

Las neuronas del corazón



晚庄軒
繪
庚子年夏月
畫

*Hoy se cuida el corazón, se da, se le tiene en los labios,
se habla con él en la mano; es duro o tierno;
se quiere o se aborrece con todo el corazón
o con una parte de él; se tiene o no se tiene,
lo cual es inexplicable.*

HENRI DE PARVILLE



¿Y si te dijeran que siempre sí?, que sí puedes sentir con el corazón y que esa vieja oposición cerebro *versus* corazón con la que suelen arrinconarte no existe, y no sólo eso, sino que en tus decisiones continuamente participa el corazón. Entonces tus corazonadas son ciertas, te enamoras con tu cerebro, con tu corazón... con todo el cuerpo.

Actualmente se reconoce que el corazón es un músculo bomba altamente especializado y con gran capacidad de trabajo pues ejecuta billones de latidos continuos a lo largo de una vida; también se considera un órgano autoexcitable con capacidad para iniciar y coordinar su propia actividad contráctil; como un órgano endocrino, pues produce y secreta por lo menos cuatro hormonas bien caracterizadas: los péptidos atriales, mediante los cuales se comunica con los riñones y el sistema vascular. Pero más recientemente se ha

empezado a entender la función sensorial y neuroefectora de un sistema nervioso intrínseco al corazón, constituido por decenas de miles de neuronas locales de las que apenas se bocetan sus funciones. En la figura 1 se presentan los resultados de un estudio histológico realizado en el corazón de una rana; podemos apreciar la enorme cantidad de células nerviosas que se localizan en él.

El corazón de los vertebrados es un corazón miogénico, esto es, la propia estructura muscular genera la actividad eléctrica que activa las contracciones rítmicas y regulares que sostienen la vida de un animal, lo que llamamos actividad marcapaso. Aunque suene sorprendente, el corazón de los vertebrados no necesita del sistema nervioso para iniciar y propagar su actividad; en los invertebrados esto no siempre es así. Sin embargo, para ajustarse a to-

da la gama de actividades y demandas metabólicas, el corazón se conecta con el sistema nervioso autónomo a través de sus grandes ramas: el sistema nervioso simpático y el sistema nervioso parasimpático. Recordemos que el sistema nervioso autónomo se refiere a toda la división que no está sujeta, en lo general, a regulación voluntaria. Se ha descrito que las vías de actividad nerviosa del sistema nervioso simpático y del parasimpático representan algo así como un sistema *yin yang* de activación-inhibición, pero éstos no sólo tienen actividad recíproca, sino que pueden funcionar de diferentes modos. Pueden coactivarse de forma sinérgica en situaciones muy demandantes y trabajar en forma desacoplada con cambios de actividad independientes entre sí.

Dada la estrecha relación funcional entre el sistema nervioso y el co-

razón, se desarrolló hace tiempo un área de la cardiología que se encarga de investigar cuál es su interacción: la neurocardiología. En el circuito cerebro-corazón-cerebro la salida cardíaca más importante es el gasto o volumen cardíaco, de ella depende la adecuada irrigación y oxigenación de todos los órganos, fundamentalmente del propio cerebro, por lo que dicho volumen está fuertemente regulado.

El eje corazón-cerebro

Para establecer cualquier comunicación se necesita que los interlocutores reciban mensajes recíprocos; usando de esta analogía, recordemos que un órgano sensorial es precisamente aquel que recibe información del interior o del exterior, de medios que en el caso del corazón son: la presión sanguínea, las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono y de glucosa, la proporción adenosín trifosfato/adenosín di-

fosfato en la sangre, el grado de tensión de las fibras cardíacas y de los vasos sanguíneos, la concentración de hormonas circulantes, entre ellas las diuréticas. Toda esta información es conducida a la médula espinal, ahí se procesa y puede originar una respuesta reflejo a nivel local o regional. Al mismo tiempo, tales señales son conducidas al cerebro para ser integradas con la infor-

mación sensorial y la procesada que proviene de otros sistemas, para finalmente dar una respuesta vía las neuronas motoras, órganos de salida o eferentes. Desde luego, todo esto debe ocurrir en unos cuantos segundos.

De acuerdo con la visión clásica de la neurocardiología, el control último del ritmo cardíaco y de muchas otras funciones debe residir en el sistema nervioso central por la vía de “comandos centrales directos”, pues es ésta una representación jerárquica de un sistema de control. Tales comandos responden a la información que llega a los centros espinales proveniente principalmente de barorreceptores: receptores de cambios en la presión sanguínea y quimiorreceptores arteriales, carotídeos (ubicados en el cuello) y del arco aórtico, estos últimos detectan cambios en la concentración de oxígeno y dióxido de carbono; además habría que considerar la información procedente del centro respiratorio. Sin embargo, no es así de directa la regulación. Hace mucho tiempo que se conoce la presencia de neuronas en el corazón, si bien hace poco que se ha estudiado su localización, organización, bioquímica y el papel que desempeñan en la fisiología cardíaca. Las neuronas intracardíacas

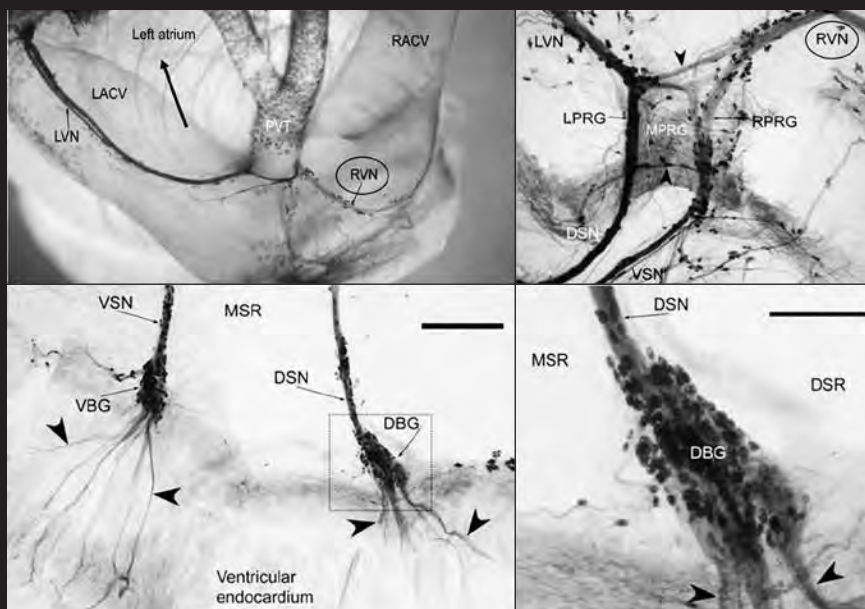


Figura 1. Corazón de una rana. Puede verse la abundancia de ganglios (arreglos de neuronas) y plexos (arreglos de ganglios) teñidos en tono más oscuro sobre la aurícula izquierda marcada con una flecha (*left atrium*). A la derecha y abajo se pueden ver detalles de esas mismas estructuras; la zona RVN (nervio venoso derecho) está encerrada en un círculo. Modificada de Batulevicius *et al.*, 2012.

presentan una gran complejidad e importancia en la modulación de las funciones del corazón.

A partir de la década de los noventa se comenzó a acumular información sobre la organización y morfología de estas estructuras intracardiacas, y siguen surgiendo nuevas incógnitas sobre los sistemas involucrados en la regulación de la actividad del corazón, tanto en estados fisiológicos como fisiopatológicos, así como en un trasplante. De este modo se ha propuesto otro protagonista en el eje corazón-cerebro: un sistema nervioso que se encuentra dentro del corazón y que se denomina sistema nervioso cardíaco intrínseco, el cual está compuesto por células nerviosas autonómicas sensoriales (aférentes), interneuronas y neuronas efectoras o de salida.

La mayoría de dichas neuronas se encuentran al interior de ganglios formando plexos o conjuntos de ganglios organizados con ramificaciones, donde también coexisten elementos del sistema nervioso central y del sistema nervioso autónomo; el sistema nervioso cardíaco intrínseco representa un sistema *in situ* para la regulación de la actividad cardíaca. El arreglo de los ganglios y su interacción sugieren una compleja red nerviosa dentro del corazón que procesa en forma localizada la información interna y externa a él.

Actualmente la neurocardiología se entiende como la relación compleja e interactiva de las neuronas del corazón y las del cerebro. Se consideran al menos tres niveles: el del sistema nervioso central, el de los sistemas nervioso simpático y parasimpático, y el del sistema nervioso cardíaco intrínseco. El nivel de regulación representado por el sistema nervioso autónomo (los nervios simpáticos y la inervación pa-

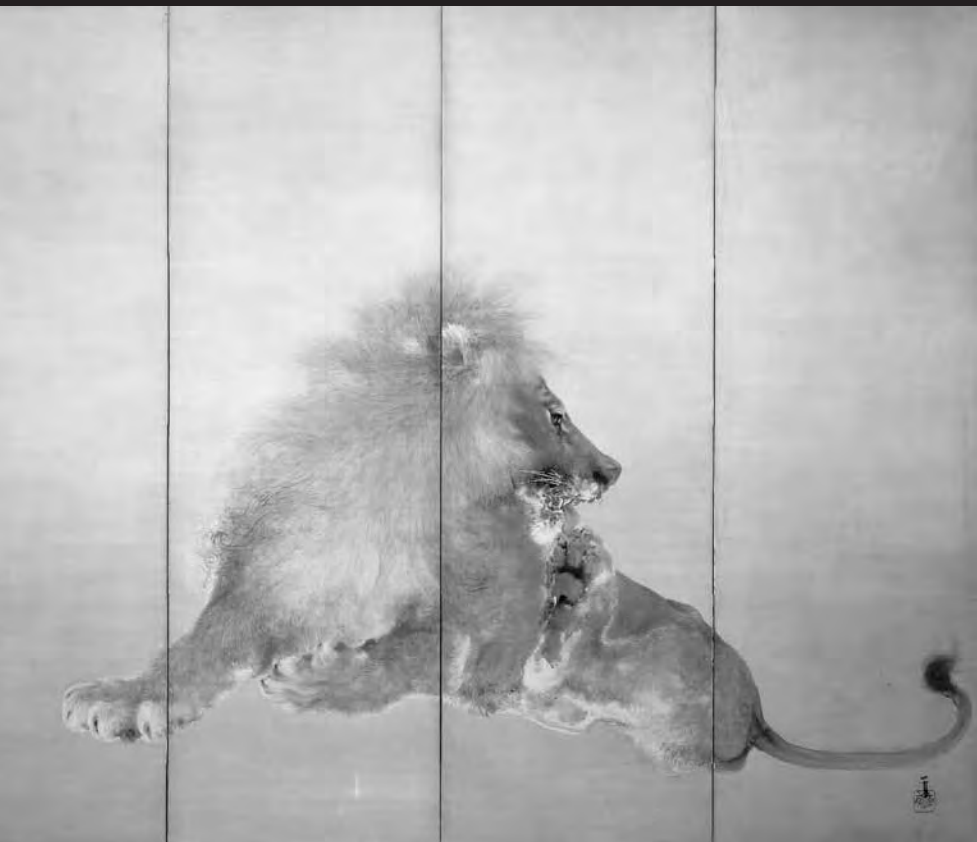


rasimpática, principalmente del nervio vago) mantiene una comunicación bidireccional entre el corazón y el sistema nervioso central. La acción de las neuronas motoras simpáticas promueve la contracción cardíaca mediante la liberación de noradrenalina, hecho conocido como aceleración o taquicardia, que todos hemos experimentado ante una situación de estrés. Mientras que el efecto “relajante” de la acetilcolina liberada por las terminales parasimpáticas deprime la actividad cardíaca. Podemos influir en buena medida en esta acción relajante conscientemente mediante la respiración, efecto conocido como arritmia respiratoria.

El diálogo corazón-cerebro

El sistema nervioso autónomo se caracteriza por contar con una última sinapsis terminal antes de hacer contacto con su órgano de acción, lo cual provee la facultad de una última modificación de la información que transmite. Los ganglios del sistema nervioso autónomo se dividen en dos clases: los que se encuentran cerca del órgano al que inervan y los que están cercanos a la médula espinal en la zona torácica o abdominal. Los primeros corresponden a nervios eferentes parasimpáticos y los segundos a nervios torácicos lumbares simpáticos. De forma clásica, los ganglios intratorácicos se han considerado como estaciones de relevo para la información que llega a órganos intratorácicos.

La inervación en el corazón que proviene de estos dos sistemas autonómicos no es homogénea, esto se explica principalmente por la compartimentalización del corazón y las diferentes actividades que realiza cada una de sus cámaras. Las aurículas que alojan al nodo marcapaso están más inerva-



das por los componentes autonómicos que los ventrículos. El lado derecho e izquierdo también tienen diferencias de inervación, ya que en una parte se recolecta la sangre sistémica para ser enviada a los pulmones y en la otra se distribuye la sangre ya oxigenada a todo el organismo; esto también sucede en las diferentes capas del miocardio.

Además, actualmente se considera que los ganglios cardíacos intrínsecos son como centros procesadores de información, capaces de modificar la actividad cardíaca en cada latido, lo que los convierte en pequeños centros de integración de información en los que conviven neuronas simpáticas y parasimpáticas con neuronas de circuito local. Estas neuronas no sólo son capaces de comunicarse directamente unas con otras, sino también de modificar la actividad contráctil de los cardiomioci-

tos a su alrededor y viceversa, y pueden ser moduladas por esa misma actividad contráctil.

Componentes celulares

El sistema nervioso cardíaco intrínseco está organizado en ganglios y plexos ganglionares con una población neuronal heterogénea, localizados principalmente en el tejido graso epicárdico alrededor de todas las cámaras, pero inervan principalmente las zonas marcapasos: el nodo sinoatrial y el atrioventricular. Se calculan decenas de miles de neuronas distribuidas en diferentes ganglios intrínsecos.

Los componentes neuronales presentes en el eje corazón-cerebro que pertenecen al sistema nervioso cardíaco intrínseco, según la caracterización que hizo Armour en 2003, son: a) neu-

ronas aferentes, que llevan información hacia el sistema nervioso central, las cuales pueden ser neuronas sensoriales asociadas al nervio vago, ganglios de la raíz dorsal intratorácicos y ganglios intratorácicos pero extracardíacos, y los ganglios intrínsecos intracardíacos; algunas de estas neuronas son sensoriales multimodales, otras perciben sólo cambios en el medio químico y mecánico muy localmente en el corazón; b) neuronas eferentes, que llevan información desde el sistema nervioso central, de las ramas simpática y parasimpática, provienen de la médula espinal y proyectan a distintas regiones cardíacas; y c) neuronas del circuito local intratorácico, que son una población neuronal de ganglios torácicos que proyectan a neuronas de ganglios intratorácicos y neuronas del mismo ganglio, relacionadas con la regulación regional y memoria a corto plazo. Esta organización en distintos arreglos podría representar diferentes formas de procesar información.



Sustancias químicas

Se han encontrado más de veinte compuestos biológicamente activos que median o modulan la transmisión interneuronal de excitación o inhibición entre las neuronas intracardíacas. Los neurotransmisores pueden ser los clásicos conocidos como acetilcolina y noradrenalina, pero también otros como dopamina, serotonina, histamina, neuropéptido, taquininas y polipéptido intestinal vasoactivo, los cuales se han revelado mediante el marcaje inmunohistoquímico principalmente (como el que se muestra en la figura 1). La mayoría son neuropéptidos, lo que sugiere que el sistema nervioso cardíaco intrínseco no está restringido a transmisión adrenérgica-colinérgica. Los efectos posibles que producen

estas diversas sustancias neuromoduladoras son: directos sobre los receptores de las células marcapaso; secundarios, modulando la actividad de canales iónicos, bombas o transportadores de cardiomiocitos; y terciarios, actuando sobre la actividad de otros neurotransmisores. Pueden afectar la contractilidad, la microcirculación y el flujo coronario.

De esta forma, el ritmo cardíaco cambia como resultado de la actividad del nodo sinoatrial que se encuentra bajo la influencia de neuronas sensoriales y motoras del sistema nervioso autónomo, y también del sistema nervioso cardíaco intrínseco. Además pueden interactuar los mismos neurotransmisores en forma sinérgica o antagonista, pre o postsinápticamente, afectando la secreción y la unión de



otro neurotransmisor a su receptor. La gran diversidad de sustancias dentro de un sistema tan localizado sugiere una alta especialización funcional de las neuronas intracardíacas.

Modelos de funcionamiento

Existe una gran redundancia dentro de la dinámica cardíaca y en general se da poco peso a una sola población neuronal para su regulación, lo cual también se ve reflejado en que las neuronas que participan en la regulación cardíaca son afectadas por gran cantidad de neuroquímicos. Así, las neuronas dentro de los ganglios intratorácicos procesan información que viene del corazón, de los vasos mayores y de los pulmones, influenciando a su vez neuronas eferentes; los efectos pueden ser a corto plazo con menos de 200 ms o mayores a 2 s, afectando los ciclos cardíacos que se produzcan durante ese intervalo. Toda esta compleja organización apoya la teoría del “pequeño cerebro cardíaco”, tomando “decisiones funcionales” sin intervención directa del sistema nervioso central. Las

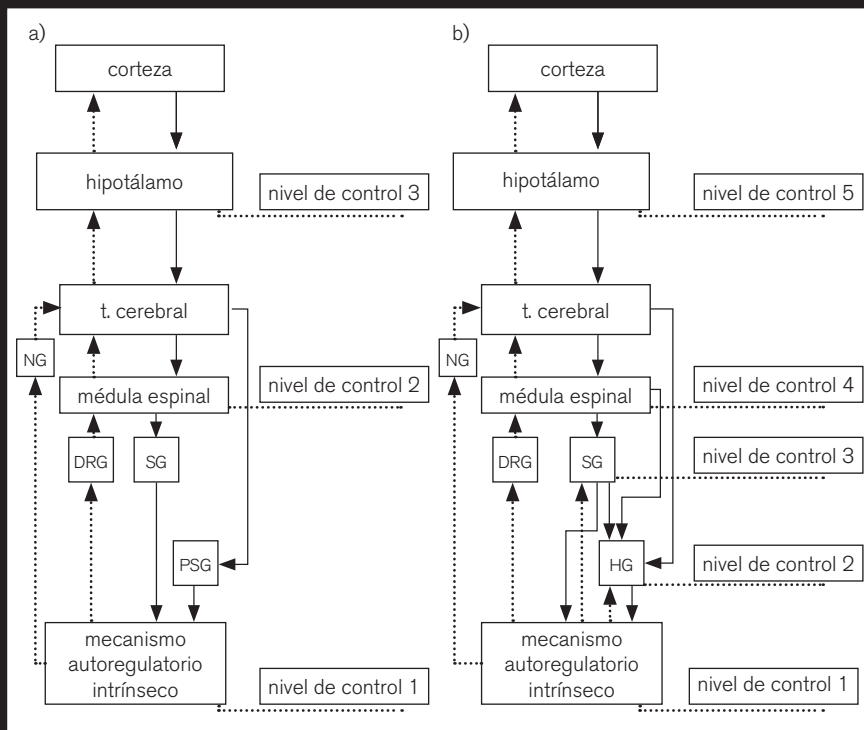


Figura 2. Modelos de regulación funcional propuestos para el corazón. a) Esquema clásico de organización jerárquica en la regulación interna. b) Nuevo concepto de organización distribuida entre los ganglios cardíacos y las otras estructuras del sistema nervioso. Líneas sólidas: vías motoras; líneas punteadas: vías sensoriales; DRG: ganglios de raíz dorsal; HG: ganglios cardíacos; NG: ganglio nodoso; PSG: ganglios parasimpáticos; SG: ganglios simpáticos. Modificado de Kukanova, 2006.



neuronas del eje corazón-cerebro actúan en este esquema con gran heterogeneidad y no de manera uniforme. El sistema de realimentación permite que las múltiples entradas a los ganglios, directas e indirectas, desde diferentes partes del cuerpo (próximas y distantes) con información de eventos cardíacos similares, pero que no tienen necesariamente un comportamiento acoplado, aseguren una salida autonómica coordinada con la flexibilidad necesaria en cada latido.

En el año 2011 Kember, Amour y Zamir propusieron un modelo teórico del control del ritmo cardíaco que incluye también los tres niveles de organización mencionados: sistema nervioso central, los sistemas nerviosos simpático y parasimpático, y los ganglios cardíacos intrínsecos, pero con otro esquema de regulación (figura 2). Estos tres sistemas formarían una red interactuante que puede ser influida e influir en la actividad de los demás niveles, de tal forma que puede adaptarse constantemente a los cambios en la demanda para el flujo sanguíneo sistémico, filtrando y modulando información antes de llegar a las neuronas eferentes cardíacas. Los cambios ocurridos en el ritmo cardíaco se deben principalmente a la demanda de la salida cardíaca y a la actividad de las neuronas del rededor. En este modelo la demanda no afecta directamente el ritmo cardíaco, sino que hay un nivel de regulación entre ellos, protegiendo el corazón de ajustes súbitos. La premisa es que las neuronas cardíacas no actúan uniformemente, sino en subconjuntos con comportamientos segregados que se transmiten a las neuronas vecinas y a otros grupos. La diferencia en esta nueva propuesta es la formación de pequeñas redes entre las células neuronales, de esta manera el efecto



de la subred aumenta el ajuste de control con un nivel más de integración en el paso de información. Usando un modelo computacional se ha visto que se obtiene un comportamiento oscilatorio ante una demanda constante, un solo grupo de células localizadas presenta actividad saturada en forma periódica, arrastrando toda la red a dicha oscilación. La comunicación entre subconjuntos de células es el punto principal de este modelo de redes.

Así, la neurocardiología actual no considera una relación lineal corazón → sistema nervioso autónomo → sistema nervioso central, sino que considera las neuronas como parte del ciclo cardíaco, son entidades que reciben directa o indirectamente entradas múltiples con información regional y sistémica.

Sistema de regulación dedicado

Se piensa que el sistema nervioso cardíaco intrínseco no es simplemente una estación de relevo en estos tres niveles principales de organización en el eje corazón-cerebro. Kukanova y Mravec señalaron en 2006 que los sistemas neuronales que existen en órganos especiales, como el corazón o el intestino, son complejos y capaces de modular su función incluso cuando las señales de sistemas de control mayor

son eliminadas. En el sistema nervioso entérico, las neuronas forman redes complejas con organización similar a los primeros estados ancestrales del sistema nervioso, esta red nerviosa representa un nivel de control adicional a la estructura de control jerárquica en el tracto gastrointestinal, la que igualmente se ha llamado “cerebro intestinal”. Así el sistema nervioso central no se sobrecarga con información aferente que surge ante pequeños cambios rutinarios y se asegura de que, si parte del sistema se ve temporalmente comprometido, entonces se produzcan pocas alteraciones en la función global.

Imaginemos lo que le puede suceder a un paciente que recibe un corazón trasplantado. Primero, todas las terminaciones nerviosas del sistema nervioso central y los sistemas periféricos habrán sido seccionadas, por lo que el corazón no recibe ninguna información neuronal y tampoco puede comunicar nada a su entorno; las neuronas extracardiácas, todas han sido removidas, y las terminaciones nerviosas que quedaron dentro del corazón se



degeneran. ¿Cómo lo logra el paciente? Se ha pensado que entonces la regulación sistémica de la función cardíaca tendría que ser hormonal (por ejemplo, se sabe que la angiotensina II ejerce un mayor control sobre neuronas intrínsecas en condiciones de trasplante). A corto plazo no hay coordinación en la respuesta a estímulos químicos, pero sí es posible que particularmente las neuronas del circuito local tengan interacciones interganglionares con coordinación a mediano plazo. Se propone que el proceso de memoria neuronal, definida como la facultad de modular la actividad cardíaca en función



de eventos próximos en el tiempo, contribuya a estabilizar el control motor cardíaco. El sistema nervioso cardíaco intrínseco se remodela después de un trasplante, lo que refuerza la idea de su relevante participación también en condiciones normales.

Kukanova y Mravec propusieron que este sistema puede constituirse en un marcapaso cardíaco "de emergencia". Un plexo ganglionar ejerce control motor sobre regiones cardíacas adyacentes a él, ya sea en forma eléctrica, mecánica o química, y como las neuronas dentro de este plexo están en constante comunicación, tienen respuestas orquestadas y pueden actuar como relevo en caso de que alguna región se encuentre comprometida.

Hasta ahora existe controversia respecto de si el corazón trasplantado puede llegar a reinervarse. Por un lado hay abundante evidencia anatómica, celular, bioquímica y funcional que apoya la idea de que el corazón trasplantado



no se reinerva en el humano, incluso hasta doce años después de la operación. Sin embargo, datos más recientes obtenidos en perros sugieren que se reinerva al cabo de más o menos un año, aunque con una funcionalidad algo diferente.

En cualquier caso, el sistema nervioso cardíaco intrínseco se revela como una estructura sorprendente y aún

con muchas incógnitas por resolver. Pareciera que en los organismos vertebrados evolucionó un cierto grado de segregación en los sistemas de control neuronal para órganos o funciones vitales como la digestión y la circulación sanguínea, lo cual probablemente facilita la integración con otras regiones y sistemas y permite desarrollos diferenciales en el sistema nervioso.

Si bien una consideración de los aspectos evolutivos del desarrollo del corazón rebasa el planteamiento inicial de este texto, no podemos dejar de mencionar que su desarrollo se ha diversificado en los distintos grupos, podemos encontrar una organización tubular bicameral en los peces (si sólo se considera la aurícula y el ventrículo), tricameral, tetracameral incompleto hasta tetracameral completo. Encontramos también que se asocia a sistemas circulatorios dispuestos en serie y en paralelo, con doble circulación. Esta diversificación no puede encuadrarse



en un desarrollo lineal “progresivo”. Las implicaciones de cada tipo de corazón están totalmente relacionadas con las formas de vida de los organismos y con las estrategias que han desarrollado para oxigenar la sangre e intercambiar el dióxido de carbono.

No obstante, es de destacar que en prácticamente todos los organismos vertebrados encontramos un sistema nervioso intrínseco cardíaco y sólo en los peces es aún materia de debate debido, sobre todo, a las dificultades

técnicas. Recordemos que las neuronas intracardiácas se definen como aquellos somas que se encuentran en el tejido cardíaco, la mayoría formando ganglios que se aglomeran junto con fibras nerviosas, dando lugar a los plexos ganglionares, lo cual provoca



que no siempre sea fácil identificar todos sus elementos.

Sin embargo, el hecho más destacado en este texto es, como se ha dicho, la organización del sistema nervioso en centros de regulación dedicados, como pueden ser los sistemas nerviosos intrínsecos cardíaco e intestinal, que tendrían como probable significado adaptativo el distribuir tareas fundamentales; aunque siempre con una coordinación integral y global de toda la información. 🐔

Julia Ojeda Alonso

Departamento de Fisiología y Biofísica,
CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional.

G. Hortensia González Gómez

Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Batulevicius, D. *et al.* 2012. “Distribution, structure and projections of the frog intracardiac neurons”, en *Autonomic Neuroscience*, vol. 168, núms. 1-2, pp. 14-24.

Kember, G., J. A. Armour y M. Zamir. 2011. “Neural control of heart rate: the role of neuronal networking”, en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 277, núm. 1, pp. 41-47.

Kukanova, B. y B. Mravec. 2006. “Complex intracardiac nervous system”, en *Bratislavská Lekárske Listy*, vol. 107, núm. 3, pp. 45-51.

Murphy D. A. *et al.* 1994. “Capacity of intrinsic cardiac neurons to modify the acutely autotransplanted mammalian heart”, en *The Journal Heart Lung Transplant*, vol. 13, núm. 5, pp. 847-856.

Nozdrachev, A. D. *et al.* 2005. “A view of the cardiac rhythm control: Intrinsic regulation”, en *Human Physiology*, vol. 31, núm. 2, pp. 221-232.

Reyes del Paso, Gustavo A. *et al.* 2013. “The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: a review with emphasis on a reanalysis of previous studies”, en *Psychophysiology*, vol. 50, núm. 5, pp. 477-487.

Schultz, Harold D. 2005. “Cardiac Vagal Afferent Nerves”, en *Advances in Vagal Afferent Neurobiology*, Undem,

Bradley J. y Daniel Weinreich (ed.). Taylor and Francis, Boca Raton. Pp. 351-377.

Waldmann, M. *et al.* 2006. “Stochastic behavior of atrial and ventricular intrinsic cardiac neurons”, en *Journal of Applied Physiology*, vol. 101, núm. 2, pp. 413-419.

Wilson, S. J. y C. P. Bolter. 2002. “Do cardiac neurons play a role in the intrinsic control of heart rate in the rat?”, en *Experimental Physiology*, vol. 87, núm. 6, pp. 675-682.

IMÁGENES

P. 46: Soga Shōhaku, *Par de grullas*, s. XVIII. P. 47: Ohara Koson, *Dos ciervos, pino y luna*, ca. 1900. P. 48: Kanō Osanobu, *Conejos jugueteando en las olas*, s. XIX. P. 54: Katsushika Hokusai, *Familia de caballo*, s. XIX. P. 50: Takeuchi Seiō, *León de oro*, ca. 1901; Muramasa Kudo, *Hoja de oro*. P. 51: kono Bairei, *Gansos chinos*, 1881. P. 53: Kuniyoshi Utagawa, *Cuatro gatos en diferentes posturas*, s. XIX; Yuko Shimizu, *Pájaros de amor*. P. 54: Itō Jakuchū, *Gallo y gallina con hortensias*, s. XVIII.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armour, J. Andrew. 2003. *Neurocardiology. Anatomical and Functional Principles*. HeartMath Research Center-Institute of HeartMath, Boulder Creek.

_____. 2004. “Cardiac neuronal hierarchy in health and disease”, en *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 287, núm. 2, pp. R265-R271.

THE NEURONS OF THE HEART

Palabras clave. Neuronas, corazón, sistema nervioso cardíaco, sistema nervioso central, sistema nervioso intrínseco.

Key words. Neurons, heart, cardiac nervous system, central nervous system, enteric nervous system.

Resumen. El corazón es un órgano altamente especializado, con gran capacidad de trabajo, autoexcitable y endocrino. Ahora empezamos a entender las funciones sensoriales y neuroefectoras de un sistema nervioso intrínseco al corazón, integrado por decenas de miles de neuronas: un sistema de regulación dedicado.

Abstract. The heart is a highly specialized organ, with enormous working, autoexcitatory, and endocrine capacity. Today, we are starting to understand the sensory and neuroeffector functions of an enteric nervous system to the heart, made up by tens of thousands of neurons: a dedicated regulatory system

Julia Ojeda Alonso estudió biología en la UNAM, y es estudiante del Departamento de Fisiología y Biofísica del CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional. En la maestría desarrolló su trabajo de titulación sobre el sistema sensorial del corazón y termina actualmente su maestría en un modelo de dolor neuropático, dolor que ya no es información sino un estado crónico anormal.

G. Hortensia González Gómez estudió biología en la UNAM. Su maestría y doctorado los hizo en el CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional, México. Realizó una estancia de investigación en el Center of Non Linear Dynamics de la Universidad de McGill en Canadá. Ella se dedica a la fisiología y biofísica de sistemas excitables, en particular a modelos de arritmias cardíacas y fisiología cardiovascular. Es profesora definitiva del departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Recibido el 3 de mayo de 2015; aceptado el 2 de julio de 2015.