



CÍCERO EDUARDO DE REZENDE

**USE OF ULTRASONOGRAPHY TO COLLECT
PHENOTYPES AND ESTIMATE GENETIC PARAMETERS
OF CARCASS CHARACTERISTICS IN TILAPIA (*Oreochromis
niloticus*)**

**Lavras – MG
2023**

CÍCERO EDUARDO DE REZENDE

**USE OF ULTRASONOGRAPHY TO COLLECT PHENOTYPES AND ESTIMATE
GENETIC PARAMETERS OF CARCASS CHARACTERISTICS IN TILAPIA
(*Oreochromis niloticus*)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Produção e Nutrição de Não Ruminantes, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Wagner Silva Hilsdorf

Co-orientador

Prof. Dr. Rilke Tadeu Fonseca de Freitas

Dr. Caio Augusto Perazza

Lavras – MG

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Rezende, Cícero Eduardo de.

Use of ultrasonography to collect phenotypes and estimate genetic parameters of carcass characteristics in tilapia (*Oreochromis niloticus*) / Cícero Eduardo de Rezende. - 2023.

96 p. : il.

Orientador(a): Alexandre Wagner Silva Hilsdorf.

Coorientador(a): Rilke Tadeu Fonseca de Freitas, Caio Augusto Perazza.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Melhoramento genético. 2. Correlação genética. 3. Ultrassom. I. Hilsdorf, Alexandre Wagner Silva. II. Freitas, Rilke Tadeu Fonseca de. III. Perazza, Caio Augusto. IV. Título.

CÍCERO EDUARDO DE REZENDE

**USE OF ULTRASONOGRAPHY TO COLLECT PHENOTYPES AND ESTIMATE
GENETIC PARAMETERS OF CARCASS CHARACTERISTICS IN TILAPIA
(*Oreochromis niloticus*)**

**UTILIZAÇÃO DA ULTRASSONOGRAFIA PARA COLETA DE FENÓTIPOS E
ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS GENÉTICOS DE CARACTERÍSTICAS DE
CARCAÇA EM TILÁPIAS (*Oreochromis niloticus*)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Produção e Nutrição de Não Ruminantes, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA, em 26 de outubro de 2023.

Dr. Alexandre Wagner Silva Hilsdorf, FZMV/UFLA
Dr. José Bento Sterman Ferraz, FAZEA/USP
Dr. Caio Augusto Perazza, UMC
Dr. Renan Rosa Paulino, FZMV/UFLA
Dra. Sarah Conceição Laguna Meirelles, FZMV/UFLA

Prof. Dr. Alexandre Wagner Silva Hilsdorf
Orientador

Lavras – MG
2023

Aos meus pais, Sebastião e Cibele que estiveram presentes durante todo percurso
Ao meu irmão, que apoiou a conquista
Aos meus amigos, sempre fazendo meus dias melhores e possibilitando estar onde estou,

Dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pela saúde, discernimento durante o processo.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Zootecnia, pela estrutura disponível para realização Pós-Graduação. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Apoio a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos e fomento de projetos.

Ao meu orientador Alexandre, pela dedicação, ensinamentos, conselhos, disponibilidade e coragem de me suportar.

Ao meu grande coorientador Rilke, por tudo que fez por mim até hoje. Não estaria onde estou se não tivesse dado a oportunidade de ingressar na pós-graduação, ensinado o caminho da bondade e felicidade, pelos ensinamentos as vezes passado de forma dura e aos que vieram através de sorrisos e logicamente pelo companheirismo e amizade, cara o senhor é “fera”.

Ao Dr. Caio, que durante sua coorientação permitiu que o processo tivesse um fim, ensinando a utilizar e aplicar a técnica em peixes, discutindo resultados e sendo um profissional comprometido. Logicamente que não posso deixar de agradecer pelas risadas sensacionais por motivos extraordinários, um dia irei assistir uma partida de tênis dos doutores, levarei as saias!

Aos meus pais, Sebastião (Tiãozinho) e Cibele, por me moldarem uma pessoa justa, com bom caráter e não medirem esforços para a realização dos meus sonhos.

Ao meu irmão Rafael, por todo apoio e durante a minha trajetória universitária, sempre dando jeito de resolver os problemas difíceis para mim.

Aos meus irmãos que a vida me deu, sem vocês sou um pilar sem ferragem fraco e pronto a ruir. Não citando nome como forma de me preservar, pois sei que esquecerei de escrever algum nome, mas independente de distância ou situação, nossos encontros sempre são perfeitos, as risadas sinceras e o amor verdadeiro.

Aos meus amigos e colegas do setor de piscicultura, Dani, Diana, Graziela, Pedro, Bianca, Ester, Tima, Renan, Mário, entre outros que venho cultivando desde minha chegada ao setor em 2011.

Aos amigos da equipe Lagoaa que me recepcionaram sempre que precisei.

Ao funcionário do setor de piscicultura, José Vitor, meu braço direito e esquerdo, pernas e tronco durante o experimento e período em que necessitei me ausentar.

A toda equipe de apoio UFLA.

“Bom mesmo é ir a LUTA com DETERMINAÇÃO,
abraçar a VIDA com PAIXÃO,
PERDER com CLASSE
e VENCER com OUSADIA,
porque o MUNDO pertence a que se ATREVE
e a vida é MUITO para ser INSIGNIFICANTE”

Charles Chaplin

RESUMO

O crescimento da piscicultura no Brasil e no mundo na última década tem sido evidenciado pelo aumento significativo na produção e na qualidade da carne. Além disso, o desenvolvimento de pacotes tecnológicos em várias fases do ciclo de produção tem contribuído para impulsionar esse setor produtivo. O melhoramento genético faz parte desse conjunto de tecnologias que têm proporcionado ganhos significativos na produtividade da aquicultura. Entre as diversas abordagens utilizadas na seleção de fenótipos superiores, a ultrassonografia tem se mostrado um aliado importante nesse processo. O uso da ultrassonografia para coletar fenótipos começou no início dos anos 2000 e provou ser eficaz, porém, a falta de padronização dessa técnica pode resultar em imprecisões, o que impede a incorporação comum dessa ferramenta em programas de melhoramento genético. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo padronizar a coleta de fenótipos por ultrassom para estimar os parâmetros genéticos relacionados às carcaças. O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira etapa foi realizada com 30 animais selecionados aleatoriamente, dos quais foram coletadas imagens de ultrassom da quinta, décima primeira e nadadeira dorsal posterior. O dispositivo utilizado foi o VinnoQ série 7, com a sonda operando a 10 MHz e com uma profundidade de onda de 3,5 cm. Após a coleta das imagens, os animais foram abatidos por secção medular e tiveram os filés removidos, pesados e divididos em filé de lombo e barriga. As altas correlações fenotípicas obtidas (0,78 - 0,99) mostraram que a ultrassonografia é altamente precisa e que as áreas de carne medidas nas imagens têm um alto coeficiente de determinação (R^2) nos modelos para estimar o rendimento dos filés. A segunda etapa do estudo foi realizada na Universidade Federal de Lavras e incluiu 897 animais de 43 famílias. A coleta das imagens ultrassonográficas seguiu um padrão definido previamente, utilizando o mesmo dispositivo e os locais exatos no corpo dos peixes. As áreas de carne dos três pontos corporais e os rendimentos foram avaliados *in silico* utilizando o programa MTGSAM para obter os parâmetros genéticos de cada característica e as correlações genéticas com o rendimento do filé. As herdabilidades estimadas foram moderadas (0,25 - 0,33), e as correlações genéticas entre as áreas obtidas por ultrassonografia e o rendimento do filé foram elevadas (0,83 - 0,92). Os resultados permitem concluir que a coleta de características de carcaça por meio da ultrassonografia é eficiente e pode ser utilizada para obter ganhos genéticos correlacionados com o rendimento do filé.

Palavras-chave: Correlação genética; Herdabilidade, Rendimento de filé; Ultrassom.

ABSTRACT

The growth of fish farming in Brazil and worldwide over the last decade has been evidenced by the significant increase in production and meat quality. In addition, the development of technological packages at various stages of the production cycle has contributed to boosting this productive sector. Genetic improvement is part of this set of technologies that has led to significant gains in aquaculture productivity. Among the various approaches used to select superior phenotypes, ultrasound has proved to be an important ally in this process. The use of ultrasound to collect phenotypes began in the early 2000s and has proven to be effective, but the lack of standardization of this technique can result in inaccuracies, which prevents the common incorporation of this tool into genetic improvement programs. In this context, this study aimed to standardize the collection of phenotypes by ultrasound in order to estimate genetic parameters related to carcasses. The study was divided into two stages. The first stage was carried out on 30 randomly selected animals, from which ultrasound images of the fifth, eleventh and posterior dorsal fin were collected. The device used was the VinnoQ 7 series, with the probe operating at 10 MHz and a wave depth of 3.5 cm. After the images were taken, the animals were slaughtered by medullary section and the fillets removed, weighed and divided into fillet and belly. The high phenotypic correlations obtained (0.78 - 0.99) showed that ultrasound is highly accurate and that the areas of meat measured in the images have a high coefficient of determination (R^2) in the models for estimating fillet yield. The second stage of the study was carried out at the Federal University of Lavras and included 897 animals from 43 families. The collection of ultrasound images followed a previously defined pattern, using the same device and the exact locations on the fish's bodies. The meat areas of the three body points and the yields were evaluated *in silico* using the MTGSAM program to obtain the genetic parameters for each trait and the genetic correlations with fillet yield. The estimated heritabilities were moderate (0.25 - 0.33), and the genetic correlations between the areas obtained by ultrasound and fillet yield were high (0.83 - 0.92). The results allow us to conclude that the collection of carcass characteristics using ultrasound is efficient and can be used to obtain genetic gains correlated with fillet yield.

Key words: Genetic correlation; Herdability; Fillet yield; Ultrasound.

RESUMO INTERPRETATIVO E RESUMO GRÁFICO

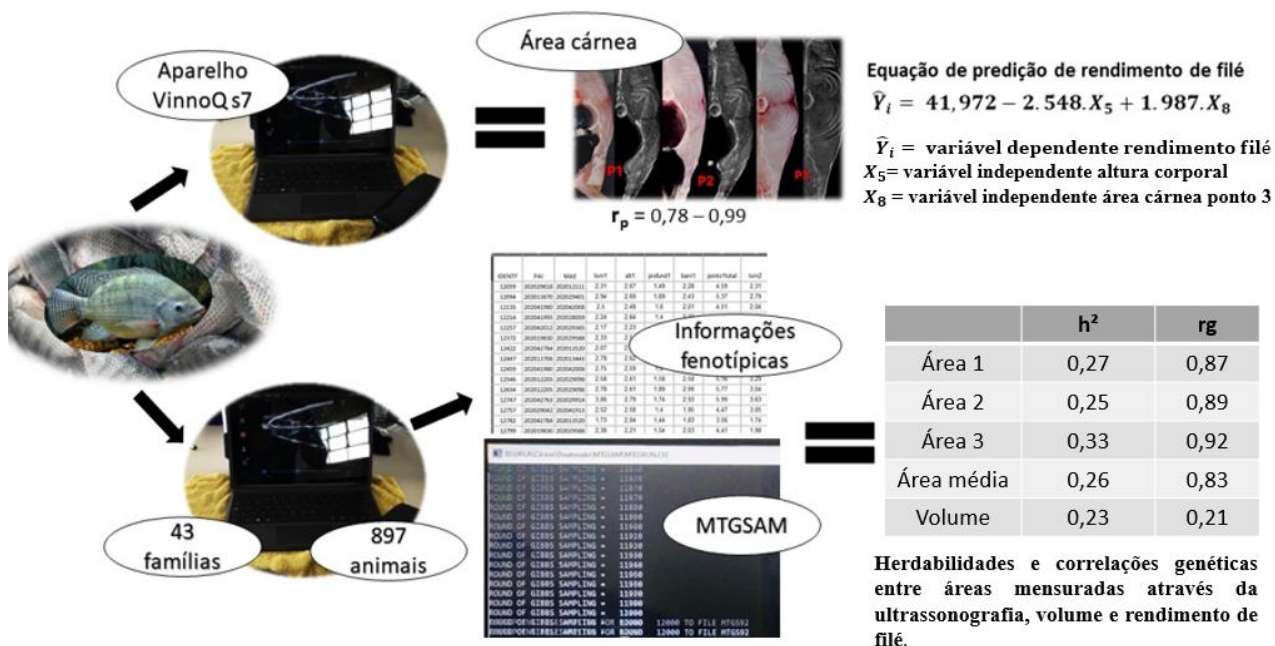
UTILIZAÇÃO DA ULTRASSONOGRAFIA PARA COLETA DE FENÓTIPOS E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS GENÉTICOS DE CARACTERÍSTICAS DE CARÇA EM TILÁPIAS (*Oreochromis niloticus*)

Elaborado por Cícero Eduardo de Rezende e orientado por Alexandre Wagner Silva Hilsdorf

A produção de tilápias tem demonstrado um crescimento evidente nos últimos anos, e o notável desenvolvimento da cadeia é justificado pela crescente demanda por alimentos saudáveis. O melhoramento genético desempenha um papel fundamental no aumento da produção de pescado. No entanto, as pesquisas relacionadas ao melhoramento genético e ao desenvolvimento de novas ferramentas de coleta de fenótipos de carcaça ainda são escassas. Com o objetivo de padronizar e estimar os parâmetros genéticos de características de carcaça obtidos através da ultrassonografia, este estudo foi conduzido.

O primeiro capítulo envolveu a obtenção de imagens ultrassonográficas de 30 animais selecionados aleatoriamente. Após o abate, os cortes da carcaça foram realizados em três pontos específicos. As correlações fenotípicas moderadas e elevadas encontradas sugerem que a ferramenta é precisa na coleta de fenótipos relacionados à carcaça de tilápias.

O segundo artigo utilizou imagens ultrassonográficas obtidas de 897 animais pertencentes a 43 famílias de tilápias. As imagens foram padronizadas de acordo com o capítulo anterior, e os parâmetros genéticos dos fenótipos coletados foram estimados usando o software MTGSAM. As herdabilidades observadas foram moderadas, e as variâncias genéticas aditivas foram baixas. Conclui-se que, mesmo com baixas variâncias genéticas, é possível realizar seleção para aumentar a área de carne mensurada para filé. No entanto, as variáveis fenotípicas avaliadas não estão associadas ao rendimento de filé, que é o principal produto.



LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1. Produção de peixes de cultivo no Brasil em toneladas. 15**
- Figura 2. Metodologia e local de coleta de fenótipos através da morfometria..... 20**
- Figura 3. Imagem ultrassonográfica utilizada para mensurar características de carcaça em surubins (*Pseudoplatystoma spp.*)..... 21**
- Figura 4. Área de olho de lombo mensurado em tambaquis 21**

Capítulo 2

- Figure 1. Locations of ultrasonographic image collection (P1 - at the 5th spine of the dorsal fin, P2 - at the 11th spine of the dorsal fin, and P3 - after the end of the dorsal fin) 37**
- Figure 2. (a) P1 and P2 cross-section cut locations with the delimited area to be in-silico measures by the image analysis package. (b) Work area of the ImageJ software used to measure the section area of the tilapia cross-section cuts..... 37**
- Figure 3. (a) Ultrasonography images of the three defined points for capturing fillet area section of tilapia. (b1) fillet area images in the dorsal region above the midline of the tilapia and (b2) fillet area in the ventral region (belly)..... 39**
- Figure 4. Cross-section delimited area (red outline) measured by ImageJ software. 40**
- Figure 5. Paired images of the real cross-section to the left and ultrasound images to the right, obtained at the pre-selected points. 45**
- Figure 6. Residual analysis of proposed model..... 47**

Capítulo 3

- Figura 1. Metodologia de coleta morfométrica em tilápias. 61**
- Figura 2. Áreas cárneas nos três pontos de coleta. 61**

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Table 1. Descriptive statistics for body measurements. ¹	40
Table 2. Descriptive statistics for fillet cross-section area (cm ²) and depth collected at the three points described sing image processing and direct measurement. ¹	41
Table 3. Descriptive statistics for fillet weights and yields. ¹	42
Table 4. Analysis of the mean values collected using ultrasound and ImageJ for evaluation of the cross-sectional area (cm ²) in tilapia. ^{1,2}	42
Table 5. Pearson correlations between fillet cross-section area measured by ultrasound and in ImageJ. ^{1,2}	43
Table 6. Pearson correlations between ultrasound fillet cross-section area, mean thickness, mean cross-section area, fillet yields and weight. ^{1,2}	44
Table 7. Coefficients of regression, Akaike information criterion (AIC), and determination coefficient (R^2) for equations for estimating fillet cross-section area (cm ²) in Nile tilapia ^{1,2}	46

Capítulo 3

Tabela 1. Estatística descritiva do peso do animal, áreas coletadas por meio da técnica de ultrassonografia, média das áreas coletadas, rendimento de filé e volume cárneo nas postas.	64
Tabela 2. Estimativas de variância e hereditariedade de fenótipos relacionados à carcaça obtidos por ultrassonografia.....	65
Tabela 3. Correlações fenóticas acima da diagonal e correlações genéticas abaixo e intervalo de credibilidade entre parênteses.....	66

SUMÁRIO

CAPITULO 1.....	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1. <i>Oreochromis niloticus</i>	14
2.2. Característica de carcaça em tilápia.....	16
2.3. Ultrassonografia na produção animal	17
2.4. Seleção indireta e ultrassonografia na coleta de fenótipos de carcaça em peixes	19
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	22
REFERÊNCIAS	23
CAPÍTULO 2 – Artigo 1.....	33
1. INTRODUCTION.....	35
2. MATERIALS AND METHODS.....	36
2.1. Animals and data collection	36
2.2. Fish holding and body measurements	36
2.3. Prediction of fillet yield from body and ultrasonography image measurements.	38
2.4. Statistical analyses.....	38
2.5. Image standardization	39
2.6. Cross-section fillet area measurement.....	40
3. RESULTS.....	40
3.1. Statistical measurement data comparison.....	40
3.2. Equation for predicting fillet yield.....	45
4. DISCUSSION	47
5. CONCLUSION.....	50
REFERENCES	51
CAPÍTULO 3 – Artigo 2.....	55
1. INTRODUÇÃO	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
2.1. População Avaliada.....	59
2.2. Morfometria e ultrassonografia	60
2.3. Análises estatísticas.....	62
3. RESULTADOS.....	63
4. DISCUSSÃO	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

CAPITULO 1

1. INTRODUÇÃO GERAL

A produção de pescados é uma atividade que têm crescido nos últimos anos, principalmente devido à redução dos estoques pesqueiros, associada a grande demanda por proteína de origem animal de qualidade (TSEGAY et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2019; PEIXE BR, 2022). Considerada como um alimento de alto valor biológico, a carne de peixe é rica em proteínas, vitaminas e minerais, além de ser fonte de ácidos graxos da família ômega (RAYMOND et al., 2020). Algumas espécies, como a tilápia (*Oreochromis niloticus*), e o baixo teor de gordura a faz ser considerada uma espécie “magra” (SIMÕES et al., 2007; CORADINI et al., 2019).

A tilapicultura tem um papel importante no agronegócio, representando a segunda espécie de peixe mais produzida no mundo e com notável crescimento durante a última década (FAO, 2022). No Brasil, quarto maior produtor de pescados no cenário mundial, a tilápia é a espécie mais cultivada, representando cerca de 65% da produção nacional, seguida de peixes nativos, conhecidos como peixes redondos (PEIXE BR, 2023). A criação de tilápias se expandiu no território brasileiro devido à sua ótima adaptação às condições ambientais, apresentando um rápido desenvolvimento corporal, fácil reprodução, prolificidade e precocidade, se tornando a espécie mais cultivada no país (CÔA et al., 2017).

Diante a grande demanda e potencial de produção da tilápia, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para fomentar os pacotes tecnológicos da espécie, que em grande maioria estão relacionados ao manejo alimentar e reprodutivo (NASCIMENTO et al., 2021). A facilidade de coletar fenótipo relacionado ao desenvolvimento corporal em peixes e a rápida resposta à seleção tornaram as características de ganho de peso o principal objetivo em programas de melhoramento genético (TURRA et al., 2010; RYE, 2012; PORTO et al., 2015). Contudo, para aumentar a rentabilidade dos produtores, tornou-se necessário avaliar características de rendimentos cárneos, como por exemplo o rendimento de filé, principal produto da tilapicultura. No entanto, para aferir essas características no animal é necessário realizar o abate, o que torna a seleção direta impraticável (BLAY et al., 2021).

Embora bastante praticada no melhoramento animal, a seleção direta deixa de ser uma ferramenta viável em estudos relacionados às características de carcaça, visto a necessidade de se abater os animais avaliados, eliminando a possibilidade de que esses possam ser a próxima geração parental, mesmo que apresente características favoráveis (CONTE, 2011; YOSHIDA, 2014). Em virtude disso, ferramentas menos invasivas para coleta de fenótipo foram

desenvolvidas, dentre elas a morfometria e a ultrassonografia (REIS NETO et al., 2014; CARDOSO et al., 2021). A utilização de imagens ultrassonográficas para selecionar animais é o método que menos interfere na homeostase do peixe (CONTE, 2011; REZENDE et al., 2023).

A ultrassonografia vem sendo utilizada na agropecuária há muitos anos, para diagnósticos reprodutivos e patológicos, na avaliação de composição corporal de animais terrestres, e nos anos 2000 passou a ser utilizada também na avaliação de características de carcaça em peixes (GODDARD, 1995; BOSWORTH et al., 2001). A técnica se apresentou eficiente na coleta de fenótipos de espécies piscícolas, porém, o número de trabalhos disponíveis na literatura ainda é limitado.

Em programas que visam selecionar peixes com melhores rendimentos cárneos a seleção indireta é encorajada com o intuito de diminuir os custos e possibilitar a avaliação de características de difícil mensuração que exigiria o abate do animal para coleta das informações (ARIEDE et al., 2023). Contudo, para que esse tipo de seleção seja eficaz, estudos sobre definição da técnica para coleta de fenótipos e estimação de parâmetros genéticos precisam ser realizados e difundidos (TURRA et al., 2013; REIS NETO et al., 2014; REZENDE et al., 2023).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou padronizar a metodologia de coleta de fenótipos de carcaça em tilápias com o auxílio do aparelho de ultrassom, desenvolver uma equação de predição de filé, assim como estimar os parâmetros genéticos para tais características, para assim ser integrado a programas de melhoramento genético facilitando e permitindo obter ganho genético correlacionado para rendimento de filé.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

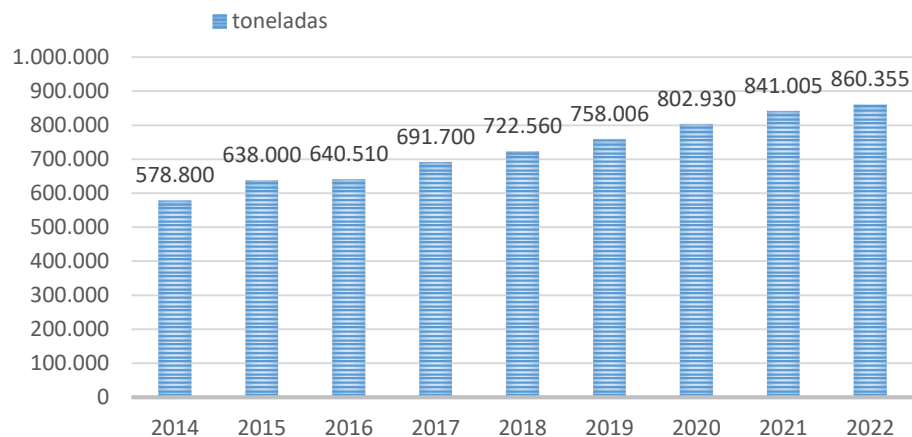
2.1. *Oreochromis niloticus*

A tilápia (*Oreochromis niloticus*) é uma espécie originária do rio Nilo, rios costeiros de Israel e outros rios presentes no continente africano. A espécie foi introduzida no Brasil na década de 70 para repovoar grandes reservatórios e prover sustento as famílias de baixa renda (HILSDORF & HALLERMAN, 2021). A fácil adaptação ao clima e aos diferentes métodos de criação permitiram o cultivo da espécie em todo território nacional, tornando a mais cultivada no país (CÔA et al., 2017; AVNIMELECH, 2011; LIMA et al., 2015; PEIXE BR, 2023).

A tilapicultura representa 4.407 mil toneladas da produção mundial de pescados e é a grande aposta do Brasil para atingir o crescimento de 19% na produção de peixes estimada para

o ano de 2030 (FAO, 2022). No ano de 2022 a produção de tilápias correspondeu a 65% da produção total de pescados no Brasil (FAO, 2022; PEIXE BR, 2023). O Sul do país lidera a produção, seguido pela região sudeste, porém, é notável o crescimento da produção da espécie no norte do país, onde o cultivo de peixes nativos predominava até a inseção da tilápia (PEIXE BR, 2022).

Figura 1. Produção de peixes de cultivo no Brasil em toneladas.



Fonte: PEIXE BR, 2023.

Diante do potencial produtivo da espécie, pacotes tecnológicos compostos por estudos nutricionais, genéticos e reprodutivos, foram elaborados para dar suporte a cadeia produtiva (NAYLOR et al., 2021, VALENTI et al., 2021). Contudo, os programas de melhoramento genético de tilápias focaram na seleção de animais com alta taxa de crescimento e ganho de peso diário, deixando em segundo plano características relacionadas a reprodução, tolerância e resistência a doenças, salinidade, rendimento e qualidade de carcaça (NEIRA, 2010; RYE, 2012).

A facilidade na coleta de fenótipos ligados ao crescimento e a elevada resposta à seleção para ganho de peso corporal são as principais justificativas para a utilização das características de desempenho nos programas de melhoramento genético da espécie. Todavia, o número de pesquisas que visam o rendimento cárneo vem crescendo e tornando a cadeia produtiva de peixes mais rentável (YOSHIDA, 2014). As estratégias de seleção necessitam ser bem delineadas para atingir ganhos genéticos significativos para rendimentos de carcaça, podendo atingir ou ultrapassar o ganho de 15% para ganho de peso, como por exemplo o programa GIFT de melhoramento genético (PONZONI et al., 2011).

A tilápia é conhecida pela sua alta precocidade reprodutiva, porém, essa característica pode apresentar aspectos negativos para o sistema produtivo, visto a grande redução na taxa de crescimento das fêmeas durante o período reprodutivo (PORTO et al., 2015). Além de precoce, a tilápia é considerada prolífera, produzindo em média 2.500 descendentes por ano (SANTOS et al 2007b; ZANARDI, 2011). Assim, a precocidade juntamente com a prolificidade permite galgar significativos ganhos genéticos em programas de melhoramento genético, visto a diminuição do intervalo entre gerações e elevando a intensidade de seleção, permitindo assim obter ganho genético anual considerável. (CORRÊA, et al., 2006; NEIRA, 2010; SANTOS et al., 2011; PORTO et al., 2015).

2.2.Característica de carcaça em tilápia

A *Oreochromis niloticus*, além de rústica, tolerante a diversas condições de salinidade, temperatura e sistemas de cultivo, apresenta crescimento rápido, produzindo carne de boa qualidade e alta aceitação pelo mercado. As fibras musculares brancas de textura firme, sem a presença das espinhas intramusculares em formato de “Y”, facilita a comercialização do peixe em forma de filé. (SILVA et al., 2009; CÔA et al., 2017).

As características morfológicas, anatômicas e físico-química dos peixes dependem de fatores intrínsecos e extrínsecos, podendo gerar uma variância significativa. Em média, a carne de tilápia apresenta aproximadamente 77,13% de umidade, 19,36% de proteína bruta, 2,6% de lipídios totais e 1,09% de cinzas (REBOUÇAS et al., 2012; SALES & MAIA, 2012; MOREIRA et al., 2015; LEITE et al., 2019; GODOY et al., 2019). O alto valor biológico e a presença de ácidos graxos da família ômega na carcaça, elevou significativamente a procura pela carne dessa espécie nas últimas décadas. Contudo, cerca de 65% do peixe vira coproduto durante o processamento, diminuindo a lucratividade da cadeia produtiva. (SIMÕES et al., 2007; CORADINI et al., 2019).

A quantidade de resíduos e cortes comerciais dependem da destreza manual do operador e das máquinas empregadas no processo de filetagem, porém, fatores intrínsecos da espécie também geram impacto no processamento. O formato do peixe, classe de peso, tamanho da cabeça, largura do peixe, peso de vísceras, pele e nadadeiras possuem correlação com a quantidade de carne e resíduos derivados do processamento. (CONTRERAS-GUZMÁN, 1994; MACEDO-VIEGAS et al., 1997).

O crescimento corporal envolve o desenvolvimento de todos os tecidos, permitindo esperar uma alta correlação entre peso de cabeça, filé e seus rendimentos (SILVA et al., 2009). A cabeça da tilápia corresponde a aproximadamente 21% do peso total do animal, valor

próximo ao rendimento de filé (33%) e a associação dessas variáveis é moderadamente inversa (EYO, 1993; DIODATTI, 2006). No entanto a correlação entre as variáveis varia conforme o processamento da carcaça, onde a remoção e o tamanho da cabeça geram diferentes impacto sobre o rendimento cárneo do produto final, que pode variar entre 35 e 50% (SOUZA et al., 2000).

A *Oreochromis niloticus* apresenta o corpo coberto por uma pele fina e escamas, cinco nadadeiras (dorsal, peitorais, anal e caudal) e durante o desenvolvimento essas estruturas aumentam suas proporções para que o animal desenvolva todas suas funções fisiológicas (SANTOS, 2004; DIODATTI, 2006). O peso da soma de nadadeiras, pele e escamas representa cerca de 11% do peso total do peixe, e quando somado ao valor de vísceras chega a representar até 15% do produto descartado (SOUZA & MARANHÃO, 2001). Todavia, durante o crescimento, a representatividade do peso das vísceras tende a diminuir (EYO, 1993; SANTOS, 2004; SILVA et al., 2009).

A costela do peixe é caracterizada pelas estruturas espinhosas que fornecem sustentação ao esqueleto e proteção das vísceras e está compreendida no espaço entre a cabeça e a nadadeira caudal. Os espinhos de costela da tilápia pode representar aproximadamente 44% do peso do peixe, apresentando grandes variações devido às diferentes fases de criação e desenvolvimento dos animais, que desenvolvem primeiramente a cabeça e posteriormente as costelas e nadadeiras (SIGNOR et al., 2017).

Após todo processamento, obtém-se o filé da tilápia, produto mais demandado aos mercados. Seu rendimento se aproxima de 33% do peso do animal ao abate, variando conforme o peso de abate, método de filetagem e decapitação da carcaça (PINHEIRO et al., 2006). O peso economicamente ideal preconizado para o abate, visando a obtenção de maior rendimento de filé está entre 350 e 400 gramas (SANTOS et al., 2007a; SOUZA & MARANHÃO, 2001).

2.3.Ultrassonografia na produção animal

A ultrassonografia é uma técnica não invasiva utilizada em animais desde 1950 para avaliar composição corporal, identificação e mensuração de tecidos moles através de imagens geradas pelas ondas de alta frequência (GODDARD, 1995). A visualização é permitida pelas ondas sonoras produzidas pela vibração de cristais específicos presentes na probe (sonda), que em contraste a impedância do tecido gera um eco na onda sonora, produzindo a imagem (GODDARD, 1995; CREPALDI, 2008).

A ultrassonografia é uma ferramenta que vêm sendo utilizada frequentemente nos últimos anos para avaliação de carcaça em espécies como suínos e bovinos como (MEDAN & ABD EL-ATY, 2010).

Na suinocultura tornou-se um marco genético na década de 50, onde passou a ser empregado para avaliar a composição corporal de suínos e espessura de toucinho, evitando técnicas invasivas anteriormente aplicadas. A ultrassonografia permitiu que a cadeia programasse o abate do animal conforme sua melhor performance produtiva, avaliando *in vivo* parâmetros de terminação da carcaça e assim atendendo as exigências do mercado (DUTRA JR., 2001; GUIMARÃES, 2007).

As principais características de carcaça suína que empregam a ultrassonografia são altura de olho de lombo (AOL) e espessura de toucinho. Com a probe ultrassônica estacionada entre a 10^a e 11^a costela é possível aferir as duas variáveis associadas à composição carne na carcaça (FERREIRA, 2001). A conformação da carcaça de suíno é altamente afetada pela espessura de toucinho que se correlaciona negativamente a quantidade de carne na carcaça, que por sua vez tem associação com a AOL, atualmente mensurada utilizando imagens ultrassonográficas (BISCEGLI & FÁVERO, 1996; BRIDI & SILVA, 2007).

A aplicabilidade da ultrassonografia em características de carcaça de ruminantes é irrefutável, sendo utilizada para diagnósticos patológicos e reprodutivos, definir o estado nutricional do animal, predizer a composição de carcaça, estimar o crescimento muscular e rendimentos cárneos de ovinos e bovinos com grande precisão (BRUCKMAIER et al., 1998; NUBIATO et al., 2013). Em grandes e médios ruminantes o ultrassom alocado entre a 12^a e 13^a costela possibilita a mensuração da área de olho do lombo e a espessura de gordura de cobertura, principais características de carcaça para as espécies. A predição da composição da carcaça antes do abate se mostra como uma eficiente ferramenta para atingir maior lucratividade na produção e a aplicação dessa tecnologia torna a produção ainda mais interessante quando utilizada para avaliar a suculência da carne por meio da gordura intramuscular ou marmoreio (SUGISAWA et al., 2008a; SUGISAWA et al., 2008b).

O uso de ultrassonografia tem sido usado em diversos aspectos da biologia de peixes, na área de reprodução (KARLSEN & HOLM, 1994, NOVELO & TIERSCH, 2012, JÉHANNET et al., 2017, BRIZENDINE et al., 2018, SALMITO-VANDERLEY et al., 2023) e na área de diagnóstico veterinário (HAFSTEINSSON et al., 1989, GODDARD, 1995, GUMPENBERGER et al., 2004). Já a coleta de imagens por ultrassonografia para aferição de características zootécnicas remonta dos anos 1990 com os primeiros trabalhos sobre a utilização de ultrassonografia para coleta de fenótipos de interesse zootécnico (GHAEDIAN et al., 1997,

SUVANICH et al., 1998, BOSWORTH et al., 2001, CREPALDI et al., 2006, CREPALDI et al., 2008, OLIVEIRA et al., 2019, AFONSO et al., 2022).

2.4. Seleção indireta e ultrassonografia na coleta de fenótipos de carcaça em peixes

Assim como vem sendo utilizada no melhoramento genético de animais terrestres (WILSON, 1992), a ultrassonografia pode ser grande valia para obtenção de fenótipos em peixes de valor econômico.

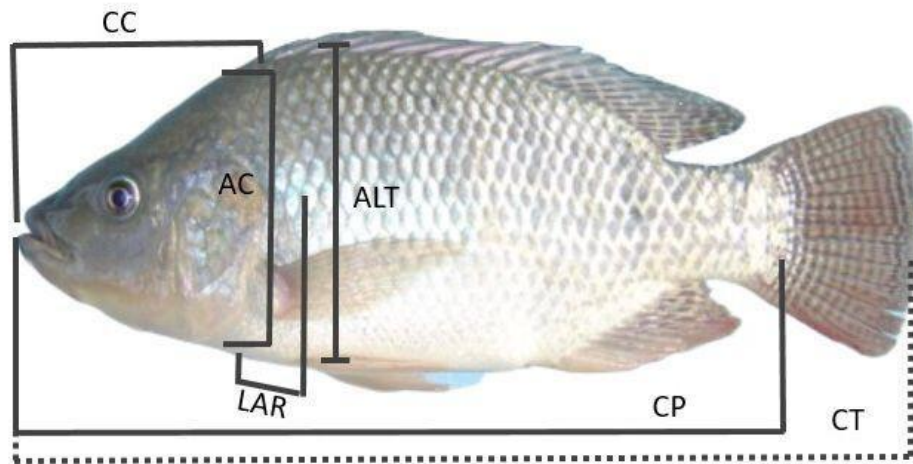
A seleção indireta de fenótipos se caracteriza pela possibilidade de trabalhar uma característica e com isso influenciar outra, permitindo alcançar ganho genético correlacionado. Esse tipo de seleção é usual quando é mais interessante selecionar para uma característica secundária que se correlacione com a característica objetivada prioritariamente, permitindo atingir o objetivo do programa (PEREIRA, 2012).

O maior incentivo para utilização da seleção indireta está relacionado aos custos de coleta das informações, avaliação dos dados, e a dificuldade na coleta de determinados tipos de fenótipos, visto que, a seleção indireta possibilita avaliar características que na seleção direta necessitaria do abate do exemplar (ARIEDE et al., 2023). A seleção indireta, além de gerar menores custos e maiores facilidades, é mais eficiente quando a intensidade de seleção das características é igual. Contudo, para que esse método seja eficiente, as características devem apresentar alta correlação genética e a característica secundária deve apresentar alta herdabilidade (CAIERÃO et al., 2006; PEREIRA, 2012).

O alto custo em manter famílias completas e a grande dificuldade em identificar os peixes para controlar o *pedigree*, elevam a necessidade de praticar a coleta do fenótipo no próprio indivíduo (XUE et al., 2023). A mensuração eficiente e correta, juntamente com a estimação acurada dos parâmetros genéticos permite obter ganho correlacionado, sem eliminar possíveis reprodutores (TURRA et al., 2013).

A mensuração do corpo é um método de coleta de fenótipo utilizado na aquicultura, capaz de descrever com exatidão os formatos dos peixes (TRONG et al., 2013). A morfometria do peixe é muito empregada em programas de melhoramento que objetivam rendimento cárneo e qualidade de carcaça, apresentando resultados positivos a seleção indireta (FERNANDES et al., 2012; LUXINGUER et al., 2018).

Figura 2. Metodologia e local de coleta de fenótipos através da morfometria.

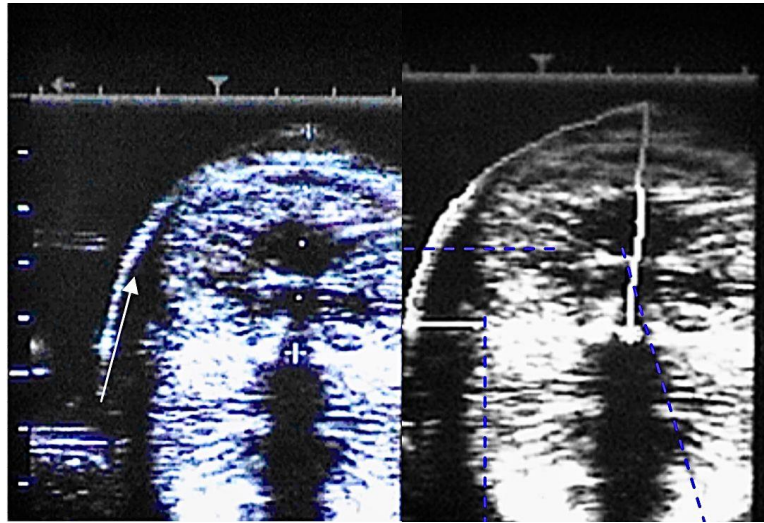


Legenda: Medidas morfométricas para *O. niloticus*, comprimento padrão (CP), a altura (ALT) e largura (LAR) corporal no primeiro raio da nadadeira dorsal, o comprimento da cabeça (CC), altura de cabeça (AC). Fonte: Arquivo pessoal.

A morfometria corporal, peso, rendimento de carcaça e filé, são características que apresentam moderadas a altas correlações e herdabilidades com peso de filé (REIS NETO et al., 2014; FERNANDES et al., 2020). Contudo, a coleta da morfometria é mais demorada e invasiva quando comparada a coleta de imagens ultrassonográficas, visto que as imagens são obtidas rapidamente com os animais submersos em água (CONTE, 2011; REZENDE et al., 2023).

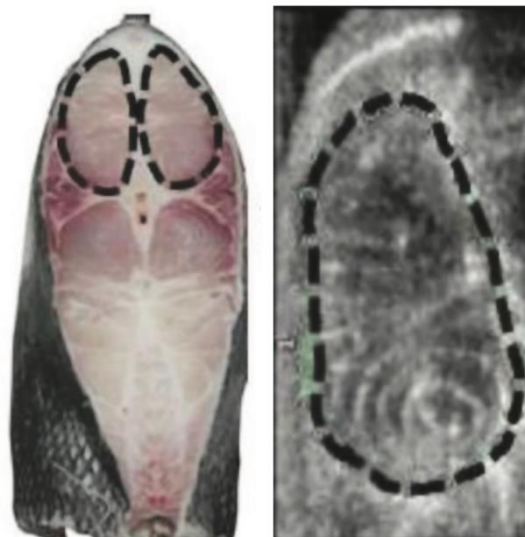
No Brasil o primeiro trabalho aplicando a ultrassonografia na coleta de fenótipos foi realizada em 34 animais híbridos de surubim e a eficácia da ferramenta foi notada, com altas correlações fenotípicas entre as imagens e os cortes realizados na carcaça congelada dos peixes (CREPALDI et al., 2008, Figura 3). Em tambaquis a ultrassonografia permitiu estimar a área de olho de lombo com alta acurácia, se mostrando uma possível ferramenta a ser empregada em programas de melhoramento (PERAZZA et al., 2015, Figura 4). A utilização de métodos não invasivos e eficientes são necessários para preservar os animais, que em primeira instância necessitaria ser abatido para coleta do fenótipo, inviabilizando a seleção direta.

Figura 3. Imagem ultrassonográfica utilizada para mensurar características de carcaça em surubins (*Pseudoplatystoma* spp.).



Fonte: Adaptado de Crepaldi et al. (2006).

Figura 4. Área de olho de lombo mensurado em tambaquis. Lado esquerdo corte na carcaça e a direita imagem ultrassonográfica do lombo.



Fonte: Adaptado de Perazza et al. (2015).

Diante a alta eficácia da utilização do ultrassom na produção animal, onze anos após o primeiro trabalho utilizando a ferramenta para coleta de fenótipos na piscicultura a tecnologia de coleta de fenótipos de carcaça passou a ser estudada e aplicada a tilapicultura, elevando as expectativas na produção de filé da espécie (CONTE, 2011). Embora haja poucos estudos

utilizando a ultrassonografia para seleção de tilápias, a técnica é acurada, permitindo selecionar animais com maior rendimento de filé a partir de apenas uma imagem, coletada de forma rápida e sem estressar o animal (REZENDE et al., 2023).

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A produção de pescados está em notável crescimento nos últimos anos e o desenvolvimento da cadeia produtiva é importante na resposta a constante busca por alimentos saudáveis. A tilápia é a espécie de peixes mais produzida no Brasil e a que apresenta maior potencial de crescimento, visto sua adaptabilidade a diferentes condições ambientais.

Dentre todas as linhas de pesquisas desenvolvidas para a produção tilápias em larga escala, o melhoramento genético é o que permitiu atingir a alta produção da atualidade, partindo de peixes selvagens para animais selecionados. O melhoramento genético da espécie engatinha quando comparado a animais terrestre, porém, tecnologias estão em constante desenvolvimento para dar suporte aos programas de seleção, levando alevinos de qualidade aos criadores.

A ultrassonografia é uma ferramenta pouco aplicada na produção e seleção de tilápias, porém, tem alto potencial na cadeia, visto a facilidade e acurácia na coleta de fenótipos, além de apresentar herdabilidade moderada e altas correlações com rendimento de filé. A padronização, estudo e a difusão da tecnologia é o primeiro passo para que sua inserção na cadeia seja massal, permitindo que a tilapicultura possa galgar novos patamares produtivos.

REFERÊNCIAS

AFONSO, J.; GUEDES, C.; TEIXEIRA, A.; REMA, P.; SILVA, S. In Vivo Ultrasound Prediction of the Fillet Volume in Senegalese Sole (*Solea senegalensis*). **Animals**, v. 12, n. 18, p. 2357, 2022.

ARIEDE, R. B.; LEMOS, C. G.; BATISTA, F. M.; OLIVEIRA, R. R.; AGUDELO, J. F.; BORGES, C. H.; HASHIMOTO, D. T. Computer vision system using deep learning to predict rib and loin yield in the fish *Colossoma macropomum*. **Animal Genetics**. V. 54, n. 3, p. 375-388, 2023.

AVNIMELECH, Y. Tilapia production using biofloc technology - saving water, waste recycling improves economics. **Global Aquaculture Advocate**. p. 66 – 68, 2011.

BISCEGLI, C. I.; FÁVERO, J. A. Recomendação sobre o uso do ultra-som na medida da espessura de toucinho em suínos vivos. Comunicado técnico - **EMBRAPA- CNPSA - SC**. n. 2, p 1-4, 1996.

BLAY, C.; HAFFRAY, P.; BUGEON, J.; D'AMBROSIO, J.; DECHAMP, N.; COLLEWET, G.; ENEZ, F.; PETIT, V.; COUSIN, X.; CORRAZE, G.; PHOCAS, F. Genetic parameters and genome-wide association studies of quality traits characterised using imaging technologies in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. **Front Genet**. v. 12, n. 219. 2021.

BOSWORTH, B. G.; HOLLAND, M.; BRAZIL, B. L. Evaluation of ultrasound imagery and body shape to predict carcass and fillet yield in farm-raised catfish. **Journal of Animal Science**, v.79, p.1483-1490, 2001.

BRIDI, A. M.; SILVA C. A. **Métodos de avaliação de carcaça e da carne suína**. 92p. Londrina, 2007.

BRIZENDINE, M. E.; WARD, D. L.; BONAR, S. A. Effectiveness of ultrasonic imaging for evaluating presence and maturity of eggs in fishes in remote field locations. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 38, n. 5, p.1017-1026, 2018.

BRUCKMAIER, R.M.; LEHMANN, E.; HUGI, W. Ultrasonic measurement of longissimus dorsi muscle and backfat associated with metabolic and endocrine traits, during fattening of intact and castrate male cattle. **Livestock Production Science**. v. 53, p. 123-134, 1998.

CAIERÃO, E., CARVALHO, F. I. F. D., & FLOSS, E. L. Indirect selection to increment grain yield in oats. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p.1126-1131, 2006.

CARDOSO, A. J. S.; OLIVEIRA, C. A. L.; CAMPOS, E.C.; RIBEIRO, R. P.; ASSIS, G. J. F.; SILVA, F. F. Estimation of genetic parameters for body areas in Nile tilapia measured by digital image analysis. **Journal of Animal Breeding and Genetic**, v. 138, p. 731-738, 2021.

CÔA, F.; MEDEIROS, A. M. Z.; BARBIERI, E. Record of nile tilapia in the mandira river, Cananéia, São Paulo state. B. **Instituto de Pesca**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 87 - 91, 2017.

CONTE, B. D. **Predição do peso e do rendimento de filé de tilápia do Nilo a partir de medidas ultrassonográficas e morfométricas, e validação dos modelos de regressão**. 70f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon, Brazil. 2011.

CONTRERAS-GUZMÁN, E.S. **Bioquímica de pescados e derivados**. Jaboticabal: Funep, 1994.

CORADINI, M. F.; OLIVERIA, G. G.; ALTIMARI JUNIOR, F. C.; RANIERO, L. S. R. O.; MIKCHA, J. M. G.; SOUZA, M. L. R. Rendimento e caracterização química de carcaça sem cabeça, filé e subprodutos da filetagem de tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*). **XI EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica**. Arana, 2019.

CORREA, L.; PIMENTEL, L.; CERQUEIRA, R.; CHEMIM, D. Estresse em peixes. **Revista Brasileira de Reprodução**, v. 30, p. 113-117, 2006.

CREPALDI, D.V.; TEIXEIRA, E. A.; FARIA, P. M.; RIBEIRO, L. P.; MELO, D. D.; OLIVEIRA, D. A. A.; TURRA, E. M.; QUEIROZ, B. M. Rendimento de carcaça em surubim ("*Pseudoplatystoma*" spp.) avaliado por ultra-som. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 9, n. 4, 2008.

CREPALDI, D.V.; TEIXEIRA, E.; FARIA, P. M. C.; RIBEIRO, L. P.; SATURNINO, H. M.; MELO, D. C.; SOUSA, A. B. D.; CARVALHO, D. C., 2006. A ultra-sonografia na piscicultura. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 39, n. 3, p. 174-181, 2006.

DIODATTI, F. C. **Medidas morfométricas no peso e rendimento de componentes corporais de tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*)**. 2006. 54 f. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

DUTRA JUNIOR, W.M. Predição de características quantitativas de carcaças de suínos pela técnica de ultra-sonografia em tempo real. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.30, n. 03, Viçosa, 2001.

EYO, A. A. Carcass composition and filleting yield of ten fish species from Kainji Lake. Proceedings of the FAO Expert consultation on fish technology in Africa. **FAO Fishers Rport, Rome**, n. 467, p. 173-175, 1993.

FAO. 2022. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. The State of World Fisheries and Aquaculture. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>.

FERNANDES, A. F. A.; DE ALMEIDA, M.; SILVA, E. R. D. A.; QUEIROZ, B. M.; DE OLIVEIRA ALVES, G. F.; TURRA, E. M. Estimativa de herdabilidades e correlações genéticas para peso, rendimento de carcaça e características morfométricas de tilápias do Nilo (*Oreochromis niloticus*) aos 119 dias de idade média utilizando análises multicaracterísticas. **X Simpósio Brasileiro de Melhoramento Animal**. João Pessoa, PB. 2012.

FERNANDES, A. F. A.; TURRA, E. M.; ALVARENGA, É. R.; PASSAFARO, T. L.; LOPES, F. B.; ALVES, G. F. O.; SINGH, V.; ROSA, G. J. M. Deep Learning image segmentation for

extraction of fish body measurements and prediction of body weight and carcass traits in Nile tilapia. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105274, 2020.

FERREIRA, G. B. **Melhoramento animal aplicado**. Cadernos didáticos, Edições UFSM, Santa Maria, 2001.

GHAEDIAN, R.; DECKER, A. E.; MCCLEMENTS, D. J. Use of ultrasound to determine cod fillet composition. **Journal of Food Science**, v. 62, p. 500-504, 1997.

GODDARD, P. J. General principles. In. **Veterinary ultrasonography**. Cambridge: CAB. International. p. 1- 19, 1995.

GODOY, A. C.; SANTOS, O. O.; OXFORD, J. H.; DE AMORIM MELO, I. W.; RODRIGUES, R. B.; NEU, D.; BOSCOLO, W. R. Soybean oil for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in finishing diets: Economic, zootechnical and nutritional meat improvements. **Aquaculture**, v. 512, p. 734324, 2019.

GUIMARÃES, G. G. **Desempenho e características de carcaça suína de dois cruzamentos de linhagens comerciais criadas em cama sobreposta**. 78f. Dissertação, (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2007.

GUMPENBERGER, M.; HOCHWARTNER, O.; G. LOUPAL. Diagnostic imaging of a renal adenoma in a Red Oscar (*Astronotus ocellatus* Cuvier, 1829). **Veterinary Radiology & Ultrasound**. v. 45, n. 2, p. 139-142, 2004.

HAFSTEINSSON, H.; PARKER, K.; CHIVERS, R.; RIZVI, S. S. H. Application of ultrasonic waves to detect seal worms in fish tissue. **Journal of Food Science**, v. 54, p. 244-247, 1989.

HILSDORF, A. W. S.; HALLERMAN, E. M. Tilapia Genetic Resources: Conservation and Use for Aquaculture. In: **Biology and Aquaculture of Tilapia**, eds. López-Olmeda, J.F., Sánchez-Vázquez, Fortes-Silva, R. pp. 1-32, 2021.

JÉHANNET, P.; HEINSBROEK, L. T.; PALSTRA, A. P. Ultrasonography to assist with timing of spawning in European eel. **Theriogenology**. v. 101, p. 73-80, 2017.

KARLSEN, O.; J. HOLM. Ultrasonography, a non-invasive method for sex determination in cod (*Gadus morhua* L.). **Journal Fish Biology**. v. 44, p. 965-971, 1994.

LEITE, L. A.; QUARESMA, F. D. S.; RIBEIRO, P. F.; FARIAS, W. R. L.; SOUZA, B. W. S. D. The use of *Arthrospira platensis* in rearing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in salt water. **Revista Ciência Agronômica**, v.50, p. 593-599, 2019.

LIMA, E. C. R. D.; SOUZA, R. L. D.; WAMBACH, X. F.; SILVA, U. L.; CORREIA, E. D. S. Cultivo da tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus* em sistema de bioflocos com diferentes densidades de estocagem. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 16, p. 948-957, 2015.

LUXINGER, A. O.; CAVALI, J.; PORTO, M. O.; SALES-NETO, H. M.; LAGO, A. A.; FREITAS, R. T. F. Morphometric measurements applied in the evaluation of *Arapaima gigas* body components. **Aquaculture**, v. 489, p. 80-84, 2018.

MACEDO-VIEGAS, E. M.; DE SOUZA, M. L. R.; NASCIMENTO KRONKA, S. Estudo da carcaça de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), em quatro categorias de peso. **Revista Unimar**, v. 19, n. 3, p. 863-870, 1997.

MEDAN, M. S.; ABD EL-ATY, A. M. Advances in ultrasonography and its applications in domestic ruminants and other farm animals reproduction. **Journal of Advanced Research**. v. 1, n.2, p. 123-128, 2010.

MOREIRA, P. O.; ROCHA, J. D. A. M.; SILVA, T. C.; BITTENCOURT, F.; NEU, D. H.; BOSCOLO, W. R. Óleo de soja utilizado pré e pós-processamento de rações para tilápia do Nilo. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 41, n. 3, p. 547-555, 2015.

NASCIMENTO, I. R. M. A.; SANTOS, J. P.; SOUZA, J. P.; NETA, R. N. F. C.; ALMEIDA, Z. D. S. Bioecologia alimentar e reprodutiva como subsídio para o cultivo do peixe *Centropomus undecimalis* (Teleostei: Centropomidae) no Brasil: Uma Revisão

Sistemática. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, e592101623893-e592101623893, 2021.

NAYLOR, R. L.; HARDY, R. W.; BUSCHMANN, A. H.; BUSH, S. R.; CAO, L.; KLINGER, D. H.; LITTLE, D. C.; LUBCHENCO, J.; SHUMWAY, S. E.; TROELL, M. A 20-year retrospective review of global aquaculture. **Nature**, v. 591, n. 7851, p. 551-563, 2021.

NEIRA, R. Breeding in aquaculture species: genetic improvement programs in developing countries. In: **Proceedings of the 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production**. 2010.

NOVELO, N.D.; TIERSCH, T.R. A review of the use of ultrasonography in fish reproduction. **North American Journal of Aquaculture**. v. 74, n. 2, p. 169-181, 2012.

NUBIATO, K. E. Z., FERNANDES, A. R. M., ALVES, L. G. C., DA SILVEIRA OSÓRIO, J. C., OSÓRIO, M. T. M., DA CUNHA, C. M., ... & NETO, A. P. C. A técnica do ultrassom para avaliação da carcaça em tempo real. **PUBVET**, v. 7, p. 619-706, 2013.

OLIVEIRA, S. N.; RIBEIRO, R. P.; OLIVEIRA, C. A. L.; LOPERA-BARRERO, N. M.; BORQUIS, R. R. A.; ZARDIN, A. M. S. O.; SOUZA, F. P.; POVEDA-PARRA, A. R. Multivariate analysis using morphometric and ultrasound information for selection of tilapia (*Oreochromis niloticus*) breeders. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 48, p. 701-79, 2019.

PEIXE BR. Associação Brasileira Da Piscicultura - **Anuário Peixe BR da Piscicultura**. 101p. 2022. Disponível em: <https://www.peixebr.com.br/anuario-2022/>.

PEIXE BR. Associação Brasileira Da Piscicultura - **Anuário Peixe BR da Piscicultura**. 65p. 2023. Disponível em: <file:///C:/Users/Cicero/Downloads/AnuarioPeixeBR2023.pdf>.

PERAZZA, C. A.; PINAFFI, F. L. V.; SILVA, L. A.; HILSDORF, A. W. S. Evaluation of ultrasound imaging to predict loin eye area in tambaqui. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 41(Special), p. 803-809, 2015.

PEREIRA, J. C. C. **Melhoramento Genético Aplicado à Produção Animal**. 758p. 2012. Editora FepMvz.

PONZONI, R. W.; NGUYEN, N. H.; KHAW, H. L.; HAMZAH, A.; BAKAR, K. R. A.; YEE, H. Y. Genetic improvement of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with special reference to the work conducted by the WorldFish Center with the GIFT strain. **Reviews in Aquaculture**, v. 3, n. 1, p. 27-41, 2011.

PORTO, E. D. P.; OLIVEIRA; C. A. L. D.; MARTINS, E. N.; RIBEIRO, R. P.; CONTI, A. C. M.; KUNITA, N. M.; PORTO, P. P. Respostas à seleção de características de desempenho em tilápia-do-nilo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 745-752, 2015.

RAYMOND, J. K.; ONYANGO, A. N.; ONYANGO, C. A. Proximate Composition and Mineral Contents of Farmed and Wild Fish in Kenya. **Journal of Food Research**, v. 9, n. 3, 2020.

REBOUÇAS, M. C.; RODRIGUES, M. C. P.; CASTRO, R. J. S.; VIEIRA, J. M. M. Caracterização do concentrado protéico de peixe obtido a partir dos resíduos da filetagem de tilápia do Nilo. **Semin., Ciências. Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 697-704, 2012.

REIS NETO, R. V.; OLIVEIRA, C. A. L. D.; RIBEIRO, R. P.; FREITAS, R. T. F. D.; ALLAMAN, I. B.; OLIVEIRA, S. N. D. Genetic parameters and trends of morphometric traits of GIFT tilapia under selection for weight gain. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 259-265, 2014.

REZENDE, C. E.; PERAZZA, C. A.; FREITAS, R. T. F.; HALLERMAN, E.; HILSDORF, A. W. S. Use of ultrasonographic imaging for non-invasive carcass yield prediction in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture International**, p. 1-16, 2023.

RYE, M. Current status and prospects for the application of genetic improvement in aquaculture species. In **Proceedings of the 9th Biennial Symposium of the Brazilian Society of Animal Breeding**. 2012.

SALES, R. O.; MAIA, E. L. Chemical composition and lipids classes of the freshwater fish tilapia do Nilo, *Oreochromis niloticus*. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 6, n. 2, p. 17-30, 2012.

SALMITO-VANDERLEY, C. S. B.; FERREIRA, P. E. L. M.; SOUZA, M. B. D.; MADEIRA, G. M.; BRITO, B. F.; MAGALHÃES, L. C.; MELO, C. H. S. D.; MONTENEGRO, A. R. Use of B-mode ultrasonography for sex determination and maturation monitoring in *Prochilodus brevis* (Steindachner 1875). **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20228631, 2023.

SANTOS, A.I.; RIBEIRO, R.P.; VARGAS, L.; MORA, F.; ALEXANDRE FILHO, L.; FORNARI, D.C.; OLIVEIRA, S.N. de. Bayesian genetic parameters for body weight and survival of Nile tilapia farmed in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.33-43, 2011.

SANTOS, V. B. D.; FREITAS, R. T. F. D.; LOGATO, P. V. R.; FREATO, T. A.; ORFÃO, L. H.; MILLIOTI, L. C. Rendimento do processamento de linhagens de tilápias (*Oreochromis niloticus*) em função do peso corporal. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 554-562, 2007a.

SANTOS, L. S.; OLIVEIRA FILHO, D. R.; SANTOS, S. S.; SANTOS NETO, M. A.; LOPES, J. P. Prolifricidade da tilápia do Nilo, variedade Chitralada, de diferentes padrões de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**. v. 2, 2007b.

SANTOS, V. B. **Crescimento morfométrico e alométrico de linhagens de tilápia (*Oreochromis niloticus*)**. 86 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

SIGNOR, A. A.; FERREIRA, H. K. A.; FRANCISCO, V. A.; SIGNOR, F. R. P.; DA SILVA FIGUEIREDO, E.; RIBEIRO, A. S.; GUTIERREZ, L. S.; REIDEL, A. R. RENDIMENTO DE COSTELA DE TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*). **XX CONBEP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Pesca**. Florianópolis, 2017.

SILVA, F. V.; SARMENTO, N. L. D. A. F.; VIEIRA, J. S.; TESSITORE, A. J. D. A.; OLIVEIRA, L. L. D. S.; SARAIVA, E. P. Características morfométricas, rendimentos de

carcaça, filé, vísceras e resíduos em tilápias-do-nilo em diferentes faixas de peso. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 1407-1412, 2009.

SIMÕES, M. R.; RIBEIRO, C. F. A.; RIBEIRO, S. C. A.; PARK, K. J.; MURR, F. E. X. Composição físico-química, microbiológica e rendimento do filé de tilápia tailandesa (*Oreochromis niloticus*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos, Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas**, Brasil v. 27, n. 3, p. 608-613, 2007.

SOUZA, M. D.; MARANHÃO, T. C. F. Rendimento de carcaça, filé e subprodutos da filetagem da tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus* (L), em função do peso corporal. **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 4, p. 897-901, 2001.

SOUZA, M. L. R.; MARENGONI, N. G.; PINTO, A. A.; DA COSTA CAÇADOR, W. Rendimento do processamento da tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*): tipos de corte da cabeça em duas categorias de peso. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 22, p. 701-706, 2000.

SUGUISAWA, L.; SOUZA, W.; BRADI, A.; WIDER, A. C.; FAUSTO, D.; FERREIRA, V. O. Ultrassom no melhoramento genético da qualidade da carne caprina e ovina. **Simpósio brasileiro de melhoramento animal**, v. 7, 2008a.

SUGUISAWA, L.; VARGAS JUNIOR, F. M.; MARQUES, A.C.W.; BARDI, A. E.; MARTINS, C. F.; PINTO, G. S.; NOGUEIRA, L. M. L. Características de carcaça e Qualidade de Carne por Ultra-sonografia em Ovinos confinados. In: Zootec 2008 - **X Congresso Internacional de Zootecnia**, 2008b.

SUVANICH, V.; GHAEDIAN, R.; CHANAMAI, R.; DECKER, E. A.; MCCLEMENTS, D. J. Prediction of proximate fish composition from ultrasonic properties: Catfish, cod, flounder, mackerel and salmon. **Journal of Food Science**, v. 63, p. 966- 968, 1998.

TRONG, T. Q.; MULDER, H. A.; ARENDONK, J. A.; KOMEN, H. Heritability and genotype by environment interaction estimates for harvest weight, growth rate, and shape of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) grown in river cage and VAC in Vietnam. **Aquaculture**, v. 384, p. 119-127, 2013.

TSEGAY, T.; NATARAJAN, P.; ZELEALEM, T. Analysis of Diet and Biochemical Composition of Nile Tilapia (*O. niloticus*) from Tekeze Reservoir and Lake Hashenge, Ethiopia. **J Fisheries Livest Prod**, v. 4, n. 172, p. 2, 2016.

TURRA, E. M.; FERNANDES, A. F. A.; DE ALVARENGA, É. R. Ferramentas para o melhoramento genético de peixes em água interiores. **X Simpósio Brasileiro de Melhoramento Animal**. Uberaba: SBMA. 12p. 2013.

TURRA, E. M.; OLIVEIRA, D. A. A.; TEIXEIRA, E. A.; PRADO, S. A.; MELO, D. C.; SOUSA, A. B. Uso de medidas morfométricas no melhoramento genético do rendimento de filé da tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 34, n. 1, p. 29-36, 2010.

VALENTI, W. C.; BARROS, H. P.; MORAES-VALENTI, P.; BUENO, G. W.; CAVALLI, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reproduction**. v. 19, p. 100611, 2021.

WILSON, D. E. Application of ultrasound for genetic improvement. **Journal of Animal Science**, v. 70, p. 973-983, 1992.

XUE, Y.; BASTIAANSEN, J. W.; KHAN, H. A.; KOMEN, H. An analytical framework to predict slaughter traits from images in fish. **Aquaculture**, v. 566, p. 739175, 2023.

YOSHIDA, G. M. **Avaliação genética e de efeitos ambientais em características reprodutivas de tilápia do nilo**. 63f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. Universidade Estadual de Maringá, 2014.

ZANARDI, M. F. **Fontes de lipídios na reprodução e larvicultura de Tilápia-do-Nilo**. 87f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/100165>>.

CAPÍTULO 2 – Artigo 1**Use of ultrasonographic imaging for non-invasive carcass yield prediction
in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)**

**Cícero Eduardo de Rezende¹, Caio Augusto Perazza², Rilke Tadeu Fonseca de Freitas¹,
Eric Hallerman³, Alexandre Wagner Silva Hilsdorf^{1,2}**

¹Department of Animal Science, Federal University of Lavras, 37200-900, Lavras, MG, Brazil

²Integrated Center of Biotechnology, University of Mogi das Cruzes, P.O. Box 411, Mogi das Cruzes, SP 08780-911, Brazil

³Department of Fish and Wildlife Conservation, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA, 24061 USA

ABSTRACT

Ultrasonography has been used to collect data on internal structures in terrestrial species for many decades, and has proven an important tool for measuring meat yield-related phenotypes. However, application of this technique to selective breeding of aquaculture has not yet been standardized for many species. The aim of the present study was to use ultrasonography for assessment of fillet yield in Nile tilapia. Ultrasound images were obtained from 30 tilapia with mean weight of $645(\pm 165.89 \text{ g})$. The results were evaluated by Student's *t*-test and correlated by the Pearson method. The data obtained by ultrasonography proved reliable, given the high correlations (0.78 – 0.98) between estimates made using images collected at those standard points and subsequent evaluation from measurements made directly upon the carcass. The correlations for fillet yield (0.51 – 0.58) and belly fillet yield (0.27 – 0.42) were moderate. The area averages and depth averages collected at the three points showed high correlations with fillet yield (0.58-0.54) and sirloin fillet yield (0.56 - 0.60). We conclude that use of ultrasonography in collection of meat-yield phenotypes of economic interest is an effective method for use in selective breeding programs for Nile tilapia.

Keywords: Fish, Phenotyping, Ultrasound, Fillet Yield. Breeding Program

1. INTRODUCTION

Fillet yield is a valued trait for cultured fishes, and its improvement is often included as a goal in selective breeding programs. Yet, fillet yield is a challenging breeding goal inasmuch as it is difficult to assess non-lethally. At a practical level, breeders approach improvement of carcass traits at the family level, sacrificing some family members to evaluate the trait, and breeding other members of high-yield families to produce seed stock and the following generation's broodstock candidates (Gjerde, Mengistu, Ødegård, Johansen & Altamirano, 2012; Gjedrem, 2017). Because the approach requires grow-out and evaluation of families, it is restricted to application in well-resourced selective breeding programs and is impractical for smaller programs of more limited means. The advent of portable ultrasound machines introduces the possibility of non-lethal evaluation of body composition of broodstock candidates, enabling indirect selection and breeding of superior candidates. Ultrasonography has been applied to livestock breeding for several decades, including use for accurately and efficiently measuring the body composition of animals for use in breeding programs (Wilson, 1992; Alarcon-Rojo, Carrillo-Lopez, Reyes-Villagrana, Huerta-Jiménez & Garcia-Galicia, 2019), for example, in breeding of pigs for low backfat thickness and improved carcass quality (Greer, Lowe, & Giles, 1987). The application of ultrasound images to measure body composition in fishes is relatively recent, with studies defining parameters for image collection for channel catfish – *Ictalurus punctatus* (Bosworth, Holland, & Brazil, 2001), surubim catfish – *Pseudoplatystoma spp.* (Crepaldi et al., 2006, 2008), rainbow trout – *Oncorhynchus mykiss* (Haffray, Bugeon, Rivard, Quittet, et al., 2013), tambaqui – *Colossoma macropomum* (Perazza, Pinaffi, Silva, & Hilsdorf, 2015), European sea bass - *Dicentrarchus labrax* (Vandeputte, Puleda, Tyran, Bestin, et al. 2017) and common carp – *Cyprinus carpio* (Prchal, Kocour, Vandeputte, Kause, & Vergnet, 2020). Ultrasound image-based selection of fish for carcass quality has been applied to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Haffray, Bugeon, Rivard, Quittet, et al. 2013; Vandeputte, Bugeon, Bestin, Desgranges et al. 2019, Blay, Haffray, Bugeon, D'Ambrosio et al., 2021).

In recent decades, world production of tilapias (*Oreochromis sp.*) has grown significantly (FAO 2020), especially since the development of selectively bred farmed types with superior performance (e.g., Ibrahim, Mohamed Nasr-Allah, & Charo-Karisa, 2019; Bentsen, Gjerde, Eknath, de Vera et al., 2017; Ponzoni, Nguyen, Khaw, Hamzah et al., 2011). In Brazil, for example, tilapia production represents 65% of total aquaculture production

(Valeti, Barros, Moraes-Valenti, Bueno, & Cavalli, 2021). While there would be interest in improving fillet yield of Nile tilapia, direct measurements of body dimensions showed only a modest relationship with fillet yield (Rutten, Bovenhuis & Komen, 2004). Study of application of ultrasound to selective breeding of tilapia is limited to a single study by Oliveira, Ribeiro, Oliveira, Lopera-Barrero et al. (2019), who applied multivariate analysis to morphometric measures and ultrasound images in broodstock of the GIFT strain of Nile tilapia (*O. niloticus*), finding correlations with ultrasound measures and fillet yield ranging between 0.09 and 0.47 in males and 0.05 and 0.47 in females. Practical application of the ultrasound technique for evaluating carcass yield in tilapia requires assessment of different measurement protocols and standardization to be used reliably and repeatably. Against this background, we investigated the use of ultrasonography to collect data on economic traits of Nile tilapia to establish a baseline for future genetic breeding programs. Our goals were: (i) to propose a standardized non-invasive method of phenotype collection through ultrasound images for *O. niloticus*, and (ii) to estimate the coefficient of regression equation to predict fillet yield based on body and ultrasound images.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Animals and data collection

The animals used were obtained from aquaculture operations at the Ponte Nova Dam in the municipality of Salesópolis, Sao Paulo State, Brazil. A random sample of 30 Chitralada-strain *O. niloticus* was taken, with a mean weight of 645.17 (± 165.89) grams. Images were collected with the aid of a portable VINNO-Q series 7L ultrasound device (VINNO Technology, Suzhou, China). The work went forward with the approval of the Ethics Committee for the Use of Animals at the University of Mogi das Cruzes, under permit number 003/2021.

2.2. Fish holding and body measurements

Individuals were placed in a 50-L plastic container with water containing 300 mg/L benzocaine; the animals remained as long as necessary to become sedated, facilitating handling. The animals were individually weighed on a balance with 1g precision. The standard and total lengths and the height and width of the animals were recorded using a measuring board and a caliper. Ultrasound images were obtained using a linear transducer (probe) connected to the VINNO-Q ultrasonography device, with adjustments in the frequency (10 Mhz) and depth (3.5 cm) parameters to optimize resolution. The images were collected with the fish immersed in

water, and the probe was placed on the left side of the fish at a distance of approximately one centimeter from the skin. There was no need for gel application because water reduces acoustic impedance and reflection to allow a clear image. Images and film footage were collected at three defined positions in the fillet-yield area of tilapia. The first were taken at the fifth dorsal spine (P1), the second at the eleventh (P2), and the last at the end of the soft dorsal fin (P3) (Figure 1a). Also, the horizontal distance from the backbone to the skin (backbone depth, BD) was taken as a variable measurement to be tested (Figure 2a).

Figure 1. Locations of ultrasonographic image collection (P1 - at the 5th spine of the dorsal fin, P2 - at the 11th spine of the dorsal fin, and P3 - after the end of the dorsal fin).

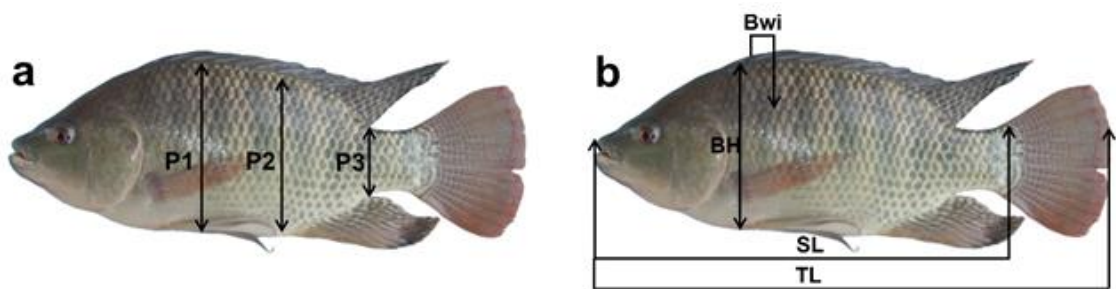
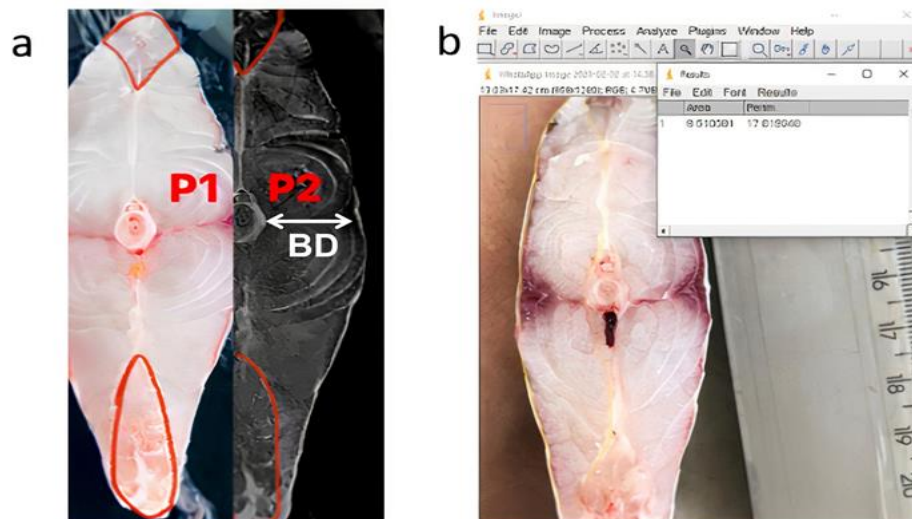


Figure 2. (a) P1 and P2 cross-section cut locations with the delimited area to be in-silico measures by the image analysis package. (b) Work area of the ImageJ software used to measure the section area of the tilapia cross-section cuts.



Using FLYINSONO Ultrasound Software version 1.7.10 (VINNO Technology), the cross-sectional area of the left-side fillet was measured at the three points to estimate the fillet area of the belly and loin areas.

The animals were slaughtered after sedation. The fillets on the right side of the fish were obtained and sectioned into belly and loin fillets; the left side was transversally cut at the three pre-selected points using a scalpel to avoid deformation of the area to be measured. Each fish's section was recorded using a Sony Cyber-shot DSC-W690 Digital Camera featuring 16.1-Mp resolution over a blue background with a ruler for image analysis post-processing. A delimited area (Figure 2b) of the sections was encompassed at the maximum zoom so that the software would reduce any deviations of the measurement that might come from human error, thereby determining the area of the section as precisely as possible. The photos taken from each fish were edited using ImageJ software (Schneider, Rasband, & Eliceiri, 2012) to calculate the cross-sectional area of the fillet.

2.3. Prediction of fillet yield from body and ultrasonography image measurements.

To estimate the coefficient of the regression equation and select the most suitable model for predicting fillet yield, five morphometric traits (body weight - BWe, standard length - SL, total length - TL, body width - BWi, and body height – BH, Figure 1b) at three defined positions of the fillet area (Ap1u, Ap2u, and Ap3u) were assessed. Models relating fillet weight to these metrics were developed, and the Akaike Information Criterion (*AIC*) and the coefficient of determination (R^2) were calculated to assess model fit to the data. The correlations between the independent variables were assessed because retaining highly correlated variables in the analysis causes redundancy, which can bias estimates and interfere with the model's stability. The stepwise method was used for selecting which variables would remain in the best-fitting model. Assumptions verified once the model was selected included outlier presence, residual normality (Shapiro-Wilk Test), and multicollinearity effects (variance inflation factor - VIF). These analyses were performed using the package *regclass* (Petrie, 2020) in software R (R Core Team, 2020),

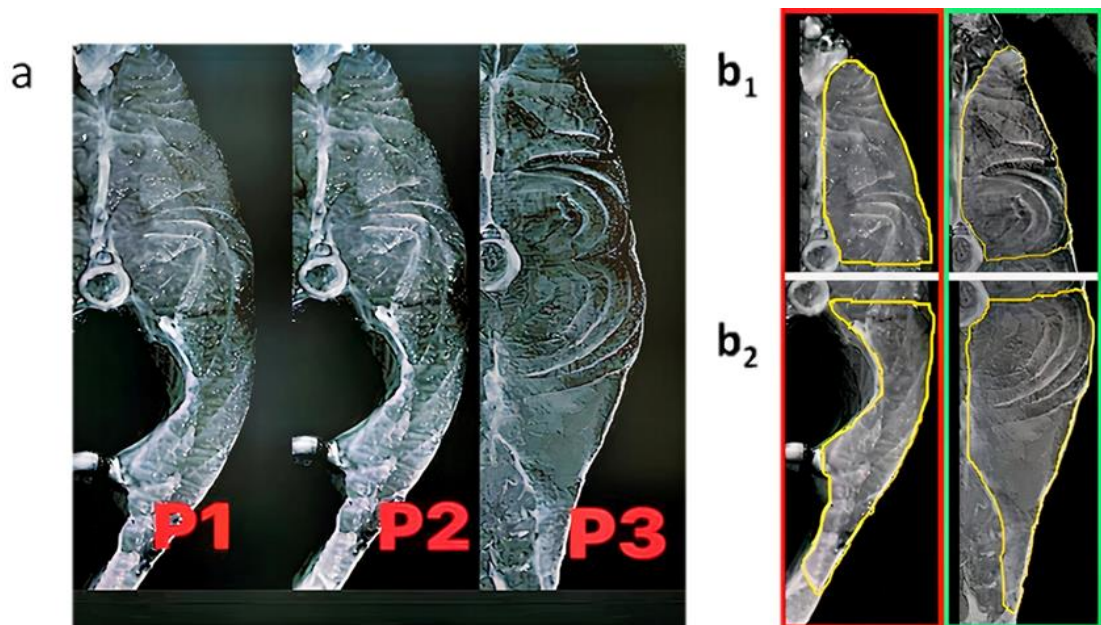
2.4. Statistical analyses

The data collected by ultrasound and the morphometric measurements were subjected to a Shapiro-Wilk normality test. The student's *t*-test was performed with $P < 0.05$, and then Pearson correlations were applied between the image measures collected using ultrasonography and the images obtained in the carcass to assess disparity between the methods of phenotype collection. The statistical procedures were carried out using the *agricolae* package (Mendiburu, 2021) in the R-studio software.

2.5. Image standardization

The three image collection positions were set to capture the entire fillet thickness cross-section for further fillet-yield measures (Figure 3a). The fillet yield area was divided into two sections and evaluated separately to obtain the meat area above the backbone, defined as the loin fillet, and the meat portion in the area of the ribs, called the belly fillet. To avoid overestimating the fillet meat area, the two fillet portions were divided from the backbone to the skin at the midline. The fillet above the lateral line of the fish includes the area between the line parallel to the backbone of the fish that extends to the center of the spinal cord, separating the animal into dorsal and ventral portions. The section delimiting the fillet's upper and lower portions was defined by a 90° angle between the line from the backbone to the dorsal spines and the line from the center of the spinal cord to the epidermis of the fish (Figure 3b1). The belly fillet included the portion of meat below the line defined from the center of the spinal cord and epidermis to the last rib bone visible in the image. (Figure 3b2).

Figure 3. (a) Ultrasonography images of the three defined points for capturing fillet area section of tilapia. (b₁) fillet area images in the dorsal region above the midline of the tilapia and (b₂) fillet area in the ventral region (belly).



The point of image capture from the region of the last spine to the center of the anal fin has anatomical characteristics different from the other points since the coelomic cavity does not extend posteriorly to the delimited point (Figure 2a). This section's upper and lower portions have higher density of tissues and were not considered fillet; therefore, they were not measured. Finally, the cross-sectional area captured by ultrasonography was precisely measured by the image-processing algorithm application of the VINNO-Q ultrasonography device.

2.6. Cross-section fillet area measurement

Figure 4 shows P1 and P2 cut locations with the delimited area measured by the image analysis package. The area delimited in red encompasses the central cross-sectional area of the fillet yield at the three standard points. These areas were then measured in-silico by the J-images package, and termed Ap1im, Ap2im, Ap3im, respectively.

Figure 4. Cross-section delimited area (red outline) measured by ImageJ software.



3. RESULTS

3.1. Statistical measurement data comparison

The animals used to standardize the ultrasound technique and measured parameters were not under zootechnical control; hence, it was a group with variability of age, weight, and sex. Descriptive statistics for body measurements are shown in Table 1. Table 2 presents the descriptive statistics for the respective sections, in which P1u, P2u, and P3u are cross-sectional areas in cm² measured using the ultrasound device, and points P1, P2, and P3 are the measurements obtained using the ImageJ software. Table 3 shows the descriptive statistics for fillet weights and yields.

Table 1. Descriptive statistics for body measurements.¹

Weight (g)	SL (cm)	TL (cm)	WD (cm)	HG (cm)
------------	---------	---------	---------	---------

<i>N</i>	29	29	29	29	29
Min	310.00	21.80	25.70	3.90	7.50
Max	970.00	35.10	38.90	38.90	11.0
Mean	645.17	27.51	33.44	34.30	9.55
SD	165.89	2.85	3.28	0.35	0.84

¹ *N* = number of observations, Min = minimum, Max = maximum, SD = standard deviation, SL = standard length, TL = total length, WD = width, and HG = height.

Table 2. Descriptive statistics for fillet cross-section area (cm²) and depth collected at the three points described using image processing and direct measurement.¹

	P1u	P2u	P3u	P1	P2	P3	PP1	PP2	PP3
<i>N</i>	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Min	4.66	4.51	4.48	4.96	5.78	5.05	1.68	1.56	1.09
Max	11.48	10.72	10.76	8.61	10.66	9.27	2.41	2.17	1.79
Mean	7.46	7.70	7.26	7.27	7.98	6.74	2.13	1.92	1.47
SD	1.53	1.52	1.57	1.05	1.45	1.10	0.22	0.17	0.19

¹ *N* = number of observations; Min = minimum; Max = maximum; SD = standard deviation; *P1u* = point at fifth spine collected by ultrasound; *P2u* = point at 11th spine collected by ultrasound; *P3u* = point posterior to dorsal fin collected by ultrasound; *P1* = point at 5th spine collected in ImageJ; *P2* = point at 11th spine collected in ImageJ; *P3u* = point posterior to the dorsal fin collected in ImageJ; *PP1* = backbone depth at point 1 by ultrasound; *PP2* = backbone depth at point 2 by ultrasound; and *PP3* = backbone depth at point 3 by ultrasound.

Table 3. Descriptive statistics for fillet weights and yields.¹

	Wfillet (g)	Wfilloin (g)	Wfilbel (g)	Yfillet (%)	Yfilloin (%)	Yfilbel (%)
N	29	29	29	29	29	29
Min	92,00	60	32	29,68	18,64	10,32
Max	328,00	212,00	124,00	39,01	24,46	14,67
Mean	208,8	130,9	77,93	33,09	20,70	12,39
SD	61,98	39,93	23,29	2,43	1,49	1,48

¹ N= number of observations; Min= minimum; Max= maximum; SD = standard deviation; *Wfillet* = fillet weight; *Wfilloin* = loin fillet weight; *Wfilbel* = belly fillet weight; *Yfillet* = fillet yield; *Yfilloin* = loin fillet yield; *Yfilbel* = belly fillet yield.

Mean values for cross-sectional fillet areas estimated using ultrasonography and ImageJ did not show significant differences at the points evaluated, exhibiting equal cross-sectional fillet areas (Table 4). Fillet width exhibited statistical differences at the $p = 0.05$ level of significance, showing that using ultrasonography, estimated backbone depth was less than that measured by sectioning the fish and measurement using the ImageJ software (Table 4). The correlations between the cross-sectional areas (cm²) of the ultrasound images and those estimated from photos of the area in the sections ranged from moderate to high correlations, as shown in Tables 5 and 6.

Table 4. Analysis of the mean values collected using ultrasound and ImageJ for evaluation of the cross-sectional area (cm²) in tilapia.^{1,2}

	Ultrasound	ImageJ
Point 1	7.30 ^a	7.27 ^a
Point 2	7.95 ^a	7.98 ^a
Point 3	6.77 ^a	6.74 ^a
Width	2.08 ^a	2.29 ^b

¹ Point 1 = at the fifth spine; Point 2 = at the 11th spine; Point 3 = point posterior to the dorsal fin.

² Mean values followed by different letters in the same row are different ($P < 0.05$).

Table 5. Pearson correlations between fillet cross-section area measured by ultrasound and in ImageJ.^{1,2}

	Ap1im	Ap2im	Ap3im	WidthIm
Ap1u	0.98**	0.63	0.61	---
Ap2u	---	0.99**	0.50	---
Ap3u	---	---	0.98**	---
WidthU	---	---	---	0.78*

¹ *Ap1u* = cross-sectional-area in cm² measured by ultrasound at the first pre-selected point; *Ap2u* = meat area in cm² measured by ultrasound at the second pre-selected point; *Ap3u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the third pre-selected point; *Ap1im* = meat area in cm² measured in ImageJ software at the first pre-selected point; *Ap2im* = cross-sectional area in cm² measured in ImageJ at the second pre-selected point; *Ap3im* = meat area in cm² measured in ImageJ at the third pre-selected point; *WidthU* = width measured by ultrasound; and *WidthIm* = width measured in ImageJ.

² **P*-value < 0.05; ** *P*-value < 0.01.

Table 6. Pearson correlations between ultrasound fillet cross-section area, mean thickness, mean cross-section area, fillet yields and weight.^{1,2}

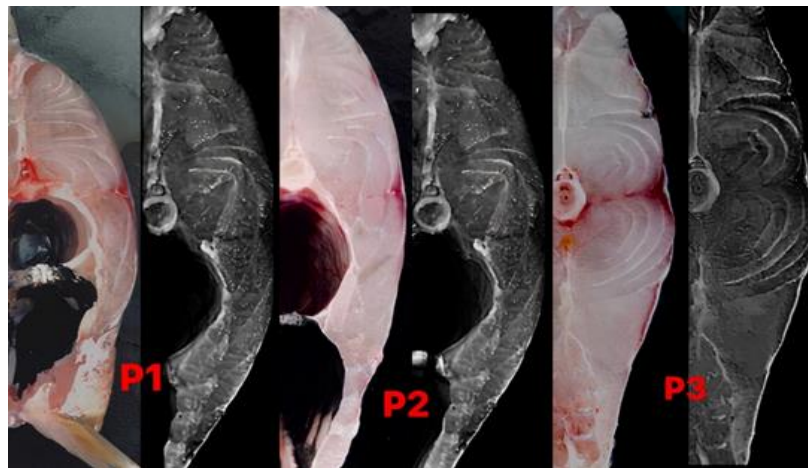
	Ap1u	Ap2u	Ap3u	PP1	PP2	PP3	Marea	Mthick
Weight	0.87***	0.84***	0.88***	0.83***	0.68**	0.80***	0.88***	0.86***
Wfillet	0.94***	0.90***	0.95***	0.88***	0.73**	0.83***	0.94***	0.91***
Wfilloin	0.89***	0.86***	0.92***	0.86***	0.70**	0.70**	0.90***	0.89***
Wfilbel	0.97***	0.92***	0.97***	0.88***	0.75**	0.75**	0.97***	0.91***
Yfillet	0.58*	0.56*	0.57*	0.52*	0.51*	0.51*	0.58*	0.56*
Yfilloin	0.53*	0.54*	0.54*	0.56*	0.53*	0.53*	0.54*	0.60*
Yfilbel	0.42	0.32	0.39	0.27	0.31	0.31	0.41	0.30

¹*Ap1u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the first point; *Ap2u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the second point; *Ap3u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the third point; *PP1* = trunk vertebral column thickness at point 1; *PP2* = trunk vertebral column thickness at point 2; *PP3* = trunk vertebral column thickness at point 3; *Wfillet* = fillet weight; *Wfilloin* = loin fillet weight; *Wfilbel* = belly fillet weight; *Yfillet* = fillet yield; *Yfilloin* = loin fillet yield; *Yfilbel* = fillet belly yield; *Marea* = mean area collected at the three points and *Mthick* = mean thickness from the skin to the trunk vertebral column at the three points.

² **P*-value <0.05; ***P*-value <0.01; *** *P*-value <0.001.

Cross-sectional area comparisons for the three standard points are depicted in (Figure 5). The phenotypic correlations between the cross-sectional areas and the depths were high and highly significant, showing that collection of data through ultrasound is accurate for assessing carcass characteristics of Nile tilapia. For the fillet and loin fillet yield characteristics, the correlation values decreased, but they were still moderate to high, allowing their use in scoring those carcass phenotypes.

Figure 5. Paired images of the real cross-section to the left and ultrasound images to the right, obtained at the pre-selected points.



3.2. Equation for predicting fillet yield

The respective models with regression coefficients and parameters tested are shown in Table 7. The AIC and R^2 values suggested that model seven exhibited the best fit to the data. Its predictor variables were body height at point 1 and cross-sectional fillet area at point 3 captured by ultrasound, as presented by the equation:

$$\hat{Y}_i = 41,972 - 2.548.X_5 + 1.987.X_8$$

where: \hat{Y}_i is the vector of observation of the dependent variable (fillet yield), X_5 is the independent variable, body height (BH); and X_8 is the independent variable, fillet area at point 3.

Table 7. Coefficients of regression, Akaike information criterion (*AIC*), and determination coefficient (R^2) for equations for estimating fillet cross-section area (cm^2) in Nile tilapia^{1,2}

Model	Coefficients									Parameters	
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	<i>AIC</i>	R^2
1	47.428 (32.412) ^{NS}	-0.004 (0.023) ^{NS}	-0.094 (0.940) ^{NS}	0.753 (0.789) ^{NS}	-4.306 (6.618) ^{NS}	-3.490 (2.853) ^{NS}	-1.513 (2.762) ^{NS}	1.276 (1.859) ^{NS}	2.719 (1.715) ^{NS}	65.008	0.512
2	47,839 (29.790) ^{NS}	-0,004 (0,021) ^{NS}	---	0.688 (0.414) ^{NS}	-4.625 (5.372) ^{NS}	-3.435 (2.595) ^{NS}	-1.632 (2.311) ^{NS}	1.382 (1.416) ^{NS}	2.791 (1.441) ^{NS}	63.033	0.581
3	53,523 (7.585) ^{***}	---	---	0.693 (0.388) ^{NS}	-5.512 (2.793) ^{NS}	-3.862 (1.355) [*]	-1.959 (1.518) ^{NS}	1.556 (1.044) ^{NS}	2.905 (1.240) [*]	61.117	0.631
4	50,471 (7.468) ^{***}	---	---	0,514 (0.376) ^{NS}	-4.515 (2.782) ^{NS}	-3.180 (1.292) [*]	---	0.578 (0.744) ^{NS}	1.555 (0.690) ^{NS}	61.953	0.604
5	50,2006 (7.310) ^{***}	---	---	0.4901 (0.367)	-4.053 (2.663)	-3.1755 (1.266) [*]	---	---	1.9761 (0.418) ^{***}	60.925	0.619
6	46,265 (6.925) ^{***}	---	---	---	-2.028 (2.266)	-2.043 (0.974)	---	---	1.998 (0.433) ^{***}	61.390	0.592
7	41.972 (4.953) ^{***}	---	---	---	---	-2.548 (0.786) ^{**}	---	---	1.978 (0.429) ^{***}	60.444	0.599

¹ Model 1: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$;

Model 2: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$;

Model 3: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$;

Model 4: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$;

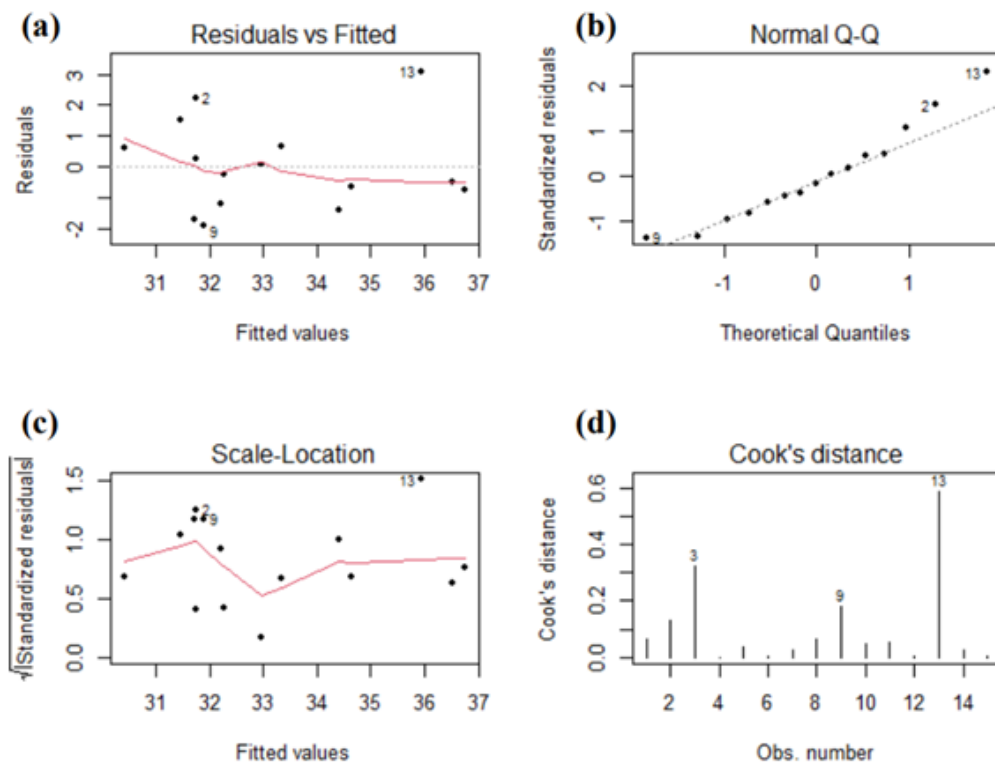
Model 5: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$;

Model 6: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$; and

Model 7: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_5 X_5 + \beta_8 X_8 + \varepsilon_i$, : where: X1 = body weight (kg), X2 = standard length (cm), X3 = total length (cm), X4 = body width (cm); X5 = body height (cm), X6 = fillet area at point 1 captured by ultrasound, X7 = fillet area at point 2 captured by ultrasound, and X8 = fillet area at point 3 captured by ultrasound.² P-values: < ***0.001, **0.01, *0.05, ^{NS} – Non-significant.

The analysis of the residuals is summarized in Figure 6. In Figure 6 (A) and (C), the residuals shown to be randomly distributed with the same amplitude around zero, indicating independence and homoscedasticity. In Figure 6 (B), the dotted line represents a theoretical normal distribution; the distribution of the residuals does not deviate significantly from the line. In Figure 6 (D), Cook's distance values greater than 1 indicate a possible outlier, so there are no discrepant data in the analysis. To corroborate the results observed in the analysis of the residuals, the p -value found in the Shapiro-Wilk test was 0.475, indicating that the residuals are normally distributed. To assess the correlation among the predictor variables and multicollinearity, we used a variance inflation factor (VIF) (O'Brien, 2007) that quantifies the severity of multicollinearity in an ordinary least-squares regression analysis. The VIF value of 3.58 indicates that the variables have low correlation and can be used concurrently in the model (O'Brien, 2007).

Figure 6. Residual analysis of proposed model.



4. DISCUSSION

After growth rate, fillet yield has been the second-most important target trait for selection in Nile tilapia, a fish valued because of its high nutrient content, lack of intermuscular bones and moderate heritability for many valued traits (Thodesen, Rye, Wang, Yang et al.,

2011; Gjerde, Mengistu, Ødegård, Johansen & Altamirano, 2012; Garcia, Oliveira. Karim, Sary et al., 2017). Therefore, any attempt to boost fillet yield under phenotypic selection, or perhaps also using DNA marker information or even genomic selection, depends upon the accuracy of fillet yield data, preferably measured upon live animals. The accuracy of the fillet yield data collected depends on the growth phase and weight of the farmed animal. Ultrasonography-based estimations of fillet volume and area can overcome these obstacles at any developmental stage of the fish without slaughtering them.

Non-invasive methods for evaluating carcass composition have been developed for several fish species to support selective breeding programs. Bosworth, Holland, and Brazil (2001) evaluated the use of ultrasound in evaluating carcass traits of channel catfish and found high associations (0.84-0.94) between the measurement estimated from images collected and measurements assessed upon frozen sections. Crepaldi (2008) applied ultrasonography to catfish (*Pseudoplatystoma* spp.) and observed high correlations between morphometry and carcass yield in different weight classes and observed that the correlations remained high regardless of the weight class. Vandeputte, Puleda, Tyran, Bestin et al., (2017) assessed different predictors from fish surface measurement on digital pictures and ultrasound images of European sea bass *Dicentrarchus labrax*. The authors found low-accuracy for prediction of fillet yield ($R^2 = 0.02-0.18$), but higher for carcass yield ($R^2 = 0.27-0.41$). This result may be the consequence of the methodology used to obtain the ultrasound measurements, which measured fillet thickness rather than area of the fillet cross-section. The same approach was used for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Vandeputte, Bugeon, Bestin, Desgranges et al., 2019) and common carp *Cyprinus carpio* (Prchal, Kocour, Vandeputte, Kause, Vergnet, 2020).

For Nile tilapia, Nguyen et al. (2010), working with morphometry at slaughter weight, found phenotypic correlations near those found in the present study; however, the animals sampled for evaluation of this study by ultrasonography were approximately 127 g heavier than the mean value in that study. Conte (2011) worked with the prediction of weight and fillet yield in fish with a mean weight of 260 grams and found similar results for the cross-sectional fillet area compared with the present study. However, the author considered only the epaxial portion of the section through the multiplication of the height of the backbone by the animal's width and, therefore, may have overestimated the values for area. The belly fillet of Nile tilapia becomes thinner ventrally, causing lack of uniformity among fillets and production lost at the processing stage. Oliveira et al. (2019) assessed variation of genetically improved GIFT-strain Nile tilapia separated by sex and observed high correlations between measurements based on

ultrasound images and those made on morphometric measurements. However, the values did not surpass 0.90 in females and 0.75 in males. The present study's values were relatively high and there was no separation between the sexes. Oliveira et al. (2019) found correlations comparable to those found in the present study (0.422) between meat area measured by ultrasound and fillet yield. The values were similar regardless of the individual weight of the animals used by the authors, with a mean weight of 761.0 g for females and 1551.0 g for males. Using morphometry (Reis-Neto, Oliveira, Ribeiro, & Freitas, 2014) and digital images (Cardoso et al., 2021) of GIFT-strain Nile tilapia body showed high phenotypic correlations. Phenotypic correlations are highly affected by the developmental phase of the fish, which shows a negative association between weight and phenotypic correlation of the characters (Wagner, Ribeiro, Moreira, Vargas, & Povh, 2004; He et al., 2018).

The shape of the fish differs from one individual to the next since growth is heterogeneous, showing different allometric growth as a function of the weight of the animal, suggesting the need for different evaluations between weight and sex groups (He, Zhao, Zhao, Gao et al., 2018). Ultrasonography, for its part, allowed carcass information to be collected at different phases of individual development. Perazza, Pinaffi, Silva, and Hilsdorf (2015), predicting loin eye area in tambaqui (*Colossoma macropomum*) through ultrasonography, observed moderate correlations (0.23-0.61) between estimates based on images collected by ultrasound and measurements made of postmortem tambaqui loin eye area drawn on tracing paper and measured in-silico, correlations lower than those found in the present study. These differences may be associated with human error or the development of the technique since ultrasonography represents highly accurate estimation of area. Therefore, better standardization may result in more useful results.

Selection Accuracy refers to the degree to which the desired result of practicing selection based upon the expected breeding value (EBV) is realized, which, in turn, is an estimate of the true breeding value (TBV). The closer that EBV and TBV are to one another, the higher the accuracy. In this context, reliability measures the degree of confidence from the genetic evaluation step by precisely evaluating the trait under selection. Obtaining trait records by directly collecting carcass measurements upon live broodstock candidates might overcome the limitations of selecting upon the basis of carcass traits evaluated upon slaughtered family members of broodstock candidates. This seems to be a viable option for predictions of genetic parameters of fillet yield in Nile tilapia.

5. CONCLUSION

High correlations between cross-sectional fillet area estimations made using ultrasound imaging and direct fillet area measurement at three body points showed that ultrasonography presents an accurate assessment of carcass traits in Nile tilapia. Using body height at point 1 and the cross-section fillet area at point 3 as described in this study, one can accurately estimate fillet yield of live animals. Therefore, ultrasonography provides an attractive methodology for assessing fillet yield in live broodstock candidates for maximizing gain of fillet yield through selective breeding.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge all the financial supporters of our research, as follow: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), and U.S. Department of Agriculture under the National Institute for Food and Agriculture. We also thank the company Quality Image Brasil for loaning the ultrasound device used in this project. AWSH and RTFF are recipients of CNPq productivity scholarships (304662/2017-8, 313804/2018-4, respectively).

REFERENCES

- Alarcon-Rojo AD, Carrillo-Lopez LM, Reyes-Villagrana R, Huerta-Jiménez M, Garcia-Galicia IA (2019) Ultrasound and meat quality: A review. *Ultrason Sonochem* 55:369-382. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.09.016
- Bentsen HB, Gjerde B, Eknath AE, de Vera MSP, Velasco RR, Danting JC, Dionisio EE, Longalong FM, Reyes RA, Abella TA, Tayamen MM (2017) Genetic improvement of farmed tilapias: Response to five generations of selection for increased body weight at harvest in *Oreochromis niloticus* and the further impact of the project. *Aquac* 468:206-217.
- Blay C, Haffray P, Bugeon J, D'Ambrosio J, Dechamp N, Collewet G, Enez F, Petit V, Cousin X, Corraze G, Phocas F (2021) Genetic parameters and genome-wide association studies of quality traits characterised using imaging technologies in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Front Genet* 12:219. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.639223>.
- Bosworth BG, Holland M, Brazil BL (2001) Evaluation of ultrasound imagery and body shape to predict carcass and fillet yield in farm-raised catfish. *Sci J Anim Sci* 79:1483-1490. doi: 10.2527/2001.7961483x.
- Cardoso AJS, Oliveira CAL, Campos EC, Ribeiro RP, Assis GJF, Silva FF (2021) Estimation of genetic parameters for body areas in Nile tilapia measured by digital image analysis. *J Anim Breed Genet* 138:731-738. doi: 10.1111/jbg.12551
- Conte BD (2011) Prediction of Nile tilapia fillet weight and yield using ultrasound and body measurements and validation of regression models (in Portuguese). M.S. thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon, Brazil. 70f. (retrieved from <http://tede.unioeste.br/handle/tede/1639>)
- Crepaldi DV, de Alencar Teixeira E, Faria PM, Ribeiro LP, Melo DC, de Andrade Oliveira DA, Queiroz BM (2008) Rendimento de carcaça em surubim ("*Pseudoplatystoma*" spp.) avaliado por ultra-som. *Rev Bras de Saude e Prod Anim* 9:4.
- Crepaldi DV, Teixeira EA, Faria PMC, Ribeiro LP, Saturnino HM, Melo DC, Sousa AB, Carvalho DC (2006) A ultra-sonografia na piscicultura. *Rev Bras Reprod Anim* 30:174-181.

- FAO (2020) The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Garcia ALS, Oliveira CAL, Karim HM, Sary C, Todesco H, Ribeiro RP (2017) Genetic parameters for growth performance, fillet traits, and fat percentage of male Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J Appl Genet* 58:527-533. doi: 10.1007/s13353-017-0413-6
- Gjerde B, Mengistu SB, Ødegård J, Johansen H, Altamirano DS (2012) Quantitative genetics of body weight, fillet weight and fillet yield in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac* 342:117-124. doi: 10.1016/j.aquaculture.2012.02.015
- Gjedrem T (2017) Possibility for improving carcass composition and meat quality traits by selective breeding. *Int J Curr Res* 9:11-18. [dx.doi.org/10.7324/IJCRR.2017.9103](https://doi.org/10.7324/IJCRR.2017.9103)
- Greer EB, Lowe TW, Giles LR (1987) Comparison of ultrasonic measurement of backfat depth on live pigs and carcasses with a digital recording instrument. *Meat Sci* 19:111–120. doi: 10.1016/0309-1740(87)90016-7
- Haffray P, Bugeon J, Rivard Q, Quittet B, Puyo S, Allamelou J M, Vandeputte M, Dupont-Nivet M (2013) Genetic parameters of in-vivo prediction of carcass, head and fillet yields by internal ultrasound and 2D external imagery in large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquac* 410:236-244. doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.06.016
- He J, Zhao Y, Zhao J, Gao J, Xu P, Yang R (2018) Random regression analysis for body weights and main morphological traits in genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J Appl Genet* 59:99-107. doi: 10.1007/s13353-018-0428-7
- Ibrahim NA, Mohamed Nasr-Allah A, Charo-Karisa H (2019) Assessment of the impact of dissemination of genetically improved Abbassa Nile tilapia strain (GIANT-G9) versus commercial strains in some Egyptian governorates. *Aquac Res* 50:2951-2959. doi: 10.1111/are.14249
- Mendiburu F (2021) *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1.3-5. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Nguyen NH, Ponzoni RW, Abu-Bakar KR, Hamzah A, LingKhaw H, Yip Yee H (2010) Correlated response in fillet weight and yield to selection for increased harvest weight in genetically improved farmed tilapia (GIFT strain), *Oreochromis niloticus*. *Aquac* 3:1-5. doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.04.007

- O'Brien RM (2007) A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Qual Quant* 41:673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Oliveira SN, Ribeiro RP, Oliveira CAL, Lopera-Barrero NM, Borquis RRA, Zardin AMSO, Souza FP, Poveda-Parra A R (2019) Multivariate analysis using morphometric and ultrasound information for selection of tilapia (*Oreochromis niloticus*) breeders. *R Bras Zootec* 48:701-79. doi 10.1590/rbz4820170179
- Perazza CA, Pinaffi FLV, Silva LA, Hilsdorf AWS (2015) Evaluation of ultrasound imaging to predict loin eye area in tambaqui. *Bol Inst Pesca* 41:803-809.
- Petrie A (2020) Regclass: Tools for an introductory class in regression and modeling. R package version 1.6. <https://CRAN.R-project.org/package=regclass>
- Ponzoni RW, Nguyen NH, Khaw HL, Hamzah A, Bakar KRA, Yee HY (2011) Genetic improvement of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with special reference to the work conducted by the WorldFish Center with the GIFT strain. *Rev Aquac*, 3, 27-41. doi: 10.1111/j.1753 -5131.2010.01041.x
- Prchal M, Kocour M, Vandeputte M, Kause A, Vergnet A, Zhao J, Gela D, Kašpar V, Genestout L, Bestin A, Haffray P (2020) Morphological predictors of slaughter yields using 3D digitizer and their use in a common carp breeding program. *Aquac*, 520:734993. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734993
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reis-Neto RV, Oliveira CALD, Ribeiro RP, Freitas RTF, Allaman IB, Oliveira SND (2014) Genetic parameters and trends of morphometric traits of GIFT tilapia under selection for weight gain. *Sci Agric* 71:259-265. doi: 10.1590/0103-9016-2013-0294
- Rutten MJ, Bovenhuis H, Komen H (2004) Modeling fillet traits based on body measurements in three Nile tilapia strains (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquac* 231:113-122. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.002
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* 9:671–675. doi:10.1038/nmeth.2089.
- Thodesen J, Rye M, Wang YX, Yang KS, Bentsen HB, Gjedrem T (2011) Genetic improvement of tilapias in China: genetic parameters and selection responses in growth of Nile tilapia

- (*Oreochromis niloticus*) after six generations of multi-trait selection for growth and fillet yield. *Aquac* 322:51-64. doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.10.010
- Vandeputte M, Puleda A, Tyran AS, Bestin A, Coulombet C, Bajek A, Baldit G, Vergnet A, Allal F, Bugeon J, Haffray P (2017) Investigation of morphological predictors of fillet and carcass yield in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) for application in selective breeding. *Aquac* 470:40-49. doi: dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.12.014
- Vandeputte M, Bugeon J, Bestin A, Desgranges A, Allamellou JM, Tyran AS, Allal F, Dupont-Nivet M, Haffray P (2019) First evidence of realized selection response on fillet yield in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, using sib selection or based on correlated ultrasound measurements. *Front Genet* 10:1225. doi.org/10.3389/fgene.2019.01225
- Valenti WC, Barros HP, Moraes-Valenti P, Bueno GW, Cavalli RO (2021) Aquaculture in Brazil: Past, present and future. *Aquac Rep*, 19, 100611. doi: 10.1016/j.aqrep.2021.100611
- Wagner PM, Ribeiro RP, Moreira HLM, Vargas L, Povh JA (2004) Evaluation of Nile tilapia strains (*Oreochromis niloticus*) in different phases of rearing (in Portuguese). *Acta Sci-Anim Scis* 26:187-196. doi: 10.4025/actascianimsci.v26i2.1864
- Wilson DE (1992) Application of ultrasound for genetic improvement. *J Anim Sci* 70:973-983. doi:10.2527/1992.703973x

CAPÍTULO 3 – Artigo 2

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico Aquaculture

Explorando o potencial da ultrassonografia na otimização do melhoramento genético: uma abordagem inovadora para o aperfeiçoamento da seleção de características de carcaça em *Oreochromis niloticus*

Cícero Eduardo de Rezende¹, Caio Augusto Perazza², Danielle Cristina Pereira Marçal¹, Diana Carla Oliveira Fernandes¹, Rafael Vilhena Reis Neto³, Rilke Tadeu Fonseca de Freitas¹, Eric Hallerman⁴, Alexandre Wagner Silva Hilsdorf^{1,2}.

¹Department of Animal Science, Federal University of Lavras, 37200-900, Lavras, MG, Brazil.

²Integrated Center of Biotechnology, University of Mogi das Cruzes, P.O. Box 411, 08780-911, Mogi das Cruzes, SP, Brazil

³Department of Fisheries engineering, Faculty of Agricultural Sciences of Vale do Ribeira - Registro Campus, São Paulo State University (UNESP), 11900-000, Registro, SP, Brazil.

⁴Department of Fish and Wildlife Conservation, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA, 24061 USA.

RESUMO

O crescimento mundial na produção de pescados tem sido notável nos últimos anos, e a tilápia vem se destacando devido à crescente demanda por alimentos saudáveis. Essa espécie demonstra notável adaptabilidade, possibilitando seu cultivo em diversas condições climáticas. No entanto, ao contrário de espécies terrestres, a piscicultura enfrenta desafios no controle genealógico e na coleta de fenótipos, demandando desenvolvimentos para dar suporte aos programas de melhoramento genético. Métodos tradicionais, como a medição corporal com réguas e a captura de imagens por fotografia, são amplamente utilizados na coleta de informações genéticas. No entanto, embora menos difundida, a ultrassonografia emerge como uma ferramenta eficaz e menos estressante para os peixes. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da ultrassonografia na seleção genética de características de carcaça em tilápias. Foram utilizados dados de 897 animais pertencentes a 53 famílias do programa de melhoramento genético da Universidade Federal de Lavras. Os animais foram sedados com benzocaína, e imagens ultrassonográficas foram coletadas em três pontos distintos para medir a área da carne. Posteriormente, os animais foram insensibilizados em gelo e abatidos por secção medular para o processamento da carcaça, que incluiu evisceração e filetagem, com registro de todos os pesos envolvidos. Os parâmetros genéticos e correlações genéticas foram estimados por meio da inferência Bayesiana utilizando o software MTGSAM, com o auxílio do Rstudio para as correlações fenotípicas. Embora as variâncias genéticas aditiva tenham se mostrado baixas, as herdabilidades das características de carcaça estudadas foram moderadas (0,23 – 0,33). Além disso, os fenótipos obtidos por meio da ultrassonografia apresentaram correlações genéticas significativamente altas com o rendimento de filé (0,83 – 0,92). Em conclusão, os resultados indicam que a seleção indireta por meio de imagens ultrassonográficas é eficaz e pode ser implementada em programas de melhoramento genético de tilápias voltados para o aumento do rendimento de filé.

Palavras-chave: Tilápia. Ultrassom. Rendimento de carcaça.

ABSTRACT

The global growth in fish production has been remarkable in recent years, and tilapia has been gaining prominence due to the increasing demand for healthy food. This species demonstrates remarkable adaptability, enabling its cultivation in various climatic conditions. However, unlike terrestrial species, aquaculture faces challenges in genealogical control and the collection of phenotypes, requiring developments to support genetic improvement programs. Traditional methods such as body measurement with rulers and image capture through photography are widely used in genetic information collection. However, although less widespread, ultrasound emerges as an effective and less stressful tool for fish. In this context, the present study aimed to assess the applicability of ultrasound in the genetic selection of carcass characteristics in tilapia. Data from 897 animals belonging to 53 families from the genetic improvement program at the Federal University of Lavras were used. The animals were sedated with benzocaine, and ultrasonographic images were collected at three distinct points to measure the area of the flesh. Subsequently, the animals were cooled in ice and euthanized through spinal section for carcass processing, which included evisceration and filleting, with records of all involved weights. Genetic parameters and genetic correlations were estimated using Bayesian inference with the MTGSAM software, assisted by Rstudio for phenotypic correlations. Although variances were found to be low, the heritabilities of the studied carcass characteristics were moderate (0.23 - 0.33). Furthermore, phenotypes obtained through ultrasound showed significantly high genetic correlations with fillet yield (0.83 - 0.92). In conclusion, the results indicate that indirect selection through ultrasonographic images is effective and can be implemented in tilapia genetic improvement programs aimed at increasing fillet yield.

Key words: Tilapia. Ultrasound. Carcass yield.

1. INTRODUÇÃO

A produção de pescados no mundo apresentou crescimento evidente nas últimas décadas (Naylor et al., 2021). A tilapicultura representa 4.407 mil toneladas da produção mundial de pescados e no Brasil a espécie é a aposta para atingir o crescimento de 19% na produção de pescados estimada para o ano de 2030 (Fao, 2022).

Na última década a produção de peixes apresentou um crescimento exponencial, ultrapassando 200 mil toneladas em 2022 (Peixe Br, 2022). O rápido crescimento do setor piscícola deve-se a diversos fatores, dentre eles a crescente demanda por alimentos saudáveis, com alto valor biológico e baixos teores de gorduras, além da popularização de receitas orientais que tem como principal ingrediente, o pescado. A tilapicultura representa cerca de 60% da produção brasileira de pescado devido a fatores intrínsecos e extrínsecos que possibilitam que os produtores supram grande parte da demanda por pescado (Valenti et al., 2021, Oliveira et al., 2019).

O crescimento da produção de tilápias no Brasil e no mundo é sustentado por um pacote tecnológico consolidado que demandou intensa busca por conhecimentos na área de nutrição, reprodução e produção de peixes. Contudo, uma das áreas que notavelmente foi responsável pela grande expansão da aquicultura mundial é o melhoramento genético, que a partir da seleção de animais zootecnicamente superiores permitiu que espécies selvagens passassem a produzir grande quantidade de carne (Gjedrem et al., 2012).

Com objetivo de suprir uma demanda do setor produtivo, o melhoramento genético de tilápias, em primeira instância, objetivou produzir animais com rápido crescimento e elevado ganho de peso diário, e isso foi alcançado por se tratar de características de fácil mensuração que apresentam altos ganhos genéticos anuais. No entanto, com intuito de otimizar a produção e diminuir os impactos ambientais, as características de carcaça passaram ser priorizadas em estudos que envolvem avaliações genéticas de tilápia (Blay et al., 2021; Neira et al., 2016; Reis Neto et al., 2014).

A obtenção de fenótipos para características de carcaça de peixes em geral é onerosa e difícil, visto a necessidade de manuseio para aferição de várias medidas corporais para compor modelos que permitem aprimorar a predição de rendimento de filé (Turra et al., 2012). Ferramentas como fotografia, morfometria, tomografia e ultrassonografia vem sendo utilizadas para tornar a coleta de fenótipos fácil, informativo e o mais preciso possível.

Diferentemente do crescimento e desenvolvimento corporal, as características de carcaça apresentam baixos ganhos genéticos anuais e maior dificuldade de promover a seleção direta, visto a dificuldade em coletar fenótipos *in vivo* (Cardoso et al., 2021; Ariede et al., 2023). Diante da impossibilidade de selecionar animais mortos, a seleção indireta para tais variáveis é a única saída para programas de melhoramento genético que objetivam rendimento de carcaça (Conte, 2011).

Na piscicultura, o método mais utilizado e difundido para coleta de fenótipos relacionados às características de carcaça é a mensuração das dimensões corporais (morfometria) juntamente com a pesagem dos indivíduos, porém, esses procedimentos envolvem a manipulação intensa dos animais por longos períodos provocando estresse, além de demandar mão-de-obra bastante treinada para obter medidas precisas (Conte, 2011). A utilização de aparelhos de ultrassonografia vem sendo testado para aumentar a eficácia na coleta de dados corporais, diminuindo o manejo aplicado durante o processo de aferição das medidas (Crepaldi et al., 2008, Oliveira et al., 2019).

O uso de imagens ultrassonográficas já foi constatado como um método acurado e não invasivo para obtenção de fenótipos associados a carcaça de peixes (Ghaedian et al., 1997, Bosworth et al., 2001). A técnica apresenta correlações fenotípicas superiores a 0,90, evidenciando a eficácia da ferramenta para mensurar a porção cárnea presente no filé do peixe (Rezende et al. 2023; Perazza, et al., 2015). No entanto, para que um programa de melhoramento genético atinja o objetivo, é de suma importância estimar os componentes de (co)variâncias para as características estudadas. O estudo dos parâmetros e correlações genéticas entre fenótipos obtidos por imagem ultrassonográficas e características de carcaça é de suma importância para planejar a metodologia aplicada para atingir os objetivos de seleção. Diante do exposto, o objetivo do presente estudo foi avaliar a aplicabilidade da ultrassonografia na seleção indireta de características de carcaça de tilápia por meio da estimativa das herdabilidades e correlações genéticas entre as medidas ultrassonográficas e rendimentos corporais de tilápia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. População Avaliada

No presente estudo, foram avaliados 897 animais provenientes de 53 famílias de irmãos completos, produzidas no Centro de Pesquisa e Difusão de Tecnologia da Universidade Federal

de Lavras (latitude -21.23111, longitude -44.98695), durante a estação reprodutiva de 2020-2021.

Para obtenção das famílias, 53 casais de tilápias foram alocados em hapas de 1m³, e a cada 7 dias, as bocas das fêmeas eram observadas para coleta de ovos. Após a coleta, a fêmea era retirada do hapa onde uma outra fêmea era alocada com o mesmo macho para geração de famílias de meios-irmãos. Os ovos coletados de cada família foram transferidos para incubadoras artificiais com capacidade de 2 L sob aeração contínua e temperatura constante (28±0,5°C). Após a eclosão, ainda separadas por família, as progênes foram transferidas para hapas de malha de 1mm com volume disponível de 1m³ distribuídas em tanques de alvenaria de 8m de comprimento x 5m de largura e 1,6m de profundidade onde permaneceram até atingirem tamanho suficiente (10 gramas) para receber a identificação individual. A identificação foi realizada em 40 animais de cada família (20 machos e 20 fêmeas), através de PIT-Tags (Passive Integrated Transponder) implantados na porção dorso-cranial dos animais.

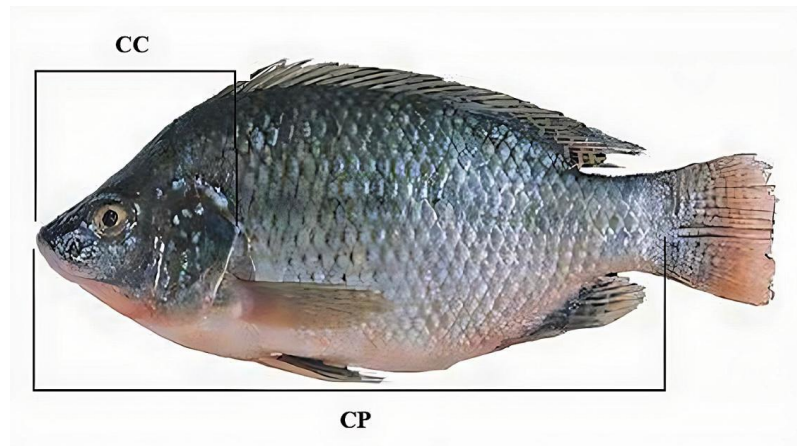
Após a identificação, os animais foram separados por sexo em tanques redes de 6m³ alocados em tanques de alvenaria com capacidade de 64 mil litros. A densidade de estocagem praticada durante todo período de crescimento e engorda foi igual em todos os tanques redes e a alimentação foi fornecida duas vezes ao dia até a saciedade aparente com a ração indicada para cada fase do desenvolvimento dos peixes.

Todos os procedimentos experimentais aplicados no presente trabalho foram realizados com a aprovação do Comitê de Ética no Uso de Animais da Universidade de Mogi das Cruzes, sob o número de autorização 003/2021.

2.2. Morfometria e ultrassonografia

Após aproximadamente 370 dias de período de crescimento, os animais foram capturados, anestesiados (benzocaína 300mg/L), pesados e medidos em comprimento de cabeça (CC) e comprimento padrão (CP) (figura 1). As medidas de comprimento foram utilizadas para aplicação da fórmula de volume corporal.

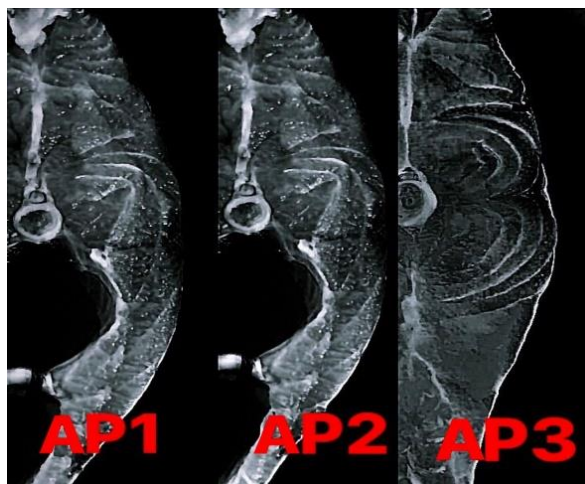
Figura 1. Metodologia de coleta morfométrica em tilápias.



Legenda: CC: comprimento de cabeça e CP: comprimento padrão.

Ainda anestesiados, três imagens ultrassonográficas foram obtidas de cada animal, permitindo identificar as estruturas calcificadas (espinhos), pele, cavidade celomática e tecido muscular. A coleta dos fenótipos foi realizada no lado esquerdo do peixe utilizando o equipamento Vinno-Q series 7L (Brasil), emitindo a uma profundidade de 3,5 cm e 10 MHz. A probe linear foi mantida à 1cm da pele do animal e em movimento dorso-ventral nos pontos que compreendem da 5^a espinha da nadadeira dorsal ao ponto caudal da nadadeira peitoral (AP1), 11^a espinha da nadadeira dorsal ao ponto cranial a papila urogenital (AP2) e posterior a nadadeira dorsal a porção central da nadadeira urogenital (AP3), conforme a (figura 2).

Figura 2. Áreas cárneas nos três pontos de coleta.



Legenda: P1, P2 e P3 ilustrando musculatura presente nas áreas aferidas através da ultrassonografia.

As imagens obtidas foram processadas posteriormente utilizando as ferramentas disponíveis no software FLYINSONO versão 1.7.10 instalado no equipamento ultrassonográfico, permitindo a obtenção do fenótipo de área cárnea no corte nos três pontos determinados. Como complemento, a área média (A_m) da porção cárnea no filé foi calculada pela soma das áreas mensuradas nos três pontos e dividida por três. Após as imagens ultrassonográficas coletadas, os animais ainda sedados foram insensibilizados por submersão em água com gelo, abatidos por secção medular, eviscerados, filetados e tiveram a cabeça separada da carcaça.

A obtenção dos filés foi realizada por pessoas treinadas, que removeram a pele e em seguida o filé dos dois lados do animal. O rendimento de filé (RendF) foi calculado pela relação entre o peso dos dois filés e peso corporal do peixe.

Com as informações das áreas estimadas pelo ultrassom e os comprimentos corporais, o volume cárneo (Vol) presente na área do filé foi calculado através da seguinte equação:

$$V = [(\sum a) / 3] * CP - CC$$

Onde:

- $\sum a$ é a somatória das três áreas mensuradas no software operacional do ultrassom.
- CP é o comprimento padrão, que compreende da abertura bocal a inserção da cauda.
- CC é o comprimento da cabeça, que compreende da abertura bocal a abertura opercular.

2.3. Análises estatísticas

Inicialmente, uma análise descritiva foi realizada com os dados coletados que posteriormente foram verificados quanto à sua distribuição a priori por meio da metodologia proposta por Mann Whitney (Wilcoxon, 1945).

As áreas ultrassonográficas mensuradas, área médias, rendimentos de filé, assim como o volume cárneo calculado foram submetidos a uma análise bicaráter envolvendo as características avaliadas duas a duas para estimar os componentes de (co)variância utilizando o modelo animal a seguir:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

Em que, y_1 e y_2 são os vetores de observações das características 1 e 2; β_1 e β_2 são os vetores dos efeitos fixos identificáveis para as características 1 e 2; a_1 e a_2 são os vetores dos

efeitos genéticos aditivos diretos para as características 1 e 2; e_1 e e_2 são os vetores dos erros aleatórios para as características 1 e 2; X_1 e X_2 são as matrizes de incidência dos efeitos fixos identificáveis para as características 1 e 2; Z_1 e Z_2 são as matrizes de efeitos genéticos aditivos diretos para as características 1 e 2.

Os seguintes efeitos fixos identificáveis foram considerados para a análise: tanque, sexo e como covariável, o peso ao abate. O efeito genético aditivo direto e o efeito residual foram considerados como aleatórios no modelo.

Os componentes de (co)variâncias foram estimados utilizando procedimentos bayesianos por meio das cadeias de Gibbs resultantes de 1.000.000 ciclos, com período de descarte de 2.000 ciclos. A convergência das cadeias de Gibbs foi testada por meio do método Heidelberger e Welch (1981), descrito por Cowles et al., (1995), utilizando-se a biblioteca CODA implementada no sistema R (versão 2.13.2 – 2011).

Com os componentes (co)variâncias, foram calculadas as herdabilidades para as características avaliadas, além das correlações genéticas entre elas.

Por fim as correlações fenotípicas entre as áreas cárneas nos pontos determinados, volume cárneo e rendimento de filé foram calculadas por meio do coeficiente de correlação linear de Pearson e seus intervalos de confiança foram estimados ao nível de 95% de confiança.

3. RESULTADOS

Os animais abatidos apresentaram grande variação de peso, com o menor animal pesando 89 g e o maior 573 g. O peso médio dos peixes analisados foi 249,9g ($\pm 76,55$), sendo contabilizados 469 animais machos e 428 fêmeas. A área cárnea mensurada no ponto 2 foi em média maior que os demais pontos e o menor área mensurada foi no ponto 1, porém o ponto 3 apresentou maior variação entre os animais, com desvio superior aos demais.

O rendimento de filé apresentou baixo desvio padrão mesmo diante da grande variação de peso ao abate, o que permite dizer que o processo de filetagem foi padronizado. O volume cárneo encontrado teve uma grande variação devido à falta de uniformidade de peso dos animais, que influenciam diretamente em fatores aplicados a equação de cálculo de volume: tamanho corporal e cabeça (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva do peso do animal (g), áreas coletadas por meio da técnica de ultrassonografia (cm²), média das áreas coletadas (cm²), rendimento de filé (%) e volume cárneo nas postas (cm³).

	PC	AP1	AP2	AP3	Am	RendF	Vol
Min	89,00	1,67	1,77	1,3	1,61	20,77	16,39
Média	249,9	4,07	4,24	4,16	4,15	29,4	57,68
Max	573,0	7,0	7,78	7,83	7,34	49,40	133,81
DP	76,55	0,92	0,99	1,1	0,95	2,83	19,04

Min: mínimo; Max: máximo; DP: desvio padrão; PC: peso corporal; AP1: ponto na quinta espinha; AP2: ponto na 11^a espinha; AP3: ponto posterior à nadadeira dorsal; Am: área média; RendF: rendimento de filé; Vol: volume de carne.

A variância genética aditiva e ambiental foram baixas quando comparadas a variância residual, evidenciando que os fenótipos são influenciados por efeitos não controlados durante o processo de produção e processamento dos animais. Contudo, a porção de variância genética aditiva apresentada pelas características permite que elas sejam transmitidas as progênes por meio de seleção (Tabela 2).

As medidas obtidas através da ultrassonografia apresentaram herdabilidade moderada, variando de 0,23 a 0,33, indicando um bom potencial de ganho genético quando utilizadas como objetivo de seleção (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas de variância e herdabilidade de fenótipos relacionados à carcaça obtidos por ultrassonografia.

	σ^2a	σ^2e	σ^2r	σ^2p	h^2
AP1	0,04 (0,02 – 0,70) ¹	0,02 (0,01 – 0,03)	0,09 (0,06 – 0,11)	0,15 (0,13 – 0,17)	0,27 (0,11 – 0,49)
AP2	0,04 (0,01 – 0,10)	0,02 (0,01 – 0,04)	0,11 (0,06 – 0,15)	0,18 (0,16 – 0,20)	0,25 (0,07 – 0,54)
AP3	0,10 (0,03 – 0,22)	0,02 (0,01 – 0,04)	0,18 (0,07 – 0,27)	0,31 (0,28 – 0,34)	0,33 (0,08 – 0,68)
Am	0,03 (0,01 – 0,05)	0,01 (0,001 – 0,02)	0,06 (0,04 – 0,08)	0,10 (0,09 – 0,11)	0,26 (0,10 – 0,49)
RendF	0,93 (0,02 – 4,52)	0,54 (0,28 – 0,93)	3,83 (0,28 – 5,10)	5,30 (4,79 – 5,89)	0,18 (0,01 – 0,85)
Vol	5,64 (0,03 – 23,23)	1,84 (0,80 – 3,41)	17,13 (0,32 – 24,65)	24,61 (22,31 – 27,26)	0,23 (0,01 – 0,92)

Legenda: AP1: ponto na quinta espinha; AP2: ponto na 11^a espinha; AP3: ponto posterior à nadadeira dorsal; Am: área média; RendF: rendimento de filé; Vol: volume de carne; σ^2a : variância genética aditiva; σ^2e : variância ambiental; σ^2r : variância residual; σ^2p : variância fenotípica e h^2 : herdabilidade.
¹Intervalos de credibilidade (limite inferior - limite superior) a 95%.

A área com maior variância genética aditiva e maior herdabilidade é a mensurada no ponto 3, que compreende a porção cárnea presente entre o fim da nadadeira dorsal e papila urogenital dos animais. Contudo, as áreas obtidas nos três pontos avaliados, assim como a média delas, podem ser utilizadas em programas de melhoramento genético de tilápias, dependendo exclusivamente da facilidade de coleta, visto que não é necessário mensurar todas e apenas uma delas é suficiente.

A área mensurada no ponto três é o mais fácil de coleta e mensuração, pois além de ser a menor altura do corpo do peixe tem muitas estruturas que geram refletância e facilitam a visualização da área muscular, aumentando a precisão da delimitação de área pelo operador. A área no ponto 3 elimina também o efeito das perdas de carne no filé de barriga durante o processamento da carcaça, diminuindo as variações causadas durante a filetagem.

Não existe a possibilidade de realizar seleção direta para rendimento de filé, visto a necessidade de abater o animal para coleta do peso dos filés e assim estimar o seu rendimento,

além de apresentar baixa herdabilidade (0,18). Dessa forma é evidenciado a necessidade de usar critérios indiretos para obter ganho correlacionado. As altas correlações genéticas entre rendimento de filé e áreas obtidas através da ultrassonografia (Tabela 3) tornam a seleção indireta mais eficiente que a direta.

O volume corporal apresentou herdabilidade moderada (0,23), porém, a mensuração e cálculo desse fenótipo é difícil e eleva as chances de erro durante o processo de coletas, visto que, eleva o número de procedimentos e manejos. O volume cárneo da área do filé do peixe além de difícil mensuração só tem associação genética com a área aferida na porção pós nadadeira dorsal e a medida das áreas coletadas (Tabela 3).

As correlações genéticas obtidas entre as áreas obtidas através de ultrassonografia nos três pontos determinados e a média delas foram altas, variando de 0,83 a 0,92, evidenciando que a seleção indireta para rendimento de filé por meio de imagens ultrassonográficas é eficiente. Contudo a correlação genética entre volume cárneo e rendimento de filé foi nulo, visto que o intervalo passa pelo zero, eliminando a possibilidade de utilização da característica para seleção de rendimento de filé (Tabela 3).

Tabela 3. Correlações fenotípicas acima da diagonal e correlações genéticas abaixo e intervalo de credibilidade entre parênteses.

	AP1	AP2	AP3	Am	RendF	Vol
AP1		0,11 (0,05 - 0,17)	0,66 (0,62 - 0,70)	0,35 (0,29 - 0,41)	0,25 (0,19 - 0,31)	0,51 (0,46 - 0,56)
AP2	0,56 (0,18 - 0,83)		0,13 (0,07 - 0,19)	0,96 (0,95 - 0,97)	0,01 (-0,05 - 0,08)	0,86 (0,85 - 0,87)
AP3	0,08 (-0,22 - 0,40)	0,51 (-0,07 - 0,87)		0,33 (0,27 - 0,39)	0,28 (0,22 - 0,34)	0,56 (0,51 - 0,61)
Am	0,63 (0,41 - 0,79)	0,62 (0,39 - 0,78)	0,58 (0,34 - 0,77)		0,09 (0,02 - 0,16)	0,98 (0,97 - 0,99)
RendF	0,87 (0,45 - 0,98)	0,89 (0,49 - 0,98)	0,92 (0,60 - 0,99)	0,83 (0,39 - 0,97)		0,15 (0,09 - 0,21)
Vol	0,53 (-0,17 - 0,85)	0,57 (-0,28 - 0,91)	0,68 (0,03 - 0,82)	0,81 (0,27 - 0,91)	0,21 (-0,77 - 0,92)	

Legenda: AP1: ponto na quinta espinha; AP2: ponto na 11^a espinha; AP3: ponto posterior à nadadeira dorsal; Am: área média; RendF: rendimento do filé; Vol: volume de carne.

A aplicabilidade de qualquer uma das áreas obtidas pelo ultrassom ou média delas é viável e pode resultar em uma boa resposta a seleção para rendimento de filé, visto que possuem herdabilidade maior que o rendimento de filé e, também, apresentam uma associação genética forte com rendimento de filé. Mesmo diante da pequena variação entre as correlações genéticas é possível observar que o ponto 1 pode sofrer maiores efeitos durante o processamento da carcaça e das imagens, visto que a porção de filé presente na barriga é fina e de difícil retirada e mensuração.

As correlações fenotípicas obtidas entre as áreas mensuradas nos três pontos, área média, volume cárneo e rendimento de filé foram moderadas a baixas e menores que as genéticas. Dentre as áreas obtidas através da ultrassonografia, a área mensurada no ponto três foi o que apresentou maior associação com o rendimento de filé observado. Essas correlações baixas e moderadas são em função do grande efeito ambiental sobre a característica rendimento de filé (Tabela 3).

3. DISCUSSÃO

A seleção direta para características de carcaça e rendimentos de cortes é inviável devido à necessidade de abater os animais para coletar tais fenótipos, o que aumenta a demanda pelo desenvolvimento de uma ferramenta eficiente para promover a seleção indireta (Kocour et al., 2007; Saillant et al., 2009; Haffray et al., 2012; Reis Neto et al., 2014; Cardoso et al., 2021; Ariede et al., 2023; Rezende et al. 2023). A ferramenta mais estudada até o momento para a seleção indireta de características de carcaça são as medidas corporais, com parâmetros genéticos estimados para diversos fenótipos de conformação corporal. Entretanto, assim como os resultados obtidos no presente estudo, as herdabilidades estimadas geralmente estão dentro de magnitudes moderadas a altas, conforme relatado por Rutten et al. (2005) ao avaliar a morfometria de tilápias com peso acima de 700g, os quais observaram herdabilidades moderadas para comprimento corporal (0,25), comprimento de cabeça (0,27) e largura corporal (0,25). Blonk et al. (2010), ao trabalhar com imagens digitais de linguados com peso médio de 164g, também observaram herdabilidades moderadas para comprimento corporal (0,27) e (0,34) para o plano sagital do corpo. Valores moderados de herdabilidade (0,34) também foram relatados por Van Sang et al. (2009) ao trabalhar com o comprimento padronizado de duas gerações de bagres listrados (*Pangasianodon hypophthalmus*).

As herdabilidades para características corporais de tilápias obtidos por ultrassonografia apresentaram estimativas de moderada a alta magnitudes para área aferida na quinta espinha (0,27), área sobre a 11^a espinha (0,25), posterior a nadadeira dorsal (0,33), área média (0,26) e para volume cárneo (0,23), permitindo atingir alto ganho genético anual ao selecionar para essas características. Valores moderados de herdabilidade também foram observados por Haffray et al., (2013) para altura da medula (0,27), profundidade da medula (0,34), largura da barriga (0,26) e altura medida na região da cavidade celomática (0,32) de trutas arco-íris coletados através de ultrassonografia. Vandeputte et al., (2019), também trabalhando com truta arco-íris observaram herdabilidade moderada (0,21) para a razão entre largura da barriga e altura da medula medidas através da ultrassonografia. Por sua vez, Garcia-Ballesteros et al. (2022), coletando fenótipos de carcaça com auxílio de ultrassonografia observou herdabilidade moderada (0,25), para indicador morfológico que utiliza informações da espessura cárnea e altura da cavidade celomática na parte abdominal de truta arco-íris. As herdabilidades estimadas para rendimento de filé as estimativas relatadas na literatura são bastante divergentes, variando entre 0,06 e 0,32 (Rutten et al. 2005; Nguyen et al. 2010; Gjerde et al. 2012; Thodesen et al. 2012; Garcia, 2016).

Ribeiro et al. (2019), ao investigarem a associação entre variáveis morfométricas e o rendimento de filé da pirapitinga (*Piaractus brachyomus*), observaram correlações genéticas baixas a moderadas com a altura (0,14) e o comprimento padrão (0,26). Por outro lado, Vu et al. (2019), ao utilizarem a morfometria por meio de imagens digitais em bagres, estimaram correlações genéticas moderadas entre o rendimento de filé e o fator de condição corporal calculado através de software (0,26). Em um estudo conduzido por León-Bernabeu et al. (2021) sobre métodos não invasivos para a coleta de fenótipos de carcaça da dourada, eles observaram correlações genéticas elevadas entre a porcentagem de área de filé, obtida por meio de imagens digitais, e o comprimento máximo do filé (0,90), a altura do pedúnculo caudal (0,59) e o comprimento padrão (0,87).

Kause et al. (2007), observaram ausência de correlação entre peso corporal e rendimento cárneo em truta arco-íris com peso médio de 1158g. Ponzoni et al. (2011) relatam correlações genéticas moderadas entre rendimento de filé e variáveis morfométricas de tilápia, variando entre 0,35 e 0,44. Altas correlações genéticas entre peso, score corporal e peso de filé também foram relatadas por Velasco et al. (1995) e Nguyen et al. (2007), sugerindo que apenas essas informações são suficientes na seleção para características de carcaça, porém, não estimaram as correlações genéticas para rendimento de filé.

A utilização de equações de predição que englobem diversas medidas corporais pode ser valiosa para que os programas de melhoramento alcancem seu objetivo de elevar o rendimento de filé (Vandeputte et al., 2019). No entanto, é crucial padronizar a coleta das medidas a fim de reduzir resíduos amostrais, uma vez que erros na coleta das medidas que compõem uma equação são multiplicativos, aumentando o risco de erros de predição. Zardin (2015), ao empregar equações de predição para o volume de filé na carcaça, identificou altas correlações fenotípicas e genéticas com a altura da cauda (0,92), largura da cauda (0,93), área do tronco (0,99) e comprimento do tronco (0,95) em relação ao volume de filé e às morfometrias corporais. Contudo, os autores não avaliaram as associações com o rendimento de filé. Reis Neto et al. (2014) relataram uma alta correlação fenotípica e genética entre o volume corporal, calculado como o produto da altura pelo comprimento pela largura, e a área corporal (altura x comprimento), com estimativas variando entre 0,80 e 0,98. No entanto, esses autores não estimaram a correlação genética entre essas dimensões corporais e o rendimento de filé. As correlações fenotípicas e genéticas estimadas no presente estudo também revelaram magnitudes elevadas entre o volume corporal e a área posterior à nadadeira dorsal (0,68) e a área ultrassonográfica média (0,81). No entanto, ao analisar a correlação genética entre o volume corporal e o rendimento de filé, observamos estimativas de correlação genética menos precisas, com um intervalo de credibilidade variando entre -0,77 e 0,92.

O uso de critérios indiretos de seleção que não apresentam correlações genéticas com a característica alvo pode não promover o melhoramento genético ou torná-lo extremamente lento e inviável para os núcleos de melhoramento (Thodesen et al., 2012). No entanto, quando existem altas correlações genéticas, é possível sugerir que os fenótipos avaliados são controlados pelo mesmo conjunto de genes, e a variabilidade genética independente entre tais características é pequena (Reis Neto et al., 2014). Avaliando o peso corporal como critério indireto de seleção para obter ganhos correlacionados no rendimento de filé, Thodesen et al. (2012), Nguyen et al. (2010) e Garcia (2016) sugeriram que outras informações devem ser incluídas para promover ganhos genéticos, uma vez que não há correlação entre peso e rendimento de filé. No presente estudo, o rendimento de filé das tilápias mostrou alta associação genética com as áreas medidas por ultrassom na quinta espinha (0,87), na 11^a espinha (0,89), posteriormente à nadadeira dorsal (0,92) e, também, com a área média (0,83). Isso indica a possibilidade de obter ganhos correlacionados por meio da seleção utilizando uma das variáveis ultrassonográficas medidas ou a média das áreas dos três pontos determinados no corpo do animal.

A seleção indireta visando ao ganho correlacionado demonstra maior eficiência em comparação à seleção direta quando as estimativas de herdabilidade e a correlação genética entre as características secundárias e a principal são elevadas (Pereira, 2012). Dadas as herdabilidades moderadas a altas e as correlações genéticas significativas entre as áreas obtidas por ultrassonografia e o rendimento de filé, conforme observado neste estudo, a seleção com base nas áreas ultrassonográficas poderá resultar no aumento do rendimento de filé das tilápias.

5. CONCLUSÃO

Com o rápido crescimento da produção de tilápias em todo o mundo, especialmente no Brasil, o aumento da produção de forma sustentável, considerando o meio ambiente e o bem-estar animal, requer a incorporação de tecnologias modernas no sistema produtivo. Entre essas tecnologias, a utilização de métodos não invasivos de seleção genética deve ser uma prioridade nos pacotes tecnológicos em desenvolvimento. Desta forma, o presente trabalho apresentou resultados promissores, com altas correlações genéticas estimadas, juntamente com herdabilidades de magnitude alta a moderada, para a incorporação da metodologia de coleta de imagens por ultrassonografia para seleção indireta do rendimento de filé em tilápias. O uso dessa técnica, associada aos avanços na área de aprendizado de máquina (*machine learning*) e inteligência artificial, pode acelerar o processo e otimizar os resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem todas as entidades fomentadoras desta pesquisa, entre elas: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

- Ariede, R. B., Lemos, C. G., Batista, F. M., Oliveira, R. R., Agudelo, J. F., Borges, C. H., Hashimoto, D. T. 2023. Computer vision system using deep learning to predict rib and loin yield in the fish *Colossoma macropomum*. *Animal Genetics*. <https://doi.org/10.1111/age.13302>.
- Blay, C., Haffray, P., Bugeon, J., D'ambrosio, J., Dechamp, N., Collewet, G., Enez, F., Petit, V., Cousin, X., Corraze, G., Phocas, F., Dupont-niveT, M. 2021. Genetic Parameters and Genome-Wide Association Studies of Quality Traits Characterised Using Imaging Technologies in Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Frontiers in Genetics*, 12, 639223. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.639223>.
- Blonk, R. J. W., Komen, J., Tenghe, A., Kamstra, A., Van Arendonk, J. A. M. 2010. Heritability of shape in common sole, *Solea solea*, estimated from image analysis data. *Aquaculture*, 307, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.06.025>.
- Bosworth, B. G, Holland, M, Brazil, B. L. 2001. Evaluation of ultrasound imagery and body shape to predict carcass and fillet yield in farm–raised catfish. *Journal of Animal Science*, v.79, p.1483-1490. <https://doi.org/10.2527/2001.7961483x>
- Cardoso, A. J. S., Oliveira, C. A. L., Campos, E. C., Ribeiro, R. P., Assis, G. J. F., Silva, F. F. 2021. Estimation of genetic parameters for body areas in Nile tilapia measured by digital image analysis. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 138, 731-738. <https://doi.org/10.1111/jbg.12551>.
- Conte, B. D. 2011. Predição do peso e do rendimento de filé de tilápia do Nilo a partir de medidas ultrassonográficas e morfométricas, e validação dos modelos de regressão. 70f. Dissertação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1639>.
- Cowles, M., Best, N., Vines, K. 1995. Convergence diagnostics and output analysis (Vol. 1). London, UK. Disponível em: <https://journal.r-project.org/articles/RN-2006-002/>.
- Crepaldi, D.V., Teixeira, E. A., Faria, P. M., Ribeiro, L. P., Melo, D. C., Oliveira, D. A. A., Turra, E. M., Queiroz, B. M., 2008. Rendimento de carcaça em surubim ("

- Pseudoplatystoma*" spp.) avaliado por ultra-som. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, v. 9, n. 4. Disponível em: [https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/revista-brasileira-de-saude-e-producao-animal/9-\(2008\)-4/rendimento-de-carcaca-em-surubim-pseudoplatystoma-spp-avaliado-por-ult/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/revista-brasileira-de-saude-e-producao-animal/9-(2008)-4/rendimento-de-carcaca-em-surubim-pseudoplatystoma-spp-avaliado-por-ult/).
- Fao. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of World Fisheries and Aquaculture. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf>.
- Garcia, A. L. S. 2016. Associação genética entre características de crescimento de carcaça de tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*). 38f. Dissertação, Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/1663/1/000224413.pdf>.
- García-Ballesteros, S., Fernández, J., Kause, A., Villanueva, B. 2022. Predicted genetic gain for carcass yield in rainbow trout from indirect and genomic selection. *Aquaculture*, 554, 738119. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738119>.
- Ghaedian, R., Decker, A. E., McClements, D. J. 1997. Use of ultrasound to determine cod fillet composition. *Journal of Food Science*, v.62, p. 500-504. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb04415.x>.
- Gjedrem, T., Robinson, N., Rye, M. 2012. The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: a review. *Aquaculture*, 350, pp.117-129. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.008>.
- Gjerde, B., Mengistu, S. B., Ødegård, J., Johansen, H., Altamirano, D. S. 2012. Quantitative genetics of body weight, fillet weight and fillet yield in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 342, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.02.015>.
- Haffray, P., Bugeon, J., Rivard, Q., Quittet, B., Puyo, S., Allamelou, J. M., Vandeputte, M., Dupont-Nivet, M. 2013. Genetic parameters of in-vivo prediction of carcass, head and fillet yields by internal ultrasound and 2D external imagery in large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 410:236-244. doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.06.016.

- Haffray, P., Bugeon, J., Pincent, C., Chapuis, H., Mazeiraud, E., Rossignol, M. N., Dupont-Nivet, M. 2012. Negative genetic correlations between production traits and head or bony tissues in large all-female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 368, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.023>.
- Heidelberger, P., Welch, P. D. 1981. A spectral method for confidence interval generation and run length control in simulations. *Communications of the ACM*, 4, 233-245. Disponivel em: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/358598.358630>.
- Kause, A., Paananen, T., Ritola, O., Koskinen, H. 2007. Direct and indirect selection of visceral lipid weight, fillet weight, and fillet percentage in a rainbow trout breeding program. *Journal of animal science*, 85, 3218-3227. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0332>.
- Kocour, M., Mauger, S., Rodina, M., Gela, D., Linhart, O., Vandeputte, M. 2007. Heritability estimates for processing and quality traits in common carp (*Cyprinus carpio* L.) using a molecular pedigree. *Aquaculture*, 270, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.03.001>.
- León-Bernabeu, S., Shin, H. S., Lorenzo-Felipe, Á., García-Pérez, C., Berbel, C., Elalfy, I. S., Afonso, J. M. 2021. Genetic parameter estimations of new traits of morphological quality on gilthead seabream (*Sparus aurata*) by using IMAFISH_ML software. *Aquaculture Reports*, 21, 100883. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100883>.
- Naylor, R.L., Hardy, R.W., Buschmann, A.H., Bush, S.R., Cao, L., Klinger, D.H., Little, D.C., Lubchenco, J., Shumway, S.E. Troell, M. 2021. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), p.551-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>.
- Neira, R., García, X., Lhorente, J.P., Filp, M., Yáñez, J.M., Cascante, A.M. 2016. Evaluation of the growth and carcass quality of diallel crosses of four strains of Nile tilapia (*Oerochromis niloticus*). *Aquaculture*, 451, p.213-222. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.033>.
- Nguyen, N. H., Ponzoni, R. W., Abu-Bakar, K. R., Hamzah, A., LingKhaw, H., Yip Yee, H. 2010. Correlated response in fillet weight and yield to selection for increased harvest

- weight in genetically improved farmed tilapia (GIFT strain), *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 3, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.04.007>.
- Nguyen, N. H., Khaw, H. L., Ponzoni, R. W., Hamzah, A., Kamaruzzaman, K. 2007. Can sexual dimorphism and body shape be altered in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by genetic means? *Aquaculture*, 272, S38-S46. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.08.013>.
- Oliveira, S. N., Ribeiro, R. P., Oliveira, C. A. L., Lopera-Barrero, N. M., Borquis, R. R. A., Zardin, A. M. S. O., Sousa, P. S., Podeda-Parra, A. R. 2019. Multivariate analysis using morphometric and ultrasound information for selection of tilapia (*Oreochromis niloticus*) breeders. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 48. <https://doi.org/10.1590/rbz4820170179>.
- Peixe Br. 2022. Associação Brasileira Da Piscicultura - Anuário Peixe BR da Piscicultura. 101p. Disponível em: <https://www.peixebr.com.br/anuario-2022/>.
- Perazza, C. A., Pinaffi, F. L. V., Silva, L. A., Hilsdorf, A. W. S. 2015. Evaluation of ultrasound imaging to predict loin eye area in tambaqui. *Boletim do Instituto de Pesca*, 41, 803-809. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3111/ca506265d02f4550875bc584a3164fb36ca2.pdf>.
- Pereira, J. C. C. 2012. *Melhoramento Genético Aplicado à Produção Animal*. 758p. Editora FepMvz.
- Ponzoni, R. W., Nguyen, N. H., Khaw, H. L., Hamzah, A., Bakar, K. R. A., Yee, H. Y. 2011. Genetic improvement of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with special reference to the work conducted by the WorldFish Center with the GIFT strain. *Reviews in Aquaculture*, 3, 27-41. <https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1753-5131.2010.01041.x>.
- Reis Neto, R. V., Oliveira, C. A. L. D., Ribeiro, R. P., Freitas, R. T. F. D., Allaman, I. B., Oliveira, S. N. D. 2014. Genetic parameters and trends of morphometric traits of GIFT tilapia under selection for weight gain. *Scientia Agricola*, 71, 259-265. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0294>.
- Rezende, C. E. D., Perazza, C. A., Freitas, R. T. F. D., Hallerman, E., Hilsdorf, A. W. S. 2023. Use of ultrasonographic imaging for non-invasive carcass yield prediction in Nile tilapia

- (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture International*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01109-4>.
- Ribeiro, F. M., Lima, M., Costa, P. A. T. D., Pereira, D. M., Carvalho, T. A., de Souza, T. V., Costa, A. C. 2019. Associations between morphometric variables and weight and yields carcass in Pirapitinga (*Piaractus brachypomus*). *Aquaculture Research*, 50, 2004-2011. <https://doi.org/10.1111/are.14099>.
- Rutten, M. J. M., Bovenhuis, H., Komen, H. 2005. Genetic parameters for fillet traits and body measurements in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture* 246, 25-132. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.01.006>.
- Saillant, E., Dupont-Nivet, M., Sabourault, M., Haffray, P., Laureau, S., Vidal, M. O., Chatain, B. 2009. Genetic variation for carcass quality traits in cultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquatic Living Resources*, 22, 105-112. <https://doi.org/10.1051/alr/2009010>.
- Thodesen, J., Rye, M., Wang, Y. X., Bentsen, H. B., Gjedrem, T. 2012. Genetic improvement of tilapias in China: Genetic parameters and selection responses in fillet traits of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) after six generations of multi-trait selection for growth and fillet yield. *Aquaculture*, 366, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.028>.
- Turra, E. M., de Oliveira, D. A. A., Valente, B. D., de Alencar Teixeira, E., de Assis Prado, S., de Melo, D. C., Silva, M. D. A. 2012. Estimation of genetic parameters for body weights of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* using random regression models. *Aquaculture*, 354, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.035>.
- Valenti, W. C., Barros, H. P., Moraes-Valenti, P., Bueno, G. W., Cavalli, R.O., 2021. *Aquaculture in Brazil: past, present and future*. *Aquaculture Reports*, 19, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>.
- Van Sang, N., Thomassen, M., Klemetsdal, G., GjØen, H. M. 2009. Prediction of fillet weight, fillet yield, and fillet fat for live river catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Aquaculture*, 288, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.11.030>.

- Vandeputte, M., Bugeon, J., Bestin, A., Desgranges, A., Allamellou, J. M., Tyran, A. S., Allal, F., Dupont-Nivet, M., Haffray, P. 2019. First evidence of realized selection response on fillet yield in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, using sib selection or based on correlated ultrasound measurements. *Frontiers in Genetics*, 10, 1225. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01225>.
- Velasco, R. R., Janagap, C. C., De Vera, M. P., Afan, L. B., Reyes, R. A., Eknatg, A. E. 1995. Genetic improvement of farmed tilápias: estimation of heritability of body and carcass traits of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 137, 280-281. Disponível em: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=683887>.
- Vu, N. T., Van Sang, N., Phuc, T. H., Vuong, N. T., Nguyen, N. H. 2019. Genetic evaluation of a 15-year selection program for high growth in striped catfish *Pangasianodon hypophthalmus*. *Aquaculture*, 509, 221-226. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.05.034>.
- Wilcoxon, F. 1945. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1, 80-83. <https://doi.org/10.2307/3002011>.
- Zardin, A. M. D. S. O. 2015. Impacto da seleção genética na morfometria e desempenho de tilápias do Nilo. 69f. Tese, Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/9841/ZardinA.M.S.O.d.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de ferramentas eficientes para a coleta de fenótipos é de suma importância para impulsionar os ganhos genéticos em características de relevância econômica, possibilitando que a cadeia produtiva alcance níveis elevados de lucratividade. O melhoramento genético é um dos fatores mais significativos na melhoria da produção de alimentos e tem sido amplamente aplicado em diversas espécies. Ao contrário das espécies terrestres, as espécies aquáticas não experimentaram o mesmo nível de desenvolvimento, principalmente devido à facilidade de obter peixes diretamente do meio natural, conhecida como pesca extrativista. No entanto, nos últimos anos, a produção de pescados em cativeiro tem ganhado maior destaque nas estatísticas de produção nacional, graças aos incentivos concedidos à pesquisa e extensão nesse campo.

As áreas de nutrição e reprodução foram as que experimentaram o maior avanço tecnológico. No entanto, o melhoramento aplicado às espécies ainda consideradas selvagens ressaltou a eficiência da seleção genética, evidenciada pela rápida resposta na produção. Inicialmente, os principais objetivos dos programas de melhoramento estavam relacionados ao ganho de peso diário e ao ganho de peso, o que resultou em significativos incrementos na produção.

O crescimento alométrico dos peixes é notavelmente rápido, resultando em um aumento significativo de tamanho em questão de meses. No entanto, a lucratividade da cadeia está diretamente ligada à produção de filé, que é o principal produto gerado pela cadeia produtiva de tilápias. A seleção direta para o rendimento de filé é inviável devido à necessidade de abater o animal para coletar os fenótipos. Diante desse desafio, diversas abordagens indiretas foram exploradas para prever o rendimento. A maioria das ferramentas utilizadas na coleta de fenótipos relacionados às características de carcaça é demorada, complicada e envolve um manejo significativo, tornando as medições custosas.

As iniciativas de emprego da ultrassonografia na coleta de fenótipos de carcaça em peixes representam um potencial significativo para a utilização em programas de melhoramento genético. A rapidez na coleta, a redução do manejo necessário e a elevada precisão da técnica de ultrassom na mensuração de fenótipos possibilitam que os melhoristas obtenham dados sobre o rendimento de carcaça, aumentando a lucratividade do processo produtivo ao selecionar animais com maior rendimento de carne. A agilidade na coleta de dados é resultado da redução da necessidade de manejo para retirar os animais da água, uma vez que estes podem permanecer imersos durante a aferição do fenótipo. Além disso, a água em que os animais são anestesiados

evita interferências na transdução das ondas ultrassônicas causadas pelo ar, resultando em imagens nítidas e de alta qualidade.

O método de conter o animal em mesas e bancadas está se tornando obsoleto diante da possibilidade de mensurar as áreas cárneas posteriormente à coleta, sem a necessidade de assistência de terceiros para registrar as informações. Na comodidade de um escritório, as medições podem ser realizadas sem sujeira ou pressa para devolver o animal à água.

O uso das funções do aparelho de ultrassom permite que o melhorista obtenha a melhor imagem para análise, e com a prática, muitos animais e variáveis a serem coletadas podem ser mensurados rapidamente. A única possível desvantagem dessa ferramenta pode ser o preço do equipamento, mas isso se justifica pela redução da necessidade de mão de obra e pelos ganhos que proporciona aos programas de melhoramento genético voltados para rendimentos de carcaça.

ANEXO A

Certificado do comitê de ética no uso de animais



CERTIFICADO

Certificamos que o projeto Desenvolvimento de metodologias para o uso da ultrassonografia na estimação de Parâmetros genéticos de características de carcaça de *Oreochromis niloticus*, protocolo nº 003/2021, sob a responsabilidade Alexandre Wagner Silva Hilsdorf (Orientador), Cícero Eduardo de Rezende (Colaborador) que envolve a utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica, encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11794, de 08 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de junho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle da Experimentação Animal (CONCEA), e foi APROVADO pela COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS CEUA da Universidade Mogi das Cruzes em reunião de 26/03/2021*.

Vigência do Projeto*	De 10/05/2021 à 10/10/2022
Espécie/ Linhagem	Tilápia do Nilo
Nº de animais	2030
Peso/Idade	500g/1 ano
Sexo	Macho e Fêmea
Origem/Fomento	Piscicultura da Barragem Ponte Nova - Biritiba Mirim

*Orientação técnica nº5 do CONCEA, de 27 de abril de 2015.

Mogi das Cruzes, 26 de 03 de 2021.

Prof. Dr. Wagner Alves de Souza Judice
Coordenador da Comissão de Ética no Uso de Animais – CEUA

ANEXO B

<https://doi.org/10.1007/s10499-023-01109-4>



Use of ultrasonographic imaging for non-invasive carcass yield prediction in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Cícero Eduardo de Rezende¹ · Caio Augusto Perazza² · Rilke Tadeu Fonseca de Freitas¹ · Eric Hallerman³ · Alexandre Wagner Silva Hilsdorf^{1,2}

Received: 15 March 2022 / Accepted: 23 March 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2023

Abstract

Ultrasonography has been used to collect data on internal structures in terrestrial species for many decades and has proven an important tool for measuring meat yield-related phenotypes. However, application of this technique to selective breeding of aquaculture species is recent, and its use for recording yield traits of economic importance has not yet been standardized for many species. The aim of the present study was to standardize ultrasound image collection methods for assessment of fillet yield phenotypes in Nile tilapia. Ultrasound images were obtained from 30 tilapia with mean weight of 645 g (\pm 165.89) using the VINNO Q device. Data on fillet cross-sectional area at three standard points along the length of the fish were analyzed with the aid of ImageJ software. The results were evaluated by Student's *t*-test and correlated by the Pearson method. The data obtained by ultrasonography proved reliable, given the high correlations (0.78–0.98) between estimates made using images collected at those standard points and subsequent evaluation from measurements made directly upon the carcass. The correlations for fillet yield (0.51–0.58) and belly fillet yield (0.27–0.42) were moderate. The area averages and depth averages collected at the three standard points showed high correlations with fillet yield (0.58–0.54) and sirloin fillet yield (0.56–0.60). We concluded that the use of ultrasonography in collection of meat-yield phenotypes of economic interest is an effective method for use in direct selection of broodstock candidates in selective breeding programs for Nile tilapia.

Keywords Fish · Phenotyping · Ultrasound · Fillet yield · Breeding program

Handling Editor: Gavin Burnell

✉ Alexandre Wagner Silva Hilsdorf wagner@umc.br

¹ Department of Animal Science, Federal University of Lavras, Lavras, MG 37200-900, Brazil

² Integrated Center of Biotechnology, University of Mogi das Cruzes, P.O. Box 411, Mogi das Cruzes, SP 08780-911, Brazil

³ Department of Fish and Wildlife Conservation, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Blacksburg, VA 24061, USA

Introduction

Fillet yield is a valued trait for cultured fishes, and its improvement is often included as a goal in selective breeding programs. Yet, fillet yield is a challenging breeding goal inasmuch as it is difficult to assess non-lethally. At a practical level, breeders approach improvement of carcass traits at the family level, sacrificing some family members to evaluate the trait, and breeding other members of high-yield families to produce seed stock and the following generation's broodstock candidates (Gjerde et al. 2012; Gjedrem 2017). Because the approach requires grow-out and evaluation of families, it is restricted to application in well-resourced selective breeding programs and is impractical for smaller programs of more limited means. However, the advent of portable ultrasound machines introduces the possibility of non-lethal evaluation of body composition of broodstock candidates, enabling direct selection and breeding of superior candidates. Ultrasonography has been applied to livestock breeding for several decades, including the use for accurately and efficiently measuring the body composition of animals for use in breeding programs (Wilson 1992; Alarcon-Rojo et al. 2019), for example, in breeding of pigs for low backfat thickness and improved carcass quality (Greer et al. 1987). The application of ultrasonography in aquaculture was initially used to assist in controlled propagation, for example, the early detection of sex and gonadal development (Kujawa et al. 2019). Ultrasound images to measure body composition in fishes are relatively recent, with studies defining parameters for image collection for channel catfish, *Ictalurus punctatus* (Bosworth et al. 2001); surubim catfish, *Pseudoplatystoma* spp. (Crepaldi et al. 2006, 2008); rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Haffray et al. 2013); tambaqui, *Colossoma macropomum* (Perazza et al. 2015); European sea bass, *Dicentrarchus labrax* (Vandeputte et al. 2017); and common carp, *Cyprinus carpio* (Prchal et al. 2020). Ultrasound image-based, direct selection of fish for carcass quality has been applied to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Haffray et al. 2013; Vandeputte et al. 2019; Blay et al. 2021).

In recent decades, the world production of tilapias (*Oreochromis* sp.) has grown significantly (FAO 2020), especially since the development of selectively bred farmed types with superior performance (Ibrahim et al. 2019; Bentsen et al. 2017; Ponzoni et al. 2011). In Brazil, for example, tilapia production represents 54% of total aquaculture production (Valenti et al. 2021). While there would be interest in improving fillet yield of Nile tilapia, direct measurements of body dimensions showed only a modest relationship with fillet yield (Rutten et al. 2004) and hence did not prove an effective approach. Valuation of application of ultrasound to selective breeding of tilapia is limited to a single study by Oliveira et al. (2019), who applied multivariate analysis to morphometric measures and ultrasound images in broodstock of the GIFT strain of Nile tilapia (*O. niloticus*), finding correlations with ultrasound measures and fillet yield ranging between 0.09 and 0.47 in males and 0.05 and 0.47 in females. Practical application of the ultrasound technique for evaluating carcass yield in tilapia requires assessment of different measurement protocols and standardization of the most effective ones for reliable and repeatable use. Against this background, we investigated the use of ultrasonography to collect data on economic traits of Nile tilapia to establish a baseline for future selective breeding programs aimed at improving carcass traits. Our goals were (i) to propose a standardized, non-invasive method of phenotype collection through ultrasound images for *O. niloticus*; (ii) to estimate the coefficient of regression equation to predict fillet yield based on body and ultrasound images; and (iii) to predict the genetic parameters of carcass traits and phenotypes obtained from ultrasound images collected at three different points on the body of tilapia (*Oreochromis niloticus*).

Materials and methods

Animals and data collection

The animals used were obtained from aquaculture operations at the Ponte Nova Dam in the municipality of Salesópolis, Sao Paulo State, Brazil. A random sample of 30 Chitralada domesticated-strain *O. niloticus* was taken, with a mean weight of 645.17 (\pm 165.89) g. These animals were fed once a day with a 28% crude protein feed. Images were collected with the aid of a portable VINNO-Q series 7L ultrasound device (VINNO Technology, Suzhou, China). The work went forward with the approval of the Ethics Committee for the Use of Animals at the University of Mogi das Cruzes, under permit number 003/2021.

Fish holding and body measurements

Individuals were placed in a 50-L plastic container with water (approx. 27 °C) containing 300 mg/L benzocaine (Sigma Aldrich, MO, USA); the animals remained as long as necessary to become sedated, facilitating handling. The animals were individually weighed on a balance with 1 g precision. The standard and total lengths and the height and width of the animals were recorded using a measuring board and a caliper. Ultrasound images were obtained using a linear transducer (probe) connected to the VINNOQ ultrasonography device, with adjustments in frequency (10 MHz) and depth (3.5 cm) parameters as needed to optimize resolution. The images were collected with the fish immersed in water, and the probe was placed on the left side of the fish at a distance of approximately 1 cm from the skin. There was no need for gel application because water reduces acoustic impedance and reflection to allow a clear image. Images and film footage were collected at three defined positions in the fillet-yield area of tilapia. The first were taken at the fifth dorsal spine (P1), the second at the eleventh dorsal spine (P2), and the last at the end of the soft dorsal fin (P3) (Fig. 1a). Also, the horizontal distance from the backbone to the skin (backbone depth, BD) was measured as a variable to be tested (Fig. 2a).

Using FLYINSONO Ultrasound Software version 1.7.10 (VINNO Technology), the cross-sectional area of the left-side fillet was measured at the three points to estimate the fillet area of the belly and loin areas (P1, P2, and P3).

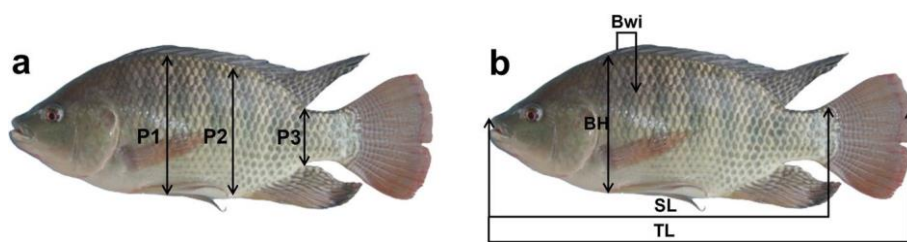


Fig. 1 Locations of ultrasonographic image collection (P1 at the 5th spine of the dorsal fin, P2 at the 11th spine of the dorsal fin, and P3 after the end of the dorsal fin) in Chitralada-strain Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

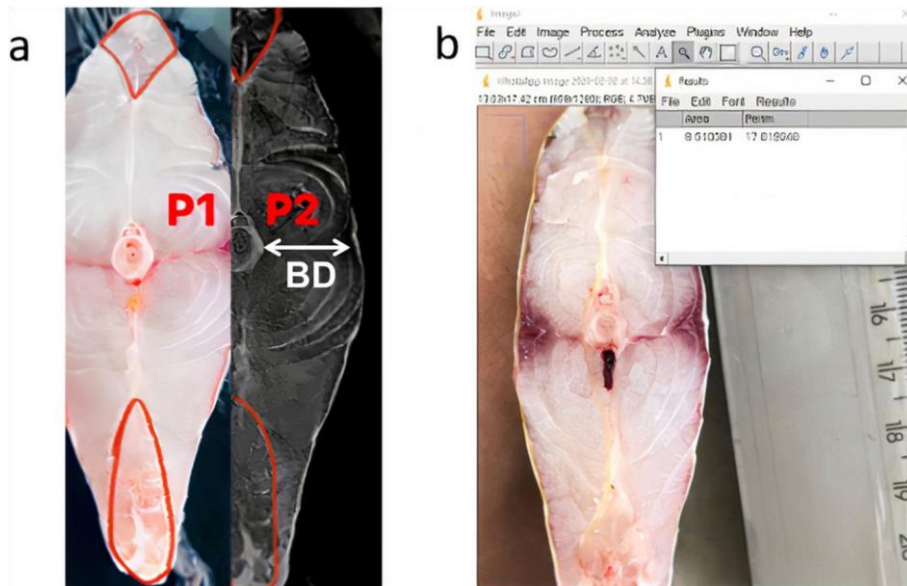


Fig. 2 a P1 and P2 cross-sectional cut locations with the delimited area to be in silico measures by the image analysis package. **b** Work area of the ImageJ software used to measure the section area of the tilapia cross-sectional cuts

Direct determination of cross-sectional fillet area

The animals were slaughtered after sedation. The fillets on the right side of the fish were obtained and sectioned into belly and loin fillets; the left side was transversally cut at the three pre-selected points using a scalpel to avoid deformation of the area to be measured. Each fish's section was recorded using a Sony Cyber-shot DSC-W690 digital camera featuring 16.1-Mp resolution over a blue background with a ruler for image analysis postprocessing. A delimited area (Fig. 2b) of the sections was imaged at the maximum zoom (10 × optical zoom) so that the software ImageJ (Schneider et al. 2012) would reduce any deviations of the measurement that might come from human error, thereby determining the area of the cross-sectional area of the fillet as precisely as possible.

Prediction of fillet yield from body and ultrasonography image measurements

To estimate the coefficient of the regression equation and select the most suitable model for predicting fillet yield, five morphometric traits (body weight, BWe; standard length, SL; total length, TL; body width, BWi; and body height, BH, Fig. 1b) at three defined positions of the fillet area (Ap1u, Ap2u, and Ap3u) were assessed. Models relating fillet weight to these metrics were developed, and the Akaike information criterion (*AIC*) and the coefficient of determination (R^2) were calculated to assess the fit of the model to the data. The correlations between the independent variables were assessed because retaining highly correlated variables in the analysis causes redundancy, which can bias estimates and interfere with the model's stability. The stepwise method was used for selecting which variables would remain in the best-fitting model. Assumptions verified once the model was selected included outlier presence, residual normality (Shapiro–Wilk test), and multicollinearity effects (variance inflation factor, *VIF*). These analyses were performed using the package regclass (Petrie 2020) in software R (R Core Team 2020),

Image standardization

The three image collection positions were set to capture the entire fillet thickness crosssection for further fillet-yield measures (Fig. 3a). The fillet yield area was divided into two sections and evaluated separately to obtain the meat area above the backbone, defined as the loin fillet, and the meat portion in the area of the ribs, called the belly fillet. To avoid overestimating the fillet meat area, the two fillet portions were divided from the backbone to the skin at the midline. The fillet above the lateral line of the fish includes the area between the line parallel to the backbone of the fish that extends to the center of the spinal cord, separating the animal into dorsal and ventral portions. The section delimiting the fillet's upper and lower portions was defined by a 90° angle between the line from the backbone to the dorsal spines and the line from the center of the spinal cord to the epidermis of the fish (Fig. 3b1). The belly fillet included the portion of meat below the line defined from the center of the spinal cord and epidermis to the last rib bone visible in the image (Fig. 3b2).

The point of image capture from the region of the last spine to the center of the anal fin has anatomical characteristics different from the other points since the coelomic cavity does not extend posteriorly to the delimited point (Fig. 2a). This section's upper and lower portions have higher-density tissues and were not considered fillet; therefore, they were not measured. Finally, the cross-sectional area captured by ultrasonography

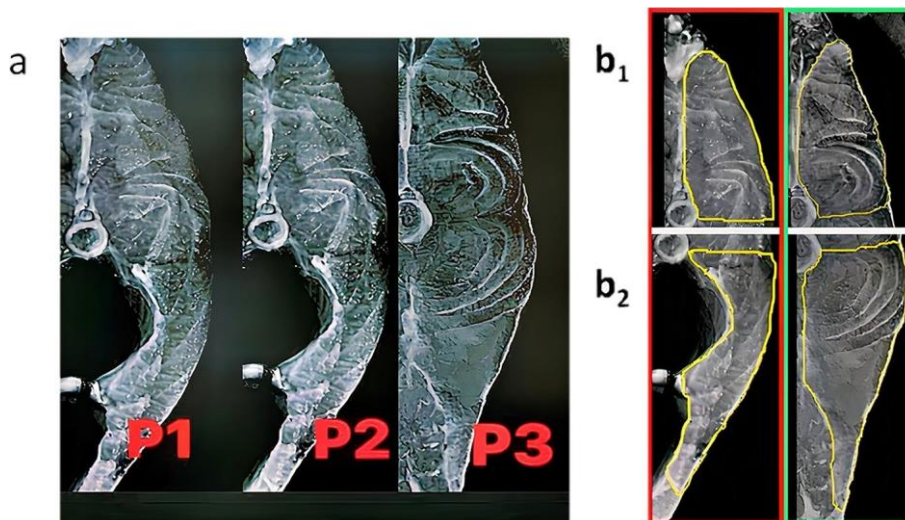


Fig. 3 a Ultrasonography images of the three defined points for capturing fillet area section of tilapia. b₁ fillet area images in the dorsal region above the midline of the tilapia and b₂ fillet area in the ventral region (belly)

was precisely measured by the image processing algorithm application of the VINNO-Q ultrasonography device.

Cross- sectional fillet area measurement

Figure 4 shows P1 and P2 area cut locations with the delimited area measured by the image analysis package. The area delimited in red encompasses the central crosssectional area of the fillet yield at the three standard points. These areas were then measured in silico by the J-images package and termed Ap1im, Ap2im, and Ap3im, respectively.



Fig. 4 Cross-sectional delimited area (red outline) measured by ImageJ software

Table 1. Descriptive statistics for body measurements.¹

	Weight (g)	SL (cm)	TL (cm)	WD (cm)	HG (cm)
<i>N</i>	29	29	29	29	29
Min	310.00	21.80	25.70	3.90	7.50
Max	970.00	35.10	38.90	38.90	11.0
Mean	645.17	27.51	33.44	34.30	9.55
SD	165.89	2.85	3.28	0.35	0.84

¹ *N* = number of observations, Min = minimum, Max = maximum, SD = standard deviation, SL = standard length, TL = total length, WD = width, and HG = height.

Table 2. Descriptive statistics for fillet cross-section area (cm²) and depth collected at the three points described using image processing and direct measurement.¹

	P1u(cm ²)	P2u(cm ²)	P3u(cm ²)	P1(cm ²)	P2(cm ²)	P3(cm ²)
N	29	29	29	29	29	29
Min	4,660	4,510	4,480	4,961	5,785	5,050
Max	11,480	10,720	10,760	8,619	10,667	9,279
Mean	7,460	7,707	7,267	7,273	7,989	6,744
SD	1,533	1,528	1,570	1,057	1,457	1,103

Note: N= number of observations; Min= minimum; Max= maximum; SD = standard deviation; P1u= ponto na direção da 5ª espinha coletada pelo ultrassom; P2u= ponto na direção da 11ª espinha coletada pelo ultrassom; P3u= ponto posterior a nadadeira dorsal coletada pelo ultrassom; P1= ponto na direção da 5ª espinha coletada no ImageJ; P2= ponto na direção da 11ª espinha coletada no ImageJ; P3u= ponto posterior a nadadeira dorsal coletada no ImageJ.

Statistical analyses

The data collected by ultrasound and the morphometric measurements were subjected to a Shapiro–Wilk normality test. The Student's *t*-test was performed with $P < 0.05$, and then, Pearson correlations between the image measures collected using ultrasonography and the images obtained from the carcass were calculated to assess disparity between the two methods of phenotype collection. The statistical procedures were carried out using the *agricolae* package (Mendiburu 2021) in the R-studio software.

Results

Statistical measurement data comparison

Descriptive statistics for body measurements are shown in Table 1. Table 2 presents the descriptive statistics for the respective sections, in which P1u, P2u, and P3u are cross-sectional areas in cm² measured using the ultrasound device, and points P1, P2, and P3 are the measurements obtained using the ImageJ software. Table 3 shows the descriptive statistics for fillet weights and yields.

Table 3. Descriptive statistics for fillet weights and yields.¹

	Wfillet (g)	Wfilloin (g)	Wfilbel (g)	Yfillet (%)	Yfilloin (%)	Yfilbel (%)
N	29	29	29	29	29	29
Min	92,00	60	32	29,68	18,64	10,32
Max	328,00	212,00	124,00	39,01	24,46	14,67
Mean	208,8	130,9	77,93	33,09	20,70	12,39
SD	61,98	39,93	23,29	2,43	1,49	1,48

¹ *N*= number of observations; Min= minimum; Max= maximum; SD = standard deviation; *Wfillet* = fillet weight; *Wfilloin* = loin fillet weight; *Wfilbel* = belly fillet weight; *Yfillet* = fillet yield; *Yfilloin* = loin fillet yield; *Yfilbel* = belly fillet yield.

Table 4. Analysis of the mean values collected using ultrasound and ImageJ for evaluation of the cross-sectional area (cm²) in tilapia.^{1,2}

	Ultrasound	ImageJ
Point 1	7.30 ^a	7.27 ^a
Point 2	7.95 ^a	7.98 ^a
Point 3	6.77 ^a	6.74 ^a
Width	2.08 ^a	2.29 ^b

¹ Point 1 = at the fifth spine; Point 2 = at the 11th spine; Point 3 = point posterior to the dorsal fin.

² Mean values followed by different letters in the same row are different ($P < 0.05$).

Table 5. Pearson correlations between fillet cross-section area measured by ultrasound and in ImageJ.^{1,2}

	Ap1im	Ap2im	Ap3im	WidthIm
Ap1u	0.98**	0.63	0.61	---
Ap2u	---	0.99**	0.50	---
Ap3u	---	---	0.98**	---
WidthU	---	---	---	0.78*

¹ *Ap1u* = cross-sectional-area in cm² measured by ultrasound at the first pre-selected point; *Ap2u* = meat area in cm² measured by ultrasound at the second pre-selected point; *Ap3u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the third pre-selected point; *Ap1im* = meat area in cm² measured in ImageJ software at the first pre-selected point; *Ap2im* = cross-sectional area in cm² measured in ImageJ at the second pre-selected point; *Ap3im* = meat area in cm² measured in ImageJ at the third pre-selected point; *WidthU* = width measured by ultrasound; and *WidthIm* = width measured in ImageJ.

² * P -value < 0.05; ** P -value < 0.01

Table 6. Pearson correlations between ultrasound fillet cross-section area, mean thickness, mean cross-section area, fillet yields and weight.^{1,2}

	Ap1u	Ap2u	Ap3u	PP1	PP2	PP3	Marea	Mthick
Weight	0.87***	0.84***	0.88***	0.83***	0.68**	0.80***	0.88***	0.86***
Wfillet	0.94***	0.90***	0.95***	0.88***	0.73**	0.83***	0.94***	0.91***
Wfilloin	0.89***	0.86***	0.92***	0.86***	0.70**	0.70**	0.90***	0.89***
Wfilbel	0.97***	0.92***	0.97***	0.88***	0.75**	0.75**	0.97***	0.91***
Yfillet	0.58*	0.56*	0.57*	0.52*	0.51*	0.51*	0.58*	0.56*
Yfilloin	0.53*	0.54*	0.54*	0.56*	0.53*	0.53*	0.54*	0.60*
Yfilbel	0.42	0.32	0.39	0.27	0.31	0.31	0.41	0.30

¹*Ap1u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the first point; *Ap2u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the second point; *Ap3u* = cross-sectional area in cm² measured by ultrasound at the third point; *PP1* = trunk vertebral column thickness at point 1; *PP2* = trunk vertebral column thickness at point 2; *PP3* = trunk vertebral column thickness at point 3; *Wfillet* = fillet weight; *Wfilloin* = loin fillet weight; *Wfilbel* = belly fillet weight; *Yfillet* = fillet yield; *Yfilloin* = loin fillet yield; *Yfilbel* = fillet belly yield; *Marea* = mean area collected at the three points and *Mthick* = mean thickness from the skin to the trunk vertebral column at the three points.

² **P*-value <0.05; ***P*-value <0.01; *** *P*-value <0.001

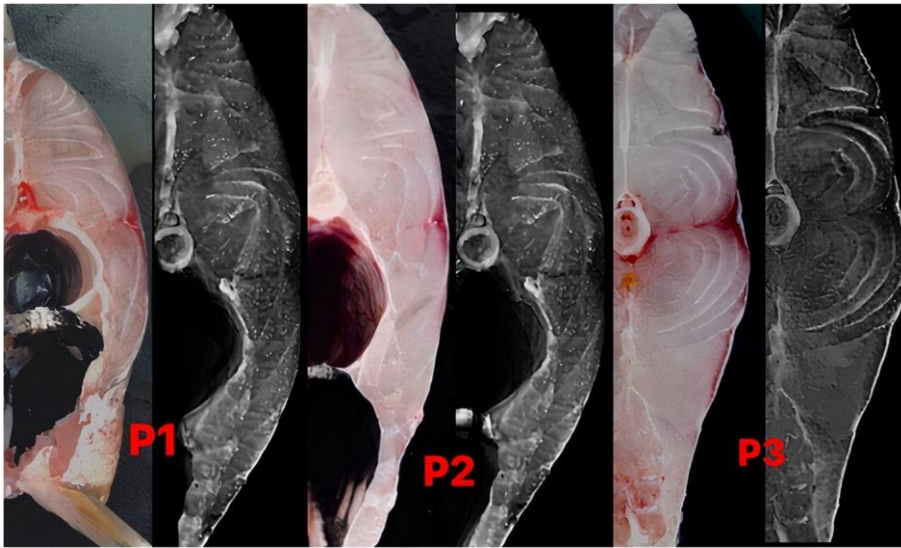


Fig. 5 Paired images of the real cross-section to the left and ultrasound images to the right, obtained at the pre-selected points those estimated from photos of the area in the sections range from moderate to high correlations, as shown in Tables 5 and 6.

Cross-sectional area comparisons for the three standard points are depicted in Fig. 5. The phenotypic correlations between the cross-sectional areas and the depths were high and highly significant ($p < 0.05$), showing that collection of data through ultrasound is accurate for assessing carcass characters of Nile tilapia. For the fillet and loin fillet yield characteristics, the correlation values were less, but they were still moderate to high, allowing their use in scoring those carcass phenotypes.

Equation for predicting fillet yield

The respective models with regression coefficients and parameters tested are shown in Table 7. The AIC and R^2 values suggested that model seven exhibited the best fit to the data. Its predictor variables were body height at point 1 and cross-sectional fillet area at point 3 captured by ultrasound, as presented by the equation:

$$\hat{Y}_i = 41,972 - 2.548.X_5 + 1.987.X_8$$

where \hat{Y}_i is the vector of observation of the dependent variable (fillet yield); X_5 is the independent variable, body height (BH); and X_8 is the independent variable, fillet area at point 3.

The analysis of the residuals is summarized in Fig. 6. In Fig. 6a and c, the residuals are shown to be randomly distributed with the same amplitude around zero, indicating independence and homoscedasticity. In Fig. 6b, the dotted line represents a theoretical normal distribution; the distribution of the residuals does not deviate significantly from the line. In Fig. 6d, Cook's distance values greater than 1 indicate a possible outlier, so there are no discrepant data in the analysis. To corroborate the results observed in the analysis of the residuals, the P value found in the Shapiro–Wilk test was 0.475, indicating that the residuals are normally distributed. To assess the correlation among the predictor variables and multicollinearity, we used a variance inflation factor (VIF) (O'Brien 2007) that quantifies the severity of multicollinearity in an ordinary least-squares regression analysis.

The *VIF* value of 3.58 indicates that the variables have low correlation and can be used concurrently in the model (O'Brien 2007).

Discussion

After growth rate, fillet yield has been the second-most important target trait for selective breeding of Nile tilapia, a fish valued for its high nutrient content, lack of intermuscular bones, and moderate heritability for many valued traits (Thodesen et al. 2011; Gjerde et al. 2012; Garcia et al. 2017). Therefore, any attempt to boost fillet yield under phenotypic selection, or perhaps also using DNA marker information or even genomic selection, depends upon the accuracy of fillet yield data, preferably measured upon live animals. The accuracy of the fillet yield data collected depends upon the growth phase and weight of the cultured individual under consideration. Ultrasonography-based estimations of fillet volume and area can overcome these obstacles at any developmental stage of the fish without slaughtering them. Non-invasive methods for evaluating carcass composition as well as determining the sex or degree of maturity of the gonads have been developed for several fish species to support selective breeding programs. Bosworth et al. (2001) evaluated the use of ultrasound in evaluating carcass traits of channel catfish and found high associations (0.84–0.94) between the measurement estimated from images collected and measurements assessed upon frozen sections. Crepaldi et al. (2008) applied ultrasonography to sorobim catfish (*Pseudoplatystoma* spp.) and observed high correlations between morphometry and carcass yield in different weight

Table 7 Coefficients of regression, Akaike information criterion (AIC), and determination coefficient (R^2) for equations for estimating fillet cross-section area (cm²) in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)^{1,2}

Model	Coefficients								Parameters		
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	AIC	R^2
1	47.428 (32.412) NS	-0.004 (0.023) NS	-0.094 (0.940) NS	0.753 (0.789) NS	-4.306 (6.618) NS	-3.490 (2.853) NS	-1.513 (2.762) NS	1.276 (1.859) NS	2.719 (1.715) NS	65.008	0.512
2	47.839 (29.790) NS	-0.004 (0.021) NS	--	0.688 (0.414) NS	-4.625 (5.372) NS	-3.435 (2.595) NS	-1.632 (2.311) NS	1.382 (1.416) NS	2.791 (1.441) NS	63.033	0.581
3	53.523 (7.585)***	--	--	0.693 (0.388) NS	-5.512 (2.793) NS	-3.862 (1.355)*	-1.959 (1.518) NS	1.556 (1.044) NS	2.905 (1.240)*	61.117	0.631
4	50.471 (7.468)***	--	--	0.514 (0.376) NS	-4.515 (2.782) NS	-3.180 (1.292)*	--	0.578 (0.744) NS	1.555 (0.690) NS	61.953	0.604
5	50.2006 (7.310)***	--	--	0.4901 (0.367)	-4.053 (2.663)	-3.1755 (1.266)*	--	--	1.9761 (0.418)***	60.925	0.619
6	46.265 (6.925)***	--	--	--	-2.028 (2.266)	-2.043 (0.974)	--	--	1.998 (0.433)***	61.390	0.592
7	41.972 (4.953)***	--	--	--	--	-2.548 (0.786)**	--	--	1.978 (0.429)***	60.444	0.599

¹Model 1: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 2: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 3: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 4: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 5: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 6: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

Model 7: $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \epsilon_i$

where $X1$ =body weight (kg), $X2$ =standard length (cm), $X3$ =total length (cm), $X4$ =body width (cm), $X5$ =body height (cm), $X6$ =fillet area at point 1 captured by ultrasound, $X7$ =fillet area at point 2 captured by ultrasound, and $X8$ =fillet area at point 3 captured by ultrasound

² P values < ***0.001, **0.01, *0.05; NS, non-significant

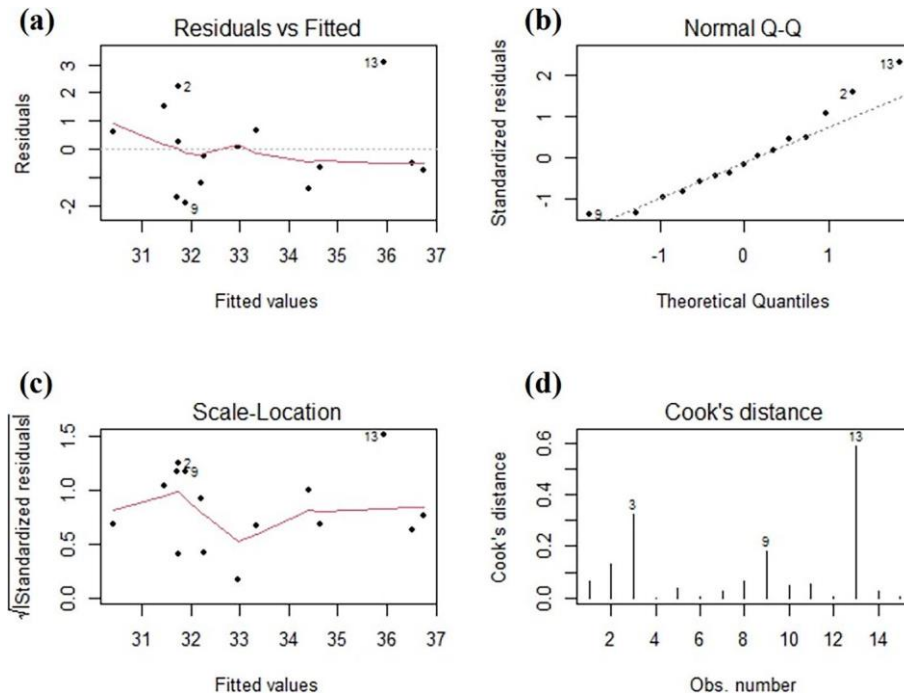


Fig. 6 Residual analysis of proposed model

classes and observed that the correlations remained high regardless of the weight class. Vandeputte et al. (2017) assessed different predictors from fish surface measurement on digital pictures and ultrasound images of European sea bass *Dicentrarchus labrax*. The authors found low accuracy for prediction of fillet yield ($R^2 = 0.02$ – 0.18), but higher accuracy for predicting carcass yield ($R^2 = 0.27$ – 0.41). This result may be the consequence of the methodology used to obtain the ultrasound measurements, which measured fillet thickness rather than area of the fillet cross-section. The same approach, measuring fillet thickness, was used for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Vandeputte et al. 2019) and common carp *Cyprinus carpio* (Prchal et al. 2020). Afonso et al. (2022) performed a similar approach to that used in the present study to predict the fillet volume of the Senegalese sole (*Solea senegalensis*) using ultrasound images. They found that real-time ultrasonography explained about 97% of the variation observed in fillet volume, making it a valuable predictor of Senegalese sole's fillet volume.

For Nile tilapia, Nguyen et al. (2010), working with morphometry at slaughter weight, found phenotypic correlations near those found in the present study; however, the animals sampled for evaluation of this study by ultrasonography were approximately 127 g heavier than the mean value in that study. Conte (2011) worked with the prediction of weight and fillet yield in fish with a mean weight of 260 g and found results for cross-sectional fillet area similar to those of the present study. However, the author considered only the epaxial portion of the section, and by multiplication of the height of the backbone by the animal's width may have overestimated the values for area. The belly fillet of Nile tilapia becomes thinner ventrally, causing lack of uniformity among fillets and production lost at the processing stage. Oliveira et al. (2019) assessed variation of genetically improved GIFT-strain Nile tilapia separated by sex and observed high correlations between measurements based on ultrasound images and those made on morphometric measurements. However, the values did not surpass 0.90 in females and 0.75 in males. The present study's values were relatively high, and there was no separation between the sexes. Oliveira et al. (2019) found correlations comparable to those found in the present study (0.422) between meat area measured by ultrasound and fillet yield. The values were similar regardless of the individual weight of the animals used by the authors, with a

mean weight of 761.0 g for females and 1551.0 g for males. Using morphometry (Reis-Neto et al. 2014) and digital images (Cardoso et al. 2021) of GIFT-strain Nile tilapia bodies showed high phenotypic correlations. Phenotypic correlations are highly affected by the developmental phase of the fish, which shows a negative association between weight and phenotypic correlation of the characters (Wagner et al. 2004; He et al. 2018).

The shape of the fish differs from one individual to the next because growth is heterogeneous, showing variable allometric growth as a function of the weight of the animal, thereby suggesting the need for different evaluations between weight and sex groups (He et al. 2018). Ultrasonography, for its part, allowed carcass information to be collected at different phases of individual development. Perazza et al. (2015), predicting loin eye area in tambaqui (*Colossoma macropomum*) using ultrasonography, observed moderate correlations (0.23–0.61) between estimates based on images collected by ultrasound and measurements made of postmortem tambaqui loin eye area drawn on tracing paper and measured in silico, correlations lower than those found in the present study. These differences may be associated with human error or the development of the technique since ultrasonography represents highly accurate estimation of area. Therefore, better standardization may result in more useful results.

Selection accuracy refers to the degree to which the desired result of practicing selection based upon the expected breeding value (EBV) is realized, which, in turn, is an estimate of the true breeding value (TBV). The closer that EBV and TBV are to one another, the higher the accuracy. In this context, reliability measures the degree of confidence from the genetic evaluation step by precisely evaluating the trait under selection. Obtaining trait records by directly collecting carcass measurements upon live broodstock candidates might overcome the limitations of indirect selection upon the basis of carcass traits evaluated upon slaughtered family members of broodstock candidates. This seems to be a viable option for predictions of genetic parameters of fillet yield in Nile tilapia.

Conclusion

High correlations between cross-sectional fillet area estimations made using ultrasound imaging and direct fillet area measurement at three body points showed that ultrasonography presents an accurate assessment of carcass traits in Nile tilapia. Using body height at point 1 and the cross-section fillet area at point 3 as described in this study, one can accurately estimate fillet yield of live animals. Therefore, ultrasonography provides an attractive methodology for predicting fillet yield in live broodstock candidates for maximizing the genetic gain for composition traits through selective breeding.

Author contribution Alexandre W.S. Hilsdorf conceptualization, writing original draft, supervision, and funding acquisition. Material preparation, data collection and analysis were performed by Eduardo de Rezende and Caio Augusto Perazza. Rilke Tadeu Fonseca de Freitas and Eric Hallerman manuscript writing, analysis, and editing, and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding This work was supported by Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), The São Paulo Research Foundation (FAPESP) (Grant numbers 88887.334910/2019–0 and 2019/07.023–2) and US Department of Agriculture under the National Institute for Food and Agriculture. We also thank the company Quality Image Brasil for loaning the ultrasound device used in this project. AWSH and RTFF are recipients of National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) productivity scholarships (309570/2021–2, 313804/2018–4, respectively).

Data availability Data are available on request from the authors.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

- Afonso J, Guedes C, Teixeira A, Rema P, Silva S (2022) In vivo ultrasound prediction of the fillet volume in Senegalese sole (*Solea senegalensis*). *Animals* 12:2357. <https://doi.org/10.3390/ani12182357>
- Alarcon-Rojo AD, Carrillo-Lopez LM, Reyes-Villagrana R, Huerta-Jiménez M, Garcia-Galicia IA (2019) Ultrasound and meat quality: a review. *Ultrason Sonochem* 55:369–382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.016>
- Bentsen HB, Gjerde B, Eknath AE, de Vera MSP, Velasco RR, Danting JC, Dionisio EE, Longalong FM, Reyes RA, Abella TA, Tayamen MM (2017) Genetic improvement of farmed tilapias: response to five generations of selection for increased body weight at harvest in *Oreochromis niloticus* and the further impact of the project. *Aquaculture* 468:206–217. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.10.018>
- Blay C, Haffray P, Bugeon J, D'Ambrosio J, Dechamp N, Collewet G, Enez F, Petit V, Cousin X, Corraze G, Phocas F (2021) Genetic parameters and genome-wide association studies of quality traits characterised using imaging technologies in rainbow trout. *Oncorhynchus mykiss* *Front Genet* 12:219. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.639223>
- Bosworth BG, Holland M, Brazil BL (2001) Evaluation of ultrasound imagery and body shape to predict carcass and fillet yield in farm-raised catfish. *Sci J Anim Sci* 79:1483–1490. <https://doi.org/10.2527/2001.7961483x>
- Cardoso AJ, Oliveira CAL, Campos EC, Ribeiro RP, Assis GJ, Silva FF (2021) Estimation of genetic parameters for body areas in Nile tilapia measured by digital image analysis. *J Anim Breed Genet* 138:731–738. <https://doi.org/10.1111/jbg.12551>
- Conte BD (2011) Prediction of Nile tilapia fillet weight and yield using ultrasound and body measurements and validation of regression models (in Portuguese). Thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brazil. (retrieved from: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/1639>)
- Crepaldi DV, Teixeira EA, Faria PMC, Ribeiro LP, Saturnino HM, Melo DC, Sousa AB, Carvalho DC (2006) A ultra-sonografia na piscicultura. *Rev Bras Reprod Anim* 30(2/4):174–181
- Crepaldi DV, de Alencar Teixeira E, Faria PM, Ribeiro LP, Melo DC, de Andrade Oliveira DA, Queiroz BM (2008) Rendimento de carcaça em surubim ("*Pseudoplatystoma*" spp.) avaliado por ultra-som. *Rev Bras Saúde Prod An* 9(4):813–824
- FAO (2020) The state of world fisheries and aquaculture 2020: sustainability in action. FAO Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Garcia ALS, Oliveira CAL, Karim HM, Sary C, Todesco H, Ribeiro RP (2017) Genetic parameters for growth performance, fillet traits, and fat percentage of male Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J Appl Genet* 58:527–533. <https://doi.org/10.1007/s13353-017-0413-6>
- Gjedrem T (2017) Possibility for improving carcass composition and meat quality traits by selective breeding. *Int J Curr Res* 9:11–18. <https://doi.org/10.7324/IJCRR.2017.9103>
- Gjerde B, Mengistu SB, Ødegård J, Johansen H, Altamirano DS (2012) Quantitative genetics of body weight, fillet weight and fillet yield in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 342:117–124. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.02.015>
- Greer EB, Lowe TW, Giles LR (1987) Comparison of ultrasonic measurement of backfat depth on live pigs and carcasses with a digital recording instrument. *Meat Sci* 19:111–120. [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(87\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0309-1740(87)90016-7)
- Haffray P, Bugeon J, Rivard Q, Quittet B, Puyo S, Allamelou JM, Vandeputte M, Dupont-Nivet M (2013) Genetic parameters of in-vivo prediction of carcass, head and fillet yields by internal ultrasound and 2D external imagery in large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 410:236–244. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.016>
- He J, Zhao Y, Zhao J, Gao J, Xu P, Yang R (2018) Random regression analysis for body weights and main morphological traits in genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J Appl Genet* 59:99–107. <https://doi.org/10.1007/s13353-018-0428-7>
- Ibrahim NA, Mohamed Nasr-Allah A, Charo-Karisa H (2019) Assessment of the impact of dissemination of genetically improved Abbassa Nile tilapia strain (GIANT-G9) versus commercial strains in some Egyptian governorates. *Aquac Res* 50:2951–2959. <https://doi.org/10.1111/are.14249>
- Kujawa R, Nowosad J, Biegaj M, Cejko BI, Kucharczyk D (2019) Use of ultrasonography to determine sex in sexually immature European river lamprey *Lampetra fluviatilis* (L.). *Anim Reprod Sci* 204:95–100
- Mendiburu F (2021) *Agricolae*: statistical procedures for agricultural research. R package version 1.3–5. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Nguyen NH, Ponzoni RW, Abu-Bakar KR, Hamzah A, LingKhaw H, Yip Yee H (2010) Correlated response in fillet weight and yield to selection for increased harvest weight in genetically improved farmed tilapia (GIFT strain), *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 3:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.04.007>
- O'Brien RM (2007) A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Qual Quant* 41:673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Oliveira SN, Ribeiro RP, Oliveira CAL, Lopera-Barrero NM, Borquis RRA, Zardin AMSO, Souza FP, Poveda-Parra AR (2019) Multivariate analysis using morphometric and ultrasound information for selection of tilapia (*Oreochromis niloticus*) breeders. *R Bras Zootec* 48:701–779. <https://doi.org/10.1590/rbz4820170179>
- Perazza CA, Pinaffi FLV, Silva LA, Hilsdorf AWS (2015) Evaluation of ultrasound imaging to predict loin eye area in tambaqui. *Bol Inst Pesca* 41:803–809
- Petrie A (2020) *Regclass*: Tools for an introductory class in regression and modeling. R package version 1.6. <https://CRAN.R-project.org/package=regclass>
- Ponzoni RW, Nguyen NH, Khaw HL, Hamzah A, Bakar KRA, Yee HY (2011) Genetic improvement of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with special reference to the work conducted by the WorldFish Center with the GIFT strain. *Rev Aquac* 3:27–41. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2010.01041.x>
- Prchal M, Kocour M, Vandeputte M, Kause A, Vergnet A, Zhao J, Gela D, Kašpar V, Genestout L, Bestin A, Haffray P (2020) Morphological predictors of slaughter yields using 3D digitizer and their use in a common carp breeding program. *Aquac* 520:734993. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734993>
- R Core Team (2020) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Reis-Neto RV, Oliveira CALD, Ribeiro RP, Freitas RTF, Allaman IB, Oliveira SND (2014) Genetic parameters and trends of morphometric traits of GIFT tilapia under selection for weight gain. *Sci Agric* 71:259–265. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0294>
- Rutten MJ, Bovenhuis H, Komen H (2004) Modeling fillet traits based on body measurements in three Nile tilapia strains (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquaculture* 231:113–122. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.002>
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* 9:671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Thodesen J, Rye M, Wang YX, Yang KS, Bentsen HB, Gjedrem T (2011) Genetic improvement of tilapias in China: genetic parameters and selection responses in growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) after six generations of multi-trait selection for growth and fillet yield. *Aquaculture* 322:51–64. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.10.010>
- Valenti WC, Barros HP, Moraes-Valenti P, Bueno GW, Cavalli RO (2021) Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquac Rep* 19:100611. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>
- Van Tassell CP, Van Vleck LD (1996) Multiple-trait Gibbs sampler for animal models: flexible programs for Bayesian and likelihood-based (co)variance component inference. *J Anim Sci* 74(11):2586–2597. <https://doi.org/10.2527/1996.74112586x>
- Vandeputte M, Puledda A, Tyran AS, Bestin A, Coulombet C, Bajek A, Baldit G, Vergnet A, Allal F, Bugeon J, Haffray P (2017) Investigation of morphological predictors of fillet and carcass yield in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) for application in selective breeding. *Aquaculture* 470:40–49. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.12.014>
- Vandeputte M, Bugeon J, Bestin A, Desgranges A, Allamellou JM, Tyran AS, Allal F, Dupont-Nivet M, Haffray P (2019) First evidence of realized selection response on fillet yield in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, using sib selection or based on correlated ultrasound measurements. *Front Genet* 10:1225. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01225>
- Wagner PM, Ribeiro RP, Moreira HLM, Vargas L, Povh JA (2004) Evaluation of Nile tilapia strains (*Oreochromis niloticus*) in different phases of rearing (in Portuguese). *Acta Sci-Anim Scis* 26:187–196. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v26i2.1864>
- Wilson DE (1992) Application of ultrasound for genetic improvement. *J Anim Sci* 70:973–983. <https://doi.org/10.2527/1992.703973x>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.