REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

COMPARAÇÃO EXPLORATÓRIA DE PROTOCOLOS CONVENCIONAIS E EMERGENTES DE DESCONGELAMENTO DE FILÉS DE TILÁPIA-DO-NILO

EXPLORATORY COMPARISON OF CONVENTIONAL AND EMERGING THAWING PROTOCOLS FOR NILE TILAPIA FILLETS

COMPARACIÓN EXPLORATORIA DE PROTOCOLOS CONVENCIONALES Y EMERGENTES DE DESCONGELACIÓN DE FILETES DE TILAPIA DEL NILO

Indira Maria Estolano Macedo
Doutoranda em Recursos Pesqueiros, UFRPE, Brasil
E-mail: indira.macedo@ufrpe.br

Allan Matheus de Souza Silva
Mestrando em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, UFRPE, Brasil
E-mail: allan.matheus@ufrpe.br

Neide Kazue Sakugawa Shinohara
Doutora em Biotecnologia, UFRPE, Brasil
E-mail: neide.shinohara@ufrpe.br

Paulo Roberto Campagnoli de Oliveira Filho
Doutor em Aquicultura, UFRPE, Brasil
E-mail: paulo.coliveirafo@ufrpe.br

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de métodos de descongelamento convencionais e emergentes sobre a cinética do processo e os parâmetros físico-químicos e texturais de filés de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*). Foi avaliado o descongelamento dos filés sob refrigeração (DAR), por imersão em água a 4 °C (DAG), por micro-ondas (DMI) e por ultrassom (DUS), tendo como controle o filé fresco (FRESH). O DMI apresentou o menor tempo para atingir 4 °C (3,5 min), porém foi associado à menor capacidade de retenção de água (CRA = 54,23%) e ao aumento da dureza dos filés. O DAR demandou tempo prolongado (660 min), gerando menor pH (6,35) e maior luminosidade (L* = 62,60). O DAG registrou a maior perda por exsudação (*drip loss*: 2,55%). Já o DUS destacou-se como o tratamento mais equilibrado, preservando a CRA (80,40%) e o pH (6,65) em níveis equivalentes aos do filé fresco (77,60% e 6,64, respectivamente), além de proporcionar a maior retenção da cor vermelha (a* = 7,90). O estudo indica que o descongelamento por ultrassom (DUS) é, dentre os métodos testados, o que demonstrou maior potencial tecnológico para investigações futuras em maior escala.

Palavras-chave: *Oreochromis niloticus*; Descongelamento por ultrassom; Tecnologias emergentes; Processamento de peixes; Qualidade físico-química.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of conventional and emerging thawing methods on process kinetics, as well as on the physicochemical and textural parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets. Fillet thawing was evaluated under refrigeration (DAR), by water immersion at 4 °C (DAG), by microwave (DMI), and by ultrasound (DUS), using fresh fillets as a control (FRESH). DMI showed the shortest time to reach 4 °C (3.5 min) but was associated with the lowest water holding capacity (WHC = 54.23%) and increased fillet hardness. DAR required a prolonged time (660 min), resulting in lower pH (6.35) and higher lightness (L* = 62.60). DAG recorded the highest drip loss (2.55%). On the other hand, DUS stood out as the most balanced treatment, preserving WHC (80.40%) and pH (6.65) at levels equivalent to those of fresh fillets (77.60% and 6.64, respectively), in addition to providing the highest retention of red color (a* = 7.90). The study indicates that ultrasound thawing (DUS) showed the highest technological potential among the tested methods for future investigations on a larger scale.

Keywords: *Oreochromis niloticus*; Ultrasound-assisted thawing; Emerging technologies; Fish processing; Physicochemical quality.

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de métodos de descongelación convencionales y emergentes sobre la cinética del proceso y los parámetros fisicoquímicos y texturales de filetes de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Se evaluó la descongelación de los filetes bajo refrigeración (DAR), por inmersión en agua a 4 °C (DAG), por microondas (DMI) y por ultrasonido (DUS), utilizando como control el filete fresco (FRESH). El DMI presentó el menor tiempo para alcanzar los 4 °C (3,5 min), pero estuvo asociado con la menor capacidad de retención de agua (CRA = 54,23%) y con el aumento de la dureza de los filetes. El DAR requirió un tiempo prolongado (660 min), generando un menor pH (6,35) y una mayor luminosidad (L* = 62,60). El DAG registró la mayor pérdida por exudación (drip loss: 2,55%). Por su parte, el DUS se destacó como el tratamiento más equilibrado, preservando la CRA (80,40%) y el pH (6,65) en niveles equivalentes a los del filete fresco (77,60% y 6,64, respectivamente), además de proporcionar la mayor retención del color rojo (a* = 7,90). El estudio indica que la descongelación por ultrasonido (DUS) es, de los métodos probados, el que demostró mayor potencial tecnológico para investigaciones futuras a mayor escala.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*; Descongelación asistida por ultrasonido; Tecnologías emergentes; Procesamiento de pescado; Calidad fisicoquímica.

1. Introdução

A tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) é uma das espécies mais relevantes para a aquicultura mundial, destacando-se pela elevada taxa de crescimento, adaptabilidade a diferentes sistemas de cultivo e alto valor nutricional (Khalil; Nasr-Allah, 2025). No Brasil, essa espécie representa cerca de 70% da produção de peixes cultivados (PEIXE BR, 2026) e é amplamente comercializada na forma de filés, devido à sua elevada aceitação pelo consumidor e às suas características sensoriais e nutricionais favoráveis (Santos et al., 2022). Entretanto, o pescado é

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

altamente perecível em função do elevado teor de umidade, da abundância de nutrientes e da alta atividade de água, fatores que favorecem o crescimento microbiano e a ocorrência de reações bioquímicas que comprometem sua qualidade durante o armazenamento (Cortés-Sánchez et al., 2024). Devido a estas características, o pescado necessita de métodos de conservação eficientes para aumentar a sua vida útil.

O congelamento é um dos métodos mais utilizados para a conservação do pescado, por sua capacidade de retardar reações enzimáticas e o crescimento microbiano, prolongando a vida útil do produto (Walayat et al., 2023; Syanya et al., 2023). No entanto, esse processo pode provocar alterações estruturais no tecido muscular devido à formação de cristais de gelo, resultando em perda de exsudato (*drip loss*), modificações na textura e redução da capacidade de retenção de água após o descongelamento (Qiao et al., 2021; Strateva et al., 2021). Esses efeitos são mais pronunciados em produtos na forma de filés, que apresentam maior área superficial e menor integridade estrutural em comparação ao peixe inteiro (Liu et al., 2022).

O descongelamento constitui uma etapa crítica para a manutenção da qualidade do pescado, podendo intensificar os danos estruturais induzidos pelo congelamento. Durante esse processo, ocorrem alterações físico-químicas relevantes, incluindo variações de pH, alterações na coloração, redução da capacidade de retenção de água e perda de firmeza na textura (Suárez-Medina et al., 2024). Além disso, métodos inadequados ou lentos de descongelamento podem agravar a perda de qualidade, promovendo intensa exsudação e heterogeneidade estrutural no músculo (James et al., 2017).

Os métodos convencionais de descongelamento, como no ar, em água e sob refrigeração, são amplamente utilizados, porém apresentam limitações relacionadas ao tempo prolongado de processo e à distribuição não uniforme de calor, o que pode resultar em perdas adicionais de qualidade (Wang et al., 2021; I., 2024). Nesse contexto, tecnologias emergentes têm sido investigadas com o objetivo de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

aperfeiçoar o processo e minimizar tais impactos. O descongelamento por micro-ondas, por exemplo, promove aquecimento rápido, mas pode resultar em distribuição térmica heterogênea, sobrecozimento pontual e dificuldade no controle da temperatura (James et al., 2017; Jia et al., 2018).

O ultrassom vem sendo aplicado em diferentes etapas do processamento de alimentos, incluindo congelamento e descongelamento com a redução dos tempos de processo. Além disso, auxilia na manutenção da cor, na estabilidade do pH e na preservação da textura e da retenção de água em matrizes alimentares (Li et al., 2019; Li et al., 2024).

Embora o ultrassom tenha demonstrado potencial promissor em processos de descongelamento de alimentos, estudos comparativos envolvendo protocolos convencionais e emergentes aplicados a filés de tilápia-do-Nilo ainda são escassos, principalmente aqueles que avaliam a evolução do perfil térmico e a preservação físico-química do músculo. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo comparar o efeito de diferentes protocolos de descongelamento, convencionais (refrigeração e imersão em água) e emergentes (micro-ondas e ultrassom), sobre a cinética do processo e os parâmetros de qualidade físico-químicos e texturais de filés de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*).

2. Metodologia

2.1 Obtenção e processamento da matéria-prima

Os filés de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) foram adquiridos no comércio varejista da Região Metropolitana do Recife - PE em outubro de 2025. Todas as amostras pertenciam ao mesmo lote comercial e foram adquiridas a granel sob refrigeração (4 °C), acondicionadas em embalagens de primeiro uso. Após a aquisição, os filés foram imediatamente acondicionados em caixas térmicas contendo gelo em escamas e transportados ao Laboratório de Tecnologia do Pescado (LATPESC), do Departamento de Pesca e Aquicultura da UFRPE, Recife - PE.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

No laboratório, o lote composto por 15 filés (220 ± 18,87g) de foi dividido em cinco grupos de três filés. Cada grupo foi constituído por três filés independentes (n = 3), representando as réplicas biológicas do delineamento experimental.

O primeiro grupo (FRESH) foi avaliado imediatamente após a aquisição. As demais amostras foram acondicionadas individualmente em sacos herméticos do tipo *ziplock*, com a remoção prévia e manual do ar residual antes do selamento e posteriormente submetidas ao congelamento em freezer a -80 ± 2 °C por 24 horas e, posteriormente, armazenadas em freezer (-22 ± 2 °C) por 30 dias até a aplicação dos tratamentos de descongelamento (Figura 1). Para as análises físico-químicas subsequentes, cada réplica biológica foi analisada individualmente, totalizando três leituras por grupo experimental (n = 3).

Figura 1. Fluxograma experimental da preparação de filés de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), incluindo o grupo controle (FRESH) e os diferentes métodos de descongelamento: DUS (ultrassom), DAG (imersão em água), DMI (micro-ondas) e DAR (descongelamento sob refrigeração).



Fonte: Imagem criada com BioRender.com

2.2 Planejamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado contendo cinco grupos de avaliação: filé fresco (FRESH, grupo controle) e quatro tratamentos de descongelamento: refrigeração (DAR), imersão em água (DAG),

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

micro-ondas (DMI) e assistido por ultrassom (DUS). Cada tratamento foi composto por três (n=3) réplicas biológicas de filé de tilápia e os ensaios físico-químicos foram em triplicata por replica biológica.

Todos os dados do estudo foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade de variância. Quando atendidos os pressupostos, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão, em que médias seguidas por letras minúsculas distintas indicam diferença estatística significativa entre os tratamentos. Todas as análises foram realizadas utilizando o software Jamovi 2.2.5.

2.3 Métodos de descongelamento

- **Descongelamento em ar estático (DAR):** As amostras foram mantidas em refrigerador comercial à temperatura de 4 ± 1 °C, até o completo descongelamento.
- **Descongelamento por imersão em água (DAG):** As amostras foram imersas individualmente em banho de água estática, mantido à temperatura inicial de 4 ± 1ºC, utilizando-se um recipiente plástico com capacidade de 2 L e dimensões de 28×20 cm. A água não foi termostatizada, circulada ou substituída durante o procedimento, e o conjunto foi mantido sob refrigeração à temperatura de 4 ± 1ºC, até o completo descongelamento do filé.
- **Descongelamento no micro-ondas (DMI):** As amostras foram colocadas em forno de micro-ondas (Consul CMS46AB, Brasil, 900 W), utilizando 20% da potência (180 W), sendo aplicados ciclos de 30 s com inversão das amostras entre os lados.
- **Descongelamento assistido por ultrassom (DUS):** As amostras foram dispostas individualmente (um filé por vez) em banho ultrassônico (Elmasonic, modelo E 60 H, Elma Schmidbauer GmbH, Singen, Alemanha), com volume

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

útil de 5,75 L, dimensões da cuba de 300 × 151 × 150 mm e dimensões do cesto de 255 × 115 × 75 mm, operado com potência nominal de 100 W (densidade de potência nominal de ~17,39 W/L) e frequência nominal de trabalho de 37 kHz. A cuba foi preenchida com água destilada (sem tratamento de desgaseificação prévia) com temperatura inicial de 1 ± 1 °C como meio de transmissão das ondas ultrassônicas. As amostras foram posicionadas no centro do cesto de aço inoxidável suspenso, sem contato com as paredes ou o fundo da cuba. O processo ocorreu em condição estática, sem circulação ou refrigeração ativa contínua, ficando o meio aquoso sujeito ao aquecimento gradual decorrente da dissipação de energia acústica. O procedimento foi mantido até que o centro térmico da amostra atingisse a temperatura alvo de 4 ± 1 °C.

2.4 Cinéticas de descongelamento

Para monitorar as mudanças de temperatura durante o processo de descongelamento dos filés de tilápia congelados, foi utilizado um termômetro tipo espeto (Incoterm, modelo 9791 Plus, Brasil). A sonda metálica foi inserida no centro geométrico da porção mais espessa do filé até que a temperatura atingisse 4 ± 1 °C. A definição desta temperatura como *endpoint* térmico justifica-se pela garantia de fusão completa dos cristais de gelo residuais no centro da matriz pré-requisito para a padronização das análises físico-químicas, além de atender ao limite de refrigeração segura para pescado, prevenindo a proliferação microbiana. O tempo total de descongelamento foi registrado, sendo obtida a curva de descongelamento. Esse monitoramento de ponto único serviu para padronizar o tempo final de processo entre os tratamentos, não sendo utilizado para inferir a distribuição espacial da temperatura ou a ausência de zonas de superaquecimento.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

2.5 Análises físico-químicas pós-descongelamento

2.5.1 Cor Instrumental

A análise de cor foi realizada em superfície usando um colorímetro portátil modelo CR 400 (Konica Minolta, Tóquio, Japão) calibrado com o padrão branco antes de cada análise. O equipamento foi operado com iluminação de Y = 92,78; x = 0,3139; e y = 0,3200, ângulo de observação de 2° e área de medição de 8 mm de diâmetro. A cor foi expressa pelo sistema CIELab — parâmetros “Commission Internationale de l'Éclairage”: L* (luminosidade), a* (intensidade do vermelho ao verde) e b* (intensidade do amarelo ao azul). A diferença total de cor (ΔE*) entre as amostras submetidas aos diferentes métodos de descongelamento e o controle fresco (FRESH) foi calculada conforme a norma ISO/CIE ISO/CIE 11664-4:2019 utilizando a Equação:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Em que: $\Delta L^* = L^*_{\text{amostra}} - L^*_{\text{FRESH}}$, $\Delta a^* = a^*_{\text{amostra}} - a^*_{\text{FRESH}}$ e $\Delta b^* = b^*_{\text{amostra}} - b^*_{\text{FRESH}}$. Valores de ΔE* > 3,5 foram adotados como limiar para variações cromáticas visíveis a olho nu.

2.5.2 pH

O pH foi determinado com auxílio de um potenciômetro (R-TEC-7-MP, Tecnal, Piracicaba, São Paulo, Brasil), por imersão do eletrodo em uma solução contendo 10 g de filé de tilápia do Nilo moído e 40 mL de água destilada (Oliveira Filho et al., 2012).

2.5.3 Capacidade de Retenção de Água (CRA)

A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada de acordo com a metodologia adaptada de Grau e Hamm (1953). Amostras dos filés $(5{,}0 \pm 0{,}1$ g)

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

foram envolvidas em papel filtro de celulose (80 g/m^2; Unifil®) e submetidas à centrifugação a $1.500 \times g$ por 10 min a 4°C. Os resultados foram expressos em porcentagem de retenção de água (%), calculados a partir da massa inicial da amostra (m_i) e da massa final após a centrifugação (m_f), conforme a equação:

$$CRA\ (\%)\ = (mf/mi)\ \times\ 100$$

Em que:

CRA = Capacidade de Retenção de Água (%);

m_i = Massa inicial da amostra de filé antes da centrifugação (g);

m_f = Massa final da amostra de filé após a centrifugação (g).

2.5.4 Perda por exsudação (*Drip loss*) pós-descongelamento

A perda por exsudação (*Drip loss*) pós-descongelamento foi determinada segundo metodologia adaptada de Zuanazzi et al. (2019). O parâmetro avalia a liberação contínua de exsudato da matriz muscular durante o armazenamento sob refrigeração pós-descongelamento. Amostras dos filés (15,0 ± 0,5 g) foram acondicionadas em funis acoplados a tubos de coleta tipo micro-Kjeldahl, vedadas com filme plástico para evitar evaporação e mantidas sob armazenamento refrigerado (6 ± 1 °C) por 48 h. Após esse período, os filés foram removidos, suavemente secos com papel absorvente e novamente pesados. Os resultados foram expressos em porcentagem de perda de massa (%), calculados conforme a Equação:

$$Drip\ loss\ (\%) = (mi\ -\ mf)/mi\ \times\ 100$$

Em que:

Drip Loss = Perda por exsudação (%);

m_i = Massa inicial da amostra de filé descongelado (g);

m_f = Massa final da amostra de filé após 48 h de gotejamento (g).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Nota: Esta análise aplica-se exclusivamente às amostras submetidas aos processos de congelamento e descongelamento, não sendo mensurada para o grupo controle fresco (FRESH).

2.5.5 Perfil de Textura Instrumental (TPA)

O perfil de textura instrumental (TPA) foi determinado em texturômetro (CT3 Texture Analyser, Brookfield®). Os filés foram comprimidos a 50% da espessura total com velocidade de pré-teste, teste e pós-teste de 2 mm/s à temperatura de 25 °C, de acordo com a metodologia de Bourne (2002). Os parâmetros avaliados foram: dureza (N, força máxima de compressão no primeiro ciclo), coesividade (adimensional, razão entre a área do segundo ciclo e a área do primeiro ciclo, A_2/A_1) e elasticidade (mm, distância de recuperação da altura da amostra entre o término do primeiro e o início do segundo ciclo de compressão).

3. Resultados e Discussão

3.1 Cinéticas de descongelamento

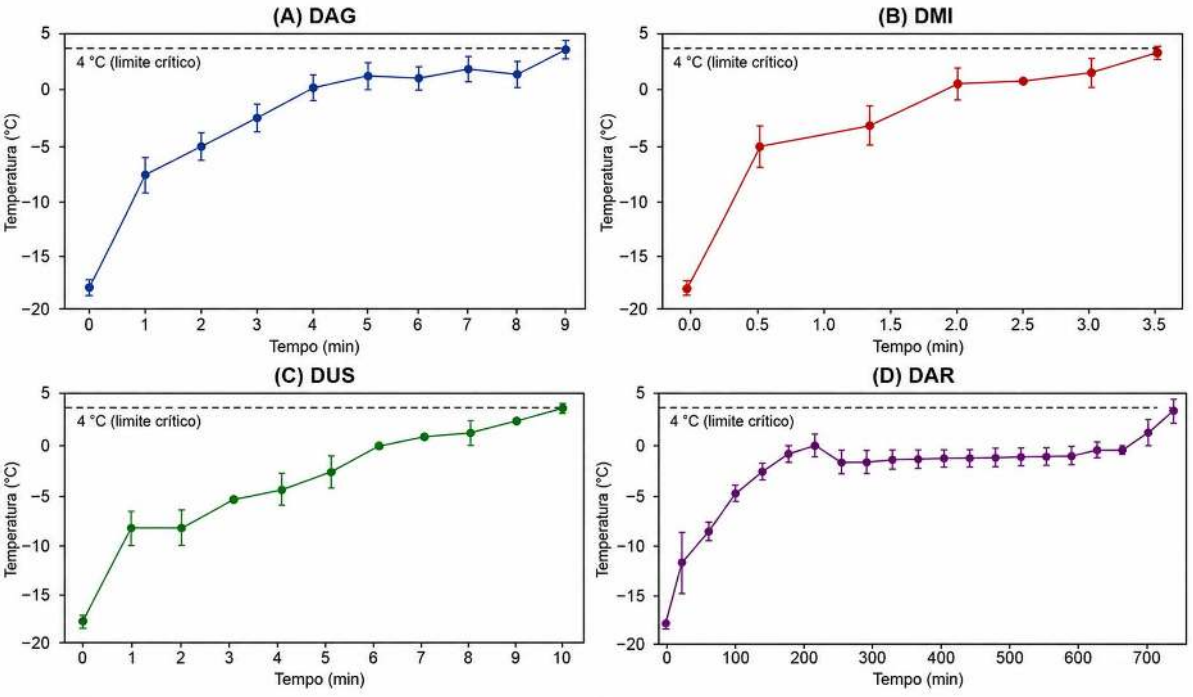
As curvas de descongelamento dos filés de tilápia do Nilo estão apresentadas na Figura 2, evidenciando a influência dos diferentes métodos sobre o tempo necessário para que as amostras atingissem a temperatura final de 4 °C. O tempo necessário para atingir o *endpoint* térmico de 4 °C seguiu a seguinte ordem crescente: DMI (3,5 min) < DAG (9 min) ≈ DUS (10 min) < DAR (660 min).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Figura 2 — Variação de temperatura de filés de tilápia do Nilo durante o descongelamento por diferentes métodos: (A) DAG - imersão em água (4 °C), (B) DMI - micro-ondas, (C) DUS - ultrassom e (D) DAR - refrigeração, considerando a temperatura final de 4 °C.



Fonte: Autores (2026).

As curvas de descongelamento refletem a influência dos métodos na transferência de calor e na uniformidade do processo (Sun et al., 2024). Métodos convencionais, como descongelamento por imersão em água refrigerada e sob refrigeração, são amplamente empregados devido à praticidade e viabilidade operacional (Koç et al., 2025). No presente estudo, o DAG promoveu aquecimento mais rápido em comparação ao DAR, que apresentou o maior tempo de processo (660 min). Contudo, esses métodos exigem maior tempo total de exposição quando comparados às tecnologias emergentes, o que pode favorecer o comprometimento da integridade textural e físico-química do tecido muscular do pescado (Wang et al., 2021).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Em comparação aos métodos convencionais, técnicas como micro-ondas e ultrassom promovem redução significativa do tempo de descongelamento, demonstrando maior eficiência térmica (Li et al., 2025). O descongelamento por micro-ondas (DMI) apresentou o menor tempo para atingir 4 °C (3,5 min), evidenciando elevada rapidez. Esse comportamento está associado à interação das ondas eletromagnéticas com moléculas polares do tecido muscular, promovendo a conversão de energia em calor por meio de fricção molecular (Sun et al., 2024). Entretanto, o aquecimento por micro-ondas ocorre de forma não homogênea, podendo ocasionar regiões de superaquecimento e danos texturais ao músculo (Koç et al., 2025). Padrão semelhante foi relatado por Zhang et al. (2024) ao avaliarem o descongelamento por micro-ondas em outra matriz aquática (*Amphioctopus neglectus*), na qual a redução no tempo de processo também resultou em distribuição térmica heterogênea e alterações na musculatura.

O protocolo de descongelamento por ultrassom (DUS) foi associado a um tempo intermediário de descongelamento (10 min) entre os protocolos avaliados. Esse comportamento pode estar relacionado aos mecanismos de cavitação acústica descritos na literatura, os quais são apontados por intensificar a transferência de calor e massa (Yang et al., 2024). Em estudo com camarão-cinza (*Litopenaeus vannamei*), Sun et al. (2024) observaram que o uso do ultrassom aumentou a taxa de descongelamento e promoveu maior uniformidade térmica. De forma semelhante, Li et al. (2020) verificaram que o ultrassom reduziu o tempo de descongelamento de filés de carpa-cabeça-grande (*Aristichthys nobilis*) para aproximadamente 12 min, enquanto a imersão em água exigiu cerca de 30 min. No presente estudo, o protocolo DUS apresentou tempo de descongelamento comparável à imersão em água e substancialmente inferior à refrigeração, embora tenha sido mais lento que o micro-ondas.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

3.2 pH

O pH é um dos principais indicadores da qualidade do pescado, refletindo alterações bioquímicas decorrentes dos processos *post-mortem*, da degradação proteica e da estabilidade química do músculo (Yang et al., 2024). O método de descongelamento influenciou significativamente ($p < 0,05$) o pH dos filés de tilápia-do-Nilo (Tabela 1). O tratamento DUS apresentou valores estatisticamente semelhantes aos da amostra FRESH, os métodos DAG e DMI não apresentaram diferença significativa entre si e resultaram nos maiores valores de pH, enquanto o tratamento DAR resultou no menor valor observado.

Tabela 1 — Efeito dos métodos de descongelamento sobre o pH e a cor instrumental (L*, a*, b*) de filés de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*).

Parâmetros	**Métodos de Descongelamento**				
	DUS	**DMI**	**DAG**	**DAR**	**FRESH**
pH	6,65 ± 0,01^{b}	6,68 ± 0,01^{a}	6,69 ± 0,01^{a}	6,35 ± 0,00^{c}	6,64 ± 0,01^{b}
*L**	51,86 ± 1,84^{c}	50,90 ± 3,23^{c}	54,60 ± 5,63^{b}	62,60 ± 3,91^{a}	52,88 ± 0,58 ^{bc}
*a**	7,90 ± 1,86^{b}	6,02 ± 2,75^{bc}	6,47 ± 2,42^{bc}	5,04 ± 1,28^{c}	15,55 ± 0,57^{a}
*b**	21,83 ± 1,23^{a}	21,99 ± 2,32^{a}	12,93 ± 2,15^{b}	12,91 ± 0,65^{b}	8,30 ± 0,06^{c}
ΔE*	15,58±1,15^{ab}	16,80±0,98^{a}	10,34±1,20^{c}	15,04±1,45^{b}	—

[1]DUS (descongelamento com ultrassom); DAG (descongelamento em água); DMI (descongelamento por micro-ondas); DAR (descongelamento no ar); FRESH (amostra fresca de controle). [2] Letras minúsculas na mesma linha indicam diferença significativa entre tratamentos pelo teste de Tukey ao nível de 5% de confiança. [3] ΔE*: Diferença total de cor calculada em relação à amostra fresca (FRESH).

No protocolo DUS, a manutenção da estabilidade do pH foi associada a variações menos acentuadas nos parâmetros físico-químicos de deterioração muscular, sendo que mecanismos de cavitação descritos na literatura podem

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

contribuir para esse comportamento durante o descongelamento, minimizando alterações bioquímicas e estruturais (Sun et al., 2024). Resultados semelhantes foram descritos por Ugalde-Torres et al. (2024) em filés de tilápia e por Li et al. (2024) em camarões (*Litopenaeus vannamei*), sugerindo que o protocolo assistido por ultrassom auxilia na preservação da estabilidade química muscular em níveis próximos aos do produto fresco.

Por outro lado, os maiores valores de pH observados nos protocolos DMI e DAG podem estar relacionados a alterações nas proteínas miofibrilares, induzidas pelo aquecimento heterogêneo do micro-ondas e pelas trocas de massa durante a imersão em água (Li et al., 2024). O menor valor de pH verificado no protocolo DAR pode refletir o tempo prolongado sob refrigeração (660 min), o qual pode favorecer a continuidade dos processos glicolíticos *post-mortem* residuais e o acúmulo de metabólitos ácidos no tecido muscular (Yang et al., 2024).

Com relação às variações observadas entre os tratamentos, atenderam integralmente ao limite regulamentar, mantendo-se abaixo do limite máximo de pH de 7,00 estabelecido pelo Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal — RIISPOA (Art. 211 do Decreto nº 9.013/2017), atestando a conformidade legal e o frescor das amostras submetidas aos diferentes protocolos.

3.3 Cor Instrumental

A cor é uma propriedade determinante para a aceitação do pescado pelo consumidor, sendo influenciada pela integridade do tecido muscular, distribuição de água na superfície do filé e modificações na reflexão da luz (Yang et al., 2024). Os protocolos de descongelamento influenciaram significativamente os parâmetros de cor L* (luminosidade), a* (intensidade de vermelho) e b* (intensidade de amarelo) dos filés de tilápia-do-Nilo ($p < 0,05$; Tabela 1).

Os protocolos DAR e DAG resultaram nos maiores valores de L^*, conferindo aos filés um aspecto mais claro e descorado em comparação aos protocolos DUS,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

DMI e à amostra fresca (FRESH). Esse aumento da luminosidade nos protocolos DAR e DAG pode estar associado à presença de água livre na superfície do músculo, que modifica o índice de refração e intensifica a dispersão da luz incidente (Verma et al., 2025). Em contrapartida, os valores de L* nos protocolos DUS e DMI permaneceram próximos aos da amostra fresca ($p > 0,05$), sugerindo menor alteração na superfície da amostra e menor liberação de exsudato visível, o que pode estar relacionado à maior rapidez e uniformidade do processo descrito para sistemas assistidos por ultrassom (Sun et al., 2024; Ugalde-Torres et al., 2024).

O FRESH apresentou o maior valor de a*. Dentre os protocolos de descongelamento, o protocolo DUS apresentou a maior média para a intensidade de vermelho, diferindo significativamente do protocolo DAR, porém mantendo-se estatisticamente semelhante aos protocolos DAG e DMI ($p>0,05$). Essa retenção intermediária no protocolo DUS pode estar relacionada ao menor tempo de exposição ao processo, reduzindo os pigmentos em comparação ao DAR.

Para o parâmetro b*, os maiores valores foram observados nos protocolos DUS e DMI, os quais diferiram significativamente ($p < 0,05$) dos protocolos DAG, DAR e do controle FRESH. O aumento acentuado de b* nesses tratamentos pode estar associado a modificações na superfície da carne, decorrentes do banho ultrassônico e da imersão em água, alterando a refletância da luz e concentrando pigmentos na superfície (Li et al., 2024; Verma et al., 2025).

A avaliação integrada dos vetores de cor mostrou uma diferença total de cor (ΔE^*) no tratamento ultrassônico, assim como nos demais protocolos de descongelamento. Como valores de $\Delta E^* > 3,5$ indicam alterações cromáticas claramente perceptíveis a olho nu, conclui-se que o tratamento DUS não preservou a cor original do filé fresco. Embora o DUS tenha mantido a luminosidade (L*) próxima da amostra FRESH e apresentado a maior retenção de a* entre os protocolos, a alteração global de cor foi motivada pela redução considerável do vermelho (a*) e pelo amarelamento da superfície (b*).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

3.4 Capacidade de retenção de água (CRA) e *Drip loss*

A capacidade de retenção de água (CRA) e a perda de peso por exsudação (*drip loss*) foram significativamente influenciadas pelos métodos de descongelamento ($p < 0,05$; Tabela 2). O tratamento DUS e o DAG apresentaram os maiores valores de CRA, não diferindo estatisticamente do controle FRESH. O tratamento DAR resultou em retenção intermediária, enquanto o DMI provocou uma redução drástica na capacidade de retenção de água.

Tabela 2 — Capacidade de retenção de água (CRA), *drip loss* e perfil de textura instrumental (TPA) de filés de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) submetidos a diferentes métodos de descongelamento.

Parâmetros	**Métodos de Descongelamento**				
	DUS	**DMI**	**DAG**	**DAR**	**FRESH**
CRA (%)	80,40 ± 0,24^{a}	54,23 ± 1,21^{c}	79,03 ± 0,93^{a}	75,77 ± 1,17^{b}	77,60 ± 0,39^{a}
Drip Loss (%)	1,98 ± 0,23^{b}	1,78 ± 0,04^{b}	2,55 ± 0,25^{a}	1,77 ± 0,51^{b}	—
Dureza (N)	2,31 ± 0,20^{ab}	2,77 ± 0,67^{b}	2,75 ± 0,29^{b}	2,42 ± 0,57^{ab}	1,28 ± 0,01^{a}
Elasticidade	3,00 ± 0,10^{b}	3,37 ± 0,29^{c}	3,00 ± 0,10^{b}	3,03 ± 0,06^{b}	0,50 ± 0,00^{a}
Coesividade	0,66 ± 0,02^{b}	0,77 ± 0,18^{c}	0,71 ± 0,06^{b}	0,71 ± 0,03^{b}	0,31 ± 0,03^{a}

[1]DUS (descongelamento com ultrassom); DAG (descongelamento em água); DMI (descongelamento por micro-ondas); DAR (descongelamento no ar); FRESH (amostra fresca de controle). [2] Letras minúsculas na mesma linha indicam diferença significativa entre tratamentos pelo teste de Tukey ao nível de 5% de confiança. [3](—): Não aplicável (amostra fresca não submetida ao ciclo de congelamento/descongelamento)

A acentuada redução da CRA no protocolo DMI pode ser explicada pela desnaturação térmica das proteínas miofibrilares (actina e miosina) provocada pelo aquecimento rápido e heterogêneo do micro-ondas, alterando a matriz tridimensional responsável pelo aprisionamento da água tecidual (Sun et al., 2024). Em

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

contrapartida, o protocolo DUS manteve a CRA em níveis equivalentes aos do pescado fresco, o que sugere maior retenção de água, em consonância com os achados de Sun et al. (2024).

Quanto ao *drip loss*, o maior valor foi observado no protocolo DAG, diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos demais protocolos de descongelamento. Como as amostras permaneceram hermeticamente seladas durante todo o procedimento, essa maior exsudação no DAG é atribuída à baixa taxa de transferência de calor da imersão em água estática. O maior tempo de permanência do filé na zona crítica de fusão do gelo favorece a drenagem do líquido celular previamente liberado pelo rompimento emoldas fibras durante o congelamento, promovendo o acúmulo contínuo desse exsudado no interior da própria embalagem (Li et al., 2020). Em contrapartida, o protocolo DUS apresentou baixos índices de exsudação, o que está diretamente relacionado à maior eficiência de transferência térmica induzida pelo ultrassom, reduzindo o tempo de processo e minimizando a liberação do fluido tecidual.

3.5 Perfil de textura instrumental (TPA)

Os parâmetros do perfil de textura instrumental foram afetados pelos protocolos de descongelamento ($p < 0,05$; Tabela 2). Os protocolos DMI e DAG apresentaram dureza significativamente superior ao controle fresco, enquanto DUS e DAR exibiram valores intermediários, sem diferença estatística tanto em relação ao FRESH quanto aos protocolos DMI e DAG.

O aumento da dureza nos protocolos DMI e DAG reflete alterações na estrutura muscular e a perda da lubrificação tecidual provocada pelo extravasamento de água (Zhang et al., 2023). Os maiores valores de dureza observados nesses tratamentos podem estar associados, no DMI, às alterações induzidas pelo aquecimento rápido e heterogêneo do micro-ondas e, no DAG, à perda de exsudato durante a imersão (Zhang et al., 2024). Em relação ao protocolo DUS, a manutenção

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

de valores de dureza semelhantes ao FRESH sugere menor impacto do processo sobre a rigidez tecidual.

Em relação à elasticidade e à coesividade, os menores valores foram observados no grupo FRESH. Essa resposta reflete a mecânica de um tecido *in natura* altamente macio e hidratado (1,28 N) no qual a matriz muscular sofre maior deformação irreversível durante o primeiro ciclo de compressão do TPA, reduzindo a recuperação dimensional e o trabalho de coesão no segundo ciclo quando comparado ao tecido enrijecido dos filés submetidos ao ciclo de congelamento e descongelamento (Cheng et al., 2014). Para a elasticidade, os protocolos DAR, DAG e DUS não diferiram estatisticamente entre si. Para a coesividade, os protocolos DUS, DAG e DAR também não diferiram entre si ($p > 0{,}05$), apresentando valores intermediários entre o filé fresco e o protocolo DMI, que registrou a maior média (Tabela 2).

O protocolo DMI gerou os maiores valores de elasticidade e coesividade, o que pode ser atribuído a alterações na matriz proteica devido ao aquecimento induzido pelas micro-ondas. O protocolo DUS demonstrou comportamento equilibrado: a aceleração da transferência térmica e a redução do tempo de processo, potencialmente favorecidas pelos efeitos físicos do ultrassom descritos na literatura, ocorreram sem provocar o sobreaquecimento característico das micro-ondas, mantendo o perfil de textura (dureza) em níveis satisfatórios e semelhantes aos do pescado fresco (Zhang et al., 2021). Sendo assim, o protocolo DUS apresentou potencial tecnológico para investigações futuras em maior escala, sendo uma alternativa promissora ao processamento convencional por aliar a redução do tempo operacional à preservação dos atributos de qualidade do filé de tilápia.

4. Limitações e estudos futuros

Este estudo apresentou caráter exploratório em escala laboratorial, visando compreender o comportamento primário de filés de tilápia-do-Nilo submetidos a métodos convencionais e emergentes de descongelamento. A amostragem de n =

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

3 por grupo a partir de matrizes comerciais garantiu uma triagem inicial representativa, recomendando-se para trabalhos futuros o aumento amostral e o uso de lotes com histórico de cultivo e congelamento rigorosamente controlados desde a origem. Quanto ao processamento, os ensaios em equipamento de bancada contaram com medição térmica em ponto único, operando sem controle pareado ou determinação da potência acústica efetiva, o que direciona pesquisas subsequentes para o mapeamento térmico contínuo do banho, quantificação da energia acústica e avaliações em escala industrial. No plano analítico, análises de microestrutura, oxidação, microbiologia e avaliação sensorial foram delimitadas para etapas posteriores, sugerindo-se sua inclusão integrada no estudo de *shelf-life* e aceitação pelo consumidor final. Dessa forma, o trabalho cumpre com rigor seu papel exploratório, direcionando o caminho técnico e científico para o avanço de tecnologias emergentes no processamento de pescado.

5- Conclusão

Nas condições experimentais avaliadas, os protocolos de descongelamento produziram respostas distintas quanto ao tempo de processo e aos atributos físico-químicos dos filés de tilápia-do-Nilo. O micro-ondas apresentou o menor tempo para atingir o *endpoint* térmico adotado, mas foi associado à menor capacidade de retenção de água e a valores elevados de dureza. A imersão em água apresentou tempo de descongelamento semelhante ao protocolo ultrassônico, porém maior perda por exsudação durante o período de armazenamento pós-descongelamento avaliado. O protocolo assistido por ultrassom apresentou CRA e pH estatisticamente semelhantes aos do controle fresco e o maior valor de *a** entre os tratamentos descongelados; entretanto, diferenças significativas de *a** e *b** em relação ao filé fresco demonstram que a cor não foi integralmente preservada. Os resultados mostram que o ultrassom pode ser uma tecnologia promissora para o processamento de pescados, recomendando-se estudos futuros com foco nos aspectos microestruturais, sensoriais e microbiológicos, bem como na avaliação do seu potencial de aplicação em escala industrial.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

6. Agradecimentos

À CAPES – Código de Financiamento 001; à FACEPE, por meio do Auxílio a Projeto de Pesquisa (Processo: APQ-0956-5.06/24) e da Bolsa de Produtividade de Pernambuco (Processo: BPP-0081-5.06/24).

Referências

BOURNE, M. C. Food texture and viscosity: concept and measurement. 2. ed. London: Academic Press, 2002. 416 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Peixe Fresco (Inteiro e Eviscerado)**. Instrução Normativa nº 21, de 31 de maio de 2017. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 1 jun. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA)**. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 mar. 2017.

ÇALIŞKAN KOÇ, G.; ÖZKAN KARABACAK, A.; SÜFER, Ö. Thawing frozen foods: A comparative review of traditional and innovative methods. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 24, n. 2, e70136, 2025. DOI: 10.1111/1541-4337.70136.

CORTÉS-SÁNCHEZ, A. D. J. et al. Processing, quality and elemental safety of fish. **Applied Sciences**, v. 14, n. 7, p. 2903, 2024. DOI: 10.3390/app14072903.

GRAU, R.; HAMM, R. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Wasserbindung im Muskel. **Naturwissenschaften**, v. 40, n. 1, p. 29-30, 1953. DOI: 10.1007/BF00595734.

JAMES, C. et al. The thawing of food: an overview of physical aspects, novel methods, and quality issues. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1211-1223, 2017. DOI: 10.1080/10408398.2014.960522.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

JIA, G. et al. Effects of different thawing methods on the quality of frozen fish. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 7, e13620, 2018. DOI: 10.1111/jfpp.13620.

KHALIL, H. S.; NASR-ALLAH, A. Sustainable development of aquaculture in Egypt: a review of key challenges and solutions. **Aquaculture International**, v. 33, p. 1-29, 2025. DOI: 10.1007/s10499-024-01580-0.

LI, D. et al. Effect of ultrasonic thawing on the water-holding capacity, physicochemical properties and microstructure of frozen tuna (*Thunnus obesus*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 11, p. 5078-5085, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9750.

LI, F. et al. Ultrasound-assisted thawing of fish: Impact on protein structure and quality attributes. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 68, p. 105210, 2020. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105210.

LI, M. et al. Comparative analysis of emerging thawing technologies on the quality of aquatic products. **LWT - Food Science and Technology**, v. 191, p. 115620, 2024. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115620.

LI, X. et al. Innovation in ultrasound-assisted thawing for muscle foods: Mechanisms and applications. **Trends in Food Science & Technology**, v. 145, p. 104320, 2025. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104320.

LIU, C. et al. Effects of different thawing methods on microstructure and the biochemical properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during frozen storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 2, e16212, 2022. DOI: 10.1111/jfpp.16212.

OLIVEIRA FILHO, P. R. C. et al. How stunning methods affect the quality of Nile tilapia meat. **CyTA - Journal of Food**, v. 10, n. 2, p. 156-162, 2012. DOI: 10.1080/19476337.2011.596887.

PARK, H. et al. Thawing frozen foods: A comparative review of traditional and emerging technologies. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 66, n. 4, p. 512-528, 2026. DOI: 10.1080/10408398.2024.2385012.

PEIXE BR. Associação Brasileira da Piscicultura. **Anuário Peixe BR da Piscicultura 2026**. São Paulo: Associação Brasileira da Piscicultura, 2026.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Disponível em: www.peixebr.com.br/anuario-2026. Acesso em: 10 fev. 2026.

QIAO, Z. et al. Freezing and storage on aquatic food: underlying mechanisms and implications on quality deterioration. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 42, e91322, 2022. DOI: 10.1590/fst.91322.

SANTOS, N. C. et al. Quality and consumer acceptance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets and derivative products. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 42, e25222, 2022. DOI: 10.1590/fst.25222.

SHANG, X. et al. Application of ultrasound-assisted thawing in meat and aquatic products: A review on mechanisms, quality, and protein structure. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 95, p. 106380, 2023. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106380.

STRATEVA, M. et al. Histological discrimination of fresh from frozen/thawed carp (*Cyprinus carpio*) muscle tissue. **Bulgarian Journal of Veterinary Medicine**, v. 24, n. 2, p. 210-220, 2021. DOI: 10.15547/bjvm.2019-0082.

SUÁREZ-MEDINA, M. D. et al. Physicochemical, structural and sensory changes during thawing of frozen fish fillets. **Food Chemistry**, v. 435, p. 137540, 2024. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137540.

SUN, Y. et al. Ultrasound-assisted thawing preserves the quality and microstructure of fish fillets: A kinetic and thermodynamic study. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 102, p. 106710, 2024. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106710.

SYANYA, F. J.; MATHIA, W. M.; HARIKRISHNAN, M. Quality and safety concerns of farmed tilapia fish during freezing and frozen storage: review. **Asian Food Science Journal**, v. 22, n. 6, p. 40-58, 2023. DOI: 10.9734/afsj/2023/v22i6638.

UGALDE-TORRES, A. et al. The effect of high intensity ultrasound on the quality and shelf life of tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle. **Processes**, v. 12, n. 7, art. 1441, 2024. DOI: 10.3390/pr12071441.

VERMA, S. K.; SASIKALA, R.; KISHORE, P.; MOHAN, C. O.; BINDU, J.; NINAN, G. Influence of microwave thawing technique on the quality of brown shrimp, *Metapenaeus dobsonii* in comparison to conventional thawing methods. **Scientific Reports**, v. 15, art. 34668, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-34668-x.

WALAYAT, N. et al. Quality evaluation of frozen and chilled fish: a review. **Food**

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/08/2026 - **Accepted:** 13/09/2026
Vol: 13.20
DOI: 10.66104/2aj23d57
Pages: 1-23

Science & Nutrition, v. 11, n. 2, p. 650-665, 2023. DOI: 10.1002/fsn3.3113.

WANG, H. et al. Effects of microwave thawing on quality traits and protein structure of fish fillets. **Journal of Food Engineering**, v. 292, p. 110250, 2021. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110250.

YANG, Q. et al. Microwave-assisted thawing of fish fillets: Thermal distribution and quality changes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 91, p. 103510, 2024. DOI: 10.1016/j.ifset.2023.103510.

ZHANG, L. et al. Changes in water distribution and protein oxidation of fish fillets during different thawing processes. **Food Control**, v. 125, p. 107980, 2021. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.107980.

ZHANG, R. et al. Ultrasonic thawing technology: Principles and applications in seafood processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 15, p. 2410-2425, 2023. DOI: 10.1080/10408398.2021.1989659.

ZHANG, Y. et al. Color degradation mechanisms and quality control of fish fillets during thawing. **Food Chemistry**, v. 430, p. 137010, 2024. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137010.

ZHENG, X. et al. Effects of ultrasound power on thawing kinetics and quality of frozen fish. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 8, p. 3810-3820, 2023. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c07886.

ZUANAZZI, M. et al. Thawing weight loss and quality of tilapia fillets submitted to different freeze-thaw cycles. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 6, p. 2541-2552, 2019. DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n6p2541.

CC BY