

**BIOMÉDICA***Recibido 18 Oct 2016 Aceptado 24 Oct 2016**ReCIBE, Año 5 No. 3, Noviembre 2016*

# Potencial Eléctrico en el Corazón: Representación Mediante un Grafo

## Heart Electrical Potential: a Graph Representation

Natalia González-Cervantes<sup>1</sup>  
nataliaglezcervantes@gmail.com

Aurora Espinoza-Valdez<sup>1</sup>  
aurora.espinoza@cucei.udg.mx

Ricardo Salido-Ruiz<sup>1</sup>  
drsalidoruiz@gmail.com

<sup>1</sup> Depto. de Ciencias Computacionales, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.

**Resumen:** De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades cardiovasculares constituyen un problema de salud pública por su alta frecuencia, además de que son la principal causa de muerte en todo el mundo. Motivo por el cual es necesario investigar nuevos enfoques de prevención y tratamiento de las complicaciones cardiovasculares. En este trabajo se estudia el potencial eléctrico en el corazón empleando elementos de la teoría de grafos, es decir representando las estructuras cardiacas involucradas y sus conexiones por medio de vértices y aristas. Los resultados muestran que es posible describir el potencial eléctrico en el corazón incorporando información fisiológica en las aristas del digrafo. Esto es, el digrafo puede proporcionar información con respecto al potencial eléctrico por regiones para una mejor localización.

**Palabras clave:** Grafo, corazón, potencial eléctrico.

**Abstract:** According to the World Health Organization (WHO), because of its high frequency, cardiovascular diseases are a public health problem, moreover they are the leading cause of death worldwide. Then, it is necessary to investigate new approaches to prevention and treatment of cardiovascular complications. In this paper we studied the electrical potential in the heart using elements of graph theory, i.e., representing cardiac structures involved and their connections through vertices and edges. The results show that it is possible to describe the electrical potential in the heart including physiological information into the edges of the digraph. That is, the digraph can provide information regarding the electrical potential in certain regions for better localization.

**Keywords:** Graph, hearth, electrical potential.

## 1. Introducción

A través de los años, la comprensión del ser humano desde un punto de vista biológico (es decir el entendimiento del funcionamiento de los sistemas y aparatos que lo componen) se convirtió en un objetivo primordial y desafiante para la ciencia debido a la complejidad de los mismos. En la actualidad sabemos que una ciencia no es capaz de describir con detalle todos los aspectos relacionados a los sistemas biológicos. Ciencias como la biología y la computación se fusionan en lo que conocemos como biología computacional con el objetivo de estudiar a detalle todos los aspectos relacionados con éstos sistemas. De manera más concreta, la biología computacional tiene como objetivo el proponer modelos que ayuden a describir los procesos biológicos en términos del lenguaje computacional con el fin de pronosticar o predecir el comportamiento de éstos sistemas (Lobardero, 2014 y Shapiro, 1975). Por otro lado, el modelo describe teóricamente un objeto de la realidad mediante elementos dentro del campo de la computación. El éxito o fracaso de éste modelo dependen de la precisión con la que se construya ésta representación numérica. Otro aspecto importante que interviene es la fidelidad con la que se concreten hechos y situaciones naturales en forma de variables y la relación

entre ellas. La utilidad del modelo radica en que ayuda a estudiar cómo se comportan las estructuras complejas frente a aquellas situaciones que no pueden verse con facilidad en el ámbito real. Desde mediados de los 90's una rama de la computación ha sido utilizada con este objeto: la teoría de grafos; la cual trata a los sistemas complejos de una manera más sencilla reduciéndolos a componentes (vértices) e interacciones entre ellos (aristas) (Lobardero, 2014).

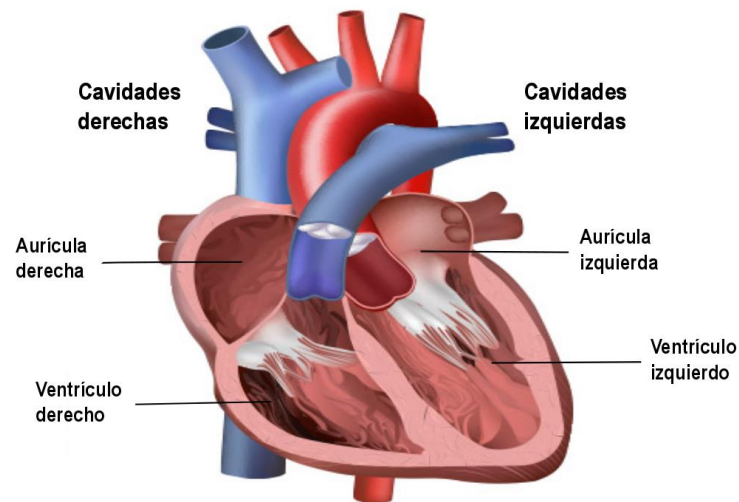
Por otro lado, el funcionamiento del corazón ha sido objeto de una serie de estudios (Peñaranda, 2012, Jiang, 2010, Min-Hung, 2016, Göktepe, 2009, Villa, 2000, Basavaprasad, 2014), esto porque el corazón es un órgano vital. Entre estos estudios realizados utilizando grafos, destaca el trabajo de Villa y Reyna (2000), donde se desarrolló un algoritmo utilizando grafos borrosos con el objetivo de simplificar los métodos tradicionales de caracterización de señales biológicas en especial la del trazo ECG (Villa, 2000). Más recientemente, Basavaprasad y Ravindra (2014) explican diferentes tipos de grafos y presentan un modelo de red teórica de gráfico en el corazón humano, donde se proponen diversos grafos que muestran las posibles rutas que podría tener el flujo sanguíneo en el corazón. Basavaprasad y Ravindra proponen solucionar problemas de la red cardiaca micro-densa modificando mediante los grafos de Euler y Hamilton la circulación del Sistema Cardíaco (Basavaprasad, 2014). Como se puede observar, sí existen estudios del corazón utilizando la teoría de grafos; sin embargo no hemos encontrado ningún estudio referente al potencial eléctrico del corazón utilizando grafos.

## 2. El Corazón

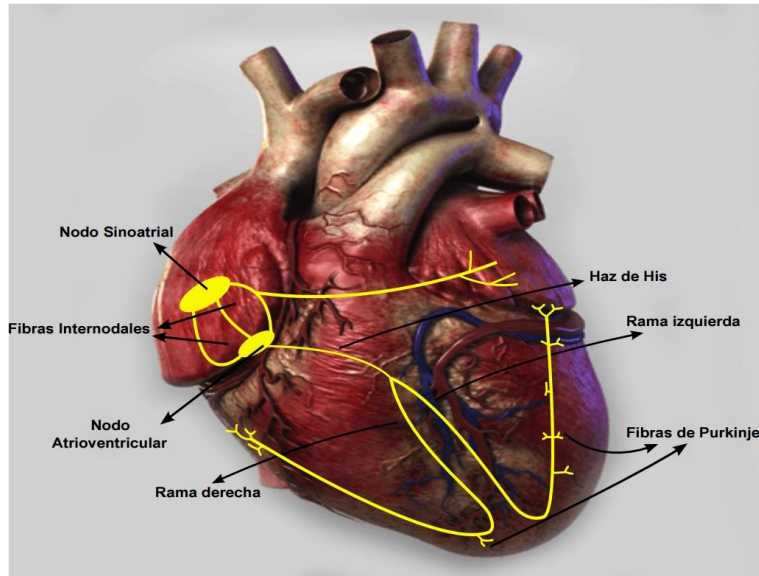
El órgano del corazón está formado por músculos cardíacos que generan impulsos eléctricos. Este órgano tiene la función de oxigenar cada célula de nuestro cuerpo. La complejidad del corazón va más allá de solo bombear sangre; requiere de procesos biofísicos que lo ayudan a ser un órgano autómatas latiendo de esta manera por sí solo y recibiendo ocasionalmente órdenes del sistema nervioso central y del sistema endócrino. Podríamos preguntarnos, ¿qué tiene

que ver la computación con el corazón? Para poder comprender la relación que existe, es necesario comprender a detalle el funcionamiento del corazón.

La anatomía del corazón consta de 4 cavidades: 2 aurículas y 2 ventrículos, la sangre entra por las aurículas al corazón y de las aurículas la sangre es enviada a los ventrículos desde donde será expulsada la sangre para enviarla al resto del cuerpo (ver Fig. 1) (Uribe, 2014). Por otro lado, el músculo cardiaco (miocardio) es el que hace latir al corazón, tiene la capacidad de originar y transmitir sus propios impulsos eléctricos para contraerse a través de células especializadas. Esta señal eléctrica se origina en el nodo sinoatrial, este se encuentra ubicado en la parte superior derecha del corazón (véase Fig. 2). Al nodo sinoatrial también se le denomina el marcapasos natural del corazón. Cuando el marcapasos emite el impulso eléctrico, éste estimula la contracción de las cavidades superiores del corazón (aurículas), después la señal pasa por el nodo atrioventricular (AV). El nodo AV detiene la señal un instante y la envía por las fibras musculares de las cavidades inferiores (ventrículos) estimulando su contracción (Uribe, 2014).

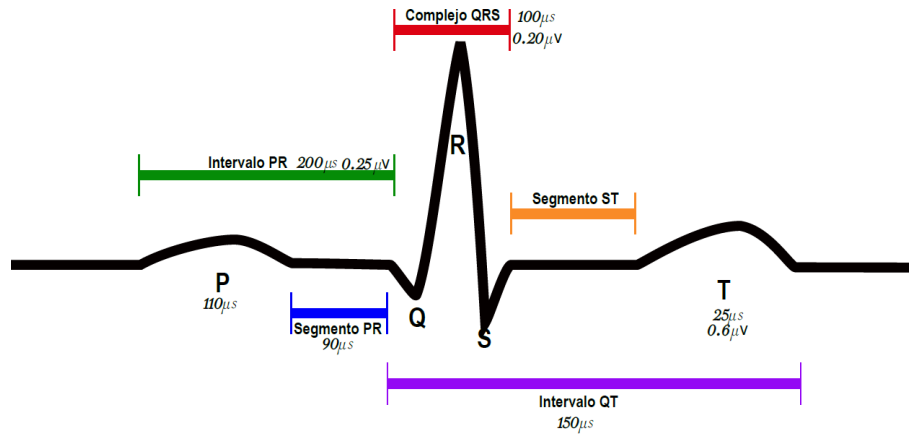


**Figura 1:** Anatomía del corazón (imagen modificada de bioedonline.org).



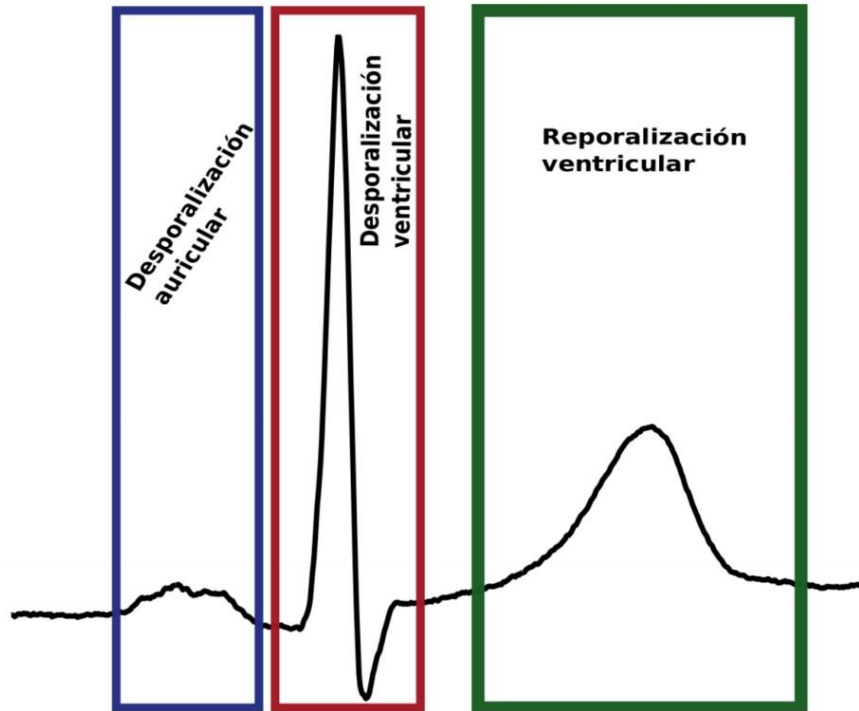
**Figura 2:** *Potencial eléctrico del corazón (imagen modificada de healthncure.org)*

A través de un electrocardiograma (ECG) es posible ver la representación gráfica de los movimientos del corazón, ya que este estudio puede registrar la actividad eléctrica muscular que causa los movimientos del corazón [6]. El resultado del ECG se puede observar en la Fig. 4, donde la primera ondulación pequeña en la parte superior del trazado la cual se denomina onda P e indica que las aurículas son estimuladas en forma eléctrica para bombear la sangre hacia los ventrículos. El siguiente segmento se le conoce como complejo qRs y nos indica que el impulso eléctrico llegó a los ventrículos y generó la contracción de los mismos. La siguiente ondulación es la onda T y nos dice que el corazón se recupera del impulso que recibió, es decir; se encuentra relajado y listo para el siguiente impulso eléctrico (Shapiro, 1975, Uribe, 2014).



**Figura 3:** Señal electrocardiográfica del corazón.

Los impulsos eléctricos se producen a través de la despolarización y repolarización de las células cardíacas, es decir, son células excitables que en respuesta a un estímulo generan un potencial de acción asociado a una respuesta contráctil. Un potencial de acción es un cambio reversible en el potencial de la membrana producida por la activación secuencial de diversas corrientes iónicas generadas por la difusión de iones a través de la membrana a favor de su gradiente electroquímico. Así, durante la despolarización la célula pasa de estar interiormente con carga negativa a positiva, en otras palabras, las células tienen en su interior una carga negativa y durante el potencial de acción entran iones positivos a la célula, esto es la despolarización y provoca las contracciones musculares cardíacas (sístole) y la repolarización es cuando la célula recupera su carga interior negativa, es cuando se relaja el músculo (diástole), ver Fig. 4.



*Figura 4: Esquema la señal cardiaca y su relación con las fases del corazón.*

### 3. Resultados

A fin de visualizar la topología de potencial eléctrico en el corazón podemos modelar el potencial eléctrico del corazón en el cual se puedan incluir leyes fisiológicas a partir de la definición de un grafo (Diestel, 2005). El potencial eléctrico se puede representar a través de un grafo donde: cada vértice representa los puntos principales que generan los impulsos eléctricos y que llevan la electricidad a cada parte del corazón, las aristas describen el valor máximo de voltaje y su duración en tiempo que descarga cada vértice.

**Definición 1:** Un grafo  $G$  es una terna ordenada  $(V, E, \Psi)$  que consiste en un conjunto no vacío  $V$  de vértices, de un conjunto  $E$  de aristas y de una función de incidencia  $\Psi: E \rightarrow K \subseteq 2^V$ , donde  $K \subseteq 2^V$  es subconjunto de  $2^V$  de tamaño menor o igual a 2, es decir, cada arista cumple una de las siguientes condiciones:

- $\Psi$  asocia la arista  $e$  a un par de vértices de  $V$ ,  $\Psi(e) = \{u, v\}$ .

- $\Psi$  asocia la arista  $e$  a un vértice de  $V$ ,  $\Psi(e)=\{u\}$ .

$G$  representa el grafo de potencial eléctrico en el corazón. Los vértices de  $G$  tienen todas sus aristas orientadas en tal forma que simboliza la dirección de la circulación del potencial eléctrico en el corazón. Además, cada arista es etiquetada con la información fisiológica por la función  $\Psi: E \rightarrow (R+U)^2$  donde  $U$  es el número de parámetros fisiológicos considerados para el desarrollo del potencial eléctrico del corazón.

Cada arista es etiquetada como  $e_i$  donde  $i \in N$ , ahora cada arista es etiquetada como  $e_i(t_i)$  donde  $t_i$  es el tiempo. El tiempo del ECG se estimó el intervalo de tiempo que debe transcurrir desde un vértice a otro, se debe tomar en cuenta que diferentes factores influyen en el cálculo de la despolarización y repolarización auricular y ventricular, por lo que no es posible determinar con exactitud el tiempo o el voltaje de cada una de las ondas, pero se puede estimar el máximo y mínimo voltaje y tiempo que debe tener cada una, y mientras se respeten estas pautas, se puede decir que se tiene un ciclo normal.

Comenzando con el marcapasos natural del corazón (nódulo sinusal), el impulso eléctrico recorre las fibras internodales hasta llegar al nodo atrioventricular, en el grafo este recorrido es representado por los vértices  $v_1, v_2, v_3, v_4$  y  $v_5$  los cuales simulan la primer onda, la onda P, la cual tiene un tiempo máximo entre  $0.10''-0.12''$ . Una vez que la onda eléctrica viaja hasta el nodo atrioventricular se retiene la señal por al menos  $0.8''$  en el vértice  $v_6$ , donde  $e_{av}$  representa un tiempo de duración de  $.9''$ , esto con el fin de permitir a las aurículas y ventrículos terminar su proceso de llenado y vaciado, una vez completado esto, el impulso sigue su camino hacia el tronco del Has de His en el vértice  $v_7$  y comienza de esta manera la despolarización ventricular, donde la corriente eléctrica se divide entre las dos ramas del Has de His (izquierda  $v_8$  y derecha  $v_9$ ), teniendo en cuenta que en la rama izquierda predomina el potencial eléctrico debido a dos ramas más que se encuentran en este lado llamadas: división posterior y división anterior ( $v_{10}, v_{17}, v_{18}$ ) el recorrido por estas ramas genera la onda R de nuestro



electrocardiograma, siendo por este motivo una deflexión positiva larga, el viaje eléctrico continua hasta las fibras de Purkinje {v12, v15, v15, v20, v24, v23, v11, v13, v14, v19, v21, v22, v22, v25, v26, v27, v28,v29,v30} las cuales generan la onda s terminando de esta manera la despolarización ventricular y el complejo qRs que no debe medir más de 0.10". Las fibras de purkinje forman parte del sistema bioeléctrico del corazón y se distribuyen por todo el miocardio ventricular. La repolarización ventricular comienza al terminar el complejo qRs generando de esta manera la onda T de nuestro ECG y propicia el término de un ciclo eléctrico para prepararse para el siguiente.

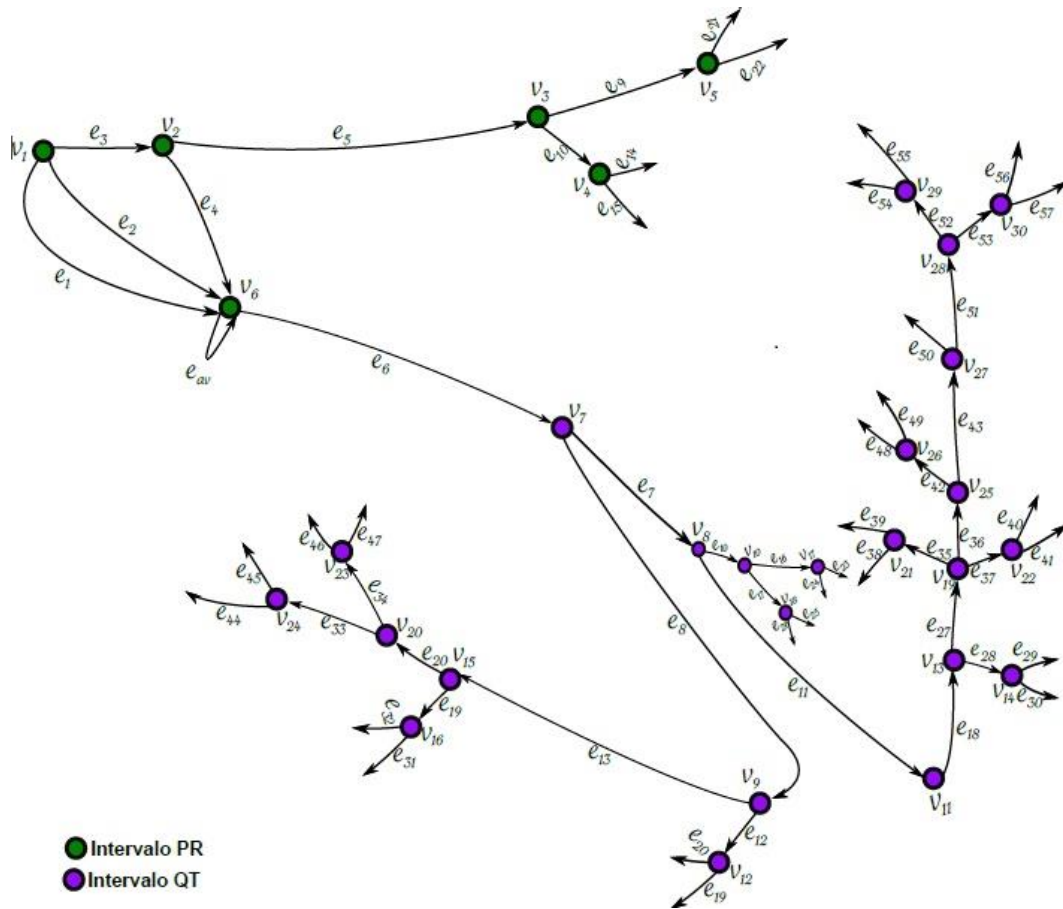
Una vez generado el grafo principal del corazón sano se pueden analizar diferentes aspectos en el comportamiento del corazón e incluso proponer soluciones a alguna de las problemáticas que presenta, como las arritmias.

## 4. Conclusiones

El corazón es un órgano complejo en cuestión de funcionalidad y estructura. En este trabajo se estudió el potencial eléctrico en el corazón utilizando teoría de grafos. El estudio muestra que se pueden incorporar las leyes fisiológicas involucradas. Esto es, cada uno de los vértices representa uno de los puntos principales que generan los impulsos eléctricos y que llevan la electricidad a cada parte del corazón, las aristas describen el valor máximo de voltaje y su duración en tiempo que descarga cada vértice. Además, puede proporcionar información con respecto al potencial eléctrico por zonas para una mejor localización.

Como trabajo a futuro, será incorporando todo a un sistema y programar el grafo para generar el ECG de un sujeto sano y el conjunto de combinaciones fisiológicas que describen la patología de arritmias.

**AGRADECIMIENTOS:** Un especial agradecimiento al Médico Internista. Dr. Vitelio Augusto Mariona Montero por asesoría en la fisiología del corazón.



**Figura 5:** Grafo del potencial eléctrico en el corazón. Donde el intervalo PR representa la despolarización auricular y el intervalo QT la despolarización y repolarización ventricular.

## Referencias

Basavaprasad B., Ravindra S. Hegadi. A graph theoretical network model on human heart. International Journal of Applied Engineering Research. Vol. 9 No. 20 pp 4549-4553, 2014.

Diestel R. Graph Theory. Springer-Verlag Heidelberg, New York, 2005.

Göktepe S., Kuhl E. "Computational modeling of cardiac electrophysiology: a novel finite element approach" Int. J. Numer. Methods Eng. 79, pp. 156-178, 2009.

Jiang Z., Connolly A. and Mangharam R. "Using the virtual heart model to validate the mode-switch pacemaker operation", Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Conf., pp. 6690-6693, 2010.

Lombardero O. A. Un vistazo a la Biomatemática. Números: Revista de Didáctica de las Matemáticas. Vol. 86, pp 29-38, 2014.

Min-Hung C., Po-Yuan C. and Ching-Hsing L., "Quadratic adaptive algorithm for solving cardiac action potential models". Computers in Biology and Medicine, vol. 7, pp. 261-273, 2016.

Peñaranda A., Cantalapiedra I, Bragard J. and Echebarria B. "Cardiac dynamics: A simplified model for action potential propagation", Theo Bioi and Med Modelling, vol. 9, pp. 50, 2012.

Shapiro M., Martínez S. J. Arritmias cardiacas: Introducción a su Diagnóstico y Tratamiento. Librería de Medicina, pp 27-31, 1975.

Uribe W. Electrocardiografía Clínica. De Lo Básico A Lo Complejo. Bogotá, 2014.

Villa Angulo C., Reyna Carranza, M.A. Algoritmo para detectar el complejo QRS en el trazo de ECG, utilizando operaciones para grafos borrosos. Memoria Electro-Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica. Vol. 22 pp 109-114, 2000.

<http://www.who.int/en/>

## Notas biográficas:

**Natalia González-Cervantes** es estudiante del quinto semestre de la carrera de Ingeniería en Computación en la Univesidad de Guadalajara. Edad: 24 años. Intereses: Seguridad web, redes computacionales, biología y matemáticas.

**Aurora Espinoza-Valdez** recibió el grado de Licenciada en Matemáticas Aplicadas en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México. El grado de Maestra en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. El grado de Doctora en Ciencias en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICyT), México. Desde el

02/2012 es Profesor Investigador del Depto. de Ciencias Computacionales en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Su interés de investigación es el modelamiento matemático de sistemas biológicos y sistemas dinámicos.

**Ricardo Salido-Ruiz** es Ingeniero en electrónica por la Universidad Autónoma de Baja California. Trabajó en el sector privado en Electrónica Lawrence en el diseño y creación de prototipos de circuitos con componentes de montaje superficial. Realizó su maestría en Bioelectrónica en CINVESTAV-IPN en el área de procesamiento de señales de transductores electroacústicos. Realizó sus estudios de doctorado en Instituto Nacional Politécnico de Lorraine, INPL (hoy Universidad de Lorraine) en Francia para en el área de procesamiento de señales electrofisiológicas. Ahí trabajó con señales electroencefalográficas EEG, provenientes de pacientes con epilepsia. Laboró en el programa de Bioingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California como Profesor Titular A. Presidió el comité científico evaluador de trabajos libres y del concurso estudiantil de la SOMIB en el congreso nacional de ingeniería biomédica CNIB2014 en Puerto Vallarta. Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en el Departamento de Ciencias Computacionales del CUCEI.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons  
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.