

AQUECIMENTO GLOBAL E O FUTURO DAS TARTARUGAS: RISCOS DA FEMINIZAÇÃO EXTREMA POR TSD

Lara Christ de Castro, Eduarda de Almeida Godoi, Marina Passamani Marçal, Caio Matias de Oliveira, Juliara Coutinho Gonçalves Chaves, Giuliano Moraes Figueiró, Felipe Berbari Neto.

Universidade Federal do Espírito Santo/ Departamento de Medicina Veterinária/CCAUE/UFES,
- Caixa postal 16, Alto Universitário - 29500-00, Alegre - ES, Brasil,
laracastro.lc61@gmail.com, eduarda20.doc@gmail.com, passamanimarina18@gmail.com,
caio.m.oliveira@edu.ufes.br, juliara.chaves@edu.ufes.br, giuliano.figueiro@ufes.br,
berbarineto@hotmail.com

Resumo

A determinação do sexo em tartarugas é um processo multifatorial, no qual a temperatura de incubação se destaca como principal fator, caracterizando a Determinação Sexual Dependente da Temperatura (TSD). Este trabalho teve como objetivo revisar os fatores ambientais, genéticos e hormonais envolvidos nesse processo, bem como suas implicações diante das mudanças climáticas. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica de artigos publicados entre 2009 e 2024, contemplando estudos sobre temperatura, substrato de incubação, expressão gênica e ação hormonal. Os resultados indicaram que a TSD é modulada pela interação de fatores ambientais e biológicos, sendo o aumento global das temperaturas responsável pela projeção de feminização extrema das populações. Conclui-se que compreender esses mecanismos é essencial para orientar estratégias de manejo e conservação, visando a manutenção do equilíbrio populacional e a viabilidade das espécies a longo prazo.

Palavras-chave: determinação sexual tartarugas, temperatura de incubação, mudanças climáticas, conservação.

Área do Conhecimento: Área de Ciências da Saúde – Medicina Veterinária.

Introdução

A determinação do sexo nas tartarugas é um processo complexo que envolve múltiplos fatores ambientais. Em várias espécies, a Determinação Sexual Dependente da Temperatura (TSD) emerge como mecanismo predominante, onde a temperatura durante o desenvolvimento embrionário é responsável por definir o sexo do indivíduo. A TSD exemplifica a interação entre fatores genéticos e ambientais, sendo uma teoria que busca explicar como a temperatura pode afetar a expressão de genes que regulam a diferenciação sexual (Zaluski, 2019).

Além disso, a influência de fatores ambientais, como a granulose da areia, tem sido objeto de discussão, indicando que as características físicas do substrato de nidificação podem impactar o desenvolvimento embrionário e a determinação do sexo (Tacchi et al., 2019).

A determinação sexual genotípica (DSG) é menos comum entre os quelônios, sendo mais frequente em grupos como cobras e lagartos. Genes associados à diferenciação sexual, como DMRT1, que está ligado ao desenvolvimento testicular, e FOXL2, relacionado ao desenvolvimento ovariano, são influenciados pela temperatura. Estudos demonstram que a expressão desses genes é crucial para a determinação do sexo em tartarugas, como evidenciado em pesquisas sobre a espécie *Trachemys scripta* (Chutian et al., 2017; Xiaohui et al., 2022).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

As mudanças climáticas estão alterando os padrões térmicos globais, o que afeta diretamente a determinação do sexo em tartaruga. Pesquisas indicam que o aumento da temperatura média global pode causar um desequilíbrio na proporção de sexos, potencialmente levando à extinção de populações com um excesso de fêmeas (Hays et al., 2017; Novais, 2010). O estudo de Hays et al. (2014) sugere que a diferença na periodicidade reprodutiva entre machos e fêmeas pode ajudar a equilibrar essas proporções, permitindo que as tartarugas marinhas mantenham uma taxa reprodutiva saudável, mesmo diante das mudanças térmicas.

Compreender esses fatores é essencial, pois pode auxiliar na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre as populações de tartarugas, assegurando sua viabilidade a longo prazo (Hays et al., 2014) o que gerou esse estudo, pois tem se estudado muito sobre estes fatores nos últimos anos.

Metodologia

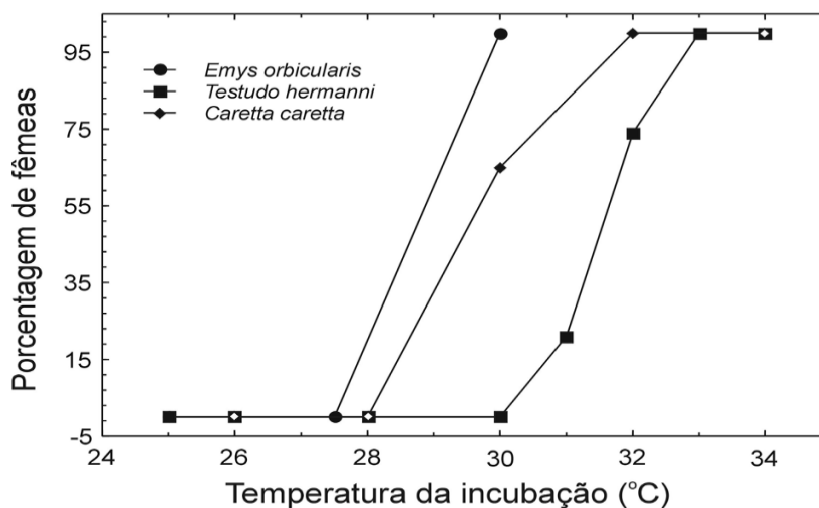
A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica abrangente, incluindo artigos publicados entre os anos de 2009 e 2024, com foco nas seguintes áreas de estudo: determinantes genéticos do sexo nas tartarugas, temperatura de incubação e Determinação Sexual Dependente da Temperatura (TSD), granulose da areia e seus efeitos, e fatores hormonais na diferenciação sexual.

Resultados

A análise da literatura evidenciou que a Determinação Sexual Dependente da Temperatura (TSD) constitui o principal mecanismo de definição do sexo em tartarugas, sendo considerada um processo-chave na biologia reprodutiva do grupo. Estudos clássicos e contemporâneos apontam que temperaturas mais elevadas durante o período termossensitivo resultam predominantemente em fêmeas, enquanto temperaturas mais baixas favorecem a formação de machos (Hays et al., 2014; Hays et al., 2017; Novais, 2010).

Yntema & Mrosovsky (1979), Eendebak (1995) e Pieau (1971) (*apud* Ferreira Junior, 2009), relata que a TSD é o mecanismo mais frequente entre os quelônios (Figura 1), mas em algumas espécies a determinação sexual independe da temperatura de incubação.

Figura 1 - Relação entre a temperatura da incubação e a razão sexual de quelônios. A razão sexual será expressa pela porcentagem de fêmeas. Baixas temperaturas de incubação induzem a produção de machos e altas temperaturas de incubação levam ao desenvolvimento de fêmeas. A DST é comum em tartarugas marinhas (*C. caretta*), terrestres (*T. hermanni*) e de água doce (*E. orbicularis*).



Fonte dos dados: Ferreira Junior (2009)

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A formação das gônadas ocorre durante o período termossensitivo, quando as células somáticas e germinativas respondem aos estímulos térmicos, modulando cascatas de sinalização que direcionam a diferenciação sexual. Nesse sentido, estudos recentes vêm destacando que a variação intra e interpopulacional da TSD pode estar associada à plasticidade adaptativa das espécies, possibilitando que populações distintas apresentem diferentes limites críticos de temperatura (Girondet; Pieau, 2016).

Outro fator ambiental relevante é a granulometria do substrato das áreas de nidificação. Pesquisas como as de Tacchi et al. (2019) demonstraram que a textura da areia altera a retenção térmica dos ninhos, impactando diretamente não apenas a proporção sexual, mas também o sucesso de eclosão. Areias mais finas tendem a reter calor, favorecendo o nascimento de fêmeas, ao passo que areias mais grossas contribuem para temperaturas mais baixas e maior produção de machos. Estudos em *Chelonia mydas* relataram que intervenções artificiais já foram utilizadas experimentalmente para mitigar distorções sexuais acentuadas (Fuentes et al., 2011).

No campo molecular, investigações com *Trachemys scripta* demonstraram que a expressão diferencial de genes como DMRT1, associado ao desenvolvimento testicular, e FOXL2, relacionado à diferenciação ovariana, é regulada pela temperatura de incubação (Chutian et al., 2017; Xiaohui et al., 2022). Paralelamente, a literatura também aponta o papel de hormônios esteroides na diferenciação sexual. Zaluski (2019) descreve que esses hormônios atuam de forma complementar à TSD, modulando a formação das gônadas durante a embriogênese. Estudos experimentais demonstraram que a aplicação exógena de estrogênio ou inibidores de aromatase pode alterar a trajetória de diferenciação sexual (Garner; Janzen, 2008).

Modelos preditivos sugerem que, em algumas localidades, mais de 90% dos filhotes podem nascer fêmeas nas próximas décadas (Jensen et al., 2018).

Discussão

Os resultados apontam que a TSD não deve ser compreendida apenas como uma resposta linear à temperatura, mas como um fenômeno multifatorial no qual fatores ambientais, genéticos, moleculares e hormonais interagem de maneira dinâmica (Janzen; Phillips, 2006; Carr; Orenstein, 2016). Essa visão reforça que a determinação sexual em tartarugas deve ser compreendida como o resultado da sobreposição de múltiplos níveis de regulação biológica, indo além da simples resposta à temperatura. Tais achados indicam que o manejo de áreas de nidificação — ou mesmo a incubação artificial com substratos controlados — pode representar estratégia de conservação relevante para balancear as razões sexuais em populações ameaçadas. A integração entre temperatura, expressão gênica e influência hormonal amplia o entendimento sobre a plasticidade fenotípica, além de abrir novas perspectivas para pesquisas em biologia molecular e conservação de espécies ameaçadas.

No contexto das mudanças climáticas, os estudos convergem em apontar riscos concretos de feminização extrema das populações, devido ao aumento das temperaturas médias globais. Esse desequilíbrio pode comprometer a viabilidade reprodutiva a longo prazo, levando à redução da variabilidade genética e aumento do risco de extinção. Embora Hays et al. (2014) tenham sugerido que diferenças na periodicidade reprodutiva entre machos e fêmeas possam mitigar parcialmente esse desequilíbrio, os dados mais recentes indicam que tais mecanismos não seriam suficientes diante do cenário de aquecimento acelerado.

Uma lacuna ainda evidente na literatura diz respeito ao potencial adaptativo das populações de tartarugas frente às mudanças climáticas. Alguns autores sugerem que ajustes comportamentais, como alterações nos períodos de desova ou na seleção de micro-habitats, poderiam retardar os efeitos da feminização (Fuentes; Warnken, 2016). No entanto, ainda são necessários estudos de longo prazo que confirmem a efetividade desses mecanismos compensatórios. Além disso, pouco se sabe sobre a variabilidade genética intraespecífica na sensibilidade térmica da TSD, o que representa um campo promissor para futuras investigações.

Conclusões

Assim, os resultados discutidos indicam que a determinação sexual em tartarugas deve ser entendida como um processo multifatorial, influenciado por fatores ambientais, genéticos e hormonais que interagem de forma dinâmica. A compreensão dessa complexidade é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação, que devem incluir tanto a proteção de habitats naturais quanto intervenções controladas, como programas de incubação artificial e monitoramento genético. O avanço da pesquisa nesse campo, especialmente com integração entre ecologia, biologia molecular e modelagem climática, pode fornecer as bases necessárias para assegurar a sustentabilidade das populações de tartarugas em um cenário de rápidas mudanças ambientais.

Referências

- CARR, A.; ORENSTEIN, R. **The ecology and biology of sea turtles**. Washington: Smithsonian Institution Press, 2016.
- CHUTIAN, Z. et al. Temperature-dependent expression of sex-related genes in the red-eared slider turtle (*Trachemys scripta*). **Journal of Experimental Zoology**, v. 327, n. 7, p. 437-449, 2017.
- FERREIRA JÚNIOR, Paulo Dias. Aspectos ecológicos da determinação sexual em tartarugas. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 139-154, 2009.
- FUENTES, M. M. P. B. et al. Potential impacts of projected sea-level rise on sea turtle rookeries. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 21, n. 2, p. 132-140, 2011.
- FUENTES, M. M. P. B.; WARNKEN, J. Variability in nesting success of sea turtles: climate, beach characteristics and human activities. **Marine Ecology Progress Series**, v. 545, p. 227-239, 2016.
- GARNER, J. A.; JANZEN, F. J. Genetic and environmental effects on sex determination in reptiles. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 21, p. 557-567, 2008.
- GIRONDET, L.; PIEAU, C. Effects of incubation temperature on sex determination in reptiles: a mechanistic and evolutionary perspective. **Sexual Development**, v. 10, p. 17-29, 2016.
- HAYS, G. C. et al. Climate change and marine turtles. **Endangered Species Research**, v. 26, p. 223-232, 2014.
- HAYS, G. C. et al. Nest temperatures and hatchling sex ratios for green turtles in the Mediterranean: a test of the thermal incubation hypothesis. **Marine Ecology Progress Series**, v. 583, p. 161-173, 2017.
- JANZEN, F. J.; PHILLIPS, P. C. Exploring the evolution of environmental sex determination, especially in reptiles. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 19, p. 1775-1784, 2006.
- JENSEN, M. P. et al. Environmental warming and feminization of one of the largest sea turtle populations in the world. **Current Biology**, v. 28, p. 154-159, 2018.
- NOVAIS, R. A determinação sexual em répteis. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 27, n. 2, p. 289-295, 2010.
- TACCHI, G. L. et al. Sand granulometry influences incubation temperature and sex ratio in sea turtles. **Chelonian Conservation and Biology**, v. 18, n. 2, p. 159-168, 2019.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

XIAOHUI, L. et al. Epigenetic regulation of temperature-dependent sex determination in turtles. **Developmental Biology**, v. 478, p. 1-12, 2022.

ZALUSKI, A. F. O papel dos hormônios esteroides na determinação sexual de tartarugas. **Acta Biológica Catarinense**, v. 6, n. 1, p. 33-41, 2019.