente, sua ação como gás de enchimento nas embalagens com atmosfera modificada, ajudando a neutralizar a deformação da embalagem resultante da dissolução do dióxido de carbono (Masniyom, 2011; Parry, 2012; Gonçalves *et al.*, 2021).

### **3.3.4 Monóxido de Carbono (CO)**

Nas embalagens com atmosfera modificada, o uso do monóxido de carbono é justificado pela atratividade que este gás confere ao produto, promovendo uma alteração na sua coloração. A coloração da carne está diretamente relacionada à aceitabilidade do produto pelo consumidor, pois este a associa a características de frescor (Djenane & Roncalés, 2018). A descoloração da carne pode levar à rejeição do produto no ponto de venda, gerando prejuízos significativos para a indústria, com perdas financeiras que podem ser estimadas em milhões de dólares (Djenane & Roncalés, 2018). Segundo Mancini e Hunt (2005), foi ainda relatada uma redução de 15% no preço da carne no varejo devido à descoloração da superfície.

Em condições de aerobiose, a coloração vermelha da carne é gerada pela oxigenação da desoximioglobina para oximioglobina, como resultado da exposição ao oxigênio (Djenane & Roncalés, 2018). Esse processo de oxigenação é considerado reversível, dependendo da pressão parcial de O<sub>2</sub>. No que se refere à descoloração da superfície da carne, ela ocorre devido à oxidação do pigmento oximioglobina ou desoximioglobina, formando a metamioglobina (Djenane & Roncalés, 2018). Essa oxidação do pigmento pode ser lentamente reversível pela redução da metamioglobina, mediada por enzimas, nos estágios iniciais da oxidação do pigmento (Djenane & Roncalés, 2018). Assim, a preservação da aparência da cor da carne envolve, principalmente, a prevenção ou o retardamento da formação de metamioglobina nas superfícies expostas da carne (Djenane & Roncalés, 2018).

Para prolongar a estabilidade da cor vermelha e minimizar as desvantagens associadas à embalagem aeróbica, foi desenvolvida a tecnologia da EAM associada ao uso do monóxido de carbono (CO-EAM). A razão pela qual a CO-EAM poderia melhorar a estabilidade da cor vermelha está relacionada à maior estabilidade da carboximioglobina em comparação à oximioglobina, devido à ligação mais forte do CO ao sítio ferro-porfirina da molécula de mioglobina (Mancini & Hunt, 2005; Djenane & Roncalés, 2018).

A afinidade da desoximioglobina pelo CO é de 28 a 51 vezes maior do que pelo oxigênio (Santos *et al.*, 2007). Além disso, a carboximioglobina é mais estável do que a oximioglobina, o que torna menos provável a sua oxidação e transformação em metamioglobina, gerando o pigmento marrom (Djenane & Roncalés, 2018). Diante dessas características, a necessidade do uso de oxigênio para alcançar a coloração brilhante é eliminada, juntamente com os prejuízos associados ao uso do oxigênio, como a oxidação lipídica (Djenane & Roncalés, 2018).

No que se refere ao uso do monóxido de carbono em embalagens de carnes, já em 1985, as indústrias de carne norueguesas utilizavam o CO em concentrações de 0,4%, aplicando esta tecnologia em carnes bovina, suína e de cordeiro frescas, com 60-70% de CO<sub>2</sub> e o restante como N<sub>2</sub> (Djenane & Roncalés, 2018). Cerca de 60% da carne fresca na Noruega foi vendida utilizando essa composição gasosa, até que, em 2004, o uso do CO foi proibido devido à implementação de regulamentos alimentares da União Europeia (UE), apesar do sucesso comercial e histórico de segurança do processo norueguês (Djenane & Roncalés, 2018).

Apesar de se tratar de um gás capaz de gerar risco à saúde humana quando inalado em grandes quantidades (Djenane & Roncalés, 2018), o risco de toxicidade por CO proveniente do processo de embalagem ou do consumo de carnes tratadas com CO é insignificante. Os aspectos toxicológicos do CO utilizado no EAM da carne foram revisados por Sørheim *et al.* (1999), e

concluíram que, com até cerca de 0,5% de CO em EAM, não era provável que fosse possível desencadear nenhum nível de toxicidade humana.

Cornfort e Hunt (2008) também observaram que o consumo de carne tratada com CO não está associado a quaisquer riscos para a saúde, e a carne do CO-EAM resulta apenas em quantidades insignificantes de CO e carboxihemoglobina em humanos. Isso também foi constatado pelas autoridades Norueguesas de Controle Alimentar, que não registraram surtos ou uma maior frequência de casos esporádicos de doenças de origem alimentar associadas a tais produtos desde 1985 (Djenane & Roncalés, 2018).

No entanto, até os dias atuais, o uso de CO na indústria alimentícia continua sendo controverso. Alguns países, como os EUA, Canadá, Austrália e Nova Zelândia, aprovam sua aplicação, enquanto os estados membros da União Europeia proíbem o uso no processamento de alimentos (Djenane & Roncalés, 2018). Embora o risco de toxicidade por monóxido de carbono ao consumidor tenha sido considerado insignificante, a principal preocupação que embasa a proibição é que o CO poderia dificultar a identificação da deterioração da carne (Djenane & Roncalés, 2018).

Isso ocorre devido à alteração das características visuais do produto, uma vez que a cor vermelha-cereja pode permanecer estável além da vida útil e da segurança microbiológica da carne, encobrendo a deterioração (Djenane & Roncalés, 2018). Tal fenômeno poderia induzir os consumidores a considerarem, erroneamente, um produto deteriorado como fresco e seguro. Assim, produtos cárneos com CO, armazenados em condições inadequadas, como o aumento de temperatura que pode ocorrer durante o manuseio incorreto ou transporte, poderiam ter suas evidências visuais de deterioração ocultadas (Djenane & Roncalés, 2018).

Neste contexto, é importante mencionar a relevância de algumas espécies de peixes no mercado de pescado. Isso porque é necessário avaliar o risco toxicológico associado ao prolongamento da vida útil dos alimentos, em particular para peixes ricos em histidina, como atum, cavala, sardinha, arenque e espadarte (Visciano *et al.* 2014). A utilização excessiva de CO pode apresentar um risco adicional nestes casos, uma vez que pode mascarar visualmente estados de decomposição (Djenane & Roncalés, 2018), levando ao consumo de peixes com altos níveis de histamina, caso não haja controle rigoroso de temperatura (Visciano *et al.* 2014).

A produção de histamina está associada a condições inadequadas de armazenamento, particularmente à elevação da temperatura, que favorece o crescimento microbiano e a atividade descarboxilásica que converte histidina em histamina, podendo este composto estar presente mesmo em peixes sem sinais de decomposição (Visciano *et al.* 2014). A ingestão de peixes com altos níveis de histamina pode causar uma intoxicação alimentar conhecida como

escombrotóxico, caracterizada por sintomas como rubor facial, cefaleia, náuseas e distúrbios gastrointestinais (Visciano *et al.* 2014).

Sendo assim, seu uso necessita de estudos específicos para cada produto, visando garantir que as características visuais aceitas pelo consumidor permaneçam apenas durante o período de vida útil, que a cadeia de frio seja efetiva integralmente e que haja uma indicação clara ao consumidor sobre o respeito à data de validade.

### 3.3.5 Outros gases

Os principais gases utilizados em atmosfera modificada são o dióxido de carbono, oxigênio e nitrogênio. No entanto, pesquisas recentes têm investigado o efeito de outros gases na preservação de alimentos, entre os quais se destacam o hidrogênio e o argônio.

O hidrogênio molecular ( $H_2$ ) é um gás incolor e insípido, e sua incorporação em EAM, denominada embalagem em atmosfera redutora, foi investigada por Sezer *et al.* (2022) em peixes. Neste estudo, a utilização de atmosfera redutora com hidrogênio a 4% inibiu significativamente a formação de aminas biogênicas, como histamina, tiramina, putrescina e cadaverina em truta arco-íris e carapau.

Esta descoberta indicou que a incorporação de hidrogênio proporcionou vantagens na inibição de aminas biogênicas, com taxas de redução cerca de duas vezes maiores em comparação com a atmosfera modificada sem hidrogênio, sendo este efeito relacionado à presença de propriedades antioxidantes do gás. Contudo, a utilização do hidrogênio ainda é restrita devido ao custo, dificuldade de manuseio e os perigos de inflamabilidade quando em altas concentrações (Sezer *et al.*, 2022).

Outro gás que pode ser incorporado é o argônio, gás inerte, incolor e insípido, que tem sido estudado como uma alternativa ao nitrogênio ( $N_2$ ) como gás de preenchimento. Herbert *et al.* (2013) sugeriram que o argônio poderia ser mais eficaz ao induzir mudanças na conformação de proteínas, interferindo nos receptores locais de oxigênio das enzimas, deslocando o oxigênio de forma mais eficaz que o nitrogênio. Esses autores verificaram a diminuição na taxa de crescimento bacteriano em frango quando foi usada atmosfera com 82% de argônio e 18% de dióxido de carbono. Diante dessa hipótese, Olatunde e Benjakul (2019) verificaram que, em comparação à atmosfera modificada com o uso de nitrogênio, a atmosfera com argônio apresentou redução efetiva na carga microbiana e oxidação lipídica em badejo asiático.

### 3.3.6 Deterioração em Atmosfera modificada

Devido às características e mecanismos de ação dos gases utilizados em embalagens com atmosfera modificada, incluindo a limitação da disponibilidade de oxigênio, este ambiente favorece o crescimento e a deterioração por meio de bactérias anaeróbicas ou anaeróbicas facultativas. Dentre essas bactérias, destacam-se as do gênero *Photobacterium*. Diversos estudos comprovam a dominação desse gênero em embalagens com atmosfera modificada (Dalgaard, 1995; Kuuliala *et al.*, 2018; Lerfall *et al.*, 2018; Antunes-Rohling *et al.*, 2019).

Um estudo relevante é o de Sørensen *et al.* (2020), no qual foi observada a alteração das espécies dominantes em filés de bacalhau do Atlântico armazenados em gelo, em função da composição da atmosfera. Como resultado, constatou-se que, em condições de aerobiose, as espécies dominantes eram *Pseudomonas* spp., *Photobacterium* spp., *Shewanella* spp. e *Acinetobacter* spp., enquanto em embalagens com atmosfera modificada (40% CO<sub>2</sub>: 60% N<sub>2</sub>), *Photobacterium* spp assumiu a posição de gênero dominante, indicando que essa condição favorece especificamente este grupo bacteriano.

Dentre outras classes que se beneficiam da mudança na atmosfera, as BAL estão incluídas, tendendo a se tornar dominantes nessas condições. No estudo de Zhang *et al.* (2019), *Pseudomonas* e *Psychrobacter* dominaram a microbiota em filés de carpa capim embalados com ar, enquanto *Lactococcus* (um dos gêneros comuns de BAL) tornou-se o gênero predominante em atmosfera modificada com composição de 75% CO<sub>2</sub>: 25% N<sub>2</sub>. Outros gêneros de BAL também foram observados como dominantes em amostras com atmosfera modificada, incluindo *Carnobacterium* (Hansen *et al.*, 2007; Parlapani *et al.*, 2015; Silbande *et al.*, 2018).

Em relação à susceptibilidade à ação direta do dióxido de carbono, bactérias deteriorantes comuns em produtos da pesca embalados no ar, como os gêneros *Aeromonas* e *Shewanella*, geralmente são mais resistentes ao CO<sub>2</sub> do que *Pseudomonas*, e podem manter um crescimento lento mesmo em atmosfera modificada (Antunes-Rohling *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Jakobsen *et al.*, 2020).

Essa viabilidade observada em *Aeromonas* e *Shewanella* pode ser atribuída à existência de espécies geneticamente modificadas que se adaptaram a ambientes de anaerobiose, tornando-se anaeróbicas facultativas (Antunes-Rohling *et al.*, 2019). Em contraste, *Pseudomonas* é geralmente considerada uma das bactérias mais sensíveis ao CO<sub>2</sub> (Antunes-Rohling *et al.*, 2019).

Tendo em vista essa dinâmica de susceptibilidade entre as espécies, o uso de embalagens com atmosfera modificada, baseadas em altas concentrações de CO<sub>2</sub>, pode ser utilizado como

um método de inibição específica, visando *Pseudomonas*, uma bactéria com forte capacidade de deterioração (Antunes-Rohling *et al.*, 2019). A constatação desse fato sugere que as alterações na microbiota, e não apenas a redução do crescimento microbiano, causadas pela atmosfera modificada, também podem ser uma razão importante para seus efeitos conservantes (Antunes-Rohling *et al.*, 2019).

Neste contexto, a alteração da microbiota dominante aeróbica para a dominância das BAL (por exemplo, *Lactococcus* e *Lactobacillus*) pode justificar os efeitos conservantes das embalagens com atmosfera modificada, pois, nos casos em que essa classe se torna dominante, ela normalmente exerce menor capacidade de deterioração dos produtos da pesca quando comparada às *Pseudomonas*, além de inibir outras bactérias nocivas por meio da liberação de bacteriocinas e produção de ácido láctico (Zhuang *et al.*, 2020).

Em contrapartida, estudos anteriores demonstraram que o *Photobacterium* também é um microrganismo ativo na produção de metabólitos de deterioração, como o TMA (Dalgaard, 1995; Kuuliala *et al.*, 2018; Sørensen *et al.*, 2020). Sørensen *et al.* (2020) relataram ainda que o *Photobacterium* spp., isolado do bacalhau, apresentou formação de BVT muito maior quando comparado aos gêneros *Shewanella* spp. e *Pseudomonas* spp.. Portanto, os efeitos conservantes do EAM em amostras cuja microbiota é dominada por *Photobacterium* podem ser atribuídos principalmente à inibição do metabolismo e crescimento bacteriano, em vez de mudanças na microbiota de *Pseudomonas* para *Photobacterium*.

Dessa forma, apesar do grande potencial do uso da atmosfera modificada na inibição de bactérias deteriorantes aeróbicas, evitando o domínio de determinados gêneros, existe o risco de que outros gêneros, igualmente ou até mais deteriorantes, se tornem dominantes.

Para lidar com esse problema, Lerfall *et al.* (2018) relataram alta concentração de O<sub>2</sub> poderia inibir a dominância de *Photobacterium* e melhorar a qualidade físico-química (por exemplo, concentrações mais baixas de cadaverina e hipoxantina). Resultados semelhantes também foram observados por Hansen *et al.* (2007) e Sivertsvik (2007), que comprovaram os efeitos positivos do O<sub>2</sub> na qualidade e prazo de validade dos produtos da pesca em EAM.

No entanto, uma inibição excessiva da dominância de *Photobacterium* pelo uso do oxigênio pode induzir um aumento correspondente de microrganismos aeróbicos como *Pseudomonas* (Zhuang *et al.*, 2020). Sendo assim, é importante que haja equilíbrio entre microrganismos aeróbicos e anaeróbicos, ajustando a composição da atmosfera ou combinando outras técnicas de preservação. Em outras palavras, inibir o crescimento microbiano e retardar o domínio das bactérias deteriorantes específicas pode ser mais eficaz para embalagens com atmosfera modificada do que simplesmente alterar a microbiota (Zhuang *et al.*, 2020).

### 3.3.7 Limitações e desafios do uso de frente a microrganismos patogênicos

Os peixes podem atuar como portadores de microrganismos causadores de Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar (DTHA), sendo que diversos patógenos podem ser encontrados nesses organismos. Alguns microrganismos, como *Vibrio* spp., *Aeromonas hydrophila* e *Plesiomonas shigelloides*, estão frequentemente presentes no ambiente aquático ao qual os peixes são expostos (Sivertsvik *et al.*, 2002). Já aqueles provenientes de reservatórios animais ou humanos, como *Salmonella* spp., *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, estão diretamente relacionados às práticas de higiene durante a fabricação e manipulação dos produtos (Sivertsvik *et al.*, 2002).

Neste último caso, estudos (Miettinen & Wirtanen, 2006; Gazal *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2021; Porto *et al.*, 2022) ainda tem demonstrado que estes microrganismos patogênicos também podem estar presentes na etapa primária da cadeia produtiva, mesmo que os peixes não sejam seus reservatórios naturais. Essa contaminação pode ocorrer por meio da água, da ração ou manejo inadequado do sistema produtivo, resultando em matéria prima já contaminada antes mesmo do início do processo. Isso reforça a importância do controle microbiológico não apenas nas etapas de fabricação e manipulação, mas também nas boas práticas aplicadas à produção aquícola.

Ao considerar os potenciais microrganismos patogênicos em peixes, é essencial diferenciar entre duas categorias de produtos embalados em AM. A primeira compreende aqueles destinados ao consumo sem qualquer tratamento térmico, isto é, produtos prontos para consumo, como sashimi, sushi e produtos defumados. A segunda refere-se aos produtos que serão submetidos a tratamento térmico com um binômio tempo/temperatura adequado para a inativação de patógenos antes do consumo, como ocorre com a maioria dos peixes frescos (Sivertsvik *et al.*, 2002).

Independentemente da categoria, a implementação de medidas de controle durante o processamento e o manuseio é fundamental para prevenir a contaminação inicial ou a proliferação desses microrganismos. No entanto, o modo de consumo do alimento pode amplificar ou mitigar o risco associado a patógenos específicos.

Estudos iniciais demonstraram que o uso da EAM não eleva os riscos de crescimento de *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens*, *Yersinia* spp., *Campylobacter* spp., *Aeromonas hydrophila*, *Vibrio parahaemolyticus* e *Enterococcus* além dos níveis esperados para produtos armazenados em condições normais de exposição ao ar (Silliker & Wolfe, 1980; Reddy *et al.*, 1992). No caso específico de *Plesiomonas shigelloides*,

este microrganismo é completamente inibido em ambientes com altas concentrações de dióxido de carbono (Kirov, 1997).

Em um estudo conduzido por Kimura e Murakami (1993), não foram observadas diferenças na sobrevivência de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Vibrio parahaemolyticus* e *Clostridium perfringens* em cavala (*Trachurus japonicus*) armazenada ao ar, em atmosferas contendo 100% de nitrogênio (N<sub>2</sub>) ou em uma composição de 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 60% de N<sub>2</sub>, a uma temperatura de 5°C.

Slade & Davies (1997) investigaram a sobrevivência de cepas resistentes a antibióticos de *Yersinia enterocolitica*, *Aeromonas* spp. e *Salmonella* Typhimurium inoculadas em peixes armazenados a 0°C ou 5°C, sob diferentes condições de atmosfera: ao ar ou em embalagens com atmosfera modificada contendo distintas concentrações de CO<sub>2</sub>. Esses autores identificaram um efeito bacteriostático do CO<sub>2</sub> sobre *Salmonella* em temperaturas reduzidas, bem como o crescimento de *Aeromonas* e *Yersinia*. Entretanto, as condições de EAM demonstraram capacidade de inibição microbiana quando comparadas ao armazenamento ao ar.

No contexto das EAM, os produtos de pescado armazenados a temperaturas de refrigeração, isso é, abaixo de 10°C, *Listeria monocytogenes* se torna extremamente relevante, sendo sua incidência mais expressiva nesse tipo de armazenamento do que em produtos mantidos sob condições aeróbicas (Sivertsvik *et al.*, 2002).

No que diz respeito a *L. monocytogenes*, verificou-se que embalagens contendo 100% de CO<sub>2</sub> reduziram, mas não inibiram totalmente, o crescimento dessa bactéria em *nuggets* de frutos do mar crus e cozidos previamente inoculados (Lyver *et al.*, 1998). Dessa forma, a utilização de EAM com altas concentrações de CO<sub>2</sub> pode retardar a proliferação de *L. monocytogenes*. No entanto, a combinação entre atmosfera modificada e armazenamento refrigerado, isoladamente, pode não ser suficiente para controlar completamente o crescimento desse patógeno em determinados produtos (Sivertsvik *et al.*, 2002). Para garantir a segurança microbiológica, especialmente em produtos com prazo de validade prolongado, recomenda-se a implementação de barreiras adicionais (Sivertsvik *et al.*, 2002).

### 3.4 Microrganismos patogênicos relevantes em peixes em EAM

#### 3.4.1 *Listeria monocytogenes*

*Listeria monocytogenes* é um bacilo Gram-positivo, não esporulante, anaeróbio facultativo e móvel a temperaturas entre 20°C e 28°C, deslocando-se por meio de flagelos (Allerberger, 2003; Roberts *et al.*, 2020; Koopmans *et al.*, 2023). Diferentemente de outros patógenos de origem alimentar que requerem condições ambientais específicas para seu crescimento e multiplicação, *L. monocytogenes* apresenta notável plasticidade fisiológica, sendo capaz de proliferar em temperaturas de refrigeração (0–4°C), resistir a concentrações elevadas de NaCl e adaptar-se a uma ampla faixa de pH (4,0–9,6), o que lhe confere uma vantagem adaptativa em diferentes substratos e superfícies (Bacur *et al.*, 2018; Osek *et al.*, 2022; Zakrzewski *et al.*, 2024).

Do ponto de vista ecológico, *L. monocytogenes* é amplamente distribuída no ambiente, podendo ser isolada de solos, água, vegetação em decomposição e do trato gastrointestinal de humanos e animais, incluindo espécies silvestres e domésticas, apesar de não fazer parte da microbiota nativa de peixes (Dhama *et al.*, 2015; Koopmans *et al.*, 2023). Sua presença em diferentes nichos ecológicos facilita a contaminação de matérias-primas e produtos alimentícios ao longo da cadeia produtiva, representando um desafio crítico para a indústria de alimentos.

A persistência desse microrganismo em instalações industriais é atribuída, em grande parte, à sua capacidade de adesão a superfícies abióticas e à formação de biofilmes estruturados, sendo capaz de se fixar em superfícies de processamento de alimentos e se multiplicar para formar biofilmes em locais inacessíveis em instalações de processamento (Tabit, 2018). Os biofilmes protegem a bactéria contra a ação antimicrobiana, permitindo-lhe colonizar equipamentos de processamento de alimentos, correias transportadoras, tubulações, pisos e sistemas de drenagem, persistindo por meses ou até anos, contaminando diferentes superfícies em plantas de processamento de alimentos (Tabit, 2018). Superfícies frequentemente utilizadas na indústria de alimentos, como aço inoxidável, borracha e plásticos, favorecem essa adesão, possibilitando a permanência da bactéria por períodos prolongados e aumentando o risco de contaminação cruzada (Doijad *et al.*, 2015; Nowak *et al.*, 2017).

Além da proteção conferida pelos biofilmes, *L. monocytogenes* pode apresentar resistência a diversos sanitizantes utilizados na higienização industrial Magalhães *et al.*, 2016; Skowron *et al.*, 2018). Essa resistência pode ser atribuída a fatores como presença de matéria orgânica residual, inadequação na aplicação dos agentes desinfetantes, pressão seletiva decorrente do uso contínuo de biocidas ou, ainda, à adaptação bacteriana a determinados

compostos químicos (Magalhães *et al.*, 2016; Skowron *et al.*, 2018). A persistência do microrganismo em ambientes industriais representa um risco significativo para a segurança de alimentos, uma vez que sua disseminação em superfícies de contato pode resultar na contaminação de produtos prontos para o consumo, potencializando a ocorrência de surtos de listeriose.

Diante da capacidade adaptativa e da resistência de *L. monocytogenes* em ambientes de processamento de alimentos, o controle eficaz desse patógeno demanda a implementação de estratégias rigorosas de higienização e monitoramento microbiológico contínuo. A aplicação de sanitizantes eficazes, na concentração e tempo de contato adequados, aliada a práticas preventivas, como monitoramento contínuo da higiene e a associação a condições ambientais específicas, como utilização de água em altas temperatura, são medidas essenciais para a mitigação dos riscos associados a essa bactéria na indústria alimentícia (Skowron *et al.*, 2019).

O desenvolvimento de novas abordagens tecnológicas, incluindo o uso de biocidas alternativos, bacteriocinas e tratamentos físicos complementares, como luz ultravioleta (UV), também se destaca como uma estratégia promissora para minimizar a persistência de *L. monocytogenes* e garantir a segurança dos alimentos processados.

#### **3.4.1.1 Patogenicidade e manifestações clínicas**

A listeriose é uma infecção severa causada por *L. monocytogenes*, um patógeno intracelular facultativo capaz de atravessar múltiplas barreiras fisiológicas no hospedeiro humano, incluindo as barreiras intestinal, hematoencefálica e placentária (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Esse microrganismo utiliza um arsenal de fatores de virulência para adesão, invasão, evasão da resposta imune e disseminação sistêmica, resultando em manifestações clínicas graves, como septicemia, meningoencefalite e infecção neonatal (Osek & Wiczorek, 2022).

A patogênese da listeriose pode ser dividida em seis etapas principais: (1) adesão e invasão da mucosa intestinal, (2) escape do vacúolo fagocítico e replicação intracelular, (3) disseminação via sistema linfático e sanguíneo, (4) evasão da resposta imune do hospedeiro, (5) travessia de barreiras fisiológicas e (6) infecção sistêmica, como serão descritas a seguir.

##### **3.4.1.1.1 Adesão e Invasão da Mucosa Intestinal**

A infecção inicia-se pela ingestão de alimentos contaminados contendo *L. monocytogenes*. No trato gastrointestinal, a bactéria adere às células epiteliais intestinais utilizando proteínas de superfície conhecidas como Internalinas (InlA e InlB), sendo estas duas das principais moléculas utilizadas pelo patógeno para invadir diferentes células normalmente

não fagocíticas, como enterócitos, fibroblastos, hepatócitos ou células endoteliais (Koopmans *et al.*, 2023; Osek & Wieczorek, 2022).

A InlA interage com a E-caderina, um componente das junções epiteliais intestinais, promovendo a endocitose da bactéria (Koopmans *et al.*, 2023; Osek & Wieczorek, 2022). A InlB interage com o receptor c-Met, ativando cascatas de sinalização celular que facilitam a invasão (Quereda *et al.*, 2021). Ambas as proteínas atuam sequestrando o maquinário de reciclagem endocítica destes receptores, induzindo eventos de sinalização que desencadeiam, em última análise, a remodelação do citoesqueleto e a internalização bacteriana (Koopmans *et al.*, 2023).

Além disso, *L. monocytogenes* ganha acesso ao compartimento intracelular através da função fagocítica normal de macrófagos e outras células apresentadoras de antígenos (Koopmans *et al.*, 2023). Esta via de internalização é independente das proteínas InlA/InlB. Uma vez internalizada, seja por uma célula do sistema imune fagocítica ou não, *L. monocytogenes* encontra-se em vacúolos fagocíticos, onde evita a degradação lisossomal (Koopmans *et al.*, 2023). Esse escape é mediado por fatores de virulência essenciais, como:

**Listeriolisina O (LLO)** – Uma toxina formadora de poros que rompe a membrana do vacúolo (Osek & Wieczorek, 2022).

**Fosfolipases PlcA e PlcB** – Enzimas que degradam fosfolipídios da membrana fagossomal, facilitando a liberação da bactéria no citoplasma (Koopmans *et al.*, 2023).

#### 3.4.1.1.2 Sobrevivência e Replicação Intracelular

Uma vez no citoplasma da célula hospedeira, *L. monocytogenes* explora mecanismos específicos para sua sobrevivência e rápida replicação, como a utilização dos primeiros intermediários do metabolismo da glicose na célula hospedeira e a polimerização de actina via ActA (Quereda *et al.*, 2021). A proteína ActA promove a formação de uma cauda de actina, permitindo que a bactéria se mova no citoplasma e invada células adjacentes sem ser exposta ao meio extracelular (Quereda *et al.*, 2021). Em seu movimento através do citosol, as bactérias eventualmente alcançam a periferia da célula e empurram para fora em saliências semelhantes a pseudópodes, com uma bactéria na ponta, conhecida como “listeriópodes” (Koopmans *et al.*, 2023). Estas estruturas são eventualmente fagocitadas por estruturas vizinhas, resultando em vacúolos secundários de membrana dupla, dos quais *Listeria* escapa novamente pela ação da LLO, PlcA e, particularmente, PlcB, reiniciando o ciclo de infecção (Koopmans *et al.*, 2023).

### 3.4.1.1.3 Disseminação Via Sistema Linfático e Sanguíneo

Após atravessar a mucosa intestinal, o microrganismo se desloca ainda mais através da linfa e do sangue para o fígado e baço. A parte principal da carga de *L. monocytogenes* no trato gastrointestinal é extracelular, mas a pequena proporção de bactérias intracelulares é crucial para uma disseminação eficiente para os linfonodos mesentéricos (Quereda *et al.*, 2021), sobrevivendo dentro de macrófagos. Isso permite sua disseminação pelo sistema linfático e circulação sanguínea, promovendo bacteremia e alcançando órgãos como fígado e baço (Koopmans *et al.*, 2023). No fígado, a bactéria pode infectar hepatócitos e células de Kupffer, levando à formação de micro abscessos hepáticos (Koopmans *et al.*, 2023).

É durante esta fase que as bactérias entram no sistema nervoso central (Quereda *et al.*, 2021). A remodelação que ocorre na parede celular pode ajudar *L. monocytogenes* a sobreviver à atividade do sistema imune no sangue e no plasma e atingir órgãos-alvo, como o cérebro ou a placenta (Quereda *et al.*, 2021).

### 3.4.1.1.4 Evasão da Resposta Imunológica

Embora as infecções por este patógeno provoquem fortes respostas imunológicas, *L. monocytogenes* desenvolveu mecanismos para escapar e modular essas defesas do hospedeiro. Uma estratégia importante de *L. monocytogenes* é usar a motilidade baseada em actina para se espalhar de célula para célula, evitando o meio extracelular (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023).

A propagação de *L. monocytogenes* pelos tecidos do hospedeiro, que ocorre principalmente de citosol para citosol, permite à bactéria evitar significativamente a exposição ao espaço extracelular (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Esse modo de disseminação tem implicações cruciais para a resposta imunológica, uma vez que as defesas extracelulares do hospedeiro, como anticorpos, complemento e neutrófilos, que são eficazes na eliminação do microrganismo, não conseguem acessar as células infectadas devido à propagação intracelular do patógeno (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Em vez disso, a resolução da infecção depende da resposta imunológica inata, especificamente da imunidade citosólica (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023).

Essa resposta envolve a ativação de macrófagos M1 (ativados de forma clássica), células T CD8<sup>+</sup> restritas ao complexo principal de histocompatibilidade (MHC) classe I, e mediadores como o fator de necrose tumoral alfa (TNF- $\alpha$ ) e o interferon gama (IFN- $\gamma$ ), que são essenciais para a eliminação da infecção (Koopmans *et al.*, 2023).

Contudo, *Listeria* provoca a inibição da apresentação antigênica, fazendo com que a célula hospedeira reduza a expressão do complexo MHC classe I, prejudicando a ativação de linfócitos T citotóxicos (Wang *et al.* 2020).

#### 3.4.1.1.5 Travessia de Barreiras Fisiológicas

A disseminação hematogênica permite que *L. monocytogenes* atravesse barreiras fisiológicas críticas, levando a manifestações clínicas graves. O principal evento na patogênese das infecções do Sistema Nervoso Central (SNC) é a interação com as barreiras hematoencefálicas. A neuroinvasão por *L. monocytogenes* ocorre no contexto de uma doença sistêmica e normalmente resulta de bacteremia e disseminação através da corrente sanguínea, mas pode ocorrer através das fibras das células nervosas ligadas aos tecidos periféricos (Quereda *et al.*, 2021; Osek & Wiczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023).

Evidências indicam que as bactérias transportadas no sangue podem ser extracelulares, onde bactérias, tanto livres quanto associadas na superfície das células circulantes, podem reconhecer receptores na superfície das barreiras e atravessá-las (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Além disso, as bactérias que atravessam a barreira hematoencefálica podem estar associadas a leucócitos infectados, utilizados como meios para obter acesso ao sistema nervoso central (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Uma vez que as bactérias tenham sido detectadas no líquido cefalorraquidiano pelo sistema imunológico, macrófagos e neutrófilos são atraídos para o SNC, resultando em maior produção de citocinas pró-inflamatórias (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023). Durante a meningoencefalite listerial, ocorre uma resposta inflamatória grave. Esta via hematogênica é provavelmente a mais frequente em humanos, levando a meningite ou meningoencefalite (Quereda *et al.*, 2021; Koopmans *et al.*, 2023).

Tal como a principal via de invasão do cérebro por *L. monocytogenes*, a colonização listerial da placenta também é hematogênica, sendo este microrganismo também capaz de atravessar a barreira placentária e infectar o feto em mulheres grávidas, resultando em natimortos ou em infecções neonatais letais frequentes (Osek & Wiczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023). Todo o processo de entrada não está totalmente esclarecido, mas se deduz que as bactérias podem atravessar o endotélio dos vasos sanguíneos maternos e depois passar para o sistema circulatório fetal das vilosidades placentárias. A infecção do feto pode ser alcançada de duas maneiras: como disseminação célula a célula a partir de fagócitos maternos infectados ou através da infecção de trofoblastos com *L. monocytogenes* que circula no sangue (Osek & Wiczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023).

As mulheres grávidas infectadas com *L. monocytogenes* podem ser assintomáticas ou apresentar sintomas inespecíficos semelhantes aos da gripe. Contudo, a infecção associada à gravidez apresenta-se geralmente no feto com septicemia, pneumonia ou meningite, e muitas vezes termina com aborto (20–30% dos casos), dando à luz uma criança morta ou parto prematuro (Osek & Wieczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023).

Alguns estudos demonstraram que nem todos os casos de listeriose nas mães durante a gravidez estão associados à infecção do feto e cerca de 30% dos casos relacionados à gravidez não resultam em nenhuma das complicações descritas acima (Osek & Wieczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023). A forma neonatal de listeriose é geralmente o resultado da transmissão vertical de *L. monocytogenes* da mãe para o feto, quer por ingestão de líquido amniótico infectado durante a vida intrauterina, por via transplacentária a partir da circulação materna ou por colonização ascendente a partir da vagina infectada, ou, raramente, por infecção horizontal após o nascimento (Osek & Wieczorek, 2022; Koopmans *et al.*, 2023).

#### **3.4.1.1.6 Infecção Sistêmica e Manifestações Clínicas**

A apresentação clínica da listeriose pode variar desde uma infecção gastrointestinal autolimitada até formas invasivas severas, como meningite, meningoencefalite e septicemia (Koopmans *et al.*, 2023; Quereda *et al.*, 2021; Osek & Wieczorek, 2022). De acordo com as características epidemiológicas e clínicas, a doença pode ser classificada em três principais formas: listeriose invasiva, listeriose em gestantes e neonatos, e listeriose febril autolimitada (Koopmans *et al.*, 2023; Quereda *et al.*, 2021; Osek & Wieczorek, 2022).

A listeriose invasiva é a forma mais grave da infecção e ocorre predominantemente em indivíduos imunocomprometidos, idosos (>65 anos) e neonatos (Koopmans *et al.*, 2023). Essa forma da doença resulta da disseminação hematogênica da bactéria após sua translocação pelo epitélio intestinal e subsequente invasão de órgãos-alvo, como o SNC e o sistema cardiovascular. As principais manifestações incluem septicemia, meningite/meningoencefalite e infecções localizadas (Koopmans *et al.*, 2023).

A bacteremia pode manifestar-se de forma transitória ou persistente, com sintomas inespecíficos, como febre, calafrios, fadiga e hipotensão. Nos casos mais graves, evolui para sepse, caracterizada por disfunção de múltiplos órgãos e choque séptico (Quereda *et al.*, 2021). A mortalidade em pacientes sépticos pode atingir até 30%, sendo fundamental o diagnóstico precoce e a instituição de antibioticoterapia adequada (Quereda *et al.*, 2021).

A neuroinvasão de *L. monocytogenes* ocorre após a travessia da barreira hemoencefálica, levando à inflamação das meninges e do parênquima cerebral (Koopmans *et*

*al.*, 2023). A meningite listeriana representa cerca de 20% dos casos de meningite bacteriana em adultos imunocomprometidos, manifestando-se com febre alta, cefaleia intensa, rigidez de nuca, sinais neurológicos focais e alterações do nível de consciência (Koopmans *et al.*, 2023). A meningoencefalite listeriana pode evoluir para encefalite do tronco cerebral (*rhombencefalite*), caracterizada por sintomas como disartria, ataxia, paralisia de nervos cranianos e distúrbios do estado de alerta. Essa forma é considerada um marcador clínico altamente sugestivo de listeriose e apresenta elevada letalidade (Koopmans *et al.*, 2023).

Embora rara, a endocardite causada por *L. monocytogenes* pode ocorrer em pacientes com valvulopatias ou próteses valvares, com alta taxa de complicações tromboembólicas e mortalidade superior a 50% (Osek & Wieczorek, 2022). A bactéria também pode causar artrite séptica, osteomielite e abscessos cerebrais, especialmente em pacientes imunossuprimidos (Osek & Wieczorek, 2022).

A listeriose na gestação é particularmente preocupante devido à capacidade de *L. monocytogenes* de atravessar a barreira placentária, resultando em infecção fetal e alta taxa de morbimortalidade neonatal. A transmissão vertical pode ocorrer tanto por via transplacentária, levando à listeriose congênita, quanto por exposição ao canal de parto contaminado, causando infecção neonatal tardia (Koopmans *et al.*, 2023; Quereda *et al.*, 2021).

Em gestantes, a infecção geralmente se manifesta como um quadro febril inespecífico, frequentemente confundido com uma síndrome gripal. Sintomas como febre moderada, mialgia, fadiga e sintomas gastrointestinais podem estar presentes. Apesar da infecção materna ser frequentemente branda, o risco de transmissão vertical e complicações fetais é significativo (Osek & Wieczorek, 2022). A infecção fetal pode resultar em aborto espontâneo, natimortalidade, parto prematuro ou nascimento de neonatos sépticos. A *granulomatosis infantiseptica*, uma manifestação rara, porém grave, da listeriose neonatal, é caracterizada por múltiplos granulomas disseminados no fígado, baço, pulmões e pele, levando a sepse neonatal fulminante (Quereda *et al.*, 2021). O envolvimento pulmonar grave pode causar insuficiência respiratória neonatal e óbito intraútero (Quereda *et al.*, 2021).

Recém-nascidos que adquirem *L. monocytogenes* durante o parto ou no ambiente hospitalar podem desenvolver a forma tardia da listeriose neonatal, caracterizada por meningite bacteriana (Koopmans *et al.*, 2023). Essa condição manifesta-se entre a segunda e a quarta semana de vida, com sinais como irritabilidade, letargia, apneia, dificuldade alimentar e convulsões. O prognóstico depende da precocidade do diagnóstico e do início do tratamento antimicrobiano adequado (Koopmans *et al.*, 2023).

A listeriose febril autolimitada ocorre predominantemente em indivíduos imunocompetentes e resulta da ingestão de alimentos contaminados com altas cargas de *L. monocytogenes*. Essa forma da doença se apresenta como uma gastroenterite febril transitória e autolimitada (Osek & Wieczorek, 2022). O período de incubação varia de 6 a 48 horas e os principais sintomas incluem diarreia aquosa, náuseas, vômitos, dor abdominal e febre baixa a moderada (Osek & Wieczorek, 2022). O quadro clínico se assemelha a outras infecções gastrointestinais bacterianas, como as causadas por *Salmonella* spp. e *Escherichia coli* enterotoxigênica (Quereda *et al.*, 2021).

Em indivíduos saudáveis, a listeriose febril geralmente se resolve espontaneamente dentro de 2 a 5 dias, sem necessidade de tratamento antimicrobiano. No entanto, em idosos, gestantes e pacientes imunocomprometidos, a infecção pode evoluir para a forma invasiva, resultando em complicações graves, como septicemia e meningite (Koopmans *et al.*, 2023).

#### **3.4.1.2 Dados epidemiológicos**

Diante dos impactos resultantes da infecção por *L. monocytogenes*, esta configura-se como um problema de saúde pública de grande relevância, especialmente devido à sua elevada taxa de letalidade, que varia entre 20% e 30% dos casos (WHO, 2022). Embora menos frequente em comparação com outras doenças alimentares, a listeriose apresenta uma taxa de hospitalização superior a 90% nos casos sintomáticos, ocupando a posição de uma das doenças transmitidas por alimentos de maior gravidade (WHO, 2022).

De acordo com estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2010, foram registrados aproximadamente 14.000 casos de listeriose globalmente, resultando em 3.200 óbitos, contudo, esses dados apresentam uma ampla margem de incerteza (95%), variando de 6.112 a 91.175 casos. Além do exposto, a carga global da doença foi estimada em cerca de 270.000 anos de vida ajustados por incapacidade, destacando o impacto substancial da infecção na saúde pública.

A quantidade limitada de estudos sobre a prevalência global da listeriose, conforme relatado pela OMS (2022), revelam a escassez de dados sobre a incidência da doença, sendo constatado que informações e estimativas estão disponíveis apenas para um número restrito de países, predominantemente de alta renda, como os europeus.

Neste contexto, o Relatório One Health sobre Zoonoses da União Europeia de 2023, publicado pela Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA) e pelo Centro Europeu de Prevenção e Controle de Doenças (ECDC), reforça que a listeriose permanece uma preocupação significativa de saúde pública. Em 2023, foram notificados 2.952 casos

confirmados de listeriose humana, o que representou a maior incidência desde 2007 (EFSA, 2023). A taxa de notificação foi de 0,8 casos por 100.000 habitantes, evidenciando um aumento em relação aos anos anteriores. A listeriose apresentou a maior taxa de letalidade entre as zoonoses monitoradas, com 335 óbitos registrados (EFSA, 2023).

No Brasil, a listeriose é considerada uma doença subdiagnosticada e subnotificada, em grande parte devido à ausência de notificação individual compulsória e à limitação da vigilância epidemiológica sistemática (Barancelli, 2011). Contudo, estudos realizados nas últimas décadas, como os citados a seguir, indicam a presença de *L. monocytogenes* em diversos produtos alimentícios, bem como casos clínicos esporádicos.

Uma pesquisa conduzida com amostras coletadas entre 1971 e 1997 analisou amostras isoladas de diferentes fontes de infecção, como humanos (247-7,9%) e animais (239-7,6%), bem como de várias rotas de infecção, incluindo alimentos (2.330-74,8%) e constituintes ambientais (296-9,5%) de diferentes estados brasileiros, dos quais 774 (24,8%) dos isolados foram identificados como sendo de *L. monocytogenes* (Hofer *et al.*, 2000).

Em relação à presença de *L. monocytogenes* em alimentos, um estudo realizado com amostras coletadas entre 1990 e 2012, envolvendo 5.953 isolados suspeitos de *Listeria spp.* provenientes de diferentes produtos alimentícios de 12 estados brasileiros, identificou 2.248 (38,9%) como *L. monocytogenes*, com predominância nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Goiás (Vallim *et al.*, 2015). Uma revisão integrativa realizada por Costa *et al.* (2022) avaliou 17 publicações sobre a presença de *L. monocytogenes* em amostras alimentícias. Ao todo, 2.320 amostras coletadas entre 2011 e 2021 foram analisadas, com uma ocorrência de *L. monocytogenes* variando de 1,2% a 48,7%. As amostras foram coletadas de pelo menos oito estados, sendo a maioria do estado de São Paulo (n = 1.168; 50,3%) e do Rio Grande do Sul (n = 515; 22,0%). As categorias alimentícias mais afetadas foram carnes (n = 1.135; 48,9%), seguidas de vegetais (n = 847; 36,5%).

Embora o Brasil careça de estatísticas oficiais abrangentes sobre a listeriose, esses estudos indicam a presença do patógeno em alimentos e casos clínicos esporádicos. A ausência de notificação compulsória individual dificulta, portanto, a obtenção de dados precisos sobre a incidência da doença no país. No âmbito da regulamentação, a legislação brasileira referente aos padrões microbiológicos em alimentos é orientada pela Instrução Normativa (IN) Nº 161/2022 (ANVISA, 2022). De acordo com essa normativa, apenas os alimentos classificados como prontos para o consumo devem cumprir os padrões microbiológicos estabelecidos para *L. monocytogenes*, e devem garantir a segurança dos alimentos ao longo de todo o seu prazo de validade.

### 3.4.1.3 *Listeria monocytogenes* em peixes e produtos de pesca

De acordo com o Relatório One Health sobre Zoonoses na União Europeia de 2023, publicado pela EFSA e pelo ECDC, peixes e produtos pesqueiros estão entre as principais fontes associadas a surtos de listeriose na União Europeia. Entre os anos de 2021 e 2023, foram documentados dez surtos de listeriose relacionados ao consumo destes produtos (EFSA, 2023).

A presença de *L. monocytogenes* em peixes tem sido documentada, já tendo sido observada na superfície externa de peixes oriundos de águas contaminadas. Estudos demonstram que *L. monocytogenes* pode colonizar estruturas como o revestimento do estômago, brânquias e intestinos em ambientes aquáticos poluídos (Jami *et al.*, 2014), também sendo comumente isolada de peixes capturados ou cultivados em águas superficiais, onde o patógeno está naturalmente presente (FAO, 1999).

Contudo, em animais hígidos, a musculatura do peixe é estéril, porém a contaminação desse tecido pode ocorrer por dois mecanismos principais: a disseminação de *L. monocytogenes* a partir do trato gastrointestinal, especialmente quando o intervalo entre a morte do animal e a evisceração ultrapassa algumas horas; e decorrente da contaminação cruzada ao longo da cadeia de produção e distribuição, onde superfícies de contato, água e gelo podem servir como fontes de disseminação do patógeno (Zakrzewski *et al.*, 2024). Neste contexto, os humanos também podem representar um papel importante na disseminação da bactéria (Soultsos *et al.*, 2007; Zakrzewski *et al.*, 2024).

No que tange as indústrias de processamento de pescado, a contaminação por *L. monocytogenes* está frequentemente associada à formação de biofilmes em superfícies de difícil acesso, particularmente em locais úmidos e porosos (FAO, 1999; Tabit, 2018), onde a sanitização ineficiente propicia a contaminação cruzada dos produtos. Além do exposto, a capacidade de *L. monocytogenes* de se multiplicar em alimentos refrigerados permanece uma preocupação significativa, visto que o patógeno tem sido isolado tanto de produtos crus quanto processados que requerem armazenamento sob temperatura reduzida (Zakrzewski *et al.*, 2024).

Em relação aos alimentos prontos para consumo, na União Europeia, o relatório de 2022 indica que 1,5% das amostras testadas apresentaram resultados positivos para *L. monocytogenes* (EFSA, 2023). Entre os diferentes tipos de alimentos analisados, os produtos de origem pesqueira apresentaram a maior taxa de contaminação, com 6,5% das amostras positivas, seguidos por produtos cárneos (2,2%) e queijos (0,4%) (EFSA, 2023). Assim, os alimentos prontos para consumo, especialmente os de origem animal, continuam a ser as principais fontes de infecção por *L. monocytogenes* (EFSA, 2023).

Outro fator relevante que contribui para a ocorrência do microrganismo em produtos de pesca é o tempo decorrido entre a captura e a comercialização dos peixes, uma vez que o prolongamento desse intervalo favorece a multiplicação bacteriana. Ademais, as diferenças nos métodos de amostragem e na qualidade dos sistemas de monitoramento sanitário podem influenciar os índices de detecção de *L. monocytogenes* (Zakrzewski *et al.*, 2024). Nos países de alta renda, como os países europeus, as regulamentações rigorosas exigem que os fabricantes realizem testes microbiológicos frequentes (Aalto-Araneda *et al.*, 2018). No entanto, mesmo nesses países, deficiências no controle sanitário ainda são observadas, como relatado por pesquisadores finlandeses, que associaram a presença de *Listeria* nas indústrias de processamento de pescado à falhas frequentes na higienização de equipamentos e superfícies de contato (Aalto-Araneda *et al.*, 2018).

### 3.4.2 *Salmonella* spp.

O gênero *Salmonella* compreende bacilos Gram-negativo, anaeróbios facultativos e móveis, pertencentes à família *Enterobacteriaceae*, amplamente reconhecidos como patógenos de relevância global devido ao seu impacto na saúde pública e na segurança de alimentos (Ehuwa *et al.*, 2021; Billah *et al.*, 2024). A infecção causada por esses microrganismos, denominada salmonelose, pode variar desde quadros gastroentéricos autolimitados até manifestações graves e sistêmicas, como septicemia e febre tifoide, dependendo da sorovariedade envolvida e da condição imunológica do hospedeiro (Galán-Relaño *et al.*, 2023).

A principal via de transmissão de *Salmonella* é a ingestão de alimentos contaminados, sendo produtos de origem animal – como carnes, ovos e laticínios – as fontes mais comuns de infecção (Ehuwa *et al.*, 2021). Entretanto, a bactéria também tem sido frequentemente isolada em vegetais crus, frutas, nozes e frutos do mar, ampliando os desafios no controle da sua disseminação ao longo da cadeia produtiva (Ehuwa *et al.*, 2021). Em particular, os produtos de pesca representam um veículo significativo para a transmissão de *Salmonella*, uma vez que podem ser contaminados em diversas etapas, incluindo captura, processamento, armazenamento e distribuição (Billah *et al.*, 2024).

A capacidade de *Salmonella* de persistir no ambiente é atribuída à sua notável adaptabilidade ecológica, permitindo sua sobrevivência em diferentes nichos, como solos, água doce e marinha, matéria orgânica em decomposição e no trato gastrointestinal de animais silvestres e domésticos (Billah *et al.*, 2024). Além disso, sua habilidade de formar biofilmes em superfícies abióticas, como equipamentos de processamento e embalagens, assim como *L.*

*monocytogenes*, representa um desafio adicional para a indústria de alimentos, aumentando o risco de contaminação cruzada e dificultando sua erradicação (Galán-Relaño *et al.*, 2023).

No setor de pescado, a contaminação por *Salmonella* representa um risco significativo, especialmente em produtos embalados em atmosfera modificada, que visam prolongar a vida útil e preservar a qualidade microbiológica dos alimentos. Embora essa tecnologia reduza o crescimento de deteriorantes aeróbios, sua eficácia no controle de patógenos entéricos, como *Salmonella* e *L. monocytogenes*, ainda é objeto de investigação. A compreensão dos fatores que influenciam a ocorrência desses patógenos em peixes embalados em AM é essencial para aprimorar estratégias de controle e minimizar riscos.

#### 3.4.2.1 Patogenicidade e manifestações clínicas

A gênese das infecções por *Salmonella* spp. está intrinsecamente relacionada à sua capacidade de invadir, sobreviver e proliferar dentro do hospedeiro, desencadeando respostas imunológicas e inflamatórias que contribuem para o desenvolvimento da salmonelose (Ehuwa *et al.*, 2021; Galán-Relaño *et al.*, 2023). Essa patogênese é um processo multifatorial que envolve a interação entre a bactéria e o epitélio intestinal, a modulação da resposta imune e a disseminação sistêmica em casos mais graves, sendo que a intensidade da salmonelose em humanos depende do sorotipo e o estado imunológico do respectivo hospedeiro (Ehuwa *et al.*, 2021; Galán-Relaño *et al.*, 2023).

A infecção inicia-se com a ingestão de alimentos ou água contaminados com *Salmonella* spp., através dos quais a bactéria alcança o intestino delgado (Ehuwa *et al.*, 2021; Galán-Relaño *et al.*, 2023). Nesse microambiente, *Salmonella* spp. utiliza mecanismos complexos para aderir e invadir as células epiteliais intestinais, mediada principalmente por ilhas de patogenicidade (*Salmonella* Pathogenicity Islands - SPIs), como SPI-1 e SPI-2 (Ehuwa *et al.*, 2021; Galán-Relaño *et al.*, 2023). As ilhas de patogenicidade de *Salmonella* são aglomerados de genes de virulência responsáveis pela invasão, sobrevivência e transmissão extraintestinal.

A SPI-1 codifica um sistema de secreção do tipo III (T3SS-1). O sistema de secreção tipo III (T3SS) é o canal multiproteico da superfície celular que permite à bactéria entregar suas moléculas efetoras no citosol do hospedeiro, estas por sua vez ativam o sistema de transdução de sinal e induzem o rearranjo do citoesqueleto de actina do hospedeiro, levando à projeção externa da membrana da célula epitelial para internalizar a bactéria (Galán-Relaño *et al.*, 2023). A estrutura da membrana projetada se assemelha ao processo de fagocitose, que é conduzido por células fagocíticas normais (Galán-Relaño *et al.*, 2023; Teklemariam *et al.*, 2023; Billah *et al.*, 2024).

Uma vez internalizada, *Salmonella* sobrevive e se replica dentro de vacúolos denominados *Salmonella-containing vacuoles* (SCVs), utilizando mecanismos mediados pelo SPI-2, que conferem proteção contra a degradação lisossomal (Ehuwa *et al.*, 2021). Essa capacidade de sobrevivência intracelular permite que a bactéria escape da resposta imunológica inata e se dissemine para tecidos subjacentes, podendo alcançar órgãos como o fígado e o baço através do sistema linfático e da corrente sanguínea, gerando novos focos de infecção (Ehuwa *et al.*, 2021).

A resposta imune à infecção por *Salmonella* é caracterizada pela ativação de neutrófilos e macrófagos, que reconhecem componentes bacterianos através de receptores do tipo Toll (TLRs), induzindo uma resposta inflamatória mediada por citocinas como TNF- $\alpha$ , IL-1 $\beta$  e IL-6 (Galán-Relaño *et al.*, 2023). Essa intensa resposta inflamatória, além de contribuir para a sintomatologia clínica, como diarreia e febre, pode favorecer a disseminação bacteriana em indivíduos imunocomprometidos (Galán-Relaño *et al.*, 2023).

A expressão de fatores de virulência é modulada por condições ambientais e fatores do hospedeiro, como o pH intestinal, a microbiota e a disponibilidade de nutrientes (Billah *et al.*, 2024). Estudos indicam que a microbiota intestinal desempenha um papel fundamental na competição por nutrientes e na regulação da proliferação de *Salmonella*, sendo uma barreira crítica contra a infecção. No entanto, o uso de antibióticos de amplo espectro pode desestabilizar essa barreira, favorecendo o crescimento e a colonização da *Salmonella* spp. no trato gastrointestinal (Billah *et al.*, 2024).

As manifestações clínicas da salmonelose variam amplamente, dependendo do sorovar envolvido, da carga infecciosa, da imuno competência do hospedeiro e de fatores ambientais. A infecção por *Salmonella* pode se apresentar sob três formas principais: gastroenterite, febre entérica (tifoide e paratifoide) e infecção invasiva (Billah *et al.*, 2024).

A forma mais comum da salmonelose em humanos é a gastroenterite autolimitada, causada predominantemente por sorovares não tifoídes, como *Salmonella* Enteritidis e *Salmonella* Typhimurium (Teklemariam *et al.*, 2023). Os principais sintomas incluem (Teklemariam *et al.*, 2023):

- Diarreia aquosa ou sanguinolenta, que pode persistir por 4 a 10 dias;
- Náuseas e vômitos;
- Dor abdominal tipo cólica;
- Febre moderada (38–39°C);
- Mal-estar, fadiga e mialgia.

Em indivíduos saudáveis, a recuperação geralmente ocorre sem necessidade de antibióticos, mas em crianças pequenas, idosos e imunossuprimidos, a desidratação pode levar a complicações severas (Teklemariam *et al.*, 2023).

A febre entérica é uma forma sistêmica grave da infecção causada principalmente por *Salmonella* Typhi e *Samonella* Paratyphi. A toxina produzida pelo sorotipo Typhi, designada “toxina tifóide”, é responsável pela patogênese e pelos sintomas da febre tifóide (Teklemariam *et al.*, 2023). Essa forma clínica apresenta um período de incubação mais longo (5 a 21 dias) e evolui em fases (Teklemariam *et al.*, 2023):

- Fase inicial: febre progressiva (>39°C), cefaleia, mal-estar e dor abdominal difusa;
- Fase avançada: esplenomegalia, hepatomegalia, prostração, distensão abdominal e manchas rosadas no tronco (*rose spots*);
- Complicações graves: perfuração intestinal, hemorragia digestiva, miocardite e meningoencefalite.

Em indivíduos imunocomprometidos, como portadores de HIV, pacientes oncológicos e desnutridos, os sorovares não tifoídes podem causar infecção sistêmica invasiva (iNTS). Os sintomas incluem (Teklemariam *et al.*, 2023):

- Bacteremia persistente;
- Sepses grave;
- Endocardite, artrite séptica e meningite;
- Abscessos hepáticos e esplênicos.

As taxas de mortalidade para iNTS podem chegar a mais de 14%, e o tratamento com antibióticos é essencial (Kim *et al.*, 2024). No entanto, a crescente resistência antimicrobiana de cepas de *Salmonella* não tifoíde representa um desafio global (Kim *et al.*, 2024).

Dessa forma, a salmonelose apresenta um espectro clínico diversificado, e sua gravidade depende da interação entre o agente patogênico, o hospedeiro e as condições ambientais.

### 3.4.2.2 Dados epidemiológicos

A infecção por *Salmonella* continua sendo uma das principais causas de DTHA em nível global, afetando milhões de pessoas anualmente (Billah *et al.*, 2024). Estima-se que *Salmonella* seja responsável por aproximadamente 93,8 milhões de casos de gastroenterite e 155.000 óbitos por ano em todo o mundo, tendo os surtos não havendo demonstrado nenhuma recessão considerável nas últimas décadas (Billah *et al.*, 2024). Observa-se ainda uma carga desproporcionalmente alta em países em desenvolvimento, onde as condições sanitárias e o controle microbiológico dos alimentos são menos rigorosos (Billah *et al.*, 2024).

Os produtos de origem animal representam uma das principais fontes de transmissão da *Salmonella* para humanos. Segundo uma metanálise global realizada por Ferrari *et al.* (2019), a prevalência média de *Salmonella* em produtos cárneos e derivados varia entre 5% e 30%, dependendo do tipo de alimento e da região geográfica. Entre as principais categorias de alimentos contaminados, destacam-se carne de frango (29,2%), suína (24,2%) e bovina (13,7%). Além disso, ovos e laticínios são frequentemente implicados em surtos, especialmente devido ao consumo de produtos crus ou malcozidos.

A análise epidemiológica de surtos de salmonelose nos Estados Unidos entre 1990 e 2015 revelou um total de 1.509 surtos confirmados, com mais de 43.000 casos e 5.650 hospitalizações associadas a *Salmonella* Enteritidis (Sher *et al.*, 2021). Desses surtos, 75% estavam diretamente relacionados ao consumo de produtos de origem animal, com destaque para ovos (54%), carne de frango (18%) e laticínios não pasteurizados (8%). A sazonalidade também desempenha um papel importante na epidemiologia da salmonelose, com maior incidência nos meses mais quentes do ano, possivelmente devido ao aumento da proliferação bacteriana e a práticas inadequadas de armazenamento e manipulação dos alimentos.

A salmonelose permanece como uma das infecções gastrointestinais mais frequentemente notificadas na UE, representando um desafio significativo para a saúde pública. Segundo a EFSA (2024), em 2023, foram registrados 77.486 casos confirmados da doença, resultando em uma taxa de notificação de 18,0 casos por 100.000 habitantes. Esse número representa um aumento de 16,9% em relação a 2022, quando a taxa foi de 15,4 casos por 100.000 habitantes (EFSA, 2023). Apesar desse crescimento pontual, a tendência geral das infecções por *Salmonella* entre 2019 e 2023 permaneceu estável, sem aumentos ou reduções estatisticamente significativos no período.

A análise dos principais sorovares de *Salmonella* adquiridos na UE evidencia a predominância de *S. Enteritidis*, responsável por 70,8% dos casos confirmados, seguido por *S. Typhimurium* (8,9%) (EFSA, 2024). Esses dados reforçam a importância da vigilância epidemiológica e da implementação de medidas eficazes de controle ao longo da cadeia de produção de alimentos, especialmente em produtos de origem animal, que são as principais fontes de infecção para os humanos (EFSA, 2024).

No Brasil, entre 2000 e 2018, em estudo realizado por Costa (2020), *Salmonella* spp. destacou-se como um dos dez agentes etiológicos mais frequentemente identificados, sendo responsável por 2.756 casos (33,5%). Durante esse período, os principais sorovares identificados foram *S. Enteritidis*, *S. Typhimurium*, *S. Infantis*, *S. Oranienburg*, *S. Miami*, *S. Mbandaka*, *S. Ohio*, além das espécies *Shigella flexneri* e *Shigella sonnei*. O sorovar *S.*

Enteritidis foi o mais prevalente, com 664 casos registrados em 2010. O maior número de óbitos ocorreu em 2013, com três mortes associadas à infecção por *Salmonella* (Costa, 2020).

No contexto global, a resistência antimicrobiana emergente em cepas de *Salmonella* tem se tornado uma preocupação crescente. De acordo com Billah e Rahman (2024), a prevalência de isolados multirresistentes de *Salmonella* provenientes de alimentos de origem animal aumentou significativamente nas últimas décadas, principalmente devido ao uso excessivo de antibióticos na produção pecuária. Sorovares como *S. Typhimurium* e *S. Heidelberg* apresentam alta resistência a antimicrobianos críticos, como cefalosporinas de terceira geração e fluoroquinolonas, comprometendo as opções terapêuticas para infecções invasivas (Billah & Rahman, 2024).

A complexidade da epidemiologia de *Salmonella* exige medidas rigorosas de monitoramento e controle ao longo de toda a cadeia produtiva. A implementação de sistemas de vigilância eficazes, o fortalecimento das boas práticas agropecuárias e de fabricação, bem como a conscientização dos consumidores sobre os riscos do consumo de alimentos crus ou malcozidos, são estratégias fundamentais para mitigar os impactos dessa infecção na saúde pública.

#### **3.4.2.3 *Salmonella* spp. em peixes e produtos de pesca**

*Salmonella* não é um residente nativo do ambiente aquático, no entanto, diversos sorovares de *Salmonella* spp. encontram-se amplamente distribuídos em diferentes corpos d'água, incluindo ambientes marinhos, estuarinos e fluviais, podendo contaminar frutos do mar, como moluscos, camarões, amêijoas e diversas espécies de peixes (Heinitz *et al.*, 2000).

Uma vez contaminados, os peixes podem atuar como portadores assintomáticos da bactéria (Bibi *et al.*, 2015). Embora a patogênese de *Salmonella* spp. em peixes ainda não esteja completamente elucidada (Fernandes *et al.*, 2018), estudos demonstram que a bactéria pode persistir no trato gastrointestinal de espécies como pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), piauí (*Leporinus* spp.) e tambaqui (*Colossoma macropomum*), sendo possível detectá-la nas fezes desses animais. Esse fenômeno sugere um potencial mecanismo de recontaminação ambiental e disseminação para outros organismos presentes no ecossistema (Santos, 2015).

Dessa forma, apesar de ser considerada parte da microbiota comensal do trato gastrointestinal de aves, répteis e mamíferos (Lopes, 2008), *Salmonella* spp. não integra a microbiota residente de peixes, mas pode ser encontrada nesses organismos como microbiota transitória e eliminada por meio das fezes (Santos, 2015).

Essa dinâmica ocorre porque a microbiota de peixes recém-capturados reflete diretamente a qualidade microbiológica da água em que habitavam. Como esses organismos estão em contato constante com o ambiente aquático, pele, brânquias e trato gastrointestinal interagem diretamente com os microrganismos presentes na água (Fernandes *et al.*, 2018). Esse fenômeno também foi observado por Guzmán *et al.* (2004), que identificaram elevada correspondência entre as bactérias isoladas da água de cultivo e aquelas recuperadas do trato gastrointestinal de peixes. Estudos adicionais relatam ainda altas taxas de detecção de *Salmonella* spp. em amostras de intestinos, pele e brânquias de peixes (Nwiyi & Onyeabor, 2012).

Dessa forma, fatores ambientais, como a qualidade da água, desempenham um papel crucial na ocorrência de *Salmonella* spp. em peixes, representando um risco significativo para a saúde pública, especialmente quando há consumo de peixes oriundos de águas contaminadas ou sem controle sanitário adequado (Santiago *et al.*, 2013; Fernandes *et al.*, 2018). A presença de *Salmonella* spp. na superfície e nos órgãos internos dos peixes não apenas representa um risco direto de infecção alimentar, mas também contribui para a disseminação da bactéria durante o processamento dos peixes, aumentando o risco de contaminação cruzada (Heinitz *et al.*, 2000).

No que diz respeito a musculatura dos peixes, a presença de *Salmonella* spp. neste sítio pode ocorrer principalmente durante as etapas de evisceração, devido à ruptura das vísceras durante o processo de retirada da cabeça e evisceração, o que possibilita o contato da carne com o conteúdo intestinal contaminado. Esse evento pode comprometer não apenas os filés e demais formas de apresentação comercial do pescado, mas também os utensílios, o ambiente de processamento e as mãos dos manipuladores, favorecendo a disseminação da bactéria entre diferentes lotes de peixes.

Além da presença transitória de *Salmonella* spp. em peixes, os manipuladores de alimentos representam um fator crítico para a disseminação do patógeno, uma vez que indivíduos assintomáticos podem atuar como reservatórios humanos da bactéria (Fernandes *et al.*, 2018). Sendo assim, o risco de contaminação está diretamente relacionado ao estado de saúde dos manipuladores, sua higiene pessoal e seu conhecimento e aplicação das boas práticas de manipulação de alimentos (Ehuwa *et al.*, 2021).

Apesar destes fatos, historicamente a salmonelose tem sido menos associada ao consumo de pescado, porém os produtos derivados de frutos do mar vêm se tornando uma fonte emergente de infecção. Estudos indicam que a prevalência de *Salmonella* spp. em pescado e mariscos pode variar entre 2% e 12%, dependendo das condições de captura, processamento e

armazenamento (Heinitz *et al.*, 2000; Billah *et al.*, 2024), de forma ainda que entre 2006 e 2024, o Centro de Controle e Prevenção de Doenças dos Estados Unidos (CDC) investigou seis surtos de salmonelose associados ao consumo de pescado e produtos derivados do mar (CDC, 2024). Esses dados reforçam a necessidade de rigorosos controles sanitários ao longo da cadeia produtiva do pescado, desde a captura até o consumo final, além da manutenção e fornecimento de dados constantes aos sistemas de controle epidemiológicos de cada país.

### 3.4.3 *Escherichia coli*

*E. coli* é uma bactéria gram-negativo, anaeróbica facultativa, pertencente à família *Enterobacteriaceae*, amplamente reconhecida como parte da microbiota intestinal de humanos e animais de sangue quente (Kaper *et al.*, 2004). Embora muitas cepas sejam comensais, algumas adquiriram fatores de virulência que as transformaram em patógenos capazes de causar uma gama diversificada de doenças intestinais e extraintestinais (Kaper *et al.*, 2004).

As cepas patogênicas de *E. coli* são tradicionalmente classificadas em patótipos, de acordo com os mecanismos de virulência, sítios de infecção e manifestações clínicas. Os principais patótipos intestinais incluem *E. coli* enteropatogênica (EPEC), enterotoxigênica (ETEC), entero-hemorrágica (EHEC), enteroinvasiva (EIEC), enteroagregativa (EAEC) e aderente difusamente (DAEC). Além destes, destacam-se os patótipos extraintestinais, como a *E. coli* uropatogênica (UPEC) e a associada à meningite neonatal (MNEC) (Pakbin *et al.*, 2021).

Os fatores de virulência estão distribuídos em quatro principais categorias: (i) fatores de colonização e adesão, (ii) toxinas, (iii) fatores de evasão imune e (iv) sistemas de secreção (Pakbin *et al.*, 2021). Dentre os fatores de adesão, destacam-se as fímbrias, as adesinas afimbriais e proteínas de membrana externa como a intimina, envolvida na formação da lesão de adesão e apagamento (do inglês *Attaching and Effacing* - A/E) típica das cepas EPEC e EHEC (Kaper *et al.*, 2004).

A principal via de transmissão das cepas patogênicas de *E. coli* é a fecal-oral, ocorrendo por meio da ingestão de água ou alimentos contaminados com fezes humanas ou animais (Kaper *et al.*, 2004). Essa contaminação pode acontecer em diferentes etapas da cadeia produtiva, desde a produção primária até o consumo final, incluindo práticas inadequadas de higiene pessoal, manipulação de alimentos, saneamento deficiente, irrigação com água contaminada ou consumo de produtos de origem animal crus ou mal cozidos (Kaper *et al.*, 2004).

Diante disso, a segurança dos alimentos torna-se um fator crítico na prevenção das infecções por *E. coli*, especialmente considerando o potencial zoonótico de cepas como STEC, capazes de causar surtos alimentares e complicações graves à saúde humana (Kaper *et al.*,

2004). A adoção de boas práticas agrícolas, sanitárias e de manipulação, aliadas à fiscalização eficiente e ao monitoramento microbiológico de produtos alimentícios, constitui uma estratégia essencial para reduzir a incidência dessas infecções e proteger a saúde pública.

#### 3.4.3.1 Patogenicidade e manifestações clínicas

A patogenicidade de *E. coli* decorre de um conjunto complexo de estratégias moleculares que lhe conferem capacidade de adesão, invasão, evasão imune, produção de toxinas e destruição tecidual (Kaper *et al.*, 2004). Esses mecanismos variam de acordo com o patotipo envolvido, sendo modulados por fatores ambientais e pelas características do hospedeiro (Kaper *et al.*, 2004; Pakbin *et al.*, 2021).

Após a colonização inicial do intestino ou de sítios extraintestinais, as cepas patogênicas de *E. coli* ativam múltiplos fatores de adesão, como fímbrias, adesinas e proteínas de membrana externa (Pakbin *et al.*, 2021). Esses fatores permitem que a bactéria se fixe firmemente à mucosa do epitélio intestinal, urinário ou endotelial. Essa adesão é fundamental para resistir à ação mecânica do peristaltismo intestinal, da urina e do fluxo sanguíneo (Pakbin *et al.*, 2021).

Em patotipos como a EPEC e EHEC, ocorre a formação da clássica lesão de adesão e apagamento (A/E), que envolve a destruição das microvilosidades do enterócito, a reorganização do citoesqueleto do hospedeiro e a formação de pedestal de actina sob a bactéria (Kaper *et al.*, 2004; Pakbin *et al.*, 2021). Essa modulação é mediada por proteínas efetoras injetadas por meio do sistema de secreção do tipo III (T3SS), que desregulam vias intracelulares e comprometem a função de barreira intestinal (Kaper *et al.*, 2004; Pakbin *et al.*, 2021).

A presença da bactéria e a ação de seus produtos, como lipopolissacarídeo (LPS), flagelina, toxinas e outras proteínas efetoras, desencadeiam a ativação da resposta imune inata, principalmente via receptores do tipo Toll (TLRs) (Kim *et al.*, 2005). Por exemplo, o LPS interage com o TLR4, ativando a via de transdução de sinal que culmina na ativação de um fator de transcrição, promovendo a produção de citocinas pró-inflamatórias (Kim *et al.*, 2005).

Essas citocinas induzem a quimiotaxia e o recrutamento de polimorfonucleares, especialmente neutrófilos, para o local da infecção. Esse processo resulta em inflamação local, diarreia secretora e, em alguns casos, dano tecidual colateral devido à liberação de enzimas líticas e espécies reativas de oxigênio (ROS) por parte dos neutrófilos (Kim *et al.*, 2005; Shpigel *et al.*, 2008).

Algumas cepas, como a MNEC, desenvolveram estratégias para atravessar barreiras epiteliais e endoteliais. A invasão da barreira hematoencefálica, por exemplo, envolve proteínas que interagem com receptores específicos de células endoteliais cerebrais (Kim *et al.*, 2005).

Após a invasão, a bactéria evita a fagocitose por meio de lisossomos, sobrevivendo em vacúolos intracelulares e multiplicando-se no sistema nervoso central (Kim *et al.*, 2005).

Além da imunidade inata, a resposta imune adaptativa é ativada com a apresentação de antígenos bacterianos por células dendríticas e macrófagos aos linfócitos (Kim *et al.*, 2005). A produção de anticorpos específicos, principalmente IgA secretora (no intestino) e IgG (sistêmica), desempenha papel crucial na neutralização de toxinas e na facilitação da opsonização e fagocitose da bactéria (Kim *et al.*, 2005).

No entanto, cepas patogênicas como EHEC podem evadir a resposta imune por meio da inibição da apoptose de células fagocíticas e da modulação da produção de citocinas. A toxina Shiga (Stx), por exemplo, induz apoptose de células endoteliais renais e intestinais ao inibir a síntese proteica via clivagem do RNA ribossomal, além de modular a produção de citocinas inflamatórias, contribuindo para o desenvolvimento da síndrome hemolítico-urêmica (Kaper *et al.*, 2004).

Por fim, destaca-se que a capacidade de modular o ambiente do hospedeiro, de escapar de mecanismos de defesa e de induzir lesões teciduais diferencia *E. coli* patogênica das cepas comensais, sendo a expressão coordenada de múltiplos fatores de virulência a chave para sua patogenicidade (Kaper *et al.*, 2004).

As manifestações clínicas das infecções por *E. coli* são diversas e dependem diretamente do patótipo envolvido, da carga bacteriana, da via de infecção e da resposta imunológica do hospedeiro. De forma geral, essas manifestações se dividem em síndromes intestinais e extraintestinais.

Entre as infecções intestinais, destacam-se (Kaper *et al.*, 2004; Pakbin *et al.*, 2021):

- **EPEC:** causa diarreia aquosa persistente, especialmente em crianças menores de dois anos. A lesão A/E leva à destruição da borda em escova dos enterócitos, reduzindo a absorção e contribuindo para perdas líquidas intensas.
- **ETEC:** principal agente da "diarreia do viajante", provoca diarreia aquosa, cólicas e náuseas, sendo associada à produção de toxinas termoestável e termolábil, que promovem secreção ativa de íons e água para o lúmen intestinal.
- **EHEC:** pode evoluir de uma colite hemorrágica autolimitada para uma síndrome hemolítico-urêmica, especialmente em crianças e idosos. A toxina Shiga afeta principalmente os rins e vasos sanguíneos, levando a anemia hemolítica, trombocitopenia e insuficiência renal aguda.

- **EIEC:** semelhante à *Shigella*, penetra nas células do cólon, causando inflamação intensa, febre, dor abdominal, disenteria e diarreia com sangue e muco.
- **EAEC:** relacionada a diarreia crônica e enterite persistente, forma biofilmes aderentes na mucosa intestinal e produz toxinas que comprometem a integridade do epitélio intestinal.
- **DAEC:** com frequência associada a infecções prolongadas em crianças e a distúrbios intestinais em adultos imunocomprometidos, caracteriza-se por adesão difusa às células epiteliais e inflamação leve.

Nas infecções extraintestinais, as principais manifestações incluem:

- **ITU:** a *E. coli* uropatogênica é a principal causa de infecções do trato urinário, incluindo cistite, pielonefrite e infecção urinária recorrente. Utiliza fímbrias para aderir ao urotélio e pode formar reservatórios intracelulares persistentes.
- **Meningite neonatal:** causada pela cepa K1 de *E. coli*, ocorre nas primeiras semanas de vida e resulta da invasão da corrente sanguínea e posterior travessia da barreira hematoencefálica. Pode provocar sequelas neurológicas permanentes ou óbito.
- **Sepse:** especialmente em imunossuprimidos, recém-nascidos e idosos, determinadas linhagens de *E. coli* podem causar infecção sistêmica grave com risco elevado de choque séptico.

A variabilidade das manifestações clínicas evidencia a plasticidade genômica de *E. coli* e reforça a importância desse microrganismo no contexto da saúde pública.

### 3.4.3.2 Dados epidemiológicos

Este microrganismo representa um importante desafio de saúde pública mundial devido à sua ampla distribuição, diversidade patogênica e crescente resistência antimicrobiana. A transmissão ocorre predominantemente por via fecal-oral, através da ingestão de água ou alimentos contaminados, sendo comum em surtos associados a produtos de origem animal mal preparados, vegetais crus e leite não pasteurizado (WHO, 2018).

Nos Estados Unidos, a *E. coli* O157:H7 é uma das principais causas de surtos de doenças transmitidas por alimentos (Tack *et al.* 2021). Estimativas indicam que *E. coli* STEC causa cerca de 265 mil infecções por ano no país, causando mortes e internações (Tack *et al.* 2021). A faixa etária mais acometida é a de crianças menores de cinco anos, com maior risco de evolução para síndrome hemolítico-urêmica (CDC, 2024).

Na Europa, a STEC é a terceira doença gastrointestinal de origem alimentar e hídrica mais comumente relatada na EU, e também o terceiro patógeno bacteriano mais frequentemente detectado em surtos de origem alimentar (ECDC, 2024). De acordo com o relatório One Health

da união europeia, esse patotipo foi responsável por 10.217 casos de doença, com 1.234 (37,6%) hospitalizações e 31 mortes (EFSA, 2023)

No Brasil, um estudo conduzido pelo Instituto Adolfo Lutz analisou 5047 amostras clínicas entre 2011 e 2016, identificando 683 casos (13,5%) positivos para cepas diarreicas de *E. coli* (DEC) e 10 casos de *Escherichia albertii*. Os principais patotipos identificados foram: EPEC (52,6%), EAEC (32,5%), ETEC (6,3%), EIEC (4,4%) e STEC (4,2%) (Ori *et al.*, 2019). A maior parte das infecções ocorreu em crianças menores de cinco anos, especialmente nos casos de EPEC, EAEC e STEC, sendo que os dois casos confirmados de síndrome hemolítico-urêmica também envolveram pacientes dessa faixa etária.

Neste mesmo estudo, notavelmente, a forma atípica de EPEC predominou em relação à forma típica, e observou-se ampla diversidade de sorotipos entre as cepas isoladas (Ori *et al.*, 2019). Além disso, a presença de genes de virulência associados à produção de toxinas e à formação de lesões A/E indica a circulação de cepas com potencial patogênico relevante. Esses dados reforçam a necessidade de vigilância contínua, sobretudo em populações pediátricas e em surtos de origem alimentar.

Contudo, a escassez de dados nacionais robustos sobre bacteremia e infecções extraintestinais reforça a necessidade de políticas de vigilância laboratorial e epidemiológica contínuas.

### **3.4.3.3 *Escherichia coli* em peixes e produtos de pesca**

A ocorrência de *E. coli* em peixes e produtos de pesca é uma preocupação sanitária relevante, especialmente em regiões tropicais e em mercados onde as condições higiênico-sanitárias são precárias. A presença dessa enterobactéria nesses alimentos está frequentemente associada à contaminação fecal da água utilizada na aquicultura, na pesca artesanal e nos processos de manuseio e armazenamento (Costa, 2013).

Diversos estudos ao redor do mundo têm demonstrado a presença de cepas de *E. coli*, incluindo variantes multirresistentes e produtoras de toxinas, em peixes comercializados em mercados de varejo. Na China, uma investigação nacional analisou 849 produtos aquáticos e revelou que 40% estavam contaminados com *E. coli*, sendo 19,9% portadores de cepas multirresistentes (Zhang *et al.*, 2024). As cepas identificadas apresentaram resistência a diversos antimicrobianos, incluindo tetraciclina, ampicilina, trimetoprim-sulfametoxazol, cloranfenicol e quinolonas (Zhang *et al.*, 2024).

Na Índia, estudo realizado por Dutta e Sengupta (2016) revelou alta prevalência de *E. coli* em peixes (65%) e camarões (85%) vendidos em mercados locais, com aumento da

incidência durante os meses mais quentes. Foram isoladas cepas enteropatogênicas confirmadas por análise de 16S rRNA. Os autores atribuíram a contaminação às condições sanitárias deficientes dos mercados e ao uso de água contaminada durante o transporte e armazenamento. A sazonalidade também desempenhou um papel importante, sendo observadas maiores taxas de contaminação nos meses de verão, possivelmente devido ao aumento da temperatura da água e à maior carga microbiana ambiental (Dutta & Sengupta, 2016).

Além disso, estudo conduzido por Onmaz *et al.* (2020) na Turquia investigou 140 amostras de peixes provenientes de fazendas aquícolas e mercados varejistas, detectando a presença de *E. coli* em 17,8% das amostras. Duas amostras (1,4%) continham cepas do sorogrupo O157, sendo uma portadora do gene *stx1* e outra do gene *eaeA*, ambos associados à patogenicidade em humanos. As cepas isoladas demonstraram resistência a ciprofloxacino e, em alguns casos, a amoxicilina-clavulanato, sulfametoxazol-trimetoprim e gentamicina. Cerca de 24% das cepas apresentaram capacidade de formar biofilmes, o que aumenta sua resistência a antimicrobianos e dificulta sua erradicação no ambiente de processamento de alimentos.

Em relação ao Brasil, Costa (2013) destacou a ocorrência de *E. coli* em peixes e mariscos como um indicativo de contaminação fecal, sendo comum em regiões costeiras tropicais e em condições de manipulação inadequadas. A autora relatou a detecção de cepas enteropatogênicas, incluindo STEC, em peixes comercializados no mercado interno, alertando para o risco de doenças de origem alimentar. Essas cepas, embora nem sempre presentes em grande número, representam risco relevante à saúde pública, principalmente quando associadas à resistência a múltiplos fármacos.

Complementando esses achados, Cardozo *et al.* (2018) identificaram cepas de *E. coli* STEC e EPEC em tilápias coletadas em fazendas aquícolas no interior do estado de São Paulo. Embora as amostras de músculo não tenham testado positivo, a detecção dessas cepas em fezes evidencia o risco de contaminação cruzada durante o processamento. Além disso, foram encontrados genes de adesão e de resistência a múltiplos antimicrobianos, como ampicilina, cefalotina e tetraciclina. Os autores também destacam a presença de *E. coli* em ambientes industriais, indicando que falhas na manipulação durante a despesca ou o processamento podem representar vias críticas de contaminação dos produtos finais.

Dessa forma, além da contaminação na origem, o risco de disseminação também pode ocorrer ao longo da cadeia produtiva do pescado, especialmente em situações de refrigeração inadequada, contaminação cruzada e falhas no controle de qualidade. Isso é agravado em ambientes de comercialização informal, como feiras livres, onde o controle sanitário é limitado e a exposição dos peixes a temperaturas ambientais favorece o crescimento bacteriano.

Por fim, fica evidente que a contaminação de peixes e produtos da pesca por *E. coli* está fortemente relacionada à qualidade da água utilizada, à higiene durante o manuseio e ao armazenamento. A detecção de cepas patogênicas e multirresistentes indica a necessidade urgente de melhorias em boas práticas de manipulação, vigilância microbiológica e controle sanitário ao longo da cadeia produtiva do pescado, visando proteger a saúde pública e prevenir surtos de doenças transmitidas por alimentos. Campanhas educativas voltadas a pescadores, manipuladores e comerciantes, aliadas ao fortalecimento da inspeção sanitária, são estratégias fundamentais para reduzir a prevalência de contaminação e garantir a inocuidade dos produtos de origem pesqueira.

#### **3.4.4 *Staphylococcus aureus***

*S. aureus* é uma bactéria Gram-positivo amplamente distribuída no ambiente e reconhecida como parte da microbiota comensal de humanos e alguns animais. Sua ocorrência frequente na pele, nas mucosas e no trato respiratório superior contribui para sua introdução em diferentes pontos da cadeia alimentar, especialmente durante a manipulação de alimentos (CDC, 2024). Esse microrganismo é considerado um contaminante relevante na indústria de alimentos, sendo frequentemente associado à presença em alimentos de origem animal (CDC, 2024).

Sua detecção em produtos alimentícios costuma estar relacionada a práticas higiênico-sanitárias inadequadas, o que reforça a importância da adoção de boas práticas de fabricação em toda a cadeia produtiva. Estudos demonstram que *S. aureus* possui notável capacidade de sobreviver em ambientes inóspitos, tolerando elevadas concentrações de sal e apresentando crescimento em uma ampla faixa de temperatura, o que favorece sua multiplicação mesmo em condições refrigeradas (Peng *et al.* 2022).

No contexto do pescado, a presença de *S. aureus* pode ocorrer tanto por contaminação cruzada no ambiente de processamento quanto pela manipulação direta por trabalhadores colonizados (Peng *et al.* 2022). Sua identificação em produtos de pesca e até mesmo em ambientes industriais indica a necessidade de monitoramento constante e estratégias eficazes de controle sanitário.

Diante disso, a vigilância microbiológica em alimentos que apresentam risco potencial para o crescimento de *S. aureus* é essencial para assegurar a qualidade sanitária dos produtos, proteger a saúde do consumidor e atender aos critérios exigidos por legislações nacionais e internacionais.

#### 3.4.4.1 Patogenicidade e manifestações clínicas

*S. aureus* é um importante agente de doenças transmitidas por alimentos, principalmente devido à sua capacidade de produzir enterotoxinas termoestáveis que, mesmo após o cozimento, permanecem biologicamente ativas (Cheung *et al.*, 2021). A intoxicação estafilocócica ocorre pela ingestão dessas toxinas já formadas no alimento, dispensando a necessidade de colonização ativa do trato gastrointestinal. Esse mecanismo diferencia-se de infecções bacterianas tradicionais e representa uma forma aguda de toxinfecção alimentar com rápida instalação dos sintomas (Cheung *et al.*, 2021).

A patogenicidade de *S. aureus* está relacionada a uma ampla variedade de fatores de virulência, com destaque para as enterotoxinas estafilocócicas (SEs), que compõem um grupo de proteínas superantigênicas com propriedades eméticas. Atualmente, mais de 20 tipos de enterotoxinas foram descritos, sendo as mais frequentemente associadas a surtos alimentares as do tipo A (SEA), B (SEB), C (SEC), D (SED) e E (SEE) (Pinchuk *et al.*, 2010; Ahmad-Mansour *et al.*, 2021). Essas toxinas são altamente resistentes a calor, pH ácido, ação de enzimas digestivas e diversos tratamentos tecnológicos aplicados aos alimentos, o que permite sua persistência mesmo em alimentos processados (Pinchuk *et al.*, 2010; Ahmad-Mansour *et al.*, 2021).

O processo de produção dessas toxinas é regulado por sistemas de sinalização bacteriana, como o sistema regulador acessório (*agr*), que controla a expressão de genes de virulência de acordo com a densidade celular (Cheung *et al.*, 2021). Isso significa que, sob condições ideais de crescimento — como em alimentos com alta carga proteica, armazenados à temperatura ambiente por longos períodos — *S. aureus* pode atingir níveis populacionais suficientes para ativar esse sistema e iniciar a síntese de enterotoxinas (Cheung *et al.*, 2021).

Após a ingestão de alimentos contaminados com SEs pré-formadas, as toxinas resistem ao pH gástrico e à ação de enzimas proteolíticas, atingindo intactas o intestino delgado (Pinchuk *et al.*, 2010; Cieza *et al.*, 2024). Lá, interagem com células epiteliais e células do sistema imune, como macrófagos e células dendríticas, promovendo um aumento da permeabilidade intestinal e induzindo a liberação de citocinas pró-inflamatórias (como IL-2, TNF- $\alpha$ , IFN- $\gamma$ ) e mediadores neuroativos, como serotonina, o que estimula o centro do vômito por meio do sistema nervoso entérico (Pinchuk *et al.*, 2010; Cieza *et al.*, 2024).

A ligação direta das toxinas aos receptores TCR-V $\beta$  de células T e ao complexo MHC de classe II nas células apresentadoras de antígeno leva à ativação policlonal maciça de linfócitos T, culminando na liberação sistêmica de citocinas e sintomas como náuseas, vômitos

intensos, cólicas abdominais e diarreia (Pinchuk *et al.*, 2010; Cieza *et al.*, 2024). Essa cascata é iniciada com concentrações muito baixas de toxina (às vezes inferiores a 200 ng/g de alimento) e pode ocorrer mesmo na ausência de células viáveis de *S. aureus* no alimento. Algumas toxinas, como a SEA, também promovem a liberação de histamina por mastócitos submucosos, amplificando os sintomas gastrointestinais (Pinchuk *et al.*, 2010; Cieza *et al.*, 2024).

As manifestações clínicas da intoxicação alimentar por *S. aureus* caracterizam-se pelo início súbito, geralmente entre 30 minutos e 6 horas após a ingestão do alimento contaminado, com sintomas típicos de náuseas intensas, vômitos, dor abdominal e diarreia aquosa (Ahmad-Mansour *et al.*, 2021; Liu, 2009). Febre geralmente está ausente, e o quadro clínico costuma ser autolimitado, com duração de 24 a 48 horas. A severidade dos sintomas está relacionada à quantidade de toxina ingerida e à suscetibilidade do indivíduo. Em grupos de risco, como idosos, crianças e imunocomprometidos, pode ocorrer desidratação grave, demandando suporte clínico (Ahmad-Mansour *et al.*, 2021; Liu, 2009).

Embora *S. aureus* seja também um patógeno relevante em infecções invasivas, no contexto da segurança de alimentos sua principal ameaça está relacionada à sua capacidade de persistir em alimentos e ambientes de processamento, formando biofilmes em superfícies industriais e resistindo à higienização (Cheung *et al.*, 2021). Além disso, a contaminação por manipuladores portadores assintomáticos — principalmente por meio das mãos, mucosa nasal e equipamentos — constitui uma das principais fontes de introdução do patógeno em alimentos prontos para consumo (Cheung *et al.*, 2021).

Assim, a intoxicação alimentar por *S. aureus* representa um desafio recorrente à saúde pública, sendo necessário reforçar as boas práticas de fabricação, higiene pessoal e controle de temperatura de alimentos perecíveis, especialmente aqueles ricos em proteínas como os pescado, carnes e laticínios, para prevenir a multiplicação da bactéria e a produção das toxinas.

#### **3.4.4.2 Dados epidemiológicos**

De acordo com estimativas do CDC, cerca de 240 mil pessoas nos Estados Unidos adoecem a cada ano devido à ingestão de alimentos contaminados por *S. aureus*, principalmente por toxinas produzidas em alimentos mantidos sob condições inadequadas de conservação (CDC, 2011). Embora a evolução clínica seja, na maioria dos casos, autolimitada, surtos podem afetar grandes grupos populacionais, como em escolas, refeitórios industriais, hospitais e eventos comunitários (Le *et al.*, 2021; CDC, 2024).

No que diz respeito a UE, Cinco Estados-Membros (Croácia, Alemanha, Grécia, Itália e Espanha) relataram dados sobre *Staphylococcus* spp. em diversas matrizes alimentares (N = 6.700) e animais (N = 8.913) no ano de 2023. No geral, 5,4% das unidades de amostragem de alimentos e 10,8% das amostras de animais apresentaram resultados positivos (EFSA, 2024). As categorias de alimentos com o maior número de resultados positivos incluíram "leite cru", "outros produtos alimentícios processados e pratos preparados", "produtos cárneos prontos para consumo", "queijos frescos, duros, macios e semi macios" e "manteiga" (EFSA, 2024).

Há ainda uma crescente preocupação com a presença de cepas resistentes a meticilina (MRSA) em produtos alimentícios. Estudos internacionais já demonstraram a presença de *S. aureus* resistente à meticilina em carnes, aves e pescado, incluindo produtos prontos para consumo (EFSA, 2009; Le *et al.* 2021). Essas cepas, além de toxigênicas, podem representar risco ocupacional aos manipuladores e à saúde pública, devido à possibilidade de transmissão zoonótica e à dificuldade de tratamento em caso de infecção (Bashabsheh *et al.*, 2024; Ahmad-Mansour *et al.*, 2021).

No Brasil, *S. aureus* é amplamente reconhecido como um dos principais agentes causadores de surtos de DTHA. De forma ainda mais preocupante, cepas de *S. aureus* resistentes à meticilina (MRSA) também vêm sendo isoladas com frequência considerável. Uma revisão recente identificou prevalência significativa de MRSA em carnes, leite, derivados lácteos, manipuladores e instalações de processamento no território nacional, destacando a potencial toxigenicidade de alguns isolados (Silva *et al.*, 2020). Em um dos estudos citados, por exemplo, foram detectadas taxas de MRSA em 28,1% das amostras de carnes cruas e 9,5% de carnes cozidas em hospitais públicos da Bahia (Costa *et al.*, 2015), reforçando a necessidade urgente de medidas rigorosas de higiene, rastreamento microbiológico e capacitação de manipuladores em toda a cadeia produtiva.

Portanto, *S. aureus* é um indicador microbiológico importante de falhas em boas práticas de fabricação e higiene. Sua presença em alimentos reforça a necessidade de controle rigoroso de temperatura, manipulação e higiene ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a captura ou abate até o consumo final. Estratégias como educação sanitária de manipuladores, programas de autocontrole e monitoramento microbiológico contínuo são fundamentais para a redução do risco de surtos e para a proteção da saúde pública.

### 3.4.4.3 *Staphylococcus aureus* em peixes e produtos de pesca

A presença de *S. aureus* em peixes e seus derivados representa uma preocupação significativa no contexto da segurança de alimentos, especialmente considerando seu potencial enterotoxigênico e resistência antimicrobiana. Embora essa bactéria faça parte da microbiota comensal de humanos e alguns animais, sua introdução em produtos de origem aquática ocorre principalmente por contaminação cruzada durante o processamento, manipulação ou armazenamento inadequado dos alimentos.

A contaminação de peixes pode ocorrer em diversos pontos da cadeia de produção. Em ambientes industriais, manipuladores portadores assintomáticos são uma das principais fontes de introdução de *S. aureus*, especialmente por contato direto com os produtos ou superfícies contaminadas (Cortés-Sánchez *et al.*, 2020). A presença dessa bactéria em frutos do mar e pescado tem sido frequentemente associada à ausência de boas práticas de higiene, o que possibilita sua multiplicação e produção de enterotoxinas, especialmente quando os alimentos são mantidos em temperaturas inadequadas (Cortés-Sánchez *et al.*, 2020).

Em um estudo conduzido por Sivaraman *et al.* (2022), foram analisadas 498 amostras de pescado na Índia, das quais 13,65% estavam contaminadas com *S. aureus*, e 3,01% com cepas MRSA. Essas cepas carregavam genes de enterotoxinas e apresentaram resistência a múltiplos antimicrobianos, como eritromicina, gentamicina e norfloxacina. Os autores destacaram que a principal fonte dessa contaminação é a manipulação humana, reforçando a importância da implementação de Boas Práticas de Higiene e do sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle.

A situação se repete em outros países. Um levantamento feito por Obaidat *et al.* (2015) em 330 amostras de peixes importados revelou uma prevalência de 47,3% de cepas enterotoxigênicas, com destaque para os genes *seg* e *sei*. O estudo também indicou correlação entre resistência antimicrobiana e presença de genes de enterotoxinas, evidenciando o risco potencial da disseminação de *S. aureus* multirresistentes pela cadeia alimentar globalizada.

No Brasil, embora os dados sejam mais escassos, um estudo recente identificou a presença de *S. aureus* em 26% de amostras de peixe salgado coletadas no litoral do estado do Pará, com 100% das cepas isoladas sendo resistentes à metilina (Rashid *et al.*, 2023). Além disso, 38% dessas cepas carregavam o gene *sea* e 23% o *seb*, ambos associados à produção de enterotoxinas responsáveis por quadros de intoxicação alimentar. Todos os isolados foram capazes de formar biofilme em superfícies inertes, característica que potencializa sua persistência no ambiente de processamento e dificulta a sua eliminação.

Adicionalmente, a pesquisa de Matuszewska *et al.* (2023) demonstrou a ausência de *S. aureus* em populações de peixes selvagens na Escócia, sugerindo que sua presença em ambientes aquícolas é atribuída à contaminação humana. Essa observação reforça que o problema não está na microbiota natural do pescado, mas sim em falhas higiênico-sanitárias ao longo da cadeia produtiva.

Assim, considerando o potencial patogênico de *S. aureus* e sua capacidade de produzir toxinas termoestáveis, a contaminação de pescado com essa bactéria configura um sério risco à saúde pública. A ingestão de peixes contaminados pode provocar quadros de intoxicação alimentar com sintomas típicos como náusea, vômito e diarreia de início abrupto. Além disso, a presença de cepas resistentes a múltiplos antibióticos pode representar uma ameaça adicional em casos de infecções invasivas.

Medidas preventivas eficazes incluem a capacitação dos trabalhadores da indústria pesqueira quanto às boas práticas de higiene pessoal e manipulação, monitoramento microbiológico regular, e a implementação de protocolos rigorosos de sanitização de superfícies e equipamentos. A aplicação sistemática de critérios microbiológicos e a rastreabilidade dos produtos também são essenciais para mitigar os riscos e assegurar a qualidade sanitária dos peixes e seus derivados.

### **3.5 Métodos de Identificação microbiológica**

A detecção e identificação dos microrganismos deteriorantes e patogênicos em alimentos são fundamentais tanto para a obtenção de dados científicos para estudos epidemiológicos quanto para a segurança de alimentos e a prevenção de surtos de DTHA. Para esse fim, diferentes abordagens analíticas têm sido desenvolvidas, abrangendo métodos convencionais, moleculares e técnicas emergentes. Cada abordagem possui vantagens e limitações quanto à sensibilidade, especificidade, tempo de resposta e custo operacional.

#### **3.5.1 Métodos Convencionais**

Os métodos microbiológicos tradicionais, ou convencionais, baseiam-se principalmente no cultivo em meios seletivos e diferenciais, seguido de análises morfológicas e bioquímicas que visam confirmar a presença e a identidade de microrganismos em alimentos. Esses métodos são amplamente utilizados devido à sua padronização por agências internacionais como a *International Organization for Standardization* (ISO) e a *Food and Drug Administration* (FDA), sendo considerados referência na detecção de patógenos em matrizes alimentares (MAPA, 2022; ISO, 2017).

Em geral, a metodologia tradicional envolve quatro etapas principais: pré-enriquecimento, enriquecimento seletivo, isolamento em meios sólidos e testes de confirmação bioquímica. Embora esses procedimentos apresentem boa sensibilidade e sejam financeiramente acessíveis, sua principal limitação reside na longa duração (entre 5 a 7 dias) para obtenção de resultados, além da baixa especificidade em amostras complexas, onde diferentes microrganismos compartilham características fenotípicas semelhantes (Osek *et al.*, 2022).

Para a detecção de *L. monocytogenes*, os protocolos recomendados pela ISO incluem o uso de caldos seletivos como Fraser e Half-Fraser para o pré-enriquecimento, seguido do isolamento em meios sólidos seletivos como Agar Oxford e PALCAM. As colônias típicas são azul-esverdeadas com halo escuro (Oxford) ou cinza-esverdeadas com halo enegrecido (PALCAM). A confirmação da espécie é feita por testes bioquímicos, como L-Ramnose (+) e D-Xylose (-), além da observação de beta-hemólise positiva (ISO, 2017; OSEK *et al.*, 2022).

No caso de *Salmonella* spp., os protocolos clássicos seguem a ISO 6579:2017 e envolvem enriquecimento seletivo em caldos como Lactose, Rappaport-Vassiliadis (RV) e Tetratonato. O isolamento é feito em meios diferenciais como XLD (colônias vermelhas com centro preto) e Hektoen Enteric (colônias verde-azuladas). A confirmação bioquímica inclui produção de H<sub>2</sub>S, utilização de citrato e ausência de fermentação de lactose (ISO, 2017).

Para *E. coli*, o meio seletivo utilizado para contagem pode ser o triptona-bile-glicurônico (TBX). As bactérias que a 44 °C formam colônias azuis típicas em meio TBX são consideradas *E. coli*. Os testes confirmatórios incluem a produção de indol, motilidade, fermentação de lactose e uso de citrato, características fenotípicas utilizadas para diferenciar *E. coli* de outras enterobactérias (ISO, 2001).

Já a identificação tradicional de *S. aureus* inicia-se com o isolamento em Ágar Baird-Parker (BPA), que permite o crescimento seletivo de estafilococos. As colônias típicas são pretas ou cinzas, brilhantes e cercadas por uma zona clara. A confirmação da espécie envolve testes bioquímicos clássicos como a coloração de Gram (cocos Gram-positivo em cachos), catalase (+), coagulase (+), sendo teste confirmatório para *S. aureus* (ISO, 2021).

Apesar da confiabilidade histórica desses métodos, sua aplicabilidade pode ser limitada em amostras de alimentos com alta carga microbiana ou flora competitiva, o que compromete a recuperação de microrganismos-alvo. Além disso, a necessidade de manipulação de culturas viáveis aumenta o risco de contaminação cruzada em ambientes laboratoriais, reforçando a demanda por métodos mais rápidos e específicos, como os moleculares e imunológicos.

### 3.5.2 Métodos Moleculares

Os métodos moleculares têm revolucionado a detecção de uma ampla gama de microrganismos, permitindo análises mais rápidas, sensíveis e específicas. Dentre essas técnicas, destacam-se a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR) convencional, a PCR quantitativa em tempo real (qPCR) e o sequenciamento de DNA.

A PCR convencional baseia-se na amplificação de sequências específicas do genoma, permitindo uma identificação precisa do patógeno em poucas horas. Já a qPCR, por utilizar sondas fluorescentes, possibilita a quantificação da carga bacteriana presente na amostra, sendo amplamente empregada em análises de alimentos e superfícies de processamento (Osek *et al.*, 2022).

A análise do gene 16S rRNA é um método molecular amplamente utilizado para a identificação de microrganismos, especialmente bactérias. Este gene codifica o RNA ribossomal da subunidade 30S, possui cerca de 1.500 pares de bases e está presente em todas as células procarióticas, contendo regiões altamente conservadas intercaladas por regiões hipervariáveis (Srinivasan *et al.*, 2015). Essas características permitem tanto a amplificação por PCR quanto a discriminação entre diferentes gêneros e espécies bacterianas (Srinivasan *et al.*, 2015).

O processo típico envolve a extração de DNA genômico, seguida da amplificação do gene 16S com primers, purificação do produto de PCR e sequenciamento (Srinivasan *et al.*, 2015). As sequências obtidas são comparadas com bancos de dados especializados (como Greengenes, SILVA ou RDP) para atribuição taxonômica (Srinivasan *et al.*, 2015).

Na identificação clínica, o uso do gene 16S pode alcançar concordância de até 96% no nível de gênero e 87,5% no nível de espécie, conforme demonstrado por Srinivasan *et al.* (2015), especialmente quando combinado com classificadores probabilísticos como o Naïve Bayes, que permite alta precisão mesmo diante de grandes volumes de dados.

Apesar de sua ampla aplicabilidade, a análise do gene 16S apresenta algumas limitações. A resolução no nível de espécie pode ser insuficiente para determinados grupos taxonômicos, como *E. coli* e *Shigella* spp., devido à alta similaridade entre suas sequências 16S (Srinivasan *et al.*, 2015). Ainda assim, trata-se de uma ferramenta robusta, especialmente útil para bactérias de crescimento lento ou difíceis de cultivar (Srinivasan *et al.*, 2015).

Além disso, a PCR permite a identificação de genes de virulência e de resistência antimicrobiana, como o *mecA*, que confere resistência à meticilina, sendo esse fator determinante na caracterização de cepas MRSA (Coelho *et al.*, 2007).

No entanto, embora os métodos moleculares sejam muito sensíveis, são frequentemente inibidos por diferentes componentes presentes nos alimentos (Osek *et al*, 2022). Além disso, as abordagens de amplificação de DNA não são capazes de distinguir células vivas de células mortas das bactérias alvo (Osek *et al*, 2022). Assim, o enriquecimento é necessário para diluir potenciais inibidores e multiplicar microrganismos vivos. Os métodos moleculares também requerem instrumentos especializados e pessoal altamente treinado (Osek *et al*, 2022).

Dentre as técnicas moleculares, ainda se enquadra a espectrometria de massa de tempo de voo por desorção a laser assistida por matriz (do inglês *Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization-Time of Fly* - MALDI-TOF MS). Essa é uma técnica que permite a ionização e vaporização de grandes biomoléculas não voláteis, como proteínas intactas que geram principalmente íons de carga única (Osek *et al*, 2022). Eles são então acelerados através de um campo eletrostático no tubo de voo de alto vácuo até chegarem ao detector. O tempo de voo necessário para alcançar o detector depende da massa e do grau de ionização das proteínas, resultando em um perfil espectral único para uma determinada espécie (Osek *et al*, 2022).

Os espectros coletados são comparados com um banco de dados de referência contendo uma ampla variedade de isolados bacterianos, e o software de computador gera um valor numérico com base nas semelhanças entre os conjuntos de dados observados e armazenados, permitindo a identificação do microrganismo (Osek *et al*, 2022). A abordagem MALDI-TOF MS é simples, robusta e leva cerca de 30 minutos para fornecer uma identificação definitiva da espécie, porém necessita de equipamento de alto valor e pessoal treinado (Osek *et al*, 2022).

Diante do exposto, observa-se que a evolução das técnicas de detecção tem permitido avanços significativos na segurança de alimentos. A combinação de métodos tradicionais com abordagens moleculares pode otimizar a identificação do patógeno, garantindo respostas mais rápidas e precisas.

### **3.5.3 Métodos Imunológicos**

Os métodos imunológicos para a detecção de microrganismos são baseados na interação altamente específica entre antígenos da bactéria e anticorpos, permitindo uma identificação rápida e eficiente em amostras alimentares e clínicas. Esses métodos apresentam vantagens como alta sensibilidade, especificidade e menor tempo de resposta em comparação com métodos microbiológicos convencionais.

O teste de Ensaio de Imunoabsorção Enzimática (do inglês *Enzyme-Linked Immunosorbent Assay* - ELISA) é um dos métodos imunológicos mais amplamente utilizados para a detecção de microrganismos em alimentos e amostras clínicas (Shah & Maghsoudlou,

2016). Essa técnica emprega anticorpos monoclonais ou policlonais ligados a uma enzima que, na presença do substrato específico, gera uma reação colorimétrica mensurável por espectrofotometria (Shah & Maghsoudlou, 2016). O microrganismo é indicado pela intensidade da coloração gerada, permitindo uma quantificação indireta da bactéria (Shah & Maghsoudlou, 2016).

Devido às suas vantagens como simplicidade, relativa boa sensibilidade e facilidade de operação, o ELISA tem sido uma ferramenta poderosa na segurança e verificação de alimentos. No entanto, a sensibilidade e precisão relativamente baixas são as principais limitações do ELISA tradicional, que tem dificultado sua aplicação na análise de alimentos (Kumar *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2019).

A escolha do método de detecção e identificação depende de diversos fatores, como a finalidade da análise, a natureza da amostra e os recursos disponíveis. Os métodos tradicionais de cultura ainda são amplamente utilizados devido à sua confiabilidade, mas técnicas moleculares e imunológicas oferecem vantagens em termos de rapidez e especificidade. De forma geral, a identificação precisa de microrganismos em alimentos de origem animal, como peixes e produtos de pesca, é fundamental para garantir a segurança dos alimentos e prevenir surtos de doenças.

### **3.6 Tecnologias de barreiras aplicadas à conservação de pescado**

Diante do exposto, observa-se que a EAM e o vácuo ainda podem apresentar limitações, principalmente no que tange os microrganismos patogênicos, como *L. monocytogenes*. Dessa forma uma das alternativas viáveis para potencializar o efeito de conservação desses produtos é a associação dessa tecnologia a outras.

Neste contexto, o conceito de tecnologia de barreiras, também conhecido como *hurdle technology*, se enquadra como uma solução para estas limitações. Este refere-se à combinação intencional de diferentes métodos de conservação, aplicados de forma sinérgica para inibir ou eliminar microrganismos presentes em alimentos, sem comprometer sua qualidade sensorial e nutricional (Floros & Matsos, 2005). Cada barreira pode atuar sobre diferentes aspectos do metabolismo microbiano — como membrana celular, atividade enzimática ou expressão gênica — tornando mais difícil a adaptação e sobrevivência de microrganismos patogênicos ou deteriorantes (Floros & Matsos, 2005).

No setor de pescado, a aplicação da tecnologia de barreiras tem ganhado destaque como estratégia para prolongar a vida útil, garantir a segurança microbiológica e atender às exigências do mercado consumidor por alimentos minimamente processados. A combinação de atmosfera

modificada ou embalagem a vácuo com outros tratamentos conservadores, como bioconservação, aditivos naturais e tecnologias físicas, tem se mostrado eficaz na inibição de microrganismos psicrotróficos, como *Pseudomonas* spp., bem como de patógenos relevantes, como *L. monocytogenes*, sendo uma opção interessante para contornar as limitações de conservação microbiológica que a EAM ou vácuo apresentam quando utilizados isoladamente.

Dentre as principais classes de tecnologias associadas à conservação de pescado, destacam-se:

### **3.6.1 Bioconservação por microrganismos protetores**

A bioconservação utiliza culturas de microrganismos não patogênicos, conhecidas como culturas protetoras, capazes de competir com a microbiota indesejada e produzir metabólitos com atividade antimicrobiana, como ácidos orgânicos, peróxidos e bacteriocinas (Martín *et al.*, 2022).. Uma das classes de microrganismos mais estudados é a das BAL.

As BAL têm sido frequentemente utilizadas como culturas iniciadoras ou protetoras devido à sua capacidade natural de dominar a população microbiana de muitos alimentos onde ocorrem naturalmente, devido à sua capacidade de catabolizar carboidratos em ácido lático e produzir outros compostos biologicamente ativos, como ácidos orgânicos, diacetila, peróxido de hidrogênio, peptídeos antibacterianos e precursores de sabor (Martín *et al.*, 2022).

Essas culturas podem ser adicionadas diretamente ao alimento ou incorporadas em filmes ou revestimentos. A associação da bioconservação com AM intensifica o efeito inibitório, criando múltiplas barreiras contra o crescimento microbiano.

### **3.6.2 Aditivos antimicrobianos naturais**

Os aditivos naturais têm ganhado relevância em substituição aos conservantes sintéticos, respondendo à demanda por alimentos mais saudáveis e com apelo *clean label*. Entre os compostos mais utilizados estão os óleos essenciais (de orégano, tomilho e cravo), álcoois fenólicos, nisina e compostos derivados de plantas.

Existem antimicrobianos naturais de três fontes: derivados de microrganismos, de animais e de plantas (Carocho *et al.*, 2015). Idealmente, todos os antimicrobianos naturais devem ter uma ação ampla, ter atividades bactericidas e fungicidas, em vez de apenas inibitórias, devem ser ativos em baixas concentrações, estáveis ao calor, não afetados pelo pH, não conferir sabor ou cor, não apresentar toxicidade, ser facilmente quantificáveis, não ter aplicação farmacêutica e, finalmente, terem boa relação custo-benefício (Carocho *et al.*, 2015).

No que diz respeito aos antimicrobianos derivados de microrganismos, estes são moléculas resultantes de organismos vivos (Carocho *et al.*, 2015). A principal limitação das

bacteriocinas é o número limitado de espécies microbianas que são afetadas por elas, que tendem a ser espécies muito intimamente relacionadas entre si (Carocho *et al.*, 2015). A nisina, uma das bacteriocinas mais utilizadas, possui amplo espectro de ação em termos das espécies que é capaz de inibir, além de ser termoestável e eficaz em sistemas com pH ácido, sendo ela utilizada tanto como aditivo alimentar quanto como constituinte de revestimentos e filmes (Carocho *et al.*, 2015).

A aplicação de bacteriocinas vem ganhando interesse nas indústrias alimentícias devido à sua origem natural e aos benefícios que podem ser alcançados com sua incorporação em alimentos (Carocho *et al.*, 2015).

### 3.6.3 Revestimentos comestíveis bioativos

Os revestimentos comestíveis são finas películas aplicadas diretamente sobre a superfície do alimento, compostas por biopolímeros naturais (como quitosana, alginato e gelatina), que podem ser fortificados com compostos antimicrobianos ou antioxidantes. Esses filmes atuam como barreiras físicas à entrada de oxigênio e umidade, além de veicular ingredientes ativos capazes de controlar o crescimento microbiano (Dehghani *et al.*, 2018). A quitosana, por exemplo, tem ação antimicrobiana comprovada contra diversos gêneros bacterianos e fúngicos, sendo frequentemente utilizada em pescado (Dehghani *et al.*, 2018).

Quando combinados à atmosfera modificada, esses revestimentos contribuem para a preservação da integridade do produto ao longo do armazenamento.

### 3.6.4 Tecnologias físicas

As tecnologias físicas representam métodos de conservação que atuam por meio de agentes físicos, como temperatura, pressão, radiação ou eletricidade, capazes de inativar microrganismos. Entre elas, destacam-se:

- **Altas pressões hidrostáticas:** provocam danos irreversíveis à membrana celular e estruturas intracelulares microbianas, inativando bactérias, vírus e esporos sem necessidade de aquecimento (Aganovic *et al.*, 2021).
- **Luz UV-C e irradiação ionizante:** promovem quebras no DNA bacteriano, reduzindo cargas microbianas na superfície do produto (Ploydaeng *et al.*, 2021)

Essas técnicas, quando utilizadas como barreiras adicionais à AM, têm sido eficazes na conservação de peixes frescos e minimamente processados.

### 3.6.5 Tecnologias químicas

As tecnologias químicas aplicadas à conservação de pescado incluem compostos com ação antimicrobiana direta, entre os quais se destaca o ácido acético, principal componente ativo do vinagre. Este ácido orgânico é amplamente reconhecido por sua capacidade de reduzir o pH superficial dos alimentos, criando um ambiente desfavorável à multiplicação de microrganismos patogênicos e deteriorantes (Stratford *et al.*, 2013).

O vinagre, por ser uma solução natural rica em ácido acético, tem sido utilizado em diversas formas — imersão, pulverização ou incorporação em marinadas —, de forma que, quando utilizado em conjunto com embalagem em atmosfera modificada, o ácido acético potencializa o efeito antimicrobiano da barreira gasosa, resultando em maior controle microbiológico e prolongamento da vida útil do pescado (Stratford *et al.*, 2013).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho, foi realizada uma revisão sistemática a partir de estudos que descreveram a ocorrência de *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus* spp., *E. coli*, *Pseudomonas* spp., enterobactérias, microrganismos psicrotóxicos e mesófilos em peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo, com ou sem o uso de tecnologias adicionais.

### 4.1 Estratégia de pesquisa

A revisão sistemática foi conduzida de acordo com as diretrizes do Cochrane Handbook (Higgins *et al.*, 2024). As etapas envolvidas na pesquisa, seleção, extração e análise dos dados de interesse, foram realizadas de acordo com o Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page *et al.*, 2021).

Dados relacionados à ocorrência de *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus* spp., *E. coli*, *Pseudomonas* spp., enterobactérias, microrganismos psicrotóxicos e mesófilos em peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo, com ou sem o uso de tecnologias adicionais foram obtidos por meio de pesquisas informatizadas em quatro bancos de dados, sendo eles PubMed Central, Scopus, Web of Science e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS). As buscas foram realizadas em 14 de março de 2025.

Artigos que relataram a presença destes microrganismos em peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo, com ou sem o uso de tecnologias adicionais foram considerados neste trabalho. Os critérios de inclusão preliminar para os artigos foram: artigos escritos em inglês, português ou espanhol, que abordem sobre o tema específico em território nacional ou internacional, artigos que avaliassem produtos minimamente processados, como

defumação e *gravlax*. Os prescritores empregados nas bases de dados foram definidos de acordo com os termos do Medical Subject Heading (MeSH).

#### 4.2 Prescritores

Para cada banco de dados, foi utilizada uma combinação de termos. Essa etapa foi definida de acordo com pesquisas preliminares durante a definição do tema, para que fossem escolhidas as melhores combinação de termos para cada base. Os termos utilizados, em cada uma delas, foram:

- PUBMED

("Listeria"[Title/Abstract] OR "Salmonella" [Title/Abstract] OR "Pseudomonas"[Title/Abstract] OR "Enterobacteriaceae"[Title/Abstract] OR "Staphylococcus"[Title/Abstract] OR "staphylococci"[Title/Abstract] OR "*Escherichia coli*"[Title/Abstract] OR "aerobic bacteria"[Title/Abstract] OR "total viable count"[Title/Abstract] OR "psychrotrophic"[Title/Abstract]) AND ("Fish"[Title/Abstract] OR "salmon"[Title/Abstract] OR "*Salmo salar*"[Title/Abstract] OR "trout"[Title/Abstract] OR "*Oncorhynchus mykiss*" [Title/Abstract] OR "*Oreochromis niloticus*" [Title/Abstract] OR "thunnus" [Title/Abstract]) AND ("Modified Atmosphere "[Title/Abstract] OR "MAP" [Title/Abstract] OR "vacuum-packaged" [Title/Abstract] OR "vacuum" [Title/Abstract])

- SCOPUS

TITLE-ABS("Listeria" OR "Salmonella" OR "Pseudomonas" OR "Enterobacteriaceae" OR "Staphylococcus" OR "staphylococci" OR "*Escherichia coli*" OR "aerobic bacteria" OR "total viable count" OR "psychrotrophic" AND "Fish" OR "salmon" OR "*Salmo salar*" OR "trout" OR "*Oncorhynchus mykiss*" OR "*Oreochromis niloticus*" OR "thunnus" AND "Modified Atmosphere" OR "MAP" OR "vacuum-packaged" OR "vacuum")

- WEB OF SCIENCE

TI=(("Listeria" OR "Salmonella" OR "Pseudomonas" OR "Enterobacteriaceae" OR "Staphylococcus" OR "staphylococci" OR "*Escherichia coli*" OR "aerobic bacteria" OR "total viable count" OR "psychrotrophic") AND ("Fish" OR "salmon" OR "*Salmo salar*" OR "trout" OR "*Oncorhynchus mykiss*" OR "*Oreochromis niloticus*" OR "thunnus") AND ("Modified Atmosphere" OR "MAP" OR "vacuum-packaged" OR "vacuum")) OR AB=(("Listeria" OR "Salmonella" OR "Pseudomonas" OR "Enterobacteriaceae" OR "Staphylococcus" OR "staphylococci" OR "*Escherichia coli*" OR "aerobic bacteria" OR "total viable count" OR

"psychrotrophic") AND ("Fish" OR "salmon" OR "*Salmo salar*" OR "trout" OR "*Oncorhynchus mykiss*" OR "*Oreochromis niloticus*" OR "thunnus") AND ("Modified Atmosphere" OR "MAP" OR "vacuum-packaged" OR "vacuum"))

- BVS

(*Listeria* OR *Salmonella* OR *Pseudomonas* OR Enterobacteriaceae OR *Staphylococcus* OR staphylococci OR *Escherichia coli* OR aerobic bacteria OR total viable count OR psychrotrophic) AND (Fish OR salmon OR *Salmo salar* OR trout OR *Oncorhynchus mykiss* OR *Oreochromis niloticus* OR thunnus) AND (Modified Atmosphere OR MAP OR vacuum-packaged OR vacuum)

### 4.3 Seleção dos estudos

Para determinar a ocorrência de *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus* spp., *E. coli*, *Pseudomonas* spp., enterobactérias, microrganismos psicrotóxicos e mesófilos em peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo, com ou sem o uso de tecnologias adicionais, foi utilizada a estratégia PEOS (do inglês *Population, Exposure, Outcome* e *Study Design*) (Eriksen *et al.*, 2018) como segue: “População”, peixes embalados em atmosfera modificada ou vácuo; “Exposição”, suspeita de contaminação com *L. monocytogenes* e/ou *Salmonella* spp. e/ou *Staphylococcus* spp. e/ou *E. coli* e/ou *Pseudomonas* spp. e/ou enterobactérias e/ou microrganismos psicrotóxicos e/ou mesófilos; “Resultados”, presença do microrganismo; “Desenho do estudo”, estudos observacionais e observações dos estudos.

Primeiramente, os títulos, resumos e palavras-chave dos artigos foram avaliados de acordo com os critérios de elegibilidade PEOS por dois pesquisadores independentes. Nesta etapa, os artigos foram selecionados de acordo com os seguintes critérios de exclusão: (i) artigos que não realizaram avaliação microbiológica para *L. monocytogenes* e/ou *Salmonella* spp. e/ou *Staphylococcus* spp. e/ou *E. coli* e/ou *Pseudomonas* spp. e/ou enterobactérias e/ou microrganismos psicrotóxicos e/ou mesófilos (ii) artigos em que não havia sido utilizada a tecnologia de atmosfera modificada ou vácuo, (iii) artigos que não mencionaram o número total de amostras utilizadas e (IV) artigos que envolveram outras espécies de microrganismos.

Dissertações, resumos, livros, notas, reportagens e trabalhos em outros idiomas foram excluídos. Além disso, foram utilizados critérios de exclusão adicionais: (i) artigos que utilizaram produtos derivados de peixe submetidos a formulações complexas ou processamento industrial intensivo, como hambúrgueres, almôndegas, nuggets, pastas, dentre outros, (ii)

artigos que não foram publicados entre os anos de 2015 e 2025 e (iii) estudos dos quais não foram disponibilizados os documentos para leitura na internet.

A seguir os trabalhos passaram por uma segunda avaliação, realizada por um terceiro pesquisador, e foram selecionados apenas aqueles que se enquadraram nos parâmetros do estudo.

#### **4.4 Extração e seleção**

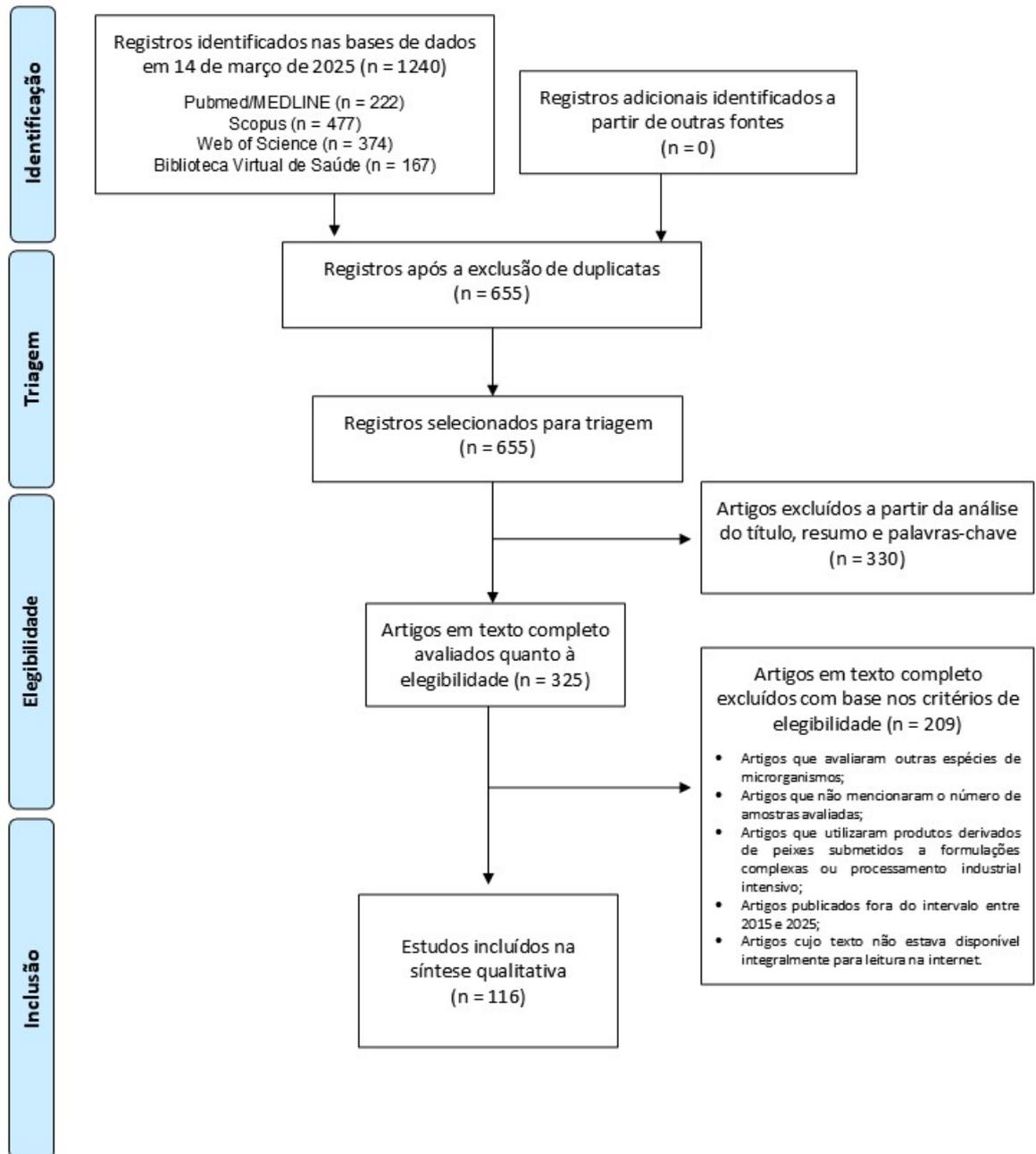
Após seleção dos artigos, os dados de interesse foram extraídos para análise e interpretação. Os dados utilizados foram: (i) autores (iii) data de publicação; (ii) local de coleta da amostra; (iii) espécie de peixe, (iv) forma de apresentação, (v) tipo de embalagem, (vi) tecnologia associada, (vii) tipo de tecnologia associada (viii) tratamentos, (ix) microrganismos analisados, (x) método de isolamento, (xi) número de amostras analisadas, (xii) contagem dos microrganismos (xiii) conclusão do experimento.

### **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Inicialmente, foram encontrados 1.240 artigos potencialmente relevantes dentro dos bancos de dados selecionados. Após a exclusão de duplicatas, 655 estudos foram posteriormente selecionados para a etapa seguinte, na qual os títulos, resumos e palavras-chave foram avaliados para definir se estavam de acordo com o definido pela estratégia PEOS. Dos 325 estudos resultantes, 209 foram excluídos com base nos critérios de elegibilidade (Figura 1) e 116 deles foram selecionados para extração das informações que foram organizadas em tabelas, incluindo variáveis como autor, local de coleta, espécie de pescado, forma de apresentação, tipo de embalagem, tecnologias associadas, tratamentos aplicados, microrganismos analisados, métodos de identificação e conclusão dos estudos.

No teste de confiabilidade do interexaminador, utilizado para avaliar a consistência das medidas utilizadas por dois examinadores diferentes, o grau de concordância entre os dois autores responsáveis pela busca e seleção dos artigos foi substancial, conforme revelou pelo índice de concordância kappa ( $kappa = 0,88$ ).

Figura 1 - Critérios de elegibilidade e exclusão dos artigos encontrados



Fonte: Autoria própria (2025).

Para facilitar a análise comparativa, os dados foram organizados com base no tipo de embalagem (vácuo, atmosfera modificada ou ambos) e na presença ou ausência de tecnologias associadas. A seguir, são apresentadas as tabelas correspondentes a cada um dos grupos:

Quadro 1 - Estudos com embalagem a vácuo e uso de tecnologia associada

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Behnam <i>et al.</i> , 2015	Irã	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Peixe eviscerado	Nisina	AAN	Nisina x Controle	(1) Psicotróficos	CM	O tratamento com nisina e vácuo foi capaz de aumentar a vida de prateleira da truta de 12 para 16 dias a 4 °C.
Barcellos <i>et al.</i> , 2016	Brasil	Corvina ( <i>Micropogonias furnieri</i> )	Filé	Irradiação por feixe de elétrons	TF	Controle x Irradiação por feixe de elétrons (0,7 kGy) x Irradiação por feixe de elétrons (1,0 kGy)	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos	CM	A irradiação por feixe de elétrons reduziu bactérias mesófilas e psicotróficas inicialmente presentes, mas não houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos (P>0,05).
Boulares <i>et al.</i> , 2016	Tunísia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Filé	BAL	BMP	Controle não inoculado x Controle + <i>L. monocytogenes</i> x Combinações de BAL x Co-inoculação: BAL + <i>L. monocytogene</i>	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Mesófilos; (3) Psicotróficos	CM	As combinações de BAL inibiram significativamente <i>L. monocytogenes</i> e reduziram a deterioração microbiana e bioquímica, prolongando a vida útil de filés por 21 dias a 4°C.
Cuadrado <i>et al.</i> , 2016	Espanha	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> ); Salmão ( <i>Salmo salar</i> ); Atum ( <i>Thunnus spp.</i> )	Fatias; Fatias defumadas	Co-extrusão de filme de LDPE ativado com óxido de zinco; Ativação superficial de filmes com tirosol ácido láctico ou PHBA	TQ AAN	LDPE (ZnO); Ativação da superfície (Tirosol, Tirosol + PHBA, Tirosol + ácido láctico) x Controle (LDPE não ativado)	(1) <i>L. inocua</i> (Inoculada); (2) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (3) <i>Salmonella entérica</i> (Inoculada)	CM	O melhor tratamento identificado para controle dos patógenos foi a ativação superficial de filmes de LDPE com 1.5% de tirosol + 0.5% de PHBA. O tratamento com 5% de ZnO em dourada inoculada com <i>L. innocua</i> apenas induziu a um atraso no crescimento.
Ramos <i>et al.</i> , 2016	Brasil	Tambaqui ( <i>Colossoma macropomum</i> )	Filé	Sous vide	TF	200g filé + 50g molho de manjeriço + 10mL lactato de sódio 5%, pasteurizado a 65°C por 12,5 min	(1) <i>Salmonella spp.</i> ; (2) <i>L. monocytogenes</i> ; (3) Staphylococcus coagulase positivo; (4) Mesófilos; (5) Psicotróficos	CM	O processamento sous vide reduziu significativamente a carga microbiana, atendendo aos padrões legais.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Lebow <i>et al.</i> , 2017	EUA	Salmão vermelho ( <i>Oncorhynchus nerka</i> )	Filé curado defumado	Nisina; HPP	AAN TF	Nisina (ausente, presente) x HPP (ausente, 450 MPa, 600 MPa) x Tempo (30, 60 ou 120s)	(1) <i>L. innocua</i> (Inoculada); (2) Psicotróficos	CM	O melhor tratamento para controlar <i>L. innocua</i> e organismos de deterioração em salmão defumado a frio foi a combinação de nisina (10 µg/g) e HPP de 600 MPa por 120 s.
López <i>et al.</i> , 2017	Itália	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Nisina	AAN	Controle x Nisina	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos; (3) Enterobactérias; (4) <i>Pseudomonadacea</i>	CM	O tratamento com nisina não se mostrou significativamente superior ao tratamento controle na inibição do crescimento dos microrganismos analisados.
Blázquez <i>et al.</i> , 2018	Espanha	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> )	Filé em pedaços	HPP; Embalagem de Filme Ativado (FA) com timol e Enterocina AS-48	TF AAN	Controle x FA (timol e enterocina AS-48) x HPP x FA+HP	(1) Mesófilos; (2) Enterobactérias; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.; (4) <i>Listeria seeligeri</i> ; (5) <i>E. coli</i>	CM; PCR (16S)	O estudo concluiu que o uso de HPP, FA com timol e Enterocina AS-48, isoladamente ou combinados, alterou significativamente a composição da microbiota de filés. As combinações dos tratamentos apresentaram maior eficácia na redução de microrganismos deteriorantes e patógenos.
Colejo <i>et al.</i> , 2018	Espanha	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias defumadas	Radiação UV-C; Plasma Atmosférico Não Térmico (NTAP)	TF	UV-C x NTAP (1-15 min) x UV-C + NTAP x Controle	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) <i>L. innocua</i> (Inoculada); (3) <i>Salmonella</i> Typhimurium (Inoculada); (4) <i>Salmonella</i> Enteritidis; (5) <i>S. aureus</i> (Inoculada); (6) <i>E. coli</i> O157:H7 (Inoculada)	CM	UV-C e NTAP são eficazes para descontaminação superficial, especialmente em superfícies abióticas. A combinação de luz UV-C e NTAP apresentou um efeito letal adicional na maioria dos microrganismos inoculados no produto. No entanto, o estudo também alerta que tratamentos mais intensos podem induzir oxidação lipídica e alterações adversas na aparência.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Hager <i>et al.</i> , 2018	EUA	Robalo híbrido ( <i>Morone chrysops</i> × <i>Morone saxatilis</i> )	Filé defumado	Revestimento à base de zeína de milho; Nisina; Óleo essencial	RCB AAN	Controle (sem revestimento) x Revestimento de zeína + Nisina x Revestimento de zeína + Óleo de capim-limão x Embalagem (PVC, Vácuo)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Mesófilos	CM	O tratamento mais eficaz para inibir <i>L. monocytogenes</i> foi o revestimento à base de zeína de milho incorporado com nisina. No que diz respeito aos organismos de deterioração, apenas as amostras tratadas com capim-limão e embaladas em PVC demonstraram inibição do crescimento.
Monteiro <i>et al.</i> , 2018	Brasil	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Filé	Irradiação UV-C; HPP	TF	Controle (não tratado) x UV-C (0.103 ± 0.002 J/cm <sup>2</sup> ) x HHP (220 MPa por 10 min a 25 °C) x UV-C + HHP	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos; (3) Enterobactérias	CM	O estudo apontou que os tratamentos com HHP, tanto isoladamente quanto combinado com radiação UV-C, demonstraram maior potencial para a preservação de filés de tilápia.
Ahmed <i>et al.</i> , 2019	Egito	Arenque ( <i>Clupea harengus</i> )	Filé	Nisina; Extrato herbal de alho e gengibre; Hidroxitolueno butilado (BHT)	AAN TQ	Controle (sem aditivos) x Nisina x Extrato herbal (alho e gengibre) x BHT	(1) Enterobactérias; (2) <i>Salmonella</i> spp.; (3) <i>S. aureus</i>	CM	Extrato herbal manteve a qualidade e segurança dos filés em comparação com o controle, nisina e BHT, inibindo o crescimento microbiano e retardando oxidação lipídica.
Amoli <i>et al.</i> , 2019	Irã	Truta arco-iris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Peixe eviscerado	Revestimento de alginato contendo um extrato etanólico e/ou o óleo essencial de <i>Mentha aquatica</i>	RCBA AN	Controle x Controle (vácuo) x Revestimento + vácuo x Revestimento + 2% extrato etanólico de <i>M. aquatica</i> + vácuo x Revestimento + 1% óleo essencial de <i>M. aquatica</i> + vácuo x Revestimento + 0,5% óleo essencial + 1% extrato etanólico + vácuo	(1) Mesófilos; (2) Enterobactérias; (3) Psicotróficos	CM	O revestimento de alginato com óleo essencial e extrato etanólico de <i>M. aquatica</i> prolongou a vida útil de 6 para 12 dias, reduzindo significativamente o crescimento microbiano e a oxidação lipídica.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Aksoy & Sezer 2019	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Óleo essencial de louro (OEL)	AAN	Controle (vácuo) x OEL 1% x OEL 2%	(1) Psicotróficos; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.; (3) Enterobactérias	CM	O OEL a 2% retardou a deterioração microbiana, estendendo a vida útil de 8 para 12 dias, e melhorou as características sensoriais.
Aymerich <i>et al.</i> , 2019	Espanha	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé em pedaços defumado	BAL	BMP	Controle (sem inoculação) x Inoculação com <i>L. sakei</i> x <i>Lactobacillus curvatus</i> x <i>Carnobacterium maltaromaticum</i>	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Enterobactérias	CM	O tratamento mais eficaz para controlar o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> foi a aplicação de <i>L. sakei</i> .
Bolat <i>et al.</i> , 2019	Turquia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Lombo	Sous vide; Louro; Cúrcuma	TF; AAN	Controle (sem aditivos) x Amostras com louro x Amostras com cúrcuma	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos; (3) Enterobactérias	CM	O louro e a cúrcuma prolongaram a vida útil do Robalo em 8,88% e 22,2%, respectivamente. Nenhum microrganismo ultrapassou o limite de 7,00 log UFC/g durante os 60 dias de armazenamento.
Dabija <i>et al.</i> , 2019	Romênia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Peixe inteiro defumado	Óleo de alecrim; Óleo de cravo; Óleo de orégano	AAN	Controle (sem tratamento) x Óleo de alecrim (1%) x Óleo de cravo (1%) x Óleo de orégano (1%)	(1) Enterobactérias; (2) <i>Salmonella</i> spp.; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O óleo de cravo foi o mais eficaz, estendendo a vida útil de 35 dias (controle) para 90 dias, sem afetar as características sensoriais. Óleos de orégano e alecrim também mostraram efeitos positivos, mas menores.
Dimitrijević <i>et al.</i> , 2019	Bósnia e Herzegovina	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Carvacrol; Eugenol	AAN	Controle (sem adição de compostos) x Carvacrol (0.5%) x Eugenol (0.5%) x Combinação (0.5% cada)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Mesófilos	CM	Eugenol e carvacrol reduziram significativamente <i>L. monocytogenes</i> e mesófilos, com eugenol sendo mais eficaz no final do armazenamento. O tratamento melhorou a aceitação sensorial.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Durmus <i>et al.</i> , 2019	Turquia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Filé	Nanoemulsões de óleos comestíveis (avelã, milho, canola, soja, oliva e girassol)	AAN	Controle (sem nanoemulsão) x Óleo de avelã x Milho x Canola x Soja x Oliva x Girassol	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos; (3) Enterobactérias	CM	As nanoemulsões prolongaram a vida útil dos filés em 4 dias (canola, milho, soja, avelã) e 2 dias (oliva, girassol). Soja e avelã apresentaram melhores resultados microbiológicos e químicos.
Esmaeli <i>et al.</i> , 2019	Irã	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Revestimento de zeína, óleo essencial (OE) e extrato de <i>Pimpinella affinis</i>	RCB; AAN	Revestimento (ausente, presente) x Vácuo (ausente, presente) x Aditivo (ausente, presente) x Extrato de <i>P. affinis</i> 2%, óleo essencial 1%, extrato de <i>P. affinis</i> 1% + óleo essencial 1%	(1) Enterobactérias; (2) Psicrotróficos; (3) Mesófilos; (4) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O tratamento mais eficaz foi o revestimento de zeína com a combinação de 1% de óleo essencial e 1% de extrato de <i>P. affinis</i> , aliado à embalagem a vácuo.
Heir <i>et al.</i> , 2019	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé defumado	Vinagre; Dextrose; Defumação; Radiação UV-C	TQ; TF; OU	Verdad N6 (0%, 0,15%, 0,5%, 1%, 2%) x Dextrose (0%, 1%) x Defumação (3,5 h, 5,5 h) x UV-C (0 mJ/cm <sup>2</sup> , 50 mJ/cm <sup>2</sup> ) x Temperatura (4 °C, 8 °C) x Controles	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM; PCR (16S)	A combinação de 1% de Verdad N6 e tratamento com luz UV-C representou o tratamento mais eficaz para o controle de <i>L. monocytogenes</i> em salmão fumado a frio não fatiado.
Mayeli <i>et al.</i> , 2019	Irã	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Peixe eviscerado	Revestimento de zeína enriquecido com extratos metanólicos (Em) e etanólicos (Ee) de casca de laranja azeda	RCB; AAN	Controle (sem tratamento) x Vácuo (V) x CZ (zeína) x CZ-VEe 2% x CZ-VEe 2% x CZ-VEe 1% + VEm 1%	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias; (3) Psicrotróficos	CM	O revestimento de zeína com Em e Ee de casca de laranja azeda prolongou a vida útil da truta, reduzindo a oxidação lipídica e o crescimento microbiano. A combinação CZ-VEe 1% + VEm 1% foi a mais eficaz.
Barcellos <i>et al.</i> , 2020	Brasil	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Hidrolisado de gelatina de peixe (HP)	AAN	Controle x Hidrolisado proteico (1:10) x Hidrolisado proteico (1:1)	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos; (3) <i>S. aureus</i> ; (4) <i>E. coli</i> ; (5) <i>Salmonella</i> spp.	CM	Não houve diferença estatística entre os grupos, mas hidrolisado proteico 1:1, demonstrou efeito potencial na microbiota.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Chen <i>et al.</i> , 2020	EUA	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias defumadas	Nisina	AAN	<i>L. monocytogenes</i> (6 cepas) x Pré-exposição (pH, NaCl, Quart) x Nisina (25 ppm) x Controle	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM; PCR; SOR; GEN	O pré-crescimento em ambientes levemente ácidos, com alta concentração de sal e com concentrações subletais de compostos de amônio quaternário pode fornecer proteção cruzada contra o tratamento com nisina em <i>L. monocytogenes</i> . A eficácia da nisina também foi afetada pela sorovariedade de <i>L. monocytogenes</i>
Dogruyol <i>et al.</i> , 2020	Turquia	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Carne moída	Sous vide; Óleo essencial de orégano; Ácido cítrico	TF; AAN	Controle x Ácido cítrico 0.5% x Óleo essencial de orégano 1% x Ácido cítrico 0.5% + Óleo essencial de orégano 1% x Temperaturas (55, 57.5, 60 e 62.5 °C)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O tratamento mais eficaz foi a combinação de ácido cítrico e óleo essencial de orégano, que resultou em uma redução significativa na resistência térmica de <i>L. monocytogenes</i> , evidenciada pelos valores de D significativamente menores em todas as temperaturas testadas.
Lelwela <i>et al.</i> , 2020	Sri Lanka	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Filé	Fumaça de madeira selecionada	TQ	Imersão em salmoura (2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% NaCl) x Fumagem (50°C, 60°C, 70°C) x Tempo de secagem (3h, 4h, 5h) x Tipo de fumaça (mogno, canela, mogno+canela 1:1) x Controle	(1) <i>E. coli</i> ; (2) <i>Salmonella</i> spp.	CM	A combinação de salmoura (10% NaCl) e defumação com mogno:canela (1:1) a 60°C por 4 horas produziu tilápia com melhores qualidades sensoriais e segurança microbiológica, viável para armazenamento refrigerado por 21 dias.
Palotás <i>et al.</i> , 2020	Hungria	Carpa ( <i>Cyprinus carpio</i> )	Filé em pedaços	Água Eletrolisada Ácida (AEW) e lisozima	TQ; AAN	Controle (sem tratamento) x Lavagem com água x AEW x AEW + lavagem x AEW + lisozima x AEW + lavagem + lisozima	(1) Enterobactérias; (2) Mesófilos	CM	A combinação de AEW e lisozima aumentou a vida útil em mais de 5 dias, sem afetar as propriedades organolépticas.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Rezaeifar <i>et al.</i> , 2020	Irã	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Revestimento de quitosana enriquecido com extrato de verbena de limão (EVL) e óleo essencial (OEVL)	RCB; AAN	Controle (sem tratamento) x Vácuo x CH (quitosana) x CH-EVL 2% x CH-OEVL 1% x CH-EVL 1%-OEVL 0.5%	(1) Psicrotróficos; (2) Enterobactérias	CM	O revestimento de quitosana com extrato e óleo essencial de verbena-limão prolongou a vida útil da truta, reduzindo a oxidação lipídica e o crescimento microbiano. A combinação CH-EVL 1%-OEVL 0.5% foi a mais eficaz.
Shen <i>et al.</i> , 2020	China	Esturção russo ( <i>Acipenser gueldenstaed</i> )	Filé	Aquecimento a Vácuo de Baixa Temperatura	TF	Temperatura (50°C, 60°C, 70°C, 100°C) × Tempo (15 min, 30 min) × Pressão (-880 bar, -812 bar, -700 bar, pressão normal)	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	PCR (16S)	O melhor tratamento para reter as características originais e reduzir a taxa de deterioração foi a 70 °C, 15 min, - 700 bar.
Wiernasz <i>et al.</i> , 2020	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias <i>gravlax</i>	BAL	BMP	Controle: Salmão <i>gravlax</i> sem inoculação x 6 cepas de BAL inoculadas separadamente x Cepas + <i>L. monocytogenes</i> :	(1) Enterobactérias; (2) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM; PCR (16S)	O tratamento com <i>C. maltaromaticum</i> apresenta potencial promissor para a biopreservação segura do salmão <i>gravlax</i> . Este tratamento impediu o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> , mantendo sua contagem em níveis semelhantes aos iniciais.
Bolívar <i>et al.</i> , 2021	Espanha	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> )	Filé defumado	BAL	BMP	Armazenamento (Isotérmico, Dinâmico) × Inoculação ( <i>L. sakei</i> , <i>L. monocytogenes</i> ) × Carga (2, 4, 6 log UFC/g) × Cultura (Mono, Co-cultura)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Mesófilos	CM	O melhor tratamento para controlar o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> foi a aplicação da cultura bioprotetora <i>L. sakei</i> 2:1 (bioprotetor:patógeno) em log UFC/g.
Fidalgo <i>et al.</i> , 2021	Portugal	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Lombo	Armazenagem Hiperbárica (AH)	TF	AH1 (60 MPa, 10°C, 30 dias) x AH2 (75 MPa, 25°C, 30 dias) x PA1 (Pressão Atmosférica)/5°C (30 dias) x PA/10°C (15 dias) x AP/25°C (5 dias)	(1) <i>E. coli</i> (Inoculada); (2) <i>L. innocua</i> (Inoculada); (3) Mesófilos; (4) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O tratamento AH1 foi o mais eficaz para conservação do produto por 30 dias, ele levou a uma redução das contagens de mesófilos e <i>E. coli</i> para valores abaixo do limite de detecção. Houve redução nas contagens de <i>L. innocua</i> .

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Hansen <i>et al.</i> , 2021	Dinamar-ca	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Sal na fase aquosa (WPS)	TQ	Estirpes MS22246 e MS22258 x WPS (0,1%, 3,0%, 6,0%) x temperatura (58°C, 60°C, 62,5°C)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O tratamento mais eficaz para inativação das estirpes de <i>L. monocytogenes</i> foi a aplicação de calor a 62,5 °C com concentração de sal de 0% WPS, que resultou na maior redução da viabilidade bacteriana.
Heir <i>et al.</i> , 2021	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Vinagre; Nisina	TQ; AAN	Verdad N6 (2,5%, 5%, 10%, 18%) x Nisina (0,2 ppm, 0,5 ppm, 1 ppm) x Imersão (5 ou 300 segundos) x Controles (sem tratamento) x Controle (1% ácido acético)	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada); (2) Psicotróficos; (3) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	O tratamento mais eficaz foi a combinação de Verdad N6 (5% ou 10% por 5 segundos) e nisina (1 ppm). Esta combinação manteve os níveis de <i>L. monocytogenes</i> não superiores aos iniciais após 12 dias a 4 °C.
Iacumin <i>et al.</i> , 2021	Croácia	Robalo (Espécie não especificado)	Filé defumado	BAL	BMP	<i>L. monocytogenes</i> (3 estirpes) x culturas bioprotetoras ( <i>L. sakei</i> , <i>Carnobacterium</i> spp., <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactobacillus paracasei</i> x Controles	(1) <i>Listeria</i> spp. (Inoculada); (2) <i>Salmonella</i> spp.; (3) <i>Staphylococcus</i> spp.; (4) Enterobactérias; (5) Mesófilos	CM; BIO; SOR	A utilização da cultura iniciadora bioprotetora <i>L. sakei</i> inibiu o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> , mantendo sua concentração em torno de 2 log UFC/g ao longo de 60 dias, similar ao nível da inoculação inicial.
Kunová <i>et al.</i> , 2021	Eslováquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé em pedaços	Óleo de girassol; Óleo essencial de limão; Óleo essencial de <i>Cinnamomum camphora</i>	AAN	Embalagem (aeróbica, vácuo) x Aditivos (ausente, óleo de girassol, óleo de limão 0,5%, óleo de limão 1%, <i>C. camphora</i> 0,5%, <i>C. camphora</i> 1%)	(1) <i>Pseudomonaceae</i> ; (2) <i>Listeriaceae</i> ; (3) Enterobactereaceae. (4) <i>Staphylococcaceae</i>	MALD 1-TOF MS	Os melhores tratamentos para a qualidade microbiológica foram óleo essencial de <i>C. camphora</i> a 1%, que demonstrou as menores TVC, e o óleo essencial de limão a 1%, que foi mais eficaz contra enterobactérias.
Sun <i>et al.</i> , 2021	China	Carpa ( <i>Cyprinus carpio L.</i> )	Filé em pedaços fermentado	Irradiação; Tratamento térmico	TF	Grupo tratado termicamente x Grupo tratado com radiação x Grupo não tratado	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O tratamento térmico e por irradiação foram eficazes na inibição do crescimento de <i>Pseudomonas</i> spp. No produto em temperatura ambiente por 90 dias.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Naef <i>et al.</i> , 2021	Argentina	Piava ( <i>Leporinus obtusidens</i> ).	Filé	Impregnação a vácuo com suco de limão	AAN	Impregnação a vácuo com suco de limão comercial a 60% por 5, 10 e 15 minutos x Grupo controle sem impregnação	(1) Mesófilos; (2) Psicrótroficos; (3) Enterobacterias	CM	A impregnação a vácuo com suco de limão por 15 minutos se mostrou viável para controlar o crescimento microbiano, estendendo a vida útil por até 4 dias.
Öztürk <i>et al.</i> , 2021	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Sous vide; Óleos essenciais (alecrim, coentro, manjerição e louro)	TF; AAN	Óleos essenciais (alecrim, coentro, manjerição e louro) em concentração 2x MIC. Cozimento sous-vide a 50°C ou 55°C	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O óleo essencial de coentro (2x MIC) combinado com sous-vide a 55°C foi mais eficaz na inativação de <i>L. monocytogenes</i> , prolongando a segurança microbiológica da truta sous-vide.
Uchoi <i>et al.</i> , 2021	Índia	Cavala indiana ( <i>Rastrelliger kanagurta</i> )	Pedaços	Fermentação de salmoura saturada	TQ	Fermentação em salmoura saturada (23% NaCl)	(1) <i>E. coli</i>	CM	A fermentação em salmoura saturada preservou eficientemente a cavala, reduzindo a oxidação lipídica e mantendo a segurança microbiológica. O produto final teve alta aceitação sensorial e estabilidade em armazenamento, sendo seguro para consumo.
Chen <i>et al.</i> , 2022	EUA	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias defumadas	Nisina	AAN	Controle (sem nisina) a 4°C x Controle (sem nisina) a 7°C x Nisina (25 ppm) a 4°C x Nisina (25 ppm) a 7°C x Nisina (250 ppm) a 4°C x Nisina (250 ppm) a 7°C	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O tratamento mais eficaz contra <i>L. monocytogenes</i> foi a aplicação de 250 ppm de nisina em ambas as temperaturas.
Maqbool <i>et al.</i> , 2022	Índia	Mahseer de Deccan ( <i>Tor khudree</i> )	Pedaços (steaks)	Extrato de Casca de Beterraba (ECB)	AAN	Controle (ar atmosférico) x Controle (vácuo) x BtV (Extrato de casca de beterraba (20%) a vácuo	(1) Enterobactérias; (2) <i>E. coli</i> ; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.; (4) <i>L. monocytogenes</i>	CM	Em conclusão, o melhor tratamento identificado no estudo foi o grupo BtV. Não foi detectada a presença de <i>L. monocytogenes</i> em nenhuma das amostras de peixe durante o estudo em 12 dias.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Nguyen <i>et al.</i> , 2022	França	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias defumadas	Membrana de polipropileno tratada com plasma com <i>Carnobacterium divergens</i> vivo	BMP	Membrana de polipropileno tratada com plasma e funcionalizada com <i>C. divergens</i> x Aspersão direta de <i>C. divergens</i> x Controle	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	Para <i>L. monocytogenes</i> em salmão, o melhor tratamento foi a utilização de membrana de polipropileno tratada com plasma e funcionalizada com <i>C. divergens</i> foi altamente eficaz na inibição do crescimento deste patógeno durante o armazenamento refrigerado.
Qian <i>et al.</i> , 2022	China	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Curcumina e piperina	AAN	Controle, temperatura flutuante x Controle, temperatura constante x Vácuo, temperatura flutuante x Curcumina + Piperina, temperatura flutuante x Curcumina + Piperina, vácuo, temperatura flutuante	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos	CM	A combinação de embalagem a vácuo com curcumina e piperina foi o tratamento mais eficaz para preservar o salmão sob abuso de temperatura.
Damdam <i>et al.</i> , 2023	Arábia Saudita	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Irradiação UV-C	TF	Irradiação UV-C e vácuo X Irradiação UV-C (ambiente aeróbico) X Vácuo X Controle (ambiente aeróbico)	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Mesófilos; (3) <i>E. coli</i>	CM	A combinação de irradiação UV-C e vácuo demonstrou ser o melhor tratamento para preservação do salmão. Nenhuma amostra testou positivo para <i>E. coli</i> .
Jeyakumari <i>et al.</i> , 2023	Índia	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Pedaços	Irradiação por Feixe de Elétrons (EBI)	TF	Controle: Sem irradiação x Irradiação 2.0 kGy x Irradiação 4.0 kGy	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	A irradiação com 2.0–4.0 kGy estendeu a vida útil da tilápia para 28–38 dias (vs. 16 dias no controle), reduzindo contagens microbianas sem afetar parâmetros bioquímicos do produto.
Racioppo <i>et al.</i> , 2023	Itália	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> ); Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Filé defumado	Fumaça líquida com extrato de limão, sal e ácido acético	TQ; AAN	Pulverização com solução de extrato de limão (0.75%), ácido acético (0.5%), NaCl (2%) e fumaça líquida (0.002%) x Grupo controle sem tratamento	(1) Psicotróficos; (2) Pseudomonadaceae; (3) Enterobactérias; (4) <i>Staphylococcus</i> spp.; (5) <i>E. coli</i> O157; (6) <i>L. monocytogenes</i> ; (7) <i>Salmonella</i> spp.	CM	A composição contendo fumaça líquida pode preservar filés de dourada e robalo por pelo menos duas semanas a 4 °C, mantendo baixas cargas de bactérias de deterioração e sem detecção de patógenos.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Alberghini <i>et al.</i> , 2024	Itália	Salmão ( <i>Salmo salar</i> ); Bacalhau do Atlântico ( <i>Gadus morhua</i> ); Solha ( <i>Pleuronectes platessa</i> )	Filé	Skin pack	TF	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (inoculado, não inoculado) x Temperatura (4 °C, 6-8 °C)	(1) <i>P. aeruginosa</i> (inoculado)	CM	Embalagem a vácuo é eficaz na redução da multiplicação de <i>Pseudomonas</i> spp. em filés de peixe. O potencial de crescimento de <i>P. aeruginosa</i> foi inferior a 0.5 Log10 UFC/g, independentemente da temperatura e espécie.
El Asuoty <i>et al.</i> , 2024	Egito	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Filé	Ácido acético	TQ	Vácuo x Não-vácuo x Imersão em ácido acético 1% por 2 minutos e vácuo x Imersão em ácido acético 1% por 2 minutos e não-vácuo	(1) Psicotróficos	CM	O tratamento com ácido acético 1% e vácuo foi o método mais eficaz para estender a vida útil do peixe, reduzindo a contaminação microbiana e mantendo melhores propriedades sensoriais.
Gurusamy <i>et al.</i> , 2024	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Estabilização de Gás Solúvel (SGS)	TF	Tratamento SGS com CO <sub>2</sub> 100% a -1,6 °C por 10 h x controle (ar) x Armazenamento (Transporte: 0 ou 4 °C; Varejo: 0, 4 ou 8 °C)	(1) Psicotróficos	CM	O tratamento SGS prolongou a fase lag dos microrganismos (2,2–3,0 vezes) e manteve a qualidade do salmão sob diferentes cenários de cadeia fria.
Monteiro <i>et al.</i> , 2024	Brasil	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Radiação UVC-LED	TF	11 Tratamentos com UVC-LED (Potência: 1.00–1.58 mW/cm <sup>2</sup> ; Tempo: 500–2700 s; Dose: 500–4630 mJ/cm <sup>2</sup> ) + controle não tratado	(1) Psicotróficos	CM	UVC-LED (1.46 mW/cm <sup>2</sup> por 2407.8 s = 3515.40 mJ/cm <sup>2</sup> ) aumentou a vida útil em 1.4×, manteve cor e textura próximas ao fresco, mas elevou oxidação lipídica em 160%.
Özpolat 2024	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Óleo de <i>Juniperi fructus</i>	AAN	Óleo de <i>J. fructus</i> (0%, 0.3%, 0.6%) x Embalagem (aeróbica, vácuo)	(1) Mesófilos	CM	O melhor tratamento para limitar o crescimento de bacteriano foi a combinação de embalagem a vácuo com óleo essencial de <i>J. fructus</i> a 0.6%, demonstrando o menor aumento nas contagens microbianas ao longo do período de armazenamento.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Timoracká <i>et al.</i> , 2024	Eslováquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Pedaços ( <i>steaks</i> )	Ervas secas e óleos essenciais (girassol, tomilho, alecrim)	AAN	Controle aeróbico x Controle vácuo x Óleo de girassol x Óleo essencial de tomilho x Erva seca de tomilho x Óleo essencial de alecrim x Erva seca de alecrim	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) <i>Staphylococcus</i> spp.	CM; MALDI-TOF MS	O óleo essencial de alecrim foi o mais eficaz na inibição do crescimento bacteriano. Os tratamentos com óleos essenciais e ervas secas reduziram significativamente a carga microbiana.
Zhang <i>et al.</i> , 2024	China	Carpa capim ( <i>Ctenopharyngodon idella</i> )	Filé	Tratamentos térmicos (vapor, cozimento, fritura, sous-vide, assado)	TF	Cru (controle) x Vapor x Cozido x Frito x Assado x Sous-vide	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	PCR (16S)	O melhor tratamento para preservar a qualidade da carne de carpa durante o armazenamento refrigerado foi a fritura, apresentando a maior vida de prateleira (até 15 dias) com sinais mínimos de deterioração.
Son <i>et al.</i> , 2025	Chile	Salmão Coho ( <i>Oncorhynchus kisutch</i> )	Filé em pedaços defumado	BAL	BMP	Fermentado de <i>L. lactis</i> x Sobrenadante livre de células de <i>L. lactis</i> x Suspensão de células de <i>L. lactis</i> x Controle	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O tratamento mais eficaz para controlar <i>L. monocytogenes</i> foi a aplicação do fermentado ou do sobrenadante livre de células de <i>L. lactis</i> .
Augustin <i>et al.</i> , 2015	NE	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Fatias defumadas	Irradiação	TF	Fatias de salmão defumado irradiadas e contaminadas artificialmente com <i>L. innocua</i> Armazenado a 8°C por 12 dias.	(1) <i>L. innocua</i> (Inoculada)	CM	O estudo concluiu que a modelagem baseada em indivíduos (IBM), combinada com a descrição do microambiente dos alimentos, é mais eficaz para prever o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> em situações de baixa contaminação inicial.

Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: AAN – Aditivos Antimicrobianos Naturais; AEW – Acidic Electrolyzed Water (Água Eletrolisada Ácida); AH – Armazenagem Hiperbárica; BAL – Bactérias Ácido-Láticas; BHT – Butil-hidroxitolueno; BIO – Testes Bioquímicos; BMP – Bioconservação por Microrganismos Protetores; CH – Quitosana; CM – Cultura Microbiológica; CO – Monóxido de Carbono; CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono; CZ – Zeína; EBI – Electron Beam Irradiation (Irradiação por Feixe de Elétrons); EUA – Estados Unidos da América; EVL – Extrato de Verbena de Limão; FA – Filme Ativado; GEN – Caracterização Genotípica; HPP – High Pressure Processing (Processamento por Alta Pressão); LED – Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz); MALDI-TOF MS – Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry; MIC – Minimum Inhibitory Concentration (Concentração Inibitória Mínima); NE – Não Especificado; NTAP – Non-Thermal Atmospheric Plasma (Plasma Atmosférico Não Térmico); OE – Óleo Essencial; OEL – Óleo Essencial de Louro; OEVL – Óleo Essencial de Verbena de Limão; OU – Outros; O<sub>2</sub> – Oxigênio; PA – Pressão Atmosférica; PCR (16S) – Polymerase Chain Reaction (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16S rRNA; PHBA – p-Hidroxibenzoico; PVC – Polyvinyl Chloride (Policloreto de Vinila); RCB – Revestimentos Comestíveis Bioativos; SGS – Estabilização de Gás Solúvel; SOR – Sorotipagem; TF – Tecnologias Físicas; TQ – Tecnologias Químicas; UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama; UV – Ultravioleta; UV-C – Radiação Ultravioleta tipo C; ppm – Parte por Milhão.

Quadro 2 - Estudos com embalagem a vácuo sem tecnologia associada

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Binsi <i>et al.</i> , 2015	Índia	Peixe gato ( <i>Ompok pabda</i> )	Peixe eviscerado	Vácuo x Controle aeróbio Armazenamento a 4±2 °C	(1) Enterobactérias; (2) <i>E. coli</i> ; (3) <i>Salmonella</i> spp.; (4) <i>L. monocytogenes</i> ; (5) <i>S. aureus</i>	CM	O estudo concluiu que a embalagem a vácuo, associada à evisceração e refrigeração, foi eficaz em prolongar a vida útil do produto em até 20 dias, com significativa redução das contagens microbianas em comparação à embalagem convencional.
Tang <i>et al.</i> , 2015	NE	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé defumado	Crescimento em salmão defumado a frio x Crescimento em caldo MBHIB	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM; PCR	Densidade celular máxima média de <i>L. monocytogenes</i> foi de 8,68 ± 0,14 log UFC/g, representando o nível mais alto do patógeno alcançado nas amostras de salmão durante o período de incubação a 7°C monitorado no estudo.
Fuentes-Amaya <i>et al.</i> , 2016	Austrália	Imperador de manchas azuis ( <i>Lethrinus sp.</i> ); Imperador Vermelho ( <i>Lutjanus malabaricus</i> ); Parfo carmesim ( <i>Lutjanus erythropterus</i> ); Robalo asiático ( <i>Lates calcarifer</i> ); Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Armazenamento a 4°C por 5 dias	(1) Psicotróficos	CM	A deterioração da qualidade dos filés de peixe é um evento complexo que envolve fatores bioquímicos, sensoriais e microbianos, sendo a avaliação sensorial o método mais importante para monitorar a frescura. No que se refere aos psicotróficos, houve um aumento nos níveis médios ao longo do período de armazenamento a 4°C.
Kataoka <i>et al.</i> , 2016	NE	Albacora ( <i>Thunnus alalunga</i> ); Bonito-listrado ( <i>Katsuwonus pelamis</i> )	Lombo, lascas e pedaços	Espécie (Albacora, Bonito) x Preparação (Lombo, Pedaço, Lascas) x Temperatura (21°C, 27°C) x Inoculação ( <i>S. aureus</i> 10 <sup>3</sup> UFC/g)	(1) <i>S. aureus</i> (Inoculado)	CM	Observou-se um crescimento significativamente mais rápido de <i>S. aureus</i> na albacora em comparação com bonito ( $P < 0,05$ ), possivelmente devido a diferenças na composição da amostra (pH e teor de sal), com diferenças marcantes entre preparações.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Zhang <i>et al.</i> , 2016	China	Pregado ( <i>Scophthalmus maximus</i> )	Peixe eviscerado	Armazenamento refrigerado a 4 °C	(1) <i>Pseudomonas</i> spp., (2) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	Considerando o tratamento de embalagem a vácuo e armazenamento a 4 °C, o estudo concluiu que a vida de prateleira do pregado foi de 16 dias.
Li <i>et al.</i> , 2017	China	Carpa prateada ( <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> )	Filé	Ar x Vácuo	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	O melhor tratamento para inibir o crescimento de <i>Pseudomonas</i> spp. foi a embalagem a vácuo, com o crescimento de <i>Pseudomonas</i> spp. significativamente menor ( $p < 0.05$ ) sob esta condição durante todo o período de armazenamento.
Aalto-Araneda <i>et al.</i> , 2019	Finlândia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> ); Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé gravlax ou defumados; Fatias gravlax ou defumados	Levantamento de práticas de higiene e sanitização em 21 plantas de processamento de peixe.	(1) <i>L. monocytogenes</i>	CM; BIO	A conclusão do estudo revela que a contaminação por <i>L. monocytogenes</i> ocorreu apenas em produtos fatiados, sendo significativamente mais comum em produtos gravlax (11%) do que em produtos defumados (1.9%). <i>L. monocytogenes</i> não foi detectado nas amostras não fatiadas.
Jääskeläinen <i>et al.</i> , 2019	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> ); Atum Albacora ( <i>Thunnus albacares</i> )	Filé	Espécie (Atum-albacora, Salmão) x Embalagem (Vácuo, sem embalagem)	(1) Psicotróficos; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.; (3) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	Sob embalagem a vácuo, o atum apresentou uma menor proliferação de bactérias psicotróficas e <i>Pseudomonas</i> spp. em comparação com o salmão.
Zhang <i>et al.</i> , 2021	China	Carpa negra ( <i>Mylopharyngodon piceus</i> )	Filé curado	Armazenamento a $4 \pm 1$ °C x $25 \pm 1$ °C	(1) <i>Staphylococcus</i> spp.	PCR (16S)	O estudo indicou que o armazenamento refrigerado a 4 °C foi o "melhor tratamento" para manter a diversidade da microbiota. Neste tratamento, gênero <i>Staphylococcus</i> foi um dos três mais abundantes durante todo o armazenamento.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Lemos <i>et al.</i> , 2023	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Condições aeróbicas x Vácuo	(1) Psicrotróficos; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	O melhor tratamento para prolongar o prazo de validade de filé de salmão foi a embalagem a vácuo a 4 °C, que estendeu a vida útil até 20 dias e resultou numa redução no número total de microrganismos em comparação com o armazenamento aeróbico.
Chen <i>et al.</i> , 2024	China	Corvina amarela ( <i>Larimichthys crocea</i> )	Filé	Filés não esterilizados x esterilizados x esterilizados + inoculação de <i>Pseudomonas fluorescens</i> x esterilizados + inoculação de <i>Shewanella putrefaciens</i>	(1) <i>P. fluorescens</i> (Inoculado)	CM	<i>S. putrefaciens</i> foi o principal agente de deterioração em embalagem a vácuo, degradando IMP rapidamente. A embalagem a vácuo não inibiu completamente o crescimento de <i>S. putrefaciens</i> , mas foi eficaz contra <i>P. fluorescens</i> .

Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: BIO – Testes Bioquímicos; CM – Cultura Microbiológica; IMP – Inosina Monofosfato; MBHIB – Modified Buffered Heart Infusion Broth (Caldo Infusão Coração Tamponado Modificado); NE – Não Especificado; PCR (16S) – Polymerase Chain Reaction (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16S rRNA; UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama.

Quadro 3 - Estudos com embalagem em atmosfera modificada e uso de tecnologia associada.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Pang <i>et al.</i> , 2015	EUA	Peixe-gato-americano ( <i>Ictalurus punctatus</i> )	Filé em pedaços	Isotiocianato de alila (AIT)	AAN	Controle (sem AIT, sem AM) x AIT (18 e 36 $\mu$ L/L) x EAM x AIT + EAM (EAM: 49% CO <sub>2</sub> , 50.5% N <sub>2</sub> , 0.5% O <sub>2</sub> )	(1) <i>P. aeruginosa</i>	CM	A combinação de AIT + AM prolongou significativamente a vida útil do produto, especialmente em baixas temperaturas (8°C). O modelo matemático desenvolvido previu com precisão o tempo de lag e a taxa de crescimento de <i>P. aeruginosa</i> .
Shamloofar <i>et al.</i> , 2015	Irã	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Nisina encapsulada em zeína	AAN	Controle (sem nisina) x Nisina 0.15 g/kg x Nisina 0.25 g/kg x Nisina encapsulada 0.15 g/kg x Nisina encapsulada 0.25 g/kg (EAM: 45% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos	CM	O tratamento mais eficaz para controlar a proliferação de microrganismos em filés de truta refrigerados sob EAM foi a aplicação de nisina encapsulada a uma concentração de 0.25 g/kg.
Miraglia <i>et al.</i> , 2016	Itália	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Pedaços ( <i>steaks</i> )	Extrato fenólico da água da vegetação de oliveira	AAN	Extrato fenólico de água de vegetação de oliva a 1.5 g/L x Extrato fenólico de água de vegetação de oliva a 3 g/L x Imersão em água EAM: 70% CO <sub>2</sub> , 25% N <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> )	(1) Enterobactérias	CM	O melhor tratamento foi a imersão em solução de extrato fenólico a 3 g/L.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Moroney <i>et al.</i> , 2016	Irlanda	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Dieta com <i>Ulva rigida</i>	OU	Dietas com 0%, 5%, 10%, 15% de <i>U. rigida</i> x controle positivo (Astaxantina sintética)  (EAM: 40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos	CM	<i>U. rigida</i> a 5% melhorou a estabilidade microbiana dos filés. Níveis mais altos (10–15%) não tiveram efeito significativo. A qualidade sensorial foi mantida em 5%.
Rodrigues <i>et al.</i> , 2016	Brasil	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Radiação UV-C	TF	Ar x EAM+ Radiação UV-C (106.32 mJ/cm <sup>2</sup> )  (EAM: 80% CO <sub>2</sub> /20% N <sub>2</sub> ;) )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos	CM	O melhor tratamento para a conservação de filés de truta foi EAM + radiação UV-C, que aumentou a vida de prateleira em pelo menos duas vezes, promovendo a formação da fase lag e um menor número de colônias na fase estacionária.
Saraiva <i>et al.</i> , 2017	NE	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Suco de limão	AAN	Aeróbico x EAM x EAML (EAM + suco de limão) x Temperatura (3°C, 8°C, 30°C)  (EAM: 50% N <sub>2</sub> , 40% CO <sub>2</sub> , 10% O <sub>2</sub> )	(1) Psicrotróficos; (2) Enterobactérias; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O tratamento mais eficaz para inibir o crescimento dos microrganismos avaliados foi a EAML a 3°C.
Carrión-Granda <i>et al.</i> , 2018	Espanha	Merluza ( <i>Merluccius merluccius</i> )	Filé em pedaços	Revestimento com óleos essenciais de orégano e tomilho	RCB; AAN	Controle (sem revestimento) x WPI (proteína de soro de leite) x WPI + óleo de orégano 1% x WPI + óleo de orégano 3% x WPI + óleo de tomilho 1% x WPI + óleo de tomilho 3%  (EAM: 50% CO <sub>2</sub> , 45% N <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> )	(1) Enterobactérias; (2) Psicrotróficos; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	A combinação de revestimentos WPI com óleos essenciais e EAM estendeu a vida útil dos filés, especialmente para amostras com baixa carga microbiana inicial. WPI + Óleo de orégano 3% em EAM foi o mais eficaz, dobrando a vida útil (12 dias vs. 4-8 dias do controle).

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Abel <i>et al.</i> , 2019	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé em pedaços	Estabilização de Gás Solúvel (SGS)	TF	Tratamentos térmicos (40, 50, 60 °C) x Embalagem EAM ou SGS x Controle (EAM: 60% CO <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> )	(1) <i>L. innocua</i> (Inoculada)	CM	O tratamento combinando SGS com aquecimento a 50°C mostrou os melhores resultados, inibindo completamente o crescimento de <i>L. innocua</i> por 24 dias de armazenamento a 4°C.
Costa <i>et al.</i> , 2019	Espanha	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> )	Filé	BAL	BMP	Cepa bacteriana ( <i>L. sakei</i> , <i>L. monocytogenes</i> ) x Proporção de inoculação (1:1, 1:2, 1:3) x Temperatura (isotérmica: 2,2°C, 5,0°C, 8,1°C, 12,1°C; não isotérmica) (EAM: 27.0% CO <sub>2</sub> , 37.4% O <sub>2</sub> )	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	O uso da cepa de <i>L. sakei</i> como cultura bioprotetora é uma estratégia adequada para controlar o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> em filés dourada refrigerados sob atmosfera modificada, sendo que a maior proporção de <i>L. sakei</i> para <i>L. monocytogenes</i> resultou na ausência de crescimento do patógeno.
Di Toro <i>et al.</i> , 2019	Itália	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé	Vinagre aromático	TQ	Vinagre aromático (1,5 mL/150 g) x Controle (EAM (Inicial): 28.22% CO <sub>2</sub> , 13.46% O <sub>2</sub> )	(1) Enterobactérias; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.; (3) Psicrótroficos; (4) <i>Salmonella</i> spp.; (5) <i>L. monocytogenes</i>	CM	O vinagre aromático reduziu significativamente <i>Pseudomonas</i> spp. e carga psicrotrófica, além de diminuir a produção de aminas biogênicas. <i>Salmonella</i> spp. e <i>L. monocytogenes</i> não foram detectadas.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Maghami <i>et al.</i> , 2019	Irã	Esturjão branco (Huso huso)	Filé	Revestimento de nanopartículas de quitosana (CNPs) e óleo essencial de funcho (OE)	RCB; AAN	Controle sem revestimento e sem EAM x Amostras não revestidas x Revestidas com CNPs x Revestidas com EO x Revestidas com CNPs e carregadas com EO (EAM: 80% CO <sub>2</sub> , 19% N <sub>2</sub> , 1% O <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	O tratamento mais eficaz para aumentar o tempo de prateleira foi a combinação de CNPs e EO com EAM. Este tratamento combinado demonstrou ser o mais eficiente na inibição do crescimento dos microrganismos durante o armazenamento refrigerado.
Merlo <i>et al.</i> , 2019	Chile	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé em pedaços	Revestimento de quitosana e extrato de pimenta rosa	RCB; AAN	Controle (sem filme) x Filme de quitosana x Filme de quitosana com extrato de pimenta rosa (EAM: 100% CO <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos	CM	O tratamento mais eficaz foi filme de quitosana com extrato de pimenta rosa combinada com embalagem em atmosfera modificada (100% CO <sub>2</sub> ).
Pinheiro <i>et al.</i> , 2019	Itália	Sardinha ( <i>Sardina pilchardus</i> )	Filé	Misturas gasosas de argônio e óxido nitroso	TF	Ar (20,8%O <sub>2</sub> , 79,2%N <sub>2</sub> ) x EAM (30% CO <sub>2</sub> , 70% N <sub>2</sub> ) x EAM (30% CO <sub>2</sub> , 70% N <sub>2</sub> O) x (30% CO <sub>2</sub> , 70% Argônio) x Ar (30% CO <sub>2</sub> / 70% Ar).	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos; (3) Enterobactérias; (4) <i>Pseudomonas</i> spp.; (5) <i>L. monocytogenes</i> (6) <i>Salmonella</i> spp.	CM	A conclusão do estudo aponta que o melhor tratamento para estender significativamente o tempo de prateleira dos filés foi a EAM (30% CO <sub>2</sub> , 70% Argônio). <i>L. monocytogenes</i> e <i>Salmonella</i> spp. não foram detectados em nenhuma amostra durante o estudo.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Skírnisdóttir <i>et al.</i> , 2021	Islândia	Bacalhau do Atlântico ( <i>Gadus morhua</i> )	Lombo	Revestimento de quitosana	RCB	Tratamento (quitosana: ausente, presente) x Embalagem (ar, EAM) (EAM: 55% CO <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	O tratamento com quitosana aplicado ao bacalhau eviscerado antes do armazenamento a bordo foi eficaz na redução da carga bacteriana inicial nos lombos recém-processados. Embora não tenha resultado numa extensão geral da vida de prateleira dos lombos, EAM retardou o crescimento bacteriano geral nos lombos, independentemente do tratamento do peixe inteiro.
Zhang <i>et al.</i> , 2021	China	Carpa capim ( <i>Ctenopharyngodon idellus</i> )	Filé	Óleo essencial de orégano e nisina	AAN	Controle (sem tratamento) x Óleo essencial de orégano x Nisina x Óleo essencial de orégano + Nisina (EAM: 75% CO <sub>2</sub> , 25% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	PCR (16S)	O uso de óleo essencial de orégano e nisina modificou as propriedades sensoriais, microbiológicas e químicas dos filés em EAM. A combinação de nisina e óleo essencial de orégano apresentou um efeito antimicrobiano sinérgico, estendendo significativamente a vida útil.
Jääskeläinen <i>et al.</i> , 2023	Finlândia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Marinação	TQ	Não marinado X Marinado (EAM: 20%CO <sub>2</sub> , 79% N <sub>2</sub> , 1%O <sub>2</sub> )	(1) Psicotróficos; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	A marinação pode aumentar a concentração de BAL e a formação de tiramina, sendo vantajosa na redução do odor de peixe deteriorado.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Kizilkaya & Kaya 2023	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Revestimento de quitosana, nanopartículas de dióxido de titânio e ácido rosmarínico	RCB; AAN; TQ	Controle x Quitosana 2% x Quitosana 2% + TiO <sub>2</sub> 1,5% x Quitosana 2% + TiO <sub>2</sub> 1,5% + ácido rosmarínico 5 ppm. (EAM: 40% CO <sub>2</sub> ,30% O <sub>2</sub> ,30% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos; (3) Enterobactérias	CM	Tratamento com Quitosana + TiO <sub>2</sub> + ácido rosmarínico foi o mais eficaz para inibir o crescimento bacteriano em filés de truta arco-íris refrigerados.

Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: AAN – Aditivos Antimicrobianos Naturais; AM – Atmosfera Modificada; BAL – Bactérias Ácido-Láticas; BMP – Bioconservação por Microrganismos Protetores; CM – Cultura Microbiológica; CO – Monóxido de Carbono; CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono; EAM – Embalagem em Atmosfera Modificada; EUA – Estados Unidos da América; NE – Não Especificado; OE – Óleo Essencial; OU – Outros; O<sub>2</sub> – Oxigênio; PCR (16S) – Polymerase Chain Reaction (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16SrRNA; RCB – Revestimentos Comestíveis Bioativos; SGS – Estabilização de Gás Solúvel; TF – Tecnologias Físicas; TQ – Tecnologias Químicas; UV – Ultravioleta; UV-C – Radiação Ultravioleta tipo C; WPI – Whey Protein Isolate (Proteína Isolada do Soro do Leite); ppm – Parte por Milhão.

Quadro 4 - Estudos com embalagem em atmosfera modificada sem tecnologia associada.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Parlapani <i>et al.</i> , 2015	Itália	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Peixe eviscerado	Armazenamento a 2°C sob ar x EAM (EAM: 60%CO <sub>2</sub> , 10%O <sub>2</sub> , 30%N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias	CM	O estudo concluiu que <i>Pseudomonas</i> spp. foram os principais microrganismos responsáveis pela deterioração do robalo armazenado a 2 °C, atingindo 7,2 log CFU/g sob atmosfera aeróbica e 6,4 log CFU/g sob atmosfera modificada no final da vida útil. A vida útil sensorial foi estendida de 9 dias (ar) para 13 dias (EAM).
Parlapani <i>et al.</i> , 2015	Grécia	Dourada ( <i>Sparus aurata</i> )	Filé	Armazenamento a 2°C sob ar x EAM (EAM: 60%CO <sub>2</sub> , 10%O <sub>2</sub> , 30%N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	o experimento demonstrou que a atmosfera modificada inibiu significativamente o crescimento dessas bactérias em comparação ao armazenamento sob ar. Sob condições aeróbias, <i>Pseudomonas fragi</i> predominou no final da vida útil em ambas as temperaturas (0 °C e 5 °C), atingindo contagens superiores a 8,4 log UFC/g. Já sob EAM a população de <i>Pseudomonas</i> spp. foi reduzida, especialmente a 0 °C, onde <i>Pseudomonas veronii</i> foi a espécie dominante, com contagem final em torno de 7,1 log UFC/g.
Guillard <i>et al.</i> , 2016	França	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	NE	EAM x Temperatura (4 °C e 8 °C) x Armazenamento em ar a 15 °C (controle) (EAM: 50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> )	(1) <i>L. monocytogenes</i> (Inoculada)	CM	Os resultados para o salmão mostram que o crescimento de <i>L. monocytogenes</i> foi principalmente influenciado pela temperatura de armazenamento, com a armazenagem a 4 °C sendo o melhor tratamento para limitar a sua proliferação, independentemente da atmosfera modificada.
Antunes-Rohling <i>et al.</i> , 2019	Espanha	Merluza ( <i>Merluccius merluccius</i> )	Filé	Armazenamento em EAM (50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> ) a 1, 4, 7 e 10 °C	(1) Mesófilos aeróbios; (2) Mesófilos anaeróbios; (3) Psicrotróficos aeróbios; (4) Psicrotróficos anaeróbios; (5) <i>Pseudomonas</i> spp.; (6) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	A conclusão do estudo sobre filés de merluza EAM e armazenados entre 1 °C e 10 °C revela distintos padrões de crescimento microbiano, com as temperaturas mais baixas apresentando melhores resultados.

Kritikos <i>et al.</i> , 2020	Grécia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> ); Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé; Fatias	Armazenamento a 2 °C por 14 dias sob atmosfera modificada (EAM: 60% CO <sub>2</sub> , 10% O <sub>2</sub> , 30% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias	CM	O estudo demonstrou diferentes padrões de crescimento microbiano. No robalo, o microrganismo dominante foi <i>Pseudomonas</i> spp., com suas contagens em 6.7 log UFC/g no final da vida de prateleira. As contagens de Enterobactérias no robalo permaneceram relativamente baixas, não ultrapassando 4.6 log UFC/g. Em contraste, no salmão, <i>Pseudomonas</i> spp. atingiu 4.9 log UFC/g no ponto de rejeição sensorial, enquanto as contagens de Enterobactérias foram significativamente menores, chegando a 2.8 log UFC/g no final da vida de prateleira. Essas diferenças indicam que as mesmas condições de armazenamento EAM afetam distintamente a microbiota dessas duas espécies.
Sorensen <i>et al.</i> , 2020	Groelândia	Bacalhau do Atlântico ( <i>Gadus morhua</i> )	Filé	Armazenamento aeróbico em gelo x Aeróbico a 3°C x EAM em gelo x EAM a 3°C (EAM: 40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM	Foi demonstrado que o tratamento mais eficaz para inibir o crescimento de <i>Pseudomonas</i> spp. foi a EAM com 40% de CO <sub>2</sub> e 60% de N <sub>2</sub> , tanto em condições de refrigeração (2.9 °C) quanto em gelo (0.4 °C).
Govari <i>et al.</i> , 2021	Grécia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Filé	Temperatura (0, 4, 8 e 12 °C) x Atmosfera (Ar, EAM) (EAM: 31% CO <sub>2</sub> , 23% O <sub>2</sub> , 46% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias	CM; FTIR	A FTIR demonstrou ser uma ferramenta promissora para a avaliação rápida da qualidade microbiológica de filés de robalo. Em relação aos microrganismos, o estudo constatou que as contagens de <i>Pseudomonas</i> spp. apresentaram níveis populacionais mais elevados em comparação com Enterobactérias, independentemente da temperatura de armazenamento e da condição de embalagem; contudo, o crescimento de <i>Pseudomonas</i> spp. foi inibido sob EAM.
Syropoulou <i>et al.</i> , 2022	Grécia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	Peixe inteiro; Filé	Ar x EAM x Forma de apresentação (Peixe inteiro, filé) x Temperatura (0, 4, 8 e 12 °C) (EAM: 31% CO <sub>2</sub> , 23% O <sub>2</sub> , 46% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	PCR (16S)	<i>Pseudomonas</i> dominou na maioria dos tratamentos, exceto em EAM a 12°C, onde <i>Serratia</i> prevaleceu. EAM prolongou a vida útil e alterou a microbiota, com <i>Carnobacterium</i> spp. e <i>Shewanella</i> spp. aparecendo esporadicamente. A abundância de <i>Pseudomonas</i> spp. Foi de 33-61% em ar e 18-47% em EAM.

Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: AM – Atmosfera Modificada; CM – Cultura Microbiológica; CO – Monóxido de Carbono; CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono; EAM – Embalagem em Atmosfera Modificada; FTIR – Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier); NE – Não Especificado; O<sub>2</sub> – Oxigênio; PCR (16S) – Polymerase Chain Reaction (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16S rRNA; UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama.

Quadro 5 – Estudos com embalagem combinada (vácuo e atmosfera modificada) e uso de tecnologia associada.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Yıldız 2015	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé defumado	Óleo essencial de tomilho e cravo	AAN	Vácuo x EAM x Vácuo + 1% de óleo essencial de tomilho x EAM + 1% de óleo essencial de tomilho x Vácuo + 1% de óleo essencial de cravo + EAM + 1% de óleo essencial de cravo (EAM: 50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos	CM	O tratamento EAM + óleo essencial de cravo foi considerado o melhor do estudo, observou-se a menor proliferação microbiana durante os 120 dias de armazenamento a 4 °C. Este tratamento apresentou crescimento microbiano significativamente mais lento ( $p < 0,05$ ) prolongando significativamente a vida útil do produto
Yıldız 2015	Turquia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé defumado	Óleo essencial de tomilho e alecrim	AAN	Vácuo x EAM x Vácuo + 1% óleo de tomilho x EAM + 1% óleo de tomilho x Vácuo + 1% óleo de alecrim x EAM + 1% óleo de alecrim (EAM: 50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos	CM	Considerando as contagens de mesófilos e psicotróficos, o experimento demonstrou que a combinação de óleos essenciais (particularmente o de tomilho) e EAM foi eficaz na inibição do crescimento microbiano em trutas defumadas. As amostras controle ultrapassaram o limite de 7 log UFC/g para mesófilos e psicotróficos em 50 e 80 dias, respectivamente. Em contraste, as amostras com óleo de tomilho sob EAM mantiveram-se abaixo desse limite até o 90º dia.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Rodrigues <i>et al.</i> , 2016	Brasil	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé	Radiação UV-C	TF	Ar x Vácuo x Vácuo + UV-C x EAM x EAM + UV-C (EAM: 80% CO <sub>2</sub> , 20% N <sub>2</sub> )	(1) Psicrotróficos; (2) Mesófilos; (3) Enterobactérias	CM	A combinação de EAM e UV-C prolongou a vida útil da truta em pelo menos 2 vezes, retardando o crescimento microbiano (formação de fase lag) e a produção de aminas biogênicas.
Guerra <i>et al.</i> , 2017	Brasil	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Filé	Ácido ascórbico	TQ	T1 (controle em aerobiose) x T2 (1% ácido ascórbico + EAM (80% CO <sub>2</sub> , 20% O <sub>2</sub> ) x T3 (1% ácido ascórbico + 100% CO <sub>2</sub> ) x T4 (1% ácido ascórbico + vácuo)	(1) <i>Staphylococcus</i> coagulase positivo; (2) <i>Salmonella sp.</i> ; (3) Psicrotróficos	CM	O tratamento T4 foi o mais eficaz para a conservação do filé de tilápia refrigerado, inibindo o desenvolvimento microbiano e mantendo a qualidade por mais tempo (18 dias). A presença de <i>Staphylococcus</i> coagulase positivo e <i>Salmonella sp.</i> não foi comprovada em nenhuma das amostras durante todo o período de armazenamento.
Hernández <i>et al.</i> , 2017	Brasil	Pirarucu ( <i>Arapaima gigas</i> )	Filé em pedaços	Sous vide	TF	Vácuo x EAM1 (60% CO <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> ) x EAM2 (70% CO <sub>2</sub> , 30% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos; (3) <i>Salmonella spp.</i> ; (4) <i>Staphylococcus</i> coagulase positivo	CM	Vida útil definida por parâmetros físico-químicos e sensoriais, com 49 dias para vácuo, 28 dias EAM1, 35 dias para EAM2. Microrganismos dentro dos limites legais durante todo o armazenamento. A análise de <i>Salmonella spp.</i> resultou em ausência/25g em todos os tratamentos no início e no final do armazenamento.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Li <i>et al.</i> , 2020	China	Baiacu obscuro ( <i>Takifugu obscurus</i> )	Peixe inteiro	Água Eletrolisada Fracamente Ácida (WAEW)	TQ	AP (controle com ar) x VP (vácuo) x EAM x WAEW + AP x WAEW + VP x WAEW + MAP (EAM: 60% CO <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> , 35% N <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.,	CM	WAEW + EAM inibiu significativamente o crescimento microbiano, prolongou a vida útil e manteve a qualidade do peixe. No grupo WAEW+EAM, a contagem de <i>Pseudomonas</i> spp. aumentou ao longo do armazenamento, mantendo-se abaixo do limite de 7.0 log <sub>10</sub> UFC/g até ao 18º dia.
Iacumin <i>et al.</i> , 2022	Croácia	Robalo ( <i>Dicentrarchus labrax</i> ); Dourada ( <i>Sparus aurata</i> )	Peixe eviscerado; Peixe inteiro	BAL	BMP	Vácuo x EAM (70% N <sub>2</sub> , <1% O <sub>2</sub> , 30% CO <sub>2</sub> ); Vácuo a 6 ± 2 °C e <i>L. sakei</i> x dextrose (0.1%) x controle	(1) Enterobactérias; (2) <i>E. coli</i> ; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.; (4) <i>L. monocytogenes</i> ; (5) <i>Salmonella</i> spp.	CM	O melhor resultado em 14 dias a 6 ± 2 °C foi através da lavagem dos peixes em suspensão de <i>L. sakei</i> suplementada com dextrose (0,1%), seguida de embalagem a vácuo. Este tratamento reduziu o crescimento de microrganismos deteriorantes.
Marino <i>et al.</i> , 2024	Itália	Caboz transparente ( <i>Aphia minuta</i> )	Peixe inteiro	Óleos essenciais (timol, limão e extrato cítrico)	AAN	Óleo Essencial (Extrato Cítrico, Timol, limão Controle) × Embalagem (Nylon, PLA, Amido de Milho) × Atmosfera (Ar, vácuo, EAM) (EAM: 65% N <sub>2</sub> , 30% CO <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) <i>Staphylococcus</i> spp.; (3) Psicotróficos; (4) Enterobactérias	CM	O melhor tratamento, que consistiu na combinação da embalagem a vácuo com a imersão das amostras numa solução de extrato de citrinos a 100 mg/L, exerceu um efeito biocida nos microrganismos psicotróficos, reduzindo a sua contagem para níveis abaixo do limite de detecção após 7 dias.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tecnologia Associada	Tipo	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão
Lázaro <i>et al.</i> , 2020	Brasil	Tilápia ( <i>Oreochromis niloticus</i> )	Filé	Irradiação UV-C	TF	Embalagem (AR, Vácuo, EAM 50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> ) x UV-C x Inoculação (sem inoculação, <i>Salmonella</i> Typhimurium, <i>E. coli</i> O157:H7) x Controles (AR, Vácuo, EAM, UV, EAM/UV)	(1) <i>Salmonella typhimurium</i> (Inoculada); (2) <i>E. coli</i> O157:H (Inoculada); (3) Mesófilos; (4) Psicrotróficos; (5) Enterobactérias	CM	O tratamento com irradiação UV-C (0.30 J/cm <sup>2</sup> ) foi o mais eficaz na redução inicial de <i>S. typhimurium</i> e <i>E. coli</i> O157:H7 inoculadas, com diminuição de 1.13 log UFC/g e 0.70 log UFC/g, respectivamente. Para a extensão do prazo de validade, o tratamento combinado de EAM e UV-C demonstrou ser o mais promissor, prolongando o prazo de validade em pelo menos cinco dias.

Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: AAN – Aditivos Antimicrobianos Naturais; AEW – Acidic Electrolyzed Water (Água Eletrolisada Ácida); AM – Atmosfera Modificada; BAL – Bactérias Ácido-Láticas; BMP – Bioconservação por Microrganismos Protetores; CM – Cultura Microbiológica; CO – Monóxido de Carbono; CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono; EAM – Embalagem em Atmosfera Modificada; O<sub>2</sub> – Oxigênio; PLA – Polylactic Acid (Ácido Polilático); TF – Tecnologias Físicas; TQ – Tecnologias Químicas; UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama; UV – Ultravioleta; UV-C – Radiação Ultravioleta tipo C; WAEW – Weakly Acidic Electrolyzed Water (Água Eletrolisada Fracamente Ácida).

Quadro 6 – Estudos com embalagem combinada (vácuo e atmosfera modificada) sem tecnologia associada.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão do experimento
Milijašević <i>et al.</i> , 2015	Sérvia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> ); Carpa ( <i>Cyprinus carpio</i> )	Pedaços ( <i>steaks</i> )	EAM1 (60% CO <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> ) x EAM2(40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> ) x Vácuo	(1) Enterobactérias	CM	A EAM com maior concentração de CO <sub>2</sub> (60%) inibiu significativamente o crescimento de Enterobactérias em comparação com vácuo ou menor concentração de CO <sub>2</sub> (40%). A contagem inicial de Enterobactérias no dia 0 foi de aproximadamente 2 log UFC/g, aumentando para cerca de 3 log UFC/g após 14 dias em EAM1.
Kramarenko <i>et al.</i> , 2016	Estônia	NE	Produtos de peixe RTE, defumados a frio, defumados a quente, salgados	Avaliação de produtos prontos para consumo	(1) <i>L. monocytogenes</i>	CM; BIO	Prevalência de <i>L. monocytogenes</i> foi maior em produtos de peixe (16.8%) vs. carne (5.9%) Dentro os produtos de peixes, a categoria com a maior contaminação foi a de peixes levemente salgados, com 32% de prevalência. A maioria das amostras de peixe continha níveis baixos de <i>L. monocytogenes</i> .
Silbande <i>et al.</i> , 2016	França	Atum Albacora ( <i>Thunnus albacares</i> )	Pedaços ( <i>steaks</i> )	Atmosfera (ar, vácuo, EAM 70% CO <sub>2</sub> , 30% O <sub>2</sub> ) x Temperatura (0 °C, 4 °C → 8 °C)	(1) Mesófilos; (2) Psicotróficos; (3) <i>Pseudomonas</i> spp.; (4) Enterobactérias	CM; PCR (16S)	Nenhum dos métodos de embalagem testados prolongaram significativamente o prazo de validade do atum em comparação com o armazenamento em ar a 0 °C, com todos os lotes a serem considerados inaceitáveis após 13 dias.
Đorđević <i>et al.</i> , 2017	Bósnia e Herzegovina	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Filé defumado	Vácuo x EAM1 (50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> ) x EAM2 (90% CO <sub>2</sub> , 10% N <sub>2</sub> )	(1) Enterobactérias	CM	EAM com 90% CO <sub>2</sub> (EAM2) foi mais eficaz na inibição de Enterobactérias (crescimento 2.72 log vs. 5.36 no vácuo), e promoveu maior crescimento de BAL. Vácuo mostrou o pior desempenho microbiológico.
Silbande <i>et al.</i> , 2018	França	Tambor vermelho ( <i>Sciaenops ocellatus</i> )	Filé; Peixe eviscerado	Peixe eviscerado resfriado com gelo x filés a vácuo x filés EAM (50% CO <sub>2</sub> , 50% N <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) psicotróficos; (3) Enterobactérias; (4) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	A embalagem a vácuo e EAM estenderam o prazo de validade dos filés em comparação com o peixe eviscerado gelado, com poucas diferenças gerais entre os dois métodos de embalagem.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão do experimento
Esteves <i>et al.</i> , 2021	Portugal	Peixe-gatilho cinzento ( <i>Balistes caprisucus</i> )	Filé	Ar x Vácuo x EAM (30% N <sub>2</sub> , 40% CO <sub>2</sub> , 30% O <sub>2</sub> )	(1) Mesófilos; (2) Psicrotróficos	CM	A embalagem a vácuo foi o tratamento mais eficaz para manter a qualidade do filé de peixe-gatilho-cinzento durante o armazenamento refrigerado. As bactérias psicrotróficas permaneceram abaixo do limite estabelecido no tratamento com embalagem a vácuo ao longo dos 15 dias de armazenamento.
Popelka <i>et al.</i> , 2021	NE	Cavala ( <i>Scomber scombrus</i> )	Peixe eviscerado	Armazenamento em caixas (Controle) x vácuo x EAM (40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> )	(1) Psicrotróficos; (2) Enterobactérias	CM	O estudo indica que os melhores tratamentos para preservar a qualidade microbiológica durante o armazenamento refrigerado foram a embalagem a vácuo e, especialmente, a EAM. EAM também foi superior na preservação de lipídios e ácidos graxos.
Wiernasz <i>et al.</i> , 2021	Noruega	Salmão ( <i>Salmo salar</i> )	Filé <i>gravlax</i> fatiado; Filé defumado fatiado; Filé defumado em cubos	Salmão gravlax a vácuo x Salmão defumado a vácuo x Salmão defumado em EAM (40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> )	(1) Enterobactérias; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	O melhor tratamento em termos de menor deterioração sensorial foi a EAM do salmão defumado frio. As contagens de enterobactérias inicialmente presentes não apresentaram crescimento significativo ao longo dos 35 dias de armazenamento.
Hoel <i>et al.</i> , 2022	Noruega	Bacalhau do Atlântico ( <i>Gadus morhua</i> )	Filé	Inoculação de <i>Aeromonas salmonicida</i> (presente, ausente) x Atmosfera de embalagem (67%CO <sub>2</sub> , 33%O <sub>2</sub> , 67%CO <sub>2</sub> /33%N <sub>2</sub> , Vácuo)	(1) Psicrotróficos	CM	A EAM com CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> (67/33%) demonstrou ser o tratamento mais eficaz para inibir o crescimento da microbiota geral, evidenciado pela contagem total de psicrotróficos aeróbios que, nas amostras não inoculadas, apresentou um aumento de aproximadamente 5 logs enquanto no grupo CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , apesar de um aumento inicial, manteve-se significativamente menor em comparação com os outros tratamentos até o dia 10, não excedendo o limite de 7 log UFC/g durante os 13 dias de armazenamento.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão do experimento
Tsoukalas <i>et al.</i> , 2022	Noruega	Solha europeia ( <i>Pleuronectes platessa</i> )	Peixe eviscerado; Filé	Filés em EAM ou vácuo, armazenados a 4°C, em diferentes épocas do ano e peixe inteiro no gelo (0°C) como controle (EAM: 70% CO <sub>2</sub> , 20% N <sub>2</sub> , 10% O <sub>2</sub> )	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.; (2) Enterobactérias; (2) <i>L. monocytogenes</i> ; (3) Psicotróficos	CM	O tratamento mais eficaz foi a EAM. Sobre as contagens bacterianas neste tratamento, psicotróficos iniciaram com contagens baixas (estimadas em torno de 2 log UFC/g) e aumentaram para um valor máximo de 8.24 ± 0.12 log UFC/g no grupo de Setembro e 7.55 ± 0.03 log UFC/g no grupo de Abril ao longo do período de armazenamento de 20 dias. Para as <i>Pseudomonas</i> spp., as contagens nos grupos EAM foram as mais baixas em comparação com outros tratamentos. Assim, a EAM demonstrou ser eficaz na limitação do crescimento microbiológico em comparação com a embalagem a vácuo
Milijasevic <i>et al.</i> , 2023	Sérvia	Truta arco-íris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Peixe eviscerado	Vácuo x EAM1 (40% CO <sub>2</sub> , 60% N <sub>2</sub> ) x EAM2 (60% CO <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> ) x EAM3 (90% CO <sub>2</sub> , 10% N <sub>2</sub> )	(1) Psicotróficos; (2) Enterobactérias	CM	EAM3 demonstrou ser a condição que proporcionou os resultados microbianos mais desejáveis. A contagem de bactérias psicotróficas no grupo EAM3 variou de 2,68 ± 0,20 log UFC/g no dia 1 para 6,50 ± 0,26 log UFC/g no dia 16. Já a contagem de Enterobactérias no mesmo grupo variou de 1,86 ± 0,27 log cfu/g no dia 1 para 4,25 ± 0,28 log cfu/g no dia 16.
Bartáková <i>et al.</i> , 2023	República Tcheca	Carpa ( <i>Cyprinus carpio</i> ); Salmão ( <i>Salmo salar</i> ); Bacalhau do Atlântico ( <i>Gadus morhua</i> )	Filé	Exposição a temperaturas elevadas (0, 3, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 25 °C) por 1, 2, 3 e 4 horas, seguido de retorno a temperatura de resfriamento (1 ou 3 °C) (EAM: 30% CO <sub>2</sub> /70% N <sub>2</sub> )	(1) Psicotróficos; (2) <i>Salmonella</i> spp.	CM	A interrupção da cadeia de frio aumenta o crescimento microbiano, especialmente em embalagens simples. EAM e vácuo inibiram o crescimento bacteriano, exceto em salmão. Após a exposição a variações de temperatura, as contagens em amostras EAM apresentaram uma variação que se manteve, em muitos casos, dentro dos limites aceitáveis, principalmente em condições de menor intensidade de interrupção da cadeia de frio. Embora as faixas de variação após a exposição tenham sido amplas, a EAM geralmente apresentou menos violações dos limites de psicotróficos.

Autor	Local	Espécie	Forma	Tratamentos	Microrganismos	Método	Conclusão do experimento
Yan <i>et al.</i> , 2023	China	Corvina amarela ( <i>Larimichthys crocea</i> )	Filé	Ar x Vácuo x EAM1 (60%CO <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> ) x EAM2 (70% CO <sub>2</sub> , 30% N <sub>2</sub> ) x EAM3 (80% CO <sub>2</sub> /20% N <sub>2</sub> ).	(1) <i>Pseudomonas</i> spp.	PCR (16S); MAC	A EAM com alta concentração de dióxido de carbono demonstrou ser o tratamento mais eficaz para prolongar a vida de prateleira. A análise de diversidade microbiana revelou que no grupo embalado em ar, <i>Pseudomonas</i> spp. era um dos principais microrganismos de deterioração. No entanto, nos grupos submetidos à EAM com alta concentração de CO <sub>2</sub> , a abundância relativa de <i>Pseudomonas</i> spp. foi visivelmente reduzida, tornando-se um componente minoritário da microbiota ao final do período de armazenamento (dia 21 para EAM3).
Chen <i>et al.</i> , 2024	China	Garoupa-gigante ( <i>Epinephelus lanceolatus</i> )	Filé	Embalagem a ar (AP) x Vácuo x EAM1 (40% CO <sub>2</sub> , 55% N <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> ) x EAM2 (60% CO <sub>2</sub> , 35% N <sub>2</sub> , 5% O <sub>2</sub> ) x Temperatura (constante de 4 °C e flutuante de 4–8 °C)	(1) Psicofílicas; (2) <i>Pseudomonas</i> spp.	CM; PCR (16S)	A investigação revelou que o tratamento mais promissor para preservar a qualidade da garoupa durante o armazenamento refrigerado foi a combinação da embalagem em atmosfera modificada EAM2 mantida a uma temperatura constante de 4 °C. Estes resultados sublinham a eficácia desta combinação específica de embalagem e temperatura na supressão do desenvolvimento destes grupos bacterianos deteriorantes.
Sequino <i>et al.</i> , 2024	Itália	Anchovas ( <i>Engraulis</i> spp.)	Peixe eviscerado	Armazenamento a 0°C, 4°C e 10°C por até 16 dias em diferentes atmosferas (Ar, EAM 60% CO <sub>2</sub> , 20% O <sub>2</sub> , Vácuo)	(1) <i>Pseudomonas deceptionensis</i>	MAT	A conclusão do estudo sugere que a EAM pode ser uma estratégia eficaz para retardar a produção de compostos associados ao odor de deterioração, como H <sub>2</sub> S e TMA. Em relação aos microrganismos <i>Pseudomonas</i> spp., o estudo identificou diferentes espécies como principais organismos de deterioração específicos dependendo da condição de embalagem.

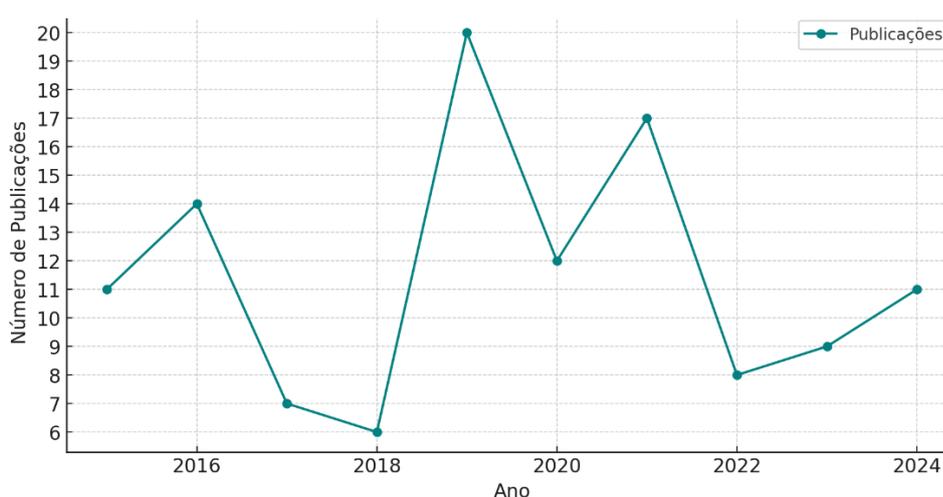
Fonte: Autoria própria (2025). Legenda: AM – Atmosfera Modificada; BAL – Bactérias Ácido-Láticas; BIO – Testes Bioquímicos; CM – Cultura Microbiológica; CO – Monóxido de Carbono; CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono; EAM – Embalagem em Atmosfera Modificada; MAC – Sequenciamento por Macrogenômica; MAT – Sequenciamento por metagenômica; NE – Não Especificado; O<sub>2</sub> – Oxigênio; PCR (16S) – Polymerase Chain Reaction (Reação em Cadeia da Polimerase) e sequenciamento do gene 16S rRNA; RTE – Ready-to-Eat (Pronto para Consumo); TMA – Trimethylamine (Trimetilamina); UFC/g – Unidades Formadoras de Colônias por grama.

A análise dos dados obtidos a partir dos 116 estudos selecionados nesta revisão sistemática permitiu identificar tendências relevantes quanto à eficácia dos diferentes tipos de embalagem e das tecnologias associadas na conservação microbiológica de peixes. Observou-se que a combinação de métodos, frequentemente referida como tecnologia de barreiras, tem sido amplamente utilizada como estratégia para inibir o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos, prolongando a vida útil dos produtos. Nesta seção, os resultados são discutidos à luz da literatura científica, considerando-se o tipo de embalagem adotado (vácuo, atmosfera modificada ou ambos), a presença ou não de tecnologias complementares, as espécies de pescado analisadas e os microrganismos investigados.

### 5.1 Ano e local da coleta

A análise temporal dos estudos incluídos nesta revisão sistemática revela uma tendência crescente de publicações entre os anos de 2015 e 2025, com um aumento expressivo a partir de 2018 e um pico registrado em 2019. Este padrão não é aleatório, mas sim reflexo de um cenário multifatorial composto por elementos sanitários, econômicos e mercadológicos que impactaram diretamente a indústria de alimentos, especialmente o setor de pescado, ao longo da última década. No entanto, esse ritmo ascendente foi temporariamente interrompido entre 2019 e 2022, como evidencia a Figura 2, período em que a pandemia de COVID-19 afetou substancialmente as atividades de pesquisa, os investimentos científicos e a condução de estudos laboratoriais em diversas partes do mundo.

Figura 2 – Número de publicações de acordo com o ano de publicação (2015–2024)



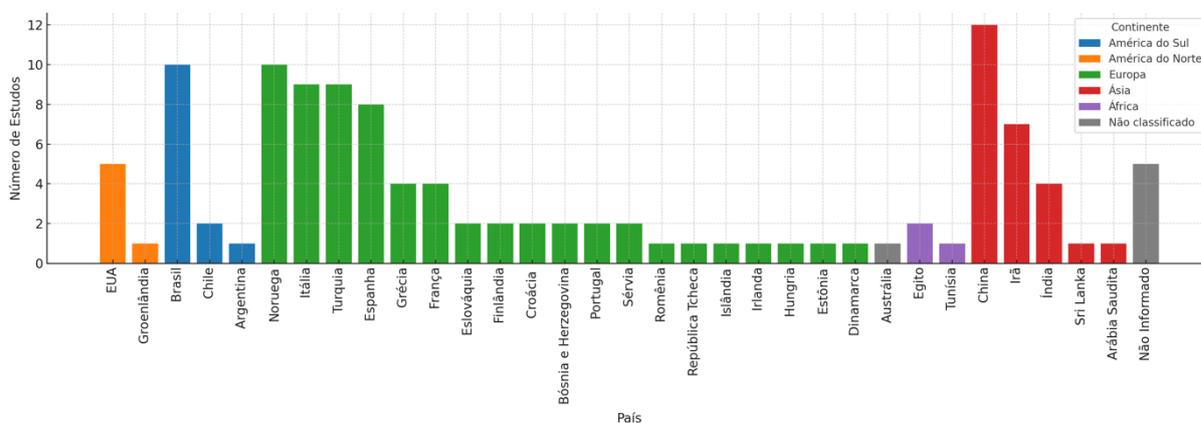
Fonte: Autoria própria com base nos dados da revisão sistemática, (2025).

Com a superação das restrições impostas pelo contexto pandêmico, observa-se a partir de 2023 uma retomada do número de publicações, indicando um renovado interesse da comunidade científica e do setor produtivo pelo tema da conservação de pescado e da utilização

da atmosfera modificada. Esse movimento reforça a relevância do tema frente às exigências crescentes de segurança de alimentos, inovação tecnológica e sustentabilidade que caracterizam o período recente.

Entre os fatores sanitários que podem justificar o aumento observado no número de publicações científicas, destacam-se o registro da ocorrência de surtos de DTHA no mundo, principalmente na UE, fazendo com que o tendo em vista que cerca de 54% do total dos trabalhos relacionados foram desenvolvidos com amostras de origem europeia (Figura 3).

Figura 3 – Número de estudos por país de acordo com a distribuição por continente.



Fonte: Autoria própria com base nos dados da revisão sistemática.

À primeira vista esta predominância de estudos em países europeus pode sugerir uma maior ocorrência de surtos alimentares nessa região. No entanto, essa concentração de publicações não necessariamente reflete uma maior incidência de casos, mas sim a presença de sistemas de vigilância epidemiológica mais robustos e integrados. Relatórios periódicos coordenados sob a abordagem One Health pela Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA), em parceria com o Centro Europeu de Prevenção e Controle de Doenças (ECDC), evidenciam a eficácia e o comprometimento desses países na detecção, monitoramento e divulgação de dados relacionados à segurança dos alimentos. Assim, a elevada produção científica pode estar mais relacionada à capacidade institucional de gerar e reportar dados do que a um risco sanitário efetivamente superior.

No que diz respeito aos dados obtidos pelos relatórios anuais da EFSA, estes tem indicado uma alta incidência de casos relacionados a microrganismos como *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. e *E. coli*, especialmente em produtos de origem animal refrigerados ou prontos para o consumo (EFSA, 2018). Em particular, *L. monocytogenes* tem se destacado por seu alto índice de hospitalização e letalidade, sendo frequentemente associada a produtos à base de peixe defumado ou embalado a vácuo (EFSA, 2018). Análise de séries temporais realizada pela UE

para o período de 2008–2015 na UE ainda indicou uma tendência crescente da taxa de incidência mensal notificada de listeriose invasiva humana confirmada nas faixas etárias acima de 75 anos e na faixa etária feminina entre 25 e 44 anos (EFSA, 2018). Esse cenário impulsionou uma atitude regulatória mais incisiva, que se manifestou, por exemplo, no reforço da legislação europeia referente a critérios microbiológicos para alimentos (Regulamento CE nº 2073/2005), por meio de diversas atualizações ao longo da última década, especialmente quanto à presença de *L. monocytogenes* em produtos prontos para o consumo.

Além disso, houve a publicação de diretrizes e relatórios técnicos pela EFSA e programas nacionais de monitoramento em diversos países da União Europeia, visando à redução da ocorrência de surtos e ao fortalecimento da rastreabilidade e controle sanitário ao longo da cadeia produtiva. Destaca-se, nesse contexto, o documento "*Listeria monocytogenes* contamination of ready-to-eat foods and the risk for human health in the EU" (EFSA, 2018), no qual a opinião científica da UE aponta que a utilização de EAM ou vácuo podem aumentar o risco de crescimento de *L. monocytogenes* em alimentos prontos para consumo.

Diante disso, diversos estudos revisados nesta dissertação investigaram a inoculação deliberada desse patógeno com o objetivo de avaliar a magnitude do risco microbiológico. Este tipo de abordagem consiste na adição proposital do microrganismo ao alimento ou substrato experimental, em concentrações conhecidas, sob condições controladas de temperatura, atmosfera e tempo. Tal metodologia permite simular cenários de contaminação e acompanhar, de forma precisa, o comportamento do patógeno em diferentes condições de armazenamento. Observa-se, ainda, que a utilização de tecnologias antimicrobianas em muitos destes casos foi associada à EAM ou vácuo, surgindo como uma alternativa viável para mitigar tal risco.

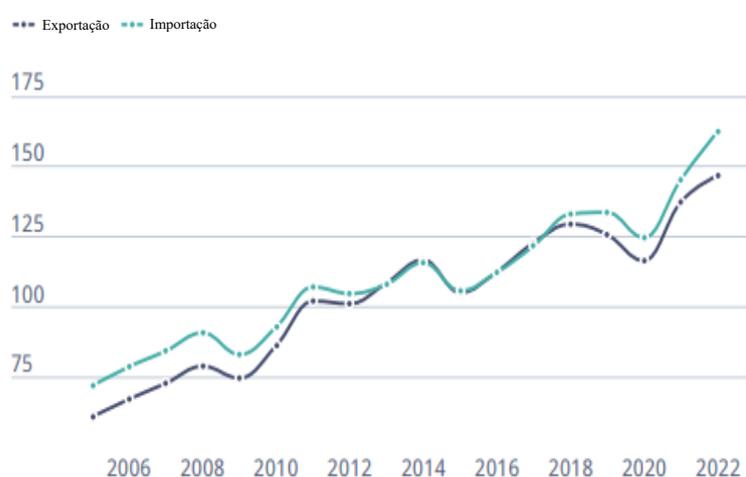
Como consequência desse endurecimento regulatório, foram promovidos incentivos à pesquisa científica, incluindo programas de fomento da União Europeia como o Horizon 2020, que financiou projetos voltados à segurança de alimentos e ao desenvolvimento de tecnologias de conservação. Esse programa esteve em vigor entre 2014 e 2020, coincidindo com o período de aumento das publicações sobre EAM observadas nesta revisão (Stelzl *et al.*, 2023).

Do ponto de vista econômico, o mercado global de pescado sofreu importantes transformações nos últimos anos. O crescente consumo de peixes e frutos do mar como fonte alternativa de proteína, associado à globalização da cadeia de distribuição e à necessidade de prolongar a vida útil dos produtos, intensificou a busca por soluções que garantissem a segurança e qualidade microbiológica dos alimentos.

Dados recentes também apontam um aumento expressivo nas transações monetárias globais relacionadas ao setor pesqueiro, refletindo a valorização econômica dessa cadeia.

Conforme indicado pelo relatório da FAO (2024), o comércio internacional de produtos pesqueiros apresentou crescimento consistente no período de 2005 a 2022, com as exportações ultrapassando a marca de 150 bilhões de dólares em 2022. Tanto exportações quanto importações cresceram substancialmente, especialmente após 2015, o que evidencia o fortalecimento do setor em escala global e justifica o aumento do interesse por estratégias de conservação como a EAM. Esse crescimento é especialmente notável no período de 2015 a 2022, o que se alinha com o aumento do número de publicações científicas relacionadas à conservação de peixes e ao uso de EAM como estratégia para prolongar a vida útil e garantir segurança de alimentos.

Figura 4 - Comércio internacional de produtos pesqueiros (2005–2022) em bilhões de dólares



Fonte: Adaptado de FAO (2024). FishStat: Global Aquatic Trade Statistics 1976–2022.

A EAM surge nesse contexto como uma ferramenta estratégica para atender tanto às exigências legais quanto às demandas dos consumidores por alimentos mais naturais, frescos e com menor uso de conservantes sintéticos (FAO, 2022). Além disso, incidentes que envolvam surtos de doenças transmitidas por alimentos (não apenas listeria) demonstram ter grande impacto na reputação das empresas. Por essas razões, é de interesse também do setor privado que os produtos fornecidos sejam seguros, de forma que diversos esforços são feitos por meio de pesquisas e procedimentos, como a Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle, para produzir alimentos seguros e reduzir riscos.

Ademais, o período analisado também coincidiu com o fortalecimento de políticas públicas europeias voltadas à redução do desperdício de alimentos, à valorização de cadeias curtas de produção e à promoção da bioeconomia, todas com impacto direto na forma como produtos de origem animal, como peixes, são processados e comercializados (European Commission, 2020). O aumento de publicações científicas entre 2018 e 2019 pode, portanto,

ser interpretado como uma resposta integrada às ameaças sanitárias e às oportunidades mercadológicas emergentes, consolidando a EAM e as tecnologias antimicrobianas como temas centrais nas discussões sobre a segurança de alimentos no século XXI.

## 5.2 Espécies e forma de apresentação

A análise dos estudos incluídos nesta revisão sistemática revelou que cinco espécies de peixes concentram a maior parte das pesquisas voltadas à aplicação da atmosfera modificada e do vácuo, associadas ou não a tecnologias de conservação. São elas: *Salmo salar* (salmão do Atlântico), avaliado em 27,59% dos estudos; *Oncorhynchus mykiss* (truta arco-íris), com 22,41%; *Dicentrarchus labrax* (robalo europeu), com 7,76%; *Sparus aurata* (dourada), com 6,03% e *Oreochromis niloticus* (tilápia-do-nilo) com 5,17%. Esse elevado percentual pode ser atribuído à importância econômica dessas espécies, aos elevados volumes de produção e à ampla aceitação nos mercados consumidores.

Salmão do atlântico destaca-se como a espécie mais estudada, reflexo direto de seu alto valor de mercado, ampla distribuição geográfica (impulsionada pela aquicultura) e elevada perecibilidade. Apenas a Noruega produziu cerca de um milhão de toneladas em 2024, com exportações que ultrapassaram US\$ 7,78 bilhões (FAO, 2025). O Reino Unido, com a Escócia na liderança, foi responsável por 73.580 toneladas no valor de US\$ 794 milhões nos primeiros nove meses de 2024 (FAO, 2025). A espécie é amplamente comercializada na forma de filés frescos ou defumados — apresentações que exigem tecnologias eficazes de conservação e garantias de segurança de alimentos.

A versão defumada, classificada como produto pronto para consumo, é ainda frequentemente associada à presença de *L. monocytogenes*, o que justifica seu uso recorrente em estudos de segurança microbiológica (Huang *et al.*, 2023). Além das preocupações microbiológicas, esses produtos exigem soluções tecnológicas que aumentem a vida de prateleira e ofereçam proteção contra a oxidação lipídica, especialmente devido ao alto teor de gordura do pescado — demandas que podem ser atendidas por meio da EAM.

No que diz respeito à truta arco-íris, esta é uma espécie de interesse consolidado na aquicultura, destacando-se por seu elevado volume de produção e ampla aceitação comercial (Sun *et al.*, 2023). Embora pertença à mesma família do salmão (Salmonidae), seu uso em estudos científicos se justifica pela própria relevância de mercado e representatividade na cadeia produtiva de peixes de água doce. Em 2023, a truta arco-íris foi a espécie mais valiosa cultivada na União Europeia, representando 17,7% de toda a produção aquícola, sendo produzida em

larga escala principalmente na França, Itália e Dinamarca (EUROSTAT, 2023). A principal forma de apresentação observada nos estudos foi a de filés.

A terceira espécie, robalo, é frequentemente analisado em estudos realizados em países mediterrâneos, como Grécia, Itália e Espanha. Trata-se de uma espécie extensivamente cultivada e comercializada tanto fresca quanto minimamente processada (EUROSTAT, 2023). Entre os estudos avaliados, foi uma das espécies que apresentou grande diversidade nas formas de apresentação — incluindo filé, lombo e peixe eviscerado. Essa variabilidade reflete sua versatilidade comercial e exige diferentes abordagens tecnológicas para garantir a qualidade e segurança microbiológica em distintas formas de corte (Eurostat, 2023).

A tilápia, por sua vez, é uma das espécies mais relevantes na aquicultura de países tropicais. Em 2024, a produção brasileira de tilápia alcançou 662.230 toneladas (PeixeBR, 2025). Contudo, a China continua como maior produtora global, com 1,75 milhão de toneladas em 2022, seguida por Indonésia, Egito, Bangladesh, Filipinas e Tailândia (Aqua, 2025). A espécie é valorizada por sua carne de sabor suave, adaptabilidade a diversos sistemas de cultivo e ampla aceitação no mercado consumidor. Nos estudos analisados, a tilápia foi apresentada principalmente em filés e pedaços.

Por fim, a dourada (*Sparus aurata*) representa uma importante fonte de proteína para países do sul da Europa. Com cerca de 62% da produção concentrada na Grécia (Eurostat, 2023), a dourada é amplamente comercializada como peixe inteiro ou eviscerado, principalmente em feiras e mercados locais (Rodríguez & Ramudo, 2015). Contudo, nos estudos, a forma mais recorrente foi o filé, analisado sob refrigeração e associado ao uso de tecnologias como EAM, vácuo e agentes antimicrobianos, visando preservar a qualidade microbiológica e sensorial por mais tempo.

A frequência dessas cinco espécies nos estudos selecionados demonstra não apenas seu peso econômico, mas também sua representatividade no consumo humano e a importância de desenvolver tecnologias conservantes adequadas. Além disso, os países de origem das amostras analisadas coincidem, em muitos casos, com os principais produtores dessas espécies, indicando o alinhamento entre interesses científicos, realidades produtivas e políticas públicas voltadas ao fortalecimento da cadeia do pescado.

Além das espécies citadas como de maior destaque, também foram identificadas pesquisas que abordaram espécies tipicamente asiáticas, como a carpa comum (*Cyprinus carpio*) e a corvina-amarela (*Larimichthys crocea*), com predominância de amostras oriundas da China. Essas espécies exercem papel relevante na aquicultura asiática, sendo

cultivadas em larga escala tanto para consumo interno quanto para exportação (Yue *et al.*, 2024).

A China, como maior produtora mundial aquícola, tem intensificado investimentos em tecnologias como atmosfera modificada, embalagens a vácuo e antimicrobianos naturais, visando aumentar a segurança e a qualidade dos produtos ofertados (Crona *et al.*, 2020; FAO, 2024). A inclusão dessas espécies reforça a diversidade geográfica e biológica da produção de pescado, além de evidenciar o avanço da Ásia em temas relacionados à qualidade microbiológica e conservação de pescado.

Em alguns estudos, ainda se observou que a espécie de peixe utilizada também apresenta características intrínsecas que impactam diretamente a composição da microbiota durante o armazenamento. Jääskeläinen *et al.* (2019) demonstraram que, sob embalagem a vácuo, o atum apresentou menor proliferação de bactérias psicrófilas e *Pseudomonas* spp. do que o salmão, sugerindo que características bioquímicas da espécie, como o perfil lipídico e proteico, e possivelmente a microbiota nativa influenciam o crescimento bacteriano sob tais condições. Em complemento, Kritikos *et al.* (2020) evidenciaram padrões distintos de desenvolvimento microbiano entre robalo e salmão, mesmo sob as mesmas condições de armazenamento em atmosfera modificada. No robalo, *Pseudomonas* spp. atingiu 6,7 log UFC/g, enquanto no salmão essa contagem foi de 4,9 log UFC/g; as enterobactérias também apresentaram diferenças marcantes. Esses achados indicam que a composição muscular, a atividade de enzimas endógenas, e a interação entre microbiota nativa e condições de conservação variam entre espécies, afetando diretamente a dinâmica do crescimento microbiano.

Do mesmo modo, a forma de apresentação do pescado pode exercer influência significativa sobre a carga microbiana, uma vez que o processamento, como fatiamento ou defumação, pode alterar as condições de exposição aos microrganismos e a distribuição de contaminantes na superfície e no interior do produto. Por exemplo, Aalto-Araneda *et al.* (2019) observaram que a contaminação por *L. monocytogenes* ocorreu exclusivamente em produtos fatiados, com prevalência mais elevada em produtos do tipo *gravlax* (11%) em comparação aos defumados (1,9%), sendo que nenhuma detecção foi feita em amostras inteiras não fatiadas. Essa diferença pode ser atribuída ao aumento da superfície exposta e à maior manipulação envolvida no preparo de produtos fatiados, fatores que potencializam a possibilidade de contaminação cruzada e o crescimento microbiano. Kataoka *et al.* (2016) também relataram um crescimento significativamente mais rápido de *S. aureus* na albacora em comparação ao bonito ( $P < 0,05$ ), atribuindo essa diferença às variações no pH e no teor de sal entre as diferentes formas de apresentação.

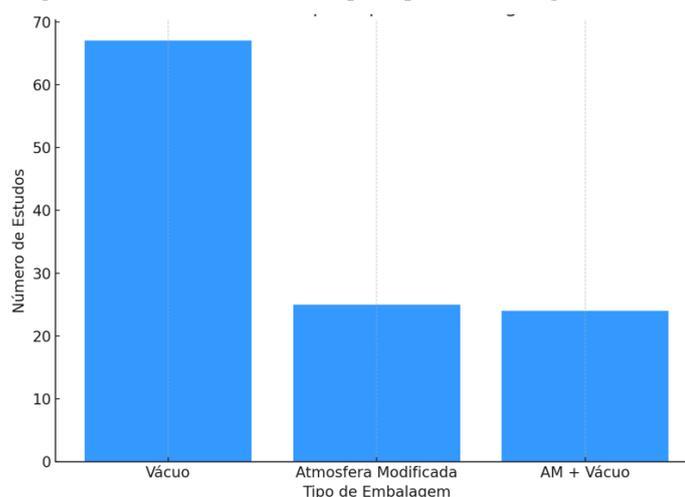
Diante disso, é importante observar que a espécie e a forma de apresentação comercial também podem influenciar diretamente a escolha das tecnologias de conservação, como no estudo de Nguyen *et al.*, 2022, que testou a tecnologia de membrana de polipropileno tratada com plasma e funcionalizada com *C. divergens* em fatias de salmão defumado. A inovação do trabalho reside na integração de uma tecnologia antimicrobiana a uma prática amplamente utilizada nesse tipo de produto: a interposição de filmes plásticos entre as fatias. Com isso, além de manter a funcionalidade prática do produto, a membrana tratada atua como uma barreira ativa contra o crescimento microbiano, representando uma estratégia eficaz de bioproteção em um formato que, por sua natureza e manipulação intensa, apresenta maior suscetibilidade à contaminação.

Dessa forma, a análise das espécies mais recorrentes em estudos com atmosfera modificada e vácuo revela uma relação direta entre sua importância econômica, volume de produção e desafios microbiológicos, especialmente considerando suas formas de apresentação comercial. Espécies como salmão, truta, robalo, dourada e tilápia são amplamente consumidas em formatos como filés e fatias, que, embora atendam à demanda por praticidade, apresentam maior suscetibilidade à contaminação. Sendo assim, tanto a espécie quanto a forma de apresentação podem influenciar significativamente o crescimento microbiano, devido a variações na composição bioquímica, microbiota nativa e grau de exposição. Assim, a adoção de tecnologias conservantes deve ser personalizada, como demonstrado nos estudos. O desenvolvimento de soluções eficazes requer, portanto, abordagens tecnológicas ajustadas às características específicas de cada produto, alinhadas aos hábitos de consumo, exigências de mercado e riscos sanitários de cada região.

### **5.3 Tipo de embalagem**

A análise da distribuição por tipo de embalagem evidencia uma clara predominância do uso de embalagem a vácuo nos estudos revisados (Figura 5). Essa prevalência pode estar relacionada à simplicidade operacional e à ampla acessibilidade da tecnologia de vácuo, que não exige equipamentos de alta complexidade nem gases específicos. O vácuo representa uma alternativa viável e econômica, sobretudo para pesquisas realizadas em países com menor investimento em tecnologias conservantes de alto custo.

Figura 5 – Número de estudos por tipo de embalagem utilizada



Fonte: Autoria própria com base nos dados da revisão sistemática (2025).

Outra justificativa plausível para a preferência pelo vácuo é a sua compatibilidade com diferentes formatos de apresentação dos peixes, como filés, lombos ou cortes inteiros, além da maior facilidade de padronização entre tratamentos. Em contrapartida, a atmosfera modificada, embora mais sofisticada e personalizável, exige a formulação e controle preciso da composição gasosa, o que aumenta a complexidade e o custo operacional, além da especificidade da composição de gases que cada espécie exige, levando em consideração teor lipídico, cor e microbiota nativa.

Dentre os estudos que compararam a utilização de atmosfera modificada e vácuo, 5 deles (20,8%) demonstraram performance superior da embalagem a vácuo em termos de controle microbiológico quando comparado à EAM. Por exemplo, no estudo de Iacumin *et al.* (2022), que avaliou diferentes estratégias de conservação em robalo (*Dicentrarchus labrax*) e dourada (*Sparus aurata*), o armazenamento sob vácuo apresentou resultados superiores em comparação à atmosfera modificada. Marino *et al.* (2024) e Esteves *et al.* (2021) também definiram como melhor tratamento aquele que utilizou a embalagem a vácuo. Esses efeitos podem ser atribuídos à redução drástica da disponibilidade de oxigênio, que limita o crescimento de microrganismos aeróbios estritos e facultativos predominantes na deterioração de peixes frescos, além de interações resultantes das tecnologias associadas.

Contudo, apesar da embalagem a vácuo ser a mais utilizada entre os estudos revisados, observa-se que, nos artigos que realizaram comparações diretas entre vácuo e atmosfera modificada, a EAM foi apontada como o melhor tratamento na maioria dos casos, representando 66,7% dos casos, principalmente quando associada a alguma tecnologia, representado, nesse grupo, 73,3%. Essa tendência reforça a hipótese de que o uso predominante

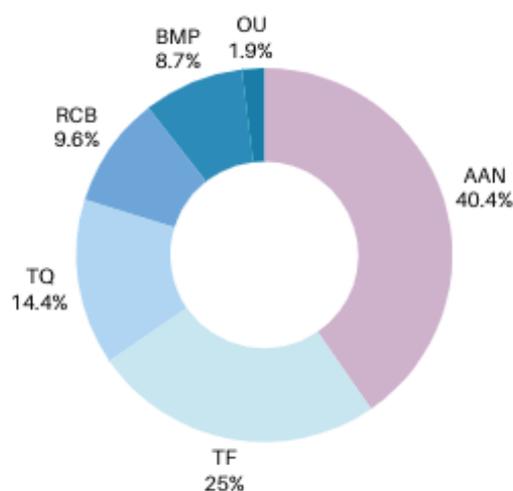
do vácuo pode estar relacionado mais a fatores econômicos e de logística do que necessariamente à sua superioridade técnica. A atmosfera modificada, embora mais cara e tecnicamente exigente, frequentemente demonstrou melhores resultados em termos de controle microbiológico e extensão da vida útil do pescado.

Dessa forma, observa-se que a escolha do tipo de embalagem nos estudos analisados pode envolver uma interação complexa entre viabilidade técnica, disponibilidade de recursos e objetivos específicos de cada pesquisa. Enquanto o vácuo se mostra uma opção acessível e eficiente em determinados contextos, a atmosfera modificada desponta como a alternativa mais robusta em termos de desempenho conservante. Assim, futuras investigações devem buscar estratégias que conciliem custo e eficácia, especialmente considerando as diferentes realidades produtivas e as exigências de qualidade e segurança de alimentos dos mercados consumidores.

#### 5.4 Tecnologias associadas à conservação de pescado

A análise dos estudos incluídos nesta revisão revelou uma ampla variedade de tecnologias associadas às embalagens aplicadas na conservação de pescado, com destaque para aditivos antimicrobianos naturais, tecnologias físicas emergentes, tecnologias químicas e o uso de revestimentos comestíveis bioativos. A distribuição da utilização das diferentes classes de tecnologias associadas à conservação de peixes entre os artigos analisados nesta revisão está disposta na figura 6.

Figura 6 - Distribuição dos tipos de tecnologias associadas à conservação de peixes.



Fonte: Autoria própria (2025).

Legenda: AAN: Aditivos Antimicrobianos Naturais; TF: Tecnologias Físicas; TQ: Tecnologias químicas; RCB: Revestimentos Comestíveis Bioativos; BMP: Bioconservação por Microrganismos Protetores; OU: Outros.

Essas abordagens visam, principalmente, prolongar a vida útil, preservar as características sensoriais e garantir a segurança microbiológica dos produtos. Dos estudos avaliados, aproximadamente 70% utilizaram alguma tecnologia associada, reforçando a importância dessas estratégias na melhoria dos sistemas de conservação. Esse número também ilustra a crescente aplicação do conceito de tecnologia de barreiras, no qual diferentes métodos de preservação são combinados de forma sinérgica para inibir o crescimento microbiano, retardar reações de deterioração e prolongar a vida útil dos alimentos.

#### 5.4.1 Aditivos antimicrobianos naturais

Esta foi a categoria mais representativa em número de estudos e variedade de compostos. A nisina foi utilizada em estudos distintos em associação a embalagem a vácuo ou EAM, principalmente em espécies como truta e salmão. Outros compostos amplamente empregados incluem óleos essenciais (como tomilho e orégano), extratos fenólicos e isotiocianatos, sendo aplicados tanto diretamente nos filés quanto em filmes ativados. A escolha desses compostos reflete uma tendência crescente da indústria por alternativas naturais, com apelo ao consumidor e boa estabilidade em sistemas refrigerados.

Yıldız (2015) demonstrou que a combinação de óleo de cravo e atmosfera modificada foi mais eficaz na redução das contagens de bactérias mesófilas e psicrotóficas em comparação aos tratamentos controle ou com utilização de óleo essencial de tomilho. De forma semelhante, Saraiva *et al.* (2017) observaram efeitos positivos no controle de psicrotóxicos, *Enterobacteriaceae* e *Pseudomonas* spp. em filés de salmão tratados com suco de limão.

Além disso, Dimitrijević *et al.* (2019) relataram que a aplicação de eugenol em embalagem de vácuo levou a uma redução significativa da bactéria inoculada *L. monocytogenes*, com diminuição de 2,84 log UFC/g, variando de 4,69 log UFC/g no dia 0 para 1,85 log UFC/g no dia 20. Essa categoria também foi utilizada em associação com outras tecnologias, como demonstrado por Lebow *et al.* (2017), que combinaram nisina com processamento de alta pressão. O tratamento resultou em uma redução de *L. innocua* de  $3,99 \pm 0,34$  log UFC/g imediatamente após o processamento, sem crescimento detectável durante 36 dias de armazenamento a 4 °C.

Também se destacam estudos como o de Cuadrado *et al.* (2016) que associaram aditivos antimicrobianos naturais a tecnologias químicas. Nesse caso, o melhor tratamento identificado foi a ativação superficial de filmes de LDPE contendo óxido de zinco com 1,5% de tirosol e 0,5% de ácido p-hidroxibenzoico. Essa combinação demonstrou elevada eficácia na redução e inativação de *L. monocytogenes* e *S. enterica* em salmão e atum, levando a contagens abaixo

do nível de detecção para ambos os patógenos no salmão após 7 dias de refrigeração, e a reduções significativas no atum (1,7 ciclos logarítmicos para *L. monocytogenes* e 1,2–1,3 ciclos logarítmicos para *S. enterica*).

#### 5.4.2 Revestimentos comestíveis bioativos

Compostos à base de quitosana foram aplicados em estudos, comumente associados a truta arco-íris em filé ou peixe eviscerado. Esses revestimentos frequentemente incorporam óleos essenciais ou bacteriocinas como a nisina, promovendo uma ação conservante adicional. Observou-se que a combinação de revestimento com as embalagens a vácuo ou EAM resultou em melhorias na inibição do crescimento microbiano tanto em amostras embaladas a vácuo ou em EAM.

Reforça-se ainda que os revestimentos bioativos são comumente utilizados em associação com aditivos antimicrobianos naturais, potencializando sua ação conservante. Exemplo disso é o estudo de Rezaeifar *et al.* (2020), que aplicaram um revestimento de quitosana enriquecido com extrato de verbena de limão (LVE) e óleo essencial (LVEO). Esse tratamento combinado apresentou o efeito supressor mais eficaz no controle da população microbiana na carne de peixe, confirmando a eficiência da sinergia entre barreiras naturais e bioativas.

Contudo, mais tecnologias podem ser associadas aos revestimentos, como foi o caso do estudo de Kizilkaya e Kaya (2023), que utilizaram uma combinação de quitosana (2%), nanopartículas de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$  a 1,5%) e ácido rosmarínico (5 ppm) aplicados em filés de truta arco-íris embalados em atmosfera modificada (40%  $\text{CO}_2$ /30%  $\text{O}_2$ /30%  $\text{N}_2$ ). O tratamento foi o mais eficaz na inibição do crescimento microbiano durante o armazenamento refrigerado. A contagem de bactérias aeróbias mesófilas totais evoluiu de 3,22 log UFC/g para 6,44 log UFC/g ao longo de 18 dias, enquanto a contagem de bactérias psicrotróficas aumentou de 3,39 log UFC/g para 6,44 log UFC/g no mesmo período, com desempenho superior ao dos tratamentos controle.

#### 5.4.3 Tecnologias físicas

Foram identificados estudos com aplicação de tecnologias físicas como radiação UV-C e processamento de alta pressão. Essas abordagens foram comuns em estudos realizados com espécies de maior valor agregado, como salmão, e demonstraram potencial significativo de inativação microbiana. A quantidade limitada de estudos com essas tecnologias pode estar

relacionada ao alto custo de equipamento e à necessidade de protocolos específicos de aplicação.

Essa categoria apresentou ótimos resultados microbiológicos em algumas aplicações. Monteiro *et al.* (2024) observaram que o tratamento com UVC-LED (1,46 mW/cm<sup>2</sup> por 2407,8 segundos = 3515,40 mJ/cm<sup>2</sup>) aumentou a vida útil dos filés de peixe em 1,4 vezes, mantendo cor e textura próximas ao produto fresco. No controle das bactérias aeróbias psicrotólicas, o estudo utilizou um modelo preditivo primário para estimar o tempo necessário para atingir o limite de 7 log UFC/g, parâmetro usado para definir o prazo de validade. O tratamento ideal com UVC-LED resultou em uma validade de  $4,72 \pm 1,00$  dias — um aumento de cerca de 40% em comparação com os filés não tratados, cuja validade foi de  $3,36 \pm 0,10$  dias. No entanto, observou-se elevação significativa da oxidação lipídica, com aumento de até 160% nas amostras tratadas, o que destaca a necessidade de ajustes ou combinações com antioxidantes.

Outro exemplo é o estudo de Rodrigues *et al* (2016), onde a combinação de atmosfera modificada (80% CO<sub>2</sub>) e radiação UV-C prolongou a vida útil da truta em pelo menos duas vezes. Os autores observaram um retardo no crescimento microbiano, evidenciado pela formação de fase lag prolongada e pela redução na produção de amins biogênicas. O tratamento EAM+UV-C apresentou contagens significativamente menores de microrganismos em comparação ao grupo controle (aeróbico e sem tratamento), com valores de 7,69 log UFC/g para psicrotólicas e 7,77 log UFC/g para mesófilos, enquanto o tratamento aeróbio apresentou 8,87 log UFC/g e 9,69 log UFC/g, respectivamente.

Além disso, também foram identificadas aplicações de tratamentos térmicos no contexto de tecnologias físicas, como o método sous vide. Ramos *et al.* (2016) demonstraram que o processamento sous vide reduziu significativamente a carga microbiana, atendendo aos padrões legais. O produto final foi considerado seguro, nutritivo e com boa qualidade físico-química e sensorial. Observou-se uma redução significativa ( $p < 0,05$ ) nas contagens de mesófilos, que passaram de  $6,6 \times 10^2$  UFC/g no filé fresco para  $3,8 \times 10^2$  UFC/g no produto tratado, e de psicrotólicas, que diminuíram de  $2,8 \times 10^2$  UFC/g para menos de 10 UFC/g, destacando o potencial dessa abordagem térmica controlada na conservação de pescado.

#### **5.4.4 Bioconservação por microrganismos protetores**

Alguns estudos também utilizaram cepas de bactérias lácticas com ação inibitória, como *Lactobacillus sakei*, aplicadas em espécies como robalo e salmão. Essas cepas demonstraram capacidade de limitar o crescimento de bactérias deteriorantes e patógenos quando combinadas com EAM ou vácuo. Essa tecnologia se destaca pela possibilidade de

aplicação em produtos minimamente processados e pela sinergia com sistemas de refrigeração e EAM.

Um exemplo relevante é o trabalho de Nguyen *et al.* (2022), que investigou a aplicação de uma membrana de polipropileno tratada com plasma e funcionalizada com *Carnobacterium divergens* em fatias defumadas de salmão embaladas a vácuo. O estudo demonstrou que essa abordagem foi altamente eficaz na inibição do crescimento de *L. monocytogenes* durante o armazenamento refrigerado. No grupo controle, as contagens de *L. monocytogenes* aumentaram significativamente para  $5,5 \times 10^5$  UFC/g de salmão após 28 dias a 8 °C. Em contraste, a utilização da membrana bio-protetora resultou em forte inibição, com contagens atingindo apenas  $2,4 \times 10^2$  UFC/g no mesmo período, evidenciando o potencial dessa técnica como barreira adicional no controle de patógenos em pescado defumados.

Em estudos com atmosfera modificada, como o de Costa *et al.* (2019), também se obtiveram bons resultados. Os autores observaram que o uso de uma cepa de *L. sakei* como cultura bioprotetora foi uma estratégia eficaz para controlar o crescimento de *L. monocytogenes* em filés de dourada refrigerados sob EAM. A maior eficácia foi observada quando a proporção de *L. sakei* para *L. monocytogenes* foi de 3:1, resultando na ausência de crescimento do patógeno durante o período de armazenamento.

Esse tipo de tecnologia parece ser especialmente empregado visando o controle de *L. monocytogenes*, uma vez que todos os estudos revisados com aplicação de microrganismos protetores avaliaram sua eficácia contra esse patógeno. Dentre esses estudos, apenas um deles não realizou a inoculação deliberada de *L. monocytogenes*, o que reforça a intencionalidade na investigação da eficácia dessa estratégia de biocontrole. Além disso, observa-se que as amostras utilizadas foram, em sua maioria, produtos defumados — o que se alinha com o fato de que esse tipo de produto apresenta um risco considerável para listeriose, como já discutido em tópicos anteriores.

Essa utilização de bactérias ácido-láticas como culturas bioprotetoras para o controle de *L. monocytogenes* é justificada por diversos mecanismos de ação sinérgicos. Segundo Yang *et al.* (2024), essas bactérias produzem compostos antimicrobianos como ácidos orgânicos e bacteriocinas que atuam diretamente na desestabilização da membrana celular de patógenos. Além disso, sua capacidade de ocupar nichos ecológicos dominantes no produto cárneo e competir por nutrientes contribui para a inibição do crescimento de microrganismos indesejáveis. Bactérias como *L. sakei* também apresentam rápida adaptação ao ambiente refrigerado e facultativamente anaeróbico de produtos de pescado embalados a vácuo ou em EAM, sendo eficazes mesmo em alimentos prontos para o consumo.

#### 5.4.5 Tecnologias químicas complementares

Embora menos recorrentes, estudos como os de Hier *et al.* (2021) e Guerra *et al.* (2017), aplicaram compostos como vinagre e ácido ascórbico. Essas tecnologias mostraram-se eficazes na inibição do crescimento bacteriano em curto prazo. No entanto, o uso de aditivos químicos é limitado por questões regulatórias e por menor aceitação entre consumidores que buscam alimentos livres de produtos químicos.

Apesar disso, existem compostos amplamente reconhecidos e aceitos pelo consumidor, uma vez que já fazem parte do cotidiano alimentar, e que apresentam bons resultados, como demonstrado no estudo de El Asuoty *et al.* (2024), que avaliou a aplicação de ácido acético. O tratamento com ácido acético a 1%, em combinação com embalagem a vácuo, foi o mais eficaz para estender a vida útil do pescado, reduzindo a contaminação microbiológica e mantendo melhores propriedades sensoriais. Em relação à contagem de bactérias psicotróficas, este grupo apresentou uma contagem inicial de  $1,01 \pm 0,01$  log UFC/g no dia 0 e, após 21 dias de armazenamento a  $2 \pm 1$  °C, a contagem foi de apenas  $1,05 \pm 0,01$  log UFC/g, evidenciando o efeito conservante da tecnologia química utilizada.

Além disso, Heir *et al.* (2021) observaram que a combinação do ácido acético na forma comercial de vinagre Verdad N6 (aplicado a 5% ou 10% por 5 segundos) com nisina (1 ppm) foi o tratamento mais eficaz para preservar a qualidade microbiológica de filé de salmão refrigerado. Essa combinação manteve os níveis de *L. monocytogenes* inalterados após 12 dias a 4 °C e reduziu significativamente a contagem de bactérias psicotróficas — média de 5,7, 4,2 e 4,5 log UFC/g no dia 12 para os grupos tratados, comparado a 7,5 log UFC/g no grupo controle. Adicionalmente, o Verdad N6 levou à redução dos níveis relativos de *Enterobacteriaceae*, reforçando o potencial dessa tecnologia na conservação do pescado.

Heir *et al.* (2019) também avaliaram o impacto de tecnologias químicas em associação com outros métodos, como UV-C, defumação e o uso de dextrose combinado ao vinagre. Nesse estudo, a combinação de 1% de Verdad N6 com tratamento por luz UV-C foi a mais eficaz para o controle de *L. monocytogenes* em salmão defumado a frio não fatiado. Esse tratamento proporcionou uma redução inicial de 0,8 log UFC/g de *L. monocytogenes*, seguida de inibição completa do crescimento do microrganismo durante 29 dias de armazenamento tanto a 4 °C quanto a 8 °C. Em contraste, no salmão controle não tratado, observou-se um aumento de 2,3 log UFC/g e 4,6 log UFC/g a 4 °C e 8 °C, respectivamente, durante o mesmo período.

Adicionalmente, estudos recentes também destacaram o uso da água eletrolisada como tecnologia química promissora. Palotás *et al.* (2020) demonstraram que a combinação de água

eletrolisada ligeiramente ácida (AEO) com lisozima prolongou a vida útil do pescado em mais de 5 dias, sem comprometer as propriedades sensoriais. Da mesma forma, Li *et al.* (2020) observaram que o uso de água eletrolisada fracamente ácida (WAEW), quando combinado com atmosfera modificada, inibiu significativamente o crescimento microbiano, prolongou a vida útil e manteve a qualidade do peixe. No grupo WAEW+EAM, a contagem de *Pseudomonas* spp. aumentou ao longo do armazenamento, mas manteve-se abaixo do limite de 7,0 log<sub>10</sub> UFC/g até o 18º dia.

Diante do exposto, observa-se que as tecnologias associadas aplicadas à conservação de pescado revelam grande potencial técnico, especialmente quando utilizadas de forma sinérgica conforme o conceito de tecnologia de barreiras. A integração de diferentes abordagens — como aditivos antimicrobianos naturais, revestimentos bioativos, microrganismos protetores, tecnologias físicas e químicas — tem mostrado eficácia microbiológica prolongando a vida útil dos produtos. Além disso, tecnologias emergentes, embora ainda em menor número, vêm se consolidando como promissoras alternativas para atender às exigências do consumidor moderno por alimentos seguros, de qualidade e com menor impacto ambiental.

## **5.5 Tratamentos realizados nos estudos**

A análise da coluna "tratamentos realizados" dos estudos incluídos nesta revisão permite uma compreensão aprofundada das estratégias experimentais aplicadas à conservação de pescado. A diversidade e estrutura dos tratamentos demonstram a busca por combinações tecnológicas eficazes, especialmente no contexto da segurança microbiológica e prolongamento da vida útil.

### **Estratégias comparativas adotadas**

Grande parte dos estudos estruturou seus tratamentos de forma a permitir comparações diretas entre diferentes tecnologias. Isso inclui o uso de grupos com aplicação de embalagem isolada (vácuo ou atmosfera modificada), como o de Parlapani *et al.* 2015, grupos tratados com a mesma embalagem associada a compostos antimicrobianos ou revestimentos, como proposto por Behnam *et al.* (2015); além de tratamentos controle sem qualquer intervenção, como observado no estudo de Maghami *et al.*, 2019.

Em alguns casos, as comparações envolveram diferentes concentrações de compostos bioativos, tempos de exposição ou tecnologias combinadas, como o de Heir *et al.*, 2021. Essa abordagem experimental oferece uma base sólida para avaliar sinergias entre tecnologias e isolar o efeito de cada variável, refletindo a aplicação prática do conceito de tecnologia de barreiras. Além disso, esses testes comparativos são fundamentais para identificar o tratamento

mais eficaz para cada espécie levando em consideração a forma de apresentação do pescado, considerando suas características microbiológicas, estruturais e sensoriais.

### **Presença de grupo controle**

A inclusão de grupos controle, especialmente aqueles mantidos sob condições ambientais similares, mas sem adição de conservantes ou tratamentos, foi observada na maioria dos estudos. Esses grupos possibilitam a comparação direta dos efeitos de cada intervenção tecnológica. Estudos com delineamento experimental bem estruturado incluem controles negativos (sem tratamento) e, em alguns casos, controles positivos (com utilização de EAM ou vácuo sem tratamento). A presença de controles padronizados é essencial para comparar a real eficácia das tecnologias testadas e para validar cientificamente os resultados. No entanto, alguns estudos não incluíram controles claros, como o de Wiernasz *et al*, (2021), o que limita a interpretação dos dados e deve ser considerado como uma limitação metodológica importante.

### **Inoculação deliberada de microrganismos**

Outro ponto relevante é a presença de tratamentos com inoculação deliberada de patógenos, especialmente *L. monocytogenes*, microrganismo de grande preocupação em produtos de pescado prontos para o consumo, como salmão defumado. Essa prática foi comum nos estudos que testaram antimicrobianos naturais, bacteriocinas e culturas bioprotetoras, como mencionado anteriormente, permitindo a avaliação direcionada da eficácia das tecnologias frente a patógenos-alvo.

O uso da inoculação padronizada possibilita também a reprodutibilidade dos experimentos e a comparação entre diferentes estudos da literatura. Essa escolha experimental reforça o foco na segurança de alimentos, especialmente em espécies como salmão, que são consumidas defumadas ou prontas para o consumo, aumentando o risco potencial de infecções por *L. monocytogenes*.

### **Condições de armazenamento**

A grande maioria dos tratamentos foi conduzida sob refrigeração, com temperaturas variando entre 2 °C e 6 °C, refletindo as condições reais de comercialização e armazenamento de peixes frescos. Alguns estudos também simularam desvios de temperatura (ex: 8 °C no estudo de Silbande *et al*, 2016), representando falhas na cadeia de frio, o que permitiu avaliar a robustez dos tratamentos frente a situações adversas.

A padronização da temperatura, associada ao acompanhamento de parâmetros microbiológicos, físico-químicos e sensoriais, permite avaliar com mais precisão a estabilidade dos produtos ao longo do tempo. Dessa forma, é possível discutir a relevância da estabilidade da cadeia de frio na eficácia dos tratamentos, considerando que pequenas variações podem

comprometer a eficácia de determinadas tecnologias, como observado por Saraiva *et al* (2016), onde a conclusão do estudo indica que o tratamento mais eficaz para inibir o crescimento dos microrganismos avaliados foi a EAM associado a suco de limão a 3°C.

A análise dos tratamentos realizados revela o amadurecimento das abordagens tecnológicas no setor de conservação de pescado. O uso de comparações estruturadas, controle microbiológico e inoculação padronizada reforça a validade dos resultados e a aplicabilidade dos achados. Em conjunto, esses elementos contribuem para o avanço de soluções eficazes, seguras e adaptadas às realidades comerciais e sanitárias do setor pesqueiro.

## 5.6 Microrganismos de interesse analisados

A presente revisão estabeleceu previamente um critério de inclusão claro quanto aos microrganismos microbiologicamente relevantes para o pescado. Dessa forma, foram considerados apenas estudos que investigassem ao menos um dos seguintes grupos: *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp., *E. coli*, *Staphylococcus* spp., bactérias psicrófilas, mesófilas, *Pseudomonas* spp. e *Enterobacteriaceae*. Essa seleção se baseou tanto na legislação vigente (Instrução Normativa N° 161/2022) quanto na relevância desses microrganismos como indicadores de qualidade, deterioração e risco sanitário, como abordado ao longo da revisão de literatura.

Entre os microrganismos avaliados, *L. monocytogenes* foi o patógeno mais investigado. Isso se justifica pelo seu risco a saúde pública e pela grande associação de surtos a produtos de pescado prontos para o consumo, como o salmão defumado, nos quais a refrigeração e a embalagem não são suficientes para garantir o controle do patógeno (Huang *et al.*, 2023). Outros microrganismos frequentemente abordados incluem *Pseudomonas* spp. e bactérias psicrófilas, que têm papel central na deterioração do pescado em condições refrigeradas e, portanto, influenciam diretamente na determinação da vida útil (Nie *et al.*, 2022).

A distribuição dos microrganismos entre os estudos também revela a diferença de foco entre os trabalhos: enquanto alguns avaliaram apenas um patógeno específico, outros investigaram várias classes microbianas simultaneamente. Estudos mais completos analisaram tanto a qualidade higiênico-sanitária quanto a estabilidade do produto, oferecendo uma visão integrada dos efeitos do tratamento sobre a microbiota.

Ainda que a seleção dos microrganismos tenha sido previamente definida nesta revisão, a escolha dos autores em quais deles focar pode refletir a preocupação com riscos específicos relacionados ao tipo de pescado, seu processamento e forma de consumo. Dessa forma, o levantamento também permite relacionar os microrganismos analisados com os tratamentos

escolhidos, como a frequente associação de tecnologias com a finalidade de controle de *Listeria* — incluindo antimicrobianos naturais, bacteriocinas, bioprotetores e embalagem ativa — e o uso de EAM para retardar o crescimento de *Pseudomonas* spp..

Além da escolha dos microrganismos, os estudos também variaram quanto aos métodos utilizados para sua detecção. A maioria utilizou métodos clássicos de microbiologia, como a contagem em placas com meios seletivos e diferenciais apropriados, seguindo protocolos padronizados por normas como ISO. Esses métodos foram empregados tanto para quantificação da microbiota natural quanto para detecção de patógenos específicos.

Em alguns casos, especialmente nos estudos com inoculação de *L. monocytogenes*, foram aplicadas técnicas de confirmação como testes bioquímicos ou PCR. A padronização desses métodos é essencial para garantir a comparabilidade entre os estudos e a confiabilidade dos dados obtidos, embora variações nos meios, tempos de incubação e critérios de interpretação possam introduzir heterogeneidade nos resultados.

Esse panorama evidencia que a seleção microbiana nos estudos está alinhada com os objetivos tecnológicos propostos e com a necessidade de garantir não apenas a segurança, mas também a qualidade sensorial e comercial dos produtos de pescado refrigerados.

## **5.7 Análise da conclusão dos experimentos**

A análise da coluna "Conclusão do experimento" dos estudos incluídos nesta revisão sistemática fornece uma visão geral das tendências mais relevantes observadas no desempenho das tecnologias testadas. Embora a variedade de tratamentos, espécies de peixes e condições experimentais seja ampla, um padrão se destaca: a maioria dos melhores resultados microbiológicos foi obtida com a utilização de tecnologias associadas. Dos 82 estudos com utilização de tecnologia associada, apenas 6 (7,3%) não viram diferença estatística entre os tratamentos ou não consideraram o tratamento com tecnologia associada o mais eficiente no controle microbiológico.

Sendo assim, dos estudos analisados, 92,7% apresentaram conclusões que atribuíram melhor desempenho ao uso de atmosfera modificada ou vácuo em associação com outras abordagens, como antimicrobianos naturais, bacteriocinas, culturas bioprotetoras, revestimentos comestíveis, radiação UV-C, plasma frio ou tecnologias químicas complementares.

Essa tendência confirma a efetividade do conceito de tecnologia de barreiras, em que o uso de duas ou mais estratégias com mecanismos distintos é capaz de ampliar o espectro de ação, aumentar a durabilidade do alimento e reduzir o risco microbiológico. Além disso,

reforça-se que a aplicação dessas tecnologias deve considerar a espécie de peixe, a forma de apresentação do produto (filé, inteiro, eviscerado), as condições de armazenamento e os microrganismos-alvo.

Sendo assim, o uso combinado de tecnologias se mostra como uma alternativa mais robusta para a conservação de pescado, representando uma estratégia promissora tanto para a indústria quanto para a segurança de alimentos do consumidor.

## **6 CONCLUSÃO**

Com base nos estudos incluídos nesta revisão sistemática, é possível afirmar que a embalagem em atmosfera modificada exerce influência significativa sobre a segurança microbiológica e a qualidade de peixes, sendo que a modificação da composição gasosa, especialmente o aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pode contribuir para a inibição do crescimento de microrganismos deteriorantes e patógenos. No entanto, os resultados variam conforme a espécie de peixe, a proporção dos gases utilizados e a forma de apresentação do produto.

Assim, os resultados desta revisão demonstram que a combinação de atmosfera modificada ou vácuo com tecnologias antimicrobianas representa uma abordagem eficaz e adaptável para a preservação de pescado. Essa estratégia contribui significativamente para o aumento da vida útil, o controle da deterioração e a redução de riscos microbiológicos, especialmente em produtos prontos para o consumo. A variedade de tecnologias testadas e a diversidade de espécies avaliadas reforçam a viabilidade da aplicação dessas soluções em diferentes contextos da cadeia produtiva pesqueira, alinhando segurança, qualidade e sustentabilidade.

## **7 PERSPECTIVAS**

A crescente demanda por produtos de pescado seguros e com maior vida útil tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias inovadoras de conservação, nas quais as EAM e a vácuo se destacam como ferramentas centrais. Os dados analisados ao longo desta revisão sistemática evidenciam que, isoladamente, essas tecnologias já proporcionam melhorias significativas na qualidade microbiológica dos produtos, mas é a associação com tecnologias complementares que demonstra maior eficácia no controle de microrganismos deteriorantes e patogênicos.

A análise dos 116 estudos revelou, ainda, que existe uma tendência crescente na literatura científica pelo uso de metodologias combinadas com a aplicação de ferramentas

moleculares, como a identificação por PCR e sequenciamento do gene 16S rRNA, o que reforça a busca por maior precisão na avaliação da microbiota e na rastreabilidade de contaminações. Esse avanço metodológico deve ser incentivado, especialmente no contexto da vigilância sanitária e da indústria, que ainda dependem amplamente de métodos tradicionais.

Em síntese, os resultados desta revisão apontam para um cenário promissor, no qual a combinação racional de embalagens e tecnologias antimicrobianas pode se consolidar como estratégia eficaz para garantir a segurança microbiológica e a sustentabilidade dos produtos de pesca. A continuidade dos avanços depende, no entanto, da integração entre pesquisa científica, inovação industrial, legislação sanitária e educação do consumidor — pilares fundamentais para o fortalecimento de cadeias produtivas mais seguras, eficientes e resilientes.

## 8 LIMITAÇÕES

Apesar da contribuição relevante desta revisão para o entendimento sobre o uso de atmosfera modificada e vácuo associados a tecnologias complementares na conservação de pescado, algumas limitações devem ser reconhecidas.

Uma das principais limitações refere-se à heterogeneidade entre os estudos incluídos, tanto em relação às espécies de peixe analisadas quanto às condições de armazenamento, formas de apresentação do produto e métodos microbiológicos utilizados. Essa variabilidade dificultou a comparação quantitativa entre os estudos. Além disso, os protocolos de tratamento diferiram significativamente entre os artigos, com variações nas concentrações de gases, nos tempos de exposição, nas tecnologias associadas e na forma de aplicação.

Além disso, nota-se uma concentração geográfica das pesquisas em determinados países, indicando a necessidade de maior representatividade de regiões com alta produção pesqueira, incluindo o Brasil.

Também se observa que, embora diversas tecnologias tenham sido avaliadas, algumas delas foram testadas em apenas um ou dois estudos, o que limita a generalização de seus resultados. Tecnologias emergentes ainda carecem de mais evidências para que suas eficácias possam ser comparadas de forma ampla.

Por fim, vale ressaltar que esta revisão teve como foco exclusivo a segurança microbiológica e a estabilidade de produtos de pescado, não incluindo outros aspectos importantes como avaliação sensorial, impacto econômico, sustentabilidade ambiental das tecnologias ou aceitação pelo consumidor final. Esses pontos representam oportunidades para futuras revisões.

Reconhecer essas limitações é essencial para interpretar os resultados com o devido senso crítico e para guiar novas investigações científicas que possam consolidar as evidências atualmente disponíveis.

## 9 REFERÊNCIAS

AALTO-ARANEDA Mariella; KORKEALA, Hannu; LUNDÉN, Janne. Strengthening the efficacy of official food control improves *Listeria monocytogenes* prevention in fish-processing plants. **Scientific Reports**, 2018.

AALTO-ARANEDA, Mariella *et al.* Processing plant and machinery sanitation and hygiene practices associate with *Listeria monocytogenes* occurrence in ready-to-eat fish products. **Food microbiology**, v. 82, p. 455-464, 2019.

ABEL, Nanna *et al.* Physiochemical and microbiological quality of lightly processed salmon (*Salmo salar L.*) stored under modified atmosphere. **Journal of Food Science**, v. 84, n. 12, p. 3364-3372, 2019.

AGANOVIC Kemal *et al.* Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 4, p. 3225-3266, 2021.

AHMAD-MANSOUR N. *et al.* *Staphylococcus aureus* Toxins: An Update on Their Pathogenic Properties and Potential Treatments. **Toxins**, v. 13, n. 10, p. 677, 2021.

AHMED, El-Sohaimy Sobhy *et al.* Extend Shelf-life of Vacuum-Packaged Herring Fish Fillets using Garlic and Ginger Extracts. **Journal of Pure & Applied Microbiology**, v. 13, n. 3, 2019.

AKSOY, Aksem; SEZER, Çiğdem. Combined use of laurel essential oil and vacuum packing to extend the shelf-life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. **Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi**, v. 25, n. 6, 2019.

ALBERGHINI, Giulia *et al.* A challenge test on *Pseudomonas* spp. as spoiling microorganism in fish fillets. **Heliyon**, v. 10, n. 11, 2024.

ALLERBERGER F. *Listeria*: growth, phenotypic differentiation and molecular microbiology. **FEMS Immunology & Medical Microbiology**, 35(3), 183-189. 2003.

ALMEIDA, Edivaldo Sampaio Filho de *et al.* Comportamento de microbiota residente, *Aeromonas hydrophila*, *Yersinia enterocolitica*, e *Listeria monocytogenes* inoculadas em carne de atum (*Thunnus albacares*), estocada sob refrigeração (0±1°C) em diferentes atmosferas modificadas. 1960.

AMIT Sadat Kamal *et al.* A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. **Agriculture & Food Security**, v. 6, n. 1, p. 1-22, 2017.

AMOLI, Zahra Alizadeh *et al.* Shelf life extension of refrigerated, vacuum-packed rainbow trout dipped in an alginate coating containing an ethanolic extract and/or the essential oil of *Mentha Aquatica*. **Chemical Papers**, v. 73, p. 2541-2550, 2019.

ANTUNES-ROHLING Adriana *et al.* Modelling microbial growth in modified-atmosphere-packed hake (*Merluccius merluccius*) fillets stored at different temperatures. **Food Research International**, v. 122, p. 506-516, 2019.

ANTUNES-ROHLING, Adriana *et al.* Modelling microbial growth in modified-atmosphere-packed hake (*Merluccius merluccius*) fillets stored at different temperatures. **Food Research International**, v. 122, p. 506-516, 2019.

ANVISA. Instrução Normativa - IN nº 161, de 01/07/2022. Estabelece os padrões microbiológicos dos alimentos. 2022.

AQUA CULTURE ASIA PACIFIC. The global tilapia. Disponível em: <https://aquaasiapac.com/2025/02/04/the-global-tilapia/#:~:text=market%20in%20Colombia.-,Production,any%20sign%20of%20a%20slowdown>. Acesso em: 08 abr. 2025.

AUGUSTIN, Jean-Christophe *et al.* Comparison of individual-based modeling and population approaches for prediction of foodborne pathogens growth. **Food microbiology**, v. 45, p. 205-215, 2015.

AYMERICH, Teresa *et al.* Assessment of the bioprotective potential of lactic acid bacteria against *Listeria monocytogenes* on vacuum-packed cold-smoked salmon stored at 8° C. **Food microbiology**, v. 83, p. 64-70, 2019.

BARANCELLI, Giovana V. et al. *Listeria monocytogenes*: ocorrência em produtos lácteos e suas implicações em saúde pública. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 78, p. 155-168, 2020.

BARCELLOS, Carolina Cristina Colão *et al.* Influência da aplicação de irradiação por feixe de elétrons na qualidade microbiológica de filés de corvina (*Micropogonias furnieri*) refrigerados. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, p. 535-542, 2016.

BARCELLOS, Carolina Cristina Colão *et al.* The effect of the commercial fish gelatin protein hydrolysate on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet quality. **Food Science and Technology**, v. 40, p. 929-937, 2020.

BARTÁKOVÁ, Klára *et al.* The effect of cold chain disruption on the microbiological profile of chilled fish. **Journal of microbiology, biotechnology and food sciences**, v. 13, n. 1, p. e9883-e9883, 2023.

BASHABSHEH R. H. F. *et al.* *Staphylococcus aureus* epidemiology, pathophysiology, clinical manifestations and application of nano-therapeutics. **Pathogens and Global Health**, v. 118, n. 3, p. 209–231, 2024.

BEHNAM, Shabnam *et al.* Effect of nisin as a biopreservative agent on quality and shelf life of vacuum packaged rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) stored at 4 C. **Journal of food science and technology**, v. 52, p. 2184-2192, 2015.

BIBI F. *et al.* Occurrence of Salmonella in freshwater fishes: A review. **Journal of Animal and Plant Sciences**. 25:303-310. 2015

BILLAH Mohammad Maruf; RAHMAN, Md Saydur. Salmonella in the environment: A review on ecology, antimicrobial resistance, seafood contaminations, and human health implications. **Journal of Hazardous Materials Advances**, 2024.

BINSI, P. K. *et al.* Microbiological and shelf life characteristics of eviscerated and vacuum packed freshwater catfish (*Ompok pabda*) during chill storage. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, p. 1424-1433, 2015.

BOLAT, Yıldız *et al.* Effect of laurel (*Laurus nobilis*) and curcuma (*Curcuma longa*) on microbiological, chemical and sensory changes in vacuum packed sous-vide european sea bass (*Dicentrarchus labrax*) under chilled conditions. **Food Science and Technology**, v. 39, n. Suppl. 1, p. 159-165, 2018.

BOLÍVAR, Araceli *et al.* Quantifying the bioprotective effect of *Lactobacillus sakei* CTC494 against *Listeria monocytogenes* on vacuum packaged hot-smoked sea bream. **Food microbiology**, v. 94, p. 103649, 2021.

BOULARES, Mouna *et al.* Anti-listerial inhibitory lactic acid bacteria in fresh farmed sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets during storage at 4° C under vacuum-packed conditions. **Journal of Food Safety**, v. 37, n. 3, p. e12323, 2017.

BOULETIS Achilleas D.; ARVANITTOYANNIS, Ioannis S.; HADJICHRISTODOULOU, Christos. Application of modified atmosphere packaging on aquacultured fish and fish products: A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 11, p. 2263-2285, 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Decreto nº 10.468, de 18 de agosto de 2020, o qual dispõe sobre o Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. **Diário Oficial da União**. Brasília, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Portaria nº 185, de 13 de maio de 1997, o qual dispõe o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade Peixe Fresco (Inteiro e Eviscerado) . **Diário Oficial da União**. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego – MTE. Norma Regulamentadora Nº 15, estabelece as atividades que devem ser consideradas insalubres, gerando direito ao adicional de insalubridade aos trabalhadores – 2020.

BROWN William. On the germination and growth of fungi at various temperatures and in various concentrations of oxygen and of carbon dioxide. **Annals of Botany**, v. 36, n. 142, p. 257-283, 1922.

BUCUR F. I., Grigore-Gurgu, L., Crauwels, P., Riedel, C. U., & Nicolau, A. I. Resistance of *Listeria monocytogenes* to stress conditions encountered in food and food processing environments. **Frontiers in microbiology**, 2018.

BUCUR Florentina Ionela *et al.* Resistance of *Listeria monocytogenes* to stress conditions encountered in food and food processing environments. **Frontiers in microbiology**, v. 9, p. 2700, 2018.

CALLOW E. H. Gas storage of pork and bacon. Part I - Preliminary experiments. **J. Soc. Chem. Ind.** (London) 51:116T-119T. 1932.

CARDOZO M. V. *et al.* Shigatoxigenic and atypical enteropathogenic *Escherichia coli* in fish for human consumption. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, n. 4, p. 936–941, 2018.

CAROCHO Márcio; MORALES, Patricia; FERREIRA, Isabel CFR. Natural food additives: Quo vadis?. **Trends in food science & technology**, v. 45, n. 2, p. 284-295, 2015.

CARRIÓN-GRANDA, Ximena, *et al.* Effect of antimicrobial edible coatings and modified atmosphere packaging on the microbiological quality of cold stored hake (*Merluccius merluccius*) fillets. **Journal of Food Quality**, 2018.1: 6194906. 2018.

CDC - Reports of Selected Salmonella Outbreak Investigations. 2025. Disponível em: <https://www.cdc.gov/salmonella/outbreaks/index.html>. Acesso em 24 de Fevereiro, 2025.

CDC. About *Escherichia coli* Infection. Atlanta: CDC, 2024. Disponível em: <https://www.cdc.gov/ecoli/about/index.html#:~:text=Most%20E.%20coli%20are%20harmless,%2C%20sepsis%2C%20and%20other%20illnesses>. Acesso em 24 de Fevereiro, 2025

CDC. Estimates of Foodborne Illness in the United States. 2011. Disponível em: <https://www.cdc.gov/foodborneburden/index.html> Acesso em 24 de Fevereiro, 2025

CDC. Staph Food Poisoning – About. Centers for Disease Control and Prevention, 2024. Disponível em: <https://www.cdc.gov/staph-food-poisoning/about/index.html>. Acesso em 24 de Fevereiro, 2025

CHEN J.; LIU, X.; WANG, R.; ZHANG, Y. Occurrence and control of *Listeria monocytogenes* in seafood products: A review. **Food Control**, v. 144, p. 109342, 2023.

CHEN Jiali *et al.* A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents. **Food Chemistry**, v. 369, p. 130874, 2022.

CHEN, Bingyu; MEI, Jun; XIE, Jing. Effects of packaging methods and temperature variations on the quality and microbial diversity of grouper (*Epinephelus lanceolatus*) during cold storage. **Food Bioscience**, v. 60, p. 104315, 2024.

CHEN, Bohan *et al.* Effect of Specific Spoilage Organisms on the Degradation of ATP-Related Compounds in Vacuum-Packed Refrigerated Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*). **Foods**, v. 13, n. 13, p. 1989, 2024.

CHEN, Ruixi *et al.* Pre-growth conditions and strain diversity affect nisin treatment efficacy against *Listeria monocytogenes* on cold-smoked salmon. **International Journal of Food Microbiology**, v. 333, p. 108793, 2020.

CHEN, Ruixi *et al.* The efficacy of nisin against *Listeria monocytogenes* on cold-smoked salmon at natural contamination levels is concentration-dependent and varies by serotype. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 930400, 2022.

CHEUNG G. Y. C.; BAE, J. S.; OTTO, M. Pathogenicity and virulence of *Staphylococcus aureus*. **Virulence**, v. 12, n. 1, p. 547–569, 2021.

CIEZA M. Y. R. *et al.* Staphylococcal enterotoxins: description and importance in food. **Pathogens**, **Basel**, v. 13, n. 8, p. 676, 2024. DOI: 10.3390/pathogens13080676.

COELHO Shana de Mattos de Oliveira *et al.* Mapeamento do perfil de resistência e detecção do gene *mecA* em *Staphylococcus aureus* e *Staphylococcus intermedius* oxacilina-resistentes isolados de espécies humanas e animais. **Ciência rural**, v. 37, p. 195-200, 2007.

COLEJO, Sandra, *et al.* Evaluation of ultraviolet light (UV), non-thermal atmospheric plasma (NTAP) and their combination for the control of foodborne pathogens in smoked salmon and their effect on quality attributes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 50: 84-93. 2018.

COLES Richard; KIRWAN, Mark J. Food and beverage packaging technology. **John Wiley & Sons**, 2011.

CORNFORTH Daren; HUNT, Melvin. Low-oxygen packaging of fresh meat with carbon monoxide. **AMSA white paper series**, v. 2, n. 10, p. 1-12, 2008.

CORTÉS-SÁNCHEZ A. D. *et al.* Bacteriological quality and antibiotic resistance of *Staphylococcus aureus* isolated from fresh and frozen fish in retail markets. **Open Journal of Biological Sciences**, v. 5, n. 1, p. 291–306, 2020.

COSTA Julia Nunes Batista da. Estudo retrospectivo da ocorrência de Salmonelose no Brasil no período de 2000 a 2018. São José do Rio Preto; SES/SP. **Monografia**. 2020.

COSTA Paula Vasconcelos, *et al.* *Listeria monocytogenes*: challenges of microbiological control of food in Brazil. **Food Science and Technology**, 2022.

COSTA R. A. *Escherichia coli* in seafood: A brief overview. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 4, p. 450-454, 2013.

COSTA WLR, Ferreira J; dos S, Carvalho JS, Cerqueira ES, Oliveira LC, Almeida RC de C. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in raw meats and prepared foods in public hospitals in Salvador, Bahia, Brazil. **J Food Sci** 80(1):M147–M150. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12723>. 2015.

COSTA, Jean Carlos Correia Peres *et al.* Modelling the interaction of the sakacin-producing *Lactobacillus sakei* CTC494 and *Listeria monocytogenes* in filleted gilthead sea bream (*Sparus aurata*) under modified atmosphere packaging at isothermal and non-isothermal conditions. **International Journal of Food Microbiology**, v. 297, p. 72-84, 2019.

COYNE Frederick Philip. The effect of carbon dioxide on bacteria growth. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, **Containing Papers of a Biological Character**, v. 113, n. 782, p. 196-217, 1933.

CRONA Beatrice *et al.* China at a crossroads: an analysis of China's changing seafood production and consumption. **One Earth**, v. 3, n. 1, p. 32-44, 2020.

CUADRADO, Belén Soriano *et al.* Effect of activated plastic films on inactivation of foodborne pathogens. **Coatings**, v. 6, n. 3, p. 28, 2016.

DABIJA, Adriana *et al.* Effect of rosemary, clove and oregano oil on the preservation of vacuum-packaged hot smoked trout. **Farmacia**, v. 67, n. 5, p. 794-800, 2019.

DALGAARD Paw. Qualitative and quantitative characterization of spoilage bacteria from packed fish. **International journal of food microbiology**, v. 26, n. 3, p. 319-333, 1995.

DAMDAM, Asrar Nabil *et al.* Effects of UV-C irradiation and vacuum sealing on the shelf-life of beef, chicken and salmon fillets. **Foods**, v. 12, n. 3, p. 606, 2023.

DANIELS James A.; KRISHNAMURTHI, Rajagopalan; RIZVI, Syed SH. A review of effects of carbon dioxide on microbial growth and food quality. **Journal of food protection**, v. 48, n. 6, p. 532-537, 1985.

DE SANTOS, F. *et al.* Effect of carbon monoxide in modified atmosphere packaging, storage time and endpoint cooking temperature on the internal color of enhanced pork. **Meat Science**, v. 77, n. 4, p. 520-528, 2007.

DEGHANI Samira; HOSSEINI, Seyed Vali; REGENSTEIN, Joe M. Edible films and coatings in seafood preservation: A review. **Food chemistry**, v. 240, p. 505-513, 2018.

DHAMA Kuldeep, *et al.* Listeriosis in animals, its public health significance (food-borne zoonosis) and advances in diagnosis and control: a comprehensive review. **Veterinary Quarterly**, 2015.

DI TORO, Jessica *et al.* Efficacy of an aromatic vinegar in reducing psychrotrophic bacteria and biogenic amines in salmon fillets (*Salmo salar*) stored in modified atmosphere packaging. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 69, n. 4, 2019.

DIMITRIJEVIĆ, Mirjana *et al.* Inhibition of *Listeria monocytogenes* growth on vacuum packaged rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with carvacrol and eugenol. **Journal of Food Safety**, v. 39, n. 1, p. e12553, 2019.

DJENANE Djamel; RONCALÉS, Pedro. Carbon monoxide in meat and fish packaging: Advantages and limits. **Foods**, v. 7, n. 2, p. 12, 2018.

DOGRUYOL, Hande; MOL, Suhendan; COSANSU, Serap. Increased thermal sensitivity of *Listeria monocytogenes* in sous-vide salmon by oregano essential oil and citric acid. **Food Microbiology**, v. 90, p. 103496, 2020.

DOIJAD Swapnil P., *et al.* Biofilm-forming abilities of *Listeria monocytogenes* serotypes isolated from different sources. **PloS one**, 2015.

DORĐEVIĆ, Jasna *et al.* Effect of vacuum and modified atmosphere packaging on microbiological properties of cold-smoked trout. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2017. p. 012084.

DUARTE A. S. *et al.* Microbiological safety of fish and seafood products: Emerging concerns and control strategies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 137, p. 25-38, 2023.

DURMUS, Mustafa *et al.* The effects of edible oil nanoemulsions on the chemical, sensory, and microbiological changes of vacuum packed and refrigerated sea bass fillets during storage period at 2±2 °C. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 12, p. e14282, 2019.

DUTTA C.; SENGUPTA, C. Prevalence of *Escherichia coli* in fish and shrimps obtained from retail fish markets in & around Kolkata, India. **Frontiers in Environmental Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2016.

ECDC. Factsheet for health professionals on Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC) infection. 2024. Disponível em: <https://www.ecdc.europa.eu/en/escherichia-coli-ecoli/facts>  
Acesso em 24 de Fevereiro de 2025

EFSA & ECDC. The European Union One Health 2023 Zoonoses report. **EFSA Journal**, 22(12), e9106. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9106>. 2024.

EFSA & ECDC. Zoonotic diseases on the rise in the EU: Listeriosis cases hit highest levels since 2007. Parma: EFSA, 2024.

EFSA PANEL ON BIOLOGICAL HAZARDS (BIOHAZ) *et al.* *Listeria monocytogenes* contamination of ready-to-eat foods and the risk for human health in the EU. **EFSA journal**, v. 16, n. 1, p. e05134, 2018.

EFSA; ECDC. The European Union One Health 2018 zoonoses report. **EFSA Journal**, [S. l.], v. 17, n. 12, p. 5926, 2019.

EFSA; ECDC. The European Union One Health 2020 zoonoses report. **EFSA Journal**, [S. l.], v. 19, n. 12, p. 6971, 2021.

EFSA. Assessment of the public health significance of meticillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in animals and foods. **EFSA Journal**, v. 7, n. 3, p. 993, 2009.

EFSA. *Listeria monocytogenes* contamination in food processing environments and food products. Parma: EFSA, 2023.

EFSA. The European Union One Health 2021 Zoonoses Report. **EFSA Journal**, v. 20, n. 12, p. 7592, 2022.

EHUWA Olugbenga; JAISWAL, Amit K.; JAISWAL, Swarna. Salmonella, food safety and food handling practices. **Foods**, 2021.

EKLUND T. The effect of carbon dioxide on bacterial growth and on uptake processes in bacterial membrane vesicles. **International Journal of Food Microbiology**, v. 1, n. 4, p. 179-185, 1984.

EL ASUOTY, MS; AA, OMER; NM, ABOU-ARAB. Effect of packaging method and use of acetic acid on the shelf life of fish during refrigeration storage. **Assiut Veterinary Medical Journal**, v. 70, n. 180, p. 77-88, 2024.

EPA. Air Trends—Carbon Monoxide—National Trends in CO Levels. Disponível em: <http://www.epa.gov/airtrends/carbon.htm>. Acesso em 25 de fevereiro de 2025.

ERIKSEN, Mette Brandt; FRANDBSEN, Tove Faber. The impact of patient, intervention, comparison, outcome (PICO) as a search strategy tool on literature search quality: a systematic review. **Journal of the Medical Library Association: JMLA**, v. 106, n. 4, p. 420, 2018.

ESMAELI, Fatemeh, *et al.* Effect of combined application of *Pimpinella affinis* essential oil and extract in zein edible coating on vacuum packaged rainbow trout fillet quality. In: **Veterinary Research Forum**. p. 109. 2019.

ESTEVEZ, Eduardo; GUERRA, Luís; ANÍBAL, Jaime. Effects of vacuum and modified atmosphere packaging on the quality and shelf-life of gray triggerfish (*Balistes capriscus*) filets. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 250, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system, 2020. Disponível em: [https://food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3\\_en?filename=f2f\\_action-plan\\_2020\\_strategy-info\\_en.pdf](https://food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3_en?filename=f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf) . Acesso em: 7 abr. 2025.

EUROSTAT. *Aquaculture statistics – Statistics Explained*. European Commission, 2023. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Aquaculture\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Aquaculture_statistics). Acesso em Abril, 2025.

FANESTIL D. D.; HASTINGS, A. Baird; MAHOWALD, Theodore A. Environmental CO<sub>2</sub> stimulation of mitochondrial adenosine triphosphatase activity. **Journal of Biological Chemistry**, v. 238, n. 2, p. 836-842, 1963.

FAO 2023. Fishery and Aquaculture Country Profiles. Brazil, Country Profile Fact Sheets. Fisheries and Aquaculture Division. Rome. Updated Sep 21, 2020.

FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>

FAO. Food safety: Ensuring food safety worldwide. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/food-safety/en/> . Acesso em 2 de Março, 2025.

FAO. *Quarterly salmon analysis – February 2025*. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b0e8467b-3a2d-4b88-89e3-9dbf3569485e/content>. Acesso em 08 de Abril, 2025.

FAO. Report of the FAO Expert Consultation on the Trade Impact of Listeria in Fish Products: Amherst, MA, United States, 17–20 May 1999.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022 – Towards Blue Transformation. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2025.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Rome: FAO, 2022.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture. Sustainability in action. Roma, Itália. p. 244, 2020.

FARBER J. M.; PETERKIN, P. I. *Listeria monocytogenes*: A foodborne pathogen of concern. **Food Microbiology**, v. 104, p. 12-20, 2021.

FDA. Water Activity (aw) in Foods. Inspection Technical Guides. Disponível em: <<https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-technical-guides/water-activity-aw-foods>> Acesso em 30 de janeiro, 2024. 2014.

FERNANDES Dandara Virginia Guia Semedo, *et al.* Salmonella spp. in the fish production chain: a review. **Ciência Rural**, 2018.

FERRARI Rafaela G. *et al.* Worldwide epidemiology of Salmonella serovars in animal-based foods: a meta-analysis. **Applied and environmental microbiology**, v. 85, n. 14, p. e00591-19, 2019.

FERREIRA Suzana Oellers. Aplicação tecnologia a espécies de pescado de agua doce visando atender a agroindustria rural. 1987. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987. . Acesso em: 27 set. 2023.

FIDALGO, Liliana G. *et al.* Hyperbaric storage of vacuum-packaged fresh Atlantic salmon (*Salmo salar*) loins by evaluation of spoilage microbiota and inoculated surrogate-pathogenic microorganisms. **Food Engineering Reviews**, v. 13, p. 651-659, 2021.

FILHO I. L. V.; MESQUITA, E. de F. M. Aminas biogênicas em pescado: ocorrência, relevância e detecção. **Semioses**, v. 12, n. 3, p. 115-141, 2018.

FLOROS John D.; MATSOS, Konstantinos I. Introduction to modified atmosphere packaging. In: **Innovations in food packaging**. Academic Press, p. 159-172, 2005.

FRASER Owen; SUMAR, Sam. Compositional changes and spoilage in fish-an introduction. **Nutrition & Food Science**, v. 98, n. 5, p. 275-279, 1998.

FRAZIER W. C.; WESTHOFF, D. C. Food Microbiology. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2022.

FUENTES-AMAYA, Luisa Fernanda *et al.* Sensory, microbiological and chemical changes in vacuum-packaged blue spotted emperor (*Lethrinus sp*), saddletail snapper (*Lutjanus malabaricus*), crimson snapper (*Lutjanus erythropterus*), barramundi (*Lates calcarifer*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets stored at 4° C. **Food Science & Nutrition**, v. 4, n. 3, p. 479-489, 2016.

GALÁN-RELAÑO Ángela, *et al.* Salmonella and salmonellosis: An update on public health implications and control strategies. **Animals**, 2023.

GANDHI M.; CHIKINDAS, M. L. Listeria: A persistent foodborne pathogen. **Journal of Applied Microbiology**, v. 135, n. 4, p. 987-1001, 2023.

GAZAL, Luís Eduardo de Souza *et al.* Antimicrobials and resistant bacteria in global fish farming and the possible risk for public health. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 87, p. e0362019, 2020.

GHALY, Abdel E.; DAVE, D.; BUDGE, S.; BROOKS, M. S. Fish spoilage mechanisms and preservation techniques. **American Journal of Applied Sciences**, v. 7, n. 7, p. 859, 2010.

GONÇALVES A. A. *et al.* Tecnologia do pescado: ciência, tecnologia, inovação e legislação. 2. Ed. Editora Atheneu, 2021.

GONÇALVES A. A.; RODRIGUES, B. L. Qualidade e segurança do pescado: Da produção ao consumo. 2. ed. São Paulo: **Blucher**, 2022.

GOVARI, Maria *et al.* Quest of intelligent research tools for rapid evaluation of fish quality: FTIR spectroscopy and multispectral imaging versus microbiological analysis. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 264, 2021.

GUERRA, Nkarthe *et al.* Efeito da embalagem com atmosfera modificada associada ao ácido ascórbico na vida útil de filés de tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, n. 00, p. e2015045, 2017.

GUILLARD, Valérie *et al.* Validation of a predictive model coupling gas transfer and microbial growth in fresh food packed under modified atmosphere. **Food Microbiology**, v. 58, p. 43-55, 2016.

GUPTA Priyanka; ADHIKARI, Achyut. Novel approaches to environmental monitoring and control of *Listeria monocytogenes* in food production facilities. **Foods**, 2022.

GURUSAMY, Revathy *et al.* Impact of soluble gas stabilisation (SGS) technology on the quality of superchilled vacuum-packed salmon portions following different cold chain scenarios. **LWT**, v. 201, p. 116223, 2024.

GUZMÁN M. C. *et al.* Recovery of *Escherichia coli* in fresh water fish, *Jenynsia multidentata* and *Bryconamericus iheringi*. **Water research**, v. 38, n. 9, p. 2368-2374, 2004.

HAGER, Janelle V. *et al.* *Listeria monocytogenes* is inhibited on fillets of cold-smoked sunshine bass, *Morone chrysops* × *Morone saxatilis*, with an edible corn zein-based coating incorporated with lemongrass essential oil or nisin. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 50, n. 3, p. 575-592, 2019.

HANSEN A. Å. *et al.* Quality changes during refrigerated storage of MA-packaged pre-rigor fillets of farmed Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) using traditional MAP, CO<sub>2</sub> emitter, and vacuum. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 9, p. M423-M430, 2007.

HANSEN, Tina Beck *et al.* Predicting the effect of salt on heat tolerance of *Listeria monocytogenes* in meat and fish products. **International Journal of Food Microbiology**, v. 352, p. 109265, 2021.

HEINITZ Maxine L., *et al.* Incidence of Salmonella in fish and seafood. **Journal of food protection**, , 63.5: 579-592. 2000.

HEINITZ Maxine L., *et al.* Incidence of Salmonella in fish and seafood. **Journal of food protection**, 2000.

HEIR, Even *et al.* Improved control of *Listeria monocytogenes* during storage of raw salmon by treatment with the fermentate Verdad N6 and nisin. **International Journal of Food Microbiology**, v. 336, p. 108895, 2021.

HEIR, Even *et al.* Reduction and inhibition of *Listeria monocytogenes* in cold-smoked salmon by Verdad N6, a buffered vinegar fermentate, and UV-C treatments. **International journal of food microbiology**, v. 291, p. 48-58, 2019.

HERBERT Ulrike *et al.* Comparison of argon-based and nitrogen-based modified atmosphere packaging on bacterial growth and product quality of chicken breast fillets. **Poultry science**, v. 92, n. 5, p. 1348-1356, 2013.

HERNÁNDEZ, Enrique José Gregorio Pino *et al.* Effects of modified atmosphere packing over the shelf life of sous vide from captive pirarucu (*Arapaima gigas*). **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 39, p. 94-100, 2017.

HIGGINS, Julian P. T. *et al.* Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions: version 6.5 (updated August 2024). Cochrane, 2024.

HOEL, Sunniva; LERFALL, Jørgen; JAKOBSEN, Anita Nordeng. Growth and spoilage potential of an *Aeromonas salmonicida* strain in refrigerated Atlantic cod (*Gadus morhua*) stored under various modified atmospheres. **Foods**, v. 11, n. 18, p. 2757, 2022.

HOFER Ernesto; RIBEIRO, Rosmary; FEITOSA, Deise Paranhos. Species and serovars of the genus *Listeria* isolated from different sources in Brazil from 1971 to 1997. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, 2000.

HONG H.; REGENSTEIN, J. M.; LUO, Y. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 9, p. 1787-1798, 2015.

HUANG, Lihan *et al.* Shelf-life boundaries of *Listeria monocytogenes* in cold smoked salmon during refrigerated storage and temperature abuse. **Food Research International**, v. 173, p. 113362, 2023.

HUSSAIN M. A., Sumon, T. A., Mazumder, S. K., Ali, M. M., Jang, W. J., Abualreesh, M. H., Sharifuzzaman, S. M., Brown, C. L., Lee, H. T., Lee, E. W., & Hasan, M. T.. Essential oils and chitosan as alternatives to chemical preservatives for fish and fisheries products: A review. **Food Control**, 129, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108244>. 2021.

IACUMIN, Lucilla *et al.* Analysis of the bioprotective potential of different lactic acid bacteria against *Listeria monocytogenes* in cold-smoked sea bass, a new product packaged under vacuum and stored at 6±2 C. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 796655, 2021.

IACUMIN, Lucilla *et al.* Evaluation of different techniques, including modified atmosphere, under vacuum packaging, washing, and *Lactobacillus sakei* as a Bioprotective Agent, to increase the shelf-life of fresh gutted sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and sea bream (*Sparus aurata*) stored at 6±2 C. **Biology**, v. 11, n. 2, p. 217, 2022.

IBGE. Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018. Avaliação Nutricional da Disponibilidade Domiciliar de Alimentos no Brasil. Pesquisa de Orçamentos Familiares – POF 2017-1019. Rio de Janeiro, 2020.

ILYAS, Ashal *et al.* Implications of trimethylamine N-oxide (TMAO) and betaine in human health: beyond being osmoprotective compounds. **Frontiers in Molecular Biosciences**, v. 9, p. 964624, 2022.

ISO. Microbiology of food and animal feeding stuffs—Horizontal method for the enumeration of beta-glucuronidase-positive *Escherichia coli*—Part 2: colony-count technique at 44 degrees C using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl beta-D-glucuronide. 2001.

ISO. Microbiology of Food Chain: Horizontal Method for the Detection and Enumeration of *Listeria monocytogenes* and of *Listeria* Spp.-Part 2: Enumeration Method. International Organization for Standardization, 2017.

ISO. Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of *Salmonella* spp. Geneva: ISO, 2017.

ISO. Microbiology of the Food Chain-Horizontal Method for the Enumeration of Coagulase-Positive Staphylococci (*Staphylococcus aureus* and Other Species)-Part 1: Method Using Baird-Parker Agar Medium. 2021.

ITAL. ITAL 50 anos Ciência, tecnologia e inovação a serviço da sociedade e da indústria brasileira de alimentos; Campinas, São Paulo. P. 97, 2013.

JÄÄSKELÄINEN, Elina *et al.* Marination increased tyramine levels in rainbow trout fillet strips packaged under modified atmosphere. **Food Microbiology**, v. 109, p. 104099, 2023.

JÄÄSKELÄINEN, Elina *et al.* Metabolomics and bacterial diversity of packaged yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and salmon (*Salmo salar*) show fish species-specific spoilage development during chilled storage. **International Journal of Food Microbiology**, v. 293, p. 44-52, 2019.

JAKOBSEN Anita N. *et al.* Growth and spoilage metabolites production of a mesophilic *Aeromonas salmonicida* strain in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during cold storage in modified atmosphere. **Journal of Applied Microbiology**, v. 129, n. 4, p. 935-946, 2020.

JAMI M., Ghanbari, M., Zunabovic, M., Domig, K.J., Kneifel, W.,. *Listeria monocytogenes* in aquatic food products-a review. **Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.** 13 (5), 798–813. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12092>. 2014.

JEYAKUMARI, A. *et al.* Effect of electron beam irradiation on the quality of vacuum-packed, chilled-stored tilapia fish chunks. *Indian Journal of Fisheries*, 70(2). <https://doi.org/10.21077/ijf.2023.70.2.132421-14>. 2023.

JOS. in't Veld JHH. Microbial and biochemical overview of foods: an overview. *Int J Food Microbiol*;33(1):1–18. Van Boekel MA. Kinetic modeling of food quality: a critical review. *Rev Food Sci Food Saf.* 2008;7:144–58. 1996.

KAPER J. B.; NATARO, J. P.; MOBLEY, H. L. Pathogenic *Escherichia coli*. *Nature Reviews Microbiology*, v. 2, p. 123–140, 2004.

KATAOKA, Ai *et al.* Effect of storage temperature on the outgrowth and toxin production of *Staphylococcus aureus* in freeze-thawed precooked tuna meat. *Journal of Food Protection*, v. 79, n. 4, p. 620-627, 2016.

KATSOULI Maria *et al.* Active and Intelligent Packaging for Enhancing Modified Atmospheres and Monitoring Quality and Shelf Life of Packed Gilthead Seabream Fillets at Isothermal and Variable Temperature Conditions. *Foods*, v. 11, n. 15, p. 2245, 2022.

KIDD F. and C. West.. A relation between the concentration of oxygen and carbon dioxide in the atmosphere, rate of respiration and length of storage life in apples. Great Britain Dept. Sci. Ind. RES. Rpt. Food Investment Board 1925, 1926. p. 41-45. 1927.

KILLEFER D. H.. Carbon dioxide preservation of meat and fish. *Industrial & Engineering Chemistry*, 22, 140e143. 1930.

KIM B. Y. *et al.* Invasion processes of pathogenic *Escherichia coli*. *International Journal of Medical Microbiology*, v. 295, p. 463–470, 2005.

KIM Sol, *et al.* The economic burden of non-Typhoidal Salmonella and invasive non-Typhoidal Salmonella infection: a systematic literature review. *Vaccines*, 2024.

KIMURA B. & Murakami, M.. Fate of food pathogens in gas-packaged jack mackerel fillets. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59, 1163–1169. 1993.

KIROV S.M. . Aeromonas and Plesiomonas species. In: *Food Microbiology – Fundamentals and Frontiers* (edited by M.E. Doyle, L.R. Beuchat & T.J. Montville). Pp. 265–287. Washington, DC: ASM Press. 1997.

KIZILKAYA, Pınar; KAYA, Mükerrerem. The effect of a chitosan/TiO<sub>2</sub>-nanoparticle/rosmarinic acid-based nanocomposite coating on the preservation of refrigerated rainbow trout fillets (*Oncorhynchus mykiss*). *Food Science of Animal Resources*, v. 43, n. 6, p. 1170, 2023.

KONTOMINAS, M. G.; BADEKA, A. V.; KOSMA, I. S.; NATHANAILIDES, C. I. Innovative seafood preservation technologies: recent developments. *Animals*, v. 11, n. 1, p. 92, 2021.

KOOPMANS Merel M., *et al.* Human listeriosis. *Clinical Microbiology Reviews*, 2023.

KRAMARENKO, Toomas *et al.* *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat vacuum and modified atmosphere packaged meat and fish products of Estonian origin at retail level. **Food Control**, v. 67, p. 48-52, 2016.

KRITIKOS, Athanasios *et al.* Volatilome of chill-stored European seabass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and Atlantic salmon (*Salmo salar*) slices under modified atmosphere packaging. **Molecules**, v. 25, n. 8, p. 1981, 2020.

KUMAR, R.; SURENDRAN, P. K.; THAMPURAN, N. Evaluation of culture, ELISA and PCR assays for the detection of *Salmonella* in seafood. **Letters in Applied Microbiology**, v. 46, n. 2, p. 221–226, 2007.

KUNOVÁ, Simona *et al.* Influence of essential oils on the microbiological quality of fish meat during storage. **Animals**, v. 11, n. 11, p. 3145, 2021.

KUULIALA Lotta *et al.* Microbiological, chemical and sensory spoilage analysis of raw Atlantic cod (*Gadus morhua*) stored under modified atmospheres. **Food microbiology**, v. 70, p. 232-244, 2018.

LAORENZA Yeyen *et al.* Polymeric packaging applications for seafood products: Packaging-deterioration relevance, technology and trends. **Polymers**, v. 14, n. 18, p. 3706, 2022.

LÁZARO, César A.; MONTEIRO, Maria Lúcia G.; CONTE-JUNIOR, Carlos A. Combined effect of modified atmosphere packaging and UV-C radiation on pathogens reduction, biogenic amines, and shelf life of refrigerated tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets. **Molecules**, v. 25, n. 14, p. 3222, 2020.

LE Hao Hong Thi *et al.* Large-scale *Staphylococcus aureus* foodborne disease poisoning outbreak among primary school children. **Microbiology Research**, v. 12, n. 1, p. 43-52, 2021.

LEBOW, Noelle K., *et al.* Influence of high-pressure processing at low temperature and nisin on *Listeria innocua* survival and sensory preference of dry-cured cold-smoked salmon. **Journal of Food Science**, 82.12: 2977-2986. 2017.

LEE Dong Sun. Carbon dioxide absorbers for food packaging applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 57, p. 146-155, 2016.

LELWELA, G. K. T. N. *et al.* Effect of Selected Wood Smoke on Physicochemical and Sensory Qualities of Tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 30, n. 1, p. 85-94, 2021.

LEMOS, Maria-Leonor *et al.* An exploratory study on spoilage bacteria and *Listeria monocytogenes* in fresh Salmon: Extending shelf-life using vacuum and seasonings as natural preservatives. **Veterinary Sciences**, v. 10, n. 7, p. 423, 2023.

LERFALL Jørgen; THOMASSEN, Gunn Merethe Bjørge; JAKOBSEN, Anita Nordeng. Quality of fresh saithe (*Pollachius virens*) in modified atmosphere packages as affected by the gas composition. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 18, p. 147-156, 2018.

LI, Dongping, *et al.* Quality changes and microbiological spoilage analysis of air-packed and vacuum-packed silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during chilled storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, 42.1: e13389, 2018.

LI, Peiyun *et al.* Evaluation of weakly acidic electrolyzed water and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of farmed puffer fish (*Takifugu obscurus*) during cold storage. **Journal of Food Safety**, v. 40, n. 3, p. e12773, 2020.

LIAO, Cui-Yi *et al.* Antimicrobial resistance of *Escherichia coli* from aquaculture farms and their environment in Zhanjiang, China. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 8, p. 806653, 2021.

LIU G. Y. Molecular pathogenesis of *Staphylococcus aureus* infection. **Pediatric Research**, v. 65, n. 5, Pt 2, p. 71R–77R, 2009.

LIU Xiaochang *et al.* Characterization of the microbiota in lightly salted bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets stored at 4° C. **Food Microbiology**, v. 62, p. 106-111, 2017.

LOPES Luiz Fernando Larangeira. *Salmonella sp* em répteis e aves silvestres no Estado de São Paulo: frequência de isolamento, caracterização dos isolados e as conseqüências para o manejo em cativeiro e reintrodução. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, 2008.

LÓPEZ, Clemencia Chaves *et al.* Effect of nisin on biogenic amines and shelf life of vacuum packaged rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. **Journal of Food Science and Technology**, v. 54, p. 3268-3277, 2017.

LUÑO M. *et al.* Beef shelf life in low O<sub>2</sub> and high CO<sub>2</sub> atmospheres containing different low CO concentrations. **Meat science**, v. 55, n. 4, p. 413-419, 2000.

LYVER A. & Smith, J.P. . Challenge studies with *Clostridium botulinum* type E in a value-added surimi product stored under a modified atmosphere. **Journal of Food Safety**, 18, 1–23. 1998.

MAGALHÃES Rui, *et al.* Persistent and non-persistent strains of *Listeria monocytogenes*: A focus on growth kinetics under different temperature, salt, and pH conditions and their sensitivity to sanitizers. **Food microbiology**, 2016.

MAGHAMI, Mohadeseh; MOTALEBI, Abbas Ali; ANVAR, Seyed Amir Ali. Influence of chitosan nanoparticles and fennel essential oils (*Foeniculum vulgare*) on the shelf life of *Huso huso* fish fillets during the storage. **Food science & nutrition**, v. 7, n. 9, p. 3030-3041, 2019.

MALORNY, Burkhard *et al.* Diagnostic real-time PCR for detection of *Salmonella* in food. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 12, p. 7046–7052, 2004.

MANCINI R. A.; HUNT, M.Cy. Current research in meat color. **Meat science**, v. 71, n. 1, p. 100-121, 2005.

MANCINI, R. A.; HUNT, M. C. Current research in meat color. **Meat Science**, v. 71, p. 100–121,. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.003>. 2005.

MAPA. Consumo e tipos de peixes no Brasil. [S.D.].

MAPA. Métodos oficiais para análise de produtos de origem animal. 2022.

MAQBOOL, Hafsa *et al.* The combined effect of beetroot peel extract, chilling, and vacuum packaging on the shelf-life of deccan mahseer (*Tor khudree*) steaks. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 32, n. 1, p. 1-12, 2022

MARINO, Rosaria *et al.* Valorization of fish from the Adriatic Sea: nutritional properties and shelf life prolongation of *Aphia minuta* through essential oils. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1454228, 2024.

MARTÍN Irene *et al.* Strategies for biocontrol of *Listeria monocytogenes* using lactic acid bacteria and their metabolites in ready-to-eat meat-and dairy-ripened products. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 542, 2022.

MASNIYOM Payap. Deterioration and shelf-life extension of fish and fishery products by modified atmosphere packaging. **Songklanakarin Journal of Science & Technology**, v. 33, n. 2, 2011.

MATUSZEWSKA M. *et al.* Absence of *Staphylococcus aureus* in wild populations of fish supports a spillover hypothesis. **Microbiology Spectrum**, v. 11, n. 4, p. e04858-22, 2023. .

MAYELI, Mahsa *et al.* Combined impacts of zein coating enriched with methanolic and ethanolic extracts of sour orange peel and vacuum packing on the shelf life of refrigerated rainbow trout. **Flavour and fragrance journal**, v. 34, n. 6, p. 460-470, 2019.

MC CARTHY, Catherine M.; DE VRIES, Ralph; MACKENBACH, Joreintje D. The influence of unhealthy food and beverage marketing through social media and adver gaming on diet-related outcomes in children—A systematic review. **Obesity Reviews**, v. 23, n. 6, p. e13441, 2022.

MCMILLIN Kenneth W. Where is MAP going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat. **Meat science**, v. 80, n. 1, p. 43-65, 2008.

MERLO, Thais Cardoso *et al.* Incorporation of pink pepper residue extract into chitosan film combined with a modified atmosphere packaging: Effects on the shelf life of salmon fillets. **Food research international**, v. 125, p. 108633, 2019.

MIETTINEN, Hanna; WIRTANEN, Gun. Ecology of *Listeria* spp. in a fish farm and molecular typing of *Listeria monocytogenes* from fish farming and processing companies. **International journal of food microbiology**, v. 112, n. 2, p. 138-146, 2006.

MILIJASEVIC, Jelena Babic *et al.* Effect of vacuum and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of gutted rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage. **Foods**, v. 12, n. 16, p. 3015, 2023.

MILIJASEVIC, Milan; BABIC, Jelena; VESKOVIC-MORACANIN, Slavica. Effect of vacuum and modified atmosphere on Enterobacteriaceae count determined in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and carp (*Cyprinus carpio*) steaks. **Procedia food science**, v. 5, p. 195-198, 2015.

MIRAGLIA, Dino *et al.* Effect of a Phenolic extract from olive vegetation water on fresh salmon steak quality during storage. **Italian journal of food safety**, v. 5, n. 4, p. 6167, 2016.

MKHARI, Tshamisane; ADEYEMI, Jerry O.; FAWOLE, Olaniyi A. Recent Advances in the Fabrication of Intelligent Packaging for Food Preservation: A Review. **Processes**, v. 13, n. 2, p. 539, 2025.

MONTEIRO, Maria Lúcia Guerra *et al.* Optimized UVC-LED condition to improve the shelf life of vacuum-packed refrigerated stored rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. **Food Control**, v. 156, p. 110141, 2024.

MONTEIRO, Maria Lúcia Guerra, *et al.* Combined effect of high hydrostatic pressure and ultraviolet radiation on quality parameters of refrigerated vacuum-packed tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets. **Scientific Reports**, 8.1: 9524. 2018,

MORAN T., and Bate-Smith, E.C.. " Storage of Chilled Beef in Atmospheres containing Carbon Dioxide." Report of the Food Investigation Board for the Year 1932, page 23. H.M. Stationery Office. 1932.

MULLAN, Michael; MCDOWELL, Derek. Modified atmosphere packaging. **Food and beverage packaging technology**, p. 263-294, 2011.

MORONEY, Natasha C. *et al.* Influence of green seaweed (*Ulva rigida*) supplementation on the quality and shelf life of Atlantic salmon fillets. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 26, n. 10, p. 1175-1188, 2017.

NAEF, Elisa Fernanda *et al.* Caracterización microbiológica y fisicoquímica de carne de boga (*Leporinus obtusidens*) impregnada con jugo de limón. **Acta Agronómica**, v. 70, n. 1, p. 57-65, 2021.

NGUYEN, Ngoc Thanh Xuan *et al.* Antibacterial activity of plasma-treated polypropylene membrane functionalized with living *Carnobacterium divergens* in cold-smoked salmon. **Food Control**, v. 137, p. 108903, 2022.

NIE Xiaobao *et al.* Mechanisms underlying the deterioration of fish quality after harvest and methods of preservation. **Food Control**, v. 135, p. 108805, 2022.

NOWAK Jessika, *et al.* Persistent *Listeria monocytogenes* strains isolated from mussel production facilities form more biofilm but are not linked to specific genetic markers. **International journal of food microbiology**, 2017.

NWIYI, P.; ONYEABOR, A. Occurrence of *Salmonella* spp. from fresh fish (*Tilapia nilotica* Linn) using improved isolation methods. **Online Journal of Animal and Feed Research**, v. 2, p. 475–478, 2012.

OBAIDAT M. M.; SALMAN, A. E. B.; LAFI, S. Q. Prevalence of *Staphylococcus aureus* in imported fish and correlations between antibiotic resistance and enterotoxigenicity. **Journal of Food Protection**, v. 78, n. 11, p. 1999–2005, 2015.

OHLSSON Thomas; BENGTSSON, Nils (Ed.). Minimal processing technologies in the food industries. **Elsevier**, 2002.

OLATUNDE Oladipupo Odunayo; BENJAKUL, Soottawat; VONGKAMJAN, Kitiya. Comparative study on nitrogen and argon-based modified atmosphere packaging on microbiological, chemical, and sensory attributes as well as on microbial diversity of Asian sea bass. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 22, p. 100404, 2019.

ONMAZ N. E. *et al.* *Escherichia coli* O157 in fish: Prevalence, antimicrobial resistance, biofilm formation capacity, and molecular characterization. **LWT - Food Science and Technology**, v. 133, 109940, 2020.

ORI E. L. *et al.* Diarrhoeagenic *Escherichia coli* and *Escherichia albertii* in Brazil: pathotypes and serotypes over a 6-year period of surveillance. **Epidemiology and Infection**, v. 147, e10, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1017/S0950268818002595>. 2018.

ORTEGA BLÁZQUEZ, Irene, *et al.* Treatment with high-hydrostatic pressure, activated film packaging with thymol plus enterocin AS-48, and its combination modify the bacterial communities of refrigerated sea bream (*Sparus aurata*) fillets. **Frontiers in Microbiology**, 9: 314. 2018.

OSEK Jacek; LACHTARA, Beata; WIECZOREK, Kinga. *Listeria monocytogenes* in foods—From culture identification to whole-genome characteristics. **Food Science & Nutrition**, 2022.

OSEK Jacek; LACHTARA, Beata; WIECZOREK, Kinga. *Listeria monocytogenes*—how this pathogen survives in food-production environments?. **Frontiers in microbiology**, 2022.

OSEK Jacek; WIECZOREK, Kinga. *Listeria monocytogenes*—How this pathogen uses its virulence mechanisms to infect the hosts. **Pathogens**, 2022.

ÖZPOLAT, Emine. The effects of *Juniperi fructus* essential oil and vacuum packing on the shelf life of rainbow trout fillets during storage at  $2\pm 1^{\circ}$  C. **Cellular and Molecular Biology**, v. 70, n. 4, p. 29-34, 2024.

ÖZTÜRK, Fatma; GÜNDÜZ, Hatice; SÜRENGİL, Gökür. The effects of essential oils on inactivation of *Listeria monocytogenes* in rainbow trout cooked with sous-vide. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 10, p. e15878, 2021.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PAKBIN, Behzad; BRÜCK, Wolfgang M.; ROSSEN, J. W. A. Virulence factors of enteric pathogenic *Escherichia coli*: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 18, p. 9922, 2021.

PALOTÁS, Péter *et al.* Preservative Effect of Novel Combined Treatment with Electrolyzed Active Water and Lysozyme Enzyme to Increase the Storage Life of Vacuum-Packaged Carp. **Journal of Food Quality**, v. 2020, n. 1, p. 4861471, 2020.

PANG, Yu-Hsin *et al.* Growth behavior prediction of fresh catfish fillet with *Pseudomonas aeruginosa* under stresses of allyl isothiocyanate, temperature and modified atmosphere. **Food control**, v. 47, p. 326-333, 2015.

PARLAPANI Foteini F.; KORMAS, Konstantinos Ar; BOZIARIS, Ioannis S. Microbiological changes, shelf life and identification of initial and spoilage microbiota of sea bream fillets stored under various conditions using 16S rRNA gene analysis. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 12, p. 2386-2394, 2015.

PARLAPANI, Foteini F. *et al.* Microbiological spoilage and volatiles production of gutted European sea bass stored under air and commercial modified atmosphere package at 2 C. **Food microbiology**, v. 50, p. 44-53, 2015.

PARLAPANI, Foteini F.; KORMAS, Konstantinos Ar; BOZIARIS, Ioannis S. Microbiological changes, shelf life and identification of initial and spoilage microbiota of sea bream fillets stored under various conditions using 16S rRNA gene analysis. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 12, p. 2386-2394, 2015.

PARRY R. T. (Ed.). Principles and applications of modified atmosphere packaging of foods. **Springer Science & Business Media**, 2012.

PEIXE BR. *Anuário 2025: Peixe BR da Piscicultura. 2025*. Acesso em: 08 abr. 2025.

PENG Qi *et al.* A review of biofilm formation of *Staphylococcus aureus* and its regulation mechanism. **Antibiotics**, v. 12, n. 1, p. 12, 2022.

PENNEY David G. (Ed.). Carbon monoxide toxicity. **CRC Press**, 2000.

PINCHUK Irina V.; BESWICK, Ellen J.; REYES, Victor E. Staphylococcal enterotoxins. **Toxins**, v. 2, n. 8, p. 2177-2197, 2010.

PINHEIRO, Ana Cristina De Aguiar Saldanha *et al.* The impact of gas mixtures of Argon and Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) on quality parameters of sardine (*Sardina pilchardus*) fillets during refrigerated storage. **Food Research International**, v. 115, p. 268-275, 2019.

PIVETTA A. G. *et al.* Modified atmosphere packaging in seafood: A review on microbiological and physicochemical safety. **Journal of Food Protection**, v. 86, n. 7, p. 1003-1015, 2023.

PIVETTA Natália Pavanelo *et al.* O mercado de alimentação saudável e suas tendências: um estudo a partir da percepção de gestores de santa maria-rs. *Revista de Administração, Contabilidade e Economia da Fundace*, v. 12, n. 3, 2021.

PLOYDAENG Monthanat; RAJATANAVIN, Natta; RATTANAKAEMAKORN, Ploysyne. UV-C light: A powerful technique for inactivating microorganisms and the related side effects to the skin. **Photodermatology, photoimmunology & photomedicine**, v. 37, n. 1, p. 12-19, 2021.

POPELKA, Peter *et al.* Influence of smoking and packaging methods on physicochemical and microbiological quality of smoked mackerel (*Scomber scombrus*). **Acta Veterinaria Brno**, v. 90, n. 1, p. 117-124, 2021.

PORPINO Gustavo; BOLFE, Édson Luis. Tendências de consumo de alimentos: implicações e oportunidades para o setor agroalimentar brasileiro. Informe Agropecuário. Certificação, Rastreamento e Agregação de **Valor**, v. 41, n. 311, p. 7-14, 2020.

PORTO, Yuri Duarte et al. Salmonella spp. in aquaculture: an exploratory analysis (integrative review) of microbiological diagnoses between 2000 and 2020. **Animals**, v. 13, n. 1, p. 27, 2022.

QIAN, Yun-Fang *et al.* Effects of immersing treatment of curcumin and piperine combined with vacuum packaging on the quality of salmon (*Salmo salar*) during cold chain logistics. **Frontiers in nutrition**, v. 9, p. 1021280, 2022.

QUEREDA Juan J., *et al.* Pathogenicity and virulence of *Listeria monocytogenes*: A trip from environmental to medical microbiology. **Virulence**, 2021.

RACIOPPO, Angela *et al.* Optimizing liquid smoke conditions for the production and preservation of innovative fish products. **Food Bioscience**, v. 53, p. 102712, 2023.

RAMOS, Fabiane de Cássia Pontes *et al.* Tambaqui (*Colossoma macropomum*) sous vide: characterization and quality parameters. **Ciências Agrárias**, v. 37, n. 1, p. 117-130, 2016.

RASHID N. *et al.* Enterotoxigenic methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* contamination in salted fish from Gwadar Balochistan. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e247701, 2023.

REDDY N.R., Armstrong, D.J., Rhodehamel, E.J. & Kautter, D.A.. Shelf-life extension and safety concerns about fresh fishery products packaged under modified atmospheres: a review. **Journal of Food Safety**, 12, 87–118. 1992.

REDDY N.R., Solomon, H.M. & Rhodehamel, E.J.. Comparison of margin of safety between sensory spoilage and onset of Clostridium botulinum toxin development during storage of modified atmosphere (MA)-packaged fresh marine cod fillets with MA-packaged aquacultured fish fillets. **Journal of Food Safety**, 19, 171–183. 1999.

REZAEIFAR, Maryam *et al.* Effect of chitosan edible coating enriched with lemon verbena extract and essential oil on the shelf life of vacuum rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Journal of Food Safety**, v. 40, n. 3, p. e12781, 2020.

REZENDE-DE-SOUZA Jonatã Henrique; SAVAY-DA-SILVA, Luciana Kimie. As Bases nitrogenadas voláteis totais são confiáveis para aferir o frescor de pescado?. In: Ciência e tecnologia do pescado: Uma análise pluralista. **Editores Científicos Digital**, p. 40-57.2021.

ROBERTS Brandy N. *et al.* *Listeria monocytogenes* response to anaerobic environments. **Pathogens**, v. 9, n. 3, p. 210, 2020.

ROBERTSON Gordon L. Food packaging: principles and practice. **CRC press**, 2005.

RODRIGUES, Bruna Leal *et al.* Influence of vacuum and modified atmosphere packaging in combination with UV-C radiation on the shelf life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. **Food Control**, v. 60, p. 596-605, 2016.

RODRIGUES, Bruna Leal *et al.* Modified atmosphere packaging and UV-C radiation on shelf life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Procedia Food Science**, v. 7, p. 9-12, 2016.

RUIZ W. A.; GONÇALVES, A. A. Tecnologia do Pescado: Ciência, Tecnologia, Inovação e Legislação. Rio de Janeiro. Editora Atheneu. 2a ed., p. 383, 2021.

SANDHYA. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. **LWT-Food Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 381-392, 2010.

SANTIAGO, J. de A. S. *et al.* Bactérias patogênicas relacionadas à ingestão de pescados – revisão. **Labmar**, 2013.

SANTOS R. R. D. Ocorrência, tipagem molecular e capacidade de colonização de amostras de *Salmonella enterica* em peixes nativos. **Tese de doutorado**, 2015.

SARAIVA, C.; VASCONCELOS, H.; DE ALMEIDA, José MMM. A chemometrics approach applied to Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for monitoring the spoilage of fresh salmon (*Salmo salar*) stored under modified atmospheres. **International Journal of Food Microbiology**, v. 241, p. 331-339, 2017.

SEQUINO, Giuseppina *et al.* Microbiome dynamics, antibiotic resistance gene patterns and spoilage-associated genomic potential in fresh anchovies stored in different conditions. **Food Research International**, v. 175, p. 113788, 2024.

SEZER Yasemin Çelebi *et al.* The effects of hydrogen incorporation in modified atmosphere packaging on the formation of biogenic amines in cold stored rainbow trout and horse mackerel. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 112, p. 104688, 2022.

SHAH Karishma; MAGHSOUDLOU, Panagiotis. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA): the basics. **British journal of hospital medicine**, v. 77, n. 7, p. C98-C101, 2016.

SHAMLOOFAR, M. *et al.* Antibacterial activities of nisin encapsulated in zein and modified atmosphere packaging on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet during chilled storage 4 C. **Iranian Journal of Fisheries Sciences**, v. 14, n. 2, p. 369-381, 2015.

SHARMA, A. K.; SINGH, S. P. Effect of amino acids on the repression of alkaline protease synthesis in haloalkaliphilic *Nocardiosis dassonvillei*. **Biotechnology Reports**, v. 12, p. 40–51, 2016.

SHEN, Shi-ke *et al.* Changes in food quality and microbial composition of Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedti*) fillets treated with low temperature vacuum heating method during storage at 4 C. **Food Research International**, v. 138, p. 109665, 2020.

SHER, Azam Ali *et al.* Outbreaks of foodborne *Salmonella enteritidis* in the United States between 1990 and 2015: an analysis of epidemiological and spatial-temporal trends. **International Journal of Infectious Diseases**, v. 105, p. 54–61, 2021.

SHPIGEL, Nahum Y.; ELAZAR, Sharon; ROSENSHINE, Ilan. Mammary pathogenic *Escherichia coli*. **Current Opinion in Microbiology**, v. 11, n. 1, p. 60–65, 2008.

SILBANDE Adèle *et al.* Effect of vacuum and modified atmosphere packaging on the microbiological, chemical and sensory properties of tropical red drum (*Sciaenops ocellatus*) fillets stored at 4 C. **International journal of food microbiology**, v. 266, p. 31-41, 2018.

SILBANDE, Adèle *et al.* Quality assessment of ice-stored tropical yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and influence of vacuum and modified atmosphere packaging. **Food Microbiology**, v. 60, p. 62-72, 2016.

SILBANDE, Adèle, *et al.* Effect of vacuum and modified atmosphere packaging on the microbiological, chemical and sensory properties of tropical red drum (*Sciaenops ocellatus*) fillets stored at 4 C. **International journal of food microbiology**, 266: 31-41. 2018.

SILLIKER J.H. & Wolfe, S.K. . Microbiological safety considerations in controlled-atmosphere storage of meats. **Food Technology**, 34, 59–63. 1980.

SILVA Luciana Almeida *et al.* Solubilidade e reatividade de gases. **Química nova**, v. 40, p. 824-832, 2017.

SILVA Luciana KimieSavay da *et al.* Otimização e padronização do uso da metodologia de determinação de bases nitrogenadas voláteis totais (BNVT) em camarões *Xyphopenaeus kroyeri*. In: **Book of abstracts**. 2008.

SIVARAMAN G. K. *et al.* Characterization and antibiotic resistance of *Staphylococcus aureus* isolated from seafoods in South India. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 2640, 2022.

SIVERTSVIK Morten; JEKSRUD, Willy K.; ROSNES, J. Thomas. A review of modified atmosphere packaging of fish and fishery products—significance of microbial growth, activities and safety. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 37, n. 2, p. 107-127, 2002.

SIVERTSVIK Morten. The optimized modified atmosphere for packaging of pre-rigor filleted farmed cod (*Gadus morhua*) is 63 ml/100 ml oxygen and 37 ml/100 ml carbon dioxide. **LWT-Food Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 430-438, 2007.

SIVERTSVIK, Morten; JEKSRUD, Willy K.; ROSNES, J. Thomas. A review of modified atmosphere packaging of fish and fishery products – significance of microbial growth, activities and safety. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 107–127, 2002.

SKIRNISDOTTIR, Sigurlaug *et al.* Impact of onboard chitosan treatment of whole cod (*Gadus morhua*) on the shelf life and spoilage bacteria of loins stored superchilled under different atmospheres. **Food Microbiology**, v. 97, p. 103723, 2021.

SKOWRON Krzysztof, *et al.* Comparison of selected disinfectants efficiency against *Listeria monocytogenes* biofilm formed on various surfaces. **International Microbiology**, 2018.

SKOWRON Krzysztof, *et al.* Disinfectant susceptibility of biofilm formed by *Listeria monocytogenes* under selected environmental conditions. **Microorganisms**, 2019.

SLADE A. & Davies, A.R.. Fate of foodborne pathogens on modified atmosphere packaged (MAP) cod and trout. In: *Seafood from Producer to Consumer, Integrated Approach to Quality* (edited by J.B. Luten, T. Børresen & J. Oehlenschläger). Pp. 455–461. **Amsterdam: Elsevier**. 1997.

SLOAN A. E. The Top 10 Food Trends os 2023. **Food Technology Magazine**. 2023.

SON, Na-Yeon *et al.* Anti-listeria activity of newly isolated lactic acid bacteria from fermented foods and their application to smoked salmon (Coho). **International Journal of Food Microbiology**, v. 434, p. 111148, 2025.

SØRENSEN Jonas Steenholdt *et al.* Superchilling in combination with modified atmosphere packaging resulted in long shelf-life and limited microbial growth in Atlantic cod (*Gadus morhua L.*) from capture-based-aquaculture in Greenland. **Food microbiology**, v. 88, p. 103405, 2020.

SØRENSEN, Jonas Steenholdt *et al.* Thawed and chilled Atlantic cod (*Gadus morhua L.*) from Greenland-Options for improved distribution. **LWT**, v. 131, p. 109473, 2020.

SØRHEIM Oddvin; AUNE, Tore; NESBAKKEN, Truls. Technological, hygienic and toxicological aspects of carbon monoxide used in modified-atmosphere packaging of meat. **Trends in Food Science & Technology**, v. 8, n. 9, p. 307-312, 1997.

SØRHEIM Oddvin; NISSEN, Hilde; NESBAKKEN, Truls. The storage life of beef and pork packaged in an atmosphere with low carbon monoxide and high carbon dioxide. **Meat science**, v. 52, n. 2, p. 157-164, 1999.

SOULTOS N., Abraham, A., Papageorgiou, K., Steris, V., Incidence of *Listeria* spp. in fish and environment of fish markets in Northern Greece. **Food Control** 18 (5), 554–557. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.01.006>. 2007.

SRINIVASAN Ramya *et al.* Use of 16S rRNA gene for identification of a broad range of clinically relevant bacterial pathogens. **PloS one**, v. 10, n. 2, p. e0117617, 2015.

STELZL Tamara *et al.* European food safety research: An explorative study with funding experts' consultation. **Heliyon**, v. 9, n. 12, 2023.

STRATFORD Malcolm *et al.* Weak-acid preservatives: pH and proton movements in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. **International journal of food microbiology**, v. 161, n. 3, p. 164-171, 2013.

SUN, Liyun *et al.* Supermarket trends for rainbow and steelhead trout products: Evidence from scanner data. **Aquaculture Reports**, v. 30, p. 101579, 2023.

SUN, Yingying *et al.* Improvement of the quality stability of vacuum-packaged fermented fish (*Suanyu*) stored at room temperature by irradiation and thermal treatments. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 1, p. 224-232, 2021.

SWANSON, Danielle; BLOCK, Robert; MOUSA, Shaker A. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: health benefits throughout life. **Advances in nutrition**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2012.

SYROPOULOU, Faidra *et al.* Microbiota succession of whole and filleted european sea bass (*Dicentrarchus labrax*) during storage under aerobic and MAP conditions via 16S rRNA gene high-throughput sequencing approach. **Microorganisms**, v. 10, n. 9, p. 1870, 2022.

TABIT Frederick Tawi. Contamination, prevention and control of *Listeria monocytogenes* in food processing and food service environments. **Listeria monocytogenes**, 2018.

TACK Danielle M. *et al.* Shiga toxin-producing *Escherichia coli* outbreaks in the United States, 2010–2017. **Microorganisms**, v. 9, n. 7, p. 1529, 2021.

TANG, Silin *et al.* Transcriptomic analysis of the adaptation of *Listeria monocytogenes* to growth on vacuum-packed cold smoked salmon. **Applied and environmental microbiology**, v. 81, n. 19, p. 6812-6824, 2015.

TANIWAKI M. H. *et al.* Growth and mycotoxin production by food spoilage fungi under high carbon dioxide and low oxygen atmospheres. **International journal of food microbiology**, v. 132, n. 2-3, p. 100-108, 2009.

TAVARES Jéssica *et al.* Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies. **Foods**, v. 10, n. 4, p. 780, 2021.

TEKLEMARIAM Addisu D., *et al.* Human salmonellosis: a continuous global threat in the farm-to-fork food safety continuum. **Foods**, 2023.

TIMORACKÁ, Ivana *et al.* Microbiological quality assessment of rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) meat treated with rosemary and thyme dried herbs and essential oils. **Journal of microbiology, biotechnology and food sciences**, v. 14, n. 2, p. e11157-e11157, 2024.

TODD E. C. D.; NOTERMANS, S. Epidemiology of *Listeria monocytogenes* outbreaks. **International Journal of Food Microbiology**, v. 178, p. 12-25, 2023.

TOMKINS R. G. *et al.* The inhibition of the growth of meat-attacking fungi by carbon dioxide. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 51, 1932.

TSOUKALAS, Dionysios *et al.* The effect of fishing season and storage conditions on the quality of European plaice (*Pleuronectes platessa*). **LWT**, v. 170, p. 114083, 2022.

UCHOI, Devananda *et al.* Quality changes in Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) during preservation with saturated brine fermentation technique. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 10, p. e15996, 2021.

VALLIM Deyse Christina, *et al.* Twenty years of *Listeria* in Brazil: occurrence of *Listeria* species and *Listeria monocytogenes* serovars in food samples in Brazil between 1990 and 2012. **Bio Med Research International**, 2015.

VÁZQUEZ-BOLAND J. A. *et al.* *Listeria* pathogenesis and virulence factors. **Clinical Microbiology Reviews**, v. 36, n. 1, p. e00027-23, 2023.

VISCIANO, Pierina *et al.* Histamine poisoning and control measures in fish and fishery products. **Frontiers in microbiology**, v. 5, p. 500, 2014.

WANG, Zeneng et al. Circulating trimethylamine N-oxide levels following fish or seafood consumption. **European journal of nutrition**, v. 61, n. 5, p. 2357-2364, 2022.

WANG Zhiding, et al. Tim-3 promotes *Listeria monocytogenes* immune evasion by suppressing major histocompatibility complex class I. **The Journal of infectious diseases**, 2020.

WHO. Foodborne Diseases Estimates. Geneva: WHO, 2015.

WHO. *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods: Risk assessment. Geneva: WHO, 2021.

WIERNASZ, Norman et al. Effect of the manufacturing process on the microbiota, organoleptic properties and volatilome of three salmon-based products. **Foods**, v. 10, n. 11, p. 2517, 2021.

WIERNASZ, Norman, et al. Salmon gravlax biopreservation with lactic acid bacteria: A polyphasic approach to assessing the impact on organoleptic properties, microbial ecosystem and volatilome composition. **Frontiers in Microbiology**, 10: 3103. 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), et al. *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat (RTE) food: attribution, characterization and monitoring: meeting report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022.

WHO. *E. coli*. FactSheet, 2018. Disponível em: [https://www-who-int.translate.goog/news-room/fact-sheets/detail/e-coli?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-who-int.translate.goog/news-room/fact-sheets/detail/e-coli?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc). Acesso em: 11 abr. 2025.

WHO. Foodborne diseases burden: Global estimates 2022. Geneva: WHO, 2022.

WU Long, et al. Application of nano-ELISA in food analysis: Recent advances and challenges. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, , 113: 140-156. 2019.

YAN, Qi et al. Molecular characterization of spoilage microbiota in high CO<sub>2</sub> refrigerated large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillets using metagenomic and metabolomic approaches. **Food Bioscience**, v. 56, p. 103227, 2023.

YANG, Yufei et al. Use of bacteriocin-producing lactic acid bacteria to control *Listeria monocytogenes*: mechanisms, efficacy and challenges. **Postharvest Biology and Technology**, v. 210, p. 112857, 2024.

YILDIZ, Pinar Oğuzhan. Effect of essential oils and packaging on hot smoked rainbow trout during storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 806-815, 2015.

YILDIZ, Pinar Oğuzhan. Combine effects of essential oils and packaging on smoked rainbow trout stored 4 C. **Packaging Technology and Science**, v. 28, n. 12, p. 987-997, 2015.

YUE Gen Hua et al. Aquaculture species diversification in China. **Aquaculture and Fisheries**, v. 9, n. 2, p. 206-217, 2024.

ZAKRZEWSKI A. J., Gajewska, J., Chajęcka-Wierzchowska, W., Załuski, D., & Zadernowska, A. Prevalence of *Listeria monocytogenes* and other *Listeria* species in fish, fish products and fish processing environment: A systematic review and meta-analysis. **Science of the Total Environment**, 907, 167912. 2024.

ZAKRZEWSKI Arkadiusz Józef, *et al.* Prevalence of *Listeria monocytogenes* and other *Listeria* species in fish, fish products and fish processing environment: A systematic review and meta-analysis. **Science of the Total Environment**, 2024.

ZHANG Jingbin *et al.* Characterization of the microbial composition and quality of lightly salted grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets with vacuum or modified atmosphere packaging. **International Journal of Food Microbiology**, v. 293, p. 87-93, 2019.

ZHANG S. *et al.* High prevalence of multidrug-resistant *Escherichia coli* in retail aquatic products in China and the first report of mcr-1-positive extended-spectrum  $\beta$ -lactamase-producing *E. coli* ST2705 and ST10 in fish. **International Journal of Food Microbiology**, v. 408, p. 110449, 2024.

ZHANG, Caili *et al.* Quorum sensing involved in the spoilage process of the skin and flesh of vacuum-packaged farmed turbot (*Scophthalmus maximus*) stored at 4° C. **Journal of Food Science**, v. 81, n. 11, p. M2776-M2784, 2016.

ZHANG, Jingbin *et al.* Effects of oregano essential oil and nisin on the shelf life of modified atmosphere packed grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). **Lwt**, v. 147, p. 111609, 2021.

ZHANG, Lu *et al.* Exploration of changes in sensory, physicochemical properties and microbial metabolic activities of grass carp meat with five thermal processing treatments during refrigerated storage. **Food Chemistry: X**, v. 23, p. 101662, 2024.

ZHANG, Qi *et al.* Diversity and succession of the microbial community and its correlation with lipid oxidation in dry-cured black carp (*Mylopharyngodon piceus*) during storage. **Food Microbiology**, v. 98, p. 103686, 2021.

ZHUANG Shuai *et al.* Spoilage-related microbiota in fish and crustaceans during storage: Research progress and future trends. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 1, p. 252-288, 2021.