

La electricidad y la electrónica como base para la electrofisiología y la biofísica de membranas

Estela López Hernández¹, Juan Carlos López De la Cruz², Hugo Solís¹

¹ Laboratorio de Neurofisiología. Depto. Anatomía. Facultad de Medicina. CU. UNAM.

² Pasante en Servicio Social de la Lic. en Pedagogía y estudiante del 2º semestre de la Lic. en Diseño Gráfico. F.E.S. Acatlán. UNAM.

*Correspondencia: Laboratorio de Neurofisiología. Depto. de Anatomía. Edificio B 4º piso. Facultad de Medicina. CU. UNAM. Email: estelalopez@unam.mx, hugosol@unam.mx

Resumen

En esta revisión planteamos la necesidad que tienen los estudiantes en general y en particular los de bioingeniería y medicina de obtener información básica sobre la electrofisiología del tejido excitable. Es importante establecer algunos conceptos históricos de cómo evolucionó y se estructuró el marco teórico de la electricidad y de la electrónica que manejamos en la actualidad. Esta información nos sirve de base para entender el desarrollo tecnológico de la electrónica que en particular se usa para el diseño y construcción de dispositivos biomédicos. Presentamos conceptos generales del circuito eléctrico equivalente a la membrana celular del tejido excitable y de manera funcional establecemos el comportamiento del voltaje y de la corriente en un sistema biológico.

Palabras claves: biofísica de membranas, electrofisiología, electricidad, electrónica.

Aceptado: 3 junio 2016

Electricity and electronics as a support for electrophysiology and membranes biophysics

Abstract

In this review we raised the need of the students in general and in particular those of bioengineering and medicine to obtain basic information on the electrophysiology of excitable tissue. It is important to establish some historical concepts of how it evolved and the theoretical framework of electricity and electronics we handle today was structured. This information serves as a basis for understanding the technological development of electronics that is used particularly for the design and construction of biomedical devices. We discuss general concepts equivalent to the cell membrane excitable tissue and establish functional behavior of voltage and current in a biological system circuit.

Key words: *biophysics of membranes, electrophysiology, electricity, electronics.*

Introducción

La tecnología y la interdisciplinariedad son aspectos que han estado presentes en la evolución de la especie humana. Hoy en día los avances científicos se dan a pasos agigantados y han fomentado la especialización en las diferentes disciplinas. Sin embargo; el conocimiento integrado es la mejor herramienta para entender, crear y progresar. Por lo tanto, en esta revisión nos acercamos al estudio de la electrofisiología de manera general y desde el punto de vista básico y aplicado, con el propósito de refrescar algunos conocimientos que consideramos indispensables para todo individuo, en especial para aquel que se relacione con la bioingeniería o ingeniería biomédica, entendiéndola como la disciplina científica y tecnológica que aplica los principios y métodos de la ingeniería, la ciencia y tecnología para comprender, definir y resolver problemas biológicos y médicos en las

áreas básicas y aplicadas, así como para todas aquellas personas interesadas en el estudio de los aspectos biológicos de la vida y en especial de la medicina.

Dado lo extenso del tema, en este documento se hace una somera revisión de algunos de los aspectos básicos que consideramos más importantes de tener en cuenta para la aplicación del conocimiento. Se incluyen varios de los antecedentes históricos relevantes para darle "sabor" al tema, así como sus respectivas referencias bibliográficas para quienes quieran ahondar en la materia.

El objetivo general es proporcionar a los estudiantes y al personal de salud que se relacionan con la bioingeniería y biomedicina, un documento breve e interesante que les ayude a ampliar su marco de referencia en los temas que aquí se tratan.

Generalidades

La electrofisiología es la ciencia que se ocupa del estudio de los fenómenos eléctricos originados en los seres vivos, es un tema que debería de interesarnos a todos, no importa el área de estudio a la que nos dediquemos, ya que es parte de nuestra vida en el día a día¹.

Sus orígenes son tan antiguos como los fenómenos eléctricos en la naturaleza, no obstante, fue

hasta aproximadamente en 600 A.C. que el filósofo griego Tales de Mileto describió por primera vez los fenómenos electrostáticos (cargas eléctricas en reposo) producidos al frotar fragmentos de ámbar y comprobar su capacidad de atracción sobre pequeños objetos, de ahí que se le considera el padre del pensamiento moderno².

Los marinos conocían el fuego de San Telmo, fluorescencia que aparecía en lo alto de los mástiles durante las tormentas³. El poder del pez gato eléctrico (*malapterurus electricus*)⁴, y el de la raya eléctrica (*torpedo marmorata*)⁵ que producen descargas que paralizan a sus presas se conocía desde siglos antes del descubrimiento de la electricidad y se utilizaron como los primeros métodos de electroterapia en la historia⁶.

William Gilbert alrededor del año 1600 de nuestra era demostró que otras muchas sustancias mostraban efectos eléctricos por frotamiento y acuñó la palabra electricidad. La cual proviene de elektron que significa ámbar en griego, y es una forma de energía debida a cargas eléctricas estáticas o en movimiento. Es por esto que a Gilbert se le considera el padre de la electricidad y el magnetismo. En 1672 Otto von Guericke construyó la primera máquina electrostática capaz de producir triboelectricidad y que se refiere a la electrificación por frotamiento.

El siglo XVIII fue una época de nuevos descubrimientos. Uno de los hallazgos más notable fue hecho por Stephen Gray en 1729 y establece que la electricidad puede ser

conducida a través de un cuerpo conductor. En 1733 Francois de Cisternary du Fay identificó la existencia de dos cargas eléctricas, una positiva y otra negativa ligadas a la existencia de dos tipos de fluidos eléctricos, uno de atracción y otro de repulsión. En 1745 Pieter van Musschenbroek y E.G von Kleist inventaron la botella de Leyden que es un dispositivo eléctrico construido con un envase de vidrio que permite almacenar cargas y que es considerado el primer tipo de condensador.

Entre los años 1747 y 1752 Benjamín Franklin basado en los conocimientos previos inició sus experimentos sobre la electricidad. Defendió la hipótesis de la naturaleza eléctrica de las tormentas y demostró mediante su célebre cometa que los rayos eran descargas eléctricas de tipo electrostático e inventó el pararrayos. Joseph Priestley describió que la carga eléctrica es una propiedad física de algunas partículas subatómicas que se manifiestan mediante fuerzas de atracción o repulsión entre ellas⁷. Lo anterior le sirvió de base a Charles-Augustin de Coulomb quien desarrolló un aparato de medición de las fuerzas eléctricas y estableció con formalidad matemática (ley) que la magnitud de cada una de las fuerzas eléctricas con que interactúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de la magnitud de ambas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa y tiene la dirección de la línea que las une. La fuerza es de repulsión si las cargas son de igual signo, y de atracción si son de signo contrario. Estas fuerzas son unas de las más importantes que intervienen en las reacciones atómicas². En su honor la unidad de dichas fuerzas se llama Coulomb (C).

El pionero de las investigaciones en electrofisiología en 1780 fue Luigi Galvani. Estudió la teoría del fluido nervioso de naturaleza eléctrica en los animales. Para el estudio de la estimulación muscular mediante descargas eléctricas sobre ranas disecadas

utilizó los descubrimientos previamente descritos, un generador electrostático y una botella de Leyden⁸ y de esta forma estableció las relaciones entre la electricidad y el músculo⁹. En la década de los 90s Alessandro Volta llevó a cabo diversos experimentos acerca de los fenómenos comprobados por Galvani. Comenzó a experimentar sólo con metales y llegó a la conclusión de que el tejido animal no era indispensable para producir corriente, lo que causó controversias. Con el empleo de sus electroscopios y de su condensador, Volta comprobó experimentalmente la existencia de un desequilibrio eléctrico, que llamó "tensión" entre dos metales distintos cualesquiera. Este descubrimiento fundamental le indujo a tratar de conseguir la multiplicación de tales desequilibrios mediante oportunas cadenas de conductores en contacto. En el curso de las investigaciones que llevó a cabo por espacio de tres años pudo comprobar una serie de propiedades que le permitieron la construcción de la primera pila eléctrica. La demostración, realizada en 1800, del funcionamiento de la primera pila eléctrica puso fin a las controversias anteriores y definieron lo que denominamos diferencia de potencial eléctrico, tensión o voltaje. Esto es, para que exista un flujo de cargas entre dos puntos, debe existir una diferencia de potencial eléctrico entre dichos puntos y la unidad en que se miden se llama Volt (V)¹⁰.

Siguió una época de grandes avances, la famosa Revolución Industrial en el siglo XIX. En la primera mitad de este siglo, Michael Faraday (1821) trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica, descubrió la inducción electromagnética y demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra, investigaciones que años más tarde, dieron origen al motor eléctrico que hoy conocemos, así como a los condensadores o capacitores que son componentes que almacenan energía eléctrica, como una pila o batería, pero en forma de campo

eléctrico. Su unidad de medida es el faradio (F). Los condensadores están formados por dos placas metálicas separadas por un material aislante llamado dieléctrico (figura 1A). Cuando se conecta una resistencia (figura 1B) con un condensador y una batería (figura 1C) en serie, la corriente inicial es alta puesto que la batería debe transportar la carga de una placa del condensador a la otra.

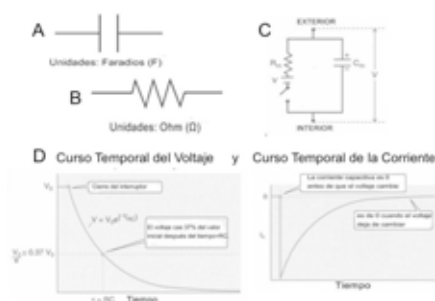


Figura 1. Ilustra en A el símbolo de un capacitor o condensador eléctrico. En B el símbolo de una resistencia. En C un circuito RC con una batería (V), una resistencia (R_m) y un condensador (C_m) conectados en serie. En D el comportamiento tanto del voltaje como de la corriente en un condensador. Al cerrar el interruptor el voltaje cae de manera asintótica. Cuando alcanza 37% del valor inicial se establece la constante de tiempo $\tau = RC$. Esta medida es de utilidad para valorar en la célula excitable la capacitancia y por ende la capacidad de generar respuestas de diferente duración. También se ilustra el curso que tiene la corriente en un capacitor

Cada una de las placas tendrá potenciales de carga diferentes, por lo tanto el capacitor quedará caracterizado por la diferencia de potencial de sus placas (V). La diferencia de potencial V es el trabajo por unidad de carga que se necesita para llevar una pequeña carga desde una placa hasta la otra. En particular la diferencia de potencial entre los dos conductores de un capacitor es proporcional a las cargas que tienen, donde Q es la carga total de cada placa. Se propone entonces: $Q = C \times V$ donde la constante de proporcionalidad C recibe el nombre de capacitancia y se mide en coulombs/volt.

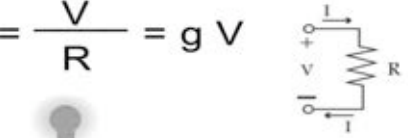
La capacitancia de un capacitor depende de las formas y las posiciones relativas de los conductores, y además del medio en el cual se encuentren inmersos los mismos. La carga de corriente alcanza asintóticamente el valor de cero a medida que el condensador se carga con el voltaje de la batería. La carga del condensador almacena energía en el campo eléctrico entre sus placas. La tasa de carga se describe típicamente en función de la constante de tiempo RC. Los capacitores o condensadores no retienen la carga por mucho tiempo. Para el proceso de descarga VC decrece exponencialmente con el tiempo. Ambas

funciones tienen una asíntota en $V = 0$ para tiempos muy grandes, (es decir, cuando τ tiende a infinito). Si están cargados y no se emplean de inmediato, se autodescargan en pocos minutos (figura 1D). Es decir, la función de un condensador es almacenar cargas eléctricas de forma instantánea y liberarla de la misma forma en el preciso momento que se requiera. Diferente a una batería, la cual para disponer de su carga o energía, es necesario que se lleve a cabo una reacción química en su interior cuando la conectamos a algún dispositivo que consuma electricidad¹¹. En 1827 André-Marie Ampère formuló la teoría del electromagnetismo, que establece que el campo magnético en el espacio alrededor de una corriente eléctrica, es proporcional a la corriente eléctrica que constituye su fuente, de la misma forma que el campo eléctrico en el espacio alrededor de una carga, es proporcional a esa carga que constituye su fuente. Es decir la corriente eléctrica es el flujo de carga a través de un conductor. Para definir la corriente eléctrica se observa la cantidad de carga que pasa por un conductor en un segundo, y por consiguiente su unidad es el amperio o Ampere (A) cuya equivalencia es: 1 Ampere = 1 Coulomb/Segundo¹².

Varios de los conceptos previos junto con el de resistencia eléctrica o resistor (figura 1B) que son

elementos que se oponen al paso de corriente, que disipan energía eléctrica, que se emplean para controlar voltaje y corriente y cuyas unidades son los Ohms, se integran en una de las leyes

fundamentales de la electricidad, que es la Ley de Ohm. Fue formulada en 1827 por George Simón Ohm y relaciona las tres magnitudes físicas principales de la electricidad que son: la diferencia de potencial (o voltaje), la resistencia y la corriente (o intensidad). La ley de Ohm establece que: la magnitud de una corriente (I) eléctrica que pasa entre dos puntos es igual al cociente entre la tensión (o voltaje V) y la resistencia (R) del conductor por el que atraviesa dicha corriente. La relación de las variables de la ley de Ohm y el esquema que la representa se ilustran en la (figura 2)¹³.

$$I = \frac{V}{R} = g V$$


I = Corriente en Amperes (A)
V = Voltaje en Volts (V)
R = Resistencia en Ohms (Ω)
g = Conductancia en Siemens (S)

Figura 2. Ilustra la fórmula matemática y el diagrama que representa la ley de Ohm, así como las unidades correspondientes de medición de acuerdo con el Sistema Internacional.

Otro descubrimiento importante posterior a la primera revolución industrial (1750-1840) es el de la conductancia eléctrica que se refiere a la capacidad de un material para conducir la corriente. Es una propiedad inversa a la resistencia eléctrica. Es decir, al encontrar el recíproco de la resistencia eléctrica de un material se tendrá una medida de que tan bien conducirá éste la electricidad. La cantidad se llama conductancia y se representa con el símbolo G, se mide en Siemens (S) en honor a Ernst Werner M. von Siemens¹⁴.

Se define como la razón de la corriente al voltaje, o el inverso multiplicativo de la resistencia, relación que se ilustra en la (figura 3).

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}$$

Figura 3. Relación de las variables para el cálculo de la conductancia (G). G es la conductancia (gate: en inglés). R es la Resistencia en ohmios (Ω). I es la corriente en amperios. V es el voltaje en voltios.

Con todos estos descubrimientos y otros tantos que sucedieron paralelamente, las aplicaciones de la electricidad crecieron continuamente durante la segunda revolución industrial (1880-1914). Después de que Edison perfeccionara la lámpara incandescente y describiera que el flujo de partículas cargadas (iones) que proviene de una superficie de metal (u óxido de metal) inducido por energía térmica vibracional provoca una fuerza electrostática que empuja los electrones hacia la superficie (emisión termoiónica) los sistemas de iluminación eléctricos se convirtieron en el logro más importante del mundo y la electricidad pudo sustituir al vapor para hacer funcionar los motores¹⁵. Esto ocasionó el control incipiente en el mercado de la generación y distribución de la energía eléctrica y una histórica rivalidad entre Tesla y Edison, conocida como “la guerra de las corrientes”¹⁶. Vale la pena describir algo de esta supuesta “guerra”.

Tesla buscaba producir energía eléctrica de manera natural y quería que llegara a todo el mundo, de manera gratuita. Concibió un campo magnético rotativo, como producto de dos o más corrientes alternas desfasadas, la clave es que permitía transportar corrientes alternas a largas distancias, y en pocos meses diseño todos los componentes necesarios para ponerlo a funcionar.

Pero Edison fue defensor y primer introductor de la corriente continua (CC o DC), cuya simbología se muestra en (figura 4a) y se refiere al flujo constante de electrones a través de un conductor en un solo sentido. Por ejemplo la corriente que entregan las baterías. Mientras que la corriente alterna (CA o AC) es el flujo de electrones a través de un conductor en ambos sentidos, cambia su dirección cincuenta a setenta veces por segundo, y oscila de arriba a abajo (señal sinusoidal de corriente). La figura 4b representa el símbolo de la CA y que es por ejemplo la corriente que entrega el enchufe.

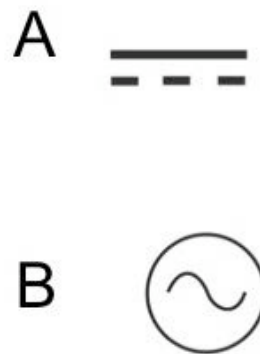


Figura 4. Ilustra en A el símbolo que denota la Corriente continua (CC o DC por sus sigla en inglés) y en B el de la corriente alterna (CA o AC por sus siglas en inglés).

El problema con el que Tesla se encontró es que Edison, estaba en esos momentos haciendo una promoción de la corriente continua, y no le hizo ninguna gracia que el nuevo método ideado por Tesla (CA) le hiciera la competencia por ser mucho más eficiente. Ahora casi toda la corriente que usamos en nuestras casas es alterna, ya que el transporte de corriente continua a largas distancias requiere que se instalen generadores cada uno a pocos metros debido a las pérdidas que tiene.

La corriente alterna, sin embargo, es capaz de superar estas resistencias con mayor facilidad, ya que puede convertirse en voltajes más altos con mayor facilidad¹⁷.

El progreso continuó y en 1904 J. A. Fleming al estudiar desde el punto de vista físico el fenómeno termoelectrónico en las lámparas incandescentes, descubrió que al colocar dentro del bombillo otro electrodo independiente y algo alejado del filamento, se establecía una circulación de corriente eléctrica desde el filamento (cátodo) hacia el nuevo electrodo (ánodo), a través de un circuito externo. Así fue como inventó la válvula termoiónica también conocida como diodo de Fleming, con la que consiguió que la corriente eléctrica circulara en un solo sentido, lo cual fue de vital importancia en la conversión de la corriente alterna a continua, y lo que supuso el inicio de la tecnología electrónica moderna¹⁸.

Tres años después, Lee de Forest intercaló entre los dos electrodos (cátodo y ánodo) de la válvula diodo de Fleming un tercer electrodo, denominado grilla o rejilla de control, con el cual la válvula era capaz de amplificar pequeñas señales de CA. La sensibilidad a la recepción de señales inalámbricas resultó ser superior en la válvula triodo en comparación con las posibilidades de los dispositivos electrolíticos y de carborundo o carborundum que se utilizaban en aquella época, y fue así como patentó la válvula electroiónica triodo, a la que llamó "audiófono" y con la que fue posible construir el amplificador de los circuitos osciladores, que después fueron la base de las telecomunicaciones por ondas de radio¹⁹.

Todos estos avances en la electricidad, entendida como la fuerza que se manifiesta por la atracción o repulsión entre partículas cargadas originada por la existencia de electrones y protones y en la teoría del electromagnetismo como se describió con antelación, sentaron las 10 bases de la electrónica y que se refiere al

estudio y aplicación del comportamiento de los electrones en diversos medios, como el vacío, los gases y los semiconductores, sometidos a la acción de campos eléctrico y magnético^{20,21}.

La ley de Ohm es una relación válida para un conjunto de elementos conectados entre sí por los que puede circular una corriente eléctrica. Se aplica a la totalidad de un circuito de CC o DC o a una parte del mismo. En electrónica básica lo más común es analizar los circuitos de CC o DC.

Para el análisis de circuitos de CA se sustituye la resistencia (R) por la impedancia (Z), que es una medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión.

Tiene en cuenta los desfases entre voltaje e intensidad y los efectos de los campos electromagnéticos producidos en los componentes electrónicos del circuito²².

Con los antecedentes mencionados y otro tipo de arreglos en la configuración de las resistencias o tipo de conexión, se establecieron los arreglos en serie que corresponden a una configuración en la que la corriente que atraviesa los elementos es la misma. En el arreglo de las resistencias en serie, como el que se muestra en (figura 5A), por ellas pasa exactamente la misma corriente. Por lo tanto el valor de las resistencias en serie se suma para obtener una resistencia equivalente. $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

Mientras que en los arreglos en paralelo la diferencia de potencial es la misma para todos los elementos. En el arreglo de las resistencias en paralelo, como el que se representa en (figura 5B), se considera que dos resistencias están en paralelo si sobre las terminales correspondientes de éstas se establece un mismo voltaje. Por lo tanto, la resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo es el producto de éstas dividido por la suma de ambas. $R_{eq} = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$ ²³.

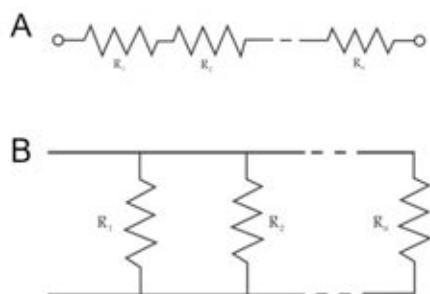


Figura 5. En A se muestra el arreglo de las resistencias en serie y en B el arreglo en paralelo.

La electrónica aplicada a la electrofisiología

Todos los aspectos antes mencionados han tenido y tienen su aplicación en la investigación biomédica. El desarrollo de dispositivos (amplificadores) de registro de actividad eléctrica se basa en la aplicación de conductores o semiconductores (electrónica digital) que aunados con el desarrollo computacional permiten la obtención y análisis cada vez más eficiente de señales biológicas. En varias áreas de la biomedicina ha tenido aplicación el conocimiento de la electrónica. Se refleja en mucho en la electrofisiología y en particular en la biofísica de tejidos excitables. En especial queremos mencionar y ejemplificar la propiedad de excitabilidad que tiene el sistema nervioso central (SNC) de algunos sistemas biológicos.

La unidad funcional del SNC es la neurona. Esta célula tiene la gran propiedad de generar respuestas que codifican en gran medida el funcionamiento del sistema nervioso. El objetivo de la neurociencia ha sido justamente descifrar estos códigos con el registro de la actividad eléctrica de las diferentes áreas cerebrales que las generan. Las técnicas de registro han sido variadas. El registro de actividad de campo eléctrico en el electroencefalograma (EEG), en

el electromiograma (EMG), el reflejo vestíbulo ocular (VOR), los potenciales evocados en diversas modalidades como los relacionados a eventos son algunos ejemplos. En cuanto al registro de la actividad individual neuronal está el registro extracelular e intracelular que en la actualidad bajo la modalidad de fijación de voltaje y registro de toda la célula (Patch Clamp, Whole cell) han revelado funcionamientos claves de la actividad neuronal como son el comportamiento de receptores membranales y la corriente relacionada con ellos. Por lo tanto, la membrana celular tiene una permeabilidad selectiva a los distintos iones del medio intracelular y extracelular debido a la presencia de proteínas estructurales que funcionan como canales iónicos a través de los cuales se establece el movimiento iónico lo que implica desplazamiento de cargas. Las membranas celulares pueden representarse con un modelo de circuito RC que consiste en una resistencia y un condensador o capacitor en paralelo (figura 6A), donde la resistencia la representan los canales iónicos de la membrana, y el condensador se representa por el aislamiento de la membrana lipídica. Las bombas iónicas tienen la función de establecer una diferencia de potencial a través de la membrana y pueden modelarse como una pila eléctrica. La resistencia, la pila y el condensador pueden conectarse en serie o en paralelo, cada modo de conexión establece una dinámica diferente. Una conexión adecuada entre las componentes del análogo electrónico es fundamental para que el modelo reproduzca los comportamientos observados experimentalmente.

La dinámica puntual de la membrana celular es aquella que tiene lugar en una región muy pequeña de la membrana, en la cual el movimiento de iones ocurre sólo a través de la misma. En esa región o parche de la membrana, las unidades de carga (iones) pasan a través de una resistencia y alteran la carga que se acumula en el condensador (membrana) por la acción de la pila (trabajo de las bombas) (Figura 6B y C).

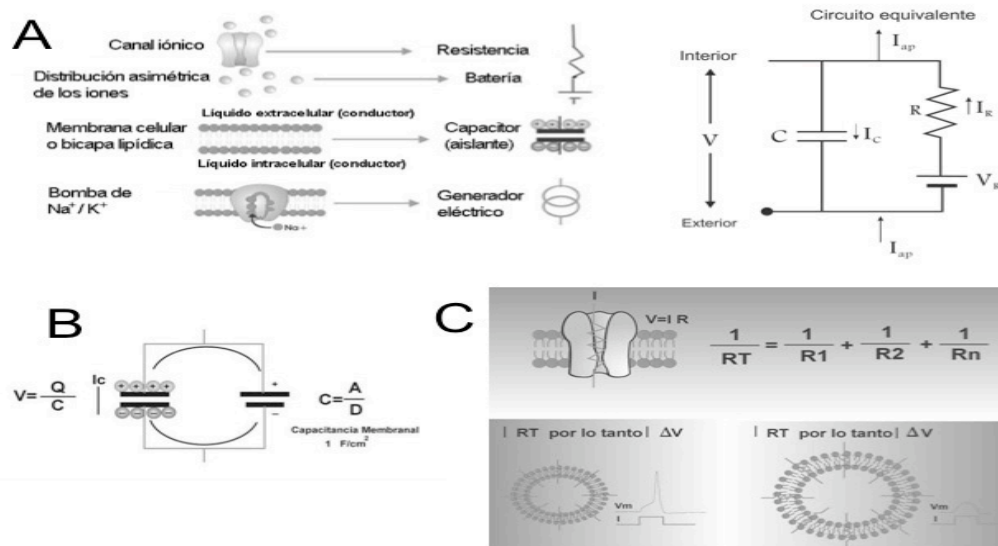


Figura 6. Una de las mejores aplicaciones del estudio de la corriente eléctrica está en la valoración de la propiedad de excitabilidad que tiene el tejido nervioso. La membrana celular tiene un circuito equivalente (A, B) que permite valorar el movimientos de partículas con carga eléctrica al pasar de un lado a otro de la membrana a través de una estructura protéica (canales) que le confiere a la membrana propiedades resistivas. La estructura misma de la membrana le confiere propiedades capacitivas. Por esta razón en C se ilustra que la respuesta (amplitud, duración y frecuencia) de la célula excitable ya sean potenciales locales o potenciales de acción depende justamente de estas propiedades intrínsecas de la membrana celular.

Este tipo de arreglo o comportamiento eléctrico de la membrana podemos estudiarlo en organismos unicelulares como el paramecium, organismo filogenéticamente antiguo y en el cual desde hace más de 100 años se han estudiado la movilidad de sus cilios y sus funciones sensoriales²⁴⁻²⁶. También en organismos pluricelulares como plantas, en las cuales desde antes de 1700 se realizaron varios experimentos de fisiología que estuvieron basados de manera importante en lo que ahora conocemos como hidroponia. Steven Hales es considerado el padre de la fisiología de las plantas por todos los experimentos que realizó y que culminaron en un libro publicado en 1727 "Vegetable staticks"²⁷. De los diversos experimentos realizados en las plantas se puede decir que generan potenciales de acción, por el uso de flujos de potasio y calcio principalmente, que viajan a través del floema, tubos o vasos

liberianos que tienen en la corteza y que funcionan como tejido conductor para coordinar su actividad y cuya señal se propaga a una velocidad de 3 cm/seg²⁸. Una de las revistas más importante en esta área y que se publica desde 1926 hasta nuestros días es Plant physiology [29]. En los animales, como se mencionó antes, el poder extraordinario del pez eléctrico se conocía desde siglos antes del descubrimiento de la electricidad. El choque producido por el pez gato eléctrico fue tópico de especulación y curiosidad considerable por varios personajes de aquellos años, lo que devino después en investigaciones científicas del fenómeno eléctrico en todos los seres vivos. Galeno caracterizó el letargo producido por el choque como una dificultad de movimiento debida a enfriamiento y compresión del tejido nervioso, lo que él atribuyó a una cierta cualidad enfriadora inherente al pez³⁰.

La hipótesis planteada más influyente para explicar la naturaleza del choque, antes del advenimiento de la teoría eléctrica, fue la de Giovanni Borelli, considerado el padre de la biomecánica y quien amplió la creencia de Lorenzini (ampolla de Lorenzini) de que el órgano eléctrico era un tipo especial de músculo, argumentaba que cuando el torpedo era tocado, el órgano eléctrico del animal se contraía a altas frecuencias y provocaba sensaciones de entumecimiento muy parecidas a las provocadas por un golpe en el codo. La teoría de Borelli permaneció sin cambios durante casi cien años. Debido por un lado a la ignorancia de la electricidad, y por el otro a que era una teoría defendida por René Antoine Ferchault de Réaumur, quien describió de forma similar que los efectos entumecedores eran ocasionados por una contracción de los músculos del torpedo, misma que provocaría una dura descarga que podía ser transmitida a través de cuerpos sólidos, pero no a través de líquidos, como los antiguos habían considerado^{31,32}.

Más tarde, con la botella de Leyden y otros experimentos realizados por John Hunter³³, John Walsh³⁴, Henry Cavendish³⁵ y Tiberius Cavallo³⁶ entre otros, relacionados con las chispas provenientes de la descarga de la anguila eléctrica, así como con los realizados por Galvani y todos los estudiosos de los fenómenos eléctricos, fue que se establecieron las bases de la presencia de la electricidad animal³⁷. Estas evidencias fueron generalizadas años más tarde en el principio fisiológico de que todos los animales producen su propia electricidad y de que la electricidad es el agente de la actividad nerviosa y muscular³⁸. Todo este interés curioso acerca de la electricidad animal se transformó en un esfuerzo científico conocido hoy en día como electrofisiología³⁹, palabra que deriva del griego ἤλεκτρον (ēlektron = ámbar); φύσις, (physis = naturaleza) y -λογία (-logía = estudio) y que se refiere al estudio de las propiedades eléctricas de células y tejidos biológicos. Término que se usa desde finales de 1800, que incluye medidas de cambio de voltaje o corriente eléctrica en una

variedad amplia de escalas, desde la corriente (100 a 200 pA = pico Amperios) que pasa por un simple canal iónico de proteínas hasta en órganos completos como el corazón,⁴⁰ y que coincide con otros muchos conocimientos y técnicas de la medicina del siglo XIX que empiezan a tomar carácter más científico. Sobresale, entre otros, Claude Bernard (1865) como el gran fisiólogo del siglo y fundador oficial de la medicina experimental⁴¹.

A lo largo del siglo XX, hubo un gran incremento de descubrimientos en áreas relacionadas con la actividad médica, sobre todo en fisiología, farmacología y química, entre otras.

Con base en anterior descrito, podemos considerar que el primer protocolo de electroterapia o electroanalgesia se remonta al año 46 A.C. cuando Scribonius Largus planteó que para todo tipo de gota se debía colocar un pez torpedo vivo bajo el pie del enfermo⁴².

Además, con las observaciones hechas por Redi, Walsh y Galvani, entre otros, de la existencia de la electricidad en la musculatura de los organismos vivos, se sentaron las bases de la electricidad y la electrónica para usos médicos. Y junto con más estudios que se desarrollaron posteriormente y que han seguido evolucionando, surgieron: el electrocardiograma, del alemán elektrokardiogramm (ECG o EKC) que tuvo sus orígenes en el año de 1842 cuando Carlo Matteucci, físico italiano y profesor de la Universidad de Pisa, mostro cómo la corriente eléctrica acompaña a cada latido cardíaco. Utilizó un nervio extraído de un anca de rana, aprovechándolo como sensor eléctrico.

Cuando el músculo del anca se contraía servía como signo visual de la actividad eléctrica. Heinrich Muller y Rudolph von Koelliker en 1856 confirmaron lo mostrado por Matteucci, al aplicar un galvanómetro en la base y ápice de un ventrículo de corazón expuesto. Hicieron una prueba similar a la que Matteucci realizó. De esta manera observaron una pequeña sacudida del músculo justo antes de la sístole ventricular y otra mucho más pequeña seguida de la sístole.

Concluyeron que esas sacudidas eran producidas por las corrientes eléctricas.

Más tarde, en 1872, Alexander Muirhead, ingeniero eléctrico, dijo haber registrado un ECG, conectando alambres a la muñeca de un paciente febril. Después el fisiólogo británico John Burden Sanderson, junto a Frederick Page, usaron un electrómetro capilar, registraron la corriente eléctrica del corazón y señalaron la existencia de dos fases.

Luego, en 1887 A. D. Waller, fisiólogo británico quien utilizó el electrómetro capilar de Lippman para registrar el primer ECG tanto en animales como en humanos, describió que la contracción del corazón inicia en el apex y termina en la base⁴³. Luego W. Eithoven, también interesado es todos los hallazgos descritos por Waller y sus antecesores, se dio cuenta de las limitaciones del electrómetro capilar, se dedicó a estudiar y en 1901 diseñó un galvanómetro de cuerda con el cual facilitó los registros, logró graficarlos para después analizarlos con precisión y detectó una serie de deflexiones u ondas en el registro del ECG humano a las que les asignó las letras P, QRS, S y T. Un par de años después, Einthoven comenzó a transmitir el ECG desde el hospital a su laboratorio, a través de líneas telefónicas, aprovechando los conocimientos de J. Bosscha Jr. relacionados con la polarización galvánica y la rapidez de las ondas sonoras.

En 1906, Einthoven publica su artículo "Le telecardiogramme" en el que presentó con detalle las aplicaciones clínicas del ECG en humanos. Continuó con sus estudios y descripciones de los hallazgos que observó tanto en ratas como en humanos.

Definió mejor las características de las ondas y su relación con la estructura anatómica (la onda P representa solo actividad auricular y la onda Q es parte del complejo ventricular). El éxito obtenido por Eithoven hizo que las compañías manufactureras se interesaran en producir versiones comerciales del

electrocardiógrafo, y fue así como la Cambridge Scientific Instrument Co. produjera los primeros aparatos y en 1908 se vendió el primer electrocardiografo comercial.

Einthoven describió un triángulo equilátero formado por sus derivaciones estándar I, II, III que más adelante sería llamado el "triángulo de Einthoven". Todos estos estudios le valieron para que en 1924 le otorgaran el Premio Nobel de Fisiología y Medicina, por sus descubrimientos en los mecanismos del ECG⁴⁴.

En 1855 aparece el electromiógrafo desarrollado por Duchenne⁴⁵ y después con Adrián y Bronk⁴⁶ y luego, con Erlanger y Gasser quienes estudiaron impulsos eléctricos transmitidos por fibras nerviosas. Diseñaron aparatos electrónicos que combinaban amplificadores y osciloscopios de rayos catódicos, lo que permitía visualizar las señales o impulsos nerviosos transmitidos por las fibras nerviosas individuales, que luego fueron amplificados en una pantalla fluorescente. Así demostraron que cada grupo de fibras nerviosas presenta una velocidad de conducción diferente, en especial en función del grosor de la fibra. Contribución muy importante que permitió avanzar en el conocimiento de los mecanismos de la transmisión de los impulsos de tipo dolor, frío o calor y que los hizo acreedores al Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1944⁴⁷.

Los estudios continuaron y en 1870 surge el electroencefalógrafo que utilizaron Fritsch y Hitzig, para registrar los movimientos que se producían al estimular regiones específicas de la corteza cerebral estableciendo así los primeros indicios de que existe una región cerebral relacionada con el movimiento voluntario y que hoy en día conocemos como la corteza motora primaria⁴⁸. Más tarde (1875), R. Caton describió por primera vez la actividad eléctrica cerebral en conejos y changos, y luego Adolf Beck, explicó la actividad eléctrica cerebral espontánea y provocada, en perros, conejos y en otros estudios que llevó a

cabo y publicó en un documento conocido como: *Centralblatt für Physiologie*, que provocó gran polémica en el ambiente fisiológico de la época (1890) con otros varios estudiosos del tema. Hasta cuarenta años después, en 1929 G. Hans Berger fue el primero que publicó el registro de la actividad eléctrica cerebral en el humano y lo promovió como técnica de registro no invasiva con expectativa clínica. Hans Berger se reconoce como neurofisiólogo, dado que se dedicó a estudiar la actividad eléctrica cerebral en diferentes condiciones: sueño, narcosis y epilepsia. Describió las condiciones en que se presentan las ondas alfa y beta cerebrales, ritmos con antelación descritas en perros por Wladimir Práwdicz-Neminski, en 1913. Dado el valor científico de los hallazgos descritos por Berger, se le considera el abuelo del electroencefalograma⁴⁹.

Conclusiones

La intención del presente documento es exponer de manera general la historia del conocimiento de la electrofisiología y biofísica y en particular del fenómeno eléctrico. Quisimos elaborar un esquema epistemológico muy sencillo. Pretendemos que esta información repercuta en el pensar y actuar de los estudiantes que se involucran con la tecnología y en especial con la investigación biomédica. Ya que el desarrollo tecnológico de la biomedicina requiere un conocimiento sólido sobre electricidad, electrónica y acerca de los mecanismos celulares y en particular de las redes celulares que conforman un sistema biológico que se pretende estudiar. El diseño y construcción de dispositivos orientados a la adquisición de señales biológicas debe apoyarse en un amplio conocimiento del funcionamiento de los sistemas biológicos en los que serán utilizados.

Referencias

1. La Historia con mapas. Definición de electrofisiología. 31/12/2007. Último acceso: 25/04/2016. <http://www.lahistoriaconmapas.com/historia/historia2/definicion-de-electrofisiologia/#sthash.xLoXxxiZ.dpuf>
2. Museo Pirenaico de la electricidad. Historia de la electricidad. Último acceso: 25/04/2016. <http://www.mupiel.es/elect/histo.html>
3. San Telmo, la fluorescencia y los tubos Led. El fuego de San Telmo. Último acceso: 25/04/2016. <http://www.tubosdeled.com/el-fuego-de-san-telmo/>
4. El universo bajo el microscopio. El pez gato eléctrico. 30/08/2015. Último acceso: 25/04/2016. <http://eluniversobajoelmicroscopio.blogspot.mx/2015/08/pez-gato-electrico.html>
5. Fishbase. Torpedo marmorata Risso, 1810. Marbled electric ray. Último acceso: 25/04/2016. <http://www.fishbase.se/summary/Torpedo-marmorata.html>
6. Chau H. Wu. Ciencia y cultura, elementos. El pez eléctrico y el descubrimiento de la electricidad animal. Último acceso: 25/04/2016. <http://www.elementos.buap.mx/num65/hm/49.htm>
7. Cuaderno de cultura científica. La ley de la fuerza eléctrica (1): la distancia. 01/03/2016. Último acceso: 25/04/2016. <http://culturacientifica.com/2016/03/01/la-ley-de-la-fuerza-electrica-1-la-distancia/>
8. The History Channel Latin America. Hoy en la historia. Fue inventada la botella de Leyden. Último acceso: 25/04/2016. <http://mx.tuhistory.com/hoy-en-la-historia/fue-inventada-la-botella-de-leyden>
9. Aguilar Peris José. SM Profes.net El legado de Galvani y de Volta a la ciencia moderna. Parte I. Luigi Galvani (1737-1798). Último acceso: 25/04/2016. http://www.exploraciencia.profes.net/ver_noticia.aspx?id=8761
10. Aguilar Peris José. SM Profes.net El legado de Galvani y de Volta a la ciencia moderna. Parte II. Alessandro Volta (1745-1827). Último acceso: 25/04/2016. http://www.exploraciencia.profes.net/ver_noticia.aspx?id=8760
11. Buscabiografías. Michael Faraday. 1999. Último acceso: 26/04/2016. <http://www.buscabiografias.com/biografia/verDetalle/1827/Michael%20Faraday>
12. Georgia State University. HyperPhysics. Electricidad y magnetismo. Ley de Ampere. Último acceso:

- 26/04/2016. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/amplaw.html>
13. Pardell Xavier. Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica (SEEIC). Apuntes de electromedicina. Ley de Ohm. 09/04/2016. Último acceso: 26/04/2016. <http://www.pardell.es/leyohm.html>
14. EcuRed. Siemens. Último acceso: 26/04/2016. <http://www.ecured.cu/Siemens>
15. Campo eléctrico. Efecto Edison. Último acceso: 26/04/2016. <https://triuns.wordpress.com/2008/05/17/efecto-edison/>
16. Nikola Tesla "la película" 11/03/2013. Último acceso: 26/04/2016. <https://www.youtube.com/watch?v=awqR4nmOaTc>
17. Lacort Javier, Nikola Tesla, el hombre que cambió el mundo pero fue condenado al ostracismo. 01/07/2014. Último acceso: 26/04/2016. <http://hipertextual.com/2014/07/nikola-tesla-genios-historia>
18. Agustín Arca, Fleming, John A. Último acceso: 26/04/2016. http://www.histel.com/z_histel/biografias.php?id_nombre=49
19. Biografías y vidas. La enciclopedia biográfica en línea. Lee de Forest. Último acceso: 27/04/2016. http://www.biografiasyvidas.com/biografia/f/forest_lee.htm
20. Real Academia Española. Último acceso: 27/04/2016. <http://dle.rae.es/?id=ETfiNgk>
21. Floriani JCA. Sobre la historia de la electrónica en el primer Centenario de su Nacimiento: la era termoiónica. IEEE Latin American Transactions, Vol. 4. No. 4, June 2006. Último acceso: 27/04/2016. http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieeee/issues/vol04/vol4issue4June2006/4TLA4_03Floriani.pdf
22. Cruz GE. Impedancia y reactancia. 23/04/2015. Último acceso: 27/04/2016. <https://prezi.com/hyotc4r7zruh/impedancia-y-reactancia/>
23. Resistencias en serie y paralelo. Último acceso: 27/04/2016. <https://www.amschool.edu.sv/Paes/science/resistencias.htm>
24. Jennings HS. Die Niederen Organismen ihre reizphysiologie und psychologie. Leipzig und Berli Druck und Verlag Von B.G. Teubner. 1914. IX. Kapitel. Die Reaktionen der infusorien auf den elektrischen strom. pp. 230-260. Último acceso: 27/04/2016. <https://archive.org/stream/dieniederenorgan00jenn#page/330/mode/2up>
25. Eckert R, Naitoh Y. Passive electrical properties of paramecium and problems of ciliary coordination. The Journal of General Physiology. Vol 55, 1970. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2203010/pdf/467.pdf>
26. Yano J, Valentine MS, Van Houten JL. Novel insights into the development and function of cilia using the advantages of the Paramecium cell and its many cilia. Cells 2015 4(3):297-314. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.mdpi.com/2073-4409/4/3/297/htm>
27. Hales S. Vegetable staticks or, an account of some statical experiments on the sap in vegetables. Printed for W. and J. Innys ... and T. Woodward. London. 1727. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.illustratedgarden.org/mobot/rarebooks/title.asp?relation=QK711H341727>
28. Christmann A, Grill E. Plant biology. Electric defence. Nature, 2013;500(7463): 404-5. 22/ Agosto. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.nature.com/nature/journal/v500/n7463/full/500404a.html>
29. Plant physiology American Society of Plant Biologists. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.plantphysiol.org/>
30. Miguélez F, Liaño R, López-Plaza R. Notas históricas sobre peces eléctricos y algunos avances científicos. Revista Española de Física, 2001;15(4): 53-57. Último acceso: 27/04/2016. http://www.udc.gal/iuem/documentos/monografias/peces_electricos.pdf
31. Lorenzini DaS. Osservazioni intorno alle torpedini. In Firenze per L'Onofri, 1678. Último acceso: 27/04/2016. <http://ia902303.us.archive.org/22/items/osservazioniintore/osservazioniintore.pdf>
32. Wisniak J. René-Antoine Ferchault de Réaumur Desde las abejas hasta los grados. Revista CENIC Ciencias Químicas, 2001; 32(2):105-111. . Último acceso: 27/04/2016. https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Wisniak/publication/236235483_Ren-Antoine_Ferchault_de_Raumur_-_From_Bees_to_Degrees/links/00463519dbbc19545f000000.pdf
33. Hunter J. Anatomical observations on the torpedo. Phil Trans 1773-1774,63: 481-9. Último acceso: 27/04/2016. <http://rsl.royalsocietypublishing.org/content/63/481.full.pdf+html>
34. Walsh J, Seignette S. Of the electric property of the torpedo. Phil Trans (1683-1775), 63(1773-1774): 461-80.

- Último acceso: 27/04/2016. http://www.jstor.org/stable/pdf/106167.pdf?_ =1460397511449
35. Bos CD, Henry Cavendish - Discoveries on torpedo fish and water formation. 24/05/2014. Último acceso: 27/04/2016. <https://www.awesomestories.com/asset/view/Henry-Cavendish-Discoveries-on-Torpedo-Fish-and-Water-Formation>
36. Baldini U. Cavallo, Tiberio. Dizionario biografico degli itliani. Vol. 22, 1979. Último acceso: 27/04/2016. [http://www.treccani.it/enciclopedia/tiberio-cavallo_\(Dizionario_Biografico\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/tiberio-cavallo_(Dizionario_Biografico)/)
37. Empresa Provincial de Energía de Córdoba - Argentina. La historia de la electricidad. Galvani y la "electricidad animal". Último acceso: 27/04/2016. <http://molet.osvaldobustos.com.ar/educativo/Fichas/ficha%20galvani.pdf>
38. Lissmann HW. Electric location by fishes. II Orientation and navigation: 56-65. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.uvm.edu/rsenr/wfb232/Lissman.pdf>
39. Wikipedia La enciclopedia libre. Electrofisiología. Último acceso: 27/04/2016. <https://es.wikipedia.org/wiki/Electrofisiolog%C3%ADa>
40. Diccionario lexicon. Electrofisiología. Último acceso: 27/04/2016. <http://lexicon.org/es/electrofisiologia>
41. Paquet G. Bibliothèque Paul-Émile-Boulet de l'Université du Québec à Chicoutimi. Claude Bernard (1813-1878) Introduction à l' étude de la médecine expérimentale (1865). 06/05/2003. Último acceso: 27/04/2016. http://classiques.uqac.ca/classiques/bernard_claude/intro_etude_medecine_exp/intro_medecine_exper.pdf
42. Baldwin B. Rheinisches Museum für Philologie. The Career and work of scriboniuslargus. 1992. Último acceso: 27/04/2016. https://www.jstor.org/stable/41233844?seq=9#page_scan_tab_contents
43. Besterman E, Creese R. Waller- pioneer of electrocardiography. Brit Heart J 1979; 42:61-4. Último acceso: 27/04/2016. <http://heart.bmj.com/content/42/1/61>
44. Capítulo II nacimiento de la cardiología como especialidad. Último acceso: 27/04/2016. http://www.fac.org.ar/edicion/historia/rosario/pdf_zip/cap02.pdf
45. Valentine A. La ciencia médica en la historia. Guillaume Duchenne de Boulogne. Pionero en neurología y la fotografía médica. 02/02/2013. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.akashavalentine.com/akasha/node/3078>
46. Adrian ED, Bronk DW. The discharge of impulse in motor nerve fibres. Part II, The frequency of discharge in reflex and voluntary contractions. J Physiol LXVII (2): 119-151. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1402822/pdf/jphysiol01681-0003.pdf>
47. Nobelprize.org Joseph Erlanger biographical. Último acceso: 27/04/2016 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1944/erlanger-bio.html
48. Hagner M. The electrical excitability of the brain; toward the emergence of an experiment. J History Neurosci Basic Clin Perspectives 2012 21(3):237-49. Último acceso: 27/04/2016. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0964704X.2011.595634>
49. Coenen A, Zayachkivska O, Kounterek S, Pawlik W, Adolf Beck, co-founder of the EEG an essay in honor of his 150th birthday. National museum in Kraków, 2013. Último acceso: 27/04/2016. <http://neuronusforum.pl/2013/beck-memorial.pdf>

Artículo sin conflicto de interés

© Archivos de Neurociencias