

El electrocardiograma normal

Parte 1

Dr. Gerardo Pozas Garza¹

• *Palabras clave*

Electrocardiograma de doce derivaciones, teoría del dipolo, teoría de los potenciales de acción, heterogeneidad eléctrica cardiaca.

Base anatómica y funcional del electrocardiograma

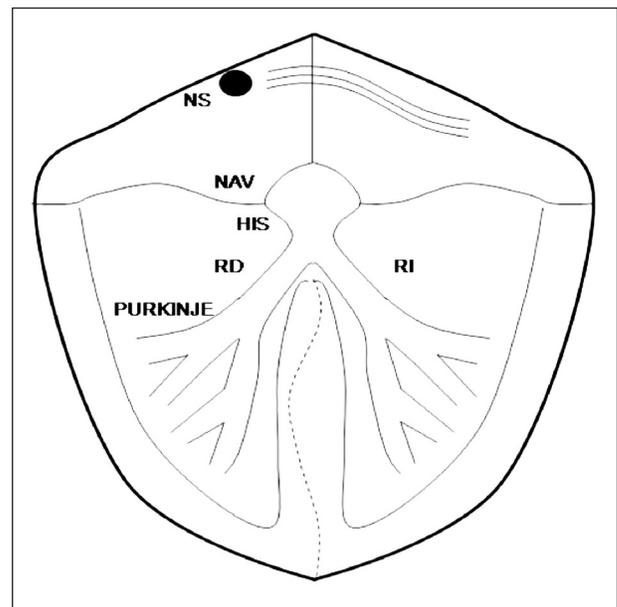
El impulso eléctrico se origina en el nodo sinusal que está estratégicamente situado en la parte alta de la aurícula derecha. La propagación del impulso hacia el nodo auriculoventricular se lleva a cabo a través de la musculatura auricular. La disposición de los haces musculares crea vías de conducción preferencial, pero no existen fascículos específicos de conducción anatómicamente diferenciados.¹ Sin embargo, el haz de Bachmann es el responsable de la conducción interauricular y provee el sustrato para la sincronía electromecánica de ambas aurículas.

El impulso experimenta un entrecimiento en la velocidad de conducción en el nodo auriculoventricular (retraso fisiológico) con el fin de favorecer el acoplamiento mecánico entre aurículas y ventrículos. El haz de His atraviesa el esqueleto fibroso del corazón, que aísla eléctricamente las masas musculares auricular y ventricular, y constituye la única vía de comunicación entre ambos.² Las ramas derecha e izquierda son las encargadas de conducir el impulso a su ventrículo respectivo y son las responsables de la sincronía de activación interventricular. Las masas septales derecha e izquierda están separadas anatómicamente y funcionalmente (barrera intraseptal).³ En condiciones patológicas su existencia se manifiesta en el salto de onda del impulso eléctrico de un ventrículo al otro. La red de Purkinje tiene una distribución fractal disponiéndose solamente en el tercio interno del espesor del miocardio.⁴ Una vez que el impulso alcanza la interfase Purkinje-músculo, la conducción se efectúa a través de las uniones intercelula-

res localizadas en los discos intercalados. Por tanto, las uniones de hendidura forman la base del acoplamiento eléctrico cardiaco y subyacen al concepto del sincitio funcional. Dicho acoplamiento eléctrico explica que la conducción del impulso sea rápida y simultánea dando lugar a la sincronía de activación intraventricular.

Desde el punto de vista teleológico, la organización anatómica y funcional de los tejidos cardiacos tiene la finalidad de originar y conducir el impulso eléctrico con orden y secuencia dentro de ciertos parámetros de tiempo (ver Figura 1). Los conceptos de asociación (o

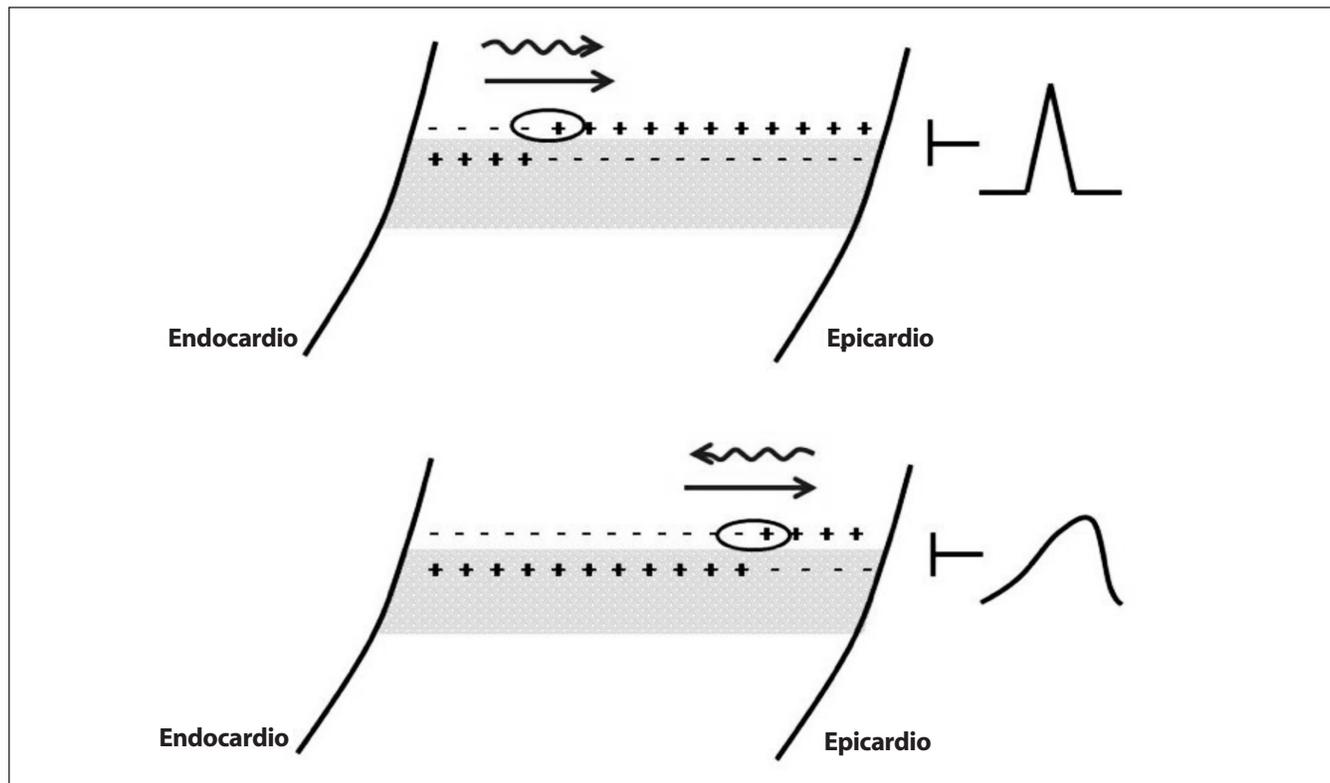
Figura 1. Esquema que ejemplifica la organización estructural y funcional de los tejidos cardiacos con énfasis en los componentes del sistema específico de conducción



El haz de Bachmann se representa por la líneas continuas ondulantes entre las aurículas. La barrera intraseptal corresponde a la línea de guiones trazada en el septum interventricular. NS = nodo sinusal; NAV = nodo auriculoventricular; RD y RI = ramas derecha e izquierda.

¹ Cardiólogo electrofisiólogo del Hospital San José Tec de Monterrey y del Instituto de Cardiología y Medicina Vascular, Tec Salud.

Figura 2. Se representa el espesor de la pared libre del ventrículo izquierdo como una sola célula cardíaca



Se ilustran los procesos de despolarización (parte superior) y repolarización (parte inferior) ventriculares: sentido del fenómeno, dipolo y vector correspondientes.

acoplamiento) y sincronía, que son componentes esenciales del ritmo cardíaco normal, se derivan de esta disposición jerárquica. Así, la concurrencia de estos elementos asegura que el impulso sea conducido del nodo sinusal a la red de Purkinje dentro de un período de tiempo fisiológico para garantizar el acoplamiento mecánico aurículo-ventricular y el desempeño óptimo de la bomba cardíaca.

Origen del electrocardiograma

Existen dos teorías sobre el origen de los componentes del electrocardiograma: la teoría del dipolo y la teoría de los potenciales de acción monofásicos.^{5,6} En realidad, ambas teorías son complementarias y expresan los mismos principios electrofisiológicos desde perspectivas diferentes. En lo sucesivo la discusión versará en torno a los procesos de despolarización y repolarización ventriculares (QRS y T).

Teoría del dipolo (vectorial)

El electrocardiograma es el reflejo de las diferencias en el voltaje transmembrana que ocurren en las células miocárdicas durante los fenómenos de despolarización

y repolarización. La actividad eléctrica generada por el corazón se expresa a través de dipolos (parejas de cargas +/- o -/+) que se propagan en la superficie celular durante los procesos de despolarización y repolarización. A su vez, los dipolos generan vectores que tienen magnitud, dirección y sentido; conviene recordar que la cabeza del vector siempre queda orientada con la carga positiva del dipolo.

Se tomará como ejemplo que una sola célula cardíaca representa el espesor del miocardio y que los eventos se registran a partir de un electrodo unipolar en el epicardio ventricular (ver Figura 2). Como fue señalado en el primer apartado, es en la red de Purkinje, de distribución subendocárdica, donde inicia el proceso de despolarización ventricular. Entonces, el frente de activación se propaga desde el subendocardio hacia el subepicardio (sentido del fenómeno). En la superficie celular se genera un dipolo que se desplaza con la carga positiva por delante. Esto origina un vector cuya cabeza está orientada hacia el electrodo explorador colocado en la superficie epicárdica. En la electrocardiografía, cuando un vector se acerca a un electrodo de registro determina la inscripción de una deflexión positiva (onda R). Recapitulando, durante la despolarización,

tanto el sentido del fenómeno como el vector resultante se dirigen del endocardio al epicardio (ver Figura 2, parte superior).

En condiciones normales, la repolarización empieza en el subepicardio. Por lo tanto, el fenómeno de la repolarización procede del subepicardio al subendocardio (sentido del fenómeno). Sin embargo, el dipolo de la repolarización avanza con la carga negativa por delante. Esto determina que la cabeza del vector nuevamente apunte hacia el epicardio. El resultado es que un electrodo situado en la superficie epicárdica registrará una deflexión positiva (onda T). En síntesis, durante la repolarización, el sentido del fenómeno es de subepicardio a subendocardio, sin embargo, el vector resultante se dirige de subendocardio a subepicardio (ver Figura 2, parte inferior).

Bayés de Luna explica estos eventos empleando el símil del desplazamiento de un auto hacia adelante o en reversa (sentido del fenómeno) con sus luces encendidas (vector). Durante la despolarización, ambos fenómenos, el auto y las luces, apuntan al epicardio; durante la repolarización, aunque el auto se desplaza en reversa, sus luces siguen dirigidas al epicardio.

Teoría de los potenciales de acción monofásicos

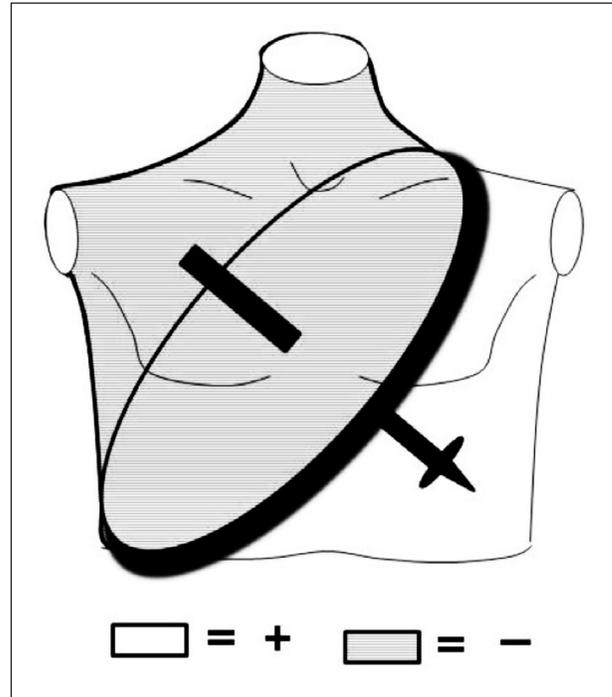
Nuevamente los eventos son registrados a partir de un electrodo epicárdico. La zona distal al electrodo corresponde al subendocardio y la zona proximal al subepicardio (ver Figura 3).

Potencial de acción subendocárdico: Durante la despolarización el electrodo epicárdico enfrenta las cargas positivas del interior celular con la correspondiente inscripción de la fase 0 del potencial de acción. Al final de la repolarización, el electrodo ahora enfrenta la negatividad del interior celular inscribiéndose la fase 3 del potencial. Finalmente la curva regresa a la línea isoelectrónica.

Potencial de acción subepicárdico: Durante la despolarización, que ocurre después que en el subendocardio el electrodo enfrenta la carga negativa en el exterior celular, registrando la fase 0 del potencial de polaridad negativa. Durante la repolarización, que ocurre antes que en el subendocardio el electrodo enfrenta ahora la carga positiva del exterior celular, verificándose la fase 3 del potencial. Nuevamente la curva regresa a la línea isoelectrónica.

Obsérvese que, como consecuencia de estos fenómenos, el subendocardio es la zona en donde inicia la

Figura 3. Se muestran los potenciales de acción representativos del subendocardio y subepicardio registrados a partir de un electrodo epicárdico señalando las fases de polarización, despolarización y repolarización celular



El electrocardiograma es el resultado de las diferencias de gradiente eléctrico derivada de la sustracción algebraica de los potenciales de acción representativos.

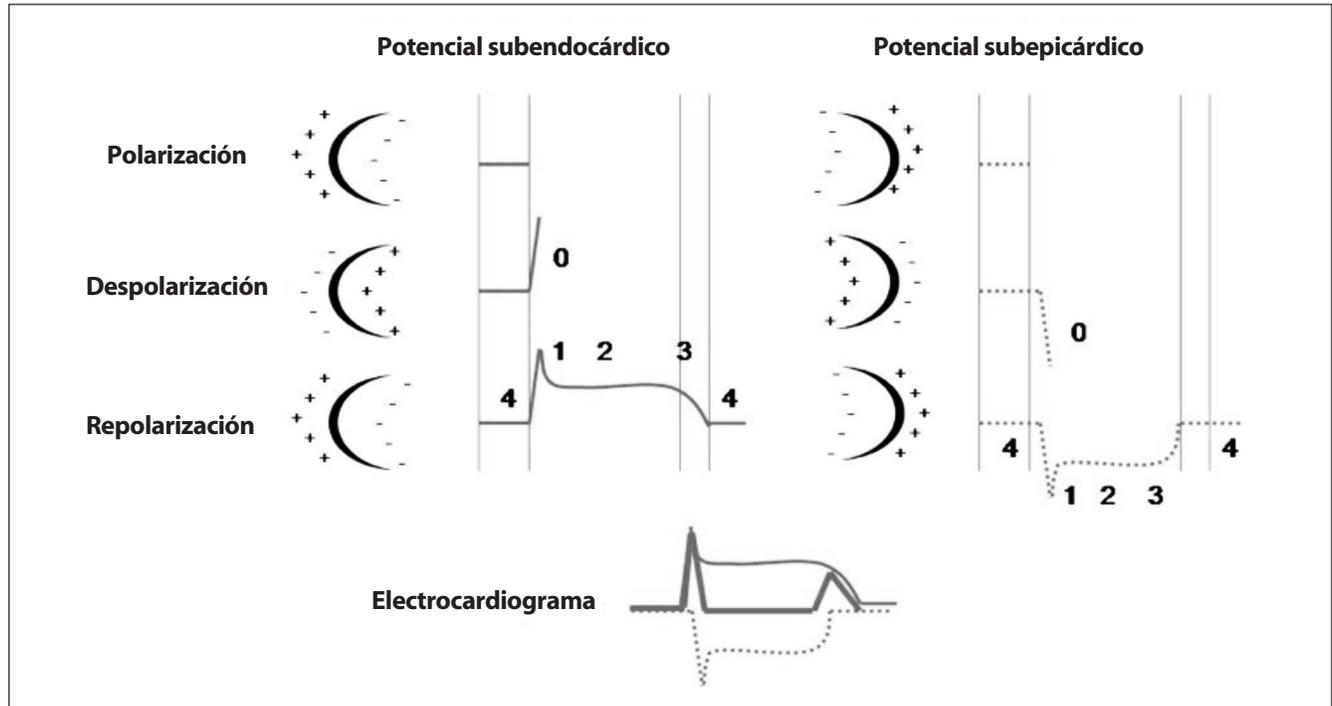
despolarización y donde finaliza la repolarización. Por ello, la duración del potencial de acción subendocárdico es mayor que la del subepicárdico.

La sobreposición de los potenciales representativos del subendocardio y subepicardio determina la existencia de gradientes de potencial eléctrico entre ambos. La diferencia algebraica de estos gradientes explica el origen de las ondas del electrocardiograma. Así, la onda R correlaciona con la fase 0 del potencial, el punto J con el fin de la fase 1, el segmento ST con la fase 2 (de meseta) y la onda T con la fase 3 del potencial. Durante las fases 2 y 4 del potencial (las células están despolarizadas y polarizadas, respectivamente) no existe diferencia de potencial y el resultado es el registro de una línea isoelectrónica.

Otros conceptos teóricos

Como se ha señalado anteriormente el electrocardiograma es el resultado del registro de las fuerzas electromotrices originadas en el corazón a partir de electrodos (derivaciones) situadas en la superficie

Figura 4. Esquema de un vector que genera un campo eléctrico en el tórax



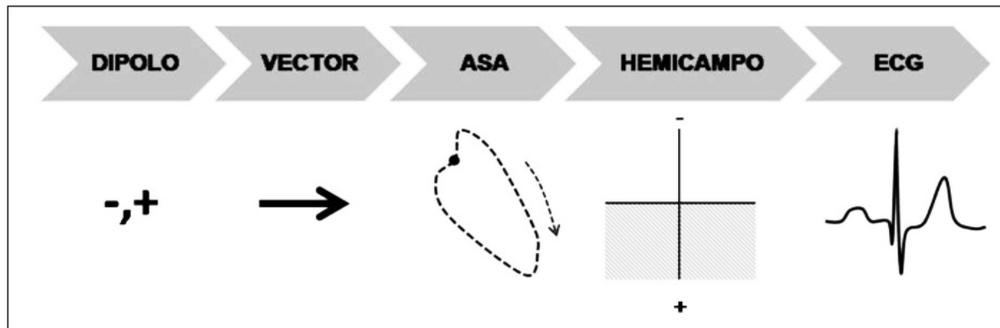
La parte media del vector se extiende en forma de disco hasta la superficie corporal determinando un plano de potencial cero o nulo. El campo eléctrico queda dividido en una mitad positiva y otra negativa para dicho vector. Las derivaciones que enfrentan la mitad positiva registrarán deflexiones positivas; las derivaciones que enfrentan la mitad negativa registrarán deflexiones negativas.

corporal. Para comprender la relación de los eventos eléctricos con las derivaciones electrocardiográficas es necesario asumir las siguientes premisas: 1) el cuerpo se comporta como una esfera de tal forma que los puntos en su superficie son equidistantes al centro del corazón; 2) el medio conductor (tejidos y estructuras entre el corazón y la piel) tiene propiedades de conducción homogéneas, y 3) las fuerzas electromotrices que se originan en el centro del corazón generan un gran dipolo que crea campos eléctricos que están simétricamente distribuidos en el medio conductor. La línea que transecta al dipolo es la línea de potencial cero (o nulo). Las derivaciones a la derecha de esta línea registran deflexiones positivas, las derivaciones a la izquierda registran deflexiones negativas y las derivaciones situadas sobre la línea de potencial cero registran deflexiones isoeletricas (ver Figura 4). La teoría del dipolo se aplica ampliamente en la enseñanza de la electrocardiografía.

Como ya fue señalado, el potencial eléctrico registrado en las derivaciones electrocardiográficas es el resultado de la sumatoria de las fuerzas eléctricas instantáneas (vectores) que ocurren durante los procesos de despolarización y repolarización. En realidad, durante

los procesos de activación y recuperación eléctrica celulares se generan numerosos vectores de aparición secuencial. Sin embargo, en aras de la simplicidad, se suele representar gráficamente solo el vector resultante promedio de la despolarización o repolarización miocárdica (eje eléctrico de QRS y T). No obstante que el análisis vectorial es válido, es más útil la aplicación del concepto de asa. Si se traza una curva que, partiendo de un punto de origen, toque las cabezas de los vectores sucesivos regresando al punto de inicio se obtendrá un asa (asa de QRS y asa de T). Según sea la aparición de los vectores sucesivos, una asa puede girar a favor o en contra de las manecillas del reloj (rotación horaria o antihoraria, respectivamente). La morfología de las deflexiones electrocardiográficas dependerá, en última instancia, de la relación que los vectores y el asa guarden con las diferentes derivaciones (y con sus hemicampos). En la Figura 5 se muestra un diagrama que esquematiza los elementos relacionados con el origen y el registro de los componentes del electrocardiograma.

Es menester aclarar que el electrocardiograma representa únicamente magnitudes escalares (v. gr. voltaje), y que la aplicación de las magnitudes vectoriales (incluida el asa) es el resultado de la extrapolación

Figura 5. Elementos relacionados con el origen y registro de los componentes del electrocardiograma

El asa representada en la Figura gira en sentido horario. Cada derivación está dividida en dos mitades (hemicampo) por una línea perpendicular a su punto neutro o cero. Los eventos ocurridos en el hemicampo positivo de una derivación registrarán deflexiones positivas. Los eventos ocurridos en el hemicampo negativo registrarán deflexiones negativas. El hemicampo de la derivación vertical aparece sombreado.

del principio físico al método electrocardiográfico. El análisis y la comprensión de los vectores y las asas electrocardiográficas forman el sustento para la interpretación racional de un electrocardiograma.

Heterogeneidad cardíaca anatómica y funcional

El corazón es un órgano heterogéneo desde el punto de vista anatómico y funcional.⁷ La heterogeneidad funcional, analizada desde el punto de vista eléctrico, se debe a la expresión de diferentes corrientes iónicas en las distintas capas del espesor del miocardio ventricular.^{8,9} Esto determina diferencias fundamentales en la duración y forma de los potenciales de acción representativos del subendocardio y subepicardio.¹⁰ Los dos rasgos más significativos son: 1) el potencial de acción del subendocardio tiene mayor duración que el del subepicardio, y 2) la amplitud de la fase 1 del potencial subepicárdico es más prominente que el subendocárdico. Además, en 1991 fue descrito un tercer grupo celular en la parte media de la pared ventricular llamado células M.^{11,12} Por lo tanto, el espesor de la pared ventricular está constituido por tres tipos de células diferentes desde el punto de vista electrofisiológico: subendocárdicas, células M y subepicárdicas.

El concepto de la heterogeneidad eléctrica ha sido validado mediante un modelo experimental llamado preparación en cuña ventricular. Empleando este modelo se ha determinado la base celular de los componentes del electrocardiograma en condiciones normales (complejo QRS, punto J, segmento ST y onda T)^{13,14} y patológicas (síndrome de QT prolongado, síndrome de Brugada, y otros).^{15,16}

Referencias bibliográficas

1. Moorman F, Christoffels V, Anderson R. Anatomic substrates for cardiac conduction. *Heart Rhythm* 2005;2:875-886.
2. James TN. Structure and function of the sinus node, AV node and His bundle of the human heart. *Prog Cardiovasc Dis* 2002;45:235-267.
3. Medrano G, de Micheli A, Aranda A, Iturralde P. *Arch Inst Cardiol Mex* 2000;70:19-29.
4. Goldberger A. Non linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet* 1996;347:1312-14.
5. Cabrera E. Teoría y práctica de la electrocardiografía. La Prensa Médica Mexicana, 1958; pag: 5-24.
6. Bayés de Luna A. *Clinical Arrhythmology*. Wiley and Blackwell 2001; pag: 51-57.
7. Katz A, Katz P. Homogeneity out of heterogeneity. *Circulation* 1989;79:712-717.
8. Katz A. Cardiac ion channels. *N Engl J Med* 1993;328:1244-1251.
9. Grant A. Cardiac ion channels. *Circ Arrhythmia Electrophysiol* 2009;2:185-194.
10. Schram G, Pourrier M, Melnyk P, Nattel S. Differential distribution of cardiac ion channel expression as a basis for regional specialization in electrical function. *Cir Res* 2002;90:939-950.
11. Antzelevitch Ch, Sicouri S, Litovsky, et al. Heterogeneity within the ventricular wall. *Cir Res* 1991;69:1427-1449.
12. Sicouri S, Antzelevitch Ch. A subpopulation of cells with unique electrophysiological properties in the deep subepicardium of the canine ventricle. *Cir Res* 1991;68:1729-1741.
13. Yan G, Lankipalli R, Burke J, et al. Ventricular repolarization components on the electrocardiogram. *J Am Coll Cardiol* 2003;42:401-9.
14. Yan G, Antzelevitch Ch. Cellular basis for the electrocardiographic J wave. *Circulation* 1996;93:372-379.
15. Yan G, Antzelevitch Ch. Cellular basis for the Brugada syndrome and other mechanisms of arrhythmogenesis associated with ST segment elevation. *Circulation* 1999;100:1660-1666.
16. Yan G, Antzelevitch Ch. Cellular basis for the normal T wave and the electrocardiographic manifestations of the long QT syndrome. *Circulation* 1998;98:1928-1936.

Correspondencia:
Dr. Gerardo Pozas Garza
Email: gpozas@itesm.mx