

Panorama das pesquisas sobre a determinação sexual em peixes, com ênfase sobre o pirarucu: Uma análise cienciométrica

Overview of research on sex determination in fish, with emphasis on the pirarucu: A scientometric analysis

Panorama de las investigaciones sobre determinación sexual en peces, con énfasis en *arapaima*: Un análisis cienciométrico

Recebido: 01/02/2024 | Revisado: 17/02/2024 | Aceitado: 18/02/2024 | Publicado: 21/02/2024

Alêssa Ferreira Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6137-7694>
Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
E-mail: alessasouza77@gmail.com

Hélen Clarice Chaves Costa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6299-0861>
Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
E-mail: helencosta663@gmail.com

Jonatas da Silva Castro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5916-4566>
Universidade Nilton Lins, Brasil
E-mail: jonscastro@gmail.com

Francisco José Lopes Cajado

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8824-9251>
Faculdade Metropolitana de Horizonte, Brasil
E-mail: lopesbio@yahoo.com.br

Carlos Riedel Porto Carreiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0898-4521>
Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
E-mail: carloscarreiro@professor.uema.br

Erivânia Gomes Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-2537>
Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
E-mail: vaniagteixeira@gmail.com

Julia Marcon Costa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7177-0168>
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
E-mail: juliamarconc@gmail.com

Resumo

Os peixes são conhecidos por sua diversidade e plasticidade nos mecanismos de determinação do sexo, o que os destaca entre os vertebrados. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão cienciométrica das pesquisas sobre determinação sexual em peixes, com foco especial no pirarucu (*Arapaima gigas*) uma espécie de grande importância aquícola, cujos mecanismos de determinação e diferenciação sexual ainda são desconhecidos. Para alcançar esse objetivo, foi conduzido um levantamento cienciométrico na base de dados *Web of Science*, utilizando palavras-chave e operadores booleanos, como "*sex determination AND fish*", "*sex-specific marker AND fish*", "*sex identification AND fish*" e "*sex identification AND Arapaima gigas*", para o período de 2000 a 2020. Como resultado, foram analisados 80 artigos provenientes de 22 países. A China foi responsável pelo maior volume de publicações, totalizando 31 artigos. No estudo, foram identificadas 35 famílias e 75 espécies de peixes, com destaque para aquelas de importância comercial. Notou-se um aumento significativo nos estudos no período de 2017 a 2020, especialmente devido ao uso crescente de tecnologias de sequenciamento de nova geração (NGS). Em relação ao pirarucu, foram encontradas 10 publicações, porém até o momento, não existe um método completamente eficiente e acessível para a identificação sexual dessa espécie. Esses achados fornecem insights importantes sobre o estado atual das pesquisas sobre determinação sexual em peixes, destacando áreas de avanço e necessidade de futuras investigações para aprimorar o conhecimento nessa área específica.

Palavras-chave: *Arapaima gigas*; Cienciométrica; Identificação sexual; Produção científica.

Abstract

Fish are known for their diversity and plasticity in sex determination mechanisms, which sets them apart among vertebrates. This study aims to conduct a scientometric review of research on sex determination in fish, with a special focus on the pirarucu (*Arapaima gigas*) a species of great aquaculture importance, whose sex determination and differentiation mechanisms are still unknown. To achieve this objective, a bibliographic survey was conducted on the Web of Science database, using keywords and Boolean operators such as "sex determination AND fish", "sex-specific marker AND fish", "sex identification AND fish", and "sex identification AND *Arapaima gigas*", for the period from 2000 to 2020. As a result, 80 articles from 22 countries were analyzed. China accounted for the largest volume of publications, totaling 31 articles. The study identified 35 families and 75 fish species, with emphasis on commercially important ones. A significant increase in studies was observed from 2017 to 2020, primarily due to the growing use of next-generation sequencing (NGS) technologies. Regarding the pirarucu, 10 publications were found, but to date, there is no completely efficient and accessible method for the sexual identification of this species. These findings provide valuable insights into the current state of research on sex determination in fish, highlighting areas of progress and the need for future investigations to enhance knowledge in this specific area.

Keywords: *Arapaima gigas*; Scientometrics; Sexual identification; Scientific production.

Resumen

Los peces son conocidos por su diversidad y plasticidad en los mecanismos de determinación del sexo, lo que los distingue entre los vertebrados. Esta investigación tiene como objetivo realizar una revisión cientométrica de las investigaciones sobre la determinación sexual en peces, con especial foco en el arapaima (*Arapaima gigas*) especie de gran importancia acuícola, cuyos mecanismos de determinación y diferenciación sexual aún se desconocen. Para lograr este objetivo, se realizó un levantamiento bibliográfico en la base de datos Web of Science, utilizando palabras clave y operadores booleanos, como "determinación del sexo Y pez", "marcador específico del sexo Y pez", "identificación del sexo Y pez" y "sexo específico Y pez". identificación Y *Arapaima gigas*", para el período 2000 a 2020. Como resultado, se analizaron 80 artículos de 22 países. China fue la responsable del mayor volumen de publicaciones, con un total de 31 artículos. En el estudio se identificaron 35 familias y 75 especies de peces, con énfasis en los de importancia comercial. Se observó un aumento significativo de los estudios en el período de 2017 a 2020, especialmente debido al uso cada vez mayor de tecnologías de secuenciación de próxima generación (NGS). En relación al arapaima se encontraron 10 publicaciones, pero hasta el presente momento no existe un método completamente eficiente y accesible para la identificación sexual de esta especie. Estos hallazgos proporcionan información importante sobre el estado actual de la investigación sobre la determinación del sexo en los peces, destacando áreas de avance y la necesidad de futuras investigaciones para mejorar el conocimiento en esta área específica.

Palabras clave: *Arapaima gigas*; Cienciometría; Identificación sexual; Producción científica.

1. Introdução

Os peixes possuem a maior diversidade e plasticidade de mecanismos de determinação do sexo dentro dos vertebrados (Sandra & Norma, 2010). Os estudos sobre determinação e diferenciação sexual em peixes representam uma área de estudo extremamente vasta, e são importantes por fornecerem uma rica fonte de dados para a compreensão dos caminhos evolutivos e a plasticidade do processo de determinação sexual em vertebrados. Especialmente, porque os peixes ocupam uma posição basal na filogenia destes animais (Devlin & Nagahama, 2002).

Os estudos das características biológicas reprodutivas relacionadas aos peixes podem ter muitas aplicações, entre elas, para estratégias de conservação, na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas e de ações antrópicas, efeitos de poluentes, para aplicações biotecnológicas como a produção de peixes ginogênicos, poliploides e transgênicos, e, para fins comerciais aplicáveis na piscicultura, como o melhoramento genético e maior produtividade (Castro, 2019).

Há um crescente número de estudos sobre os principais genes envolvidos na determinação e diferenciação sexual em peixes, no entanto, este ainda é um cenário incipiente. O progresso das técnicas de genética molecular tem contribuído para o entendimento dos mecanismos de determinação do sexo e caracterização de marcadores sexuais específicos (Xu et al., 2013). Entretanto, entre as espécies de peixes teleósteos com um gene conhecido de determinação sexual, apenas duas tiveram os cromossomos sexuais sequenciados e caracterizados: o medaka japonês (*Oryzias latipes*), cujo gene se originou da duplicação / inserção do gene da cópia duplicada (Nanda et al., 2020; Kondo et al., 2009) e o linguado chinês (*Cynoglossus semilaevis*), cujo gene se originou da diversificação alélica (Yano 2012).

O pirarucu, *Arapaima gigas* (Shinz, 1822), é uma espécie de peixe amazônico que apresenta grande importância evolutiva, ecológica, social e econômica, com alto potencial aquícola (Loureiro, 2007; Castello, 2004; Andrade, 2007; Imbiriba et al., 1996; Itaissu et al., 2005), cujos mecanismos de determinação e diferenciação sexual ainda são desconhecidos, apesar dos esforços de pesquisa recente para permitir a identificação do sexo na espécie, o que impossibilita o seu cultivo em larga escala (Chu-koo et al., 2009; Núñez et al., 2011; Almeida et al., 2013; Torati et al., 2016).

A avaliação dos conhecimentos acumulados é uma necessidade premente para qualquer setor de pesquisa, pois a partir deste conhecimento produzido pode-se inferir sobre novas áreas de investigação, apontando caminhos a serem percorridos (Teixeira & Megid Neto, 2006). A Cienciometria é uma vertente da ciência que consiste em um conjunto de métodos quantitativos empregados para estudar as atividades científicas ou técnicas, enfocando a produção ou a comunicação destas (Bufrem & Prates, 2005). As técnicas cienciométricas são importantes para, entre outras atividades, identificar as tendências e o desenvolvimento do conhecimento (Spinak, 1998).

Tendo em vista os dados abordados, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão cienciométrica sobre o panorama atual das pesquisas sobre a determinação sexual em peixes no mundo, com ênfase sobre o pirarucu.

2. Metodologia

Para a revisão cienciométrica foi realizado um levantamento da literatura científica sobre o tema "Determinação sexual em peixes" entre o período de 2000 a 2020, utilizando a base de dados *Web of Science* (Sítio *Thomson ISI*), devido à sua abrangência quanto ao número de publicações e qualidade das revistas indexadas. Utilizamos uma abordagem adaptada de Cruz (2016). As combinações de palavras-chave e operadores booleanos utilizados para a busca de artigos foram: "sex determination" AND "fish", "sex-specific marker" AND "fish", "sex identification" AND "fish", e "sex identification" AND "*Arapaima gigas*". Os artigos selecionados para o estudo deveriam conter essas combinações de palavras no título, resumo ou palavras-chave.

Dos trabalhos que atenderam aos critérios acima, foram extraídas as seguintes informações para a análise qualitativa: (I) país onde o estudo foi realizado, (II) ano da publicação, (III) espécies utilizadas, (IV) método utilizado e (V) palavras-chave. Todos os dados coletados referentes aos artigos foram importados e normalizados no Microsoft Excel®. A análise quantitativa dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva, utilizando medidas de frequência simples e absoluta, sendo representados na forma de gráficos. Para as discussões e perspectivas do estudo, as informações da literatura foram analisadas qualitativamente. A lista completa de artigos utilizados nesta revisão pode ser obtida mediante contato com o autor correspondente.

3. Resultados e Discussão

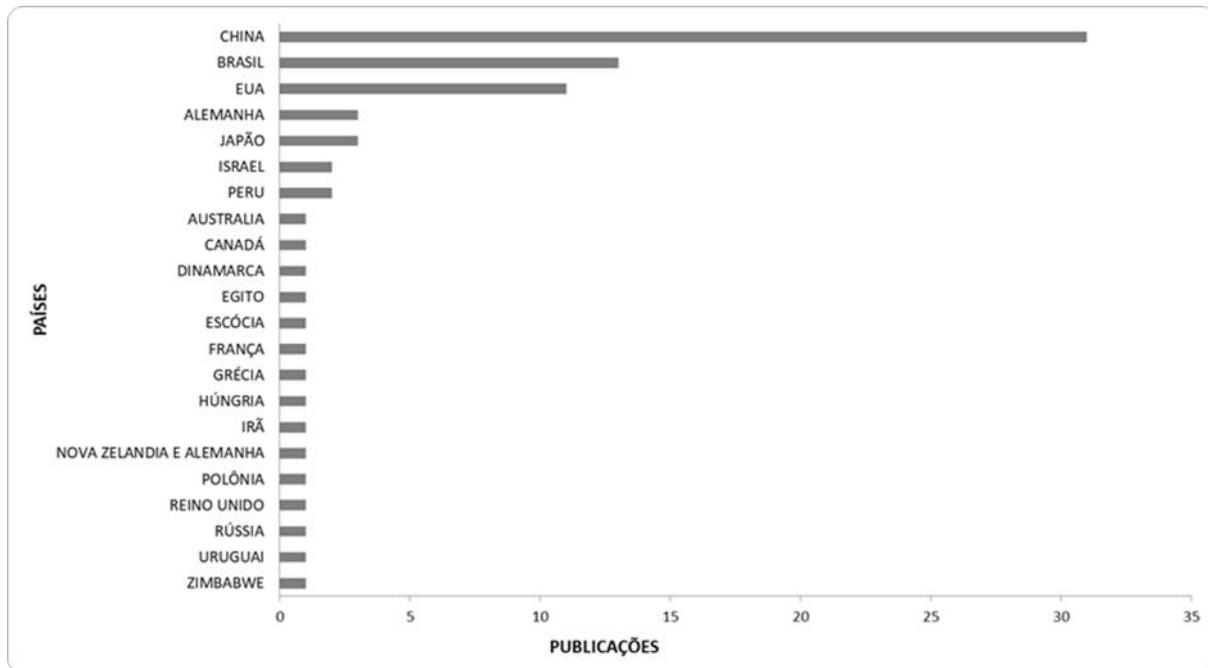
A partir da busca realizada na base de dados *Web of Science*, foi identificado um total de 1207 publicações abrangendo o período de 2000 a 2020. Após a triagem inicial e a exclusão de publicações repetidas e aquelas que não atenderam aos critérios de interesse estabelecidos, obtivemos uma amostra final de 80 publicações que foram selecionadas para análise cienciométrica. Essa seleção rigorosa visou garantir a qualidade e relevância dos estudos incluídos na análise.

3.1 Produção global de estudos sobre determinação sexual em peixes

Foram identificados um total de 80 artigos provenientes de 22 países distintos. A China se destacou como o país com o maior volume de publicações, totalizando 31 artigos, o que corresponde a aproximadamente 39% da produção mundial. Em seguida, destacam-se o Brasil (14 artigos), Estados Unidos (11), Alemanha (3) e Japão (3). Esses cinco principais países representam conjuntamente 76,2% dos artigos publicados durante o período analisado. Em relação à distribuição geográfica, o continente asiático foi responsável por quase metade das publicações (37), seguido pela América (27), Oceania (2) e África (2).

Esses resultados destacam a liderança da China no campo da pesquisa sobre determinação sexual em peixes e a contribuição significativa de outros países ao redor do mundo (Figura 1).

Figura 1 - Produção de estudos por país, com o tema determinação sexual em peixes indexadas na base de dados *Web of Science* no período de 2000 a 2020.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os esforços de pesquisa em determinação sexual em peixes têm se concentrado principalmente na Ásia, com pesquisadores asiáticos liderando a maioria dos estudos. Esse predomínio pode ser atribuído ao expressivo investimento em infraestrutura e financiamento de pesquisas realizadas tanto por instituições públicas quanto por empresas privadas e organizações não governamentais. Essa tendência está em conformidade com a realidade de países desenvolvidos, que se destacam na liderança das publicações científicas devido aos seus significativos aportes em infraestrutura, ciência e tecnologia (Jappe, 2007).

Embora o Brasil seja considerado um país em desenvolvimento, os resultados demonstram um desempenho satisfatório em termos do número de publicações sobre estudos de determinação sexual em peixes, quando comparado a nações desenvolvidas, como Estados Unidos, Japão e Alemanha. De acordo com o recente relatório da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), resultado de uma consultoria internacional (Research in Brazil: Funding excellence, 2018), a produção científica no Brasil tem apresentado um crescimento expressivo nas últimas décadas. Atualmente, o país ocupa a 13ª posição mundial, com 80.912 artigos indexados na *Web of Science* no período de 2013 a 2018, dos quais mais de 50.000 artigos foram publicados somente em 2018. Esses dados indicam um crescimento de 580% em 20 anos, acompanhado de um aumento de 510% no número de doutores formados, demonstrando uma correlação robusta entre o crescimento da produção científica e a formação de pesquisadores de alto nível (Mugnaini et al., 2004).

Em relação aos estudos sobre a determinação sexual no pirarucu, foram identificadas 10 publicações. Dessas, 7 foram conduzidas no Brasil, 2 no Peru e 1 na Alemanha. A primeira publicação indexada na base de dados *Web of Science* sobre o tema foi realizada por Chu-koo, F. et al. (2008), com o título "Determinação de gênero no Paiche ou Pirarucu (*Arapaima gigas*) utilizando níveis plasmáticos de vitelogenina, 17 β -estradiol e 11-cetotestosterona". Já a publicação mais recente é de Lima, et al. (2020), intitulada "Eficiência do padrão de cores como método de identificação de sexo em *Arapaima gigas* (Shinz, 1822)".

Os resultados obtidos evidenciam a crescente relevância das pesquisas relacionadas à determinação sexual em peixes no contexto mundial, com especial destaque para a influência asiática nesse cenário. O contínuo investimento em infraestrutura e recursos destinados à pesquisa científica nesses países tem impulsionado a produção de conhecimento nessa área. No caso específico do Brasil, a significativa ascensão na produção científica, mesmo sendo um país em desenvolvimento, reflete o comprometimento e avanço da comunidade científica nacional.

A quantidade de publicações sobre a determinação sexual no pirarucu demonstra um interesse crescente em desvendar os mecanismos biológicos que regem a determinação do sexo nessa espécie. O Brasil se destaca como um protagonista nesses estudos, indicando o desenvolvimento de pesquisas de alta qualidade e a consolidação de uma rede de pesquisadores especializados no tema.

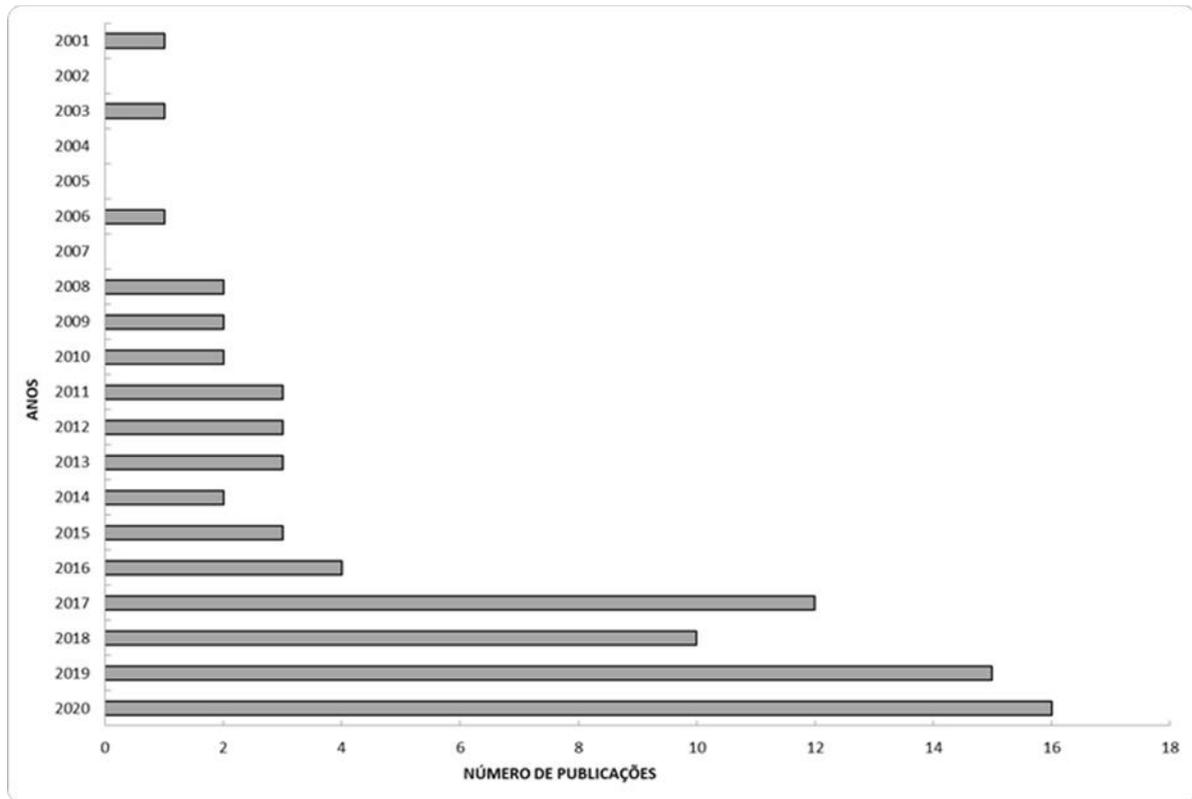
No entanto, apesar dos avanços, ainda há espaço para expansão da pesquisa científica nessa área. Investimentos contínuos e políticas de incentivo são fundamentais para fortalecer a ciência e tecnologia no Brasil, bem como garantir o desenvolvimento de novos estudos e o avanço do conhecimento na área de engenharia de pesca, especialmente na determinação sexual em peixes. A interação e colaboração com outros países e pesquisadores também são essenciais para ampliar as possibilidades de investigação e alcançar novas descobertas significativas para a conservação e gestão sustentável das espécies aquáticas.

3.2 Distribuição anual

Nos primeiros 16 anos analisados (2000-2016), apenas 27 artigos sobre determinação sexual em peixes foram publicados, sendo que em 5 desses anos não houve nenhuma publicação. A partir de 2017, observou-se um interesse crescente pelo assunto, resultando em um aumento significativo de publicações. Enquanto apenas 1 artigo foi publicado em 2001, esse número saltou para impressionantes 16 artigos em 2020, representando um aumento de 1500%. O ano de 2020 foi o mais produtivo, correspondendo a 20% das publicações, seguido de 2019 com 15 artigos, 2017 com 12 e 2018 com 10 artigos (Figura 2).

Essa tendência de crescimento nas publicações após 2016 pode ser explicada pela evolução das tecnologias de sequenciamento de nova geração (NGS), que possibilitaram avanços significativos no estudo da determinação sexual em peixes. O interesse crescente na determinação sexual em peixes também se deve à sua importância econômica e ecológica, especialmente para o desenvolvimento sustentável da aquicultura. A identificação de genes e marcadores específicos ainda é um desafio e requer pesquisas adicionais para aprofundar nossa compreensão da biologia reprodutiva de peixes e contribuir para o manejo reprodutivo de espécies de interesse comercial, visando a segurança alimentar e a preservação dos recursos pesqueiros.

Figura 2 - Produção de estudos por ano, com o tema determinação sexual em peixes indexadas na base de dados *Web of Science* no período de 2000 a 2020.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados revelam um aumento significativo do interesse pela determinação sexual em peixes na comunidade científica internacional, indicando um avanço científico notável nessa área. O número crescente de publicações é amplamente reconhecido como uma medida do progresso e evolução da ciência (Verbeek et al., 2002).

Diversos autores atribuem o aumento das publicações sobre o tema a fatores como a redução dos custos para a utilização de técnicas moleculares, maior acessibilidade aos equipamentos necessários, aprimoramento dos pesquisadores e disponibilidade de sequências de genes em bancos de dados online, o que facilita o trabalho dos cientistas. Além disso, o crescimento do número de publicações pode ser reflexo da crescente preocupação com a diminuição dos recursos pesqueiros e a necessidade de estudos para impulsionar a piscicultura global.

Segundo a FAO (2018), desde 1990, a aquicultura superou a produção pesqueira e, atualmente, responde por metade do comércio global de peixes. Em face da previsão de uma população mundial de pelo menos 9 bilhões de habitantes até 2050 (ONU, 2018) a necessidade de estratégias para aumentar a produção global de alimentos em taxas superiores às atuais torna-se evidente, e assim, a piscicultura desempenhará um papel fundamental para atender a essa crescente demanda.

Nesse contexto, o desenvolvimento de marcadores sexuais específicos torna-se essencial para a compreensão da biologia evolutiva e da evolução dos cromossomos sexuais em peixes, bem como para aprimorar a aquicultura. Esses marcadores são fundamentais para a identificação do sexo genético em espécies com dimorfismo sexual, bem como para melhorar o manejo de reprodutores e o controle da reprodução nos peixes (Mei & Gui, 2015; Gui & Zhu, 2012; Cnaani & Levavi-Sivan, 2009; Berset-Brändli et al., 2006; Devlin & Nagahama, 2002).

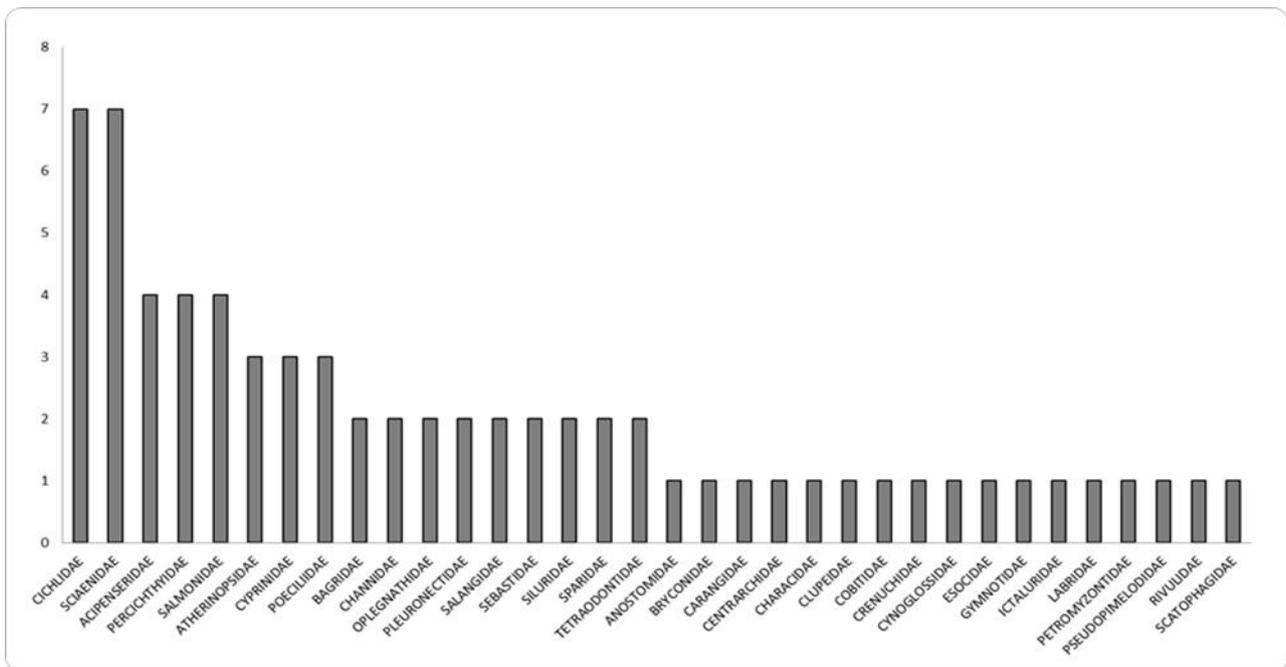
O crescente interesse e investimento na pesquisa de determinação sexual em peixes refletem o reconhecimento de sua importância tanto para a compreensão da biologia dessas espécies quanto para a sustentabilidade da aquicultura. A busca por novos marcadores sexuais promete contribuir significativamente para o desenvolvimento de estratégias inovadoras no manejo

reprodutivo de peixes, com potencial para impulsionar ainda mais o crescimento e a eficiência desse setor vital para a segurança alimentar global.

3.3 famílias estudadas

Foram identificadas 35 famílias e 75 espécies de peixes nos estudos analisados. As principais foram as famílias *Cichlidae* e *Sciaenidae* com 7 trabalhos cada uma (20%), seguido por *Acipenseridae*, *Percichthyidae* e *Salmonidadae* com 4 trabalhos cada uma (11,4%) (Figura 3).

Figura 3 - Número de famílias utilizadas nos estudos indexados na base de dados *Web of Science* com o tema determinação sexual em peixes no período de 2000 a 2020.



Fonte: Dados da pesquisa.

A maior parte dos estudos utilizou espécies de peixes comercialmente importantes para a aquicultura e que ainda não possuem seus mecanismos de determinação do sexo claros. Na aquicultura, características economicamente valiosas podem estar ligadas ao sexo, como taxa de crescimento, tamanho em maturidade, idade na maturidade sexual, padrão de cor, formato da nadadeira, e até mesmo sabor de filé (Martínez, et al., 2014; Rondeau, et al., 2013; Piferrer, et al., 2012).

A identificação genética do sexo nos peixes favorece o desenvolvimento adequado de biotecnologias que permite aos produtores tirarem proveito do dimorfismo sexual, com capacidade para melhorar a eficácia de seleção de reprodutores, e acelerar o desenvolvimento do cultivo monosexo (Weber & Lee, 2014; Rondeau et al., 2013; Mei & Gui, 2015; Gui & Zhu, 2012). Estas considerações econômicas, também baseadas na conservação dos recursos pesqueiros, destacam a importância de compreender os mecanismos de ação da determinação do sexo em peixes, e o desenvolvimento de marcadores sexuais específicos para espécies comercialmente valiosas.

A família de peixes *Cichlidae* é uma das mais importantes para o estudo de processos evolutivos. A quantidade de espécies, o grau de especiação ecológica e morfológica e a rápida formação de linhagens são as características que contribuem para que elas sejam tão utilizadas em pesquisas evolutivas. (Clabaut et al., 2005; Sturmbauer et al., 2010; Baldo et al., 2011). As Tilápias foram as espécies mais estudadas da família *Cichlidae*, e são o segundo grupo mais importante de espécies da aquicultura mundial (Khanam et al., 2020). A variedade de sistemas de determinação do sexo em tilápia e a necessidade de obtenção de

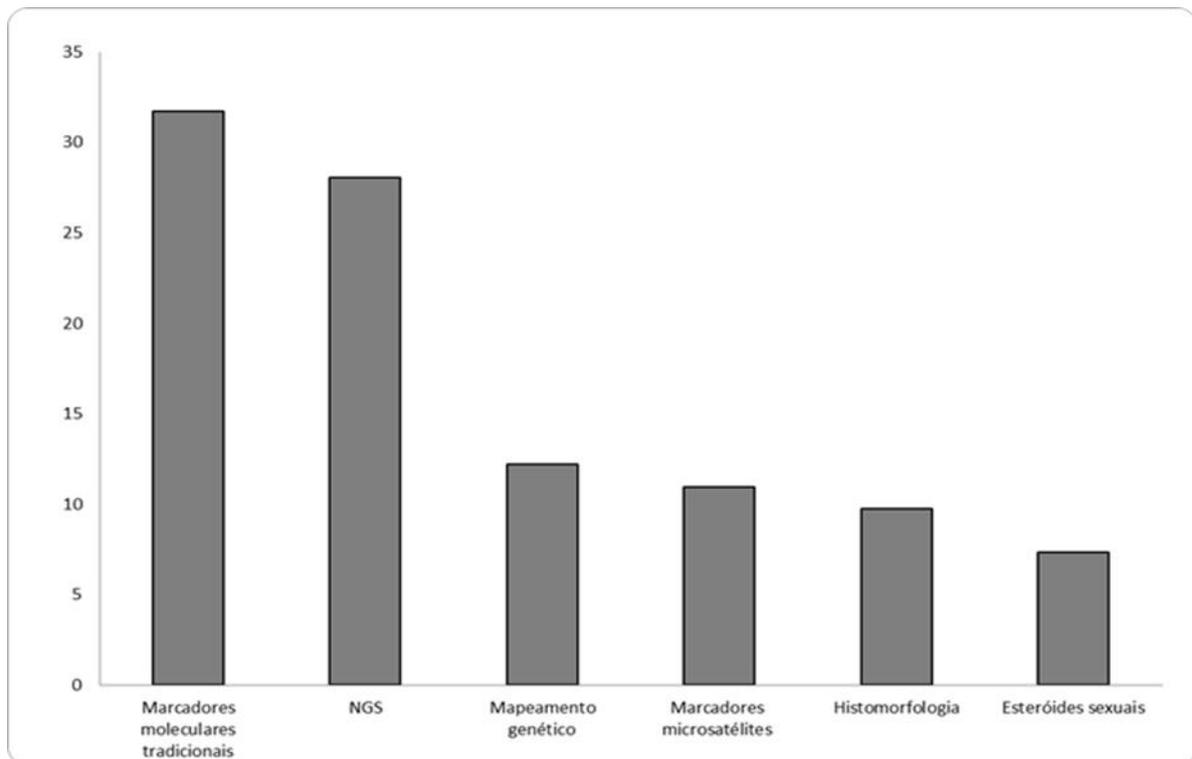
linhagens monossexo (macho monossexual), assim como de melhorar a qualidade genética dos estoques cultivados, têm incentivado os pesquisadores a elucidarem os mecanismos de determinação do sexo nas espécies (Palaiokostas et al., 2015; Li, et al., 2015; Ponzoni et al., 2011).

A família *Sciaenidae* é uma das maiores dentro da ordem Perciformes, e representa um importante recurso pesqueiro mundial, compreendendo 68 gêneros e cerca de 311 espécies (Nelson, 2016). Dentre os *Sciaenidae*, a espécie mais estudada foi o *Collichthys lucidus*, uma importante espécie de peixe marinho amplamente consumida nas regiões costeiras da Ásia. (Cheng et al., 2012). Os peixes cienídeos eram conhecidos por seu cariótipo conservador ($2n = 48a$) sem cromossomos sexuais morfologicamente diferenciados (Accioly e Molina, 2008). No entanto, o *Collichthys lucidus* tem um sistema especial de sexo múltiplo ($X1 X1 X2 X2 / X1 X2 Y$) (Zhang et al., 2018), o que o torna uma espécie importante para se estudar os cromossomos sexuais e mecanismos de determinação do sexo em *Sciaenidae*.

3.4 Métodos utilizados

Os métodos mais utilizados nos estudos foram; Marcadores moleculares tradicionais (32%), NGS - Next Generation Sequencing (28%), mapeamento genético (12%), marcadores microssatélites (11%), histomorfologia (10%) e níveis de esteroides sexuais (7%) (Figura 4).

Figura 4 - Métodos mais utilizados nos estudos indexados na base de dados Web of Science com o tema determinação sexual em peixes no período de 2000 a 2020.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os marcadores moleculares tradicionais, como o polimorfismo do comprimento do fragmento de restrição (RFLP), repetições de sequência simples (SSRs), fragmento amplificado polimorfismo de comprimento (AFLP) e DNA polimórfico amplificado aleatoriamente (RAPD), foram historicamente os mais utilizados para identificar marcadores específicos do sexo em peixes. No entanto, essas técnicas têm sido gradualmente abandonadas devido ao alto custo, trabalho e tempo envolvidos,

resultando em um progresso lento no estudo dos cromossomos sexuais e na identificação de marcadores sexuais específicos, conforme mencionado por diversos autores.

Em contrapartida, os métodos baseados em tecnologias de sequenciamento de nova geração (NGS) têm sido cada vez mais utilizados com sucesso para rastrear sequências de DNA associadas ao sexo em peixes. As técnicas NGS revolucionaram essa área de pesquisa, aumentando a eficiência dos marcadores sexuais, reduzindo custos e ampliando o número de aplicações. Isso possibilitou o desenvolvimento de recursos genéticos para um maior número de espécies, conforme destacado por Gamble (2016) e Piferrer et al. (2012).

Dentre as técnicas NGS, a RAD-seq (Sequenciamento de DNA associado ao local de restrição) tem sido a mais utilizada nos últimos anos. Esse sistema fornece dados de sequência que podem ser facilmente convertidos em um teste de validação de PCR, como descrito por Fowler e Buonaccorsi (2016). Vários estudos empregaram dados de RAD-seq para identificar marcadores ligados ao sexo e grupos de ligação de cromossomos sexuais em diversas espécies de peixes, como Peixe-mosquito ocidental (Lamatsch et al., 2015), tilápia do Nilo (Palaiokostas et al., 2013b, 2015a), robalo europeu (Palaiokostas et al., 2015b), alabote do Atlântico (Palaiokostas et al., 2013a), peixe-zebra (Anderson et al., 2012), carpa cabeça-grande (Liu et al., 2018), atum rabilho do Pacífico (Suda et al., 2019), corvina amarela (Lin et al., 2017) e snakehead (Ou et al., 2017).

No entanto, muitos estudos publicados sugerem que não existe um gene mestre universal para a determinação do sexo em peixes. A identificação dos genes de determinação do sexo ainda é um desafio em peixes, e os mecanismos exatos de regulação das vias de determinação do sexo ainda permanecem desconhecidos, como relatado por Bao et al. (2019). Esses mecanismos são diversos e muitas vezes variam entre espécies intimamente relacionadas e até mesmo dentro de diferentes populações da mesma espécie, conforme mencionado por Piferrer et al. (2012), Purcell et al. (2018), Ross et al. (2009) e Tanaka et al. (2007).

No contexto da determinação sexual no pirarucu, vários métodos foram utilizados. Chu-koo et al. (2008) e Dugué et al. (2008) obtiveram sucesso na determinação do sexo em pirarucus maduros e imaturos com base na proporção dos esteroides 11-cetotestosterona (11KT) e estradiol (E2) e vitelogenina no plasma, embora a confiabilidade dessa técnica possa não ser garantida, conforme mencionado por Chu-koo et al. (2009). Carreiro et al. (2011) obteve êxito na utilização da laparoscopia para a visualização das gônadas em juvenis, porém esse método mostrou-se trabalhoso, invasivo e de alto custo. Amaral et al. (2019) caracterizaram a diferenciação e desenvolvimento das gônadas do pirarucu, destacando que a diferenciação nessa espécie é lenta.

Torati et al. (2016, 2019) validaram um procedimento de endoscopia não cirúrgica para identificação do sexo em pirarucus jovens, acrescentando novos conhecimentos sobre a anatomia urogenital das fêmeas por meio de canulação. No entanto, não foi possível aplicar a endoscopia e canulação em machos, o que requer análises de esteroides sexuais para identificar o sexo. Portanto, são necessários estudos adicionais. Du et al. (2019) e Watanabe et al. (2018) foram os primeiros estudos a utilizar as tecnologias NGS no pirarucu. Esses estudos forneceram dados genômicos de um possível sistema genético de determinação do sexo em machos, bem como as primeiras evidências de expressão gênica sexualmente dimórfica na fase juvenil do pirarucu, com base em comparações dos perfis de expressão de tecido hepático e cutâneo. Contudo, eles afirmam a necessidade de mais pesquisas sobre esses recursos genômicos para uma compreensão completa do assunto.

Recentemente, a avaliação do padrão de coloração mostrou uma grande variabilidade intra e interpopulacional, tornando-a considerada não confiável. Os autores também recomendaram o uso combinado com outros métodos disponíveis para obter taxas ideais de identificação de sexo em pirarucu (Lima et al., 2020; Chu-koo et al., 2009).

Esses estudos representam avanços importantes na compreensão da biologia reprodutiva do pirarucu e marcam o início de uma série de pesquisas voltadas para essa área. Os resultados são promissores e têm potencial para o desenvolvimento de técnicas de sexagem confiáveis, especialmente para o cultivo da espécie. No entanto, para o desenvolvimento de protocolos eficazes de cultivo em cativeiro do pirarucu, são necessários dados mais sistemáticos sobre sua fisiologia reprodutiva,

metabolismo e genoma, especialmente para a implementação de técnicas de desova artificial, como ressaltado por Watanabe et al. (2018).

3.5 Palavras-chave

Foram encontradas 210 palavras-chave distintas, incluindo suas formas no plural. O termo "sex determination", juntamente com suas variações no plural e com complementos, foi o mais frequentemente utilizado, aparecendo em 40 citações (19%). O termo "Sex-specific marker" foi mencionado 19 vezes (9%), seguido por "sex identification" com 15 ocorrências (7,1%). "Next generation sequencing" foi mencionado 10 vezes (4,7%), enquanto "genome" foi citado em 7 ocasiões (3,3%). Os termos "sex differentiation", "Sexing" e "fish" foram mencionados 5 vezes cada (2,3%). Em algumas publicações, não foram fornecidas palavras-chave.

4. Conclusão

Em conclusão, este estudo evidencia um aumento significativo no interesse dos pesquisadores em relação à determinação sexual em peixes, tanto em países desenvolvidos quanto no Brasil. Esse aumento reflete a importância científica e econômica desse campo de pesquisa, considerando o potencial do Brasil na produção de peixes, especialmente o pirarucu.

Com base nas descobertas apresentadas neste trabalho, é esperado que os marcadores moleculares baseados em sequenciamento de nova geração (NGS) continuem sendo amplamente utilizados. Isso se deve à redução de custos e ao alto rendimento proporcionado por essas tecnologias, o que possibilita o desenvolvimento de recursos genéticos para um número cada vez maior de espécies. Esses avanços são cruciais para a compreensão dos mecanismos evolutivos e da plasticidade do processo de determinação sexual em vertebrados, bem como para o progresso da aquicultura em escala global.

No entanto, é importante ressaltar que ainda há muito a ser explorado nesse campo. A identificação de genes de determinação sexual em peixes continua sendo um desafio, e os mecanismos de regulação dessas vias ainda são pouco compreendidos.

Para pesquisas futuras, é fundamental o aprofundar o conhecimento sobre a fisiologia reprodutiva, o metabolismo e o genoma das espécies estudadas, especialmente em relação à implementação de técnicas de desova artificial. Pesquisas adicionais podem contribuir com informações valiosas e soluções inovadoras não apenas para a ciência, mas também para o desenvolvimento sustentável da aquicultura e a utilização eficiente dos recursos genéticos de diferentes espécies de peixes.

Referências

- Accioly, J. V., & Molina, W. F. (2008). Cytogenetic studies in Brazilian marine Sciaenidae and Sparidae fishes (Perciformes). *Genetics and Molecular Research*, 7(2), 358-370. <https://doi.org/10.4238/vol7-2gmr427>.
- Almeida, I. G., Ianella, P., Faria, M. T., Paiva, S. R., & Caetano, A. R. (2013). Bulk segregant analysis of the pirarucu (*Arapaima gigas*) genome for identification of sex-specific molecular markers. *Genetics and Molecular Research*. <https://doi.org/10.4238/2013.december.4.17>.
- Anderson, D., Yu, T., Phillips, B., & Schmezer, P. (1994). Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis The effect of various antioxidants and other modifying agents on oxygen-radical-generated DNA damage in human lymphocytes in the COMET assay. *Mutation Research*, 307(1), 261-271. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(94\)90300-x](https://doi.org/10.1016/0027-5107(94)90300-x).
- Andrade, J. I. A. (2007). Influence of diets supplemented with vitamins C and E on pirarucu (*Arapaima gigas*) blood parameters. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molec. & Integ. Physio.* 146. 576-580. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.03.017>.
- Baldo, L., Santos, M. E., & Salzburger, W. (2011) Comparative transcriptomics of Eastern African cichlid fishes shows signs of positive selection and a large contribution of untranslated regions to genetic diversity. *Genome Biology and Evolution*. 1, 443-455. <https://doi.org/10.1093/gbe/evr047>.
- Bao, L., Tian, C., Liu, Shikai., Zhang, Y., Elswad, A., Yuan, Z., Khalil, K., Sol, F., Yang, Y., Zhou, T., Li, N., Tan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Li, Y., Gao, D., Dunham, R., Davis, K., Waldbieser, G., & Liu, Z. (2019). The Y chromosome sequence of the channel catfish suggests novel sex determination mechanisms in teleost fish. *BMC biology*. 17(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12915-019-0627-7>.
- Berset-Brandli, L., Jaquiere, S. D., & Perrin, N. (2006). A sex-specific marker reveals male heterogamety in European tree frogs. *Molecular biology and Evolution*. 23, 1104-1106. <https://doi.org/10.1093/molbev/msk011>.

- Bufrem, L., & Prates, Y. (2005). O saber científico registrado e as práticas de mensuração da informação. *Ciência da Informação*. 34(2), 9-25. <https://doi.org/10.1590/s0100-19652005000200002>.
- Carreiro, C. R., Furtado-Neto, M., Mesquita, P., & Bezerra, T. (2011). Sex determination in the Giant fish of Amazon Basin, *Arapaima gigas* (Osteoglossiformes, Arapaimatidae), using laparoscopy. *Acta Amazonica*. 41(3), 415-419. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672011000300012>.
- Castello, L. (2004). A method to count pirarucu *Arapaima gigas*: fishers, assessment, and management. *North American Journal of Fisheries Management*. 24(2), 379-389. <https://doi.org/10.1577/m02-024.1>.
- Castro, J. P. (2019). Expressão de genes candidatos à determinação sexual em *Astyanax scabripinnis* (Teleostei: Characidae) em animais com e sem cromossomos B. Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos SP.
- Cheng, S. L. (2012). Induction of mitogynogenetic diploids and identification of WW super-female using sex-specific SSR markers in half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*). *Marine Biotechnology*. 14(1), 120-128. <https://doi.org/10.1007/s10126-011-9395-2>.
- Chu-Koo, F., Dugué, R. M., Aguilar, M. A., Daza, A. C., Bocanegra, F. A., Veintemilla, C. C., Duponchelle, F., Renno, J. F., Tello, S., & Nuñez, J. (2009). Gender determination in the Paiche or Pirarucu (*Arapaima gigas*) using plasma vitellogenin, 17 β -estradiol, and 11-ketotestosterone levels. *Fish Physiology and Biochemistry*. 35(1). <https://doi.org/10.1007/s10695-008-9211-8>.
- Clabaut, C., Salzburger, W., & Meyer, A., (2005). Comparative phylogenetic analyses of the adaptive radiation of Lake Tanganyika cichlid fish: nuclear sequences are less homoplasious but also less informative than mitochondrial DNA. *Journal of Molecular Evolution*. 61, 666-681. <https://doi.org/10.1007/s00239-004-0217-2>.
- Cnaani A, & Levavi-Sivan B. (2009). Sexual development in fish, practical applications for aquaculture. *PubMed*. 164-75. 10.1159/000223080.
- Cruz, P. R., Affonso, I., & Gomes, L. C. (2016). Ecologia de ictioplâncton: uma abordagem cienciométrica. *Oecologia Australis*, 20 (4).
- Devlin R. H. & Nagahama Y. (2002). Sex determination and sex differentiation in fish: an overview of genetic, physiological, and environmental influences. *Aquaculture*. 208. 191-364. [https://doi.org/10.1016/s0044-8486\(02\)00057-1](https://doi.org/10.1016/s0044-8486(02)00057-1).
- Du, K., Wuertz S., Adolphi M., & Kneitz S. (2019). The genome of the arapaima (*Arapaima gigas*) provides insights into gigantism, fast growth and chromosomal sex determination system. *Scientific reports*. 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41457-x>.
- Dugué, R. (2008). Purification and assay of *Arapaima gigas* vitellogenin: potential use for sex determination. *Cybium*. 32(2), 111-111. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.04.02>.
- FAO. (2018). The state of world fisheries and aquaculture 2018 - Meeting the sustainable development goals. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, Rome, Italy, p. 227.
- Fowler, B. L. S. & Buonaccorsi, V. P. (2016). Genomic characterization of sex-identification markers in *Sebastes carnatus* and *Sebastes chrysomelas* rockfishes. *Molecular ecology*. 25, 2165–2175. <https://doi.org/10.1111/mec.13594>.
- Gamble, T. (2016). Using RAD-seq to recognize sex-specific markers and sex chromosome systems. *Molecular ecology*. 25, 2114-2116. <https://doi.org/10.1111/mec.13648>.
- Gui J. F. & Zhu Z. Y. (2012). Molecular basis and genetic improvement of economically important traits in aquaculture animals. *Chinese Science Bulletin*. 57, 1751–1760. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5213-0>.
- Imbiriba, E. P., Lourenço Junior, J., Carvalho, L., Uliana, D., & Brito Filho, L. (1996). Criação de pirarucu. *Embrapa - SPI, Coleção Criar*, 93p., Belém. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/100639>
- Ituassú, D. R., Filho, M. P., Roubach, R., Crescêncio, R., Cavero, B. A., & Gandra, A. L. (2005). Níveis de proteína bruta para juvenis de pirarucu. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 40, 255-259. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2005000300009>.
- Jappe, A. (2007). Explaining international collaboration in global environmental change research. *Scientometrics*, 71(3), 367-390. <https://akjournals.com/view/journals/11192/71/3/article-p367.xml>
- Kondo, M. & Nanda, I. (2009). Sex Determination and Sex Chromosome Evolution: Insights from Medaka. *SXD*. 3, 88–98. <https://doi.org/10.1159/000223074>.
- Lamatsch, D. K., Adolfsson, F., & Alistair, M. (2015). A transcriptome derived female-specific marker from the invasive western mosquito fish (*Gambusia affinis*). *PLoS One*, 10(2), 118-214. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118214>.
- Li, M., Yunlv, S., & Zhao, J. (2015). A tandem duplicate of anti-Müllerian hormone with a missense SNP on the Y chromosome is essential for male sex determination in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *PLoS genetics*. 11(11), 100-108. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005678>.
- Lima, A. F., Alves, R. R., & Torati, L. S. (2020). Efficiency of color pattern as a method for sex identification in *Arapaima gigas* (Schinz, 1822). *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*. 15(2), 87-92.
- Lin, A., Xiao, S., & Xu, S. (2017). Identification of a male-specific DNA marker in the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*). *Aquaculture*. (480), 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.08.009>.
- Liu, B., Zhang, S., & Chang, C. C. (2018). Emerging Pollutants - Part II: Treatment. *Water Environment Research*, 90(10), 1792–1820. <https://doi.org/10.2175/106143018x15289915807443>.
- Loureiro, A. J. S. (2007). O Amazonas na época imperial. *Ed. Valer*, 70p., Manaus.

- Martínez, P., Vias, A. M., & Sanchez, L. (2014). Genetic architecture of sex determination in fish: applications to sex ratio control in aquaculture. *Frontiers in genetics*, 5, 340. <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00340>.
- Mei, J., & Gui, J. (2015). Genetic basis and biotechnological manipulation of sexual dimorphism and sex determination in fish. *Life Science*, 58, 124–136. <https://doi.org/10.1007/s11427-014-4797-9>.
- Mugnaini, R., Jannuzzi, P. M., & Quoniam L. (2004). Indicadores bibliométricos da produção científica brasileira: uma análise a partir da base Pascal. *Ciência da Informação*, 33(2), 123-131. <https://doi.org/10.1590/s0100-19652004000200013>.
- Nanda, I., Kondo, M., Hornung, U., & Asakawa, S. (2002). A duplicated copy of DMRT1 in the sex-determining region of the Y chromosome of the medaka, *Oryzias latipes*. *PNAS*, 99, 11778–11783. <https://doi.org/10.1073/pnas.182314699>.
- Nelson, J. S. (2016). Fishes of the World. *John Wiley & Sons*, 752p.
- Núñez, J., Chu-koo, F., Berland, M., & Arévalo, L. (2011). Reproductive success and fry production of the paiche or pirarucu, *Arapaima gigas* (Schinz), in the region of Iquitos, Perú. *Aquaculture Research*, 42, 815-822. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02886.x>.
- Ou, M., Yang, C., Luo, Q., & Huang, R. (2017). An NGS-based approach for the identification of sex-specific markers in snakehead (*Channa argus*). *Oncotarget*, 8, 98733–98744. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.21924>.
- Palaiokostas, C., Bekaert, M., Khan, M., & Taggart, J. (2013). Mapping and validation of the major sex-determining region in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) using RAD sequencing. *PLoS one*, 8(7), 68389. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068389>.
- Palaiokostas, C., Bekaert, M., Khan, M., & Taggart, J. (2015). A novel sex-determining QTL in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *BMC genomics*, 16(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1383-x>.
- Piferrer, F., Ribas, L., & Díaz, N. (2012). Genomic approaches to study genetic and environmental influences on fish sex determination and differentiation. *Marine biotechnology*, 14(5), 591–604. <https://doi.org/10.1007/s10126-012-9445-4>.
- Ponzoni, R., Nguyen, N., Khaw, H., & Hamzah H. (2011). Genetic improvement of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with special reference to the work conducted by the WorldFish center with the GIFT strain. *Aquaculture*, 3(1), 27-41. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2010.01041.x>.
- Purcell, C., Seetharam, A., Snodgrass, O., & García, S. (2018). Insights into teleost sex determination from the *Seriola dorsalis* genome assembly. *BMC Genomics*, 19(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-4403-1>.
- Rondeau, E., Messmer, A., Sanderson, D., & Jantzen, S. (2013). Genomics of sablefish (*Anoplopoma fimbria*): expressed genes, mitochondrial phylogeny, linkage map, and identification of a putative sex gene. *BMC Genomics*, 14, 452. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-452>.
- Ross, J., Urton, J., Boland, J., Shapiro, M. D., & Peiche, C. L. (2009). Turnover of sex chromosomes in the stickleback fishes (*Gasterosteidae*). *PLoS Genetics*, 5(2), <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000391>.
- Sandra, G. E. & Norma, M. M. (2010). Sexual determination and differentiation in teleost fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 20 (1), 101-121.
- Shoukang, Z., Zheng, J., Zhang, J., & Wang, Z. (2018). Cytogenetic characterization and description of an X1X1X2X2/X1X2Y sex chromosome system in *Collichthys lucidus* (Richardson, 1844). *Acta Oceanologica Sinica*, 37(4), 34-39. <https://doi.org/10.1007/s13131-018-1152-1>.
- Spinak, E. (1998). Indicadores cientímetricos. *Ciência da Informação*, Brasília, 27(2).
- Sturmbauer, C., Salzburger, W., Duftner, N., & Schelly, R. (2010). Evolutionary history of the Lake Tanganyika cichlid tribe Lamprologini (Teleostei: Perciformes) derived from mitochondrial and nuclear DNA data. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 57(1), 266-284. <https://doi.org/10.1016/j.ympv.2010.06.018>.
- Suda, A., Nishiki, I., Iwasaki, Y., & Matsuura, A. (2019). Improvement of the Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) reference genome and development of male-specific DNA markers. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50978-4>.
- Tanaka, K., Takehana, Y., Naruse, K., & Hamaguchi, S. (2007). Evidence for different origins of sex chromosomes in closely related oryzias fishes: substitution of the master sex-determining gene. *Genetics*, 177(4), 2075. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.075598>.
- Taslina, K., Wehner, S., Taggart, J., & Verdal, H. (2020). Sex determination in the GIFT strain of tilapia is controlled by a locus in linkage group 23. *BMC genetics*, 21(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12863-020-00853-3>.
- Teixeira, P. M. M. & Megid Neto, J. (2006). Investigando a pesquisa educacional: Um estudo enfocando dissertações e teses sobre o ensino de biologia no Brasil. *Investigações em Ensino de Ciências*, 11(2), 261-282.
- Torati, L., Lima, A., & Kirschnick, L. (2019). Endoscopy and cannulation as non-invasive tools to identify sex and monitor reproductive development in *Arapaima gigas*. *Copeia*, 107(2), 287-296. <https://doi.org/10.1643/ot-18-127>.
- Torati, L., Vargas, A., & Galvão, J. (2016). Endoscopy application in broodstock management of *Arapaima gigas* (Schinz, 1822). *Journal of applied ichthyology*, 32(2), 353-355. <https://doi.org/10.1111/jai.12988>.
- Verbeek, A., Debackere, K., & Luwel, M. (2002). Measuring progress and evolution in science and technology – I: the multiple uses of bibliometric indicators. *International Journal of Management Reviews*, 4(2), 179-211. <https://doi.org/10.1111/1468-2370.00083>.
- Watanabe, L., Gomes, F., Vianez, J., & Nunes, M. (2018). De novo transcriptome based on next-generation sequencing reveals candidate genes with sex-specific expression in *Arapaima gigas* (Schinz, 1822), an ancient Amazonian freshwater fish. *PLoS one*, 13 (10), 0206379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206379>.

Weber, G. & Lee, C. (2014). Current and future assisted reproductive technologies for fish species. *Current and Future Reproductive Technologies and World Food Production*. 33-76, 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8887-3_3.

Xu, D., Lou, B., Xu, H., & Li, S. (2013). Isolation and characterization of male-specific DNA markers in the rock bream *Oplegnathus fasciatus*. *Marine Biotechnology*. 15(2), 221-229. <https://doi.org/10.1007/s10126-012-9480-1>.

Yano, A. (2012). An immune-related gene evolved into the master sex-determining gene in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Current biology*. 22 (15), 1423-1428. <https://doi.org/10.3410/f.717952911.793458466>.

Zhang X., Liu W., Wang J., Tian H., Wang W., & Ru S. (2018) Quantitative analysis of in-vivo responses of reproductive and thyroid endpoints in male goldfish exposed to monocrotophos pesticide. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 211, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2018.05.010>.