

Aproximación al conocimiento funcional del Cerebro. Método ASETI

Luis Yoel Hernández López, Juana Rassi Pichardo, María E. Hernández Gigato

RESUMEN / ABSTRACT

Numerosas afectaciones del sistema nervioso central agotan las posibilidades diagnósticas y terapéuticas con que cuentan los especialistas. La imposibilidad de predecir el comportamiento de sistemas neuronales mediante los registros electroencefalográficos realizados en humanos, es reflejo de la existencia de mecanismos no lineales involucrados. Por la no-linealidad y caoticidad en los electroencefalogramas, se estableció un método de análisis para su mejor comprensión. Se registró la señal eléctrica del cerebro con TrackWalker. Se aplicó el método ASETI a cada registro electroencefalográfico. Los estudios analizados pertenecen a diferentes personas que sufren o no algún tipo de enfermedad. Se realizó un análisis por regiones atendiendo a tamaño, forma y valor del atractor, evidenciando gran variedad de formas y tamaños en diferentes personas e incluso en una misma persona. Esta diversidad refleja que la variabilidad de los mismos puede usarse como un indicador de salud. Del análisis basado en escala de colores y posición fisiológica se obtuvo que la disminución del atractor es por campos de interferencia producto de posibles afectaciones orgánicas. La reducción del atractor está dada por la incapacidad del sistema dinámico para acceder a determinados estados del espacio de fase. El aumento del atractor tiene una causa contraria, el sistema alcanza estados inaccesibles respecto a los de pequeño tamaño. Existe una dinámica que describe y discrimina los cambios en los resultados coincidiendo con los criterios de salud y patología propuestos de modo que es posible usarlo como método diagnóstico en el futuro.

Palabras claves: electroencefalogramas, atractor, variabilidad

Numerous disorders of the central nervous system exhaust the diagnostic and therapeutic possibilities available to specialists. The impossibility of predicting the behavior of neuronal systems through electroencephalographic recordings made in humans reflects the existence of non-linear mechanisms involved. Due to the non-linearity and chaoticity in the electroencephalograms, an analysis method was established for better understanding. The electrical signal from the brain was recorded with TrackWalker. The ASETI method was applied to each electroencephalographic recording. The studies analyzed belong to different people who do or do not suffer from some type of disease. An analysis was carried out by region considering the size, shape and value of the attractor, evidencing a great variety of shapes and sizes in different people and even in the same person. This diversity reflects that their variability can be used as an indicator of health. From the analysis based on color scale and physiological position, it was obtained that the decrease in the attractor is due to interference fields resulting from possible organic effects. The reduction of the attractor is given by the inability of the dynamical system to access certain states of the phase space. The increase in the attractor has an opposite cause, the system reaches inaccessible states with respect to those of small size. There is a dynamic that describes and discriminates the changes in the results coinciding with the proposed health and pathology criteria so that it is possible to use it as a diagnostic method in the future.

Keywords: electroencephalograms, attractor, variability

Approach to functional knowledge of the brain. ASETI method.

Recibido: 01/2023 Aceptado: 04/2023

1. -INTRODUCCIÓN

Existen numerosas afectaciones del sistema nervioso central (SNC) donde se agotan las posibilidades diagnósticas y terapéuticas con que cuentan los especialistas constituyendo un reto encontrar la solución para el caso patológico. Dichas afectaciones son resultado de comportamientos inadecuados de las partes que constituyen el organismo.

Varios investigadores [1] han probado que la evolución dinámica compleja conlleva a regímenes caóticos. En los últimos años las observaciones experimentales aseguran que los sistemas caóticos son comunes en la naturaleza. Se comprobó la existencia en neurofisiología del caos, mediante el descubrimiento de Freeman del comportamiento caótico del EEG registrado en el bulbo olfatorio en conejos [2].

La imposibilidad de predecir el comportamiento de sistemas neuronales por el resultado de los registros electroencefalográficos realizados en humanos, es reflejo de la existencia de mecanismos no lineales involucrados en el comportamiento de dichos sistemas [4]. En modelación teórica de sistemas neuronales existe un énfasis en comportamientos estables o periódicos. Un comportamiento caótico a nivel neuronal podría ser el responsable de la esquizofrenia, insomnio, epilepsia y otros tipos de desórdenes [5].

Como el hombre es un sistema dinámico y no lineal muchas de sus situaciones complejas de salud permiten una mejor comprensión con modelos que tengan en cuenta estas características. Habitualmente se estudia el cerebro mediante los electroencefalogramas (EEG) a los cuales se les aplica la descomposición en componentes de Fourier y se construye un mapeo de las diferentes componentes. Sin embargo, este enfoque no brinda una descripción total de los problemas que se presentan, pues se toman las componentes lineales y no se consideran los elementos caóticos del EEG. La búsqueda de indicadores que ayuden a interpretar de una mejor manera la información registrada en los EEG constituye una de las rutas de investigación. Esto es una herramienta útil en el desarrollo de este campo de la Medicina pues proporciona la posibilidad de que este tipo de análisis posea un carácter clínico, lo cual ayuda en la detección de muchas enfermedades.

Se implementó un método de análisis de los registros electroencefalográficos teniendo en consideración las componentes no lineales del mismo, para así, brindar otra interpretación de una manera menos sesgada y que tenga un indicador como referencia para futuras comparaciones entre estudios anteriores en un mismo paciente con determinada enfermedad y entre diferentes tipos de entidades patológicas a futuro.

Las contribuciones científicas fundamentales que se hacen en este trabajo son: un nuevo método de análisis e interpretación del EEG como complemento al protocolo habitual en que se utiliza, como herramienta de apoyo al personal de salud para una interpretación más certera en el diagnóstico y seguimiento de enfermedades. Además, la introducción de un parámetro cuantitativo que recoge las zonas a la que el sistema caótico, en este caso, el cerebro, tuvo acceso o no según la patología que se estudia.

2.- SISTEMAS DINÁMICOS. CAOS. EL ESPACIO DE FASE Y LA TRAYECTORIA DE SISTEMAS DINÁMICOS. ATRACTOR

Los sistemas dinámicos son útiles para comprender procesos de la naturaleza. Importantes descubrimientos, como la existencia de caos [6], hace vital conocer qué es un sistema lineal [7], no lineal [8] y sistema complejo [9-11].

2.1.- SISTEMA DINÁMICO

Sistema complejo que presenta un cambio o evolución de su estado en el tiempo [12,13]. El comportamiento se caracteriza determinando los límites del sistema, sus elementos y relaciones. Se elaboran modelos que buscan representar la estructura del sistema. Al definir los límites del sistema se seleccionan los componentes que contribuyan a generar los modos de comportamiento y luego se determina el espacio donde se llevará a cabo el estudio.

2.2.- CAOS

Asociado con desorden o confusión [14]. En la ciencia describe una paradoja conceptual importante que tiene un significado matemático preciso [15]. Un sistema caótico es un sistema determinístico difícil de predecir. Este es una clase específica de comportamiento dinámico, donde la porción del espacio de fases donde evoluciona un sistema caótico tenga una estructura

Recibido: 01/2023 Aceptado: 04/2023

geométrica y topológica muy complicada, y como consecuencia, una dinámica de alto grado de complejidad. Estos conjuntos se denominan atractores extraños debido a su estructura y apariencia "extraña".

2.3.- ATRACTOR

Singularidad o región en el "espacio de acción" o de fase, donde ocurre un fenómeno, hacia el cual convergen las trayectorias de una dinámica dada, que encuentran en su atractor una condición local de mínima energía, llamado esto cuenca del atractor [16]. La existencia de un atractor se puede detectar observando la disipación de algún tipo de energía.

3.- ELECTROENCEFALOGRAMAS (EEG)

La materia viva es fuente de electricidad. El cerebro es, por tanto, un campo eléctrico. Esto no sólo ocurre con el sistema nervioso, también se registran otros campos eléctricos en el organismo: corazón, músculos y retina. Todos estos campos tienen sus peculiaridades, el corazón se despolariza uniformemente, en una dirección y un sentido definido, sin embargo, en el cerebro se generan fuerzas eléctricas de forma compleja debido a las estructuras que lo componen como neuronas, gliales y otras [18].

Tal situación lleva a sólo poder captar y registrar en forma indirecta los resultados de esa complicada actividad en unos cuantos ritmos o patrones, los que se denominan de forma convencional actividad o ritmos eléctricos cerebrales. El conjunto de fenómenos que se registran no se origina en la totalidad del encéfalo, ni siquiera en la totalidad del cerebro, sino solo en la corteza cerebral y no en toda ella, ya que algunas zonas corticales, por su situación; corteza interhemisférica; no son accesibles. Sólo un manto de corteza cerebral superficial y abordable permite una adecuada exploración. Esto explica la frecuente incongruencia entre estado anatómico y funcional del cerebro, y los resultados del electroencefalograma, expresada en trazados con apariencia anormal, obtenidos en sujetos normales y viceversa: pacientes con lesiones neurológicas con un EEG normal.

En consecuencia, una función cerebral normal no equivale a un EEG normal y los trazados en modo alguno pueden interpretarse como expresión de las funciones cerebrales, ni estado de salud ni en presencia de dolencia clínica. Esta limitación ha frenado la correlación entre las enfermedades mentales y el EEG. Un trazado normal es un fuerte argumento en contra de la presencia de un tumor cerebral, una infección del sistema nervioso central (SNC), un traumatismo o una enfermedad vascular de la corteza accesible.

La perturbación neuronal tiene formas de expresión bioeléctricas limitadas a tres patrones: depresión, irritación y excitación. La depresión origina una atenuación de los potenciales eléctricos, que en casos extremos puede llegar a su total desaparición. La irritación se expresa mediante la irrupción de potenciales paroxísticos. Por último, la excitación suele provocar cambios en la frecuencia de las ondas cerebrales.

Los EEG recogidos para la realización del presente trabajo presentan la particularidad de poseer 19 canales regidos por la norma internacional 10/20 (fig. 1).

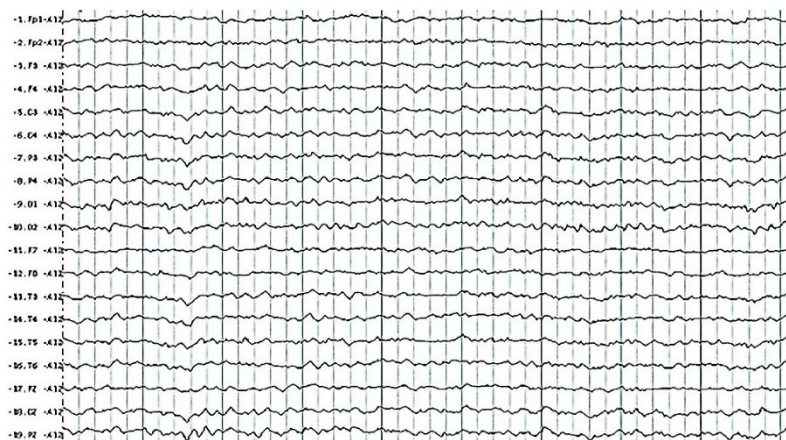


Figura 1

Registro de un EEG de 19 canales.

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a la no-linealidad y caoticidad que presentan los electroencefalogramas, se establece un método de análisis para su mejor comprensión de manera que en conjunto con el análisis cuantitativo pueda servir al médico para obtener más información útil del EEG.

4.1.- SOFTWARE

El software que registra el EEG, TrackWalker es elaborado en Cuba, en Neurociencias y está dentro del hardware correspondiente. El método de análisis que utiliza dicho software se basa en un método cuantitativo a partir de la descomposición en transformadas de Fourier del EEG. Este sistema (TrackWalker) fue autorizado y generalizado en Cuba.

4.2.- MÉTODO ASETI

Es conveniente entonces definir una variable aleatoria a partir de las series de datos recogidas por los EEG de modo que se pueda aplicar el método del Atb en cada uno de los electrodos.

Es importante señalar que el EEG es la actividad eléctrica registrada del comportamiento no predecible del cerebro, el cual se puede considerar como un sistema dinámico no lineal. El EEG no presenta una forma conocida, ni mucho menos regular, entonces considerando que los picos ocurren caóticamente, se puede definir la aparición de ellos como el evento aleatorio y los intervalos de tiempo de pico a pico P-P son irregulares, caóticos y es posible definir que la diferencia de tiempo en cada intervalo P-P constituye la variable caótica para la reconstrucción del atractor y calcular el valor del área total barrida por este con el algoritmo del Atb. Poder reconstruir el atractor se justifica con el teorema de Takens. La búsqueda de un Atractor aplicado a las Series de Tiempo obtenidas de los registros de EEG según el criterio que se explicará después se denominará método ASETI. El método será aplicado a cada electrodo, es decir a cada canal, por lo que en este caso serán 19 canales, es decir 19 atractores. Es significativo señalar que los 19 electrodos recogen información a la vez de modo que el cálculo al unísono de 19 atractores en los puntos señalados de la cabeza brindará un criterio numérico del comportamiento de cada zona y con ello poder entonces definir patrones de salud y patología. Una vez registrado el EEG se extraen los valores de los puntos que definen la señal, los cuales se encuentran separados a un intervalo fijo uno de otro

El método consiste en buscar los máximos valores que dan lugar a los “picos” de la señal mediante un criterio de comparación con los valores vecinos (fig. 2).

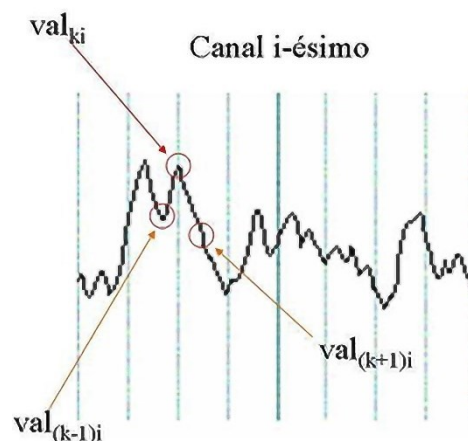


Figura. 2

Criterio de comparación para la búsqueda de los picos.

Seguidamente se procede a encontrar la separación temporal entre dos máximos P-P. Se restan las posiciones que corresponden a dos máximos contiguos y se multiplica por el intervalo de tiempo para el cual aparece cada valor registrado en el EEG, correspondiente a t .

Con todas las diferencias entre máximos existentes por canal se denotarán por Dif_{ni} , es decir, n diferencias que cambian según el valor de los canales i , se le asocia la primera diferencia a la variable $X_{(t-2)}$, la siguiente diferencia a $X_{(t-1)}$ y la próxima a $X_{(t)}$. Se hace corresponder a $X_{(t-2)}$ con X , $X_{(t-1)}$ con Y y $X_{(t)}$ con Z . Con las variables X, Y, Z se procede a la construcción de puntos con esas variables como coordenadas los que se denotan con P_1, P_2, \dots, P_{n-2} , donde el número de puntos formados corresponderá a la cantidad de diferencias menos dos. Se calcula además el punto medio P_m cuyas coordenadas X_m, Y_m, Z_m se corresponden con los valores medios de X, Y, Z .

Los puntos formados al igual que su correspondiente punto medio se colocan en el espacio de coordenadas xyz donde se construyen los triángulos cuyos vértices son P_1, P_2 y P_m para el caso del primer triángulo, P_2, P_3 y P_m para el segundo triángulo y así sucesivamente. La cantidad de triángulos será igual a la cantidad de puntos menos uno, o lo que es lo mismo, la cantidad de diferencias menos tres.

Los puntos P_1, P_2, \dots, P_{n-2} formarán una figura complicada como resultado de la caoticidad de los datos de entrada. Esa figura se corresponde con un atractor, que como ya se expuso es el reflejo del comportamiento caótico del sistema que se estudia. Ese atractor recorre un área que se denomina área total barrida, Atb . Se define como área total barrida por el atractor a la suma de todas las áreas correspondientes a los triángulos formados, en el espacio de fase, a partir de dos puntos consecutivos de la trayectoria junto con el punto central.

Mientras mayor sea el área, el sistema alcanzará más estados físicos posibles y así se confirma que la variabilidad sea mayor y también la caoticidad. Se puede entonces inferir que el atractor de una persona sana barrerá un área totalmente diferente que el correspondiente a una persona enferma, pero ello debe estar limitado pues los enfermos en este sistema tan complejo pueden asumir estados que no pueden tener las personas sanas y ello también conforma parte del área total barrida que se calcula por el Atb , por lo cual será necesario limitar los estados accesibles con un máximo. Del mismo modo mientras menor es el atractor, menos son los estados accesibles y por lo tanto menor será el área y el número calculado por el Atb , para las personas sanas debe haber un valor mínimo del Atb . Entonces, se puede afirmar que el Atb es un atractor que proporciona una medida o índice cuantitativo desde el punto de vista no lineal, de la variabilidad y caoticidad del EEG.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los EEG analizados pertenecen a diferentes personas que sufren o no algún tipo de enfermedad, un total de 16. Dichas personas se encuentran en determinados grupos según su estado de salud. Estos grupos son

- Normales (4 sujetos entre 21 y 24 años, InSTEC)
- Estado vegetativo persistente (1 enfermo de 9 años).
- Cefalea (1 enferma de 15 años).
- Dependencia alcohólica (4 enfermos, entre 32 y 50 años).
- Epilepsia (2 enfermos, entre 53 y 63 años).
- Trastornos de conducta (3 pacientes ingresados en el Hospital Psiquiátrico de La Habana, entre 27 y 55 años).
- Quiste LCR (líquido cefalorraquídeo) supraorbitario, sin síntomas (1 paciente de 40 años).

En particular en el caso del niño en estado vegetativo persistente se analizan dos EEG, porque se compara el EEG sin estímulos con el EEG que se obtiene cuando la madre le habla al oído. Esto eleva a 17 el número de EEG a procesar. Los códigos usados para los diferentes grupos de personas aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1
Códigos utilizados y grupos a que pertenecen

Código	Grupo de personas
DG87	Normal
NS	Niño (estado vegetativo)
NM	Niño (estado vegetativo) + mamá
TOX015	Epilepsia
1554	Dependencia alcohólica
1214	Trastorno de conducta
RH84	LCR

Análisis por regiones atendiendo a tamaño y forma del atractor, así como valor del Atb :

Se muestran 6 atractores para observar cuán diversas son sus formas y tamaños.

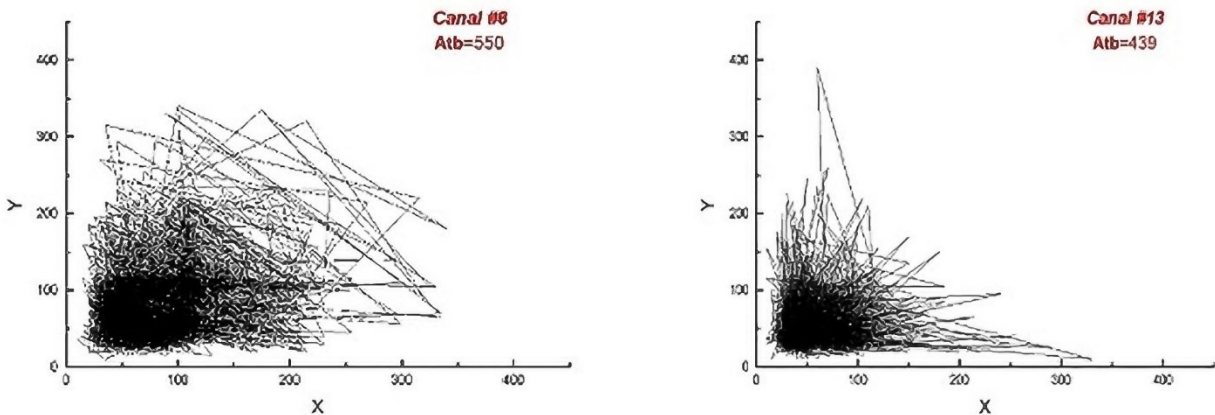


Figura 3

a. Atractor del paciente (1214) canal ocho. b. Atractor del paciente (1214) canal trece

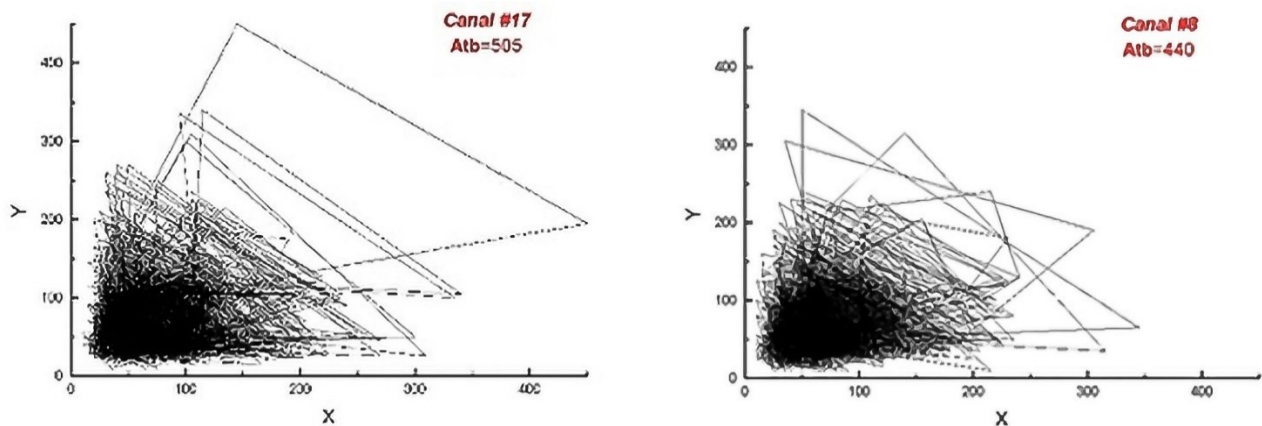


Figura 4

a. Atractor del paciente (1214) canal diecisiete. b. Atractor del paciente (1554) canal ocho.

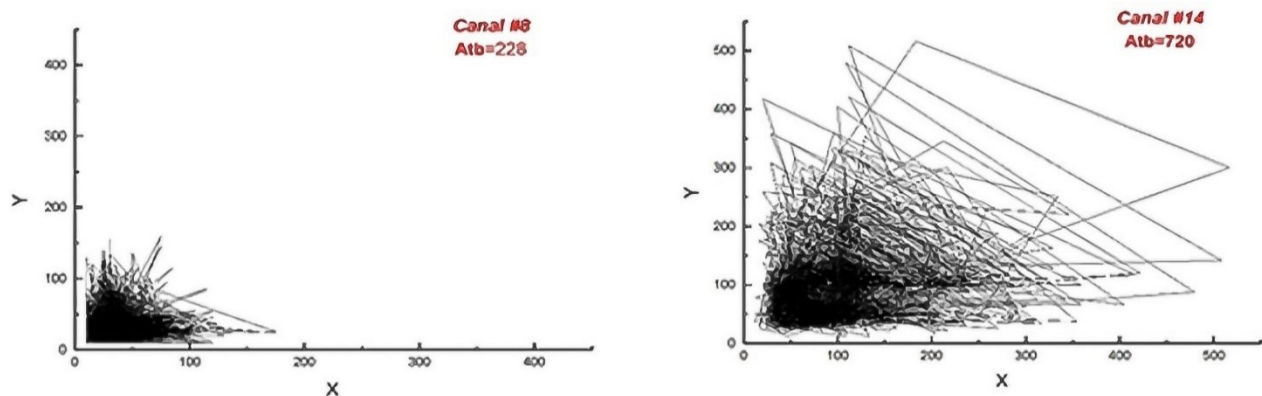


Figura 5

a. Atractor del paciente (NS) canal ocho. b. Atractor del paciente (RG86) canal catorce.

De los atractores obtenidos se puede concluir que existe una gran variedad de formas y tamaños en diferentes personas e incluso en una misma persona. La diversidad de formas y tamaños que alcanzan dichas figuras corresponde con la afirmación de que la variabilidad de los mismos puede usarse como un indicador de salud.

Para hacer un análisis más detallado sin llegar a mostrar la totalidad de atractores calculados se seleccionó un caso tipo de cada grupo identificado; de modo que se mostrarán por zonas y comparativamente siete EEG diferentes. Se muestran sus atractores y los valores del Atb.

Análisis basado en escala de colores. Análisis mediante posición fisiológica:

La escala fue definida para los casos que se estudiaron que fueron 16 personas y 17 EEG. Es posible que dicha escala sea modificada mientras mayor sea el número de casos analizados. Es importante resaltar que ningún caso normal posee un valor de Atb menor a 250, sin embargo, los pacientes con patologías conocidas si poseen una gran cantidad de valores en sus Atb correspondientes por debajo del número ya citado. Basado en lo anterior la escala se define para estar formada por cuatro colores que se hacen corresponder con cuatro intervalos de valores de Atb según se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Escala de colores

Valor Atb	Escala Color
Atb < 250	Rojo
251 <Atb < 320	Amarillo
321 <Atb < 550	Verde
Atb > 550	Azul

Para los valores de Atb menor igual que 250 se presentan puntos de posibles campos de interferencia (CI) que provocan que las señales bioeléctricas no sean las correctas, por lo que se le asigna color rojo. Para valores de Atb entre 251 y 320 se define una zona de observación (O) en la cual como su nombre indica se debe llevar a cabo una vigilancia para obtener cómo evoluciona con el tiempo dicha zona, se le asignó a este tipo de punto el color amarillo. Si el valor del Atb se encuentra entre 321 y 550 se define una zona normal (N) patológicamente que se le asigna color verde. Cuando el Atb supera el valor de 550 o es igual a 550 se define una zona excitada (E) la cual debe estudiarse con más detenimiento en otro trabajo. A este último intervalo se le colocó color azul.

En un círculo que se encuentra sobre cada electrodo se coloca el color que le corresponde según sea el valor del Atb en dicho caso. Al finalizar se obtiene un “mapa” de los colores de la cabeza donde se ubica el electrodo con su correspondiente color proporcionando visualmente un método útil para diferenciar entre posibles tipos de enfermedades y personas no patológicas. Se muestran a continuación la figura que vincula electrodo con posición fisiológica y las figuras elaboradas por este método para los mismos siete EEG cuyos atractores se mostraron en el análisis zonal.

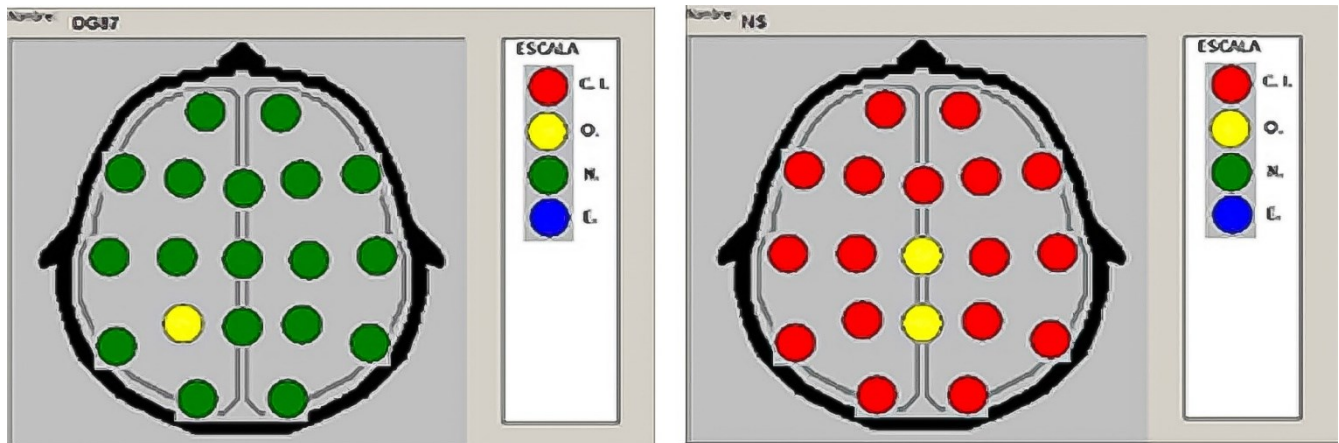


Figura 6

a. Esquema de colores para DG87. b. Esquema de colores para NS.

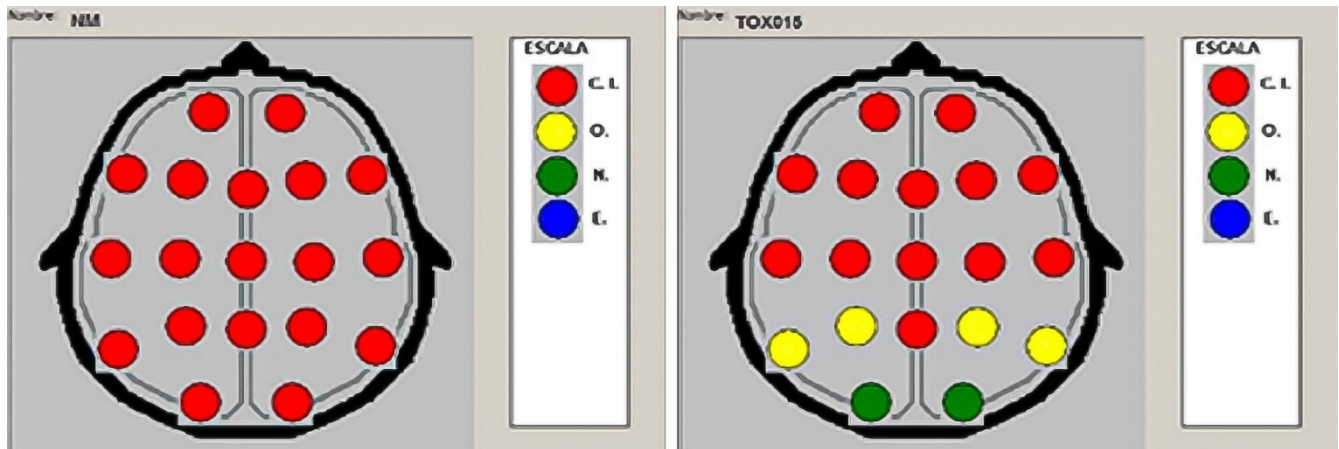


Figura 7

a. Esquema de colores para NM. b. Esquema de colores para TOX015.

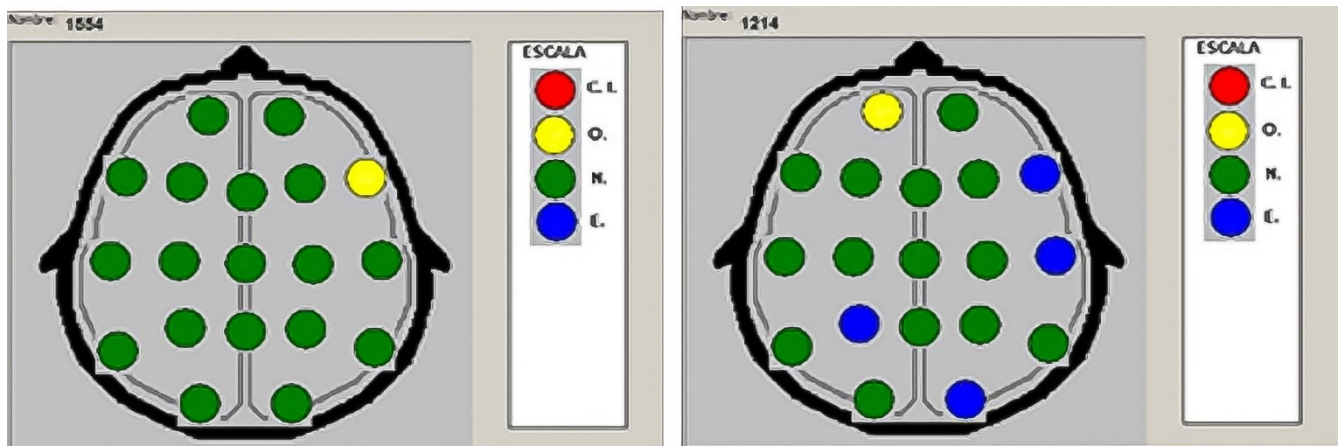


Figura 8

a. Esquema de colores para 1554. b. Esquema de colores para 1214.

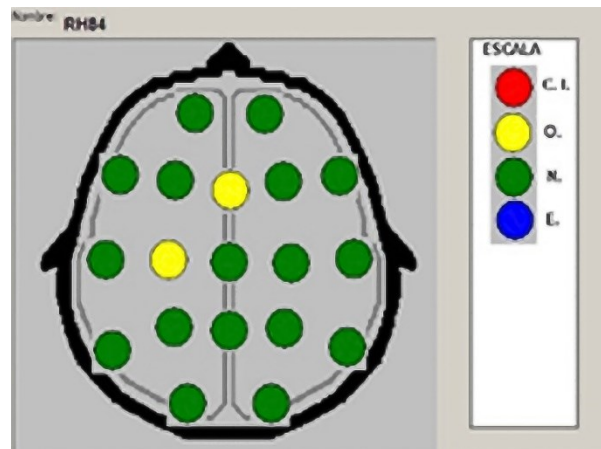


Figura 9

Esquema de colores para RH84.

De las figuras mostradas se puede concluir fácilmente que en realidad el paciente en estado vegetativo persistente tiene afectación severa en todas las zonas donde se colocaron los electrodos en la cabeza las cuales presentan color rojo. Tanto en estado estimulado (figura 7, NM) como no estimulado (figura 6, NS) el estado vegetativo persistente presenta una afectación generalizada en rojo salvo en dos posiciones correspondientes a los canales 18 y 19 cuyo color es amarillo. Esto concuerda con las conclusiones realizadas para el caso del análisis por zonas expuesto anteriormente. Se puede de cierta forma analizar la simetría que en este caso no se puede hacer notar pues existe una afectación total, existe afectación simétrica.

En el paciente que padece de epilepsia se marca un punto para el cual su valor de Atb entra en el rango de observación (figura 7, TOX15), lo que conduce a llevar a cabo una investigación más profunda correspondiente al color amarillo pues podría ser posible foco de la enfermedad. No existe una simetría total en este caso.

El paciente que corresponde al grupo de dependencia alcohólica presenta una grave afectación en la mayoría de la cabeza (figura 8, 1554). Existen solo dos puntos que se encuentran excluidos de patología señalados con color verde, resultado que se corresponde con el obtenido en el análisis zonal. En este caso sin embargo existe simetría y a la vez afectación lo que implica que presenta una afectación en casi todos los puntos correspondientes.

Para el caso del paciente perteneciente al grupo de trastorno de conducta sólo se observa una posición para investigar en color amarillo y cuatro posiciones más que se encuentran excitadas marcadas con color azul cuyo significado aún se desconoce y será objeto de estudio de otro trabajo (figura 8, 1214). Existe una pérdida de la simetría para este caso.

Para el paciente con el quiste de líquido cefalorraquídeo existen dos puntos a investigar en color amarillo los cuales como se nota están próximos (figura 9, RH84). Así entonces se llega a la conclusión de que hay que estudiar las regiones marcadas en amarillo, ya que se hacen corresponder con la parte donde radica su problema. Existe pérdida de la simetría.

6.- CONCLUSIONES

Se encontró nuevos métodos e indicadores que sirven para medir la caoticidad y aleatoriedad de un sistema, así como el estado patológico de una persona.

Del análisis zonal de los atractores se concluyó que estos en personas sanas presentan gran variabilidad en cuanto a forma y tamaño de los mismos.

Las personas con patologías presentan generalmente atractores más pequeños en cuanto a forma y menor el valor del Atb que en los no patológicos. En un mismo individuo, los atractores en los “puntos patológicos” presentan similitud de forma entre ellos. En personas normales sin puntos patológicos no ocurre lo anterior.

Existe una dinámica que describe y discrimina los cambios en los resultados coincidiendo con los criterios de salud y patología propuestos de modo que es posible usarlo como método diagnóstico en el futuro.

La reducción del atractor está dada por la incapacidad del sistema dinámico para acceder a determinados estados del espacio de fase. El aumento del atractor tiene una causa contraria, es decir, el sistema alcanza estados inaccesibles respecto a los de

pequeño tamaño. La disminución del atractor es debido a campos de interferencia (formación de vórtices) producto de posibles afectaciones orgánicas. Dichos campos no permiten el desarrollo normal de la dinámica que regularmente se lleva a cabo en el cerebro.

El método ASETI constituyen una herramienta útil en el campo de la Medicina.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a las Instituciones de salud como el Hospital Universitario “General Calixto García” y el Hospital Psiquiátrico de La Habana que apoyaron el desarrollo del trabajo por los datos entregados para el análisis, tiempo concedido al personal que realizó cada examen diagnóstico, así como el resto del personal involucrado, por su hospitalidad y profesionalismo durante el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

1. Elbert T., Ray W. J., Kowalik Z. J., Skinner J. E., Graf K. E., Birbaumer N. Chaos and physiology. *Physiological Reviews*. 1994; 74:1-47.
2. Freeman W. J., Yao Y., Burke B. Central pattern generating and recognizing in olfactory bulb: A correlation learning rule. *Neural Networks*. 1988; 1(4):277-288.
3. Ma, J., Tang, J. A review for dynamics in neuron and neuronal network. *Nonlinear Dynamics*. 2017; 89:1569–1578 <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3565-3>.
4. Rajendra Acharya U. Deep convolutional neural network for the automated detection and diagnosis of seizure using EEG signals. *Computers in Biology and Medicine*. 2018; 100: 270-278.
5. Soracipa Muñoz R. La naturaleza eléctrica del corazón como un problema de conocimiento: estudio sobre las implicaciones que tiene su interpretación desde el contexto de los sistemas dinámicos y la geometría fractal. Tesis de Maestría. Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia, 2023.
6. Korda A., Frisman M., Andreou C. Borgwardt S. Nonlinear Methods for the Investigation of Psychotic Disorders. *Computational Neuroscience*. In: Stoyanov, D., Draganski, B., Brambilla, P., Lamm, C. (eds) *Computational Neuroscience*. *Neuroinformatics*. Springer Nature. 2023, 109:133-144.
7. Jiménez Gómez W. A., Plazas Merchán T.J., Jaimes Gómez, F.S., Quiroga Campos, S.Y. *MeNuméricos*. Una introducción a los métodos numéricos. Libro de Texto. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, 2020.
8. Legarralde T., Vilches A., Luna M. E.. *Introducción a la Biología Humana*. Universidad Nacional de la Plata Editorial EDULP. 2021.
9. Lestayo O’Farrill Z., and Hernández Cáceres J.L. Aplicaciones de la Teoría del caos en medicina. *Revista Cubana de Informática Médica*. 2022; 14(2).
10. Tang Yiming, Li L., and Liu X.. State-of-the-art development of complex systems and their simulation methods. *Complex System Modeling and Simulation*. 2021; 1(4): 271-290.
11. Bakheet D. M. Complexity and synchronisation analysis of electroencephalogram signals for early prediction of neurodevelopmental disorders. *Doctoral Thesis, University of Southampton*, 2022.
12. Boeing G. Visual analysis of nonlinear dynamical systems: chaos, fractals, self-similarity and the limits of prediction. *Systems*. 2016; 4(4):37.
13. Chang Y. F.. Chaos, fractal in biology, biothermodynamics and matrix representation on hypercycle. *NeuroQuantology*. 2013; 11(4).
14. Rodríguez Bermudez G., García Laencina P.J. Analysis of EEG Signals using Nonlinear Dynamics and Chaos: A review. *Applied Mathematics & Information Sciences*
15. Alipour M., and Seyed Hashemi Golpayegani M. R. Systemic modeling of chaotic EEG during human sleep. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2023; 39: 101277.
16. Nandi M., Aston P. J. Extracting new information from old waveforms: Symmetric projection attractor reconstruction: Where maths meets medicine. *Experimental physiology*. 2020; 105(9): 1444-1451.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado, ni con ninguna otra institución.

Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores y no representan la posición de la Institución o las instituciones a las que están afiliados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Luis Yoel Hernández López: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Validación -Verificación, Redacción- borrador original.

Juana Rassi Pichardo: Conceptualización, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Recursos, Supervisión, Validación -Verificación, Redacción – revisión y edición.

María Esther Hernández Gigato: Curación de datos, Investigación, Recursos, Redacción – revisión y edición.

AUTORES

Luis Yoel Hernández López, Físico Nuclear, Máster, Hospital General Docente “Abel Santamaría Cuadrado”, Pinar del Río, Cuba, lyoel.hl@gmail.com, 0009-0009-7543-6494, Estudio sobre funcionamiento del cerebro por métodos caóticos, Física médica enfocada en el radiodiagnóstico, calidad, protección radiológica, Nutrición.

Juana Rassi Pichardo, Física, Doctora en Ciencias, arrassi@ceniai.inf.cu, 0009-0000-2838-4016, Teoría Solitónica de la Acupuntura, Sistema BIMET, Láserpuntura, Métodos no lineales utilizados en cerebro y corazón, electroencefalogramas y electrocardiogramas.

María Esther Hernández Gigato, Doctora, Especialista en 1er grado en MGI, Especialista en 1er y 2do grado en Cuidados Intensivos y Emergencias, Máster, Hospital General Docente “Abel Santamaría Cuadrado”, Pinar del Río, Cuba, mesther.gh79@gmail.com, 0009-0009-7169-9561, Estudio sobre funcionamiento del cerebro por métodos caóticos, Nutrición.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)