



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL
E RECURSOS PESQUEIROS



**FIT TAMBAQUI: POTENCIALIZANDO O CRESCIMENTO MUSCULAR E A
QUALIDADE DA CARNE ATRAVÉS DO EXERCÍCIO DE NATAÇÃO**

BRUNA GABRIELLY MACIEL GUIA

Manaus - Amazonas

Maio, 2026

BRUNA GABRIELLY MACIEL GUIA

**FIT TAMBAQUI: POTENCIALIZANDO O CRESCIMENTO MUSCULAR E A
QUALIDADE DA CARNE ATRAVÉS DO EXERCÍCIO DE NATAÇÃO**

Orientadora: Dra. Driely Kathriny Monteiro dos Santos

Coorientadora: Dra. Ligia Uribe Gonçalves

Coorientador: Dr. Thiago Macedo Santana

Coorientadora: Dra. Elizabeth Gusmão Affonso

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência Animal e
Recursos Pesqueiros da Universidade
Federal do Amazonas como requisito
final para obtenção do grau de Mestre
em Ciência Animal e Recursos
Pesqueiros, área de concentração
Produção Animal

Manaus - Amazonas

Maio, 2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- G943f Guia, Bruna Gabrielly Maciel
FIT Tambaqui: potencializando o crescimento muscular e a qualidade da carne através do exercício de natação / Bruna Gabrielly Maciel Guia. - 2026.
52 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Driely Kathriny Monteiro dos Santos.
Orientador(a): Ligia Uribe Gonçalves.
Coorientador(a): Thiago Macedo Santana.
Coorientador(a): Elizabeth Gusmão Affonso.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros, Manaus , 2026.
1. Celeridade muscular. 2. Desenvolvimento muscular. 3. Hiperplasia. 4. Hipertrofia. 5. Natação forçada. I. Santos, Driely Kathriny Monteiro dos. II. Gonçalves, Ligia Uribe. III. Santana, Thiago Macedo. IV. Affonso, Elizabeth Gusmão. V. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros. VI. Título
-

BRUNA GABRIELLY MACIEL GUIA

**FIT TAMBAQUI: POTENCIALIZANDO O CRESCIMENTO MUSCULAR E A
QUALIDADE DA CARNE ATRAVÉS DO EXERCÍCIO DE NATAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos
Pesqueiros da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para a obtenção do
grau de Mestre em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros.

Aprovado em 22 de maio de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Driely Kathriny Monteiro dos Santos – Presidente
Universidade do Federal do Amazonas

Dra. Cláudia Maiza Fernandes Epifânio – Membro
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Dra. Maeli Dal Pai – Membro
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me permitir trilhar este caminho com saúde e perseverança.

À minha família, em especial à minha mãe, Rose Neide, que sempre fez o possível e o impossível para que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade. Ao meu irmão, André Vicente, à minha tia Tatiane e à minha prima Samya Tamires, agradeço por acreditarem em mim e torcerem pelo meu sucesso em cada etapa.

À professora Lígia Uribe, minha profunda gratidão pela orientação ao longo deste percurso, pela confiança depositada em mim e pelo apoio na execução deste projeto. À professora Driely Monteiro, que assumiu a continuidade deste processo com maestria, agradeço a acolhida e condução impecável. Vocês são, para mim, exemplos admiráveis de mulheres e profissionais na ciência.

Aos meus coorientadores, professor Thiago Santana e professora Elizabeth Gusmão, agradeço a confiança, pelas oportunidades e pelos ensinamentos valiosos. Vocês são uma verdadeira inspiração profissional para mim.

À professora Thyssia Bomfim, pela generosidade em compartilhar seu conhecimento. À professora Maria Inês, por ceder o laboratório para as minhas análises histológicas. À professora e amiga Kaliane Oliveira, pela atenção, pelo auxílio e por sempre me incentivar a acreditar no meu potencial.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, do Projeto Gigas, Larissa Salgado, Ana Rebeca, Cláudia Epifânio e Armando Gomes, pela ajuda mútua, pelo apoio e pelos momentos de descontração, fundamentais nesta jornada. Aos queridos Manuel Pantoja, Rômulo Ferreira, Francisco Dantas, Viviann Greicy e Renes, pelo auxílio indispensável na montagem do sistema experimental.

Às minhas amigas, que considero irmãs de vida: Pauline Ferreira, Larissa Paz, Laiane Ferreira, Bárbara Souza e Rayane Ferreira. Obrigada por ouvirem minhas angústias, pelo apoio e por deixarem tudo mais leve. À minha sobrinha de coração, Lunna Paz, cuja alegria renovou minhas energias; adoro ser sua "titia que trabalha com peixe".

Aos amigos Rodolfo e Anderson, por todo o apoio, incentivo e presença nos momentos certos e descontraídos.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros (PPGCARP), pela oportunidade de formação acadêmica, e a todos os professores do programa que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), por disponibilizar a estrutura necessária para a execução deste projeto. Aos funcionários da Estação Experimental de Aquicultura e em especial à Dona Suzana, pelo carinho e cuidado constantes que sempre tem com todos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Primeiro as coisas básicas: nunca seja cruel, nunca seja covarde e nunca, jamais, coma peras! Lembre-se, odiar é sempre tolice e amar é sempre sábio.

— **Doctor Who (Série de TV), Décimo Segundo Doutor**

RESUMO

O exercício de natação sustentada em peixes tem sido apontado como uma estratégia para melhorar a produtividade da piscicultura por estar associado ao maior ganho de peso, melhoria na conversão alimentar, modulação do crescimento muscular e alterações na composição da carne. Este estudo avaliou os efeitos de diferentes velocidades de natação sobre o desempenho zootécnico, morfometria, índices biométricos, parâmetros hemato-bioquímicos e histologia muscular de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*). Os peixes ($160 \pm 16,3$ g; $20,5 \pm 0,81$ cm) foram microchipados e distribuídos aleatoriamente em cinco tanques circulares, submetidos a velocidades de fluxo de água de 10, 20, 30 e 40 cm/s e um grupo controle sem natação, durante 60 dias. Os tambaquis submetidos a 40 cm/s apresentaram maior ganho de peso e ganho de peso eviscerado, enquanto a 20 cm/s observou-se redução no consumo de ração, limitando o crescimento. A conversão alimentar e a sobrevivência não diferiram entre os grupos. Os peixes submetidos a 40 cm/s apresentaram maior comprimento padrão e largura corporal, com aumento linear das razões CC/CP e LC/CP, indicando remodelamento fenotípico associado ao exercício. A redução dos índices hepatossomático e viscerossomático, associada ao comportamento quadrático do índice de gordura visceral, indicou eficiente mobilização de reservas energéticas para sustentar o esforço físico. Os parâmetros hematológicos evidenciaram ajustes fisiológicos adaptativos sem comprometimento hematológico. No perfil bioquímico, a glicose plasmática aumentou com a intensidade do exercício, enquanto os triglicerídeos refletiram maior mobilização lipídica nas maiores velocidades. A redução do cortisol a 40 cm/s indicou ausência de estresse crônico. A natação potencializou a hiperplasia muscular, com pico de densidade de fibras a 30 cm/s e presença exclusiva de fibras de maior calibre ($>30 \mu\text{m}$) nesse grupo. Conclui-se que a natação sustentada entre 30 e 40 cm/s constitui a faixa ideal para a espécie, conciliando resposta metabólica, remodelamento muscular e equilíbrio fisiológico.

Palavras-chave: Celeridade muscular; desenvolvimento muscular; hiperplasia; hipertrofia; natação forçada

ABSTRACT

Sustained swimming exercise in fish has been proposed as a strategy to improve aquaculture productivity, as it is associated with greater weight gain, improved feed conversion, modulation of muscle growth, and changes in flesh composition. This study evaluated the effects of different swimming velocities on growth performance, morphometry, biometric indices, hematobiochemical parameters, and muscle histology of juvenile tambaqui (*Colossoma macropomum*). Fish (160 ± 16.3 g; 20.5 ± 0.81 cm) were individually microchipped and randomly distributed into five circular tanks, exposed to water flow velocities of 10, 20, 30, and 40 cm s⁻¹, plus a control group without swimming, for 60 days. Fish subjected to 40 cm s⁻¹ achieved the highest weight gain and eviscerated weight gain, whereas at 20 cm s⁻¹ a reduction in feed intake was observed, limiting growth potential. Feed conversion ratio and survival did not differ among groups. Regarding morphometry, fish at 40 cm s⁻¹ showed greater standard length and body width, with a linear increase in the CC/SL and BW/SL ratios, indicating exercise-associated phenotypic remodeling. The linear reduction in hepatosomatic and viscerosomatic indices, combined with the quadratic behavior of the visceral fat index, with a minimum estimated at 23.74 cm s⁻¹, indicated efficient mobilization of energy reserves to sustain physical effort, with metabolic reallocation toward lean tissue synthesis. Hematological parameters revealed adaptive physiological adjustments in hemoglobin and mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC), with no evidence of hematological impairment. In the biochemical profile, plasma glucose increased progressively with exercise intensity, peaking at 30 cm s⁻¹, while triglycerides exhibited a quadratic response, peaking at 10 cm s⁻¹ and then declining at higher intensities, reflecting greater lipid mobilization as metabolic demand increased. The reduction in cortisol at 40 cm s⁻¹ confirmed the absence of chronic stress and characterized a state of exercise-induced physiological conditioning. Swimming exercise significantly enhanced muscle hyperplasia, with fiber density peaking at 30 cm s⁻¹ ($13,636 \pm 408$ fibers mm⁻²) and the exclusive presence of larger-caliber fibers (>30 μ m) in that group. It is concluded that sustained swimming at 30–40 cm s⁻¹ represents the optimal intensity range for this species, combining maximum anabolic response, structural muscle remodeling, and physiological homeostasis.

Keywords: Forced swimming; Hyperplasia; Hypertrophy; Muscle development; Muscle growth.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Representação esquemática da organização estrutural da musculatura esquelética de peixes teleósteos. Fonte: Adaptado de Kazir e Livney (2021). 18

Figura 2 - Corte transversal da musculatura do tambaqui (*Colossoma macropomum*) demonstrando a organização das fibras musculares vermelhas (A) e brancas (B). Fonte: Elaborado pelo autor (2025). 19

Figura 3 - Representação esquemática da hiperplasia estratificada (A) e hiperplasia em mosaico (B). Abreviações: zonas de proliferação de mioblastos (ZPM), TN = tubo neural, N = notocorda, FBE = fibras musculares brancas embrionárias, MFV = monocamada de fibras musculares vermelhas, LL = linha lateral, CV = coluna vertebral, FB = fibras musculares brancas, I = fibras musculares intermediárias (ROWLERSON; VEGGETTI, 2001). 19

CAPÍTULO II

Figura 4 - A) Corte transversal dos tanques experimentais, mostrando a configuração utilizada: (a) grade de proteção da bomba, instalada no centro para impedir o acesso dos peixes; (b) bomba submersa de 0,5 cv, responsável por gerar o fluxo rotacional; (c) saídas de água conectadas a tubos de PVC, que direcionam o fluxo e permitem diferentes velocidades de nado, conforme a abertura final dos tubos. As setas em azul representam o fluxo de água nos tanques. B) Fotografia de um dos tanques experimentais evidenciando a disposição da bomba, da grade de proteção e das saídas de água. 28

Figura 5 - Representação dos pontos de medição da velocidade da água nos tanques experimentais. (a) Vista superior da caixa, dos pontos de medição distribuídos entre o centro e as bordas (b) Vista lateral da caixa, as zonas de profundidades avaliadas: Z1 (zona superior) e Z2 (zona inferior). 29

Figura 6 - Localização das amostras do tecido muscular de cada unidade experimental coletadas da porção mediana do corpo, na região dorsolateral, imediatamente abaixo da nadadeira dorsal. Fonte: Autor, 2024. 33

Figura 7 - Cortes transversais do músculo branco de juvenis de *Colossoma macropomum* submetidos a diferentes intensidades de natação: (A) controle; (B) 0,5 BL s⁻¹; (C) 1,0 BL s⁻¹; (D) 1,5 BL s⁻¹; e (E) 2,0 BL s⁻¹. As setas indicam fibras de maior diâmetro e os asteriscos (*) indicam fibras de menor diâmetro. Coloração: Hematoxilina e Eosina (H&E). Barra de escala: 50 µm. 34

Figura 8 - Regressão quadrática da densidade de fibras musculares de juvenis de tambaqui submetidos a diferentes velocidades de natação. 40

Figura 9 - Distribuição de frequência das classes de diâmetro das fibras musculares de juvenis de tambaqui em diferentes intensidades de exercício. 41

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

- Tabela 1** - Desempenho zootécnico (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias (n = 20 peixes por tratamento).....36
- Tabela 2** - Índice morfométrico (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias (n = 20 peixes por tratamento). 37
- Tabela 3** - Índices biométricos (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias (n = 20 peixes por tratamento). 38
- Tabela 4** - Parâmetros hematológicos e bioquímicos do plasma (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui submetidos a diferentes velocidades de exercícios de natação durante 60 dias.....39
- Tabela 5** - Diâmetro médio das fibras, distribuição percentual das classes de diâmetro e densidade de fibras musculares (média $\pm$ desvio-padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias.....40

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA.....	13
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1. Tambaqui	16
3.2. Miogênese e os mecanismos de crescimento muscular nos peixes.....	17
3.3. Fisiologia do nado e o exercício da natação no desenvolvimento muscular	20
CAPÍTULO II - VELOCIDADES MODERADAS DE NATAÇÃO PROMOVEM EFICIÊNCIA METABÓLICA E HIPERPLASIA MUSCULAR EM JUVENIS DE TAMBAQUI (<i>Colossoma macropomum</i>).	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1. Sistema de recirculação de água e ajuste do fluxo de água	28
4.2. Delineamento experimental	30
4.3. Parâmetros de qualidade de água	30
4.4. Desempenho zootécnico e Índices morfométricos	30
4.5. Parâmetros hemato-bioquímicos e índices biométricos	31
4.6. Análises histológicas	32
4.8. Análises estatísticas	34
5. RESULTADOS	36
6. DISCUSSÃO	42
7. CONCLUSÃO.....	47
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
9. REFERÊNCIAS.....	49

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO

A piscicultura tem se consolidado como uma das principais atividades produtoras de proteína animal em escala global, contribuindo significativamente para a segurança alimentar e para o abastecimento de produtos oriundos do pescado (FAO, 2024). Entretanto, o crescimento intensivo dessa atividade tem imposto desafios ambientais, especialmente no que se refere ao uso e à gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, torna-se fundamental que a piscicultura atenda aos três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental, impulsionando o desenvolvimento e a adoção de tecnologias voltadas à redução do consumo de água, ao controle da carga orgânica e à mitigação dos impactos ambientais, sem comprometer a produtividade e a rentabilidade dos sistemas de produção.

A expansão da piscicultura também tem se refletido na evolução dos sistemas de produção. Tradicionalmente realizada em tanques escavados ou semi-escavados, a atividade vem incorporando, crescentemente, sistemas mais intensivos, que permitem maior controle das condições de confinamento, otimização do uso dos recursos hídricos e aumento da produtividade. Nesse sentido, sistemas fechados, como os sistemas de recirculação de água (Recirculating Aquaculture System – RAS), destacam-se por possibilitarem o uso mais eficiente da água, a melhoria dos parâmetros de qualidade da água e o aumento da densidade de estocagem de peixes em confinamento (EBELING; TIMMONS, 2012). Além disso, por se tratar de sistemas com elevado grau de controle ambiental, esses modelos permitem o ajuste preciso de variáveis como temperatura, oxigenação e fluxo de água.

O controle do fluxo de água, em particular, abre espaço para a aplicação de estratégias de manejo baseadas no exercício físico dos peixes, por meio da manipulação da velocidade de natação. Essa abordagem é considerada uma ferramenta promissora para influenciar o crescimento muscular e características relacionadas à qualidade da carne, uma vez que a natação forçada pode induzir ajustes fisiológicos e metabólicos associados à melhora do desempenho produtivo.

Essa estratégia está alinhada à crescente demanda por pescado de melhor qualidade, caracterizado, entre outros aspectos, por menor teor de gordura, tanto por parte dos consumidores quanto da indústria de processamento. Tal cenário reforça a necessidade de adoção de práticas de manejo que, além de maximizar o desempenho produtivo, contribuam para a melhoria da qualidade do produto.

O exercício físico controlado, proporcionado pela natação forçada com controle do fluxo de água, é associado a efeitos benéficos em diversas espécies de peixes, incluindo maior ganho de peso, melhoria na conversão alimentar, modulação do crescimento muscular e alterações na composição da carne (DAVISON, 1997). Resultados semelhantes foram observados em espécies como o salmão-do-Atlântico (*Salmo salar*) (JØRGENSEN; JOBLING, 1993), o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) (SANTOS et al., 2017), a tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) e a corvina-de-pintas (*Sciaenops ocellatus*) (BURNS; GATLIN, 2022).

No Brasil, o tambaqui (*Colossoma macropomum*) destaca-se como a espécie nativa mais produzida, em função de sua compatibilidade com técnicas de reprodução artificial, capacidade de adaptação a diferentes sistemas de produção, elevada eficiência no aproveitamento do plâncton como recurso nutricional e boa resposta produtiva às rações comerciais (ARANTES; FREITAS, 2016). No entanto, trata-se de uma espécie caracterizada por elevado teor de gordura corporal, que pode alcançar até 8% no filé (SANTOS, 2019). Esse alto teor lipídico pode comprometer a aceitação do produto no mercado e reduzir sua vida de prateleira, uma vez que torna o pescado mais suscetível à oxidação (LIMA; KIRSCHNIK, 2013).

Dessa forma, o presente estudo avaliou efeitos de diferentes intensidades de exercício de natação sobre o desempenho zootécnico, índices morfométricos biométricos, parâmetros hematobioquímicos e crescimento muscular, e, consequentemente, a qualidade da carne do tambaqui.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos de diferentes intensidades de natação forçada sobre o crescimento muscular e a qualidade da carne do tambaqui (*Colossoma macropomum*).

2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar o desempenho zootécnico, índices biométricos, parâmetros hemato-bioquímicos de tambaquis submetidos a diferentes intensidades de natação;
- b) Verificar se há potencialização do crescimento muscular do tambaqui, com ênfase na hipertrofia e hiperplasia das fibras musculares.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Tambaqui

O tambaqui (*Colossoma macropomum*, CUVIER, 1816) é um teleósteo nativo das bacias dos rios Amazonas e Orinoco, pertencente à família Serrasalminae. A espécie consolidou-se como a principal nativa da piscicultura nacional e a segunda espécie de peixe mais produzida no Brasil (IBGE, 2024). Além da relevância no mercado interno, o tambaqui apresenta uma expansão global crescente, com destaque para a produção em países do continente asiático, como China, Vietnã e Indonésia (WOYNÁROVICH; VAN ANROOY, 2019).

Esta relevância produtiva é sustentada por sua robustez biológica, como a elevada tolerância ambiental e a capacidade de tolerar baixos níveis de oxigênio dissolvido (NEVES et al., 2020). Morfologicamente, possui corpo romboidal e nadadeiras bem desenvolvidas, atingindo em ambientes naturais até 100 cm de comprimento (MORAIS; O'SULLIVAN, 2017). Nesse contexto, a espécie apresenta características biológicas que favorecem a aquicultura, como crescimento acelerado, boa conversão alimentar e alta aceitação da carne pelos consumidores. Por isso, produtores utilizam a espécie com eficiência tanto em sistemas tradicionais quanto em modelos intensivos de produção.

Na piscicultura, o tambaqui demonstra adaptabilidade a dietas formuladas, com níveis nutricionais variando entre 25% e 35% de proteína bruta (RODRIGUES, 2014). Atualmente, a produção brasileira, sendo era majoritariamente realizada de forma semi-intensiva em viveiros escavados, atravessa um processo de intensificação. Verifica-se a expansão de sistemas de criação mais intensivos, como tanques-rede, sistemas de recirculação de água (RAS) e tanques elevados de PVC ou alvenaria (VALENTI et al., 2021; SANTOS et al., 2021). Tais sistemas visam aumentar a eficiência no uso de recursos naturais e a produtividade por área (BOYD et al., 2020).

Contudo, a intensificação produtiva impõe desafios fisiológicos, uma vez que o confinamento limita o comportamento natural da espécie, induzindo-a a um estado de maior sedentarismo. Embora na natureza seja comumente encontrado em remansos, o tambaqui é um peixe reofílico; durante o período de reprodução, os adultos deixam a várzea no período da vazante e migram contra a corrente, subindo o rio principal e seus afluentes (ARAÚJO-LIMA et al., 1998; MORAIS; O'SULLIVAN, 2017). Esse comportamento de longas migrações demanda uma alta capacidade de natação sustentada. Ao ser restringido a ambientes de baixa movimentação de água, o potencial de desenvolvimento muscular do tambaqui ainda não é

plenamente explorado. Nesse contexto, o estímulo físico, como o exercício de natação, pode ser investigado como uma ferramenta para otimizar o desempenho zootécnico e a qualidade da carne nos novos sistemas intensivos.

3.2. Miogênese e os mecanismos de crescimento muscular nos peixes

O processo de formação do tecido muscular, ou miogênese, inicia-se na fase embrionária, onde as fibras musculares esqueléticas derivam de células precursoras localizadas nos somitos. Estas células diferenciam-se em mioblastos mononucleados que, após sucessivas divisões mitóticas, fundem-se para formar miotubos multinucleados. O amadurecimento destas estruturas resulta na formação das fibras musculares maduras (JOHNSTON, 1999; MELO et al., 2024).

Este desenvolvimento é coordenado pelos Fatores Reguladores Miogênicos (MRFs), que se destacam como os principais fatores transcricionais músculo-específicos que regulam a miogênese, controlando a ativação, proliferação e diferenciação dos mioblastos (KOGANTI; YAO; CLEVELAND, 2021). Dos quatro MRFs, Myf5, MyoD, miogenina e MRF4, os primários MyoD e Myf5 são expressos na fase de proliferação, enquanto a miogenina e o MRF4 atuam durante a fusão e diferenciação em fibras imaturas (MEGENEY; RUDNICKI, 1995). Mesmo após o término da miogênese embrionária, parte dos mioblastos permanece como células precursoras miogênicas (MPCs) indiferenciadas no tecido muscular, denominadas células satélites, armazenadas como um reservatório entre a lâmina basal e o sarcolema dos feixes musculares maduros, onde são sequestradas durante a miogênese adulta (KOGANTI; YAO; CLEVELAND, 2021). Esse tipo celular tem papel importante nos processos de crescimento, regeneração e manutenção da homeostase muscular (FAUCONNEAU; PABOEUF, 2001).

Considerando que a musculatura representa entre 50% e 70% da massa corporal dos peixes, este tecido constitui a principal parte comestível e, conseqüentemente, o maior componente de interesse econômico (BONE, 1978). Estruturalmente, o músculo organiza-se em miômeros dispostos em forma de “W”, separados por miosseptos que conectam o tecido ao esqueleto axial (VIDELER, 1993) (Figura 1). Desta forma, a compreensão dos mecanismos celulares e fisiológicos do crescimento muscular é determinante para elevar a eficiência dos sistemas produtivos e melhorar atributos de qualidade da carne, como rendimento de filé, textura e deposição lipídica.

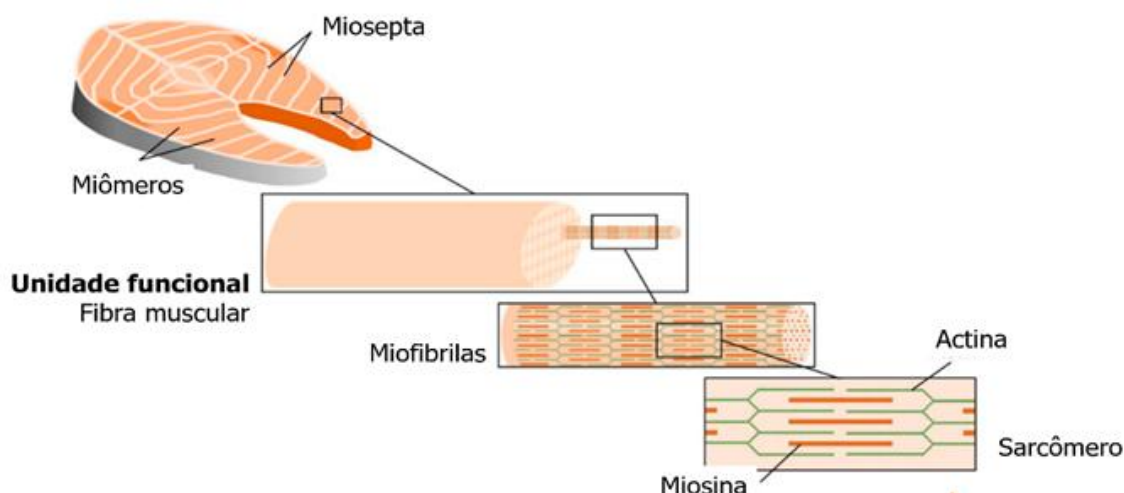


Figura 1 - Representação esquemática da organização estrutural da musculatura esquelética de peixes teleósteos. Fonte: Adaptado de Kazir e Livney (2021).

A musculatura esquelética dos peixes é composta por três tipos de fibras: vermelhas, brancas e intermediárias (Figura 2). As fibras vermelhas localizam-se em uma faixa estreita e superficial ao longo da linha lateral, inserindo-se no septo horizontal, sendo recrutadas especificamente para nadar de sustentação e longa duração. Operando sob metabolismo aeróbio, essas fibras são especializadas em movimentos de baixa velocidade e representam de 10% a 30% da musculatura do miôto. Morfologicamente, possuem diâmetro pequeno (25-45 μm) e destacam-se pela elevada densidade mitocondrial, rica vascularização e presença de mioglobina e citocromos. Adicionalmente, a reserva de glicogênio e de gotículas lipídicas, completa seu perfil metabólico, otimizando a natação sustentada de baixa intensidade com máxima economia energética (ROME, 1988; SÄNGER; STOIBER, 2001; SANTOS, 2007).

Em contraste, as fibras brancas são predominantes, representando mais de 70% da massa do músculo miotomal. Estas fibras possuem o maior diâmetro (50-100 μm ou mais) e são especializadas em movimentos rápidos e de curta duração, operando via metabolismo anaeróbio para converter glicogênio em lactato na obtenção de energia. Tal perfil metabólico está associado à baixa vascularização e às reduzidas concentrações de mioglobina e mitocôndrias nestas células. Localizadas entre as camadas de fibras brancas e vermelhas, encontra-se uma zona de transição composta pelas fibras intermediárias. De coloração rosada, estas apresentam características fisiológicas mistas, sendo classificadas como fibras de contração rápida com velocidade intermediária (ROSA, 1978; SÄNGER; STOIBER, 2001).

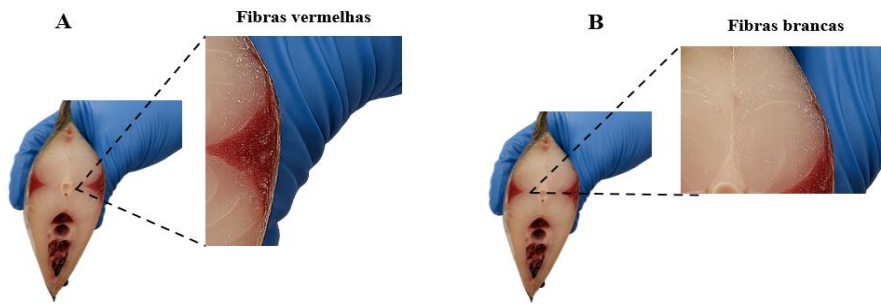


Figura 2 - Corte transversal da musculatura do tambaqui (*Colossoma macropomum*) demonstrando a organização das fibras musculares vermelhas (A) e brancas (B). Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Diferentemente dos mamíferos, em peixes teleósteos, o crescimento muscular é caracterizado por uma miogênese indeterminada, o que permite que o tecido se desenvolva de forma contínua ao longo da vida, resultado da ativação e diferenciação das células satélites, que regem os mecanismos de hipertrofia e hiperplasia (KOUMANS; AKSTER, 1995; DURAN et al., 2022). A hipertrofia consiste no aumento do diâmetro das fibras existentes pela fusão de células satélites e aumento da síntese de miofibrilas. A hiperplasia, por sua vez, envolve a formação de novos miotubos, processo especialmente relevante em espécies de grande porte e de crescimento indeterminado como o tambaqui (ROWLERSON; VEGGETTI, 2001). Após a fase embrionária, a hiperplasia ocorre de forma estratificada, em zonas de proliferação abaixo das fibras vermelhas, e em mosaico, distribuindo-se por todo o miótomo (Figura 3). Essa dinâmica resulta na coexistência de fibras de diferentes tamanhos e idades (ROWLERSON; VEGGETTI, 2001).

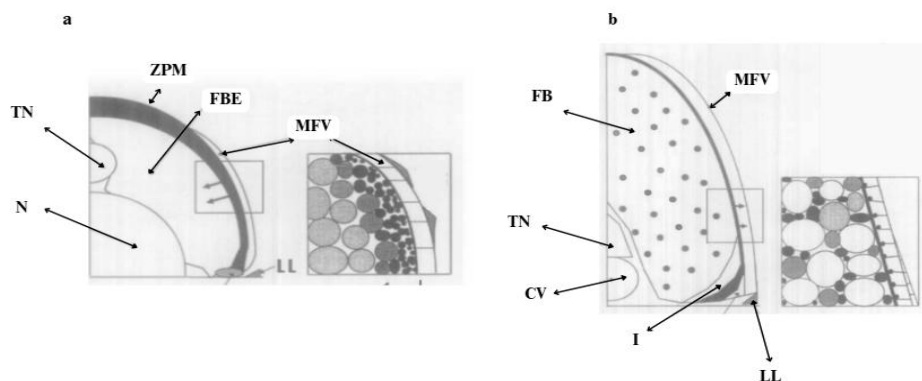


Figura 3– Representação esquemática da hiperplasia estratificada (A) e hiperplasia em mosaico (B). Abreviações: zonas de proliferação de mioblastos (ZPM), TN = tubo neural, N = notocorda, FBE = fibras musculares brancas embrionárias, MFV = monocamada de fibras musculares vermelhas, LL = linha lateral, CV = coluna vertebral, FB = fibras musculares brancas, I = fibras musculares intermediárias (ROWLERSON; VEGGETTI, 2001).

Estudos ultraestruturais indicam que a dinâmica de células satélites pode ser modulada pelo ambiente. Sugere-se que mioblastos indiferenciados proliferam no revestimento mesenquimal e migram para o músculo através dos miosseptos, contribuindo para zonas germinativas e subpopulações com características de células-tronco (STOIBER; SÄNGER, 1996). Diante desta elevada plasticidade, estímulos externos, como o exercício físico, podem modular os mecanismos de hiperplasia e hipertrofia, favorecendo o desenvolvimento muscular e a eficiência produtiva da espécie (RODGERS; GOMEZ ISAZA, 2024).

3.3. Fisiologia do nado e o exercício da natação no desenvolvimento muscular

A natação é um comportamento fisiológico central no ciclo de vida dos peixes, sendo essencial não apenas para a locomoção, mas também para a busca por alimento, fuga de predadores e interações sociais e reprodutivas. Contudo, em sistemas de criação intensiva, a expressão desses comportamentos é frequentemente reduzida devido às altas densidades de estocagem e ao baixo fluxo de água. Como a maioria dos peixes tende a nadar contra a correnteza (reotaxia), a manutenção em água parada pode causar o subdesenvolvimento deste instinto, levando à perda dos benefícios do exercício e, conseqüentemente, à redução da capacidade física e da massa muscular (PALSTRA; PLANAS, 2011; RODGERS; GOMEZ ISAZA, 2024).

A resposta metabólica à natação é classificada conforme a velocidade e a duração do esforço, fatores que determinam o recrutamento das fibras musculares. Velocidades de natação sustentada são definidas como aquelas em que o peixe consegue nadar por períodos superiores a 200 minutos, sendo a atividade mantida inteiramente via metabolismo aeróbico, sem causar fadiga (BEAMISH, 1978). Já a natação prolongada, embora também alimentada majoritariamente por vias aeróbicas, possui duração entre 20 segundos e 200 minutos e resulta em fadiga (BEAMISH, 1978). Ambas as categorias de nado, em intensidades baixas a moderadas, são impulsionadas pela musculatura vermelha (fibras de contração lenta), os quais são continuamente supridos com oxigênio e nutrientes pelos sistemas cardiovascular e respiratório (BONE, 1978).

Durante o esforço prolongado, a fadiga é desencadeada pela transição do recrutamento das fibras de contração lenta para as fibras brancas, de contração rápida (BONE, 1978). Estas últimas são alimentadas anaerobicamente através da glicólise e do consumo das reservas de glicogênio (BONE, 1978; MCKENZIE, 2011). Tal processo resulta em exaustão assim que as reservas energéticas são consumidas, ocorrendo em questão de segundos, demandando um

período de recuperação para o restabelecimento dos níveis de nutrientes (BEAMISH, 1978; BONE, 1978).

Peixes submetidos a velocidades consideradas ótimas para cada espécie tendem a apresentar maior taxa de crescimento, melhor desempenho zootécnico e maior eficiência alimentar. Esses efeitos positivos foram observados em diferentes espécies, como o matrinxã (*Brycon amazonicus*) a 12,3 cm/s (ARBELÁEZ-ROJAS; MORAES, 2009), o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) a 27,5 cm/s (SANTOS et al., 2017), a tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) e tambor-vermelho (*Sciaenops ocellatus*) a 19 cm/s (BURNS; GATLIN, 2022), além de tilápias submetidas ao exercício a 36 cm/s (ARBELÁEZ-ROJAS et al., 2024). A natação sustentada é reconhecida por induzir hipertrofia e hiperplasia muscular, aumentar a capilarização e favorecer a eficiência no metabolismo aeróbico (IBARZ et al., 2011; SÁNCHEZ-GURMACHES et al., 2013; MOYA et al., 2019).

Do ponto de vista fisiológico, a natação em velocidade moderada ativa vias anabólicas essenciais, como o fator de crescimento semelhante à insulina (IGF-I), a insulina e as proteínas quinases ativadas por mitógenos (MAPK), favorecendo a deposição proteica e o uso eficiente dos nutrientes (SÁNCHEZ-GURMACHES et al., 2013). O aumento da demanda por fluxo sanguíneo durante o exercício também estimula a angiogênese por meio da ação do fator de crescimento endotelial vascular (VEGF) e do óxido nítrico, ampliando o suprimento de oxigênio ao músculo esquelético (PALSTRA et al., 2014; Zhao et al., 2023). Paralelamente, a ativação da via antioxidante Keap1–Nrf2 contribui para a proteção contra o estresse oxidativo associado ao esforço físico (FELIP et al., 2013, ZHAO et al., 2023).

A intensidade do exercício também influencia diretamente a composição nutricional da carne. Aspectos como teor de proteína, perfil lipídico, textura e rendimento são modulados pelo metabolismo muscular e pelo padrão de atividade física (HUANG et al., 2021; TIMMERHAUS et al., 2021). O exercício moderado pode elevar o teor proteico e reduzir o acúmulo de gordura corporal, frequente em sistemas intensivos, além de melhorar características sensoriais como firmeza e textura (BELAL, 2015; LI et al., 2016; ZHU et al., 2023). Essas respostas estão associadas ao maior recrutamento muscular e à ativação de vias metabólicas relacionadas à síntese proteica e ao uso energético.

Contudo, a intensidade do exercício deve ser cuidadosamente ajustada; velocidades excessivas elevam a demanda metabólica, reduzem o desempenho produtivo e podem induzir quadros de estresse crônico e lesões físicas (SOLSTORM et al., 2015; SOLSTORM et al., 2016). Assim, o exercício de natação, quando aplicado em intensidade adequada, constitui uma

ferramenta estratégica para potencializar o crescimento muscular, otimizar a qualidade da carne e promover o bem-estar dos peixes da piscicultura.

4. REFERÊNCIAS

- ARANTES, M. L.; FREITAS, C. E. C. Effects of fisheries zoning and environmental characteristics on population parameters of the tambaqui (*Colossoma macropomum*) in managed floodplain lakes in the Central Amazon. **Fisheries Management and Ecology**, v. 23, n. 2, p. 133–143, 2016. <https://doi.org/10.1111/fme.12164>.
- ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; GOULDING, M. **Os frutos do tambaqui: ecologia, conservação e cultivo na Amazônia**. Brasília: CNPq; Sociedade Civil Mamiará, 1998.
- ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; MORAES, G. Interação do exercício de natação sustentada e da densidade de estocagem no desempenho e na composição corporal de juvenis de matrinxã *Brycon amazonicus*. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 201–208, 2009.
- ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; SILVA, T.; OTA, E.; MORAES, G.; INOUE, L. Growth performance of tilapia juveniles *Oreochromis niloticus* reared in two sustained swimming speeds and two stocking densities. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, e24220239, 2024. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-202422023>.
- BEAMISH, F. W. H. **Swimming capacity**. New York: Academic Press, 1978.
- BELAL, I. E. H. Effect of water velocity on Tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings growth parameters and body composition. **Journal of Medical and Bioengineering**, v. 4, n. 6, p. 457–460, 2015. <https://doi.org/10.12720/jomb.4.6.457-460>.
- BONE, Q. Locomotor muscle. In: RANDALL, D. J.; CONTE, F. P. (Ed.). **Fish physiology**. New York: Academic Press, 1978. v. 7, p. 361–424.
- BOYD, C. E.; D'ABRAMO, L. R.; GLENCROSS, B. D.; HUYBEN, D. C.; JUAREZ, L. M.; LOCKWOOD, G. S.; MCNEVIN, A. A.; TACON, A. G. J.; TELETCHER, F.; TOMASSO, J. R.; TUCKER, C. S.; VALENTI, W. C. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578–633, 2020.
- BURNS, A.; GATLIN, D. M. Effects of sustained swimming exercise on growth and body composition responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), red drum (*Sciaenops ocellatus*), and hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*). **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 5, p. 1401–1411, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10695-022-01129-6>.
- DAVISON, W. The effects of exercise training on teleost fish: a review of recent literature. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology**, v. 117, p. 67–75, 1997.
- DURAN, B. O. S.; ZANELLA, B. T. T.; PEREZ, E. S.; MARECO, E. A.; BLASCO, J.; DAL-PAI-SILVA, M.; GARCIA DE LA SERRANA, D. Amino acids and IGF1 regulation of fish muscle growth revealed by transcriptome and microRNAome integrative analyses of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) myotubes. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 3, p. 1180, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijms23031180>.
- EBELING, J. M.; TIMMONS, M. B. Recirculating aquaculture systems. In: TIDWELL, J. H. (Ed.). **Aquaculture production systems**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012. p. 245–278. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch11>.

FAO. **The state of world fisheries and aquaculture 2024**. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cd0683en>. Acesso em: 15 dez. 2025.

FAUCONNEAU, B.; PABOEUF, G. Muscle Satellite Cells in Fish. **Fish Physiology**, v. 18, p. 73-101, 2001.

FELIP, O.; BLASCO, J.; IBARZ, A.; MARTÍN-PÉREZ, M.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J. Beneficial effects of sustained activity on the use of dietary protein and carbohydrate traced with stable isotopes ^{15}N and ^{13}C in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). **Journal of Comparative Physiology B**, v. 183, n. 2, p. 223–234, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00360-012-0703-6>.

HUANG, X.; HEGAZY, A. M.; ZHANG, X. Swimming exercise as potential measure to improve flesh quality of cultivable fish: a review. **Aquaculture Research**, v. 52, n. 12, p. 5978–5989, 2021.

IBARZ, A.; FELIP, O.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; MARTÍN-PÉREZ, M.; BLASCO, J.; TORRELLA, J. R. Sustained swimming improves muscle growth and cellularity in gilthead sea bream. **Journal of Comparative Physiology B**, v. 181, n. 2, p. 209–217, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00360-010-0521-3>.

IBGE. **Produção da Pecuária Municipal 2023**: informativo. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pog/brasil>. Acesso em: 21 abr. 2026.

JOHNSTON, I. A. Muscle development and growth: potential implications for flesh quality in fish. **Aquaculture**, v. 177, n. 1–4, p. 99–115, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00072-1).

JØRGENSEN, E. H.; JOBLING, M. The effects of exercise on growth, food utilisation and osmoregulatory capacity of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. **Aquaculture**, v. 116, n. 2–3, p. 233–246, 1993.

KOGANTI, P.; YAO, J.; CLEVELAND, B. M. Molecular mechanisms regulating muscle plasticity in fish. **Animals**, v. 11, n. 1, p. 61, 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11010061>.

KOUMANS, J. T. M.; AKSTER, H. A. Myogenic cells in development and growth of fish. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology**, v. 110, n. 1, p. 3–20, 1995. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(94\)00150-R](https://doi.org/10.1016/0300-9629(94)00150-R).

LI, X. M.; YUAN, J. M.; FU, S. J.; ZHANG, Y. G. The effect of sustained swimming exercise on the growth performance, muscle cellularity and flesh quality of juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*). **Aquaculture**, v. 465, p. 287–295, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.021>.

LIMA, L. K. F.; KIRSCHNIK, P. G. Composição, alterações pós-morte e métodos de conservação do pescado. In: RODRIGUES, A. P. O. et al. (Ed.). **Piscicultura de água doce: multiplicando conhecimentos**. Brasília: Embrapa, 2013. p. 401–421.

MCKENZIE, D. **The energetics of Fish Swimming**. 2011.

MEGENEY, L. A.; RUDNICKI, M. A. Determination versus differentiation and the MyoD family of transcription factors. **Biochemistry and Cell Biology**, v. 73, n. 9-10, p. 723–732, 1995. <https://doi.org/10.1139/o95-080>.

MELO, D. S. D.; SÁ, A. L. A.; GUERREIRO, S. L. M.; NATIVIDADE, J.; GOMES, P. F. F.; TAKATA, R.; SILVA FILHO, E.; PALHETA, G. D. A.; MELO, N. F. A. C.; STERZELECKI, F. C.; HAMOY, I. Growth, survival, and myogenic gene expression in the post-larvae of *Colossoma macropomum* provisioned with *Artemia* nauplii. **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 50, p. 145–155, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10695-023-01182-9>.

MORAIS, I. S.; O'SULLIVAN, F. L. A. Biologia, habitat e cultivo do tambaqui *Colossoma macropomum* (Cuvier, 1816). **Scientia Amazonia**, v. 6, n. 1, p. 81–93, 2017.

MOYA, A.; TORRELLA, J. R.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; RIZO-ROCA, D.; MILLÁN-CUBILLO, A.; VÉLEZ, E. J.; ARCAS, A.; GUTIÉRREZ, J.; BLASCO, J. Sustained swimming enhances white muscle capillarisation and growth by hyperplasia in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fingerlings. **Aquaculture**, v. 501, p. 397–403, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.062>.

NEVES, L. C.; FAVERO, G. C.; BEIER, S. L.; FERREIRA, N. S.; PALHETA, G. D. A.; MELO, N. F. A. C.; LUZ, R. K. Physiological and metabolic responses in juvenile *Colossoma macropomum* exposed to hypoxia. **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 46, n. 6, p. 2157–2167, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10695-020-00868-8>.

PALSTRA, A. P.; PLANAS, J. V. Peixes em exercício. **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 37, p. 259–272, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10695-011-9505-0>.

PALSTRA, A. P.; ROVIRA, M.; RIZO-ROCA, D.; TORRELLA, J. R.; SPAINK, H. P.; PLANAS, J. V. Swimming-induced exercise promotes hypertrophy and vascularization of fast skeletal muscle fibres and activation of myogenic and angiogenic transcriptional programs in adult zebrafish. **BMC Genomics**, v. 15, n. 1, p. 1136, 2014. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1136>.

RODGERS, E. M.; GOMEZ ISAZA, D. F. The growth-promoting effects of exercise in finfish: A systematic review and meta-analysis. **Reviews in Aquaculture**, v. 16, n. 2, p. 942–953, 2024. <https://doi.org/10.1111/raq.12879>.

RODRIGUES, A. P. O. Nutrição e alimentação do tambaqui (*Colossoma macropomum*). **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 40, n. 1, p. 135–145, 2014.

ROME, L. C.; FUNKE, R. P.; ALEXANDER, R. M.; LUTZ, G.; ALDRIDGE, H.; SCOTT, F.; FREADMAN, M. Why animals have different muscle fibre types. **Nature**, v. 335, n. 6193, p. 824–827, 1988. <https://doi.org/10.1038/335824>.

ROSA, R. S. A natação nos peixes. **Revista Nordestina de Biologia**, v. 1, n. 1, p. 149–161, 1978.

ROWLERSON, A.; VEGGETTI, A. Cellular mechanisms of post-embryonic muscle growth in aquaculture species. In: JOHNSTON, I. A. (Ed.). **Fish physiology**. San Diego: Academic Press, 2001. v. 18, p. 103–140. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(01\)18006-4](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(01)18006-4).

SÁNCHEZ-GURMACHES, J.; CRUZ-GARCIA, L.; IBARZ, A.; FERNÁNDEZ-BORRÁS, J.; BLASCO, J.; GUTIÉRREZ, J.; NAVARRO, I. Insulin, IGF-I, and muscle MAPK pathway responses after sustained exercise and their contribution to growth and lipid metabolism regulation in gilthead sea bream. **Domestic Animal Endocrinology**, v. 45, n. 3, p. 145–153, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2013.08.001>.

SÄNGER, A. M.; STOIBER, W. Muscle fiber diversity and plasticity. In: JOHNSTON, I. A. (Ed.). **Muscle development and growth**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 187–250.

SANTOS, V. B. Aspectos morfológicos da musculatura lateral dos peixes. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 33, n. 1, p. 127–135, 2007.

SANTOS, V. B.; OLIVEIRA, M. W. M.; SALOMÃO, R. A. S.; SANTOS, R. S.; PAULA, T. G.; SILVA, M. D. P.; MARECO, E. A. Influence of temperature and exercise on growth performance, muscle, and adipose tissue in pacus (*Piaractus mesopotamicus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 221–227, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.08.004>.

SANTOS, T. S. **Composição dos ácidos graxos dos lipídios de tambaqui (*Colossoma macropomum*), peixe nativo da Amazônia**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Agroalimentar) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SANTOS, F. A. C.; BOAVENTURA, T. P.; JULIO, G. S. C.; CORTEZZI, P. P.; FIGUEIREDO, L. G.; FAVERO, G. C.; PALHETA, G. D. A.; MELO, N. F. A. C.; LUZ, R. K. Growth performance and physiological parameters of *Colossoma macropomum* in a recirculating aquaculture system (RAS): Importance of stocking density and classification. **Aquaculture**, v. 534, Artigo 736274, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736274>.

SOLSTORM, F.; SOLSTORM, D.; OPPEDAL, F.; FERNÖ, A.; FRASER, T. W. K.; OLSEN, R. E. Fast water currents reduce production performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*. **Aquaculture Environment Interactions**, v. 7, p. 125–134, 2015. <https://doi.org/10.3354/aei00143>.

SOLSTORM, F.; SOLSTORM, D.; OPPEDAL, F.; OLSEN, R. E.; STIEN, L. H.; FERNÖ, A. Not too slow, not too fast: water currents affect group structure, aggression and welfare in post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*. **Aquaculture Environment Interactions**, v. 8, p. 339–347, 2016. <https://doi.org/10.3354/aei00178>.

STOIBER, W.; SÄNGER, A. M. An electron microscopic investigation into the possible source of new muscle fibres in teleost fish. **Anatomy and Embryology**, v. 194, p. 569–579, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF00187470>.

TIMMERHAUS, G.; LAZADO, C. C.; CABILLON, N. A. R.; REITEN, B. K. M.; JOHANSEN, L. H. The optimum velocity for Atlantic salmon post-smolts in RAS is a compromise between muscle growth and fish welfare. **Aquaculture**, v. 532, 736076, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736076>.

VALENTI, W. C.; BARROS, H. P.; MORAES-VALENTI, P.; BUENO, G. W.; CAVALLI, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, 100611, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>.

VIDELER, J. J. **Fish swimming**. Londres: Chapman & Hall, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1580-3>.

WOYNÁROVICH, A.; VAN ANROOY, R. **Field guide to the culture of tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier, 1816)**. Roma: FAO, 2019. 121 p. (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, n. 624).

ZHAO, L.; XU, L.; YANG, Y.; HE, Q.; LIU, Q.; LUO, J.; LUO, W.; ZHANG, X.; YAN, T.; YANG, S. Exercise training promotes growth through hypertrophy and enhances capillarization and antioxidant capacity in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*). **Aquaculture**, v. 562, Artigo 738850, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738850>.

ZHU, T.; YANG, R.; XIAO, R.; NI, W.; LIU, L.; JHAO, J.; YE, Z. Effect of swimming training on the flesh quality in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) and its relationship with muscle metabolism. **Aquaculture**, v. 577, 739926, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739926>.

CAPÍTULO II - VELOCIDADES MODERADAS DE NATAÇÃO PROMOVEM EFICIÊNCIA METABÓLICA E HIPERPLASIA MUSCULAR EM JUVENIS DE TAMBAQUI (*Colossoma macropomum*).

Os resultados deste capítulo foram submetidos na forma de artigo científico sob o seguinte referencial: GUIA, B.G.M.; SANTOS, D.K.M.; CEROZI, B.S.; SANTANA, T.M.; GONÇALVES, L.U. Moderate swimming speeds promote metabolic efficiency and muscle hyperplasia in juvenile tambaqui (*Colossoma macropomum*). **Aquaculture Research**.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Aquicultura da Coordenação de Tecnologia e Inovação (COTEI), vinculada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), totalizando 60 dias de experimento. Todos os procedimentos experimentais foram aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), conforme o processo n.º 01280.000126/2025-12.

4.1. Sistema de recirculação de água e ajuste do fluxo de água

Foram utilizados cinco tanques de polietileno de 1000 L, com 600 L de volume útil. Cada tanque continha uma bomba d'água submersível de 0,5 cv (modelo XKS 450PW – Ferrari®, Cotia, São Paulo, Brasil), responsável por gerar o fluxo rotacional. A saída de cada bomba foi conectada a uma estrutura de tubos de PVC, responsável por direcionar a água, criando diferentes velocidades de fluxo (Figura 4).

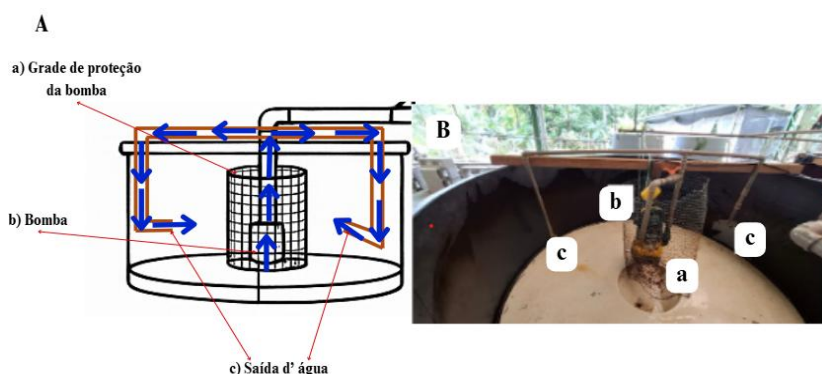


Figura 4 - A) Corte transversal dos tanques experimentais, mostrando a configuração utilizada: (a) grade de proteção da bomba, instalada no centro para impedir o acesso dos peixes; (b) bomba submersa de 0,5 cv, responsável por gerar o fluxo rotacional; (c) saídas de água conectadas a tubos de PVC, que direcionam o fluxo e permitem diferentes velocidades de nado, conforme a abertura final dos tubos. As setas em azul representam o fluxo de água nos tanques. B) Fotografia de um dos tanques experimentais evidenciando a disposição da bomba, da grade de proteção e das saídas de água.

Cada tanque possuía estruturas iguais, inclusive o tanque experimental do grupo controle, variando somente a abertura final dos tubos de PVC, o que permitia diferentes forças de injeção de água, resultando em velocidades específicas de nado para os peixes. A bomba foi instalada no centro de cada tanque isolada com uma tela/cilindro de proteção para evitar o acesso dos peixes. Os efluentes de todos os tanques experimentais foram destinados a um tanque maior onde acontecia fitorremediação e água retornava para cada tanque na mesma vazão para garantir a mesma taxa de renovação de água, porém cada unidade experimental mantinha o seu fluxo de água em velocidade diferente proporcionada pelo ajuste da bomba interna de cada tanque. Todas as unidades experimentais permaneceram com aeração constante e fotoperíodo natural.

As diferentes intensidades de fluxo de água foram determinadas com base em velocidades controladas nos tanques experimentais utilizando um fluxômetro mecânico (modelo 2030 BR, Limnotec, São Paulo). Os valores de velocidade adotados para cada tratamento foram determinados por meio de medições realizadas em duas zonas distintas dentro de cada tanque experimental. Em cada zona, foram avaliadas oito áreas, totalizando 16 pontos de medição por tanque. A velocidade final considerada para cada tanque experimental correspondeu à média dos valores obtidos nesses pontos, assegurando uma estimativa representativa do fluxo de água em todo o volume do tanque (Figura 5).

Foram definidos cinco tratamentos experimentais, conforme a velocidade da água, sendo: intensidade muito baixa (IMB) representada pela velocidade de 10 cm/s, intensidade baixa (IB) foi estabelecida em 20 cm/s, intensidade média (IM) correspondeu à velocidade de 30 cm/s, a intensidade alta (IA) foi fixada em 40 cm/s e, o grupo controle (C) foi mantido sem fluxo, com velocidade de 0 cm/s.

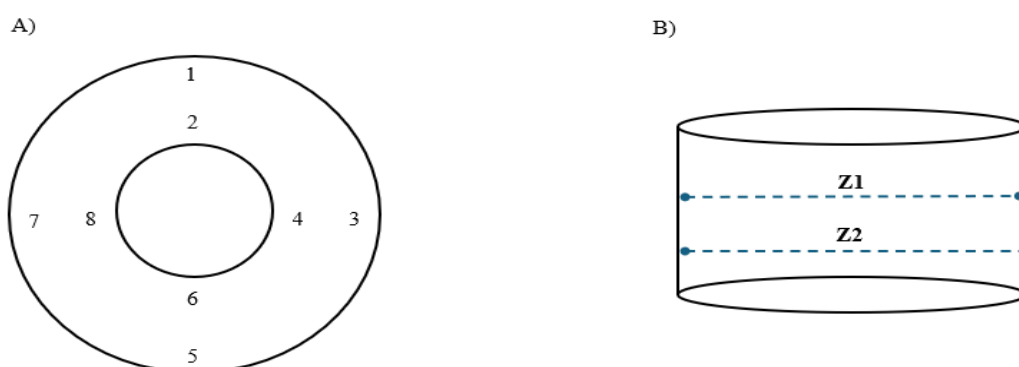


Figura 5 - Representação dos pontos de medição da velocidade da água nos tanques experimentais. (a) Vista superior da caixa, dos pontos de medição distribuídos entre o centro e as bordas (b) Vista lateral da caixa, as zonas de profundidades avaliadas: Z1 (zona superior) e Z2 (zona inferior).

4.2. Delineamento experimental

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado composto de 5 tratamentos (intensidade do fluxo de água: IMB, IB, IM, IA e C). Foram utilizados 100 juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) ($160 \pm 16,3$ g; $20,5 \pm 0,81$ cm) distribuídos homogênea e aleatoriamente nos 5 tanques experimentais, sendo cada peixe considerado uma unidade experimental (20 peixes/tanque). Previamente ao início do experimento, os peixes foram anestesiados por imersão em solução de eugenol (100 mg/L), foram aferidos peso e comprimento, e em seguida os peixes foram identificados por meio de microchip (2x12 mm) inserido na região dorsal do lado direito cada peixe. Após a microchipagem, os peixes foram mantidos em quarentena por um período de 14 dias para recuperação do manejo.

A alimentação dos animais foi realizada duas vezes ao dia, às 8h e às 16h, utilizando ração comercial com 32% de proteína bruta (8-10 mm; MultiPeixe; Multifós — Nutrição animal). Durante a alimentação, a bomba d'água foi desligada por 30 minutos e os peixes foram alimentados até a saciedade aparente.

4.3. Parâmetros de qualidade de água

No período experimental foram avaliadas as variáveis físico-químicas da água: temperatura ($29,5 \pm 1,45$ °C), oxigênio dissolvido ($6,04 \pm 1,00$ mg/L) e pH ($6,42 \pm 0,32$) foram aferidas diariamente no período da tarde por meio de um multiparâmetro digital, (modelo ProQuatro, YSI, distribuída pela Tecnal, Piracicaba–SP). Quanto às variáveis químicas: amônia total ($0,42 \pm 0,19$ mg/L), nitrito ($0,03 \pm 0,02$ mg/L) foram mensuradas semanalmente por meio de kits colorimétricos (Alfakit AT 101; Alfakit, Florianópolis–SC, Brasil). Os valores obtidos dos parâmetros de qualidade da água mantiveram-se na faixa de conforto para criação da espécie (LIMA et al., 2019). A cada três dias foi realizada a limpeza dos tanques através da sifonagem dos resíduos orgânicos.

4.4. Desempenho zootécnico e Índices morfométricos

Ao final dos 60 dias do experimento, todos os peixes foram mensurados e pesados individualmente. Para este procedimento os peixes foram submetidos ao jejum prévio de 24 horas, e anestesiados por meio de imersão em solução de eugenol na proporção de 100 mg/L. Com os dados tabulados, foram calculadas as seguintes variáveis de desempenho zootécnico e índices morfométricos:

- Sobrevivência (%) = (número de animais no final do experimento ÷ número de animais no início do experimento) x 100.

- Ganho de peso (g) = peso final - peso inicial;
- Ganho de peso diário (g) = ganho de peso / dias de experimento
- Ganho de peso eviscerado (g) = peso do peixe inteiro - peso do peixe eviscerado
- Biomassa final (g) = número final de peixes x peso médio final
- Ganho em comprimento (cm) = comprimento final - comprimento inicial
- Fator de Condição (g) = $100 \times \text{peso} / \text{comprimento}^3$
- Taxa de Crescimento Relativo – TCR (%/dia) = $(e^g - 1) \times 100$, em que “e” é o número neperiano e $g = (\ln(\text{peso final}) - \ln(\text{peso inicial})) / (\text{número de dias experimentais})$;
- Consumo de ração aparente = consumo de ração ÷ número final de peixes
- Conversão alimentar aparente = consumo de ração ÷ ganho de peso
- Taxa de eficiência proteica – TEP (%) = $(\text{ganho em peso} \div \text{consumo de proteína bruta da dieta}) \times 100$;
- Eficiência alimentar = Ganho de peso / consumo de ração seca
- CC/CP (%) – $(\text{comprimento cabeça} / \text{comprimento padrão}) \times 100$;
- AC/CP (%) - $(\text{altura do corpo} / \text{comprimento corporal}) \times 100$;
- LC/ CP (%) – $(\text{largura do corpo} / \text{comprimento padrão}) \times 100$.

4.5. Parâmetros hemato-bioquímicos e índices biométricos

Após a biometria foram coletadas aproximadamente 2,5 mL de amostras de sangue através da punção vaso-caudal de todos os peixes de cada tanque experimental usando seringas com etilenodiamino tetra-acético (EDTA 5%). Imediatamente após a coleta de sangue, a concentração de glicose foi mensurada com uma gota de sangue total, utilizando-se glicosímetro G-Tech Free Liten (Accumed-Glicomed®, Rio de Janeiro, Brasil). As amostras de sangue foram mantidas sob refrigeração para a realização das análises hematológicas e bioquímicas.

Após a coleta de sangue os peixes foram eutanasiados por imersão em dose letal de anestésico de aproximadamente 286,50 mg/L conforme metodologia descrita por Vidal et al. (2008), posteriormente foram coletadas e pesadas as vísceras totais, hepatopâncreas e gordura visceral de todos os peixes dos tratamentos para análise dos seguintes índices biométricos:

- Índice víscero-somático (%) = $(\text{peso das vísceras} \div \text{peso do peixe}) \times 100$;
- Índice hepato-somático (%) = $(\text{peso do fígado} \div \text{peso do peixe}) \times 100$;
- Índice gordura víscero-somático (%) = $(\text{peso da gordura} \div \text{peso do peixe}) \times 100$.

Para determinação concentração de hemoglobina (HB) foi utilizado kit comercial (Labtest®, Lagoa Santa, Brasil) como sugerido pelo fabricante, e o hematócrito pela escala de Goldenfarb et al. (1971). A contagem dos eritrócitos (RBC) foi realizada em câmara de Neubauer por meio de microscópio óptico com objetiva de 40x (10 µL de sangue e 2,0 mL de formol citrato). As constantes corpusculares foram determinadas pelo método descrito por Brown (1976).

A contagem total e diferencial de leucócitos foi realizada pelo método indireto proposto por Razani-Paiva e tal. (2013): Leucócitos totais (µL) = [(número de leucócitos contados na extensão x número de eritrócitos em câmara de Neubauer/2000)]. Na contagem diferencial dos leucócitos foram contadas 200 células, estabelecendo o percentual e o valor absoluto de cada componente celular de interesse.

A avaliação bioquímica do sangue foi realizada com soro oriundo da centrifugação (3000 g por 10 min 4 °C), armazenadas a -80 °C. Posteriormente, as amostras de soro foram analisadas para: proteína total (PT, g/dL), albumina (AB, g/dL), globulina (GB), triglicerídeos (TG, mg/dL), lipoproteína de alta densidade (HDL, mg/dL e lactato (nmol mL/L) e colesterol (CL, mg/L) seguindo o protocolo sugerido pelo fabricante (Labtest®, Lagoa Santa, Brasil). A determinação da lipoproteína de baixa densidade (LDL, mg/dL) e lipoproteína de densidade muito baixa (VLDL, mg/dL) foram realizadas utilizando a fórmula de Friedewald. O cortisol foi determinado pelo método imunoenzimático utilizando o ELISA kit (DRG Diagnóstica).

4.6. Análises histológicas

Para a realização da análise histológica, as amostras do tecido muscular dos 20 peixes de cada unidade experimental foram coletadas da porção mediana do corpo, na região dorsolateral, imediatamente abaixo da nadadeira dorsal, no músculo epaxial (Figura 6), para realizar a morfometria das fibras musculares e identificar os processos de hiperplasia e hipertrofia. As amostras musculares foram fixadas em formalina tamponada (10%) por um período de 24 horas e, em seguida, preservadas em álcool 70%.

Antes de iniciar o processamento histológico, foi realizada uma triagem prévia para redução da dimensão dos fragmentos de músculo coletados. Posteriormente, as amostras foram desidratadas em série crescente de etanol: álcool 80% por 30 minutos, álcool 90% por 30 minutos, seguido de duas etapas em álcool 100% (I e II), cada uma com duração de 30 minutos. Após a desidratação, os fragmentos foram imersos em solução de álcool 100% e xilol (1:1) por 20 minutos, seguidos por duas etapas em xilol puro (xilol I e II), com duração de 10 minutos cada. As amostras foram então incluídas em parafina por 2 horas.



Figura 6 - Localização das amostras do tecido muscular de cada unidade experimental coletadas da porção mediana do corpo, na região dorsolateral, imediatamente abaixo da nadadeira dorsal. Fonte: Autor, 2024.

As secções histológicas foram obtidas com espessura de 5 μm utilizando micrótomo, e os cortes foram estendidos em banho histológico a 45 °C. A coloração foi realizada com os seguintes passos: desparafinização em xilol I e II (5 minutos cada), hidratação em álcool 100% I e II (1 minuto cada), álcool 96% (1 minuto) e álcool 70% (1 minuto), seguida de lavagem em água corrente. A coloração das lâminas foi realizada com hematoxilina de Carazzi por 7 minutos, seguida de lavagem em água corrente até a completa remoção do corante. Posteriormente, aplicou-se eosina com dois mergulhos rápidos, seguido de nova lavagem. As lâminas foram montadas com bálsamo do Canadá para análise no microscópio.

A análise das fibras musculares foi realizada em microscópio óptico Leica acoplado ao sistema ImageJ, utilizando objetiva de 40 $\times$ (Figura 7). As secções de cada amostra foram observadas para determinar a densidade muscular (fibras/ mm^2). Considerando o formato aproximadamente arredondado das fibras, o diâmetro de 200 unidades por amostra foi estimado a partir da área da secção transversal, utilizando a fórmula $D = 2\sqrt{(A/\pi)}$ em que D é o diâmetro (μm), A é a área (em μm^2) e π é a constante 3,1416, conforme proposto por Valente et al. (1999).

Para esta análise, utilizaram-se seis peixes de cada caixa, sendo cada indivíduo considerado uma unidade experimental. Cada lâmina foi analisada em quatro áreas distintas até atingir o total de 200 fibras necessárias para os cálculos.

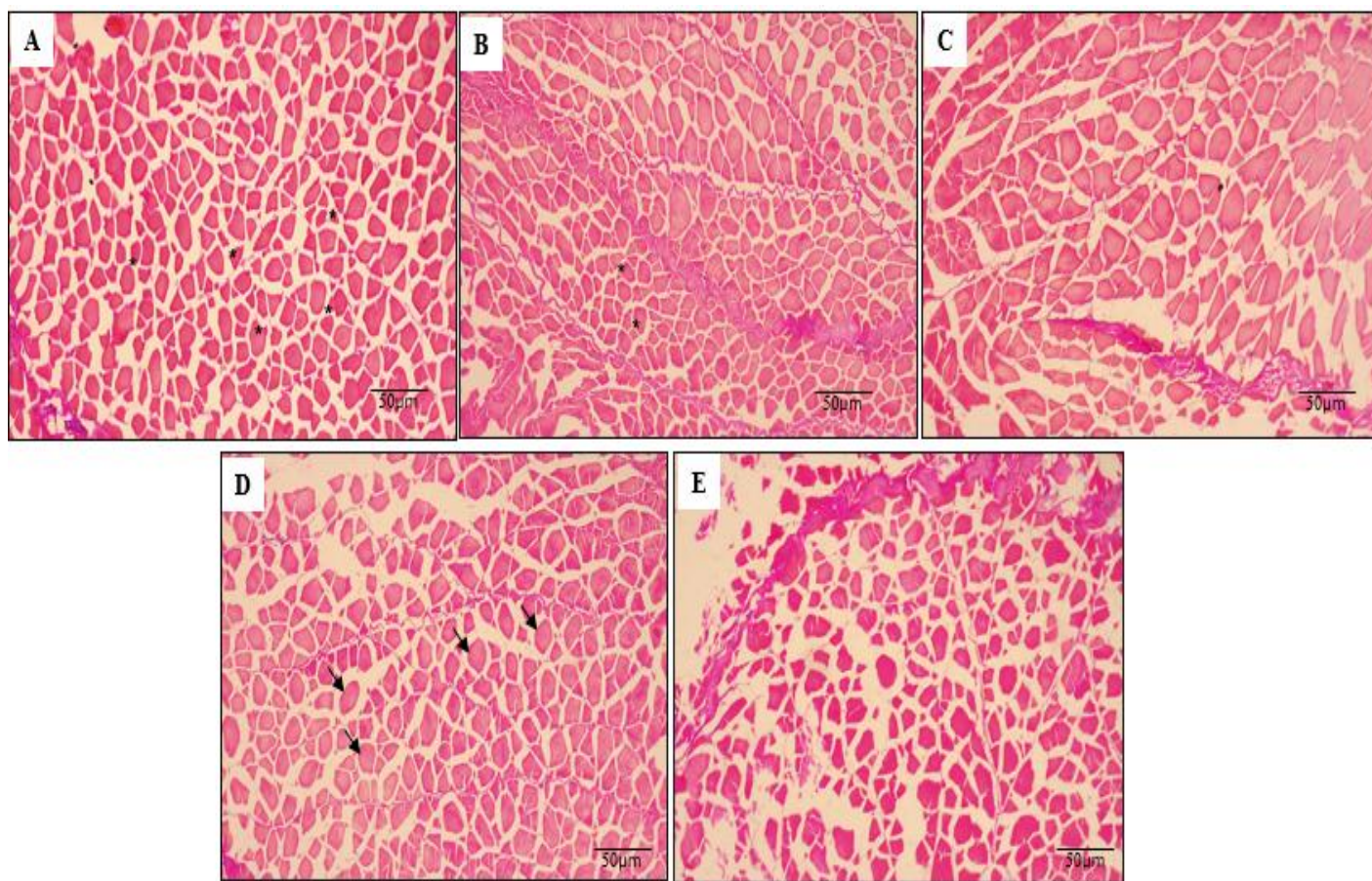


Figura 7 - Cortes transversais do músculo branco de juvenis de *Colossoma macropomum* submetidos a diferentes intensidades de natação: (A) controle; (B) 0,5 BL s⁻¹; (C) 1,0 BL s⁻¹; (D) 1,5 BL s⁻¹; e (E) 2,0 BL s⁻¹. As setas indicam fibras de maior diâmetro e os asteriscos (*) indicam fibras de menor diâmetro. Coloração: Hematoxilina e Eosina (H&E). Barra de escala: 50 µm.

Após a obtenção dos diâmetros, as fibras foram agrupadas em classes de tamanho, seguindo a metodologia de Veggetti et al. (1990) para peixes neotropicais. As fibras brancas foram organizadas nas classes ≤ 10 µm, 10–20 µm, 20–30 µm e >30 µm, determinando-se a frequência relativa de cada classe em relação ao total mensurado. Essa abordagem permitiu avaliar a distribuição do diâmetro e inferir sobre os processos de recrutamento de novas fibras (hiperplasia) e aumento das existentes (hipertrofia), conforme adotado por Assis et al. (2004).

4.8. Análises estatísticas

A normalidade dos dados e a homogeneidade de variâncias foram avaliadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Levene, respectivamente. Para as variáveis que atenderam a esses pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA one-way) seguida pelo teste de Tukey

($P < 0,05$) para comparação de médias. Nos casos em que os pressupostos não foram atendidos, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, seguido pelo teste de Dunn.

Para análise dos dados histológicos as fibras foram categorizadas em cinco classes de diâmetro ($\leq 10 \mu\text{m}$, $10\text{-}20 \mu\text{m}$, $20\text{-}30 \mu\text{m}$ e >30). Seguindo a mesma lógica estatística descrita anteriormente. A distribuição das frequências entre classes e velocidades foi avaliada pelo teste Qui-quadrado de independência.

Adicionalmente, os dados foram tratados como variáveis contínuas e submetidos a modelos de regressão linear e quadrática para determinar a intensidade de natação promotora da maior taxa de crescimento muscular. Havendo significância, aplicou-se o teste de lack of fit para verificar a adequação do modelo, selecionando-se os de melhor ajuste. Todas as análises foram realizadas no software R (versão 4.5.2), adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

5. RESULTADOS

Não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) para as variáveis taxa de crescimento relativo (TCR) fator de condição (K), eficiência alimentar (EA) e conversão alimentar aparente (CAA) nos peixes submetidos a diferentes intensidades de exercício de natação sustentada. Não foi registrada mortalidade dos peixes durante o período experimental (Tabela 1).

Os peixes submetidos às diferentes intensidades de exercício de natação sustentada apresentaram diferenças significativas para ganho de peso (GP) e ganho de peso eviscerado (GPE) ($p < 0,05$), com maiores valores observados na velocidade de 40 cm/s (Tabela 1). Ambas as variáveis apresentaram comportamento quadrático, tendo os peixes apresentado uma redução inicial e posterior aumento em velocidades mais elevadas.

Os peixes submetidos ao exercício de natação sustentada apresentaram diferença no consumo de ração (CR) entre os tratamentos. Os peixes mantidos a 20 cm/s apresentaram o menor consumo (339 g), enquanto aqueles mantidos a 40 cm/s apresentaram o maior consumo (413 g) (Tabela 1). Não foi realizada análise estatística para essa variável devido à ausência de repetição experimental nos tanques.

Tabela 1 - Desempenho zootécnico (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias (n = 20 peixes por tratamento).

Variáveis	Velocidade (cm/s)					p-valor
	0	10	20	30	40	
GP (g)	236,8 $\pm$ 54,2 ^{ab}	242,2 $\pm$ 31,4 ^{ab}	218 $\pm$ 47,5 ^b	219,9 $\pm$ 29,8 ^b	250,3 $\pm$ 38,6 ^a	0,043
GPE (g)	179,8 $\pm$ 44,2 ^{ab}	183,9 $\pm$ 26,3 ^{ab}	167,3 $\pm$ 40,0 ^{ab}	162,6 $\pm$ 22,9 ^b	190,0 $\pm$ 30,8 ^a	0,032
TCR (%)	4,05 $\pm$ 0,64	4,21 $\pm$ 0,47	3,98 $\pm$ 0,64	3,86 $\pm$ 0,26	4,21 $\pm$ 0,44	0,061
CR (g)	367	409	339	360	413	n.a
K	2,02 $\pm$ 0,16	2,06 $\pm$ 0,10	1,98 $\pm$ 0,15	2,03 $\pm$ 0,12	2,00 $\pm$ 0,10	0,18
EA (%)	71,5 $\pm$ 16,3	65,6 $\pm$ 8,52	71,2 $\pm$ 15,5	67,7 $\pm$ 9,20	67,3 $\pm$ 10,4	n.a
CAA	1,52 $\pm$ 0,64	1,55 $\pm$ 0,21	1,48 $\pm$ 0,36	1,50 $\pm$ 0,23	1,52 $\pm$ 0,26	n.a

Peso inicial médio: 160 g. GP: ganho de peso; GPE: ganho de peso eviscerado; TCR: taxa de crescimento relativo; CR: consumo de ração; K: fator de condição; EA: eficiência alimentar; CAA: conversão alimentar aparente. Médias seguidas por letras distintas na mesma linha diferem entre si pelo teste de Duncan ($P < 0,05$) para GP, GPE. As demais variáveis foram analisadas pelo teste de Tukey ($P > 0,05$), não apresentando diferenças significativas. As análises foram realizadas via Kruskal-Wallis (GP, GPE, CR, K, EA, CAA) e ANOVA (TCR). N.A: Não aplicável (a análise estatística não foi realizada para o consumo de ração devido à ausência de repetição experimental).

Os peixes submetidos ao exercício de natação sustentada apresentaram diferenças nos parâmetros morfométricos e nas relações corporais (Tabela 2). Os peixes apresentaram

diferença significativa para o comprimento padrão (CP) ($p < 0,05$), com menores valores observados na velocidade de 20 cm/s e maiores valores observados nos peixes submetidos ao exercício de natação sustentada a 40 cm/s. A largura corporal (LC) foi significativamente afetada ($p < 0,01$), com maiores valores observados nos peixes que mantiveram natação sustentada à velocidade de 40 cm/s (Tabela 2). Os peixes apresentaram comportamento linear crescente para essa variável.

As relações comprimento da cabeça/comprimento padrão (CC/CP) apresentaram maior valor nos peixes submetidos à natação sustentada a 20 cm/s e menor valor a 10 cm/s e no grupo controle; já a largura corporal/comprimento padrão (LC/CP) foi maior nos submetidos a 20 e 40 cm/s e menor no controle. Ambas as relações aumentaram linearmente com a velocidade de natação ($p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente) (Tabela 2). Não foram observadas diferenças significativas ($p > 0,05$) para as demais variáveis morfométricas nos peixes submetidos ao exercício de natação sustentada (Tabela 2)

Tabela 2 - Índice morfométrico (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias ($n = 20$ peixes por tratamento).

Variáveis	Velocidade (cm/s)					P-valor
	0	10	20	30	40	
CT (cm)	26,9 $\pm$ 1,44	26,8 $\pm$ 0,95	26,57 $\pm$ 1,02	26,61 $\pm$ 1,01	27,41 $\pm$ 1,17	0,074
CP (cm)	22,6 $\pm$ 1,31 ^{ab}	22,4 $\pm$ 0,77 ^{ab}	22,00 $\pm$ 0,82 ^b	22,23 $\pm$ 0,78 ^{ab}	22,79 $\pm$ 0,90 ^a	0,026
GC (cm)	5,76 $\pm$ 1,05	5,33 $\pm$ 0,66	5,40 $\pm$ 0,88	5,10 $\pm$ 0,81	5,68 $\pm$ 0,95	0,12
CC (cm)	6,90 $\pm$ 0,57	6,88 $\pm$ 0,39	7,00 $\pm$ 0,40	6,99 $\pm$ 0,38	7,15 $\pm$ 0,43	0,324
AC (cm)	12,2 $\pm$ 0,74	11,9 $\pm$ 0,49	11,63 $\pm$ 0,61	11,87 $\pm$ 0,62	11,97 $\pm$ 0,55	0,063
LC (cm)	3,42 $\pm$ 0,22 ^b	3,53 $\pm$ 0,21 ^{ab}	3,50 $\pm$ 0,18 ^{ab}	3,44 $\pm$ 0,14 ^b	3,64 $\pm$ 0,19 ^a	0,003
CC/CP (%)	30,5 $\pm$ 2,02 ^b	30,6 $\pm$ 1,23 ^b	31,83 $\pm$ 1,13 ^a	31,41 $\pm$ 0,87 ^{ab}	31,37 $\pm$ 1,22 ^{ab}	0,01
AC/CP (%)	53,9 $\pm$ 1,53	53,2 $\pm$ 1,51	52,86 $\pm$ 1,80	53,39 $\pm$ 1,60	52,56 $\pm$ 2,07	0,097
LC/CP (%)	15,1 $\pm$ 0,78 ^b	15,6 $\pm$ 0,79 ^{ab}	15,91 $\pm$ 0,67 ^a	15,48 $\pm$ 0,86 ^{ab}	15,99 $\pm$ 0,71 ^a	0,005

ANOVA F-test: GC – Ganho em Comprimento; CC – Comprimento da cabeça; AC – Altura do Corpo; LC – Largura do Corpo; AC/CP (%) - (Altura do Corpo/Comprimento Corporal) *100; LC/ CP (%) – (Largura do Corpo/Comprimento Padrão) *100. Kruskal- Wallis test: CT – Comprimento Total; CP – Comprimento Padrão; CC/CP (%) – (Comprimento da cabeça/Comprimento padrão) *100. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística significativa, adotou-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) e intervalo de confiança de 95%.

Os índices biométricos dos peixes foram significativamente influenciados pelo exercício de natação sustentada ($p < 0,001$). O índice viscerossomático (IVS) e o índice hepatossomático (IHS) apresentaram comportamento linear negativo, indicando redução progressiva com o aumento da intensidade de natação. O índice de gordura visceral (IGV)

apresentou comportamento quadrático, com redução inicial dos valores e posterior aumento em intensidades mais elevadas, com ponto de inflexão estimado em 23,74 cm/s (Tabela 3).

Tabela 3 - Índices biométricos (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias (n = 20 peixes por tratamento).

Variáveis	Velocidade (cm/s)					p-valor
	0	10	20	30	40	
IVS (%)	9,24 $\pm$ 0,81 ^{ab}	9,64 $\pm$ 0,75 ^a	8,20 $\pm$ 0,86 ^{bc}	8,82 $\pm$ 0,70 ^{bc}	8,58 $\pm$ 0,66 ^c	< 0,001
IHS (%)	2,04 $\pm$ 0,17 ^b	2,29 $\pm$ 0,23 ^a	1,77 $\pm$ 0,28 ^c	2,06 $\pm$ 0,21 ^b	1,78 $\pm$ 0,19 ^c	< 0,001
IGV (%)	3,05 $\pm$ 0,80 ^a	3,38 $\pm$ 0,64 ^a	2,16 $\pm$ 0,69 ^b	2,94 $\pm$ 0,60 ^a	2,92 $\pm$ 0,45 ^a	< 0,001

IVS – Índice víscero-somático; IHS –Índice Hepatossomático; IGV – Índice Gordura Visceral. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística significativa, adotou-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) e intervalo de confiança de 95%. ANOVA F-test.

As variáveis hematológicas e os indicadores bioquímicos plasmáticos dos peixes foram significativamente influenciados pelo exercício de natação sustentada (Tabela 4). O hematócrito apresentou comportamento linear negativo, indicando que os peixes submetidos ao exercício de natação sustentada em maiores intensidades exibiram redução progressiva dessa variável. A hemoglobina e a concentração de hemoglobina corpuscular média (CHCM) apresentaram diferença significativa, com os maiores valores nos peixes que nadaram a 10 e 30 cm/s e menores concentrações nos peixes submetidos a natação a 40 cm/s (Tabela 4).

No perfil bioquímico, a glicose plasmática apresentou comportamento linear positivo, indicando que os peixes submetidos ao exercício de natação sustentada em maiores intensidades exibiram elevação progressiva dessa variável (Tabela 4). O lactato apresentou variações significativas entre os tratamentos ($p < 0,001$), sendo que os peixes submetidos ao exercício de natação sustentada a 10 cm/s apresentaram a maior concentração, diferindo significativamente dos demais grupos (Tabela 4). O cortisol apresentou comportamento quadrático, com ponto de inflexão estimado no exercício de natação sustentada a 12,8 cm/s, seguido de redução significativa nos peixes submetidos a 40 cm/s em relação aos demais tratamentos (Tabela 4).

Os triglicerídeos apresentaram comportamento quadrático, com ponto de inflexão estimado no exercício de natação sustentada a 16,99 cm/s (Tabela 4). Não foram observadas diferenças significativas para o colesterol ($p > 0,05$).

As proteínas totais e a albumina apresentaram comportamento quadrático, com ponto de inflexão estimado no exercício de natação sustentada a 33,13 cm/s e a 21,81 cm/s, respectivamente (Tabela 4). Os demais índices hemato-bioquímicos não foram influenciados pelo exercício de natação sustentada ($p > 0,05$).

Tabela 4 - Parâmetros hematológicos e bioquímicos do plasma (média $\pm$ desvio padrão) de juvenis de tambaqui submetidos a diferentes velocidades de exercícios de natação durante 60 dias.

Variáveis	Velocidades (cm/s)					P-valor
	0	10	20	30	40	
Ht	39,92 $\pm$ 2,89 ^a	40,92 $\pm$ 2,48 ^a	38,7 $\pm$ 2,91 ^{ab}	36,9 $\pm$ 5,12 ^b	39,0 $\pm$ 3,79 ^a	0,015
Hb	7,82 $\pm$ 0,93 ^{ab}	8,64 $\pm$ 1,40 ^a	7,69 $\pm$ 1,36 ^{ab}	8,41 $\pm$ 1,91 ^a	7,16 $\pm$ 1,02 ^b	0,016
Et	1,27 $\pm$ 0,19	1,46 $\pm$ 0,27	1,36 $\pm$ 0,14	1,29 $\pm$ 0,26	1,24 $\pm$ 0,11	0,075
VCM	314,35 $\pm$ 51,41	285,67 $\pm$ 41,03	282,8 $\pm$ 30,81	300,0 $\pm$ 73,10	308,3 $\pm$ 40,48	0,453
HCM	61,32 $\pm$ 10,12	60,77 $\pm$ 10,27	57,8 $\pm$ 6,94	65,3 $\pm$ 15,86	54,1 $\pm$ 7,52	0,136
CHCM	19,79 $\pm$ 3,80 ^{ab}	21,52 $\pm$ 3,84 ^a	20,6 $\pm$ 3,06 ^{ab}	22,0 $\pm$ 3,55 ^a	17,6 $\pm$ 2,04 ^b	0,019
GLU	113,20 $\pm$ 22,12 ^b	109,30 $\pm$ 23,24 ^b	95,5 $\pm$ 21,09 ^c	147,1 $\pm$ 24,39 ^a	124,8 $\pm$ 41,71 ^b	<0,001
COR	182,91 $\pm$ 36,43 ^a	191,49 $\pm$ 56,38 ^a	178,8 $\pm$ 53,30 ^{ab}	185,7 $\pm$ 40,91 ^a	142,1 $\pm$ 35,59 ^b	0,007
LAC	29,20 $\pm$ 3,97 ^b	52,02 $\pm$ 30,41 ^a	26,6 $\pm$ 7,87 ^b	27,4 $\pm$ 9,86 ^b	34,6 $\pm$ 16,93 ^b	<0,001
CHO	89,19 $\pm$ 54,79	105,09 $\pm$ 46,43	107,3 $\pm$ 56,43	91,6 $\pm$ 31,99	114,17 $\pm$ 20,61	0,242
TRIG	96,82 $\pm$ 72,35 ^b	242,41 $\pm$ 52,89 ^a	155,3 $\pm$ 37,51 ^b	115,5 $\pm$ 48,22 ^b	102,0 $\pm$ 34,15 ^b	<0,001
PT	6,37 $\pm$ 1,68 ^b	6,90 $\pm$ 1,71 ^b	8,28 $\pm$ 2,04 ^a	7,69 $\pm$ 1,06 ^a	8,08 $\pm$ 1,11 ^a	<0,001
ALB	1,43 $\pm$ 0,91 ^b	2,69 $\pm$ 2,70 ^{ab}	3,06 $\pm$ 1,42 ^a	1,95 $\pm$ 1,50 ^{ab}	2,24 $\pm$ 1,11 ^{ab}	0,002

Ht: hematócrito (%); Hb: hemoglobina (g/dL); Et: eritrócitos ($\times 10^6$ cel/ μ L); VCM: volume corpuscular médio (fL); HCM: hemoglobina corpuscular média (cp); CHCM: concentração de hemoglobina corpuscular média (g/dL); GLU: glicose (mg/dL); COR: cortisol (ng/dL); LAC: lactato (mg/dL); CHO: colesterol (mg/dL); TRIG: triglicerídeos (mg/dL); PT: proteínas totais (g/dL); ALB: albumina (g/dL); GLOB: globulina (g/dL). Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Para as variáveis Ht, Hb, GLU, LAC, TRIG, CHO; ALB foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis; para as demais, utilizou-se ANOVA.

Em relação a histologia e morfometria das células musculares, o diâmetro médio das fibras musculares apresentou diferença estatística entre os grupos ($P < 0,001$) (Tabela 5). O menor valor foi observado na musculatura dos peixes submetidas à natação a 20 cm/s ($4,59 \pm 1,59 \mu$ m).

Tabela 5 - Diâmetro médio das fibras, distribuição percentual das classes de diâmetro e densidade de fibras musculares (média $\pm$ desvio-padrão) de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*) submetidos a diferentes velocidades de natação durante 60 dias.

Variáveis	Velocidades (cm/s)					P-valor
	0	10	20	30	40	
Diâmetro médio (μm)	$5,89 \pm 1,84^a$	$5,23 \pm 1,38^{ab}$	$4,59 \pm 1,59^b$	$10,0 \pm 14,7^a$	$5,43 \pm 1,95^{ab}$	$< 0,001$
Densidade (fibras/ mm^2)	7.981 ± 1631^a	8.194 ± 3206^a	12.144 ± 1335^b	13.636 ± 408^c	9.188 ± 94^b	$< 0,001$

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística significativa ($P < 0,05$). Teste de Kruskal–Wallis.

Quanto à distribuição de frequência (Figura 7), a análise de Qui-quadrado revelou associação significativa ($\chi^2 = 542,28$; $df = 16$; $P < 0,001$). O grupo exposto à natação com velocidade de 30 cm/s destacou-se pela maior heterogeneidade, sendo o único a apresentar fibras na classe $> 30 \mu\text{m}$ (9,67%).

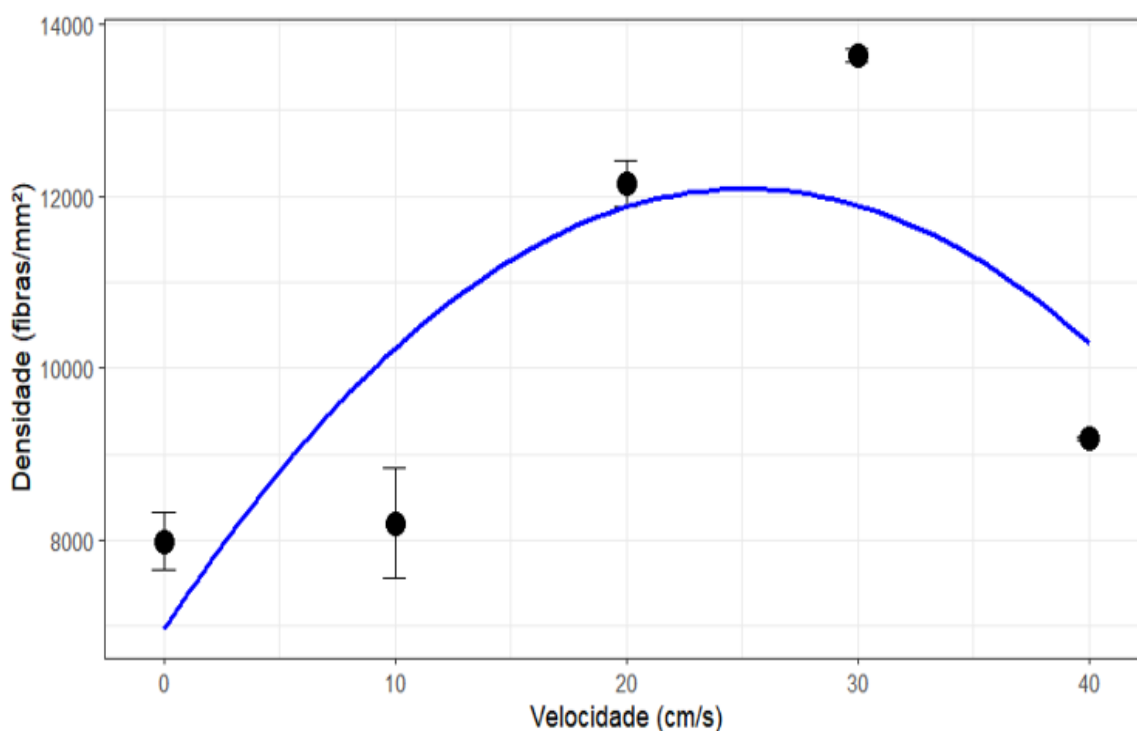


Figura 8 - Regressão quadrática da densidade de fibras musculares de juvenis de tambaqui submetidos a diferentes velocidades de natação

A densidade de fibras seguiu um modelo quadrático ($y = - 8,73x^2 + 424,35x + 7206,1$; $R^2_{\text{ajust}} = 0,39$) (Figura 8), indicando estímulo à hiperplasia até o pico de 30 cm/s (13.636 ± 408 fibras/ mm^2), valor este que foi significativamente superior a todos os demais tratamentos ($P <$

0,05). Na velocidade de 40 cm/s, houve redução da densidade em relação ao pico, embora os valores tenham permanecido superiores aos observados nas velocidades 0 e 10 cm/s.

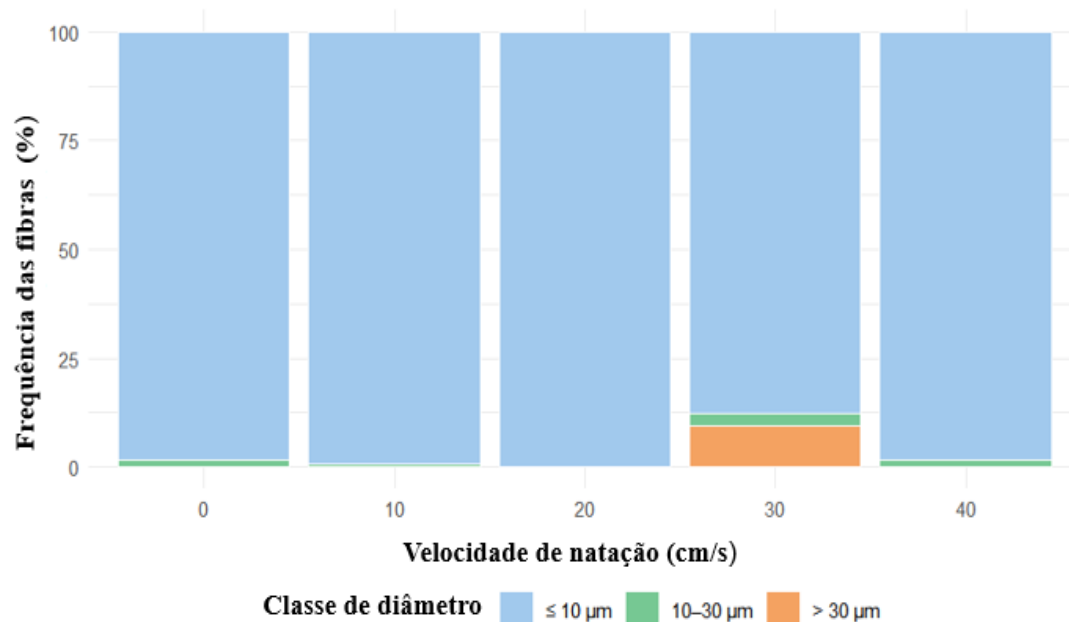


Figura 9 - Distribuição de frequência das classes de diâmetro das fibras musculares de juvenis de tambaqui em diferentes intensidades de exercício.

6. DISCUSSÃO

O exercício de natação sustentada promoveu alterações significativas no desempenho de crescimento de juvenis de tambaqui. Esses resultados evidenciam a capacidade da espécie em tolerar esforço físico prolongado, convertendo estímulos mecânicos em biomassa. O exercício físico tem sido associado ao aumento do peso corporal em espécies como o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) e a tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) (SANTOS et al., 2017; ARBELÁEZ-ROJAS et al., 2024), efeitos semelhantes foram observados no presente estudo sendo os tambaquis exercitados a 40 cm/s apresentando os maiores valores ganhos de peso (GP) e ganho de peso eviscerado (GPE).

A ingestão de ração foi influenciada pela intensidade do exercício de natação sustentada, sendo menor nos peixes submetidos a 20 cm/s, grupo que também apresentou o menor ganho de peso. Esse padrão sugere que, embora intensidades moderadas de exercício de natação sustentada possam estar associadas à velocidade ótima de natação (U_{opt}) em algumas espécies (GARCÍA-PÉREZ et al., 2024), no tambaqui a intensidade de 20 cm/s parece representar um ponto de transição no qual a redução da ingestão alimentar limitou o potencial de crescimento. Nas intensidades moderadas a elevadas, o maior custo energético foi compensado por um aumento na ingestão de ração, resultando em desempenho de crescimento superior.

Alterações morfométricas também foram observadas entre as intensidades avaliadas. Os aumentos na largura corporal (LC) e nas razões LC/CP e CC/CP indicam mudanças na proporcionalidade corporal dos peixes submetidos ao exercício de natação sustentada. Os indivíduos mantidos a 40 cm/s apresentaram maior largura corporal, enquanto as maiores razões LC/CP foram observadas nas intensidades intermediárias e elevadas. Diferentemente do que foi relatado para o pacu (*Piaractus mesopotamicus*), no qual o exercício promove maior desenvolvimento da região caudal (SANTOS et al., 2017), a resposta morfológica no tambaqui foi expressa principalmente como aumento da largura corporal. Esses achados sugerem adaptações estruturais associadas ao exercício de natação sustentada prolongado, indicando que o fluxo contínuo de água pode atuar como estímulo para o remodelamento fenotípico e o aumento da robustez corporal.

A redução dos índices hepatossomático (IHS), viscerossomático (IVS) e de gordura visceral (IGV) com o aumento da intensidade do exercício de natação sustentada indica mudanças na alocação de energia em juvenis de tambaqui submetidos ao exercício. O fígado e a gordura visceral são importantes sítios de armazenamento energético em peixes, principalmente na forma de lipídios e glicogênio, e variações nesses índices refletem alterações nas demandas

metabólicas do organismo. A resposta quadrática observada para o IGV, com mínimo estimado em 23,74 cm/s, sugere maior mobilização das reservas lipídicas nas intensidades intermediárias de exercício. Resultados semelhantes foram relatados para juvenis de dourada (*Sparus aurata*), nos quais a atividade natatória reduziu o IHS e a gordura visceral sem comprometer o crescimento somático (GARCÍA-PÉREZ et al., 2024). Essa realocação energética é compatível com as adaptações metabólicas induzidas pelo exercício de natação sustentada moderado, no qual carboidratos e lipídios são progressivamente mobilizados como substratos energéticos, poupando proteínas para a deposição muscular (IBARZ et al., 2011; MARTÍN-PÉREZ et al., 2012; FELIP et al., 2013).

Os parâmetros hematológicos indicaram ajustes fisiológicos dentro dos limites normais para a espécie (TAVARES-DIAS; MARIANO, 2015), compatíveis com o aumento da demanda metabólica associada ao exercício de natação sustentada. Observou-se elevação da hemoglobina e da concentração de hemoglobina corpuscular média (CHCM) nas intensidades intermediárias (10 e 30 cm/s), sugerindo maior eficiência no transporte de oxigênio. Respostas semelhantes foram relatadas para a matrinxã (*Brycon amazonicus*), na qual o exercício sustentado aumentou o hematócrito sem alterar a contagem de eritrócitos nem os índices hematimétricos volume corpuscular médio (VCM) e hemoglobina corpuscular média (HCM) (FABRIZZI, 2013). Nas intensidades mais elevadas, alguns parâmetros eritrocitários apresentaram redução, enquanto os índices hematimétricos permaneceram estáveis, indicando ajustes fisiológicos sem evidências de anemia ou comprometimento hematológico. A manutenção desses parâmetros dentro dos limites fisiológicos reforça que as alterações observadas representam respostas adaptativas ao exercício de natação sustentada.

Em relação ao perfil bioquímico, a glicose plasmática aumentou nas intensidades mais elevadas de exercício, particularmente a 30 cm/s, com valores superiores aos descritos como referência para a espécie (TAVARES-DIAS; MARIANO, 2015), refletindo a mobilização de substratos energéticos em resposta ao aumento da demanda metabólica.

A glicose é um dos principais indicadores das respostas fisiológicas ao exercício em peixes, estando associada à ativação de mecanismos hormonais que promovem a liberação de energia de disponibilidade imediata (MORGAN; IWAMA, 1997). Em *Sparus aurata*, a intensidade do exercício de natação sustentada influenciou os níveis de glicose e lactato, elevando-os nas intensidades moderadas e estabilizando-os nas mais elevadas, o que reflete o ajuste metabólico ao esforço continuado (SÁNCHEZ-GURMACHES et al., 2013; PALSTRA et al., 2020). O lactato plasmático apresentou a maior concentração a 10 cm/s, sugerindo uma contribuição

inicial do metabolismo anaeróbico, seguida de estabilização nas intensidades mais elevadas de exercício.

Os níveis de cortisol apresentaram variação significativa, com uma redução expressiva nos peixes submetidos a 40 cm/s em relação aos demais grupos. Esta diminuição do cortisol em intensidades mais elevadas de natação sugere uma adaptação fisiológica ao estresse crônico, onde o exercício moderado a intenso pode, em alguns casos, modular a resposta ao estresse, resultando em níveis mais baixos de cortisol basal ou uma recuperação mais rápida após um estressor (ESPÍRITO-SANTO et al., 2025; SPILIOPOULOS et al., 2025). A redução observada a 40 cm/s, sugere que o protocolo experimental não induziu estresse crônico exacerbado, e que as variações observadas em glicose e lactato representam respostas fisiológicas transitórias ao exercício de natação sustentada (PALSTRA et al., 2024).

Os níveis de colesterol permaneceram estáveis entre as intensidades avaliadas, indicando manutenção da homeostase lipídica plasmática (PALSTRA et al., 2020). Os triglicerídeos, por sua vez, aumentaram a 10 cm/s e apresentaram redução progressiva nas intensidades mais elevadas, sugerindo maior mobilização de lipídios como substrato energético à medida que a demanda metabólica aumenta. Esse padrão contrasta com o observado em *Brycon amazonicus*, no qual o exercício sustentado não induziu alterações no metabolismo lipídico plasmático, indicando que essas respostas dependem da estratégia metabólica de cada espécie (ARBELÁEZ-ROJAS et al., 2017).

As proteínas totais e a albumina plasmáticas aumentaram nas intensidades intermediárias de exercício, particularmente a 20 e 30 cm/s, refletindo ajustes fisiológicos associados ao aumento da demanda metabólica durante a natação sustentada. Esse aumento é esperado considerando que as proteínas plasmáticas desempenham papel importante no transporte de metabólitos e na manutenção da pressão osmótica. Resposta semelhante foi descrita para a matrinxã (*Brycon amazonicus*), na qual alterações nas proteínas plasmáticas foram associadas a adaptações fisiológicas ao exercício sustentado (ARBELÁEZ-ROJAS et al., 2017). De modo geral, em espécies neotrópicas, o exercício de natação sustentada moderado favorece a utilização de lipídios e carboidratos como fontes de energia, poupando proteínas para a manutenção e o crescimento (MORAES et al., 2009; HACKBARTH, 2010).

Os juvenis de tambaqui apresentaram resposta muscular dinâmica ao exercício de natação sustentada, caracterizada principalmente pela predominância de hiperplasia muscular. A alta frequência de fibras com diâmetros inferiores a 10 µm indica recrutamento miogênico ativo, padrão frequentemente observado em espécies tropicais de crescimento rápido durante a fase juvenil (VALENTE et al., 1999; ASSIS et al., 2004).

O diâmetro médio das fibras foi numericamente maior a 30 cm/s, e a presença exclusiva de fibras $>30\ \mu\text{m}$ nesse grupo sugere que essa intensidade pode representar um estímulo limiar para o desenvolvimento de fibras de maior calibre. A densidade de fibras apresentou resposta quadrática em função da intensidade do exercício de natação sustentada, com aumento progressivo até aproximadamente 30 cm/s, indicando que o exercício estimulou o recrutamento miogênico em juvenis de tambaqui. Esse aumento na celularidade sugere maior ocorrência de hiperplasia muscular, processo caracterizado pela formação de novas fibras e frequentemente associado ao crescimento em peixes juvenis (PALSTRA et al., 2020).

O aumento simultâneo da densidade e do diâmetro das fibras musculares observado nos tambaquis exercitados a 30 cm/s sugere uma reorganização estrutural das fibras. É possível que o exercício de natação sustentada tenha promovido o espessamento do sarcolema e a reorganização de miofibrilas, contribuindo para a maior robustez muscular. Em peixes teleósteos, o exercício tem sido associado a adaptações no músculo esquelético que incluem o aumento da área de secção transversal das fibras e a vascularização, indicando uma resposta adaptativa coordenada (PALSTRA et al., 2014; ROVIRA et al., 2017).

Com base nos resultados histológicos, é possível inferir que o aumento da densidade de fibras a 30 cm/s reflita a ativação de células satélites e a modulação de MRFs como MyoD e miogenina, mecanismos diretamente associados à hiperplasia em mosaico em peixes teleósteos (KIESSLING et al., 2006; JOHNSTON et al., 2011). O aumento simultâneo do diâmetro sugere que vias anabólicas como IGF-1 e mTOR também possam ter sido recrutadas, favorecendo a síntese proteica e a hipertrofia incipiente das fibras (SÁNCHEZ-GURMACHES et al., 2013; ROVIRA et al., 2017). A maior vascularização esperada nessa intensidade seria compatível ainda com a ativação do VEGF, ampliando o suprimento de oxigênio ao músculo em exercício (PALSTRA et al., 2014).

Por outro lado, a redução na densidade de fibras observada a 40 cm/s sugere que intensidades mais elevadas de exercício podem direcionar parte da energia metabólica para a manutenção do esforço natatório, reduzindo o potencial de proliferação celular. Essa plasticidade estrutural reforça a capacidade adaptativa da espécie, na qual o fluxo contínuo de água favorece a alocação de energia para a acumulação de massa muscular e o remodelamento estrutural do músculo esquelético. Em peixes, o aumento da densidade de fibras sob exercício de natação sustentada reflete uma organização tecidual mais compacta, frequentemente associada à melhora da qualidade muscular e da firmeza da carne (PERIAGO et al., 2005). Esse padrão mosaico hiperplásico indica que o regime de exercício de natação sustentada aplicado atuou como estímulo eficaz para o remodelamento do músculo esquelético, de forma

semelhante ao observado em *Sparus aurata* submetida a exercício de natação sustentada (PALSTRA et al., 2020).

Apesar de análises sensoriais e de composição centesimal não terem sido realizadas, os resultados histológicos permitem algumas inferências sobre a qualidade do produto. Em peixes, a densidade e o diâmetro das fibras musculares estão diretamente relacionados à firmeza e textura da carne (JOHNSTON et al., 2000; LISTRAT et al., 2016). Além disso, a reorganização estrutural e o remodelamento do músculo esquelético induzidos pelo exercício podem influenciar o rendimento de filé e as características sensoriais da carne (JOHNSTON et al., 2004). É possível que as adaptações musculares observadas no presente estudo reflitam positivamente na qualidade da carne do tambaqui, ainda que essa hipótese não tenha sido testada diretamente.

Embora o exercício de natação sustentada não tenha maximizado simultaneamente todas as respostas biológicas avaliadas, as intensidades moderadas a elevadas (30–40 cm/s) promoveram maior eficiência metabólica, maior mobilização das reservas energéticas e incremento na densidade de fibras musculares. Em conjunto, essas respostas indicam que o exercício de natação sustentada pode atuar como estímulo eficaz ao condicionamento fisiológico, promovendo adaptações metabólicas e estruturais integradas sem comprometer o desempenho de crescimento dos juvenis de tambaqui.

7. CONCLUSÃO

O exercício de natação sustentada em intensidades moderadas a elevadas (30–40 cm/s) promoveu as respostas fisiológicas e estruturais mais vantajosas em juvenis de tambaqui. Intensidades inferiores mostraram-se menos eficientes, a 10 cm/s predominou-se o acúmulo de reservas viscerais acompanhado dos maiores níveis de cortisol, enquanto a 20 cm/s a redução na ingestão alimentar limitou o potencial de crescimento dos tambaquis.

Em contraste, a 30 cm/s o exercício maximizou o recrutamento miogênico, com maior densidade de fibras musculares e presença de fibras de maior calibre ($>30\ \mu\text{m}$), e a 40 cm/s os tambaquis alcançaram o maior ganho de peso e rendimento de carcaça associados aos menores níveis de cortisol registrados, indicando que o exercício em alta intensidade não induziu estresse crônico, mas sim um estado de condicionamento fisiológico com melhora do bem-estar animal.

Esses achados indicam que a natação sustentada a 30–40 cm/s como uma estratégia prática de manejo para aprimorar o desempenho de crescimento, a qualidade muscular e o bem-estar de tambaquis na piscicultura intensiva.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação analisou os efeitos de diferentes intensidades de natação sustentada sobre o desempenho zootécnico, parâmetros hemato-bioquímicos e o crescimento muscular de juvenis de tambaqui (*Colossoma macropomum*). O estudo partiu do pressuposto de que sistemas de produção intensivos, como o sistema de recirculação de água (RAS), permitem o uso do exercício físico como uma ferramenta de manejo capaz de modular o desenvolvimento muscular e a qualidade da carne sem comprometer o bem-estar animal. Os resultados obtidos atenderam ao objetivo geral, demonstrando que a intensidade da natação influenciou de forma integrada as respostas fisiológicas, metabólicas e estruturais da espécie.

As evidências encontradas demonstraram que juvenis de tambaqui submetidos a intensidades entre 30 e 40 cm/s apresentaram as respostas mais favoráveis do ponto de vista produtivo e de bem-estar. Nessas velocidades, observou-se maior ganho de peso, melhor rendimento de carcaça e maior densidade de fibras musculares, acompanhados por menor acúmulo de gordura visceral e pelos menores níveis de cortisol. Esse conjunto de dados caracterizou um estado de condicionamento fisiológico no qual a demanda metabólica do exercício foi convertida em crescimento tecidual sem a indução de estresse crônico.

O estudo fornece evidências experimentais pioneiras sobre a fisiologia do exercício em espécies neotropicais. Do ponto de vista aplicado, os resultados sustentam que o manejo do fluxo de água em velocidades moderadas a elevadas pode ser adotado para intensificar o crescimento muscular, resultando em um peixe mais robusto, com maior rendimento de filé e melhor qualidade muscular.

É importante destacar que o período experimental de 60 dias que, embora suficiente para detectar respostas iniciais, não permite inferências de resultados mais expressivos. Além disso, a ausência de análises de composição centesimal e análise sensorial do filé impede conclusões definitivas sobre as propriedades sensoriais e nutricionais do produto.

Recomenda-se, portanto, a realização de estudos de longa duração para verificar como seriam as respostas fisiológicas dos tambaquis à natação sustentada em períodos prolongados, incluindo avaliações do perfil lipídico, textura e composição de ácidos graxos do filé. Adicionalmente, análises econômicas são necessárias para validar a aplicabilidade prática e a viabilidade financeira do uso da natação forçada na piscicultura intensiva de tambaqui.

9. REFERÊNCIAS

- ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; MORAES, G. Interação do exercício de natação sustentada e da densidade de estocagem no desempenho e na composição corporal de juvenis de matrinxã *Brycon amazonicus*. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 201–208, 2009.
- ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; MORAES, G. Sustained swimming improves fish dietary nutrient assimilation efficiency and body composition of juvenile *Brycon amazonicus*. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 4, p. 259–264, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0135>.
- ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; SILVA, T.; OTA, E.; MORAES, G.; INOUE, L. Growth performance of tilapia juveniles *Oreochromis niloticus* reared in two sustained swimming speeds and two stocking densities. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67, e24220239, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-202422023>.
- ASSIS, J. M. F.; CARVALHO, R. F.; BARBOSA, L.; AGOSTINHO, C. A.; DAL PAI-SILVA, M. Effects of incubation temperature on muscle morphology and growth in the pacu (*Piaractus mesopotamicus*). **Aquaculture**, v. 237, n. 1–4, p. 251–267, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.04.022>.
- BROWN, B. A. **Hematology: principles and procedures**. 2. ed. Philadelphia: Lea & Febiger, 1976.
- ESPÍRITO-SANTO, C.; ALBURQUERQUE, C.; CAVALHERI, T.; GUARDIOLA, F. A.; OZÓRIO, R. O. A.; MAGNONI, L. J. Induced swimming reduced stress and modulated immune response and antioxidant status in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Fish Physiology and Biochemistry**, v. 51, p. 151, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10695-025-01569-w>
- FABRIZZI, F.; MORAES, G.; HACKBARTH, A.; ALMEIDA, L. C.; ARBELÁEZ-ROJAS, G.; NUNES, C. S. Intermittent sustained swimming in matrinxã *Brycon amazonicus* (Bryconidae: Bryconinae): hematological and metabolic responses. **Neotropical Ichthyology**, v. 11, n. 2, p. 425–432, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-62252013000200013>.
- FELIP, O.; BLASCO, J.; IBARZ, A.; MARTÍN-PÉREZ, M.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J. Beneficial effects of sustained activity on the use of dietary protein and carbohydrate traced with stable isotopes ^{15}N and ^{13}C in gilthead sea bream (*Sparus aurata*). **Journal of Comparative Physiology B**, v. 183, n. 2, p. 223–234, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00360-012-0703-6>.
- GARCÍA-PÉREZ, I.; MONTBLANCH, M.; SÁNCHEZ-MOYA, A.; PERELLÓ-AMORÓS, M.; OTERO-TARRAZÓN, A.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; BLASCO, J.; GUTIÉRREZ, J. Sustained exercise improves growth performance and reduces fat deposition in gilthead sea bream juveniles fed with a high-protein and a high-carbohydrate diet. **Aquaculture**, v. 589, 740956, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740956>.
- GOLDENFARB, P. B.; BOWYER, F. P.; HALL, E.; BROSIUS, E. Reproducibility in the hematology laboratory: the microhematocrit determination. **American Journal of Clinical Pathology**, v. 56, n. 1, p. 35–39, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ajcp/56.1.35>.

HACKBARTH, A. **Exercício aeróbico e suas implicações no crescimento e metabolismo de pacu (*Piaractus mesopotamicus*)**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Fisiológicas) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

IBARZ, A.; FELIP, O.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; MARTÍN-PÉREZ, M.; BLASCO, J.; TORRELLA, J. R. Sustained swimming improves muscle growth and cellularity in gilthead sea bream. **Journal of Comparative Physiology B**, v. 181, n. 2, p. 209–217, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00360-010-0521-3>.

JOHNSTON, I.; ALDERSON, R.; SANDHAM, C.; DINGWALL, A.; MITCHELL, D.; SELKIRK, C.; NICKELL, D.; BAKER, R.; ROBERTSON, B.; WHYTE, D.; SPRINGATE, J. Muscle fibre density in relation to the colour and texture of smoked Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). **Aquaculture**, v. 189, p. 335–349, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00373-2](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00373-2).

JOHNSTON, I. A.; BOWER, N. I.; MACQUEEN, D. J. Growth and the regulation of myotomal muscle mass in teleost fish. **The Journal of Experimental Biology**, v. 214, n. 10, p. 1617–1628, 2011. <https://doi.org/10.1242/jeb.038620>

JOHNSTON, I.; MANTHRI, S.; BICKERDIKE, R.; DINGWALL, A.; LUIJKX, R.; CAMPBELL, P.; NICKELL, D.; ALDERSON, R. Growth performance, muscle structure and flesh quality in out-of-season Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts reared under two different photoperiod regimes. **Aquaculture**, v. 237, p. 281–300, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.04.026>

KIESSLING, A.; RUOHONEN, K.; BJØRNEVIK, M. Muscle fibre growth and quality in fish. **Archiv für Tierzucht**, v. 49, p. 137–146, 2006

LIMA, J. F.; MONTAGNER, D.; DUARTE, S. S.; YOSHIOKA, E. T. O.; DIAS, M. K. R.; TAVARES-DIAS, M. Recirculating system using biological aerated filters on tambaqui fingerling farming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, e00834, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00834>.

LISTRAT, A.; LEBRET, B.; LOUVEAU, I.; ASTRUC, T.; BONNET, M.; LEFAUCHEUR, L.; PICARD, B.; BUGEON, J. How muscle structure and composition influence meat and flesh quality. **The Scientific World Journal**, v. 2016, art. 3182746, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3182746>.

MARTÍN-PÉREZ, M.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; IBARZ, A.; MILLÁN-CUBILLO, A.; FELIP, O.; OLIVEIRA, E.; BLASCO, J. New insights into fish swimming: a proteomic and isotopic approach in gilthead sea bream. **Journal of Proteome Research**, v. 11, n. 7, p. 3533–3547, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/pr3002832>.

MORAES, G.; HACKBARTH, A.; ARBELÁEZ-ROJAS, G. A.; FABRIZZI, F.; NUNES, C. S. Adaptações bioquímicas à natação sustentada em peixes com alto potencial para piscicultura. In: TAVARES-DIAS, M. (ed.). **Manejo e sanidade de peixes em cultivo**. Amapá: Embrapa Amapá, 2009. p. 269–294.

MORGAN, J. D.; IWAMA, G. K. Measurements of stressed states in the field. In: SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY (ed.). **Seminar Series**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. p. 247–268.

PALSTRA, A. P.; ROQUE, A.; KRUIJT, L.; JÉHANNET, P.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; DIRKS, R. P. Physiological effects of water flow induced swimming exercise in seabream *Sparus aurata*. **Frontiers in Physiology**, v. 11, 610049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.610049>.

PALSTRA, A. P.; ROVIRA, M.; RIZO-ROCA, D.; TORRELLA, J. R.; SPAINK, H. P.; PLANAS, J. V. Swimming-induced exercise promotes hypertrophy and vascularization of fast skeletal muscle fibres and activation of myogenic and angiogenic transcriptional programs in adult zebrafish. **BMC Genomics**, v. 15, n. 1, p. 1136, 2014. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-1136>.

PALSTRA, A. P.; ABBINK, W.; AGBETI, W. E. K.; KRUIJT, L.; JÉHANNET, P.; LANKHEET, M. J. Heart rate and acceleration dynamics during swim-fitness and stress challenge tests in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*). **Biology**, v. 13, n. 3, 189, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology13030189>.

PERIAGO, M. J.; AYALA, M. D.; LÓPEZ-ALBORS, O.; ABDEL, I.; MARTÍNEZ, C.; GARCÍA-ALCÁZAR, A.; ROS, G.; GIL, F. Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. **Aquaculture**, v. 249, n. 1–4, p. 175–188, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.02.047>.

ROVIRA, M.; ARREY, G.; PLANAS, J. V. Exercise-induced hypertrophic and oxidative signaling pathways and myokine expression in fast muscle of adult zebrafish. *Frontiers in Physiology*, v. 8, p. 1063, 2017. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.01063>.

RANZANI-PAIVA, M. J. T.; PÁDUA, S. B.; TAVARES-DIAS, M.; EGAMI, M. I. **Métodos para análises hematológicas em peixes**. Maringá: Eduem, 2013.

SÁNCHEZ-GURMACHES, J.; CRUZ-GARCIA, L.; IBARZ, A.; FERNÁNDEZ-BORRÀS, J.; BLASCO, J.; GUTIÉRREZ, J.; NAVARRO, I. Insulin, IGF-I, and muscle MAPK pathway responses after sustained exercise and their contribution to growth and lipid metabolism regulation in gilthead sea bream. **Domestic Animal Endocrinology**, v. 45, n. 3, p. 145–153, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2013.08.001>.

SANTOS, V. B.; OLIVEIRA, M. W. M.; SALOMÃO, R. A. S.; SANTOS, R. S.; PAULA, T. G.; SILVA, M. D. P.; MARECO, E. A. Influence of temperature and exercise on growth performance, muscle, and adipose tissue in pacus (*Piaractus mesopotamicus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 221–227, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.08.004>.

SPILIOPOULOS, O.; BROWN, C.; HILDER, P.; TILBROOK, A.; DESCOVICH, K. The path to resilience: improving welfare in aquaculture through physical exercise and stressor predictability training. *Reviews in Aquaculture*, v. 17, n. 3, e70051, 2025. <https://doi.org/10.1111/raq.70051>.

TAVARES-DIAS, M.; MARIANO, W. S. Parâmetros sanguíneos de referência para espécies de peixes cultivados. In: TAVARES-DIAS, M. (ed.). **Aquicultura no Brasil: novas perspectivas**. São Carlos: Pedro & João Editores, 2015. v. 1, p. 429–453.

VALENTE, L. M. P.; FAUCONNEAU, B.; GOMES, E. F. S.; HOULIHAN, D. F. Growth dynamics of white and red muscle fibres in fast- and slow-growing strains of rainbow trout. **Journal of Fish Biology**, v. 55, n. 4, p. 675–691, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb00710.x>.

VEGETTI, A.; MASCARELLO, F.; SCAPOLO, P. A.; ROWLERSON, A. Hyperplastic and hypertrophic growth of lateral muscle in *Dicentrarchus labrax* (L.): an ultrastructural and morphometric study. **Anatomy and Embryology**, v. 182, n. 1, p. 1–10, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00187522>.

VIDAL, L. V. O.; ALBINATI, R. C. B.; ALBINATI, A. C. L.; LIRA, A. D.; ALMEIDA, T. R.; SANTOS, G. B. Eugenol como anestésico para a tilápia-do-nilo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 1069–1074, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800017>