



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE REGISTRO



**DESAFIO DE FAMÍLIAS DE TAMBAQUI (*Colossoma
macropomum*)**

A CONDIÇÕES DE ESTRESSE TÉRMICO

MATHEUS RYAN SILVA JULIO

Registro – SP

Julho - 2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE REGISTRO



**DESAFIO DE FAMÍLIAS DE TAMBAQUI (*Colossoma
macropomum*)
A CONDIÇÕES DE ESTRESSE TÉRMICO**

MATHEUS RYAN SILVA JULIO

Orientador: Prof. Dr. Rafael Vilhena Reis
Neto

Trabalho de Graduação apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
BACHAREL EM ENGENHARIA DE
PESCA

Registro – SP
Julho – 2026

J94d

Julio, Matheus Ryan Silva

Desafio de famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) a condições de estresse térmico / Matheus Ryan Silva Julio --
Registro, 2026

27 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Pesca) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, Registro

Orientador: Prof. Dr. Rafael Vilhena Reis Neto

1. Melhoramento genético. 2. Tambaqui (*Colossoma macropomum*). 3. Temperatura baixa. I. Título.

CERTIFICADO

TRABALHO DE GRADUAÇÃO/ TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PESCA

TÍTULO: "DESAFIO DE FAMÍLIAS DE TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*) ÀS
CONDIÇÕES DE ESTRESSE TÉRMICO"

ACADÊMICO: MATHEUS RYAN SILVA JULIO

ORIENTADOR: PROF. DR. RAFAEL VILHENA REIS NETO

PERÍODO: 9º Semestre 5º Ano

Aprovado: ☒

Reprovado: ☐

COMISSÃO AVALIADORA:

(Nomes)

Presidente Prof. Dr. RAFAEL VILHENA REIS NETO



Documento assinado digitalmente

RAFAEL VILHENA REIS NETO

Data: 06/07/2026 09:48:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Dra. THAIS GORNATI GONÇALVES



Documento assinado digitalmente

THAIS GORNATI GONÇALVES

Data: 06/07/2026 09:54:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro Dr. GABRIEL RINALDI LATTANZI



Documento assinado digitalmente

GABRIEL RINALDI LATTANZI

Data: 06/07/2026 11:33:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Registro, 06 / 07 / 2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho inteiramente aos meus pais Andre Julio e Maria de Jesus da Silva, a minha madrastra Eliane Aparecida e a todos os amigos que estiveram comigo e foram os maiores incentivadores para todas as realizações dos meus objetivos em minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Rafael Vilhena Reis Neto, pela oportunidade concedida ao longo desses anos, pelos ensinamentos, pela confiança depositada em meu trabalho e pela paciência durante todo o processo de formação acadêmica.

Ao Laboratório de Desafios às Mudanças Climáticas (LDMC) e a todos os seus membros, pelo ambiente de aprendizado, colaboração e apoio científico fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Antônio Sanches, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira (FCAVR), Câmpus de Registro, pela responsabilidade e condução do processo de reprodução dos animais cedidos, bem como pelo apoio técnico e científico durante as atividades experimentais.

À Dra. Camila Fernandes Corrêa, pesquisadora responsável pela área de aquicultura da APTA Regional de Pariquera-Açu, pela cessão dos animais, bem como pelo manejo e acompanhamento das fases iniciais de criação e crescimento até o início do experimento.

A toda a equipe do Prof. Dr. Rafael Vilhena Reis Neto, amigos e parceiros, John Fredy Gómes, Paula Nunes Rodrigues, Vinicius Zabotto, Thaís Gornati Gonçalves, Woshington Rocha Gervaz, Heloísa Moisés Burini, Rick Martins Soares, Leonardo Segalla Corrêa e Thomas Henrique Cruz Silva, pela convivência, apoio, troca de conhecimentos e parceria ao longo desta trajetória acadêmica.

Às Repúblicas, da cidade de Registro – SP, que me abriram portas e, esteve sempre presente com apoio, solidariedade e companheirismo.

Aos membros da banca examinadora do Trabalho de conclusão de curso (TCC), pelas contribuições, sugestões e avaliações que enriqueceram e aprimoraram este estudo.

À Universidade Estadual Paulista, por ter me acolhido por todos esses anos, tendo grande influência na minha carreira profissional.

A todos os professores da Universidade, que muito contribuíram para minha trajetória acadêmica, cujo investimento e dedicação serviram como pilares de sustentação para seguir em frente.

A IX Turma de Engenharia de Pesca, pela parceria durante esses 5 anos de graduação e por todos os bons momentos vividos.

APOIO FINANCEIRO

Agradeço a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -
processo 2022/08831-8

RESUMO

O tambaqui (*Colossoma macropomum*) é a principal espécie nativa da piscicultura brasileira. Contudo, a expansão do seu cultivo para as regiões Sul e Sudeste do país é limitada por sua baixa tolerância a águas frias (abaixo de 17 °C), demandando programas de melhoramento genético voltados à seleção de indivíduos mais tolerantes como alternativa mais sustentável. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade genética interfamiliar para tolerância a baixas temperaturas em tambaqui, visando identificar famílias superiores para a formação de uma população-base de seleção. O experimento utilizou 785 juvenis distribuídos em 25 famílias de irmãos-completos provenientes de duas origens genéticas: APTA Regional (Registro/SP, n = 4 famílias) e Embrapa Pesca e Aquicultura (Palmas/TO, n = 21 famílias). Os peixes foram submetidos a um desafio térmico progressivo com redução diária de 2 °C até atingir 11 °C. O tempo até a morte foi monitorado continuamente em horas. As curvas e probabilidades acumuladas de sobrevivência foram estimadas pelo método de Kaplan-Meier, e as divergências interfamiliares foram validadas pelo teste de log-rank com correção de Bonferroni ($p < 0,05$), utilizando o Tempo Médio Restrito de Sobrevivência (RMST) como critério de ranqueamento. Os resultados revelaram expressiva heterogeneidade na tolerância ao frio, com taxas de sobrevivência final variando de 8,33% a 80,77%. A família F26 apresentou o maior desempenho adaptativo (80,77% de sobrevivência; RMST de 85,38 horas), diferenciando-se significativamente dos grupos mais sensíveis. Sob a perspectiva geográfica, as famílias originárias da Região Norte (Embrapa) demonstraram de forma consistente maior estabilidade e taxas de sobrevivência comparadas às progênes da Região Sudeste (APTA), as quais concentraram-se nos piores estratos do ranking. Conclui-se que existe variabilidade genética aditiva interfamiliar para a resistência ao estresse por frio em tambaqui, sendo viável a aplicação de seleção artificial recorrente de linhagens puras como estratégia zootécnica de expansão da espécie em climas subtropicais.

Palavras-chave: Análise de sobrevivência, *Colossoma macropomum*, Kaplan-Meier, Melhoramento genético, Estresse térmico.

ABSTRACT

The tambaqui (*Colossoma macropomum*) is the main native species in Brazilian fish farming. However, the expansion of its cultivation to the South and Southeast regions of the country is limited by its low tolerance to cold waters (below 17 °C), demanding genetic improvement programs aimed at selecting more tolerant individuals as a more sustainable alternative. This study aimed to evaluate inter-family genetic variability for low-temperature tolerance in tambaqui to identify superior families for establishing a selective breeding base population. The experiment evaluated 785 juveniles from 25 full-sib families from two distinct genetic stocks: APTA Regional (Registro/SP, n = 4 families) and Embrapa Pesca e Aquicultura (Palmas/TO, n = 21 families). The fish underwent a progressive thermal challenge where water temperature was reduced by 2 °C per day down to 11 °C. Time-to-death was recorded continuously in hours. Cumulative survival probabilities and curves were estimated using the Kaplan-Meier method, and inter-family differences were validated using the log-rank test with Bonferroni correction ($p < 0.05$), with the Restricted Mean Survival Time (RMST) serving as the ranking criterion. The results revealed substantial heterogeneity in cold tolerance, with final survival rates ranging from 8.33% to 80.77%. Family F26 exhibited the highest adaptive performance (80.77% survival; RMST of 85.38 hours), differing significantly from the most sensitive groups. From a geographic perspective, families from the North region (Embrapa) consistently showed higher stability and survival rates than those from the Southeast region (APTA), which clustered primarily among the lowest ranks. In conclusion, there is significant inter-family additive genetic variability for cold stress resistance in tambaqui, confirming that recurrent artificial selection within purebred lines is a viable zootechnical strategy for expanding this species into subtropical climates.

Keywords: Survival analysis, *Colossoma macropomum*, Kaplan-Meier, Genetic improvement, Thermal stress.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação das 25 famílias de tambaqui (<i>Colossoma macropomum</i>) utilizadas no desafio térmico experimental, contendo os respectivos genitores maternos (Tag fêmea) e paternos (Tag macho).....	14
---	----

Tabela 2. Estimativas de Kaplan–Meier do tempo de sobrevivência e agrupamento pelo teste de log-rank para 25 famílias de peixes sob condição de desafio.....	18
---	----

Sumário

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. <i>Objetivo geral</i>	15
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 FORMAÇÃO DA POPULAÇÃO EXPERIMENTAL	15
3.2 CRIAÇÃO E MANEJO DOS ANIMAIS	16
3.3 PROTOCOLO DE DESAFIO À BAIXA TEMPERATURA	17
3.4 OBTENÇÃO DOS DADOS DE SOBREVIVÊNCIA.....	17
4. RESULTADOS	19
5. DISCUSSÃO.....	21
6. CONCLUSÃO	23
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A aquicultura consolidou-se globalmente como um dos setores de maior crescimento na produção de alimentos de origem aquática, assumindo um papel estratégico na segurança alimentar mundial. Segundo dados da FAO (2025), a produção aquícola mundial atingiu a marca histórica de aproximadamente 94 milhões de toneladas, superando pela primeira vez os volumes provenientes da pesca extrativista (ZHANG et al., 2025). Nesse cenário de expansão, as Américas ocupam o segundo lugar em produção continental, com o Brasil posicionando-se como o principal “player” da América Latina, apresentando um crescimento de 7,32% entre 2022 e 2023.

Em escala nacional, a piscicultura mantém uma trajetória ascendente, alcançando uma produção de 1.011.540 toneladas de peixes de cultivo em 2025, o que representa um aumento de 4,42% em relação ao ano anterior (PEIXE BR, 2026). No entanto, observa-se uma alta concentração produtiva em poucas espécies, onde a tilápia (*Oreochromis niloticus*) detém cerca de 70% da participação desse mercado. Apesar dessa predominância de espécies exóticas, a produção de espécies nativas neotropicais especificamente os "peixes redondos" como o pacu (*Piaractus mesopotamicus*), a pirapitinga (*Piaractus brachypomum*) e o tambaqui (*Colossoma macropomum*) representa uma parcela estratégica de 25,4% da produção nacional, totalizando 257.070 toneladas em 2025 (PEIXE BR, 2026).

O tambaqui destaca-se como a principal espécie nativa cultivada no Brasil, sendo o segundo maior peixe de escamas da bacia amazônica (HILSDORF et al., 2021). Sua popularidade zootécnica deve-se ao rápido crescimento, rusticidade fisiológica, facilidade de reprodução em cativeiro e excelente aceitação mercadológica. Entretanto, a consolidação e expansão do seu cultivo para as regiões Sul e Sudeste são severamente restringidas pela sua baixa tolerância térmica. Sendo uma espécie de origem amazônica, o tambaqui apresenta comprometimento metabólico e elevado risco de mortalidade em locais onde a temperatura da água atinge valores inferiores a 17 °C (FERNANDES et al., 2018).

Como medida mitigadora para enfrentar os meses de inverno nessas regiões, o setor produtivo utiliza frequentemente o híbrido interespecífico "tambacu" (fêmea de tambaqui x macho de pacu), buscando aliar o potencial de ganho de peso do tambaqui com a tolerância ao frio do pacu (MOURAD et al., 2018). Contudo, a hibridização

descontrolada acarreta riscos genéticos e ambientais significativos. Além da possibilidade de escapes acidentais contaminarem populações selvagens, a eficiência produtiva decai em gerações pós-F1 ou retrocruzamentos, que não mantêm a estabilidade do vigor híbrido (heterose), gerando variabilidade indesejada no desempenho zootécnico (REIS NETO et al., 2020).

Diante deste gargalo, o melhoramento genético direcionado à tolerância ao frio surge como a alternativa mais sustentável para viabilizar o cultivo de linhagens puras de tabaqui em climas subtropicais (FERNANDES et al., 2018). A implementação desses programas depende fundamentalmente da identificação de variância genética aditiva para a característica de sobrevivência sob estresse térmico. Pesquisas recentes indicam que a resistência térmica possui uma arquitetura genética complexa e poligênica, controlada por múltiplos loci de pequeno efeito distribuídos ao longo do genoma (YOSHIDA; YÁÑEZ, 2022).

Nesse contexto, o sucesso do melhoramento genético da espécie depende da avaliação e do rastreamento do desempenho adaptativo entre as famílias. Isolar os efeitos genéticos aditivos dos componentes ambientais comuns só é possível por meio desse delineamento interfamiliar, o qual viabiliza o mapeamento preciso de linhagens puras de tabaqui que toleram as temperaturas baixas (GRIFFING, 1956; FALCONER; MACKAY, 1996).

Adicionalmente, os estudos voltados à avaliação de sobrevivência têm sido amplamente empregados na ciência animal como ferramentas robustas para mensurar e descrever a resistência de populações frente a desafios ambientais e patológicos (LUCAS et al., 2020). Entre os métodos estatísticos não paramétricos aplicados, o estimador de Kaplan-Meier destaca-se por permitir a caracterização precisa da probabilidade de sobrevivência acumulada ao longo de uma escala temporal contínua, capturando de forma confiável a dinâmica temporal do óbito (KAPLAN; MEIER, 1958; JAGER et al., 2008).

A associação dessa ferramenta ao teste de *log-rank* viabiliza a comparação estatística rigorosa entre diferentes grupos, validando se as divergências observadas nas trajetórias de mortalidade são significativas (SCHOENFELD, 1981). Na aquicultura, a aplicação integrada dessas ferramentas em experimentos de termotolerância possibilita estimar parâmetros fenotípicos acurados para o ranqueamento de famílias e subsidiar a seleção de genótipos superiores (YOSHIDA; YÁÑEZ, 2022).

Assim, a identificação de famílias superiores não apenas viabiliza uma população-base robusta para o programa de seleção, mas também transforma a resistência térmica em uma característica cumulativa e zootecnicamente mensurável, reduzindo de forma definitiva a dependência de híbridos e tornando mais sustentável a piscicultura de espécies nativas no Brasil (FERNANDES et al., 2018; REIS NETO et al., 2020; YOSHIDA; YÁÑEZ, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Identificar famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) tolerantes a baixas temperaturas que possam constituir uma população base para seleção genética.

2.2. Objetivos específicos

- Submeter 25 famílias a um desafio térmico por meio de um protocolo de redução controlada de temperatura;
- Ajustar curvas de sobrevivência, por meio da metodologia de Kaplan-Meier, para as famílias de tambaqui desafiadas;
- Comparar, utilizando o teste de log-rank, as famílias mais tolerantes a baixas temperaturas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 FORMAÇÃO DA POPULAÇÃO EXPERIMENTAL

A população experimental utilizada neste estudo foi composta por 25 famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) oriundas de diferentes programas de melhoramento genético, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Ao todo, foram avaliados 785 indivíduos distribuídos entre as famílias experimentais, os quais foram posteriormente submetidos ao desafio para avaliação da tolerância a baixas temperaturas. A identificação das famílias e de seus respectivos genitores utilizados na formação da população experimental é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação das 25 famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) utilizadas no desafio térmico experimental, contendo os respectivos genitores maternos (Tag fêmea) e paternos (Tag macho).

Família (ID)	Tag_fêmea	Tag_macho
F02 (E)	54303_F14	31789_M12
F03 (E)	36879_F10	42756_M17
F05 (E)	44279_F07	31565_M10
F06 (E)	44279_F07	36894_M08
F12 (E)	60707_F19	46791_M32
F13 (E)	60667_F28	34760_M26
F14 (E)	60667_F28	46791_M32
F15 (E)	60667_F28	57212_M27
F16 (E)	14902_F27	57212_M27
F17 (E)	14902_F27	46791_M32
F18 (E)	42363_F18	15777_M24
F19 (E)	42363_F18	57212_M27
F20 (E)	44757_F26	57212_M27
F21 (E)	44757_F26	23225_M21
F22 (E)	54787_F22	42038_M28
F23 (E)	54787_F22	46791_M32
F24 (E)	54787_F22	53312_M22
F25 (E)	44757_F26	53312_M22
F26 (E)	43368_F20	15738_M33
F27 (E)	43368_F20	22812_M23
F28 (E)	60707_F19	15017_M25
F32 (A)	04230_0FR	04266_0MR
F33 (A)	04230_0FR	04272_0MR
F34 (A)	04230_0FR	04226_0MR
F35 (A)	04230_0FR	04232_0MR

(E) = famílias produzidas na EMBRAPA pesca e aquicultura, (A) = famílias produzidas na Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA)

3.2 CRIAÇÃO E MANEJO DOS ANIMAIS

As reproduções foram realizadas por indução hormonal utilizando extrato de hipófise de carpa, as fêmeas receberam duas doses hormonais (0,5 e 5,0 mg kg⁻¹) enquanto os machos receberam uma dose única de 2,5 mg kg⁻¹, (conforme protocolo descrito por Criscuolo-Urbinati et al. (2012). Após a fertilização artificial, os embriões permaneceram em incubadoras cônicas de fibra de vidro de 60L durante o período embrionário e a fase inicial de larvicultura. Posteriormente, os animais foram transferidos para viveiros destinados à alevinagem e crescimento.

Durante as diferentes fases de desenvolvimento foram utilizadas dietas comerciais adequadas à espécie e ao estágio produtivo, fornecidas de acordo com as recomendações de manejo adotadas para o cultivo do tambaqui (2x por dia, até a saciedade). Depois a

fase de alevinagem, os peixes foram mantidos em viveiros escavados de 200m² sob condições padronizadas de manejo até atingirem aproximadamente 70 g de peso médio.

Após a biometria, os peixes foram transportados para o Laboratório de Desafios às Mudanças Climáticas (LDMC), onde permaneceram em aclimação antes do início do desafio experimental.

3.3 PROTOCOLO DE DESAFIO À BAIXA TEMPERATURA

O desafio térmico foi realizado no Laboratório de Desafios às Mudanças Climáticas (LDMC) da FCAVR/UNESP Registro, utilizando um sistema de recirculação composto por oito caixas de polietileno com capacidade de 500 L (figura 1), equipado com aquecedor elétrico e chiller industrial (Evacon®, Brasil), permitindo o controle da temperatura da água durante todo o experimento.

Os animais foram distribuídos entre as unidades experimentais e submetidos a um período de aclimação de sete dias à temperatura de 28 °C. Após esse período, iniciou-se o desafio térmico por meio da redução gradual da temperatura da água até 11 °C, conforme protocolo adaptado de (JIANG et al., 2022). Os animais identificados foram pesados e distribuídos de forma igualitária nas 8 caixas (cerca de 112 animais por caixa, as famílias estavam misturadas).



Figura 1. Caixa de polietileno de 500L

3.4 OBTENÇÃO DOS DADOS DE SOBREVIVÊNCIA

As caixas foram monitoradas diariamente para a contagem e o registro dos animais mortos, possibilitando o cálculo da sobrevivência e do número de dias até a morte, o evento de interesse (óbito) foi padronizado e determinado no momento exato em que o

indivíduo manifestava perda total de equilíbrio e ausência completa de resposta a estímulos mecânicos direcionados. Com base nesses registros, definiu-se a característica fenotípica tempo até a morte em horas (HTD, Hours to Death), calculada individualmente como o intervalo de tempo entre o início da redução da temperatura da água e a ocorrência do óbito de cada animal, conforme metodologia descrita por (YOSHIDA; YÁÑEZ, 2022).

Para esse cálculo, foram computadas a data e o horário de início do desafio, bem como o momento exato de registro de cada evento de mortalidade. Dessa forma, o HTD representou o tempo total de resistência de cada indivíduo, constituindo a base de dados utilizada para as análises de sobrevivência e comparação interfamiliar. Os indivíduos que permaneceram vivos até o término do desafio (fim do período de observação a 11 °C) foram computados como sobreviventes, sendo tratados como dados censurados nas análises estatísticas.

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

3.5.1 Análise das curvas de sobrevivência

A análise de sobrevivência foi realizada utilizando dados de 785 indivíduos distribuídos em 25 famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos ao desafio térmico experimental. As curvas de sobrevivência foram estimadas pelo método de Kaplan-Meier (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

As diferenças entre as curvas de sobrevivência das famílias foram avaliadas por meio do teste de log-rank, amplamente utilizado para comparação de distribuições de sobrevivência entre grupos independentes (COLOSIMO; GIOLO, 2006). Foi adotado nível de significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando correção de Bonferroni para comparações múltiplas entre as famílias avaliadas.

Adicionalmente, foram estimados o Tempo Médio Restrito de Sobrevivência (RMST) e os respectivos intervalos de confiança de 95%, utilizados para o ranqueamento das famílias quanto à tolerância ao frio.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2024), utilizando os pacotes survival (THERNEAU, 2024), survminer (KASSAMBARA; KOSINSKI; BIECEK, 2021) e multcompView (GRAVES; PIEPHO; DORAI-RAJ, 2019).

3.5.2 Identificação das famílias mais tolerantes

A identificação das famílias mais tolerantes ao frio foi realizada com base nos parâmetros obtidos pelas análises de sobrevivência. Foram considerados o percentual final de sobrevivência, o tempo médio de resistência ao frio e os resultados das

comparações entre curvas de sobrevivência. A partir desses critérios, as famílias foram classificadas em ordem decrescente de desempenho, permitindo a identificação dos grupos com maior tolerância às baixas temperaturas.

4. RESULTADOS

As diferenças observadas entre as curvas indicam a existência de variabilidade na tolerância ao frio entre as famílias avaliadas (figura 2), demonstrando que o objetivo de ajustar as curvas de sobrevivência por meio da metodologia de Kaplan-Meier foi alcançado e evidenciando diferenças no comportamento de sobrevivência durante o desafio térmico.

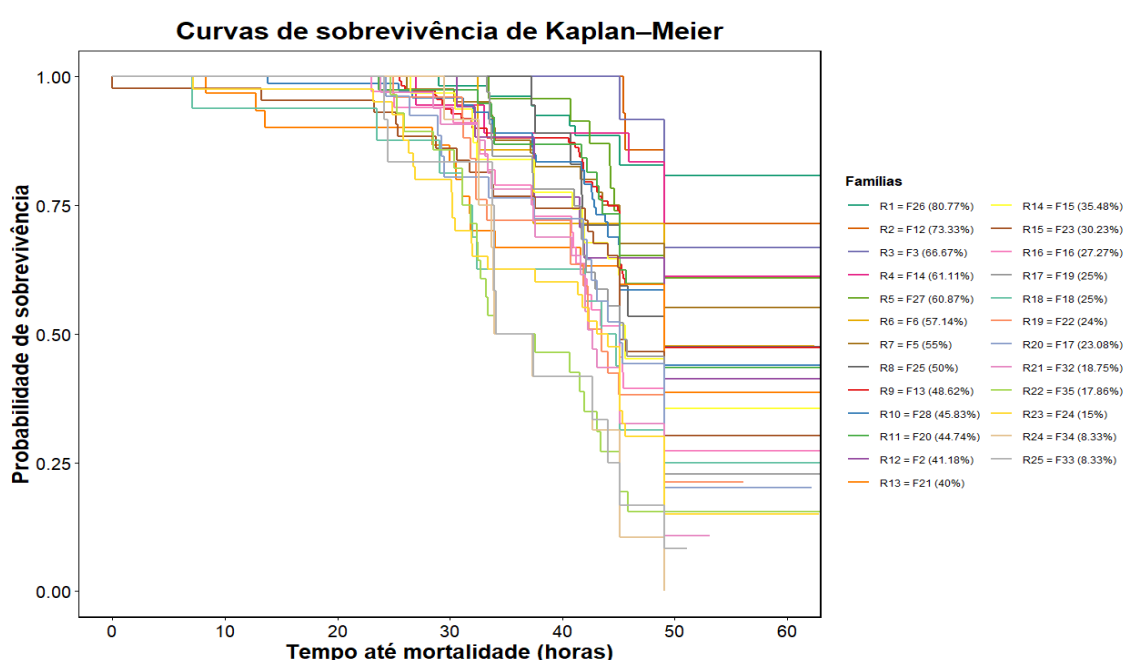


Figura 2. Curvas de sobrevivência de Kaplan–Meier para 25 famílias de peixes submetidas à condição de desafio experimental. As curvas representam a probabilidade acumulada de sobrevivência ao longo do tempo (horas). As famílias foram ranqueadas de acordo com o desempenho de sobrevivência, sendo R1 a família com maior sobrevivência e R25 a família com menor sobrevivência. As comparações entre famílias foram realizadas utilizando o teste de log-rank com ajuste de Bonferroni. (legenda).

As progênies posicionadas no topo do ranking adaptativo (R1 a R5) correspondentes às famílias F26, F12, F3, F14 e F27 sustentaram elevados índices de probabilidade de sobrevivência durante a maior parte do período experimental, consolidando taxas de sobrevivência final superiores a 60%. A família F26 destacou-se como a de maior robustez à baixa temperatura, atingindo 80,77% de sobrevivência e o maior RMST calculado (85,38 horas), diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos grupos de menor desempenho

(Tabela 2). Atende ao objetivo de identificar as famílias mais tolerantes a temperaturas baixas.

Tabela 2. Estimativas de Kaplan–Meier do tempo de sobrevivência e agrupamento pelo teste de log-rank para 25 famílias de peixes sob condição de desafio.

Ranking	Família plantel	Número de Animais	Sobrevivência (%)	Estimativa IC95%
1	F26	52	80,77	85.38 (79.37–91.39) a
2	F12	15	73,33	82.16 (70.6–93.72) ab
3	F3	12	66,67	80.1 (67.28–92.92) ab
4	F14	18	61,11	75.53 (63.36–87.69) ab
5	F27	23	60,87	75.42 (64.82–86.01) ab
6	F6	7	57,14	67.45 (43.93–90.96) abc
7	F5	40	55	71.41 (62.82–79.99) ab
8	F25	18	50	68.06 (55.35–80.76) abc
9	F13	109	48,62	67.53 (62.28–72.77) ab
10	F28	72	45,83	65.49 (58.98–72) bc
11	F20	38	44,74	65.82 (57.13–74.51) abc
12	F2	17	41,18	64.15 (51.2–77.1) abc
13	F21	30	40	58.89 (47.59–70.19) bc
14	F15	31	35,48	60.43 (50.92–69.93) bc
15	F23	43	30,23	56.02 (47.6–64.44) bc
16	F16	33	27,27	55.19 (46.39–64) bc
17	F19	32	25	54.72 (46.62–62.83) bc
18	F18	16	25	50.58 (36.81–64.36) bc
19	F22	25	24	51.78 (42.24–61.32) bc
20	F17	26	23,08	51.69 (42.48–60.89) bc
21	F32R	32	18,75	46.86 (40.13–53.59) bc
22	F35R	28	17,86	44.89 (36.28–53.51) bc
23	F24	40	15	46.08 (38.95–53.22) bc
24	F34R	12	8,33	38.42 (34.79–42.05) bc
25	F33R	12	8,33	41.58 (31.39–51.77) c

Valores entre parênteses representam os intervalos de confiança de 95%. n = número de animais por família. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre famílias de acordo com o teste de log-rank com ajuste de Bonferroni ($p < 0,05$).

5. DISCUSSÃO

A exposição a baixas temperaturas afeta processos metabólicos, fisiológicos e imunológicos importantes para a manutenção da homeostase em peixes tropicais (Gerken et al., 2016; Liu et al., 2025). Nesse contexto, o protocolo de redução gradual da temperatura utilizado neste estudo mostrou-se eficiente para promover o estresse térmico e evidenciar diferenças na resposta ao frio entre as famílias avaliadas.

As curvas de Kaplan-Meier demonstraram que a sobrevivência não ocorreu de forma uniforme entre as 25 famílias de tambaqui. Enquanto algumas famílias mantiveram elevadas probabilidades de sobrevivência durante grande parte do período experimental, outras apresentaram mortalidade mais precoce.

A maior concentração de mortalidade observada durante a fase intermediária do desafio sugere que os animais atingiram temperaturas próximas ao seu limite fisiológico de tolerância. Segundo Amanajás e Val (2023), o tambaqui é uma espécie tropical sensível a baixas temperaturas, apresentando comprometimento do desempenho fisiológico quando exposto ao frio. Além disso, a exposição prolongada a temperaturas reduzidas pode diminuir a atividade metabólica e comprometer mecanismos fisiológicos essenciais à manutenção da homeostase (Gerken et al., 2016; Liu et al., 2025). Nesse cenário, diferenças na capacidade de suportar o estresse térmico tornam-se mais evidentes, refletindo-se nos distintos padrões de sobrevivência observados entre as famílias.

A comparação das curvas pelo teste de log-rank confirmou a existência de diferenças significativas entre as famílias avaliadas. Diferenças na tolerância ao frio também têm sido observadas em outras espécies aquícolas submetidas a desafios térmicos. Em tamboril-vermelho (*Sciaenops ocellatus*), Ma et al. (2007) e Saillant et al. (2008) observaram variação na tolerância ao frio entre os indivíduos avaliados, enquanto Wang et al. (2017) relataram diferenças na resistência ao frio em camarão (*Fenneropenaeus chinensis*). Assim como observado no presente estudo, esses trabalhos demonstram que a resposta ao estresse térmico pode variar entre indivíduos e grupos submetidos às mesmas condições ambientais.

A identificação das famílias mais tolerantes representa um resultado importante para programas de melhoramento genético do tambaqui. Estudos conduzidos em outras espécies demonstram que características relacionadas à tolerância ao frio podem responder à seleção artificial ao longo das gerações (Ma et al., 2007). Dessa forma, as famílias de maior sobrevivência identificadas neste estudo constituem candidatas

promissoras para compor populações-base destinadas a futuras estratégias de seleção voltadas à tolerância ao frio.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a avaliação da sobrevivência sob desafio térmico constitui uma ferramenta eficiente para identificar famílias mais tolerantes ao frio, fornecendo subsídios para a formação de populações-base com potencial de utilização em futuros programas de melhoramento genético do tabaqui.

6. CONCLUSÃO

O desafio permitiu avaliar a tolerância a baixas temperaturas em 25 famílias de tambaqui (*Colossoma macropomum*), evidenciando diferenças expressivas de sobrevivência entre os grupos avaliados. As curvas de Kaplan-Meier e o teste de log-rank permitiram identificar famílias com maior capacidade de resistência ao frio, destacando-se a família F26 como a de melhor desempenho durante o experimento.

As taxas de sobrevivência observadas demonstraram ampla variação entre as famílias, indicando potencial para a seleção de indivíduos superiores. Além disso, as famílias oriundas da Embrapa Pesca e Aquicultura apresentaram, em média, maior tolerância ao frio em comparação às famílias provenientes dos plantéis avaliados da APTA Pariquera-Açu.

Dessa forma, os resultados obtidos atenderam aos objetivos propostos e fornecem subsídios para programas de melhoramento genético voltados ao desenvolvimento de populações de tambaqui mais adaptadas a condições de baixa temperatura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. L. et al. **Riscos genéticos da produção de híbridos de peixes nativos**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2014. (Documentos / Embrapa Pesca e Aquicultura, 18). Disponível em: Infoteca-E. Acesso em: 1 jun. 2026.
- AMANAJÁS, R. D.; VAL, A. L. Thermal biology of tambaqui (*Colossoma macropomum*): General insights for aquaculture in a changing world. **Reviews in Aquaculture**, v. 15, n. 2, p. 480-490, 2023.
- BAGGIO, Rafael A. et al. Hybrids between *Pseudoplatystoma corruscans* and *P. reticulatum* (Siluriformes: Pimelodidae) previously reported in the Upper Paraná River are likely escapes from aquaculture farms. **Zoologia**, Curitiba, v. 33, n. 2, e20150171, 2016.
- BOLDMAN, K.; KRIESE, L.; VAN VLECK, L. D. et al. **A set of programs to obtain estimates of variances and covariances**: a manual for use of MTDFREML. Lincoln: USDA/Agricultural Research Service, 1995. 115 p.
- BRADBEER, Stephanie J. et al. Limited hybridization between introduced and Critically Endangered indigenous tilapia fishes in northern Tanzania. **Hydrobiologia**, v. 832, n. 1, p. 257–268, 2019.
- COLOSIMO, E. A.; GIOLO, S. R. Análise de sobrevivência aplicada. São Paulo: Blucher, 2006. 392 p.
- CRISCUOLO-URBINATI, E.; KURADOMI, R. Y.; URBINATI, E. C.; BATLOUNI, S. R. The administration of exogenous prostaglandin may improve ovulation in pacu (*Piaractus mesopotamicus*). **Theriogenology**, v. 78, n. 9, p. 2087–2094, 2012.
- DE SILVA, S. S. et al. Alien species in aquaculture and biodiversity: a paradox in food production. **Ambio**, v. 38, n. 1, p. 24–28, 2009.
- DEL PAZO, Felipe et al. Genetic diversity and structure of the commercially important native fish pacu (*Piaractus mesopotamicus*) from cultured and wild fish populations: relevance for broodstock management. **Aquaculture International**, v. 29, n. 1, p. 289–305, 2021.
- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. Introduction to Quantitative Genetics. 4. ed. Essex: Longman Group, 1996.
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals. Rome: FAO, 2018.
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action. Rome: FAO, 2020.
- FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. Rome: FAO, 2024.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2025: Blue transformation in action. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025.

FERNANDES, E. M. et al. Survival of purebred and hybrid Serrasalminidae under low water temperature conditions. **Aquaculture**, v. 497, p. 97–102, 2018.

FERNANDES, Érica Machado. **Aspectos produtivos do pacu *Piaractus mesopotamicus* e do seu híbrido tambacu cultivados em sistema de viveiros escavados**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2018.

FREITAS, Milena V. et al. Genotype by environment interaction and genetic parameters for growth traits in the Neotropical fish pacu (*Piaractus mesopotamicus*). **Aquaculture**, v. 530, p. 735933, 2021.

GAMA, L. T. **Melhoramento Genético Animal**. Lisboa: Escolar Editora, 2012.

GERKEN, A. R.; MACKAY, T. F.; MORGAN, T. J. Artificial selection on chill-coma recovery time in *Drosophila melanogaster*: direct and correlated responses to selection. **Journal of Thermal Biology**, v. 59, p. 77-85, 2016.

GRAVES, S.; PIEPHO, H. P.; DORAI-RAJ, S. **multcompView**: Visualizations of Paired Comparisons. R package version 0.1-10. 2019. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Australian Journal of Biological Sciences, v. 9, n. 4, p. 463-493, 1956.

HASHIMOTO, D. T. et al. Genetic identification of F1 and Post-F1 Serrasalminid Juvenile Hybrids in Brazilian aquaculture. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. e89902, mar. 2014.

HILSDORF, A. W. S.; SILVA, M. U.; COUTINHO, L. L.; MONTENEGRO, H.; ALMEIDA-VAL, V. M. F.; PINHAL, D. Genome assembly and annotation of the tambaqui (*Colossoma macropomum*): an emblematic fish of the Amazon River Basin. **Gigabyte**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.46471/gigabyte.29>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de Estatísticas Agropecuárias. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

JAGER, T. E. et al. Kaplan-Meier, log-rank and Cox regression: what are they and when should they be used? *Kidney International*, v. 74, n. 6, p. 779-781, 2008.

JIANG, Jun *et al.* Effects of dietary arginine on growth performance, digestive capacity, and intestinal antioxidant response of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) under low temperature acclimation. **Aquaculture**, v. 553, p. 738072, 2022.

KAPLAN, E. L.; MEIER, P. Nonparametric estimation from incomplete observations. **Journal of the American Statistical Association**, v. 53, n. 282, p. 457–481, 1958.

KASSAMBARA, A.; KOSINSKI, M.; BIECEK, P. **survminer**: Drawing Survival Curves using “ggplot2”. R package version 0.5.0. 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=survminer>.

LIU, C. *et al.* Deciphering the genetic basis and genomic prediction of heat tolerance trait from whole-genome resequencing in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*). **Aquaculture**, v. 598, 741951, 2025.

LUCAS, M. *et al.* Survival analysis in fish breeding: a review of methods and applications in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, v. 12, n. 3, p. 1432-1447, 2020.

MA, L. *et al.* Genetic variation in tolerance to acute cold stress in red drum *Sciaenops ocellatus*. *Aquaculture*, v. 270, n. 1-4, p. 530-537, 2007.

MASTROCHIRICO-FILHO, V. A. *et al.* Assessing genetic diversity for a pre-breeding program in *Piaractus mesopotamicus* by SNPs and SSRs. **Genes**, v. 10, n. 9, p. 668, 2019.

MCKELVEY, Kevin S. *et al.* Patterns of hybridization among cutthroat trout and rainbow trout in northern Rocky Mountain streams. **Ecology and Evolution**, v. 6, n. 3, p. 688–706, 2016.

MOURAD, N. M.; COSTA, A. C.; FREITAS, R. T.; SERAFINI, M. A.; REIS NETO, R. V.; FELIZARDO, V. O. Weight and morphometric growth of Pacu (*Piaractus mesopotamicus*), Tambaqui (*Colossoma macropomum*) and their hybrids from spring to winter. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, v. 38, n. 3, p. 544-550, 2018.

PEIXE BR. **Anuário Brasileiro da Piscicultura**. São Paulo: Associação Brasileira da Piscicultura, 2024.

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

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

REIS NETO, Rafael Vilhena *et al.* Interrelationships between morphometric variables and rounded fish body yields evaluated by path analysis. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 7, p. 1576–1582, 2012.

REIS NETO, Rafael Vilhena *et al.* Performance of tambacu hybrid (♂ *Piaractus mesopotamicus* x ♀ *Colossoma macropomum*) and its parentals pacu (*Piaractus mesopotamicus*) evaluated in cages under different feeding programmes. **Aquaculture Reports**, v. 17, p. 100355, 2020.

ROCHA, C. M. C.; RESENDE, E. K.; ROUTLEDGE, E. A. B.; LUNDSTEDT, L. M. Avanços na pesquisa e no desenvolvimento da aquicultura brasileira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 8, p. iv-vi, ago. 2013.

SAILLANT, E. *et al.* Genetic effects on tolerance to acute cold stress in red drum, *Sciaenops ocellatus* L. **Aquaculture Research**, v. 39, n. 13, p. 1393-1398, 2008.

SCHOENFELD, D. A. The asymptotic properties of log-rank tests for the 2-sample problem with dropped-out records. *Biometrika*, v. 68, n. 1, p. 316-319, 1981.

THERNEAU, T. **A Package for Survival Analysis in R**. R package version 3.8-3. 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=survival>.

WANG, M. *et al.* Evaluation of genetic parameters for growth and cold tolerance traits in *Fenneropenaeus chinensis* juveniles. **PloS One**, v. 12, n. 8, e0183801, 2017.

WOYNÁROVICH, A.; VAN ANROOY, R. **Field guide to the culture of tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier, 1816)**. Rome: FAO, 2019. (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, no. 624). p. 1.

YOSHIDA, G. M. *et al.* Accuracy of genotype imputation and genomic predictions in a two-generation farmed Atlantic salmon population using high-density and low-density SNP panels. **Aquaculture**, v. 491, p. 147–154, 2018.

YOSHIDA, Grazyella M.; YÁÑEZ, José M. Increased accuracy of genomic predictions for growth under chronic thermal stress in rainbow trout by prioritizing variants from GWAS using imputed sequence data. **Evolutionary Applications**, v. 15, n. 5, p. 815-830, 2022.

ZHANG, W. *et al.* Global aquaculture production highlights and insights from the latest FAO data. FAO Fisheries and Aquaculture Circular, Rome: FAO, 2025.