

MORFOFISIOLOGÍA CARDÍACA

Cardiac Morphophysiology

José Julián Bernal Sánchez

Universidad Santiago de Cali

Universidad del Valle

© <https://orcid.org/0000-0001-9708-8536>

✉ jose.bernal00@usc.edu.co

Resumen

El corazón es un órgano de composición músculo membranosa, encargado de recibir y bombear la sangre hacia el cuerpo. Se encuentra ubicado en el mediastino medio, envuelto por pericardio. Constituido por 4 cámaras (2 atrios y 2 ventrículos), separadas por el tabique cardíaco, quien divide el corazón fisiológicamente en “corazón derecho” y “corazón izquierdo”. Las cámaras auriculares y ventriculares están separadas por las válvulas auriculoventriculares. En el lado derecho la válvula tricúspide y en el lado izquierdo la válvula mitral. El control del flujo de la arteria aorta está dado por la válvula aórtica (semilunar), sitio donde emergen las arterias coronarias. La arteria coronaria derecha nace del seno coronario derecho, mientras la arteria coronaria izquierda del seno coronario izquierdo. La dominancia de la irrigación cardíaca determina el

Cita este capítulo

Bernal Sánchez, J. J. (2024). Morfofisiología cardíaca. En: *Revascularización miocárdica: tópicos selectos para profesionales de la salud*, Tomo I: fundamentos teóricos y fisiopatológicos. Lozada Ramos, H; Daza Arana, J, E. (Editores científicos) (pp. 25-53). Cali, Colombia: Editorial Universidad Santiago de Cali; 2024.

patrón anatómico de irrigación coronaria de la región posterior del corazón. La dominancia del sistema coronario está definida según la arteria que emerge de la rama interventricular posterior (ADP). El sistema de conducción eléctrico cardíaco, lo constituye un conjunto de células especializadas que inician el latido cardíaco y coordina la contracción de las cámaras cardíacas. Este sistema se inicia generalmente por estímulos en el nodo sinoauricular (SA). El gasto cardíaco es el producto de la frecuencia cardíaca (FC) y el volumen sistólico (VS). La frecuencia cardíaca se define más comúnmente como la cantidad de veces que el corazón late en un minuto y está regulado por actividad del sistema nervioso autónomo.

Palabras clave: corazón, fisiología, anatomía (Fuente: MeSH).

Abstract

The heart is an organ of membranous muscle composition, in charge of receiving and pumping blood to the body. It is located in the middle mediastinum, surrounded by pericardium. Made up of 4 chambers (2 atria and 2 ventricles), separated by the cardiac septum, which physiologically divides the heart into a “right heart” and a “left heart”. The atrial and ventricular chambers are separated by the atrioventricular valves. On the right side the tricuspid valve and on the left side the mitral valve. Control of the flow of the aorta artery is given by the aortic valve (semilunar), the site where the coronary arteries emerge. The right coronary artery arises from the right coronary sinus, while the left coronary artery from the left coronary sinus. The dominance of the cardiac supply determines the anatomical pattern of coronary supply to the posterior region of the heart. The dominance of the coronary system is defined according to the artery emerging from the posterior interventricular branch (ADP). The cardiac electrical conduction system is made up of a set of specialized cells that initiate the heartbeat and coordinate the contraction of the cardiac chambers. This system is generally

initiated by stimuli at the sinus atrial (SA) node. Cardiac output is the product of heart rate (HR) and stroke volume (SV). Heart rate is more commonly defined as the number of times the heart beats in one minute and is regulated by activity of the autonomic nervous system.

Keywords: heart, physiology, anatomy (Source: MeSH).

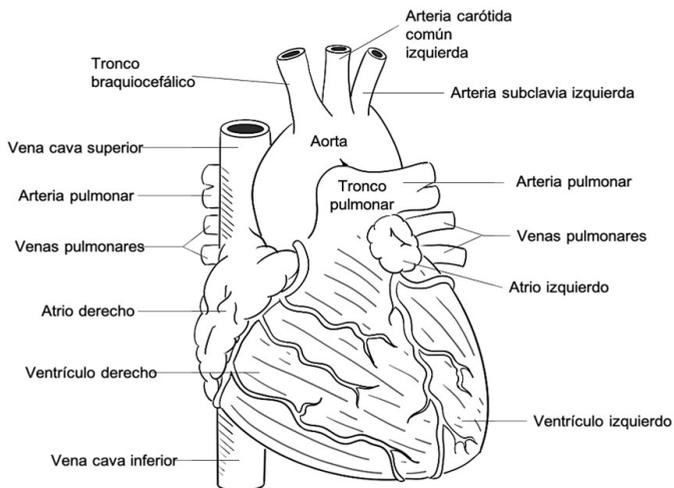
Introducción

El corazón es un órgano de composición músculo membranosa proporcional al área corporal del tamaño de un puño, ubicado espacialmente en el mediastino medio, al igual que el origen de los grandes vasos. Está compuesto básicamente por una doble bomba, cuyas partes reciben y envían sangre a todos los lugares del cuerpo. Clínicamente se describen como un “corazón derecho” y un “corazón izquierdo”.

El corazón posee forma de “pirámide invertida”, de vértice inferior dirigida hacia delante y ligeramente a la izquierda, y base superior dirigida hacia atrás, desde donde se observan la aurícula izquierda (AI), una pequeña porción de la aurícula derecha (AD) y la parte proximal de las grandes venas (vena cava superior e inferior y venas pulmonares [1]). Sus lados están formados por una cara inferior (diafragmática), una anterior (esternocostal), una pulmonar derecha e izquierda.

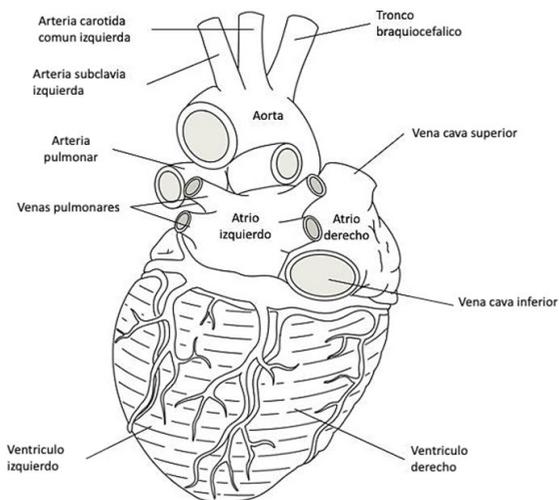
La cara anterior está formada por el ventrículo derecho (VD) y parte del ventrículo izquierdo (VI), separados por el surco interventricular anterior, que se continúa hacia la cara pulmonar izquierda junto con una porción de la AI (Figura 1.1). La cara diafragmática es el apoyo directo sobre el centro tendinoso del músculo diafragma. Está formada por el VI y una pequeña porción del VD, quienes se encuentran separados por el surco interventricular posterior (Figura 1.2).

Figura 1.1. Corazón cara anterior o esternocostal - grandes vasos



Fuente: elaboración propia.

Figura 1.2. Corazón cara diafragmática - grandes vasos



Fuente: elaboración propia.

Anatómicamente, el corazón está compuesto de tres capas. De afuera hacia adentro tenemos:

1. Pericardio: la capa más externa, cubre el corazón como un saco de tejido y tiene en sí tres envolturas (Figura 1.3).

a. Pericardio fibroso (capa firme, más externa).

b. Pericardio seroso (consta de dos láminas).

1). Lámina parietal (adherida al pericardio fibroso).

2). Lámina visceral, también conocido como pericardio seroso (capa más interna del pericardio), la cual se une directamente al borde externo del tejido miocárdico. Normalmente, existe un espacio entre las capas pericárdicas visceral y parietal, el que se llena con unos pocos mililitros de tejido seroso. Este líquido tiene función de lubricante entre las dos capas y permite el deslizamiento de ellas.

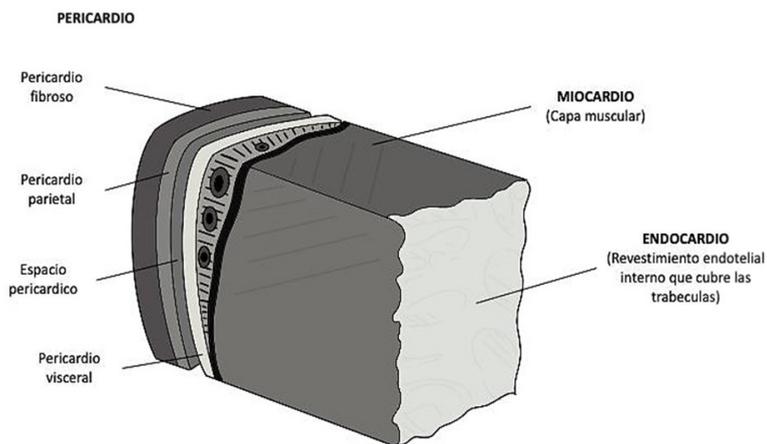
2. Miocardio: la capa media, tiene el papel esencial de contracción y está compuesto principalmente de:

a. Tejido muscular miocárdico.

b. Sistema vascular coronario.

3. Endocardio: la capa más interna, tapiza el espacio interno de las cámaras del corazón [2].

Figura 1.3. Capas del corazón. Sección transversal de la pared del corazón, donde se evidencian las láminas del pericardio, miocardio y endocardio



Fuente: Roberts DA. *Mastering the 12-Lead EKG* [Internet]. 2.^a ed. New York, NY: Springer Publishing Company; 2019.

Cámaras cardíacas. El corazón se divide en dos mitades gracias a un tabique denominado tabique cardíaco. De cada lado del tabique el corazón se divide en dos cámaras (derecha e izquierda), y a su vez cada lado está dividido en porción superior (aurícula) e inferior (ventrículo).

1. Aurícula (atrio) derecha. Conformar la porción posterior derecha del corazón. Se ubican dentro de ella varios orificios o entradas vasculares: vena cava superior, vena cava inferior y el seno coronario. Adicionalmente, en la parte superior anterior de la cavidad se encuentra la orejuela, una bolsa o prolongación de forma cónica que aumenta la capacidad (volumen) de la aurícula.

Internamente, la AD se constituye de una pared posterior lisa y delgada (seno venoso), en la que se ubican las venas cavas (superior e inferior) y el seno coronario, donde ingresa sangre proveniente del sistema

venoso (menos oxígeno). Esta pared tiene una característica rugosa, propia de los músculos pectíneos que configuran la pared interna.

La porción del tabique interauricular, que separa las aurículas, posee una pequeña depresión denominada fosa oval. Este declive es el remanente del foramen oval, el cual permite una comunicación interauricular durante el periodo embrionario en la circulación feto-madre. La porción inferior de la AD corresponde a un orificio que se comunica directamente con el ventrículo del mismo lado, y está separado por la válvula tricúspide [3].

2. Ventrículo derecho. El VD es la porción más voluminosa de la cara anterior del corazón. Desde esta cara anterior se observa una pequeña porción diafragmática y el borde inferior. El interior de esta cavidad tiene unas elevaciones musculares irregulares llamadas trabéculas cavernosas.

La sangre proveniente de la AD pasa al VD a través de la válvula tricúspide u orificio auriculoventricular derecho, la cual se localiza por detrás del IV y V espacios intercostales.

La válvula tricúspide está rodeada de un anillo fibroso, el que mantiene constante el calibre del orificio y resiste la dilatación que puede resultar de las diferentes presiones sanguíneas (Figura 1.4). La válvula tricúspide protege y separa el orificio auriculoventricular derecho. Gracias a este anillo fibroso, el orificio auriculoventricular permanece abierto y permeable, mientras que las cúspides valvulares (valvas) se unen en cada latido.

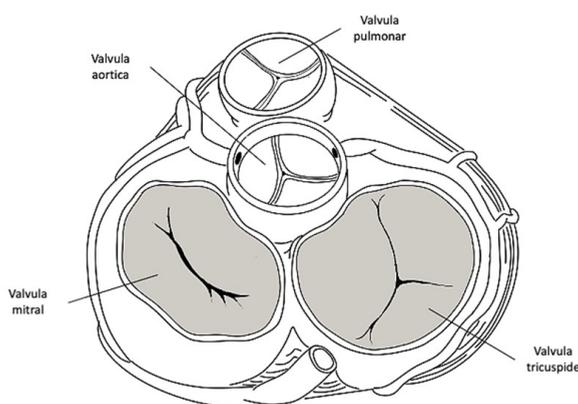
La válvula tricúspide está compuesta de tres valvas: anterior, posterior y septal; las que se unen a las cuerdas tendinosas a partir de los vértices de los músculos papilares, los cuales son:

a. Músculo papilar anterior. Es el de mayor tamaño, nace de la pared anterior del VD. Su cuerda tendinosa se une a la valva anterior y posterior de la válvula tricúspide.

b. Músculo papilar posterior. Es más pequeño que el anterior, surge de la pared inferior del VD y sus cuerdas tendinosas se unen a la valva posterior y septal.

c. Músculo papilar septal. Surge del lado derecho del tabique interventricular (TIV), y sus cuerdas tendinosas se unen a las valvas anterior y septal de la válvula tricúspide.

Figura 1.4. Válvulas cardíacas (vista superior)



Fuente: Shivani G. Aortic valve anatomy. Medscape. 2016. <https://emedicine.medscape.com/article/1922899-overview>.

Tabique interventricular: Su función es separar los dos ventrículos. Tiene convexidad hacia la derecha, tanto que, el VI forma una convexidad en el interior del VD. Su cara izquierda, por el contrario, es cóncava [4]. Está compuesto por una porción muscular y una membranosa, al igual que el resto del tejido cardíaco. Se adelgaza hacia atrás y arriba, por lo que se conoce como la porción membranosa del tabique.

Orificio del tronco pulmonar: Se ubica en la porción de salida del VD. Comprende una porción ventricular y el orificio arterial propiamente dicho.

a. Porción ventricular: Es la porción músculo-membranosa que precede al orificio del tronco pulmonar. Es una región de superficie lisa no trabeculada que da paso a la arteria pulmonar. En su límite posterior existe un relieve muscular arqueado que se corresponde con la cresta supra ventricular, también conocido como cono arterioso.

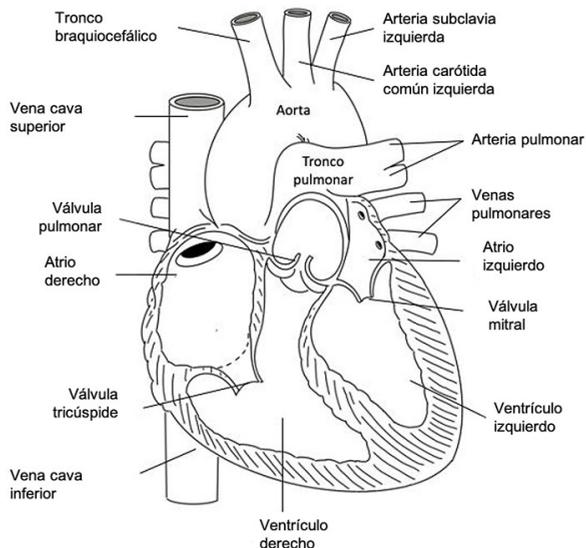
b. Orificio del tronco pulmonar: Está constituido por una fina lámina insertada de tejido fibroso, siguiendo una línea semilunar en la pared muscular del ventrículo, tapizada por endotelio proveniente del endocardio, que se continúa por el tronco de la arteria pulmonar. De esta porción endotelial se desprenden las tres valvas semilunares (sigmoideas), una anterior y dos posteriores (derecha e izquierda), que se mantienen unidas durante la diástole y se abren durante la sístole ventricular para garantizar el flujo sanguíneo.

3. Aurícula (atrio) izquierda. Es una cavidad de menor tamaño que la AD, y al igual que esta, presenta una evaginación: la orejuela izquierda. La AI recibe la sangre del pulmón a través de las venas pulmonares por su cara posterior, dos de ellas cerca del tabique interauricular y las otras dos alejadas hacia la izquierda. Un pequeño surco separa externamente esta estructura del VI (surco auriculoventricular).

La AI se encuentra ubicada en la base del corazón y por eso entra en íntimo contacto con la aorta descendente, el esófago y la columna vertebral.

El interior de la AI se caracteriza por tener paredes lisas y una orejuela similar al lado derecho. La aurícula contiene los músculos pectíneos y posee una pared ligeramente más gruesa que la AD. Está separada de la AD por el tabique interauricular (TIA), que se inclina hacia atrás y a la derecha. La superficie inferior de la cámara se separa del VI por el orificio auriculoventricular izquierdo, donde se inserta la válvula mitral (bicúspide) (Figura 1.5).

Figura 1.5. Cámaras cardíacas



Fuente: elaboración propia.

1. Ventrículo izquierdo. Forma el vértice del corazón y se ubica en la parte anterior de la AI. Comprende una gran superficie, ocupando y configurando parte de la cara anterior diafragmática, pulmonar izquierda y también formando el vértice del corazón. El VI tiene forma de cono, alargado y configurado por la capa muscular de miocardio más gruesa. Posee trabéculas carnosas igual que el VD, teniendo en cuenta que las izquierdas son más finas.

El orificio auriculoventricular izquierdo controla el flujo sanguíneo desde la AI. Este orificio se abre en la parte superior del VI en el lado posterior medial de la cámara, y se cierra durante la contracción ventricular, accionando (cerrando) la válvula auriculoventricular izquierda (mitral), también conocida como bicúspide, gracias a que posee dos valvas (anterior y posterior). Las bases de las valvas están fijadas a un anillo fibroso que rodea el agujero y las valvas que se continúan una con otra en las comisuras. La acción de las cuerdas

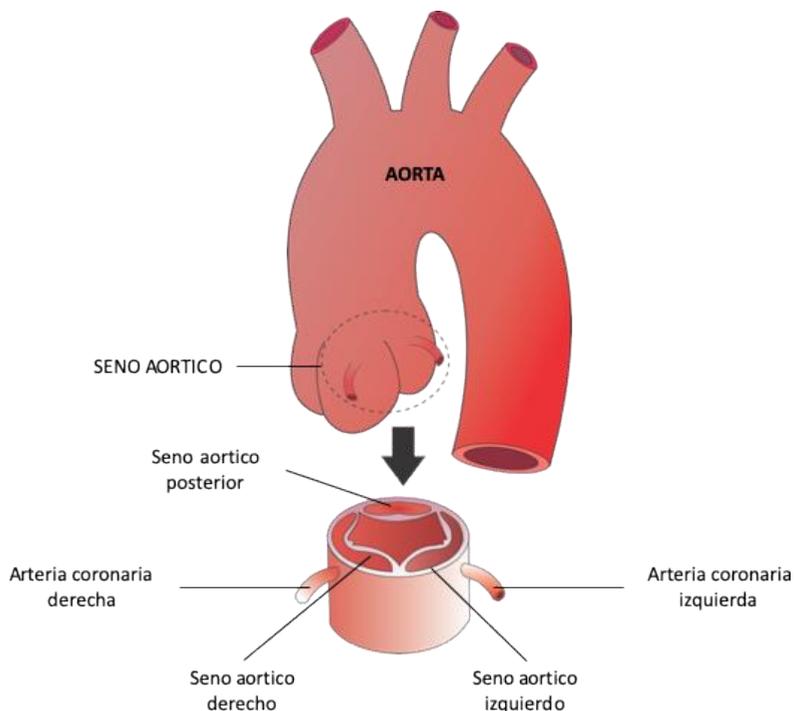
tendinosas y músculos papilares influyen la posición de la válvula mitral, al igual que en el lado derecho con la válvula tricúspide.

El TIV que divide los ventrículos forma la pared anterior y parte de la pared derecha del VI. Posee dos partes: muscular y membranosa. La porción muscular es gruesa y forma la mayor parte del tabique, mientras que la porción membranosa es la parte más fina y superior de este punto. Se puede considerar una tercera porción del tabique, la zona auriculoventricular, debido a su posición por encima de las valvas septales de la válvula tricúspide. Esta localización superior hace que parte del tabique se encuentre entre el VI y la AD.

Vascularización e inervación del corazón. Está dado por el sistema arterial coronario. Las arterias coronarias transportan sangre desde el sistema aórtico hacia la mayor parte del miocardio y las capas del corazón (endocardio y parte del subendocardio). Estas arterias coronarias tienen su origen en la raíz aórtica, por encima de los senos de Valsalva, y discurren por la superficie del epicardio hasta hacerse finalmente intramiocárdicas.

Las arterias coronarias derechas (ACD) e izquierda (ACI) surgen de los senos aórticos correspondientes en la parte proximal de la aorta ascendente, justo por encima de la válvula aórtica. Cada arteria coronaria posee una luz a cada lado de la aorta (Figura 1.6).

Figura 1.6. Seno aórtico y arterias coronarias

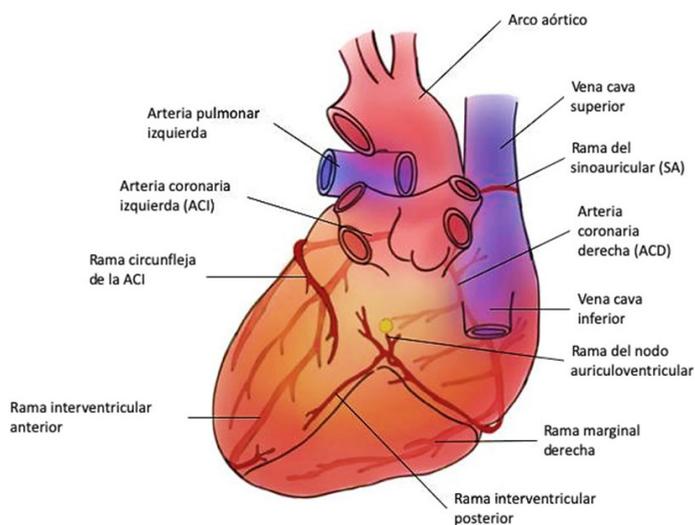


Fuente: Moore KL, Dalley AF, Agur AMR, Gutiérrez A, Ángeles Castellanos AM. *Anatomía con orientación clínica*. 2018.

1. Arteria coronaria izquierda (ACI). Surge del seno aórtico izquierdo de la aorta ascendente, justo en la raíz. Esta arteria discurre entre la orejuela izquierda y el tronco pulmonar, luego desciende por el surco coronario (en aproximadamente el 40% de la población la rama arterial del nodo SA se deriva de la ACI). Luego de cruzar el surco coronario en el extremo superior la ACI se divide en 2 ramas, la rama interventricular izquierda (clínicamente conocida como rama descendente anterior) y la rama circunfleja (CX) (Figura 1.7 y Figura 1.8).

La rama interventricular izquierda se dirige inferiormente sobre el surco hasta el vértice del corazón, donde gira posteriormente. Allí, normalmente, se anastomosa con la rama interventricular posterior

Figura 1.8. Circulación coronaria posterior



2. Arteria coronaria derecha (ACD). Esta arteria emerge del seno aórtico derecho de la aorta ascendente, y pasa por el lado derecho del tronco pulmonar, para dirigirse hacia el surco coronario. En el 60 % de los seres humanos, aproximadamente, da origen a una rama para el nodo sinoauricular ascendente que irriga el nodo. Al igual que la ACI recorre el surco coronario y da una rama marginal derecha que irriga el borde derecho del corazón, mientras discurre hacia el vértice del corazón sin alcanzarlo. Se continúa posterior y hacia la izquierda hasta alcanzar la cruz del corazón (unión del tabique y las paredes de las 4 cámaras), donde se origina la rama para el nodo auriculoventricular (Figura 1.8).

Generalmente la ACD irriga:

- La AD.
- La mayor parte del VD.
- Porción de la superficie diafragmática del corazón.
- El nodo SA, en aproximadamente el 60 % de la población.
- El nodo AV, en aproximadamente el 80 % de la población.

Tabla 1. 1. Distribución de la circulación coronaria

Arteria	Origen	Curso	Distribución
Coronaria derecha	Seno aórtico derecho	Sigue el surco coronario entre aurículas y ventrículos	Aurícula derecha, nodos SA y AV, y parte posterior del tabique interventricular
Nodo SA	Arteria coronaria derecha (60 %)	Asciende al nodo SA	Tronco pulmonar y nodo SA
Marginal derecha	Arteria coronaria derecha	Pasa al margen inferior del corazón y el vértice	Ventrículo derecho y vértice del corazón
Interventricular posterior	Arteria coronaria derecha (67 %)	Discurre en el surco IV posterior vértice del corazón	Ventrículos derecho e izquierdo y tercio posterior del TIV
Nodo AV	Arteria coronaria derecha cerca del origen de la arteria IV posterior	Pasa al nodo AV	Nodo AV
Coronaria izquierda	Seno aórtico izquierdo	Discurre en el surco AV y da las ramas IV anterior y circunfleja	Mayor parte de la aurícula y ventrículo izquierdo, tabique interventricular y haces AV; puede irrigar todo el nodo AV
Nodo SA	Rama circunfleja (40 %)	Asciende por la superficie posterior de la aurícula izquierda hasta el nodo SA	Aurícula izquierda y nodo SA

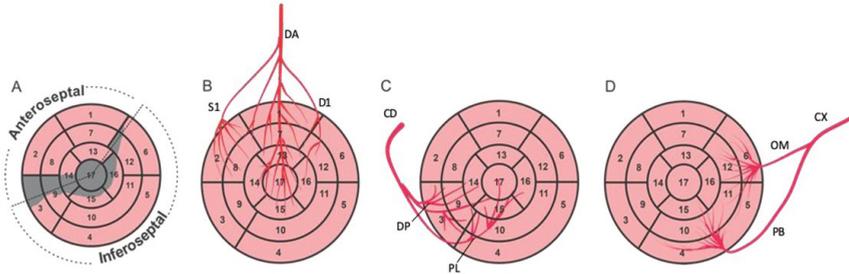
Arteria	Origen	Curso	Distribución
Interventricular anterior	Arteria coronaria izquierda	Pasa a lo largo del surco IV anterior al vértice del corazón	Ventrículos derecho e izquierdo y 2/3 anteriores del tabique interventricular
Circunfleja	Arteria coronaria izquierda	Pasa a la izquierda al surco AV y discurre por la superficie posterior del corazón	Aurícula y ventrículo izquierdo
Marginal izquierda	Rama circunfleja	Sigue el borde izquierdo del corazón	Ventrículo izquierdo
Interventricular posterior	Arteria coronaria izquierda (33%)	Va por el surco IV posterior al vértice del corazón	Ventrículos derecho e izquierdo y tercioposterior del TIV

AV, auriculoventricular; IV, Interventricular; SA, sinoauricular

Fuente: Moore KL, Dalley AF, Agur AMR, Gutiérrez A, Ángeles Castellanos AM. *Anatomía con orientación clínica*. 2018.

Funcionalmente, la irrigación coronaria divide el corazón en dos zonas: la anteroseptal perfundida por la arteria descendente anterior (DA), y la inferolateral, por la ACD y CX. También existen áreas de perfusión compartidas que dependen de la dominancia coronaria [5] (Figura 1.9).

Figura 1.9. Circulación coronaria e irrigación de los 17 segmentos del corazón



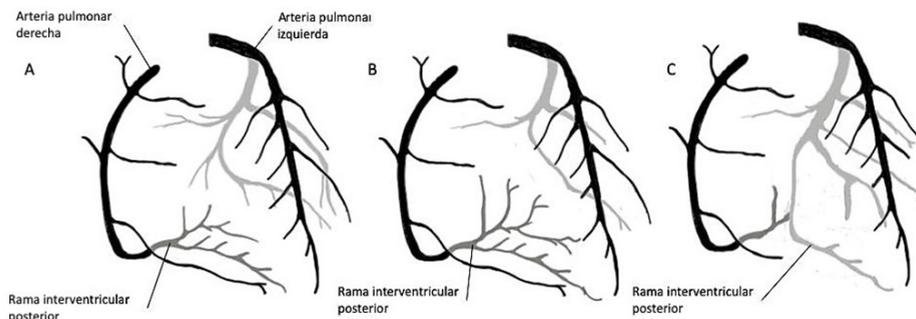
A: zonas anteroseptal e inferolateral. B, C y D: zonas irrigadas por la DA, CD y CX respectivamente. DA: descendente anterior, S1 y D1: primera septal y primera diagonal; CD: coronaria derecha; DP: descendente posterior; PL: posterolateral; OM: oblicua marginal; PB: posterobasal.

Fuente: *J Am Soc Echocardiogr* 2015; 28:1- 39.e14.

Dominancia Coronaria: Existe un término anatomoclínico denominado “dominancia” de las arterias coronarias. Este término permite establecer un patrón de irrigación de la región posterior del corazón, y fue introducido por Schlesinger en 1940 [6].

La dominancia del sistema coronario está definida según la arteria que emerja de la rama interventricular posterior (ADP). Se han identificado tres subtipos clásicos de dominancia coronaria. La dominancia derecha se caracteriza porque la mayor parte de la superficie posterior del VD es irrigada por la ACI, pero adicionalmente irriga una porción del VI. Esta irrigación contralateral se debe al origen de la ADP (desde la arteria CD) y traspasa la cruz cardíaca. Otro subtipo es la dominancia balanceada, cuando la ACD irriga el VD y la porción posterior del septum interventricular a través de la rama interventricular posterior (RIP), mientras la ACI irriga el VI finalizando en la cruz cardíaca. La dominancia izquierda se presenta si la ACI irriga la cara posterior del VI, el segmento posterior del septum interventricular y/o la pared posterior del VD (Figura 1.10).

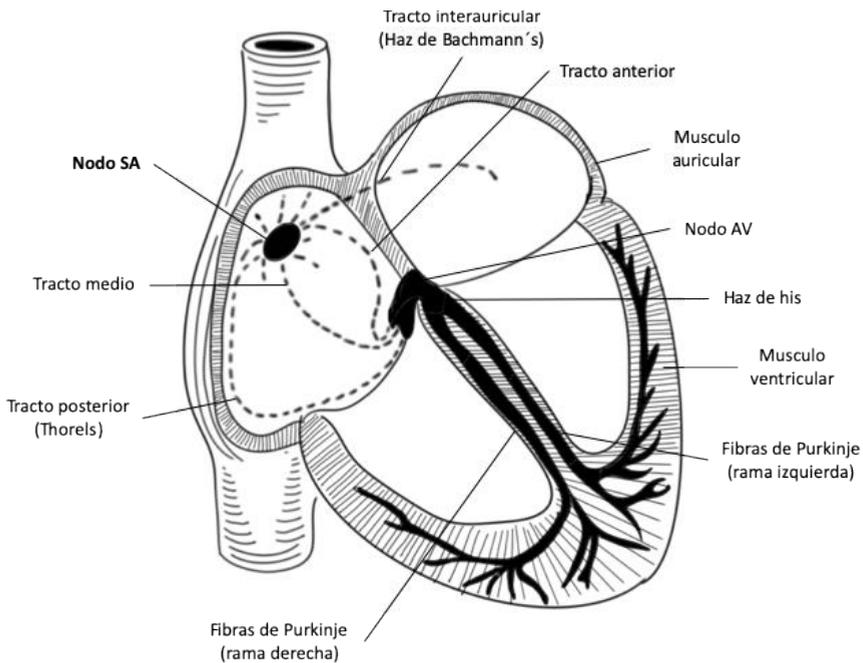
Figura 1.10. Esquema de la dominancia coronaria A. Dominancia balanceada B. Dominancia derecha C. Dominancia izquierda



Fuente: Ahmed SH, El-Rakhawy MT, Abdalla A, Harrison RG. A new conception of coronary artery preponderance. *Cells Tissues Organs*. 1972; 83(1):87-94.

Anatomía del sistema eléctrico del corazón. El sistema de conducción eléctricocardiaco lo constituye un conjunto de células especializadas que inician el latido cardíaco y coordinan la contracción de las cámaras cardíacas. Estos estímulos los inicia el nodo sinoauricular (SA), también conocido como nodo sinusal o nodo SA, el cual sirve como marcapaso natural. Este nodo es un complejo pequeño de fibras de músculo cardíaco especializado en la pared de la AD, ubicado a la derecha de la desembocadura de la vena cava superior en la AD. 9 de cada 10 individuos presentan el nodo SA justo debajo de la cresta de apéndice auricular derecho. En el restante, se extiende como una herradura a través de la cresta, llegando al surco interauricular. Generalmente da inicio al impulso eléctrico para la contracción. Estas células manifiestan despolarizaciones espontáneas, y responden para generar el ritmo. Dicho ritmo se clasifica como intrínseco y automático, y se transmite al nodo aurículoventricular (NAV) [7].

Figura 1.11. Sistema de conducción del corazón. La excitación normal se origina en el nodosinoauricular (SA), luego se propaga a través de ambas aurículas (tractos internodales mostrados como líneas discontinuas). La despolarización auricular se extiende al NAV, pasa a través del haz de His, y luego a las fibras de Purkinje, que forman las ramas izquierda y derecha del haz. Posteriormente, todo el músculo ventricular se activa



Fuente: Moore KL, Dalley AF, Agur AMR, Gutiérrez A, Ángeles Castellanos AM. *Anatomía con orientación clínica*. 2018.

Tractos especializados internodales: son haces de fibras musculares especializadas que se dirigen desde el nódulo sinusal hasta el NAV o de Aschoff- Tawara. Los cuatro haces se denominan: anterior, medio o de Wenckebach, posterior o de Thorel y el interauricular o de Bachmann. De todos los mencionados, el único con identidad anatómica es el haz interauricular, pues la existencia morfológica de los restantes está aún sujeta a debate [8]. Estos haces distribuyen el estí-

mulo eléctrico desde el nodo sinusal, a través de las paredes auriculares, hasta el NAV (Figura 1.11).

Nodo auriculoventricular. Estructura ubicada en el cuerpo fibroso central de la región auricular, de forma oval. Son un grupo de células transicionales situadas dentro de los límites del triángulo de Koch; en su zona medial y superior, en la unión AV parietal derecha. Este triángulo se sitúa sobre la superficie endocárdica de la AD y se encuentra delimitado anteriormente por la inserción del velo septal de la válvula tricúspide y posteriormente por un tendón fibroso conocido como tendón de Todaro, que es la continuación fibrosa subendocárdica de la válvula de Eustaquio. Este nodo ralentiza el estímulo proveniente del nodo SA a través de los tractos internodales. Este retraso permite que las aurículas se contraigan y que los ventrículos se llenen antes que estos se activen y se contraigan.

Los tejidos del miocardio auricular y ventricular están aislados eléctricamente entre sí por un plano de tejido conectivo formado por el anillo fibroso y el cuerpo fibroso central. El único paso eléctrico desde el miocardio auricular al ventricular está formado por el haz atrioventricular (AVB) de conducción rápida, o haz His, que está conectado al nodo AV y atraviesa la cresta del tabique ventricular. Él conduce el impulso hacia las fibras de Purkinje, las cuales activan el miocardio ventricular.

Luego de perforar el tabique interventricular, el haz de His se bifurca para constituir una estructura compacta similar a un cable en el lado derecho, conocida como rama derecha del haz de His, y una lámina ancha de fibras que continúa sobre el lado izquierdo del tabique, la rama izquierda del haz de His.

Función Cardíaca

En esencia, el corazón funciona como dos bombas musculares interconectadas en serie, que transportan sangre desde y hacia la circulación pulmonar y sistémica. Se compone básicamente, y como lo mencionamos anteriormente, por dos aurículas que reciben sangre (proveniente de las venas) y dos ventrículos que bombean sangre a través de las arterias; válvulas que evitan el reflujo de sangre, y un sistema de conducción que transmite los impulsos eléctricos. Esta señal eléctrica se propaga para convertirse en actividad mecánica a través de una serie de interacciones bioquímicas [9].

Transmisión eléctrica: La contracción del corazón es rítmica y coordinada. Estas características se dan gracias a la propagación de un impulso eléctrico (potencial de acción) de manera precisa y armónica. Cada potencial de acción normalmente es iniciado por el nodo SA, un grupo especializado de células miocárdicas en la AD alta. Estas células se caracterizan por la "automaticidad", lo que significa que espontáneamente se vuelven eléctricamente activas (se despolarizan). El impulso luego se propaga a los miocitos auriculares adyacentes a través de conexiones de célula a célula, denominadas uniones gap. Algunos autores han reportado una red de transmisión propia del tejido muscular cardíaco (tractos internodales). Finalmente, la ola de despolarización llega a un segundo grupo de células especializadas en la parte inferior de la AD, el nodo AV. Debido a que las aurículas y los ventrículos están aislados eléctricamente entre sí por una banda circunferencial de tejido fibroso a nivel de las válvulas tricúspide y mitral, el único camino para la propagación del impulso es a través del nodo AV. Después de un breve retraso intrínseco en el nodo AV (aproximadamente 0.1 segundos), el potencial de acción se propaga rápidamente por el haz de fibras de His y Purkinje dentro del miocardio ventricular. Esta red de conducción rápida actúa como "cableado" para transmitir el impulso al vértice del corazón, lo que permite una contracción coordinada y mecánicamente eficiente de los ventrículos.

Potencial de acción: Durante la fase de reposo las células musculares cardíacas (miocitos) mantienen un gradiente eléctrico negativo neto con respecto al entorno extracelular, denominado potencial de reposo. El gradiente resulta de las actividades de los canales iónicos y los transportadores dentro de la membrana celular, y es esencial para la capacidad del miocito (y el corazón) de propagar los impulsos eléctricos. Con un suficiente estímulo inicial, las alteraciones en la permeabilidad del miocito al Na^+ dan como resultado un gradiente eléctrico positivo neto con respecto al entorno extracelular (despolarización). Además, los cambios en la permeabilidad iónica del miocito al K^+ , Cl^- y Ca^{++} dan como resultado la restauración eventual del ambiente intracelular negativo. Cuando se trazan contra el tiempo, los cambios en el potencial eléctrico se describen convencionalmente como teniendo cinco fases distintas, que corresponden a las alteraciones estereotipadas en la permeabilidad de la membrana del miocito cardíaco. Los medicamentos antiarrítmicos ejercen su influencia al alterar la permeabilidad de la membrana, afectando las características del potencial de acción.

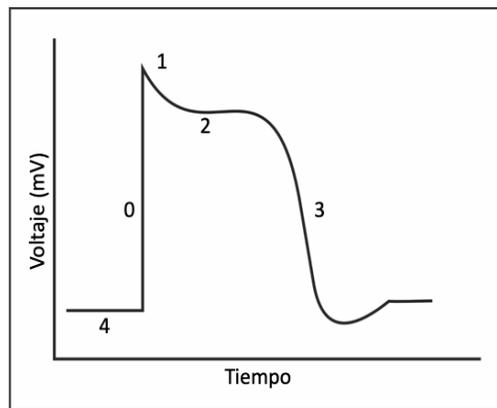
Las fases del proceso eléctrico del corazón (Figura 1.12) son:

1. Fase 4. Es el estado de reposo antes de la estimulación eléctrica.
2. Fase 0. Es la despolarización rápida como resultado de la entrada de Na^+ .
3. Fase 1. Es la etapa inicial de repolarización, causada por el cierre de los canales de Na^+ y el flujo de salida de Cl^- .
4. Fase 2. Es la misma fase de meseta, la cual está mediada principalmente por la entrada de Ca^{++} .
5. Fase 3. Es la repolarización rápida, y se ve facilitada principalmente por la salida de K^+ .

Otra de las principales diferencias del tejido cardíaco es el automatismo. El cual hace referencia a la capacidad intrínseca de un cardiomiocito o grupo de cardiomiocitos para despolarizarse espontáneamente y, por lo

tanto, iniciar la propagación de un potencial de acción. Dichas células se denominan “células marcapasos” e incluyen las de los nodos SA y AV. Las células del sistema His-Purkinje y el miocardio ventricular también pueden despolarizarse espontáneamente en circunstancias de ritmos cardíacos particularmente lentos (por ejemplo, paro de los nódulos sinusales, bloqueo cardíaco completo). Debido a la despolarización más rápida de los marcapasos habituales del corazón, la automaticidad de estas células a menudo no se manifiesta. Además, después de una lesión cardíaca, las células que normalmente no poseen automaticidad pueden adquirir una conductancia de membrana alterada con la fuga de corriente resultante y la despolarización espontánea.

Figura 1.12. Fases del proceso de despolarización/repolarización cardíaca



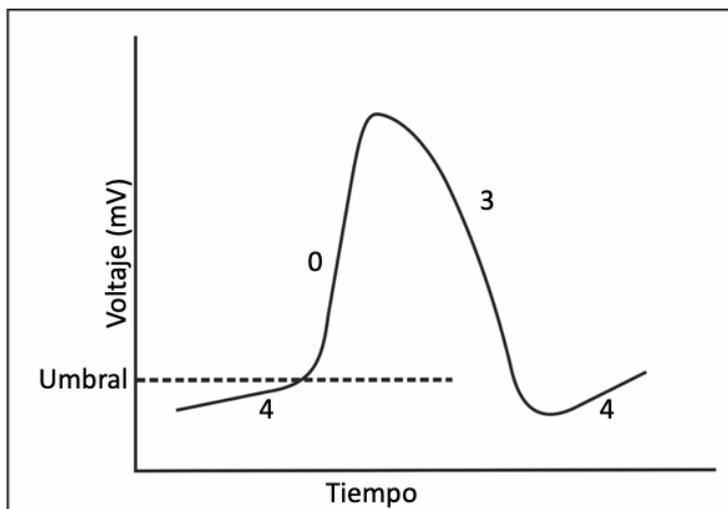
Fuente: *Physiol Rev.* 2005 Oct;85(4):1205-53

La Figura 1.13 muestra las características del potencial de acción para las células del nodo SA y AV. Se observa la fase 4 con pendiente positiva, que avanza hacia el potencial umbral, en cuyo punto, se produce la fase 0. La pendiente de la despolarización de la fase 4 es un determinante clave en la tasa de inicio de un potencial de acción y, por lo tanto, en la frecuencia cardíaca [10].

El proceso de modulación del automatismo cardíaco ocurre gracias al sistema nervioso autónomo, y por ende puede verse afectado por fármacos que actúan centralmente

(dexmedetomidina, clonidina, etc.) o aquellos que afectan el inicio y la propagación del potencial de acción a nivel de los miocitos (bloqueadores β , digoxina).

Figura 1.13. Potencial de acción del nodo SA y AV



Fuente: *Physiol Rev.* 2005 Oct; 85(4):1205-53.

A nivel macroscópico, la propagación del potencial de acción viaja desde la AD alta hasta el nodo AV, el sistema His-Purkinje y, finalmente, el miocardio ventricular permite una contracción y relajación miocárdica ordenada y coordinada. A nivel celular, esto se logra mediante el acoplamiento de los cambios en el entorno eléctrico a los cambios en la actividad mecánica (contracción y relajación del miocardio) a través de fluctuaciones de la concentración citosólica de Ca^{++} . Como consecuencia de la despolarización, la concentración citosólica de Ca^{++} aumenta notablemente por la entrada a través de la membrana celular, así como la liberación de las reservas de calcio

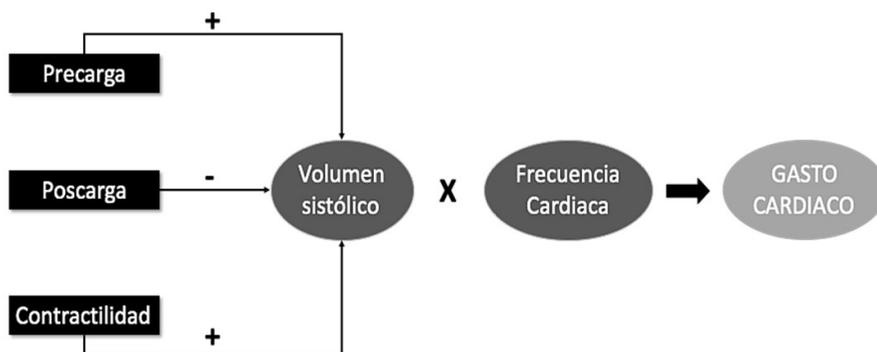
intracelular dentro del retículo sarcoplásmico. El Ca^{++} permite directamente la interacción de los elementos contráctiles actina y miosina, cuyo resultado es el acortamiento de la miofibra. Así como el proceso de contracción de los miocitos depende del Ca^{++} , la relajación del miocardio es un proceso activo, que requiere el gasto de energía en forma de trifosfato de adenosina (ATP) para eliminar el Ca^{++} del citosol rápidamente e inhibir la contracción continua.

Perfusión miocárdica: Generalmente, las arterias coronarias discurren superficialmente desde la raíz y tronco, pero van emitiendo ramas que perforan las capas musculares para irrigar el miocardio. Durante la sístole, los vasos sanguíneos intramusculares son comprimidos por el músculo cardíaco contraído, y el flujo sanguíneo al VI está en su punto más bajo. La fuerza es mayor en las capas subendocárdicas, donde se aproxima a la presión intramiocárdica. En la sístole, la sangre intramiocárdica se impulsa hacia el seno coronario y retrograda hacia los vasos epicárdicos, que actúan como capacitores. El flujo se reanuda durante la diástole cuando el músculo se relaja, siendo en esta fase en la que se produce el aporte de sangre al tejido. La presión de perfusión coronaria es la diferencia entre la presión diastólica aórtica y la presión diastólica final ventricular izquierda (LVEDP). Los cambios fásicos en el flujo sanguíneo al VD son menos pronunciados, debido a la menor fuerza de contracción. Cualquier anomalía en las presiones y flujos coronarios modifican la regulación del sistema autónomo, si este fenómeno persiste, se produce hipoperfusión e isquemia miocárdica.

Gastocardíaco El gasto cardíaco es el producto de la frecuencia cardíaca (FC) y el volumen sistólico (VS). La FC se define más comúnmente como la cantidad de veces que el corazón late en un minuto. El VS es la cantidad de sangre expulsada durante la contracción ventricular. Cada componente es el compuesto de una variedad de factores que se pueden modular según la necesidad. Los valores del gasto cardíaco en

humanos dependen del tamaño del cuerpo y del nivel de actividad. Los números comúnmente informados en sujetos sanos varían de 4 L / min en una persona en reposo con un hábito corporal pequeño, a más de 35 L / min en atletas de élite durante el ejercicio (Figura 1.14).

Figura 1.14. Determinantes del gasto cardíaco



Fuente: *Elaboración propia.*

La FC está determinada por la velocidad de propagación de la señal a través del sistema de conducción eléctrica. Las señales comienzan en el nodo SA que se dispara a una velocidad intrínseca de 60 a 100 veces por minuto, después de alteraciones únicas en la conductancia iónica a través de la membrana celular. La cronotropía describe la tasa de descarga espontánea, y puede ser alterada por una variedad de influencias. Una vez en el umbral, se genera un potencial de acción que se conduce a través de las aurículas hasta el nodo AV. La propagación de la señal a través del nodo AV es relativamente lenta y representa otro factor de control, denominado dromotropía. Desde aquí, el potencial de acción se pasa al haz de His y luego a las ramas derecha e izquierda del haz. Luego, la señal llega a las fibras de Purkinje, y finalmente llega a los miocitos ventriculares, produciendo una contracción. Por último, la membrana vuelve a su estado de

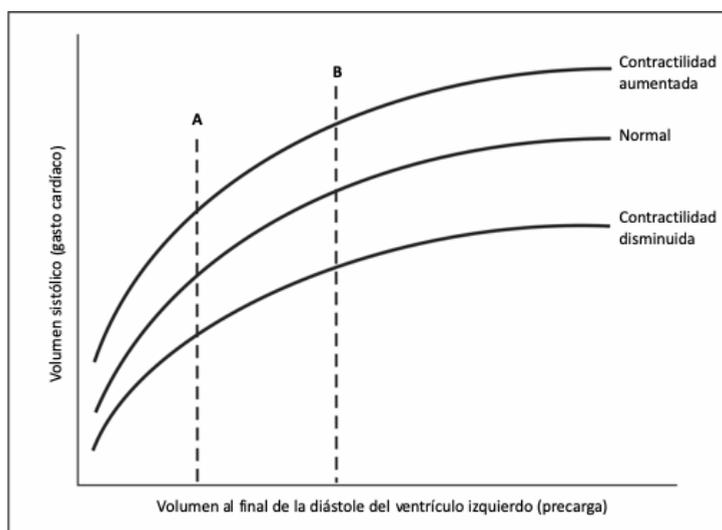
reposo antes que llegue el siguiente impulso. La relajación final y la repolarización de las células conductoras eléctricas y los miocitos se denominan lusitropía [11].

Volumen sistólico, el otro determinante principal del gasto cardíaco, también puede manipularse cuando sea necesario. La cantidad de sangre expulsada en cada latido depende de la precarga, la contractilidad y la poscarga [12].

Precarga es sinónimo de volumen ventricular diastólico final, cantidad de sangre en los ventrículos inmediatamente antes de la sístole. Los volúmenes de precarga más altos significan que los ventrículos deben expulsar más sangre. La contractilidad describe la fuerza de la contracción de los miocitos, también conocida como inotropía. A medida que aumenta la fuerza de contracción, también lo hace el volumen sistólico. El determinante final del volumen sistólico es la poscarga. La poscarga es la cantidad de resistencia sistémica que los ventrículos deben superar para expulsar sangre a la vasculatura. La poscarga es proporcional a la presión sanguínea sistémica y está inversamente relacionada con el volumen sistólico, a diferencia de la precarga y la contractilidad [12,13].

El gasto cardíaco se puede aumentar mediante una variedad de métodos de señalización que incluyen la mejora del tono simpático, la secreción de catecolaminas y la circulación de la hormona tiroidea [14]. Estos mecanismos aumentan la FC al ejercer efectos positivos en los puntos de control cronotrópicos, dromotrópicos y lusitropicos. Estas influencias también aumentan la precarga a través de la vasoconstricción mediada por el receptor. Además, la contractilidad se mejora mediante el mecanismo de Frank-Starling (Figura 1.15), y también mediante la estimulación directa de catecolaminas. Los efectos opuestos en FC y VS ocurren cuando el tono parasimpático se fortalece en respuesta a la disminución de los requerimientos de oxígeno.

Figura 1.15. La curva de Frank-Starling. Relación entre diversas cargas en estados isotrópicos y gasto cardíaco. En la precarga A, el gasto cardíaco es menor que el de la precarga B. Sin embargo, para una precarga dada A o B, el gasto cardíaco está, en parte, determinado por el estado inotrópico (contractilidad)



Fuente: *Physiol Rev.* 2005 Oct; 85(4):1205-53.

Conclusión

Las enfermedades cardiovasculares en todas sus formas son un asunto de vida o muerte. Ellas se consideran como un conjunto de enfermedades y lesiones que afectan el sistema cardiovascular.

El estudio de las estructuras y funciones del sistema cardiovascular ha permitido el entendimiento de la fisiopatología, así como el desarrollo de estrategias quirúrgicas y terapéuticas para su manejo. Estas estrategias incluyen abordajes, técnicas y materiales quirúrgicos, rehabilitación pre y postquirúrgica, y tratamientos farmacológicos que han mejorado la sobrevida y la calidad de vida del paciente.

El conocimiento de la anatomía y fisiología del sistema cardiovascular son fundamentales en el manejo del paciente candidato a cirugía cardiovascular, esta información debe ser de conocimiento abierto para todos los profesionales y técnicos encargados del manejo del paciente.

Referencias Bibliográficas

1. Drake RL, Vogl WA, Mitchell AWM, Gray. Anatomía para estudiantes. Ámsterdam; Barcelona: Elsevier; 2015.
2. Thiriet M. Cardiac Pump: An Introduction. En: Lanzer P, editor. PanVascular Medicine [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015 [citado 19 de enero de 2020]. p. 345-412. DOI: https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37078-6_25
3. Moore KL, Dalley AF, Agur AMR. Anatomía con orientación clínica. L'Hospitalet de Llobregat: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health; 2013.
4. Latarjet M, Ruiz Liard A. Anatomía humana. II II. 4.a ed. Vol. 2. Buenos Aires: Panamericana; 2012.
5. de Luna, Antoni Bayés. ECGs for beginners. John Wiley & Sons, 2014. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118821350>
6. Ballesteros Acuña LE, Corzo Gómez EG, Saldarriaga Tellez B. Determinación de la Dominancia Coronaria en Población Mestiza Colombiana: Un Estudio Anatómico Directo. Int J Morphol [Internet]. septiembre de 2007 [citado 13 de enero de 2020];25(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022007000300003>
7. Anderson, Robert H., et al. The anatomy of the cardiac conduction system. Clinical Anatomy: The Official Journal of the

American Association of Clinical Anatomists and the British Association of Clinical Anatomists 22.1 (2009): 99-113. DOI: <https://doi.org/10.1002/ca.20700>

8. Abuin, Gustavo, et al. Nuevos conceptos en la anatomía del sistema cardionector con aplicación en electrofisiología. *Revista Argentina Anatomía Online* 6.3 (2015): 101-112. Disponible en: <http://www.revista-anatomia.com.ar/archivos-parciales/2015-3-revista-argentina-de-anatomia-online-a.pdf>
9. Ramanathan T, Skinner H. Coronary blood flow. *Contin Educ Anaesth Crit Care Pain*. abril de 2005; 5(2):61-4. DOI: <https://doi.org/10.1093/bjaceaccp/mki012>
10. Munoz R, editor. *Handbook of pediatric cardiovascular drugs*. London: Springer; 2008. 356 p.
11. King J, Lowery DR. Physiology, Cardiac Output. En: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2019 [citado 21 de enero de 2020].
12. Pró EA. *Anatomía clínica*. Buenos Aires: Panamericana; 2014.
13. Latarjet M, Ruiz Liard A. *Anatomía humana*. II. 4.a ed. Vol. 2. Buenos Aires: Panamericana; 2012.
14. Tortora GJ, Derrickson B. *Principios de anatomía y fisiología*. México; Madrid: Médica Panamericana; 2018.