

# Electroplacas y peces eléctricos

## Electroplates and electric fishes

Alfredo Espitia Beltrán<sup>1</sup>

### Resumen

Este texto ofrece una visión general sobre la importancia que el estudio de los peces eléctricos ha tenido para el conocimiento y el desarrollo tecnológico desde épocas remotas. Este ha sido un tema de interés para múltiples disciplinas en diferentes momentos de la historia, y además ha presentado retos significativos a grandes hombres de ciencia. Se exponen las características generales del órgano eléctrico que este tipo de peces poseen: su unidad funcional o electroplaca, su estructura básica y su sinapsis. De forma práctica, se explica su principio de funcionamiento, el origen evolutivo relacionado con el tejido muscular y la importancia en el desarrollo de instrumentos y dispositivos eléctricos. Asimismo, se expone un modelo eléctrico con el que se puede comprender fácilmente cómo un grupo de pequeñas electroplacas puede llegar a generar, en conjunto, choques eléctricos que incluso tienen la capacidad de ser fatales, tanto para presas como para depredadores.

**Palabras clave:** electroplaca, electrocito, pez eléctrico, electrofisiología, electricidad animal, sinapsis.

### Abstract

This document is presented as a quick reference about the importance in studying electric fishes since remote times for the knowledge and the technological

development. It has been recognized as a very interesting topic for multiple disciplines along the history, it has also presented significant challenges to great scientists. It exposes the general characteristics of electric organ that this type of fish has, about its functional unit or electroplate, its basic structure and its synapses; it explains in a practical way its operating principle, its evolutionary origin related to muscle tissue and its importance in the development of electrical instruments and devices. An electric model is exposed which it can be easily understood how a group of small electroplates can generate, grouped, electric shocks that even have the capacity to be fatal, both for prey and predators.

**Keywords:** electroplate, electrocyte, electric fish, electrophysiology, animal electricity, synapses.

## 1. Introducción

Comprender de manera integral el comportamiento de los órganos eléctricos que poseen algunos peces representa un reto que requiere de la convergencia de diferentes áreas

<sup>1</sup> Ingeniero electrónico y magíster en Ingeniería Biomédica de la Universidad Nacional de Colombia. User Experience Research and Design, Universidad de Michigan. Instructor asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Central. Correo: aespitiab1@ucentral.edu.co.

del conocimiento, como la biología, la física, la química y las neurociencias. El esfuerzo conjunto se ha visto recompensado con los buenos resultados de las investigaciones y los avances tecnológicos logrados a partir de estas.

A través de la historia, grandes hombres de ciencia han encontrado inquietante la electricidad animal, por lo cual ha sido foco de inspiración de muchos trabajos, debates y controversias. El médico griego Hipócrates de Cos ya hacía referencia al choque eléctrico generado por el pez torpedo (López-Plaza, Liaño y Miguélez, 2001). Darwin definía el fenómeno como “un caso de especial dificultad”, pues, aunque lo reconocía como una ventaja de supervivencia, no lograba interpretar el proceso evolutivo (Darwin, 1859/2005). Faraday, Volta y Galvani son algunos otros nombres que se pueden mencionar en la historia del estudio de los peces eléctricos (Bogdanov, 1989; Finger y Piccolino, 2011).

Este texto pretende ofrecer un marco general sobre los procesos que ocurren en el interior del órgano eléctrico y de su unidad funcional: el electrocito (electroplaca). También se revisa cronológicamente la importancia y los favores que esta línea de estudio ha brindado al conocimiento.

## 2. Retrospectiva

En Egipto se encuentran los registros más antiguos del interés que han despertado los peces eléctricos, en particular del pez gato, que era considerado un protector.

Filósofos y naturistas como Platón, Aristóteles, Plinio y Plutarco describieron el poder adormecedor que, para cazar, usaba el pez torpedo. El médico griego Galeno de Pérgamo (130-200 e. c.) comparó los efectos del pez torpedo sobre el cuerpo humano con una

sensación de frío extremo. Esta descripción fue apoyada diez siglos después por el físico árabe Abd Al-Latif, y se mantuvo vigente sin muchas controversias hasta el siglo XVI.

Varios académicos intentaron dar una explicación al efecto del choque eléctrico sobre humanos. Algunos argumentaban que se trataba de un veneno especial, otros aseguraban que se trataba de un efecto mecánico provocado por la rápida contracción de grupos musculares en el animal.

En 1773 el anatomista John Hunter realizó el estudio más detallado hasta entonces del pez torpedo. Halló que cada órgano eléctrico estaba conformado por entre 470 y 1200 columnas de una pulgada de longitud, dependiendo del tamaño del animal. Cada columna se dividía a su vez en aproximadamente 150 partes (Hoy se sabe que cada parte es una célula). Hunter estudió las inervaciones de los órganos eléctricos y predijo que estas jugaban un rol importante en las descargas eléctricas (López-Plaza, Liaño y Miguélez, 2001).

En los siglos XVIII y XIX no era difícil encontrar peces eléctricos en laboratorios de física para ser usados como fuentes de corriente eléctrica. Michael Faraday demostró que la electricidad animal no se diferenciaba en ningún aspecto a otras clases de electricidad; consideraba que en el caso de poder comprender la naturaleza de la electricidad animal se podría transformar la fuerza eléctrica en nerviosa (Bogdanov, 1989).

En 1776, John Walsh demostró, gracias a las chispas luminosas generadas a partir de las descargas de las anguilas eléctricas, que el fenómeno correspondía efectivamente a la presencia de corrientes eléctricas. Este hecho se consideró como el nacimiento de la electrofisiología, que dio lugar, años más tarde, al principio fisiológico de que toda la materia viviente produce su propia electricidad y además es el origen

de toda actividad nerviosa y muscular (Turkel, 2013). En el siglo XIX apareció formalmente la electrofisiología y se dieron respuestas a diferentes incógnitas sobre fenómenos eléctricos en tejidos vivos (López-Plaza, Liaño y Miguélez, 2001). Más adelante se supo que los electrocitos proceden, en términos de evolución, de células musculares que se modificaron, perdieron la capacidad de contraerse, pero ganaron la habilidad de generar una corriente de iones a través de ellas (Aguilar, 2001).

La electricidad generada por peces fue utilizada como electroterapia en medicina para tratar diferentes dolencias. La dificultad para conseguir estos peces y la imposibilidad de controlar las descargas, motivó el desarrollo de medios artificiales sustitutos como generadores, medidores, monitores, etc. En 1800, Alessandro Volta inventó un aparato al que llamó órgano eléctrico artificial, porque imitaba el órgano eléctrico natural de un pez torpedo. Su estructura consistía en la interposición de láminas de zinc y plata en un baño de solución salina. Volta había inventado la batería eléctrica (López-Plaza, Liaño y Miguélez, 2001).

### 3. El órgano eléctrico y los electrocitos

La capacidad de generar electricidad por parte de los peces parece haber evolucionado en diferentes estadios. En casi todos los casos, la presencia de un órgano eléctrico se desarrolló a partir de sistemas sensoriales capaces de detectar campos eléctricos (electrorrecepción). Sin embargo, en algunas especies, el órgano eléctrico evolucionó, además, como una herramienta de defensa o ataque (Sierra, 2007).

Los órganos eléctricos son, en esencia, transformaciones de masas musculares situadas, según la especie, en diferentes partes del

cuerpo del animal, y que se han modificado para no contraerse al recibir un estímulo nervioso. Estudios de embriología y anatomía comparada establecieron que los órganos eléctricos proceden por evolución de músculos especializados. El origen de la corriente eléctrica en estos órganos es una alteración muy particular del tejido muscular (Aguilar, 2001).

Los órganos eléctricos consisten en apilamientos de aproximadamente cinco mil células planas y delgadas llamadas electrocitos o electroplacas. Cada una de ellas tiene solo uno de sus lados altamente inervado y tiene alta resistencia eléctrica, mientras que el lado opuesto carece de inervación y su resistencia eléctrica es baja (Beaumont, 2016). Ambos lados mantienen un potencial de membrana en reposo de alrededor de  $-90$  mV. Al producirse la estimulación neuronal, todas las membranas inervadas en un apilamiento de electroplacas se despolarizan simultáneamente hasta un potencial de membrana de aproximadamente  $40$  mV, lo que genera una diferencia de potencial de unos  $130$  mV a través de cada célula, como se puede apreciar en la figura 1.

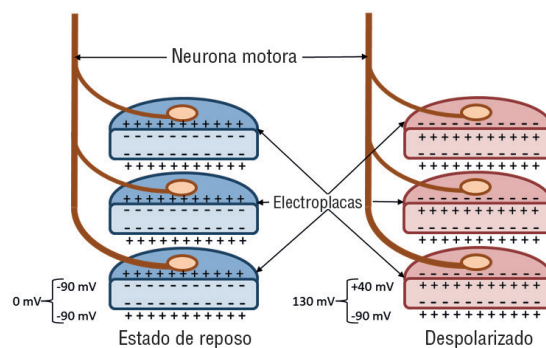
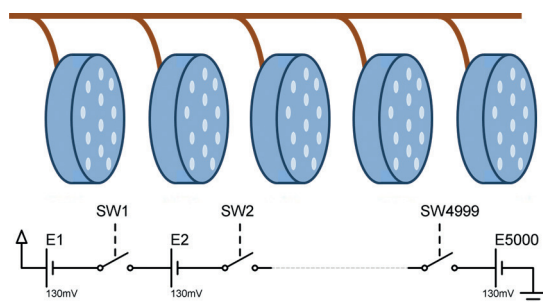


Figura 1. Despolarización simultánea de las membranas inervadas en una pila de electroplacas. Fuente: adaptado de Voet y Voet (2006).

Dado que los cinco mil electrocitos están conectados en serie, la diferencia de potencial total es de casi  $650$  V (Voet y Voet, 2006).

Para que el choque eléctrico genere un impacto importante en la caza o en la defensa, las electroplacas se deben activar de manera sincrónica. Dado que cada una de ellas se localiza a una distancia diferente del sistema nervioso central del animal, las velocidades de conducción de las diferentes neuronas motoras varían directamente con la distancia a la cual se encuentra la electroplaca. Es decir, como la longitud de los axones de las neuronas motoras son diferentes, los más largos conducen su señal más rápido y los más cortos lo hacen más lentamente, de modo que los estímulos llegan al mismo tiempo independientemente de la distancia a la cual se hallen (Linás, 2003). El proceso se muestra en las figuras 2 y 3, junto con un modelo eléctrico que sirve como analogía.

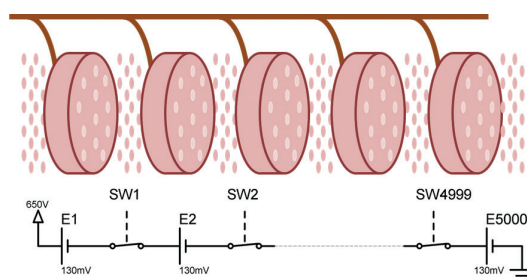


**Figura 2.** En reposo, la serie de electroplacas se comporta de manera análoga a una pila de baterías desconectadas.

Fuente: elaboración propia.

En el caso del órgano eléctrico, las uniones entre neuronas y electrocitos se denominan sinapsis colinérgicas excitatorias. Colinérgicas porque usan acetilcolina como neurotransmisor y excitatorias porque inducen la despolarización de las membranas, como se observa en la gráfica 1 (Voet & Voet, 2006), disparando un potencial de acción asociado a una corriente de  $\text{Na}^+$  (Sierra, 2007). En particular, la fuente más rica de sinapsis colinérgicas que se conocen corresponde a los órganos eléctricos de la

anguila eléctrica de agua dulce y a los del pez torpedo (Voet & Voet, 2006).



**Figura 3.** La estimulación neuronal conecta las electroplacas como si los interruptores de una pila de baterías se cerraran al mismo tiempo.

Fuente: elaboración propia.

## 4. Aportes

El estudio de la electricidad animal, y específicamente de aquella producida por los peces eléctricos, ha motivado e inspirado diferentes avances científicos y tecnológicos a lo largo de la historia. Aunque la mayoría están directamente relacionados con la electrofisiología, también es posible encontrar aportes en otras áreas del conocimiento bioinspirados en las electroplacas, su estructura, su funcionalidad y en los organismos que las poseen.

### 4.1 Electrolocación activa

Al igual que algunos insectos determinan su comportamiento a partir del flujo óptico (Kennedy, 2009) y otros animales utilizan ondas acústicas (Schnitzler, Menne, Kober y Heblich, 1983), los peces eléctricos poseen la capacidad de reconocer su entorno y los elementos que lo rodean a partir de la electrorecepción o electrolocación activa (Caputi y Budelli, 2006). Cuentan con un sistema sensorial dotado de unidades emisoras/receptoras dispersas por su cuerpo. Esto significa

que, mientras el animal está en movimiento, los campos eléctricos también se mueven e interactúan con el ambiente, lo que produce estímulos pequeños pero suficientes en los receptores, que le permiten identificar algunas características físicas de sus proximidades (Hofmann et ál., 2013). En la figura 4 se representa la estrategia de electrorrecepción de un pez eléctrico (*Gnathonemus petersii*).

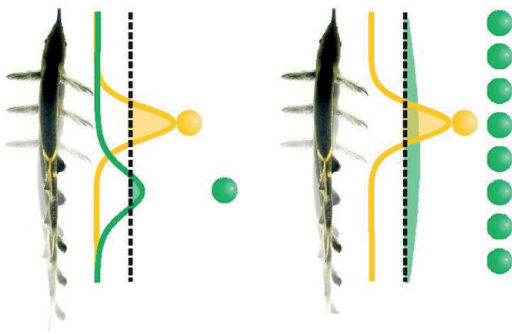


Figura 4. Electrorrecepción de la especie *Gnathonemus petersii*, reconociendo diferencias en la profundidad y en el fondo. Fuente: Hofmann (2013).

Aunque las investigaciones sobre la dinámica de la electrolocalización están aún en una etapa incipiente, el enfoque parece prometededor para el estudio del vínculo entre el movimiento y la adquisición de información sensorial. Incluso algunos trabajos alrededor de la robótica (Metta et ál., 2010; Zibner, Faubel, Iossifidis y Schöner, 2011; Neveln et ál., 2013) y del diseño de vehículos submarinos (Macyver, Fontaine y Burdick, 2004) han reconocido su importancia.

#### 4.2 Recolectores piezoeléctricos bioinspirados

El concepto conocido como *vibration energy harvesting* hace referencia a la posibilidad de convertir la energía cinética, inherente a las vibraciones, en electricidad para su posterior

almacenamiento en baterías, energía que puede ser utilizada, por ejemplo, en pequeños dispositivos portátiles. Esta conversión se puede realizar por medio de inducción electromagnética o utilizando materiales piezoeléctricos.

Inspirado en la estructura del tronco del pez eléctrico *Gnathonemus petersii*, un equipo de ingenieros surcoreanos ha diseñado y fabricado un recolector de energía cinética por vibración, a partir de un polímero piezoeléctrico flexible: fluoruro de polivinilideno (PVDF). Este material resultó muy apropiado para imitar el tejido y la estructura del pedúnculo caudal del pez (Kim, Kim y Kim, 2014).

La expectativa con este tipo de transductores es inmensa, puesto que recolectar energía a partir de vibraciones mecánicas sugiere la existencia de innumerables fuentes de energía, tanto naturales como artificiales.

## 5. Conclusiones

La curiosidad que ha despertado la electricidad animal ha desembocado en resultados de gran valor y significado para el desarrollo científico y tecnológico. El estudio detallado de los órganos eléctricos y de las electroplacas como su unidad funcional motivó el trabajo de grandes hombres, lo que ha permitido que ahora tengamos un conocimiento mucho más claro de este y otros temas asociados.

Los electrocitos (o electroplacas) tienen su origen evolutivo en células musculares que perdieron su capacidad motora, pero que desarrollaron la habilidad de generar corrientes eléctricas de naturaleza iónica, de forma que dotaron a los peces que las poseían de una ventaja competitiva en la lucha por la supervivencia.

Cada órgano eléctrico está compuesto por una fila de electroplacas, que son controladas

sincrónicamente gracias a las sinapsis con el sistema neuromotor. La estimulación neuronal lleva a cada electroplaca a tener una diferencia de potencial minúscula entre sus caras, pero que, agrupadas en centenas, generan un impacto eléctrico que podría llegar a ser poco grato para la experiencia humana.

## Referencias

- Aguilar, M. (2001). *Bioelectromagnetismo: campos eléctricos y magnéticos y seres vivos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Beaumont, W. R. C. (2016). *Electricity in fish research and management: theory and practice*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Bogdanov, K. (1989). *El físico visita al biólogo*. Moscú: Editorial Mir.
- Caputi, A. y Budelli, B. (2006). Peripheral electrosensory imaging by weakly electric fish. *Journal of Comparative Physiology*, 192, 587.
- Darwin, C. R. (1859/2005). *El origen de las especies*. Madrid: Albor Libros.
- Finger, S. y Piccolino, M. (2011). *The shocking history of electric fishes: from ancient epochs to the birth of modern neurophysiology*. Oxford: Oxford University Press.
- Hofmann, V., Sanguinetti-Scheck, J., Künzel, S., Geurten, B., Gómez-Sena, L. y Engelmann, J. (2013). Sensory flow shaped by active sensing: sensorimotor strategies in electric fish. *The Journal of Experimental Biology*, 216, 2487-2500. Consultado en <https://bit.ly/2Oz0MSt>.
- Kennedy, J. S. (2009). The visual responses of flying mosquitoes. *Proceedings of the Zoological Society of London*, A109 (4), 221-242.
- Kim, G.-W., Kim, J. y Kim, J.-H. (2014). Flexible piezoelectric vibration energy harvester using a trunk-shaped beam structure inspired by an electric fish fin. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15 (9), 1967-1971.
- Llinás, R. R. (2003). *El cerebro y el mito del yo: el papel de las neuronas en el pensamiento y el comportamiento humanos*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- López-Plaza, R., Liaño, R. y Miguélez Pose, F. (2001). Sobre peces eléctricos y algunos avances científicos. *Revista Española de Física*, 15 (4), 53-57.
- Maciver, M. A., Fontaine, E. y Burdick, J. W. (2004). Designing future underwater vehicles: Principles and mechanisms of the weakly electric fish. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29 (3). Consultado en <https://bit.ly/2B8yoVh>.
- Metta, G., Natale, L., Nori, F., Sandini, G., Vernon, D., Fadiga, L., ... Montesano, L. (2010). The iCub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development. *Neural Networks*, 23 (8-9), 1125-1134.
- Neveln, I., Bai, Y., Snyder, J., Solberg, J., Curet, O., Lynch, K. y MacIver, M. (2013). Biomimetic and bio-inspired robotics in electric fish research. *Journal of Experimental Biology*, 216, 2501-2514. Consultado en <https://bit.ly/2KRJSvR>.
- Schnitzler, H.-U., Menne, D., Kober, R. y Heblich, K. (1983). The acoustical image of fluttering insects in echolocating bats. En *Neuroethology and Behavioral Physiology* (pp. 235-250). Berlín / Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sierra, F. (2007). *El órgano eléctrico de Gymnotus: mecanismos iónicos responsables de su descarga*. Montevideo: Universidad de la República.
- Turkel, W. J. (2013). *Spark from the deep: how shocking experiments with strongly electric*

- fish powered scientific discovery*. Baltimore, ML: The Johns Hopkins University Press.
- Voet, D. y Voet, J. G. (2006). *Bioquímica*. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana.
- Zibner, S., Faubel, C., Iossifidis, I. y Schöner, G. (2011). Dynamic neural fields as building blocks of a cortex-inspired architecture for robotic scene representation. *IEEE Transactions Autonomous Mental Development*, 3 (1), 74-91. Consultado en <https://bit.ly/2MeAacz>.