

# Las neurociencias en el diagnóstico y en la evaluación de la rehabilitación integral de secuelas de lesiones cerebrales en el INR

Brust-Carmona H,<sup>\*</sup> Galicia M,<sup>†</sup> Flores Ávalos B,<sup>§</sup>  
Borunda Falcón,<sup>||</sup> Yáñez O<sup>¶</sup>

\* Lab. EEG Dirección de Investigación, Instituto Nacional de Rehabilitación (INR).

† Becario, protocolo Conacyt.

§ Servicio de Neurofisiología, Subdirección de Auxiliares de Diagnóstico y Servicios Paramédicos.

|| Asistente Dirección General, INR.

¶ Laboratorio de Imagenología, UAMI.

Dirección para correspondencia:  
Héctor Brust Carmona  
Laboratorio de EEG,  
Dirección de Investigación.  
Instituto Nacional de Rehabilitación. Antiguo Camino a Xochimilco 289, Col. Arenal Guadalupe, Tlalpan, 14389, México, D.F.  
E-mail: hbrust@inr.gob.mx  
mxbrusthector@att.net.mx

Este artículo puede ser consultado en versión completa en:  
<http://www.medigraphic.com/rid>

## Resumen

Las enfermedades del sistema nervioso representan un problema importante por su alta incidencia en etapas productivas de la vida de los individuos. El electroencefalograma es una de las técnicas neurofisiológicas ampliamente utilizadas en la práctica clínica cotidiana. Sin embargo, el análisis analógico tradicional sólo aporta indicadores diagnósticos, preferentemente para procesos epileptogénicos. Actualmente, el análisis cuantitativo de parámetros electroencefalográficos, como la densidad de la potencia espectral y de la potencia absoluta de diferentes bandas de frecuencia con su distribución topográfica, son una herramienta eficiente para estudiar el desarrollo de la organización cerebral, así como su relación con el desempeño cognoscitivo de los individuos en diferentes etapas de su vida. El objetivo del presente trabajo es presentar las bases teóricas e hipótesis anatomofuncionales que subyacen en el análisis de las medidas espectrales del electroencefalograma cuantitativo. Asimismo, se sugiere la utilidad potencial de dicho análisis cuantitativo del electroencefalograma para el diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de pacientes con lesiones neurológicas, producto de traumatismos craneoencefálicos, enfermedades cerebrovasculares o de alteraciones en el neurodesarrollo. Por último, se describe un paradigma de registro idóneo, así como las características de los indicadores cuantitativos empleados en las líneas de investigación en desarrollo en el Laboratorio de Electroencefalografía de la Dirección de Investigación del Instituto Nacional de Rehabilitación, deseando motivar al personal de las áreas clínicas, psicológicas y sociales a integrarse para la elaboración y ejecución de protocolos de investigación que repercutan en la mejora de la atención a los pacientes del instituto y de otras instituciones de salud y de docencia.

## Abstract

*The electroencephalogram is one of the neurophysiological techniques widely used in the daily clinical practice. However, traditional analogical analysis only provides diagnostic indicators, particularly for epileptogenic processes. Currently, the quantitative analysis of electroencephalographic parameters, such as density of spectral power and absolute power of different frequency bands and their topographic distribution, is an efficient tool to study the development of brain organization as well as its relation with cognitive performance at the diverse life stages of individuals. The present work is aimed at presenting the theoretical bases and the anatomo-functional hypotheses underlying the analysis of the quantitative electroencephalograms spectral measures. Likewise, we suggest the potential usefulness of this quantitative analysis of the electroencephalogram for the diagnosis, treatment, and rehabilitation of patients with neurological injuries caused by cranioencephalic traumas, cerebrovascular diseases, or by alterations in neurodevelopment. We describe an idoneous recording paradigm as well as the characteristics of the quantitative indicators used in the undergoing research lines in the electroencephalogram Laboratory from the Research Division of the National Institute of Rehabilitation (INR, for its initials in Spanish) in Mexico City, in an attempt to motivate the personnel of the clinical, psychological, and social areas to take part in the elaboration and execution of research protocols to improve the care of patients at the INR and of other health and teaching institutions.*

**Palabras clave:** Neurociencias, EEG, Informática, TCE, ECV.

**Key words:** Neurosciences, EEG, Informatics, TBI, CVD.

## Introducción

En las sociedades modernas tanto «desarrolladas» como «en desarrollo», las enfermedades del sistema nervioso van en aumento; por ejemplo en México, en el Instituto Nacional de Rehabilitación (INR), de acuerdo al análisis de 22,094 expedientes del año 2011, se seleccionaron, conforme al Sistema de Clasificación de Enfermedades, CIE 10, en el grupo V, «trastornos mentales y del comportamiento», el 10.0% del total de los pacientes y en el grupo VI «enfermedades del sistema nervioso» el 4.0%, lo que representa un total del 14.0% de los enfermos atendidos.<sup>1</sup> Los procesos diagnósticos y de tratamiento utilizados en esos pacientes ponen en evidencia muchas lagunas en el conocimiento del funcionamiento cerebral y, por consiguiente, indican importantes retos de investigación clínica, que incluyen la evaluación de las intervenciones quirúrgicas, médicas (evaluación de fármacos), psicológicas y de terapias de rehabilitación.

Muchas de las enfermedades cerebrales se consideraban antiguamente, por el absoluto desconocimiento al respecto, como «sistema de mensaje de los dioses», por ejemplo, en la cultura Egipcia.<sup>2</sup>

Posteriormente se identificó una de ellas como epilepsia, la cual, de hecho, es una de las enfermedades cerebrales mejor conocidas gracias a la aplicación de la electroencefalografía (EEG).<sup>3</sup> Sin embargo, por centenares de años se separaron las actividades mentales de las funciones corporales, estableciendo un dualismo cerebro-mente que finalmente, a principios del siglo pasado, se empezó a integrar dando origen al monismo<sup>4</sup> y, posteriormente, a los sistemas multifactoriales que integran los diversos campos de las neurociencias encargadas del estudio de las actividades cerebrales, es decir, la neurobiología, la ciencia del cerebro, la psicología cognitiva, la ciencia de la mente e informática y la ciencia de la computación.<sup>5</sup>

Uno de los retos que tiene el INR en el área de rehabilitación neurológica es continuar el desarrollo de los expedientes clínicos incorporando lo indicado en la CIE10 y en la clasificación internacional del funcionamiento de la discapacidad y de la salud (CIF), también propuesta por la OMS/OPS para especificar las discapacidades que producen las lesiones cerebrales, tanto del neurodesarrollo como de las adquiridas en etapas de la vida posteriores. Este sistema de expedientes clínicos permitirá además efectuar una evaluación cuantitativa de los procesos de rehabilitación integral, incluyendo las intervenciones a la familia y su reinserción social con buena calidad de vida y correlacionar dichos procesos con la evolución de las

alteraciones clínicas, psicológicas y electrofisiológicas y la aplicación de las neurociencias.

Los conocimientos que se generen por su aplicación en los expedientes clínicos deberán repercutir de inmediato en la mejoría de los diagnósticos y, en particular, en los procesos de pronóstico y seguimiento de las alteraciones, tanto las producidas durante el neurodesarrollo, las cuales se manifiestan como alteraciones de la atención y del aprendizaje, entre otros, como en las discapacidades, productos de las secuelas por lesiones adquiridas de diversas etiologías. Por ejemplo, los traumatismos craneo encefálicos (TCE) son la primera causa de muerte en jóvenes y los accidentes, en general, la cuarta causa de discapacidad<sup>6</sup> y mortalidad en México,<sup>7</sup> con un importante impacto socioeconómico. Según el Centro Nacional para la Prevención de Accidentes, CENAPRA, el costo de los accidentes en 2008 fue de \$121,500 millones de pesos, y para el 2009 fueron más de \$126,000 millones, lo que representó entre el 1.2 y 3% del producto interno bruto.<sup>8</sup>

A lo anterior se agrega que las enfermedades cerebro vasculares (ECV) ocupan un lugar predominante en las personas adultas y de la tercera edad, cada vez con mayor proporción y necesidades de atención preventiva y de rehabilitación en México. Por lo que es indispensable mejorar los procedimientos diagnósticos y de tratamiento, así como desarrollar métodos que permitan cuantificar los efectos de las terapias y pronosticar la posible neurorehabilitación integral del paciente y su familia. La correcta aplicación de los avances tecnológicos en la fase aguda ha logrado una mayor sobrevida de los lesionados graves e intermedios. Así mismo, se espera que se logren avances en los diagnósticos de las secuelas y, sobre todo, de los procedimientos pronósticos que guíen las intervenciones de neurorehabilitación integral del paciente y su familia, con base en el trabajo de especialistas de las neurociencias.<sup>9</sup> Para ello se recomienda establecer un algoritmo que define cuatro etapas: 1) tratamiento intrahospitalario de la fase aguda que termine con la integración de una historia clínica completa, con énfasis en las descripciones de los estudios de gabinete y que con las recomendaciones adecuadas, se le entregue al familiar que se asigne como cuidador primario; 2) tratamiento intrafamiliar para que el cuidador primario pueda desarrollar todos los tratamientos farmacológicos indicados y las intervenciones físicas y psicológicas recomendadas, debidamente anotadas en una bitácora; 3) tratamiento intrahospitalario que defina las secuelas de lesiones cerebrales, las discapacidades resultantes y con base en guías pro-

nósticas, se establezcan los tratamientos completos, encaminados a lograr la rehabilitación integral incluyendo intervenciones adecuadas a las condiciones del cuidador primario, con la capacitación en el manejo correcto del paciente y 4) persistencia del tratamiento intrafamiliar con asistencia a la consulta externa de la institución especializada en rehabilitación.<sup>a</sup>

Actualmente, se acepta que los procesos electroquímicos cerebrales son los responsables de la conducta adaptativa al medio ambiente de los seres vivos<sup>b</sup> incluyendo a los seres humanos con sus diferentes niveles de abstracción, subconsciente, consciencia de sí mismo y de sus congéneres.<sup>10</sup>

Entre las técnicas neurofisiológicas, el electroencefalograma (EEG) es el procedimiento de apoyo diagnóstico más adecuado por no agregar ningún riesgo al paciente, es fácil y rápido de realizar, repetible y de bajo costo. Su repetición permite el seguimiento de la efectividad de las intervenciones de rehabilitación integral que promueven la neuroplasticidad cerebral.<sup>11</sup> Sin embargo, el electroencefalograma y su análisis analógico tradicional no han logrado proporcionar indicadores diagnósticos concluyentes, excepto para la identificación de procesos epileptogénicos, de tal manera que la mayoría de las aplicaciones y sus programas de computación para análisis del electroencefalograma se han dirigido a identificar dichos electromorfogramas. De hecho, algunos de sus resultados han permitido indicar el uso de fármacos antiepilépticos como profilácticos sin bases farmacodinámicas específicas,<sup>12</sup> un tema de estudio que sobrepasa esta presentación.

Las nuevas técnicas de sistemas de registro analógico y su análisis digital han venido a abrir nuevas aplicaciones al poder identificar la densidad del espectro de frecuencias (DEF) y la potencia absoluta (PA) y relativa de determinadas frecuencias representándolas en forma topográfica (mapeo cerebral), además de permitir establecer diferentes índices que pueden calcularse al relacionar tanto la potencia como la frecuencia entre sí y entre diferentes regiones corticales (índices), identificando sincronía de fase y coherencias entre las diferentes regiones o ensambles neuronales; todo lo cual se integra como el EEG cuantitativo.<sup>13</sup> Sin embargo, por ser un registro que depende de un conductor de volumen, la capacidad de adjudicar el origen del flujo de corriente a una estructura específica es muy limitado; así mismo, las variaciones de conductibilidad

de las diferentes estructuras involucradas intracerebrales y extracraneales, incluyendo la colocación e impedancia de los electrodos, generan importantes variaciones de voltaje y de la frecuencia (actuando como filtros de baja y alta frecuencia que modifican los ritmos de los ensambles neuronales) las cuales han dificultado el establecimiento de estándares de comparación y su relación con funciones aferentes, cognitivas y eferentes. Precisamente, estos son algunos de los retos importantes a vencer, empezando desde la mejor y exacta colocación de electrodos con distribuciones y montajes especiales (montaje de Laplace por ejemplo), con la menor impedancia posible y, sobre todo, el desarrollo y las aplicaciones de nuevos programas de computación que permitan abolir o disminuir artefactos extracerebrales, identificar electromorfogramas de corta duración y analizar, por ejemplo, las densidades de corriente. Por lo pronto, esos procedimientos han proporcionado apoyo al estudio patofisiológico de las lesiones cerebrales, estableciendo indicadores que permiten pronosticar la evolución postaccidente cerebrovascular desde el periodo agudo.<sup>14</sup>

Acotando lo anteriormente descrito, proponemos que el Servicio de Neurofisiología de la Subdirección de Servicios Auxiliares de Diagnóstico y Servicios Paramédicos de la Dirección Médica con base en el Laboratorio de electroencefalografía (EEG) de la Dirección de Investigación del INR se encamine a establecer los indicadores EEGc, evaluando las siguientes hipótesis de una línea de investigación con presentaciones, en su oportunidad, de protocolos específicos:

1. Las neuronas, por sus características citoarquitectónicas, generan un potencial de membrana (voltaje negativo en el interior y positivo en el exterior, resultante de la diferente distribución y concentraciones de iones) que fluctúa por el intercambio de iones con el líquido extracelular.<sup>15,16</sup> Estos intercambios iónicos generan corrientes electromagnéticas que se propagan en el conductor de volumen que representa el cerebro, de tal manera que pueden ser detectadas a distancia, colocando electrodos en el cuero cabelludo. Dichos electrodos, al ser conectados a sistemas de amplificación y a un instrumento de monitoreo o de registro, representan las corrientes electromagnéticas como ondas con una determinada amplitud (voltaje) y duración. Dichas ondas, al repetirse, generan una determinada frecuencia que se puede analizar aplicando la transformada de Fourier, la cual integra el área bajo la curva de las ondas de diferentes frecuencias selecciona-

<sup>a</sup> Comunicación personal del Dr. Luis Guillermo Ibarra.

<sup>b</sup> Conducta adaptativa: actividades reflejas y cognitivas del funcionamiento cerebral que se manifiestan en las actitudes, motivaciones, cambios vegetativos y somáticos por vía neuronal y endocrina.

das previamente, representándola como potencia absoluta (PA en  $\mu V^2$ ) y como densidad espectral ( $\mu V^2/Hz$ ); sin embargo, con este procedimiento se pierde la relación temporal de la época de análisis, es decir, se desconoce si determinado cambio de la PA de alfa ocurrió al principio, en medio o al final del tiempo del registro analizado, por lo que se proponen otros procedimientos como el análisis de ondas («Wavelet»). Con este paradigma matemático se descompone la muestra del registro en sus diferentes integrantes, de acuerdo con su duración e intensidad y se compara con «patrones de ondas de diferentes frecuencias e intensidades». <sup>17</sup> Otro procedimiento que permite inferir diferentes tipos de conexiones entre ensambles neuronales es el análisis de coherencia de la potencia absoluta de una determinada frecuencia entre diferentes electrodos de registro. <sup>18</sup>

2. Se propone que esos flujos de corriente que se analizan como densidad de potencia espectral, son de mayor intensidad cuanto más neuronas los generan simultáneamente. <sup>19</sup> Esto ocurre todo el tiempo en el cerebro, en una forma caótica o al azar; sin embargo, actualmente se propone que sea el resultado de la integración «dirigida» de determinada frecuencia en diversos ensambles neuronales; estos «marcapasos» generan frecuencias dependientes de las características de sus membranas y de sus múltiples sinapsis, tanto electroquímicas como eléctricas; estas últimas, principalmente, con células de la glía integran ensambles o circuitos glíoneuronales específicos, <sup>20</sup> por lo cual se abre la posibilidad de la participación de transmisión efáptica en sinapsis eléctricas entre las prolongaciones de las neuronas, tanto en axones como dendritas. La existencia de estas sinapsis eléctricas que permiten el flujo iónico casi inmediato podría tener un papel funcional muy importante en los procesos de sincronización por difusión electrotónica. <sup>21</sup> La organización de ensambles glíoneuronales con distribución topográfica precisa se inicia en los sistemas sensoriales, como la retina de la vía visual y la cóclea de la vía auditiva. Es más, en ambos sistemas sensoriales se establecen las condiciones anatomofuncionales que les permite «detectar y responder» a determinadas frecuencias de las ondas luminosas o de las sonoras. La respuesta graduada en relación directa con la intensidad de la estimulación (potencial del re-

ceptor) se transforma en un determinado número de potenciales de acción (casi de la misma intensidad) en un determinado tiempo (frecuencia), integrando una clave neuronal, que probablemente sólo se puede sintonizar con circuitos que respondan a esas frecuencias con distribución cartográfica precisa. Esta modulación de la frecuencia en ensambles neuronales se establece como una «imagen»<sup>c</sup> del medio donde se generó la estimulación sensorial. <sup>10,22</sup> Estas imágenes representadas por los cambios electromorfológicos indican o traducen la actividad mental que va estableciendo los «conocimientos» del medio externo (información intracerebral). Se propone que en forma similar, desde los primeros días de vida, se establecen imágenes resultantes de la actividad de los interorreceptores y exterreceptores y de sus ensambles neuronales, principalmente subcorticales en el tallo cerebral e hipotalámicos, estableciendo las imágenes corporales correspondientes con relación directa con los procesos homeostáticos que incluye los procesos neuroendocrinos. <sup>10</sup>

3. Las neuronas de acuerdo con sus características citoarquitectónicas tienen mayores potenciales de membrana y generan frecuencias naturales específicas; en forma similar a lo que se conoce en los axones, <sup>23</sup> en los cuales, los de mayor diámetro tienen mayor magnitud del potencial de membrana y generan más potenciales de acción por unidad de tiempo (mayor frecuencia e intensidad, que representa la «clave en el funcionamiento de los axones»). Las neuronas de mayor diámetro tienen mayores potenciales de membrana y generan mayores flujos iónicos, como lo propone Buzsáki, <sup>24</sup> mientras que las neuronas de diámetros intermedios menores y las más pequeñas tendrán menores flujos. Dichos flujos de corriente se conforman en múltiples frecuencias que se pueden estudiar en el electroencefalograma cuantitativo (EEGc). Estas frecuencias tienden a mantenerse constantes en los diferentes circuitos cerebrales <sup>25,26</sup> y se propone que son las responsables de generar respuestas específicas tanto internas como externas.
4. Durante el neurodesarrollo, al transcribir los comandos genéticos y epigenéticos en los procesos enzimáticos correspondientes, se integran diversas proteínas y lípidos, que dirigen las «conexiones» interneuronales, como por ejemplo el factor del crecimiento de axones. <sup>27</sup> Dichos comandos integran ensambles glíoneuronales (circuitos) en la corteza cerebral, en el tálamo, en los ganglios basales, en el sistema reticular y en general, en todo el siste-

<sup>c</sup> Imagen en el sentido amplio del término como representación global aplicable a todos los sistemas sensoriales y no sólo al visual.



Cuadro I. Modificado de Damasio<sup>10</sup>

Imágenes (electromorfogramas)	Sistema sensorial y circuitos que permiten:
Cartografía de la estructura interna corporal	La identificación y la regulación del medio interno, «homeostasis»
Cartografía de las relaciones corporales, músculos, articulaciones, postura estática y dinámica	La identificación corporal y sus relaciones intracorporales y su relación con el medio externo
Cartografía de los sistemas sensoriales	La identificación de las características del medio externo, preparación para detectar y responder a los cambios con conductas adaptativas correctas, reflejas y aprendidas

ma nervioso central. Por lo tanto, estos ensambles adquieren características que les permiten generar determinadas frecuencias, convirtiéndose en los marcapasos que producen la actividad de fondo. Los factores involucrados en su integración y participación en diversas funciones deberán ser descritos por futuras investigaciones.<sup>28,29</sup> Por ejemplo, en la corteza occipital algunos ensambles neuronales o circuitos, por acciones intraensambles, generan frecuencias de 8 a 13 Hz, lo cual también puede ocurrir en los ensambles talámicos. Si estos ensambles tienen conexiones bidireccionales, podrán modular las fluctuaciones del potencial de membrana tanto electrotónicamente como por los efectos de los potenciales de acción, generando potenciales postsinápticos excitadores o inhibidores, de acuerdo al neurotransmisor que liberen y los canales de membrana que se abran, permitiendo el flujo de iones específicos que los aumenten (hiperpolarización/inhibición) o los disminuyan, acercándolos al nivel de descarga (umbral de disparo, despolarización/facilitación) a lo que se suman las posibles transmisiones de sinapsis eléctricas.<sup>30-32</sup>

Dichos efectos producen aumento o disminución de la actividad neuronal en forma «sincrónica», lo que se propone como base funcional de los circuitos cerebrales; de tal manera que cuando se sintonizan ciertos circuitos cerebrales se produce una determinada función conductual, integrándose como una red de servoinformación.<sup>33-35</sup>

Por ejemplo, la frecuencia en el rango de 8-13 Hz que se conoce como ritmo alfa, se ha relacionado con procesos sensoriales de identificación de señales visuales,<sup>36</sup> aceptando que alfa de baja frecuencia se relaciona con los procesos atencionales y la de alta frecuencia con las acciones sensomotoras y/o semánticas y que las otras frecuencias pueden agregar información o relacionarse con otras funciones.<sup>37</sup> Al respecto conocemos pocas publicaciones

de las posibles funciones del ritmo delta; sin embargo, se ha descrito que puede ser un importante regulador de la actividad cortical en varias áreas.<sup>38,39</sup> Theta ( $\theta$ ) frontal con sintonización en otras regiones cerebrales participa en la regulación de funciones cognitivas que incluyen la memoria tanto a corto como largo plazo.<sup>40,41</sup> Hemos descrito su posible participación en los procesos de memoria que se requieren en el aprendizaje por habituación.<sup>42</sup> En esa investigación se muestra que la PA de  $\theta$  en la condición prefotoestimulación aumenta en las regiones corticales mediales y posteriores, sugiriendo sincronización de la excitabilidad; probablemente en la preparación para participar en la identificación de la señal, la cual produce desincronización de la actividad de ensambles neuronales que disminuye al repetirse monótonamente dicha fotoestimulación y termina con sincronización. Esta modulación por potenciales postsinápticos excitadores e inhibidores (PPSE/PPSI) de los núcleos talámicos y por circuitos de retroinformación corticotálamicos puede relacionarse con los procesos de identificación y memorización de la información, resonando con la actividad del hipocampo.<sup>43</sup> Por último, la sincronización del ritmo beta ha sido relacionada con los procesos de integración sensomotora tanto en animales como en seres humanos.<sup>44</sup>

5. Dichos patrones de actividad electroquímica de los circuitos glíoneuronales establecen los perfiles de las PA de las diversas frecuencias del electroencefalograma (EEG) con distribución topográfica que se pueden registrar en los sujetos en reposo con los párpados cerrados y su análisis digital permite conocer la actividad de fondo (electromorfogramas) que identifican los diversos escenarios en los que se ha desarrollado «su vida». Estos electromorfogramas (imágenes mentales de su experiencia) se modifican al recibir e integrar nuevas señales del ambiente, tanto interno como externo. Estas modulaciones

en diversos circuitos glíoneuronales «integrados» en diferentes circuitos (regiones cerebrales), en alguna forma por conocer, llevan al sujeto a tomar decisiones sobre qué tipo de respuesta dentro de su repertorio («programado en la integración de los ensambles neuronales por lo comandos genéticos y epigenéticos») refleja o modificada por las experiencias previas, («aprendizaje») debe emitir y, posteriormente, tienen que analizarse los cambios producto de la conducta emitida, en conjunto funcionando como un sistema «reactivo» y no pasivo, únicamente esperando los cambios del ambiente.<sup>45</sup> Además, podemos decir que la importancia de estudiar esa actividad «espontánea» en reposo es, primero por facilidad, bajo costo, pues ya se realiza en los gabinetes de EEG; segundo, porque revela la integridad de los circuitos subcortico-corticales de los sistemas sensoriales (sistemas ascendentes) y de los cortico-subcorticales, sistemas de respuesta tanto vegetativa como somática con todos los neuromoduladores y neurotransmisores involucrados y, tercero, el conocimiento de estos electromorfogramas permite establecer «estándares de comparación» para analizar sus modificaciones en enfermedades, producto de las alteraciones del neurodesarrollo o adquiridas por diferentes causas. La funcionalidad de dichos sistemas ascendentes la podemos evaluar durante el registro de la electroencefalografía (EEG) simplemente haciendo que los sujetos abran los ojos por 6-10 segundos y los cierran, repitiendo varias veces esta maniobra, lo que indica la modulación retículo-talámica-cortical de los marcapasos corticales con sus diferentes frecuencias. Se obtiene una mayor intensidad de dicha activación sensorial con destellos de intensidad y frecuencia constantes, así como con estímulos sonoros o con estímulos somáticos, reflejándose como desincronización de las diversas frecuencias corticales. Además, la repetición monótona de estos tipos de estimulación permitirá evaluar la activación de circuitos que regulan las entradas sensoriales; en este caso, sistema polisensorial del tallo cerebral, del tálamo y de las estructuras corticales de «asociación», incluyendo las áreas corticales paramediales que se activan en el proceso de aprendizaje por habituación. Los sistemas descendentes de respuestas, tanto vegetativas como somáticas, se evalúan midiendo la respuesta simpática-parasimpática, representada por la intensidad de la conductancia cutánea y por la frecuencia cardíaca y somática además por la respuesta de presionar un botón y se mide por la latencia de presionar ese botón con la mano do-

minante. Estos tipos de respuestas se provocan al indicarle al sujeto que al «percibir» la estimulación sensorial específica presione el botón, situado en el extremo de un aditamento cilíndrico que sostiene con su mano dominante. El análisis de dichos cambios «externos» como los de los ritmos EEG permite analizar el funcionamiento de sistemas de regulación sensomotora que refleja la actividad de los sistemas ascendentes (*bottom-up*) con los descendentes (*up-down*) que participan en procesos de aprendizaje.

Tanto con los protocolos de investigación actualmente en desarrollo como en los futuros, nos proponemos evaluar dichas hipótesis, caracterizando la actividad electromagnética; para ello, proponemos un «decálogo» del tipo de la actividad electrocortical que se registra como electroencefalografía y se analiza cuantitativamente. Con este procedimiento se identifica la magnitud de la PA de frecuencias de banda reducida (delta, 1.6-4; theta 4.5-8; alfa 1, 8.5-10; alfa 2, 10.5-13; beta 1, 13.5-20; y beta 2, 20.5-30 Hz) con su distribución topográfica para establecer los perfiles que permitan, como se mencionó antes, identificar la localización y la extensión de lesiones adquiridas en el neurodesarrollo o como secuelas de lesiones cerebrales y su correlación con las alteraciones clínicas y neuropsicológicas. La información clínica se establece en las historias clínicas del INR y para las evaluaciones neuropsicológicas se utilizan diferentes pruebas apropiadas a los problemas específicos por analizar, pero en general, se aplican la prueba Neuropsic,<sup>46</sup> y de Weschler,<sup>47</sup> para medir los constructos de la inteligencia. Además en el electroencefalograma cuantitativo se analizan los cambios de los perfiles de la densidad del espectro de frecuencias por la apertura de los párpados, y sus modificaciones por la habituación y en la asociación sensomotora, lo que permite inferir el funcionamiento de los circuitos de servoinformación que participan en los procesos de aprendizaje y sus alteraciones en diversas enfermedades.

### Método de registro

En forma inicial se propone que los registros del electroencefalograma se realicen siguiendo un paradigma específico de cinco etapas: 1) registro en reposo con párpados cerrados (OC); 2) etapa de ojos cerrados y abiertos (OA) analizando la actividad eléctrica en forma sucesiva (OC-OA); 3) activación sensorial por fotoestimulación a 5 Hz durante 2 segundos, que se repite 20 veces a intervalos de 20 a 25 segundos; 4)

asociación entre el efecto de la estimulación sensorial (inicialmente de fotoestimulación, posteriormente con audioestimulación) y una respuesta motora específica, indicándole al sujeto que ante la estimulación sensorial, emita la respuesta motora de presionar un botón que tiene un aditamento cilíndrico que sostiene con su mano dominante, y 5) activación por hiperventilación durante 3 minutos, seguida de un minuto de posthiperventilación y finalmente 2 minutos más de registro y se termina el estudio. El análisis «fuera de línea» se inicia con la observación global del registro y la identificación de artefactos y electromorfogramas anormales y, en seguida, se aplica el programa de eliminación de artefactos de parpadeo.

El análisis cuantitativo se realiza aplicando el programa UAMI/Yáñez especialmente diseñado para estos fines con base en plataformas de acceso libre: 1) identifica la señal correspondiente a párpados cerrados y selecciona tres muestras de 6 segundos (principalmente en niños) o de 12 segundos (en adultos) de todos los canales de registro; 2) identifica la señal de ojos cerrados (OC) y toma muestras de 6 segundos, a continuación identifica la señal de ojos abiertos (OA) y se toma una muestra de 6 segundos, lo que se repite seis veces; 3) identifica la señal de la fotoestimulación y toma muestras de 2 segundos antes de la misma (preestimulación) y durante los 2 segundos siguientes (respuesta a la fotoestimulación), deja pasar 3 segundos y toma otra muestra de 2 segundos (postestimulación); 4) identifica la señal de la fotoestimulación y de la respuesta motora de presionar un botón, tomando muestras de 2 segundos antes de la estimulación (Pre), durante la fotoestimulación (periodo de asociación, Aso) y dejando pasar 3 segundos toma una muestra de 2 segundos postasociación; 5) identifica la señal del inicio de la hiperventilación y toma muestras de 12 segundos al minuto, otra muestra a los 2 minutos y una más a los 3 minutos; se mantiene el registro por otros 2 minutos (análisis posthiperventilación) y se termina el estudio.

## Resultados teóricos

Esperamos que dichos procedimientos permitan establecer los siguientes indicadores electroencefalográficos en condiciones funcionales normales de personas sin antecedentes clínicos:

1. Densidad del espectro de frecuencias (DEF). Relación de la potencia con frecuencia, identificación de picos de frecuencias.
2. La PA de delta (1-6 a 4.0 Hz), theta (4.5 a 7.5 Hz), alfa1 (8 a 10 Hz), alfa 2 (10.5 a 13 Hz), beta 1 (13.5

a 20 Hz), beta 2 (20.5 a 30 Hz) y gama (30.5 a 40 Hz). Sus densidades de potencia espectral en los diferentes rangos con su distribución topográfica que establece los perfiles de actividad cortical (mapeo o distribución topográfica) y algunos de sus índices.

3. Modificaciones de la PA como respuesta a la estimulación visual al abrir los párpados (ojos abiertos OA), análisis de desincronización-sincronización de las diferentes frecuencias en las diferentes regiones corticales. Establecimiento de los perfiles de potencia con relación a su distribución topográfica (mapeo cerebral).
4. Análisis de las diferencias de la PA de respuesta de cada frecuencia en cada región de uno y otro hemisferio, simetría y coherencia, identificación del hemisferio dominante desde el punto de vista de la actividad eléctrica.
5. Respuesta de desincronización a la estimulación sensorial por fotoestimulación que se repite con la misma intensidad y frecuencia (fotoestimulación repetida [FR]). Análisis de la evolución de las diferentes frecuencias en su distribución topográfica; representada en los procesos de desincronización/sincronización (D/S) relacionable con el aprendizaje por habituación.
6. Respuesta de desincronización a la estimulación sensorial representada por audio-estimulación, que se repite con la misma intensidad y frecuencia (audio-estimulación iterativa). Análisis de la evolución de las diferentes frecuencias en su distribución topográfica, procesos de desincronización/sincronización (D/S) relacionable con el aprendizaje por habituación en este caso del sistema sensorial auditivo (habituaación auditiva).
7. Modulación de D/S en condiciones de asociación de una señal sensorial con una respuesta motora específica (asociación señal-respuesta), relacionable con los procesos de aprendizaje por asociación.
8. Modulación de D/S en respuesta condicionada de presionar un botón ante una señal sensorial, que le permite evitar la aplicación de un estímulo eléctrico; cambios que son relacionables con los procesos de aprendizaje por condicionamiento de prevención.
9. Modificaciones de la PA de las diferentes frecuencias por la hiperventilación durante 3 min. Análisis de la recuperación de la actividad en los siguientes 60 segundos.
10. Incremento simétrico o asimétrico de la actividad eléctrica durante la hiperventilación con mayor proporción de la actividad delta y/o theta.

Con base en protocolos se especificarán las variables a estudiar en muestras adecuadas, tanto de sujetos sin antecedentes clínicos como de los pacientes; se espera que se realice en colaboración con otras áreas del INR y probablemente con otras instituciones incluyendo las docentes.

Los resultados obtenidos en sujetos sanos se establecerán en bases de datos y procederemos a evaluar la significancia estadística de los datos con pruebas no paramétricas apropiadas; estos datos integrados en una base electrónica al alcanzar los niveles de confiabilidad, sensibilidad y especificidad funcionaran como estándares de comparación para el análisis e interpretación de los registros de pacientes.

## Discusión

De acuerdo a la organización anatomofuncional de las neuronas, de sus conexiones sinápticas y de su inserción en un determinado circuito glioneuronal será el tipo de descarga que generen esos diferentes ensambles al ser activados por el sistema retículo-talámico-cortical, relacionado con la vigilia y los estados de atención<sup>48</sup> y también por las vías sensoriales, los sistemas ascendentes y la activación que se inicia en los sistemas sensoriales específicos (somático, auditivo, visual, etcétera).<sup>49,50</sup> Dicha descarga tendrá una determinada frecuencia e intensidad proporcional al número de neuronas que descarguen simultáneamente, constituyendo una «clave» (electromorfograma o imagen en el sentido amplio del término) de una frecuencia específica (delta, theta, alfa, beta, gama, etc.).<sup>51-53</sup> Clave que al sincronizarse en diferentes áreas o circuitos produce una sensación y al sintonizarse con otros circuitos se genera la percepción sensorial y su propagación sintonizadora a otros nodos de circuitos neurogliales, controla la emisión de respuestas (procesos descendentes).<sup>54-56</sup> La respuesta emitida genera nuevas activaciones de los ensambles neurogliales de manera que se prolonga la modificación electrofuncional (potenciación a largo plazo, constituyendo la memoria a corto plazo) y se propaga a otros integrantes del mismo circuito y de otros circuitos, como los responsables de la vigilia, la motivación y predicción de los cambios del medio ambiente y de los efectos conductuales.<sup>57,58</sup> Esto a su vez, produce una servoactivación que mantiene la actividad electrofuncional relacionable con procesos epigenéticos y enzimáticos, que se modifican por los integrantes proteicos y lipídicos de las membranas, dando lugar al establecimiento de la memoria a largo plazo, como por ejemplo el factor CREB<sup>59</sup> y otros más que se pueden leer en el libro de Mansilla Olivares.<sup>16</sup> La repetición de la

situación conductual («escenario») incrementa la actividad electrofuncional de los circuitos que se manifiesta con aumento de la PA de las diferentes frecuencias de descarga de los grupos de neuronas (sincronización a distancia).<sup>50</sup> La sincronización de esas frecuencias en las diferentes partes o nodos de los circuitos se puede relacionar con las manifestaciones conductuales que se presentan en los procesos de atención, de aprendizaje que incluye la memoria no declarativa y la declarativa<sup>11</sup> que se manifiesta en la conducta global de los sujetos que psicológicamente se integra en el constructo de inteligencia de los seres humanos.

En las explicaciones iniciales de la percepción se consideraba al cerebro como una «entidad pasiva», «que se activa» por los cambios sensoriales e integra una imagen del ambiente en determinados circuitos neuronales. Los resultados que esperamos obtener modifican ese concepto y muestran al cerebro como una estructura «activa» que constantemente modifica el estado funcional de sus circuitos, creando un significado a su «información», esta es una condición interna que puede manifestarse en las variaciones de las descargas sincrónicas de los diversos grupos que integran los circuitos glioneuronales y, por consiguiente, además de representar las variaciones del medio ambiente guía las posibles adaptaciones conductuales aprendidas.

Hemos propuesto que la conducta resulta de la integración de los procesos ascendentes y descendentes de los circuitos glioneuronales que generan los diferentes ritmos cerebrales, lo cual deberá irse correlacionando específicamente con el análisis de las conductas adaptativas correctas o con sus alteraciones por diversas enfermedades o lesiones cerebrales adquiridas, que a su vez, permitirá guiar los procedimientos de rehabilitación integral y conocer los factores favorables o desfavorables en la evolución de cada individuo con una técnica no invasiva, de fácil aplicación y con un costo razonable (económica, al alcance de la mayoría y actualmente realizable en todos los estados de la república mexicana).

## Bibliografía

1. Ibarra LG, Segura García VH, Chávez Arias DD, Borunda Falcon O, Chávez Heres T, Ridaura Valencia C et al. Análisis epidemiológico de las enfermedades y traumatismos atendidos en el Instituto Nacional de Rehabilitación, durante el año 2011. Informe Centro Colaborador de la OPS/OMS para la investigación y rehabilitación médica, 2012.
2. Pérez Tamayo R. De la magia primitiva a la medicina moderna. La ciencia para todos. México: Fondo de Cultura Económica; 1997. Disponible en: bibliotecadigital.



- ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/154/html/sec\_9.html
3. Niedermeyer E. Abnormal EEG patterns epileptic and paroxysmal. En: Ernst Niedermeyer y Fernando Lopes Da Silva. *Electroencephalography. Basic principles, clinical applications, and related fields*. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 1998: pp 235-260.
4. Popper KR. *Knowledge and the body-mind problem: in defence of interaction*. Routledge, London. Chapman & Hall, Incorporated; 1994.
5. De la Fuente R, Álvarez Leefman J. *Biología de la mente*. México: El Colegio Nacional-FCE; 1998.
6. INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010, cuestionario ampliado. México: 2010. [Septiembre de 2012]. Disponible en: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P%20mort>
7. INEGI. Causas de defunción. Defunciones generales totales por principales causas de mortalidad. México: 2011. [Septiembre de 2012]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo107&s=est&c=23587>
8. CENAPRA. Perfil accidentes de tráfico. República Mexicana. México: Observatorio Nacional de Lesiones, CENAPRA; 2010. [Septiembre de 2012]. Disponible en: [http://www.cenapra.salud.gob.mx/CENAPRA\\_2010/estadisticas/Perfil\\_Nacional\\_2008-2.pdf](http://www.cenapra.salud.gob.mx/CENAPRA_2010/estadisticas/Perfil_Nacional_2008-2.pdf)
9. Odriozola FA, Iriarte Ibararán M, Mendía Gorostidi A, Murgialai A, Garde PM. Pronóstico de las secuelas tras la lesión cerebral. *Med Intensiva* 2009; 33: 171-181.
10. Damasio A. *Y el cerebro creó al hombre: ¿cómo pudo el cerebro generar emociones, sentimientos, ideas y el yo?* España: Ediciones Destino; 2010.
11. Squire LR, Kandel ER. *Memory from mind to molecules*. Second Edition. New York: Roberts and Company; 2009.
12. Schierhout G, Roberts I. Fármacos antiepilépticos para la prevención de convulsiones después de una lesión cerebral traumática aguda [internet]. Oxford: Cochrane Database of Systematic Reviews; 2012. Disponible en: <http://www.update-software.com>
13. Roy JE, Pritchep L, Easton P. Normative data banks and neurometrics: basic concepts, methods and results of norms constructions. En: Remond A. *Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology*, Vol. III. Computer analysis of the EEG and other neurophysiological signals. California: Elsevier Amsterdam; 1987: 449-495.
14. Leon-Carrion J, Martín-Rodríguez JF, Damas-López J, Barroso y Martín JM, Domínguez-Morales MR. Delta-alpha ratio correlates with level of recovery after neuro-rehabilitation in patients with acquired brain injury. *Clin Neurophysiol* 2009; 120: 1039-1045.
15. Buzsáki G, Draguhn A. Neuronal oscillations in cortical networks. *Science* 2004; 30: 1926-1929.
16. Mansilla Olivares A. *Teoría neurocientífica: del átomo a la molécula y de la molécula a la función*. México: Elsevier, Masson Doyma S.A; 2010.
17. Amara G. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1995; 2: 18-21.
18. Chorlian DB, Rangaswamy M, Porjesz B. EEG coherences: topography and frequency structure. *Exp Brain Res* 2009; 198: 59-83. Doi 10.1007/s 00221/009/1936/9.
19. Pfurtscheller G. The cortical activation model (CAM). *Prog Brain Res* 2006; 159: 19-27.
20. Smith K. Settling the great glia debate: do the billions of non-neuronal cells in the brain send messages of their own? *Nature* 2010; 468: 160-162.
21. Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D et al. *Neuroscience*. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates; 2001.
22. Principles of signaling and organization. En: Nicholls JG, Martin RA, Wallace BG, Fuchs PA. *From neuron to brain*. 4th ed. Sunderland: Sinauer Associates; 2001: 15-22.
23. Kandel ER, Schwartz JH. *Principles of neural science*. 5th ed. New York: McGraw Hill Medical; 2013.
24. Buzsáki G. Neural syntax: cell assemblies, synapsembles, and readers. *Neuron* 2010; 68: 362-85.
25. Lopes da Silva F. Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks. *Electroenceph clin Neurophysiol* 1991; 79: 81-93.
26. Rosanova M, Casali A, Bellina V, Resta F, Mariotti M, Massimini M. Natural frequencies of human corticothalamic circuits. *J Neurosci* 2009; 29: 7679-7685. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0445-09.2009.
27. Aloe L, Rita Levi-Montalcini and the discovery of NGF. The first nerve cell growth factor. *Arch Ital Biol* 2011; 149: 175-81. doi: 10.4449/aib.v149i2.1377.
28. Sakurai Y. The search for cell assemblies in the working brain. *Behav Brain Res* 1998; 91:1-13.
29. Nuñez PL, Wingeier BM, Silberstein RB. Spatial-temporal structures of human alpha rhythms: theory, micro-current sources, multiscale measurement and global binding of local networks. *Hum Brain Mapp* 2001; 13: 125-64.
30. Llinás RR, Steriade M. Bursting of thalamic neurons and states of vigilance. *J Neurophysiol* 2006; 95 (6): 3297-308.
31. Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clin Neurophysiol* 1999; 110: 1842-1857.
32. Suffczynski P, Kalitzin S, Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Computational model of thalamo-cortical networks: dynamical control of alpha rhythms in relation to focal attention. *Int J Psychophysiol* 2001; 43: 25-40.
33. Singer W. Neuronal synchrony: a versatile code for the definition of relations? *Neuron* 1999; 24: 49-65.
34. Tononi G. An information integration theory of consciousness. *BMC Neurosci* 2004; 5:42. doi:10.1186/1471-2202-5-42.
35. Kopell N, Kramer MA, Malerba P, Whittington MA. Are different rhythms good for different functions? *Front Hum Neurosci* 2010; 4: 187. doi 10.3389/fnhum.2010.00187.
36. Ergenoglu T, Demilrap T, Bayraktaroglu Z, Ergen M, Beydagi H, Uresin Y. Alpha rhythm of the EEG modulates visual detection performance in humans. *Brain Res Cogn Brain Res* 2004; 20: 376-383.

37. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Rev* 1999; 29: 169-95.
38. Harmony T, Fernández T, Silva J, Bernal J, Díaz-Comas L, Reyes A. EEG delta activity: an indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *Int J Psychophysiol* 1996; 24: 161-171.
39. Bruns A, Eckhorn R. Task-related coupling from high- to low-frequency signals among visual cortical areas in human subdural recordings. *Int J Psychophysiol* 2004; 51: 97-116.
40. Başar E, Schürmann M, Sakowitz O. The selectively distributed theta system: functions. *Int J Psychophysiol* 2001; 39: 197-212.
41. Sauseng P, Hoppe J, Klimesch W, Gerloff C, Hummel FC. Dissociation of sustained attention from central executive functions: local activity and interregional connectivity in the theta range. *Eur J Neurosci* 2007; 25: 578-593.
42. Brust-Carmona H, Ramírez-Aboytes F, Sánchez A, Martínez J, Rodríguez MA, Flores Avalos B et al. Cambios del EEG por habituación y condicionamiento en niños de tres a 15 años que acuden al Instituto Nacional de Rehabilitación (INR). *Salud Mental* 2009; 32: 459-467.
43. Mölle M, Marshall L, Fehm HL, Born J. EEG theta synchronization conjoined with alpha desynchronization indicate intentional encoding. *Eur J Neurosci* 2002; 15: 923-928.
44. Brovelli A, Ding M, Ledberg A, Chen Y, Nakamura R, Bressler SL. Beta oscillations in a large-scale sensorimotor cortical network: directional influences revealed by Granger causality. *Proc Natl Acad Sci* 2004; 101: 9849-9854.
45. Raichle ME. Two views of brain function. *Trends Cogn Sci* 2010; 14: 180-190. doi:10.1016/j.tics.2010.01.008.
46. Ostrosky-Solís, F. NEUROPSI Atención y Memoria 2003.
47. Wechsler, D. WAIS-III: Escala Wechsler de inteligencia para adultos-III. 2a. ed. Manual Moderno; 2003.
48. Moruzzi G, Magoun HW. Brain stem reticular formation and activation of the EEG. *Electroencephalogr Clin Neurol* 1949; 1: 455-473.
49. Grossberg S. How does the cerebral cortex work? Learning, attention, and grouping by the laminar circuits of visual cortex. *Spatial Vision* 1999; 12: 163-185.
50. Engel AK, Fries P, Singer W. Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nat Rev Neurosci* 2001; 2: 704-716. doi:10.1038/35094565.
51. Rodríguez E, George N, Lachaux JP, Martinerie J, Renault B, Varela FJ. Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity. *Nature* 1999; 397: 430-433.
52. Ward LM. Synchronous neural oscillations and cognitive processes. *Trends Cogn Sci* 2003; 17: 553-559.
53. Machado MS, Cunha CE, Portella G, Silva B, Velasques VH, Bastos L et al. Participación de la corteza parietooccipital en el proceso de integración sensoriomotora: estudio electroencefalográfico. *Rev Neurol* 2008; 47: 146-149.
54. Engel AK, Singer W. Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness. *Trends Cogn Sci* 2001; 5: 16-25.
55. Varela F, Lachaux J-P, Rodríguez E, Martinerie J. The brain web: phase synchronization and large-scale integration. *Nat Rev Neurosci* 2001; 2: 229-239.
56. Grossberg S. The link between brain learning, attention, and consciousness. *Conscious Cogn* 1999; 8: 1-44.
57. Steriade M, Llinas R. The functional states of the thalamus and the associated neuronal interplay. *Physiol Reviews* 1988; 68: 649-742.
58. Taylor AG, Goehler LE, Galper DI, Innes KE, Bourguignon C. Top-down and bottom-up mechanisms in mind-body medicine: development of an integrative framework for psychophysiological research. *Explore* 2010; 6: 29-41. doi: 10.1016/j.explore.2009.10.004 PMID: PMC2818254.
59. Brust-Carmona H, Brust-Mascher E, Mascher I. Circuitos neuronales en aprendizajes complejos. En: *Aprendamos a aprender*. Editorial Trillas; 2012: 268-282.