

**MORFOLOGIA E EVOLUÇÃO  
DO CORAÇÃO NOS  
VERTEBRADOS: UMA  
REVISÃO**

**MORPHOLOGY AND EVOLUTION OF THE  
HEART IN VERTEBRATES: A REVIEW**

**Caio Henrique de Oliveira Carniatto**  
Unicesumar  
carniatto@usp.br

**Ana Paula Vidotti**  
UEM  
apvidotti@uem.br

**Larissa Renata de Oliveira Bianchi**  
UEM  
larissaoliveirabianchi@gmail.com

**Josiane Medeiros de Mello**  
UEM  
jmedeirosmello@gmail.com

**Resumo**

O coração é um órgão muscular e oco, presente em todos os vertebrados, tendo como principal função permitir a circulação do sangue no organismo, oxigenando e nutrindo os tecidos. A diversidade de espécies de vertebrados se reflete na diversidade morfológica, com padrões anatômicos distintos nas diferentes espécies. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo compilar estudos sobre o coração de vertebrados, com destaque a morfologia e a evolução cardíaca em peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos. Nos peixes, o coração é composto por quatro câmaras sequenciais, seio venoso, átrio, ventrículo e bulbo arterioso, com fluxo sanguíneo seguindo um sentido único. A transição do ambiente aquático para o terrestre exigiu adaptações para a sobrevivência em terra, como o desenvolvimento de átrios e ventrículos e circuitos duplos, pulmonar e sistêmico. Em anfíbios, o coração apresenta dois átrios e um ventrículo, assim como em répteis, com exceção dos crocódilianos, onde há um septo interventricular. Em animais homeotérmicos, aves e mamíferos, o coração é completamente dividido em átrios e ventrículos direito e esquerdo, com dupla circulação. Embora o coração apresente morfologia e topografia variáveis nos diferentes grupos, não há um coração mais evoluído e eficiente. Cada espécie apresenta uma estrutura cardíaca adaptada a suprir as necessidades fisiológicas e metabólicas do organismo, relacionadas e dependentes de fatores como estilo de vida e habitat.

**Palavras-chave:** anatomia comparada; sistema circulatório; zoologia

**Abstract**

The heart is a muscular and hollow organ, present in all vertebrates, having as main function allow the blood circulation in the organism, oxygenating and nourishing the tissues. The diversity of vertebrate species is reflected in the morphological diversity, with distinct anatomical patterns in the different species. In this sense, this work aims to compile studies on the heart of vertebrates, with emphasis on morphology and cardiac evolution in fish, amphibians, reptiles, birds and mammals. In fish, the heart consists of four sequential chambers, sinus venous, atrium, ventricle and arterial bulb, with blood flow following a single direction. The transition from the aquatic to the terrestrial environment required adaptations for survival on land, such as the development of atria and ventricles and double circuits, pulmonary and systemic. In amphibians, the heart has two atria and one ventricle, as well as reptiles, except for crocodylians, where there is an interventricular septum. In homeothermic animals, birds and mammals, the heart is completely divided into right and left atria and ventricles, with double circulation. Although the heart presents variable morphology and topography in different groups, there is no more evolved and efficient heart. Each species has a cardiac structure adapted to meet the physiological and metabolic needs of the body, related and dependent on factors such as lifestyle and habitat.

**Keywords:** circulatory system; comparative anatomy; zoology.

## 1- INTRODUÇÃO

Nos vertebrados, o sistema circulatório é, basicamente, um conjunto de tubos conectados responsáveis por transportar fluídos. Este sistema inclui os sistemas vasculares do sangue e da linfa. O sistema cardiovascular, por sua vez, é constituído pelo sangue, vasos e coração (BERGWERFF et al., 1999; MONAHAN-EARLEY; DVORAK; AIRD, 2013).

No desenvolvimento embrionário, o coração é tubular e apresenta batimentos autônomos rítmicos com a função de conduzir o sangue através da rede vascular em desenvolvimento. O sistema cardiovascular é o primeiro sistema a se tornar funcional no desenvolvimento embrionário, pois a diferenciação e o crescimento do embrião dependem do transporte interno (PELSTER; BEMIS, 1991; KARDONG, 2016).

Quando o coração embrionário já está formado, apresenta duas camadas: um endocárdio interno e um epimiocárdio externo. No coração maduro, o endocárdio apresenta uma camada espessa de tecido conjuntivo elástico, revestido por tecido endotelial. O epimiocárdio, quando amadurece, origina um epicárdio externo, que origina a membrana serosa que envolve o órgão e um miocárdio, o músculo do coração (HILDEBRAND, 2006).

O coração é a bomba responsável por movimentar o sangue pelo sistema cardiovascular. Também tem como função transportar o sangue desoxigenado e oxigenado para suas partes apropriadas, evitando assim a mistura dos sangues. Outra função é transportar hormônios do seu local de origem para os tecidos alvos (POUGH, 2008; KARDONG, 2016).

Nos vertebrados, o coração primitivo está localizado ventralmente (BISHOPRIC, 2005). Como este grupo apresenta diversas adaptações anatômicas, nas espécies que adotaram a posição bípede o coração está localizado na região anterior do corpo (HICKMAN et al., 2016).

Histologicamente, o coração é composto pelo músculo cardíaco, restrito a este órgão. Este músculo apresenta núcleos centrais e fibras estriadas ramificadas e divididas em unidades nucleadas por meio de discos intercalares (HILDEBRAND, 2006).

O coração começa o seu desenvolvimento quando as células partem da mesoderma esplâncnica para formar um par mediano de tubos endocárdicos. As células que permanecerem na mesoderma esplâncnica se proliferam, produzindo o epimiocárdio pareado. As células do tubo endocárdico e do epimiocárdio se desenvolvem sentido à linha mediana, se fundindo em um único coração tubular, localizado centralmente (KARDONG, 2011).

Os tubos endocárdicos fundidos dão origem ao revestimento endotelial cardíaco, o endocárdio; o epimiocárdio origina o miocárdio, extenso músculo cardíaco, assim como o fino peritônio visceral que recobre a superfície do coração (KARDONG, 2011).

Os animais apresentam diversas adaptações anatômicas, variando de acordo com a biologia, ecologia e habitat da espécie (OLSON, 2006; KOKUBO et al., 2010). No coração, notam-se as variações entre os arcos aórticos, inclusive entre animais do mesmo grupo, e variações anatômicas nas principais artérias anteriores em mamíferos. O destino dos arcos sistêmicos também varia de acordo com as espécies (KARDONG, 2016).

Entender a anatomia e o funcionamento cardíaco é fundamental no estudo evolutivo dos vertebrados, assim como em pesquisas sobre a fisiologia e o desenvolvimento de patologias no coração e em estruturas adjacentes. Atualmente, a cardiologia integra ciências básicas como a anatomia, fisiologia e mais recentemente a biologia molecular (CARABELLO, 2002). Também, entender a dinâmica cardíaca nas diferentes espécies permite o desenvolvimento e aprimoramento de procedimentos clínico-cirúrgicos como transplante cardíaco (HOUYEL et al., 2017; MOAYEDI et al., 2019) e pesquisas sobre regeneração cardíaca (VIVIEN; HUDON; PORRELLO, 2016; MAHMOUD; PORRELLO; 2018).

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo compilar estudos sobre o coração de vertebrados, com destaque a morfologia e a evolução cardíaca em peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos. Como método trata-se de um estudo descritivo, o qual foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica simples a partir de trabalhos publicados em base de dados científica.

## **2- DESENVOLVIMENTO**

### Morfologia do coração dos vertebrados

O coração é o órgão central do sistema cardiovascular, composto essencialmente por músculo cardíaco, o miocárdio, o qual forma uma bolsa dividida em quatro câmaras: átrio direito, átrio esquerdo, ventrículo direito e ventrículo esquerdo. Junto com os vasos sanguíneos, as câmaras cardíacas formam uma única cavidade, na qual o sangue circula continuamente (SILVERTHORN, 2017).

A principal função do coração é bombear sangue para os tecidos do corpo, transportando oxigênio e outras moléculas necessárias para o metabolismo celular. O coração também transporta hormônios para os tecidos alvo. As células atriais produzem peptídeos natriuréticos atriais, hormônio peptídeo que contribui para regular a pressão sanguínea. Em animais endotérmicos (aves e mamíferos), o coração também distribui calor, sendo responsável pela manutenção da temperatura interna do animal (DYCE; SACK; WENSING, 2010).

Externamente, o coração é envolto pelo pericárdio, uma cobertura fibrosserosa. Esta estrutura pode ser dividida em duas partes: parte fibrosa, central, e parte serosa interna e externa. O pericárdio pode ser subdividido em pleura pericárdica, pericárdio fibroso e pericárdio seroso. O coração se assemelha a um cone, sendo que sua base está localizada dorsalmente, e seu ápice ventralmente, próximo ao esterno. A base é o hilo do órgão, onde as grandes veias penetram e as grandes artérias deixam o coração (KÖNIG; RUBERTE; LIEBICH, 2016).

O sistema condutor cardíaco é formado por miócitos modificados, pois possuem maior diâmetro, mais líquido intracelular além de apresentar um maior teor de glicogênio, mas menos fibrilas. A característica mais marcante do tecido condutor é a capacidade de atividade elétrica espontânea que se espalha para o músculo adjacente. Isto é resultante de despolarização e contração, garantindo autonomia cardíaca fundamental para o ritmo inerente do coração (LIEM et al., 2012).

O sistema condutor cardíaco é constituído por: Nó sinoatrial: autônomo, inicia o ciclo cardíaco atuando como o marca-passo primário, garantindo a contração coordenada do coração. Está localizado abaixo do endocárdio da parede atrial direita, e é intensamente inervado pelos sistemas simpático e parassimpático. A partir do nó sinoatrial, o impulso excitatório se propaga para os tecidos vizinhos até o nó atrioventricular; Nó atrioventricular: localizado no septo atrioventricular próximo à abertura do seio coronário. Esses ramos estão localizados próximos ao endocárdio do septo interventricular; Fascículo atrioventricular ou Fascículo de His: estende-se ao septo interventricular, onde se bifurca originando ramos direito e esquerdo; Plexo subendocárdico ou fibras de Purkinje: ramificações distribuídas pelas paredes ventriculares, inferiormente ao endocárdio (SOMMER; WAUGH, 1978; TORTORA; DERRICKSON, 2010).

O coração é inervado pelo sistema nervoso autônomo. Todas as fibras nervosas formam o plexo cardíaco (*plexus cardiacus*) no mediastino cranial. Muitas dessas fibras

invadem o tecido condutor, especialmente os nós sinoatrial e atrioventricular (GALLEGO et al., 1997). Estímulos simpáticos aceleram a frequência e a força de contração dos batimentos, enquanto que a inervação parassimpática diminui esta frequência.

## Evolução do coração nos vertebrados

### Peixes

Sendo o grupo mais diverso entre os vertebrados, é notável a variedade morfológica cardíaca entre os peixes, dependente de fatores determinantes como hábitat e estilo de vida (GAMPERL; FARRELL, 2004). Nos peixes, o sistema circulatório apresenta apenas um fluxo contínuo em sentido único, composto por seio venoso, átrio, ventrículo e bulbo arterioso (ICARDO, 2006; MALDANIS et al., 2016; MORIYAMA et al., 2016), onde o sangue flui em uma direção caudo-cranial (LORENZALE et al., 2018). O seio venoso é a estrutura que recebe sangue venoso da circulação sistêmica (GRIMES; KIRBY, 2009), enquanto que o cone, ou bulbo arterioso (LAURENT; HOLMGREN; NILSSON, 1983), é o componente cardíaco mais primitivo na evolução dos vertebrados, sendo uma câmara contrátil que regula o fluxo do sangue (GUERRERO et al., 2004).

Na maioria das espécies, o coração bombeia uma corrente de sangue não oxigenado (HILDEBRAND, 2006), é alongado e formado por apenas um átrio e um ventrículo (OLSON, 2006; ASPINALL, 2009).

Nas lampreias, o coração apresenta quatro câmaras em série: seio venoso, átrio, ventrículo e cone arterioso (KOKUBO et al., 2010). O sangue que retorna do corpo entra no seio venoso, flui através do átrio e passa ao ventrículo. Em seguida é bombeado diretamente para a aorta ventral, a qual transporta o sangue para as brânquias (KARDONG, 2016). O ventrículo pode apresentar três formatos distintos, dependendo da estrutura do miocárdio: sacular, tubular ou piramidal (SANCHEZ-QUINTANA et al., 1995; SIMÕES et al., 2002).

Em peixes branquiais ósseos e cartilagosos, o coração é dividido em quatro câmaras: seio venoso, átrio, ventrículo e bulbo arterioso. O fluxo sanguíneo é simples, em sentido único (HU et al., 2000; TOTA; CERRA; GATTUSO, 2010; HICKMAN et al., 2016).

Em elasmobrânquios (tubarões e arraias), o átrio é uma câmara muscular, relativamente grande e com paredes finas. No ventrículo, as paredes são musculares e grossas.

O sangue flui do átrio para o ventrículo através de uma abertura, circundada por válvulas (HAMLETT et al., 1996).

Em peixes pulmonados, foi necessário remodelar as estruturas cardíacas e vasculares para suprir as exigências metabólicas e hemostáticas, incluindo adaptações na arquitetura capilar, desvios vasculares e estruturas anatômicas que minimizem a mistura do sangue oxigenado e desoxigenado no coração (OLSON, 1994; ICARDO et al., 2008). Neste grupo, o único átrio é dividido internamente por um septo interatrial, separando os átrios em uma câmara direita pequena e uma câmara esquerda grande. O ventrículo também é dividido por um septo, mas apenas em parte (HILDEBRAND, 2006; KARDONG, 2016). No peixe pulmonado *Protopterus aethiopicus*, a abertura atrioventricular não é circundada por válvulas, mas por um plugue fibrocartilaginoso (NAIR, 1976).

## **Anfíbios**

Nesse grupo, o coração é dividido em seio venoso, átrios direito e esquerdo separados por um septo interatrial, um ventrículo sem divisão interna e uma estrutura conhecida como *bulbus cordis*, equivalente ao cone arterioso nos peixes (VICTOR; NAYAK, 2000; MOORMAN; CHRISTOFFELS, 2003; TOTA; CERRA; GATTUSO, 2010; KARDONG, 2016).

Ao contrário do que é descrito em peixes cartilaginosos marinhos (tubarão-martelo, tubarão-cachorro e tubarão-tigre) e no peixe ósseo *Scomberomorus commersonii*, o coração dos anfíbios é assimétrico (VICTOR; NAYAK; RAJASINGH, 1999; JAHR; MÄNNER, 2011). O átrio pode ser dividido anatomicamente por um septo, formando as câmaras direita e esquerda. O sangue que vem das veias sistêmicas flui para o lado direito do coração e o sangue proveniente dos pulmões flui para o lado esquerdo do coração (POUGH, 2008). O ventrículo dos anfíbios apresenta uma divisão variável entre as espécies, onde esta divisão está relacionada com a importância fisiológica da respiração pulmonar (POUGH, 2008).

## **Répteis**

A transição do ambiente aquático para o ambiente terrestre exigiu mudanças anatômicas no sistema circulatório das aves, mamíferos e crocodilianos, dividindo o coração

em lados direito e esquerdo, separação a circulação em sistêmica e pulmonar, sendo a chave do sucesso evolutivo da endotermia (KOSHIBA-TAKEUCHI et al., 2009).

Com exceção dos crocodilianos, o coração dos répteis é tricavitário, ou seja, dividido em três câmaras: dois átrios e um ventrículo (GOULART, 2007). Comparado aos anfíbios, o seio venoso dos répteis é reduzido, mas retém a mesma função (KARDONG, 2016).

Nos crocodilianos, o coração está alojado na região antero-ventral torácica, e é constituído por um pequeno seio venoso, duas aurículas e dois ventrículos. Não há, portanto, mistura de sangue nos ventrículos; esta mistura ocorre no forame de panizza, pequena abertura entre os dois vasos (SUMMERS, 2005).

Em serpentes, assim como os demais órgãos internos, o coração é alongado, pois acompanha o formato do corpo destas espécies (BERNARDE, 2014).

### **Aves e Mamíferos**

Os mamíferos e o táxon Archosauria, que compreende as aves e os crocodilianos, apresentam um septo interventricular que divide completamente os ventrículos nas porções direita e esquerda (POELMANN et al., 2014).

Aves e mamíferos possuem circulação completamente dupla: um circuito pulmonar de baixa pressão (lado direito) e um circuito sistêmico de alta pressão (lado esquerdo) (HILDEBRAND, 2006).

O lado direito do coração reúne o sangue desoxigenado dos tecidos sistêmicos e o bombeia para o circuito pulmonar. No lado esquerdo, o sangue oxigenado é bombeado do dos pulmões para o circuito sistêmico (KARDONG, 2016).

O coração das aves é grande e apresenta alta velocidade de fluxo sanguíneo. Nesse grupo o seio venoso é vestigial (POUGH, 2008). O cone arterioso, ou bulbo cardíaco, é apenas uma câmara embrionária transitória (KARDONG, 2016).

### **Considerações Finais**

Um coração de peixe, considerado primitivo, apresenta circulação simples já que, no ambiente aquático, o animal encontra um excelente meio de dispersão de gases, facilitando a obtenção e distribuição de oxigênio nos tecidos.

A colonização do ambiente terrestre promoveu adaptações funcionais e estruturais no sistema circulatório dos vertebrados, pois a vida na terra exigiu modificações no plano corporal e na anatomia dos órgãos, otimizando a eficiência cardíaca e a perfusão dos tecidos. Os anfíbios, primeiro grupo evolutivo a colonizar ambientes terrestres, apresentam variações na anatomia cardíaca, mas compartilham um plano básico com dois átrios e um ventrículo. Répteis são considerados mais eficientes se observadas as adaptações cardíacas em relação aos peixes e anfíbios, com presença de dois átrios e ventrículo parcialmente dividido.

A evolução de animais homeotermos (animais que mantém a temperatura constante), aves e mamíferos impôs novas exigências ao sistema cardiovascular devido a demanda metabólica para produção e distribuição de calor, além de manter o sangue circulando, com ritmo e constância, ininterruptamente ao longo da vida do animal.

Contudo, não há um coração mais evoluído dentre os vertebrados; cada espécie apresenta adaptações cardíacas que suprem suas demandas de suprimento de oxigênio e distribuição sanguínea, sendo eficiente no modo de vida e nas exigências de cada espécie.

## REFERÊNCIAS

BERGWERFF, M.; DERUITER, M. C.; GROOT, A. C. G. Comparative anatomy and ontogeny of the ductus arteriosus, a vascular outsider. *Anatomy and Embryology*, v. 200, p. 559-571, 1999.

BERNARDE, P. S. Serpentes peçonhentas e acidentes ofídicos no Brasil. São Paulo: Anolisbooks, 2014. 223 p.

BISHOPRIC, N. Evolution of the heart from bacteria to man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1047, p. 13-29, 2005.

CARABELLO, B. A. Evolution of the study of left ventricular function: everything old is new again. *Circulation*, v. 11, n. 105, p. 1602-1608, 2002.

DYCE, K. M.; SACK, W. O.; WENSING, C. J. G. Tratado de anatomia veterinária. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 856 p.

GALLEGO, A.; DURÁN, A. C.; ANDRÉS, A. V.; NAVARRO, P.; MUÑOZ-CHÁPULI, R. Anatomy and development of the sinoatrial valves in the dogfish (*Scyliorhinus canicula*). The Anatomical Record, v. 248, p. 224-232, 1997.

GAMPERL, A. K.; FARRELL, A. P. Cardiac plasticity in fishes: environmental influences and intraspecific differences. The Journal of Experimental Biology, v. 207, p. 2539-2550, 2004.

GUERRERO, A.; ICARDO, J. M.; DURÁN, A. C.; GALLEGO, A.; DOMEZAIN, A.; COLVEE, E.; SANS-COMA, V. Differentiation of the cardiac outflow tract components in alevins of the sturgeon *Acipenser naccarii* (Osteichthyes, Acipenseriformes): implications for heart evolution. Journal of Morphology, v. 260, p. 172-183, 2004.

GRIMES, A. C.; KIRBY, M. L. The outflow tract of the heart in fishes: anatomy, genes and evolution. Journal of Fish Biology, v. 74, p. 983-1036, 2009.

ICARDO, J. M. Conus arteriosus of the teleost heart: dismissed, but not missed. The Anatomical Record Part A, v. 288, p. 900-908, 2006.

ICARDO, J. M.; AMELIO, D.; GAROFALO, F.; COLVEE, E.; CERRA, M. C.; WONG, W. P.; TOTA, B.; IP, Y. K. The structural characteristics of the heart ventricle of the African lungfish *Protopterus dolloi*: freshwater and aestivation. Journal of Anatomy, v. 213, p. 106-119, 2008.

HAMLETT, W. C.; SCHWARTZ, F. J.; SCHMEINDA, R.; CUEVAS, E. Anatomy, histology, and development of the cardiac valvular system in elasmobranchs. The Journal of Experimental Zoology, v. 275, p. 83-94, 1996.

HICKMAN, C. P.; ROBERTS, L. S.; KEEN, S. L.; EISENHOUR, D. J.; LARSON, A.; LANSON, H. Princípios integrados de zoologia. 16 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016. 937 p.

HILDEBRAND, M.; GOSLOW, G. E. Análise da estrutura dos vertebrados. 2 ed. São Paulo: Atheneu, 2006. 637 p.

HOUYEL, L.; TO-DUMORTIER, N.T.; LEPERS, Y.; PETIT, J.; ROUSSIN, R.; LY, M.; LEBRET, E.; FADEL, E.; HÖRER, J.; HASCOËT, S. Heart Transplantation in adults with congenital heart disease. *Archives of Cardiovascular Disease*, v. 110, p. 346-353, 2017.

HU, N.; SEDMERA, D.; YOST, H. J.; CLARK, E. B. Structure and function of the developing zebra fish heart. *The Anatomical Record*, v. 260, p. 148-157, 2000.

Jahr, M.; MÄNNER, J. Development of the venous pole of the heart in the frog *Xenopus laevis*: a morphological study with special focus on the development of the venoatrial connections. *Development Dynamics*, v. 240, p. 1518-1527, 2011.

JOHANSEN, K.; HANSON, D. Functional anatomy of the hearts of lungfishes and amphibians. *American Zoologist*, v. 8, p. 191-210, 1968.

KARDONG, K. V. Vertebrados: anatomia comparada, função e evolução. 7 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2016. 788 p.

KOKUBO, N.; MATSUURA, M.; ONIMARU, K.; TIECKE, E.; KURAKU, S.; KURATANI, S.; TANAKA, M. Mechanisms of heart development in the Japanese lamprey, *Lethenteron japonicum*. *Evolution & Development*, v. 12, n. 1, p. 34-44, 2010.

KOSHIBA-TAKEUCHI, K.; MORI, A. D.; KAYNAK, B. L.; CEBRA-THOMAS, J.; SUKONNIK, T.; GEORGES, R. O.; LATHAM, S.; BECK, L.; HENKELMAN, R. M.; BLACK, B. L.; OLSON, E. N.; WADE, J.; TAKEUCHI, J. K.; NEMER, M.; GILBERT, S. F.; BRUNEAU, B. G. Reptilian heart development and the molecular basis of cardiac chamber evolution. *Nature*, v. 461, p. 95-98, 2009.

KÖNIG, H. E.; RUBERTE, J.; LIEBICH, H.-G. Sistema circulatório (systema cardiovasculare). In: KÖNIG, H. E.; LIEBICH, H.-G. Anatomia dos animais domésticos: texto e atlas colorido. Porto Alegre: Artmed, 2016. 804 p. p. 451-480.

LAURENT, P.; HOLMGREN, S.; NILSSON, S. Nervous and humoral control of the fish heart: structure and function. *Comparative Biochemistry and Physiology*, v. 76, n. 3, p. 525-542, 1983.

LIEM, K. F., BEMIS, W. E., WALKER JR, W. F.; GRANDE, L. *Anatomia funcional dos vertebrados: uma perspectiva evolutiva*. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 705p.

LORENZALE, M.; LÓPEZ-UNZU, M. A.; RODRÍGUEZ, C.; FERNÁNDEZ, B.; DURÁN, A. C.; SANS-COMA, V. The anatomical components of the cardiac outflow tract of chondrichthyans and actinopterygians. *Biological Reviews*, v. 93, p. 1604-1619, 2018.

MAHMOUD, A. I.; PORRELLO, E. R. Upsizing neonatal heart regeneration. *Circulation*, v. 138, p. 2817-2819, 2018.

MALDANIS, L.; CARVALHO, M.; ALMEIDA, M. R.; FREITAS, F. I.; ANDRADE, J. A. F. G.; NUNES, R. S.; ROCHITTE, C. E.; POPPI, R. J.; FREITAS, R. O.; RODRIGUES, F.; SILJESTRÖM, S.; LIMA, F. A.; GALANTE, D.; CARVALHO, I. S.; PEREZ, C. A.; CARVALHO, M. R.; BETTINI, J.; FERNANDEZ, V.; XAVIER-NETO, J. Heart fossilization is possible and informs the evolution of cardiac outflow tract in vertebrates. *eLife*, v. 5, p. 1-12, 2016.

MOAYEDI, Y.; KOZUSZKO, S.; KNOWLES, J. W.; CHIH, S.; ORO, G.; LEE, R.; FEARON, W. F.; ROSS, H. J.; TEUTEBERG, J. J.; KHUSH, K. K. Safety and efficacy of PCSK9 inhibitors after heart transplantation. *Canadian Journal of Cardiology*, v. 35, p. 104.e1-104.e3, 2019.

MONAHAN-EARLEY, R.; DVORAK, A. M.; AIRD, W. C. Evolutionary origins of the blood vascular system and endothelium. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, v. 11, s. 1, p. 46-66, 2013.

MOORMAN, A. F. M.; CHRISTOFFELS, V. M. Cardiac chamber formation: development, genes, and evolution. *Physiological Reviews*, v. 83, p. 1223-1267, 2003.

MORIYAMA, Y.; ITO, F.; TAKEDA, H.; YANO, T.; OKABE, M.; KURAKU, S.; KEELEY, F. W.; KOSHIBA-TAKEUCHI, K. Evolution of the fish heart by sub/neofunctionalization of an elastin gene. *Nature Communications*, v. 19, n. 7, p. 1-10, 2016.

NAIR, M. G. K. Some observations on the anatomy of the heart of the African lung fish, *Protopterus aethiopicus* Heckel. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section B*, v. 84, n. 1, p. 6-11, 1976.

OLSON, E. N. Gene regulatory networks in the evolution and development of the heart. *Science*, v. 313, p. 1922-1927, 2006.

OLSON, K. R. Circulation anatomy in bimodally breathing fish. *American Zoologist*, v. 34, p. 280-288, 1999.

POUGH, F. H.; JANIS, C. M.; HEISER, J. B. *A vida dos vertebrados*. 4 ed. São Paulo: Atheneu, 2008. 684 p.

PELSTER, B.; BEMIS, W. E. Ontogeny of heart function in the little skate *Raja erinacea*. *The Journal of Experimental Biology*, v. 156, p. 387-398, 1991.

POELMANN, R. E.; GROOT, A. C. G.; VICENTE-STEIJN, R.; WISSE, L. J.; BARTELINGS, M. M.; EVERTS, S.; HOPPENBROUWERS, T.; KRUIHOF, B. P. T.; JENSEN, B.; BRUIN, P. W.; HIRASAWA, T.; KURATANI, S.; VONK, F.; VAN DE PUT, J. M. M. S.; BAKKER, M. A.; RICHARDSON, M. K. Evolution and development of ventricular septation in the amniote heart. *PLoS One*, v. 9, n. 9, p. 1-11, 2014.

RANDALL, D. J. Functional morphology of the heart in fishes. *American Zoologist*, v. 8, p. 179-189, 1968.

SANCHEZ-QUINTANA, D.; GARCIA-MARTINEZ, V.; CLIMENT, V.; HURLE, J. M. Morphological analysis of the fish heart ventricle: myocardial and connective tissue architecture in teleost species. *Annals of Anatomy*, v. 177, p. 267-274, 1995.

SILVERTHORN, D. U. *Fisiologia humana: uma abordagem integrada*. 7 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 930 p.

SIMÕES, K.; VICENTINI, C. A.; ORSI, A. M.; CRUZ, C. Myoarchitecture and vasculature of the heart ventricle in some freshwater teleosts. *Journal of Anatomy*, v. 200, p. 467-475, 2002.

SOMMER, J. R.; WAUGH, R. A. Ultrastructure of heart muscle. *Environmental Health Perspectives*, v. 26, p. 159-167, 1978.

SUMMERS, A. P. Warm-hearted crocs. *Nature*, v. 434, p. 833-834, 2005.

TORTORA, G. J.; DERRICKSON, B. *Princípios de anatomia e fisiologia*. 12 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 1228 p.

TOTA, B.; CERRA, M. C.; GATTUSO, A. Catecholamines, cardiac natriuretic peptides and chromogranin A: evolution and physiopathology of a 'whip-brake' system of the endocrine heart. *The Journal of Experimental Biology*, v. 213, p. 3081-3103, 2010.

VICTOR, S.; NAYAK, V. M. *Evolutionary anticipation of the human heart. The Royal College of Surgeons of England*, v. 82, p. 287-302, 2000.

VICTOR, S.; NAYAK, V. M.; RAJASINGH, R. Evolution of the ventricles. *Texas Heart Institute Journal*, v. 26, n. 3, p. 168-176, 1999.

VIVIEN, C. J.; HUDSON, J. E.; PORRELLO, E. R. Evolution, comparative biology and ontogeny of vertebrate heart regeneration. *npj Regenerative Medicine*, v. 1, p. 1-14, 2016.