

# Estimulación eléctrica TRANSCRANEAL y su efecto en la discriminación auditiva

**Cristian Romero**  
**Rosario Vega**  
**Enrique Soto**

Luigi Galvani (1737-1798) realizó los primeros experimentos de estimulación eléctrica y con ellos descubrió que los músculos y nervios pueden ser excitados con electricidad producida por generadores estáticos. Posteriormente, Alessandro Volta (1745-1827) creó la pila electrolítica que permite la descarga de corriente continua (Geddes y Hoff, 1971). Años más tarde, el colaborador y sobrino de Galvani, Giovanni Aldini (1762-1834) utilizó las cabezas de sujetos decapitados para estimular directamente la corteza cerebral, empleando pilas voltaicas para ello, provocando la expresión de gestos con características espantosas; también utilizó estimulación transcraneal en cadáveres, así como en pacientes que sufrían de “melancolía”.

Pasado el tiempo, Luigi Rolando (1773-1831) utilizó la estimulación eléctrica de distintas estructuras del sistema nervioso central, usando una pila voltaica y electrodos; Rolando probó así que el sistema nervioso central puede ser excitado eléctricamente. Durante el siglo XIX, los científicos Carlo Matteucci (1811-1868) y Emil du Bois-Reymond (1818-1896) perfeccionaron los dispositivos y la técnica de estimulación eléctrica, controlando la duración y amplitud del estímulo. Gustav Fritsch (1838-1927) y Edward Hitzig (1838-1907), en 1870, iniciaron el desarrollo de

la estimulación cortical con corriente constante o galvánica; trabajando con perros principalmente, reportaron que la estimulación eléctrica en distintas áreas de la corteza provoca respuestas motoras semejantes a las producidas por lesiones cerebrales regionales. Posteriormente, David Ferrier (1843-1928), continuando los trabajos de Fritsch y Hitzig, estimuló la corteza con mayor precisión, creando mapeos de zonas motoras (Ferrier 1886), esto le permitió proponer mapeos de posible localización de diversas alteraciones cerebrales; sus observaciones fueron corroboradas por Sherrington (1857-1952) y Harvey (1869-1939) en 1901 con su trabajo en primates.

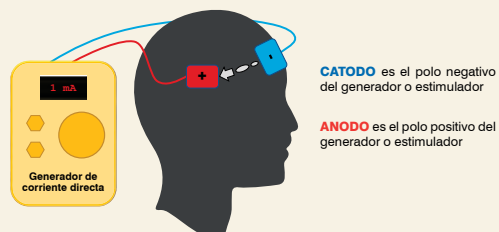
Durante el siglo XX, el avance en el campo de la neurociencia ha sido notable, aunado al desarrollo de generadores de corriente sofisticados, trayendo consigo el estudio de otras zonas del cerebro. El perfeccionamiento de las técnicas neuroquirúrgicas permitió que el canadiense Wilder Penfield (1891-1976) pudiese hacer el mapa de las zonas de asociación motora y sensitiva en su trabajo, ya clásico, "The excitable cortex in conscious man"; así mismo, los trabajos con estimulación eléctrica subcortical de Walter R. Hess (1881-1973) ayudaron a determinar las zonas del cerebro encargadas del control de órganos internos.

A inicios del siglo XX, Lucino Bini (1908-1964) y Ugo Cerletti (1877-1963) propusieron el uso de una terapia electroconvulsiva para el tratamiento de los pacientes esquizoides la cual actualmente ha sido casi completamente descartada, aunque recientemente se ha considerado que la estimulación transcraneal con corriente directa o continua (tDCS, por sus siglas en inglés) de baja intensidad, puede ser la terapia de elección para el tratamiento de la depresión (Palm y cols., 2016). Se ha demostrado que la tDCS puede modular la excitabilidad cortical, mejorando procesos complejos como la consolidación de la memoria y el sueño.

Las características de los electrodos varían entre los trabajos publicados, aunque habitualmente se utilizan electrodos de goma conductora y esponjas

### Estimulación transcraneal por corriente continua (tDCS)

Se trata de una técnica de estimulación cerebral no invasiva, indolora, y de bajo costo (Figura 1). Consiste en la aplicación de corriente continua de baja amplitud (desde 0.5 mA hasta 2 mA) en un periodo que puede durar desde segundos a minutos, mediante el uso de electrodos de superficie (con diferente polaridad: ánodo y cátodo). La aplicación de una corriente anódica débil incrementa la excitabilidad cortical, en tanto que una corriente catódica la disminuye; la alternancia de corrientes anódica y catódica decreta la excitabilidad cortical. Los efectos de la tDCS dependen de la intensidad de la corriente, así como del tamaño, posición y adhesión de los electrodos, y de la densidad de la corriente aplicada a través de ellos; además, influyen significativamente las características de la piel y la densidad ósea de los sujetos (DaSilva y cols., 2011).



### Parámetros para estimulación transcraneal por corriente continua

<b>Duración</b>	30 s-45 min
<b>Intensidad</b>	0.2 mA-2 mA
<b>Tamaño de electrodos</b>	9 cm <sup>2</sup> -49 cm <sup>2</sup>
<b>Sitio de estimulación</b>	Corteza DL-PF, A1, M1, V1

**Figura 1. Características de tDCS.** La gráfica representa el incremento y decremento de la corriente inyectada en un protocolo típico de estimulación (Zaghi y cols., 2010). DL-PF corteza dorso-lateral prefrontal; A1 corteza auditiva primaria; M1 corteza motora primaria; V1 corteza visual primaria

bañadas en solución salina, con un tamaño promedio de 5 x 5 cm (DaSilva y cols., 2011; Utz y cols., 2010); en cuanto al posicionamiento de los electrodos, regularmente se colocan con una distancia considerable entre ellos para evitar un efecto de cortocircuito que impida el funcionamiento correcto de la técnica. Al estimular se crea un campo eléctrico debido a la diferencia de potencial producida por el estimulador, y la corriente fluye del cátodo

(o electrodo negativo) hacia el ánodo (o electrodo positivo). Se habla de estimulación anódica o catódica de acuerdo con la posición del ánodo con respecto al área a estudiar. La zona del cuero cabelludo en la cual se fijan los electrodos queda establecida por el sistema internacional 10-20 para electroencefalograma (EEG), dependiendo del área de la corteza que se desea estudiar.

#### **ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA TRANSCRANEAL DE BAJA INTENSIDAD (tDCS)**

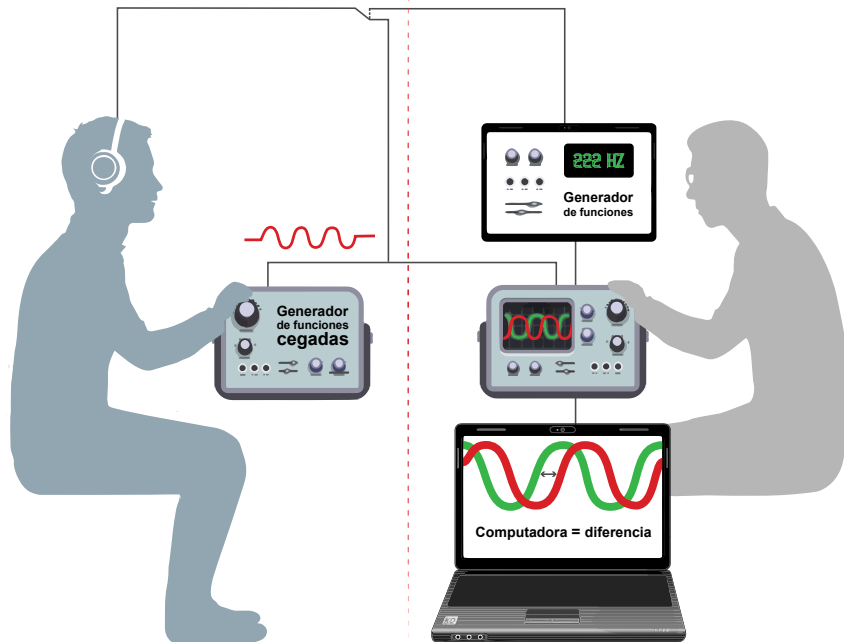
El uso de tDCS es sencillo y seguro en comparación con otras técnicas de estimulación como la estimulación magnética transcraneal, la cual ha sido muy estudiada y aun provee resultados heterogéneos con gran variabilidad y riesgo potencial para el sujeto. La tDCS, en cambio, es muy bien tolerada, es indolora y no produce contracción de la musculatura superficial en el área de aplicación incluso con uso prolongado a una intensidad de 2 mA. Se han reportado sujetos que experimentan ciertos efectos secundarios como comezón al inicio o durante la estimulación, aunque no son relevantes debido a que aparecen tanto con el estímulo real como en el falso (indicando un efecto placebo) y no persisten después de los experimentos (Bikson y cols., 2016). Diversos trabajos indican que es seguro su uso en periodos de hasta 30 minutos con una corriente de 2 mA; sin embargo, se excluye de la población a sujetos que hayan sido intervenidos quirúrgicamente, o que tengan un implante de cualquier tipo en el cráneo, inclusive aquellos que se encuentren bajo tratamiento médico, ya que hay evidencia de que algunos fármacos que actúan en el sistema nervioso puedan alterar los resultados de la estimulación (Bikson y cols., 2016; Utz y cols., 2010).

La tDCS es considerada como una técnica de neuromodulación debido a que modifica la excitabilidad neural por cambios en los gradientes eléctricos que modifican el potencial de membrana y, por tanto, también, la probabilidad de apertura de canales iónicos lo cual, en última instancia, implica cambios en la probabilidad de descarga de

potenciales de acción y en la liberación de neurotransmisores. Los efectos de la tDCS pueden estar relacionados con la potenciación a largo plazo debido a cambios dependientes de la síntesis de proteínas, a la modulación de los niveles de adenosín monofosfato cíclico y de calcio intracelular (Nitsche y cols., 2016). Estos resultados han sido respaldados por experimentos farmacológicos en humanos en los que se usó un bloqueador de canales de sodio demostrando que se bloquean los efectos excitatorios de la estimulación anódica, mientras que los efectos inhibitorios catódicos no cambian, sugiriendo que existe una relación entre la tDCS y la actividad sináptica en la corteza cerebral. El uso de fármacos ha permitido demostrar que los antagonistas del receptor N-metil-D-aspartato (NMDA) eliminan los efectos post-estimulación de tDCS, y que los efectos por estimulación anódica están regulados, en parte, por una reducción en la inhibición de ácido  $\gamma$ -aminobutírico y por la actividad del receptor NMDA (Clark y cols., 2011), mientras que los efectos inhibitorios de la estimulación catódica son mediados por la reducción en la liberación de glutamato.

El uso de tDCS se ha expandido, en principio, por trabajos relacionados con trastornos psiquiátricos; se ha usado estimulación en la corteza prefrontal para el tratamiento de trastornos psicológicos como depresión, apatía, insomnio, ansiedad y en el tratamiento de la adicción (Palm y cols., 2016; Aboulafia-Brakha, 2016; Boggio, 2008)

Esta técnica se ha empleado también en estudios relacionados con el aprendizaje y la memoria. Pese a que en el momento actual no hay consenso respecto al mecanismo de acción de la tDCS, existen trabajos que demuestran que la corriente polarizada crea cambios a corto y largo plazo en la memoria de los sujetos de prueba. Por ejemplo, se ha estudiado el efecto de la tDCS sobre la memoria de trabajo, comprobando que en tareas simples hay una mejora luego de la estimulación anódica, lo cual refuerza la idea de que los efectos de la tDCS dependen de la polaridad y del sitio



**Figura 2. Diseño del experimento.** Los tonos fueron producidos por un generador de funciones que controla el investigador y se escuchan durante 2 s. El sujeto experimental responde ajustando la salida de otro generador de funciones hasta que juzga que ambos tonos son iguales. El investigador mide digitalmente la diferencia entre el tono que se emitió y el que el sujeto produjo, así como el tiempo que tardó en juzgar que había igualado el tono.

específico que se estimula (Brasil-Neto, 2012). En el caso de la audición, se ha encontrado que los cambios por plasticidad en la vía auditiva dependen de la repetición de una tarea; no obstante, es posible modular la actividad cortical por estimulación eléctrica (Zatorre, 2007). Este tipo de plasticidad ha sido demostrado en experimentos con ratas y murciélagos, en los que una pequeña estimulación eléctrica incrementa la actividad de los campos receptivos durante un periodo de horas, aunque no se encuentra una mejor discriminación en pruebas de discriminación cognitiva.

En los últimos años se ha generado una controversia con respecto al uso de tDCS fuera de la investigación científica, debido a la interpretación superficial de los trabajos científicos relacionados con esta técnica, creándose la tendencia del *Brain Hacking*, entendido como la aplicación de técnicas cuyo objetivo es afectar el estado mental, los procesos cognitivos o el nivel de funcionamiento

cerebral de un individuo. Existen diversos sitios web en los cuales se explica el uso de tDCS para mejorar las habilidades de memoria u otras capacidades mentales.

Existe una compañía, Foc.us (<https://world.foc.us/>), que bajo lemas como “Go Flow Sports”, se dedica a la venta y distribución de estimuladores que pueden utilizarse mientras se realiza deporte, o alguna otra actividad. No obstante, debería ser motivo de preocupación la falta de regulación en el uso de tDCS; a la sombra de esta carencia se ha incrementado la popularidad de tDCS para uso doméstico, alimentando en los consumidores un estado de ignorancia parcial sobre el tema que puede resultar contraproducente para su salud.

#### **tDCS Y ANÁLISIS DE TONOS SIMPLES**

En el laboratorio en el Instituto de Fisiología de la BUAP, hemos estudiado si el uso de estimulación anódica en sujetos sin experiencia en la música puede acelerar su capacidad en la tarea de

afinación, tal como se ha reportado la mejoría de capacidades para realizar una tarea motora o visual (Cabrera, 2015; Romero C, 2018; Soto y cols., 2018).

La afinación musical es una tarea compleja, y su curva de aprendizaje es lenta (Bermudez, 2005), ya que involucra muchas variables como el timbre del instrumento musical, la composición de la escala musical, y las características del sonido; debido a ello, en nuestro trabajo se utilizaron tonos puros (de 220 Hz correspondiente a un tono La en la octava 3; 440 Hz correspondiente a un tono La en la octava 4; 1396.91 Hz correspondiente a un tono Fa en la octava 6 y 9397.27 Hz correspondiente a un tono Re en la octava 9) referidos a la El sistema de notación internacional, que se usa en casi todos los países de América, Asia y Europa y en el cual está basada la gran mayoría de la música occidental.

En nuestro laboratorio desarrollamos un paradigma experimental que nos permite estudiar de forma cuantitativa la capacidad de sujetos experimentales para reproducir un tono simple (producido por un generador de funciones) luego de dos segundos a partir del momento en que se ha escuchado el tono (Figura 2).

Además, comparamos el efecto de la tDCS en sujetos con educación musical (estudiantes de la Escuela de Música de la BUAP) con sujetos sin educación musical formal. Los resultados obtenidos en sujetos sin educación musical nos indican que la estimulación anódica funciona como una ayuda en el desarrollo de esta tarea, ya que el porcentaje de error al reproducir un tono fue menor en los grupos de sujetos con estimulación anódica izquierda.

Estos resultados pueden deberse a que el lóbulo temporal izquierdo es dominante para sujetos diestros, teniendo una actividad de hasta 95 % mayor que el hemisferio contrario en el proceso del lenguaje y discriminación de sonidos en esta área; sin embargo, los sujetos sin educación musical que mejoraron no lograron igualar o acercarse al resultado de personas con entrenamiento musical. En cuanto al grupo con estimulación catódica izquierda, este mantuvo una alta tasa de

error en la certeza de respuesta a lo largo de las sesiones, aunque hubo una mejoría en los tonos agudos en comparación al grupo control.

Los datos de los sujetos con enseñanza musical demuestran que sus capacidades son producto del entrenamiento, dando un muy bajo porcentaje de error en la afinación de tonos, lo cual era previsible y demuestra que, ciertamente, tienen una capacidad de detección de tonos mayor que la de los sujetos sin entrenamiento musical. Encontramos que, en sujetos con entrenamiento musical, la tDCS no modifica significativamente la capacidad para detectar un tono.

Por último, es necesario mencionar que no se presentaron efectos secundarios que pusieran en riesgo la integridad física y mental de los participantes, dejando en claro la seguridad del método. De igual manera, nuestros resultados indican que la tDCS influye en procesos cognitivos, lo que sugiere que puede ser un método útil de investigación y, eventualmente, también de tratamiento en alteraciones cognitivas.

## R E F E R E N C I A S

- Aboulafia-Brakha T, Manuel AL, & Ptak R (2016). Prefrontal transcranial direct current stimulation facilitates affective flexibility. *Neuropsychologia* 86:3-18.
- Bermudez P (2005). Conditional Associative Memory for Musical Stimuli in Nonmusicians: Implications for Absolute Pitch. *Journal of Neuroscience* 25(34):7718-7723.
- Bikson M, Grossman P, Thomas C, Zannou AL, Jiang J, Adnan T... Woods AJ (2016). Safety of Transcranial Direct Current Stimulation: Evidence Based Update 2016. *Brain Stimulation* 9(5):641-661.
- Boggio PS, Sultani N, Fecteau S, Merabet L, Mecca T, Pascual-Leone A... Fregni F (2008). Prefrontal cortex modulation using transcranial DC stimulation reduces alcohol craving: A double-blind, sham-controlled study. *Drug and Alcohol Dependence* 92(1-3):55-60.
- Brasil-Neto JP (2012). Learning, memory, and transcranial direct current stimulation. *Frontiers in Psychiatry* 3:1-4.
- Cabrera J (2015) *Efectos de la estimulación eléctrica transcraneal sobre la percepción tonal en humanos*. Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
- Clark VP, Coffman BA, Trumbo MC, & Gasparovic C (2011). Transcranial direct current stimulation (tDCS) produces localized and



© **Ranulfo González.** *Alegoría a las artes*, óleo/tela, 110 x 150 cm, 2013.

specific alterations in neurochemistry: A 1H magnetic resonance spectroscopy study. *Neuroscience Letters* 500(1):67-71.

DaSilva AF, Volz MS, Bikson M & Fregni F (2011). Electrode positioning and montage in transcranial direct current stimulation. *Journal of Visualized Experiments: JoVE* 51:1-11.

Nitsche MA, Fricke K, Henschke U, Schlitterlau A, Liebetanz D, Lang N... Paulus W (2003). Pharmacological modulation of cortical excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans. *Journal of Physiology* 553(1):293-301.

Palm U, Hasan A, Strube W & Padberg F (2016). *tDCS for the treatment of depression: a comprehensive review*. European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience.

Romero C (2018) *Modulación de la percepción auditiva de tonos puros por estimulación eléctrica transcraneal (tDCS) en humanos*. Tesis de Licenciatura en Biomedicina, BUAP.

Soto E, Vega R, Romero C (2018) Transcranial direct current stimulation and tonal perception in musicians and non-musicians. *Soc. for Neurosci. Abs.* 2018-S-9892-SfN.

Utz KS, Dimova V, Oppenländer K & Kerkhoff G (2010). Electrified minds: Transcranial direct current stimulation (tDCS) and Galvanic Vestibular Stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology-A review of current data and future implications. *Neuropsychologia* 48(10):2789-2810.

Zaghi S, Acar M, Hultgren B, Boggio PS & Fregni F (2010). Noninvasive Brain Stimulation with Low-Intensity Electrical Currents: Putative Mechanisms of Action for Direct and Alternating Current Stimulation. *The Neuroscientist* 16(3):285-307.

Zatorre RJ, Chen JL & Penhune VB (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews. Neuroscience* 8(7):547-558.

**Cristian Romero**  
**Rosario Vega**  
**Enrique Soto**  
**Instituto de Fisiología**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**esoto24@gmail.com**