

Investigacion

La entropía de Renyí: Una herramienta matemática para el diagnóstico neurogenerativo

Renyí's entropy: a mathematical tool for neurogenerative diagnosis

Marlene Leyva Martínez, Luis Manuel Díaz Granado Bricuyet, Aidara Carrazana Aguilar

Revista de Investigación



Volumen X, Número X, pp. 015–022, ISSN 2174-0410
Recepción: 01 Jun'20; Aceptación: 09 Jul'20

1 de octubre de 2020

Resumen

El cerebro humano es un sistema complejo que progresivamente envejece, alcanza una sincronización generalizada (epilepsia) [11], se degenera (demencias) o simplemente proyecta preconditionamientos genéticos. En el presente trabajo se realiza un breve estudio acerca de ciertos patrones que se derivan de las señales electroencefalográficas, teniendo en cuenta la Entropía de Renyi, como una medida del desorden. Dichos patrones permiten diferenciar a un paciente considerado sano de uno con una afección neurológica. Los resultados conseguidos contribuyen al diagnóstico precoz de ciertas afecciones neurológicas. Además, se emplean algunas técnicas matemáticas que facilitan la interpretación de los resultados por los especialistas clínicos.

Palabras Clave: Electroencefalograma (EEG), Entropía de Renyi, Mapa de colores.

Abstract

The human brain is a complex system that progressively ages, reaches a generalized synchronization (epilepsy) [11], degenerates (dementias) or simply projects genetic preconditionings. In this paper, a brief study is carried out on certain patterns that are derived from electroencephalographic signals, taking into account Reny Entropy, as a measure of disorder. These patterns allow differentiating a patient considered healthy from one with a neurological condition. The results achieved contribute to the early diagnosis of certain neurological conditions. In addition, the use of some mathematical techniques that facilitate the interpretation of the results by clinical specialists.

Keywords: Electroencephalogram (EEG), Renyí's entropy, colors map.

1. Introducción

Nuestro cerebro rige todas las funciones de nuestro cuerpo, y cada una tiene un área de asignación determinada, ya sea la vista, el oído, etc. Los accidentes, enfermedades y otros sucesos tienen la capacidad de alterar estas funciones básicas y a su vez su comportamiento.

El cerebro constituye la masa principal del encéfalo y es el lugar donde llegan las señales procedentes de los órganos de los sentidos, de las terminaciones nerviosas nociceptivas y propioceptivas. Se desarrolla a partir del telencéfalo. Procesa toda la información procedente del exterior y del interior del cuerpo y la almacena como recuerdos. Él es el encargado del buen funcionamiento del cuerpo, pues regula todas y cada una de las funciones de este [5].

Es además el centro de control del movimiento, del sueño y de casi todas las actividades vitales necesarias para la supervivencia, se encarga de recibir e interpretar las innumerables señales que le llegan desde el organismo y el exterior. El cerebro humano adulto normal pesa entre 1 y 1.5 Kg (3 libras) y tiene un volumen promedio de 1600 cm^3 . Es una estructura anatómica fascinante, entre otras cosas, porque se apoya en decenas de miles de millones de conexiones sinápticas, convirtiéndolo en una red neuronal extremadamente intrincada y densamente conectada [2].

Aunque una parte importante del conocimiento acerca del funcionamiento del cerebro humano continúa siendo un secreto para la comunidad científica dedicada al tema, se han dado pasos importantes que han ayudado a comprender cada vez más las interacciones anatómicas funcionales que ocurren en esta estructura y le garantizan dar una respuesta satisfactoria a los diversos estímulos que recibe y procesa en instantes de tiempo extremadamente cortos. En este sentido han surgido diversos conceptos que ayudan a comprender y clasificar mejor estas interacciones.

1.1. Características de las señales (EEG)

Para lograr realizar un diagnóstico certero se utiliza el Encefalograma. El electroencefalograma (EEG) puede ser rigurosamente definido como la actividad eléctrica media del cerebro en diferentes sitios de la cabeza, más específicamente es la suma de los flujos de corriente extracelulares de grandes grupos de neuronas [1, 8].

Todavía en nuestros días no son comprendidos todos los detalles acerca de la generación del EEG. Los ritmos del EEG registrados sobre el cuero cabelludo son el resultado del efecto aditivo de muchos potenciales postsinápticos excitatorios e inhibitorios producidos en las capas piramidales de la corteza cerebral [7].

El cerebro es un sistema extremadamente complejo que constantemente procesa y transfiere información hacia el exterior. Los sistemas neuronales trabajan a través de interacciones entre largos ensamblajes neuronales en el sistema nervioso central y el sistema nervioso periférico. Al nivel celular, las neuronas transfieren y procesan la información a través de los potenciales de acción y el disparo neuronal [9].

Cuando este tipo de actividad eléctrica se transfiere a la superficie de la corteza y a la superficie del cuero cabelludo, la podemos registrar como EEG. Una de las razones fundamentales del EEG cuantitativo es que las señales de EEG se originan en el cerebro y portan información patológica o fisiológica redundante dentro del mismo, por lo cual su adquisición y procesamiento resulta muy útil en la evaluación de esta información.

1.2. La adquisición del EEG

Para la realización de los registros de los EEG [3, 12], se utilizan sensores, también conocidos como electrodos, son posicionados a distancias preestablecidas sobre el cuero cabelludo. Durante la adquisición de los datos cada electrodo capta señales eléctricas desde el Sistema Nervioso Central. El sistema de registro de EEG incluye:

1. Etapa de electrodo y cabeza,
2. Pre-procesamiento y EEG cuantitativa,
3. Almacenamiento de datos y resultados.

Con el reciente desarrollo de la electrónica y la instrumentación ayudada por computadoras, existen mini-sistemas de EEG portables y poderosos para el registro y análisis de estas señales [6].

Estas medidas son desarrolladas fundamentalmente sobre la superficie del cuero cabelludo (EEG de superficie) o usando electrodos especiales ubicados en el cerebro mediante una operación quirúrgica (EEG intracraneal). Los electrodos de EEG son sensores potenciales eléctricos, los cuales se disponen en distintas formas y tamaños, que dependen del trabajo o las condiciones experimentales, tales como los electrodos de superficie, los electrodos de aguja, los electrodos del sphenoid, los electrodos de cinta subdural, y los electrodos de profundidad [13].

Actualmente, los electrodos normalmente más usados por el subprograma clínico del EEG son los electrodos de superficie, los cuales se pegan a la piel con gel.

2. Entropía de Renyi

El cerebro es un sistema complejo que, sin duda, pierde progresivamente la complejidad a medida que envejece, alcanza una sincronización generalizada (epilepsia) [11] o se degenera (demencias). Este patrón de simplificación neuronal es un rasgo que tiene una importancia central para entender el funcionamiento de la corteza cerebral (donde residen gran parte de las funciones cognitivas). La complejidad es una propiedad que caracteriza a los sistemas no lineales, por lo que debemos explorar en las técnicas no lineales para aprender a medir esta característica inherente al funcionamiento del cerebro (en la salud y la enfermedad). Existen una serie de medidas novedosas que se han dado a conocer en el mundo científico de hoy, a algunas de las cuales nos referiremos en adelante.

Hay que destacar que el procesamiento de la información por el cerebro se refleja en los cambios dinámicos de la actividad eléctrica en tiempo, frecuencia y forma espacial. Por consiguiente, para caracterizar la actividad eléctrica se requieren métodos capaces de describir la variación cuantitativa de estas señales en el tiempo y también en los cambios de sus componentes frecuenciales. Para ello es importante realizar un análisis EEG cuantitativo (qEEG), basado en la Transformada Wavelet Discreta Ortogonal (ODWT), para señales EEG. Para este caso, dos cuantificadores han sido usados: la Energía Wavelet Relativa (RWE) y la Entropía Wavelet Total Normalizada (NTWS) [4].

Asumamos que la señal viene dada por los valores muestreados

$$S = \{s_0(n) : 1 \leq n \leq M\} = \bigcup_{1 \leq i \leq \mathcal{N}} S^{(i)},$$

donde $S^{(i)}$ son subseñales que no se solapan, con $1 \leq i \leq \mathcal{N}$ y $\mathcal{N} = M/L$, siendo L el tamaño de las ventanas. Sea t_s y ω_s el tiempo y la frecuencia de muestreo, respectivamente. Si la descomposición de la señal es llevada sobre todos los niveles de resolución $N = \log_2(M)$, entonces

la expansión de wavelet vendrá dada por

$$S^{(i)}(t) = \sum_{1 \leq j \leq N} \sum_k C_j^{(i)}(k) \psi_{j,k}(t), \quad 1 \leq i \leq \mathcal{N},$$

donde los coeficientes de wavelet $C_j^{(i)}(k)$ pueden interpretarse como el error residual local entre las aproximaciones sucesivas de la señal sobre las escalas j y $j + 1$ y $\{\psi_{j,k}(t)\}$ representa la familia de wavelets madres seleccionada.

Luego, la energía de wavelet en el nivel de resolución j , para la ventana temporal i , viene dada de la siguiente forma:

$$E_j^{(i)} = \sum_{k=(i-1)L+1}^{i \cdot L} |C_j^{(i)}(k)|^2, \quad 1 \leq i \leq \mathcal{N}.$$

Mientras que la energía total en esta ventana de tiempo vendrá dada por

$$E_{\text{Total}}^{(i)} = \sum_{1 \leq j \leq N} E_j^{(i)}.$$

La evolución en el tiempo de la energía de wavelet relativa viene dada mediante:

$$p_j^{(i)} = \frac{E_j^{(i)}}{E_{\text{Total}}^{(i)}}.$$

Finalmente, la entropía de Renyi [10] quedará como sigue:

$$(H^q)^{(i)} = \frac{1}{1-q} \log_N \sum_{1 \leq j \leq N} \left(p_j^{(i)}\right)^q, \quad q \geq 0, \quad q \neq 1.$$

3. Valoración de los resultados

Para evaluar cuantitativamente el efecto de ciertas afecciones neurológicas se procedió a registrar la actividad eléctrica cerebral (EEG). Las señales EEG se captaron de 19 derivaciones del sistema internacional 10-20 de 19 canales. Para el caso del presente estudio, fue programada la medida $(H^q)^{(i)}$, con $1 \leq i \leq \mathcal{N}$, calculada a partir de la energía de wavelet e implementada en Python 3.7.

Esto permitió una experimentación inicial con todos los datos clínicos aportados en la base de datos del Departamento de Neurofisiología del Hospital Docente Carlos Manuel de Céspedes de la provincia Granma, entre los que se registraron pacientes con afectaciones neuronales y pacientes sanos, para lo cual se tomó como criterios los test neuropsicológicos y estudios genéticos, además de dos sujetos control (sanos), y pacientes con enfermedades como: Demencia, Alzheimer, Epilepsia, Parkinson, con pacientes cuyas edades oscilan entre los 6 meses de edad hasta 61 años, utilizando diferentes canales, para los cuales las técnicas utilizadas descartaban la presencia de dichas enfermedades así como la posibilidad de padecer alguna enfermedad neuronal.

En las Figuras 1 y 2, la media de los valores de la entropía de Renyi se concentra entre la banda 0.4 y 0.6, lo cual se refiere a pacientes sanos. En el caso de las Figuras 3 y 4, dicha media se concentra entre la banda 0.6 y 0.8, refiriéndose a pacientes con afectaciones (Epilepsia y Demencia). Por otro lado, la Figura 5 muestra mapas de colores, que representan a pacientes sanos, mientras que la Figura 6 representa a pacientes enfermos, notándose la intensidad de la coloración, siendo más intensa según el tipo de enfermedad y el tiempo de padecimiento en dependencia de la escala utilizada.

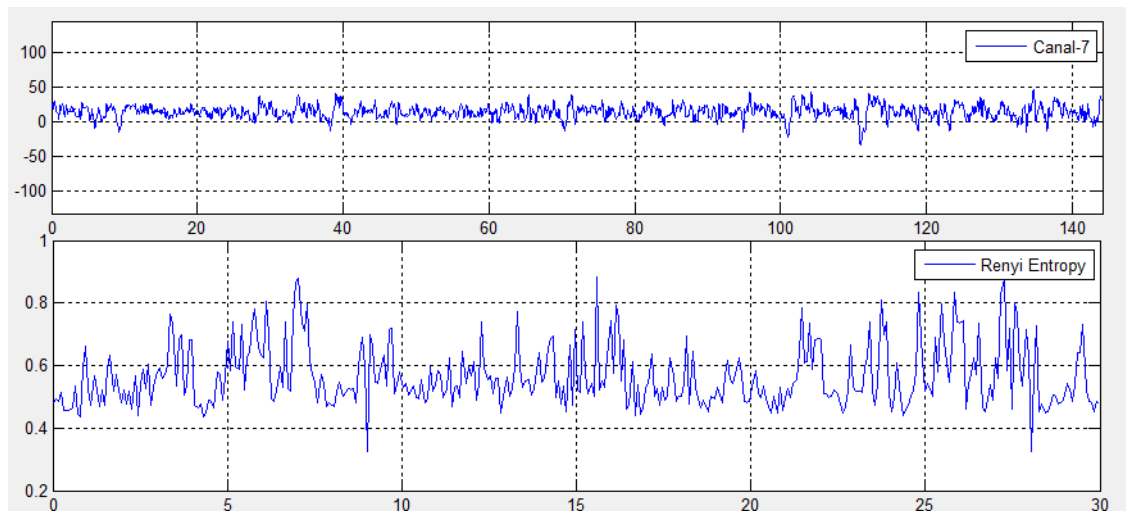


Figura 1. Paciente Bárbaro Sano, 18 años de edad. Canal 7

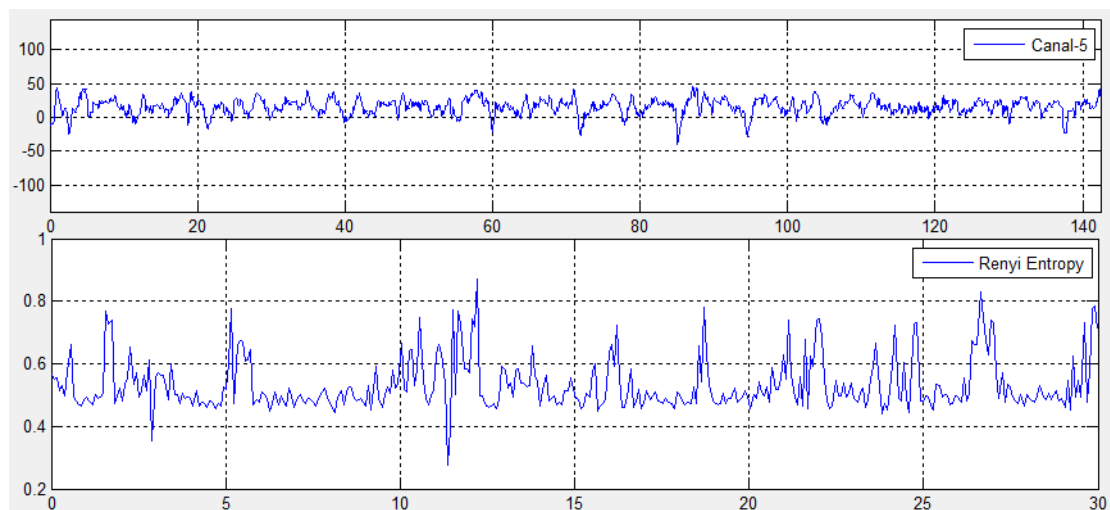


Figura 2. Paciente Dennis Sano, 42 años de edad. Canal 5

4. CONCLUSIONES

A través de esta investigación se dedujo que cuando la media de los valores de la RE se concentra por debajo de 0.5 se está en presencia de un paciente sano, mientras que si se concentra por encima de 0.5 se estaría en presencia de un paciente que padece alguna afección neuronal. Además, se concluyó que la utilización de una medida no lineal posibilita el estudio de la complejidad neuronal así como una comprensión precisa de los datos analizados. Las medidas no lineales estudiadas fueron programadas en Python 3.7, propiciando su tratamiento numérico y gráfico; de esta forma se facilitó la interpretación de dichas medidas por los especialistas clínicos, favoreciendo el proceso de diagnóstico precoz de las enfermedades neuronales y por lo tanto, la detección y la prevención de enfermedades neuronales.

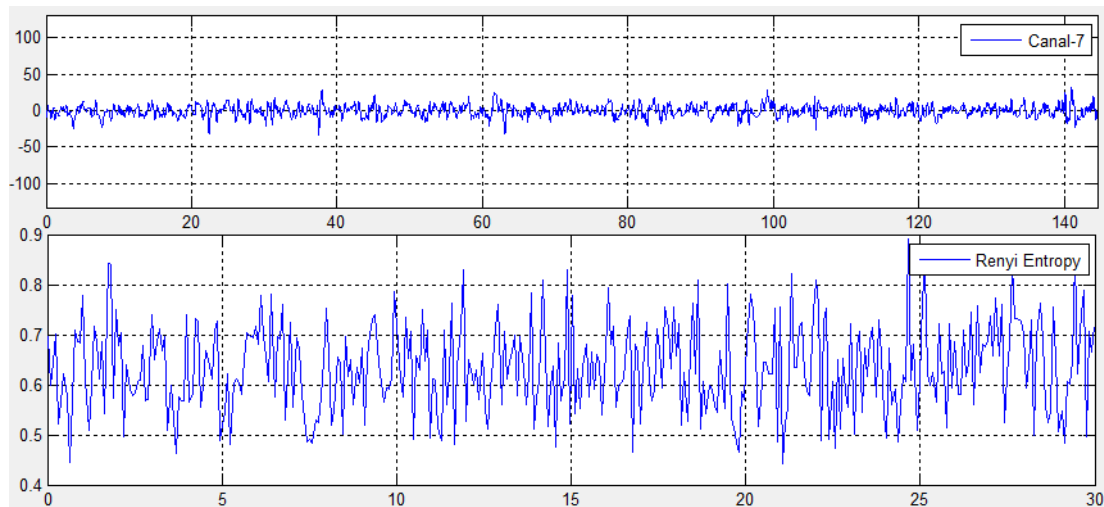


Figura 3. Paciente Rafael con Epilepsia, 24 años de edad. Canal 7

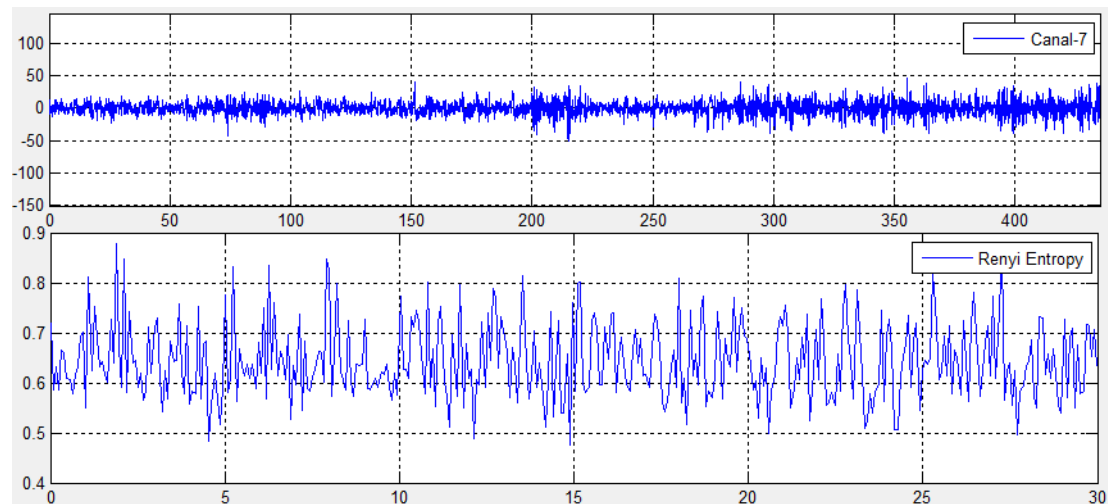


Figura 4. Paciente Alcides con Demencia, 61 años de edad. Canal 7

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a los árbitros por sus valiosas sugerencias y recomendaciones.

Referencias

- [1] ALAEI, H., KHALILZADEH, A. y GORJI, A., *Optimal selection of sop and sph using fuzzy inference system for on-line epileptic seizure prediction based on eeg phase synchronization*, Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine, Vol. 42, N° 4, pp. 1049–1068, 2019.
- [2] BHATTACHARYA, J., WATANABE, K. y WSHIMOJO, S., *Nonlinear dynamics of evoked neuro-magnetic responses signifies potential defensive mechanisms against photosensitivity*, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 14, N° 08, pp. 2701–2720, 2004.

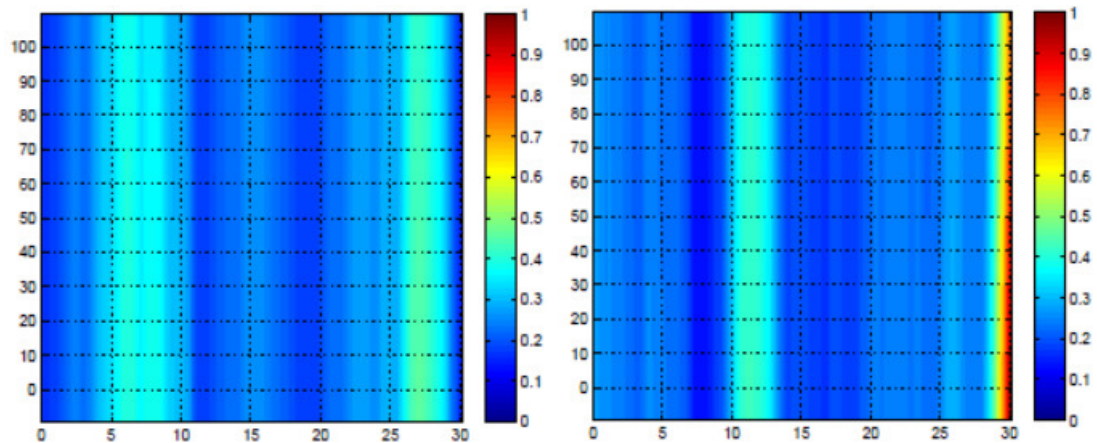


Figura 5. A la izquierda, Bárbaro Sano, 18 años, Canal 7 y a la derecha, Dennis Sano, 42 años, Canal 5

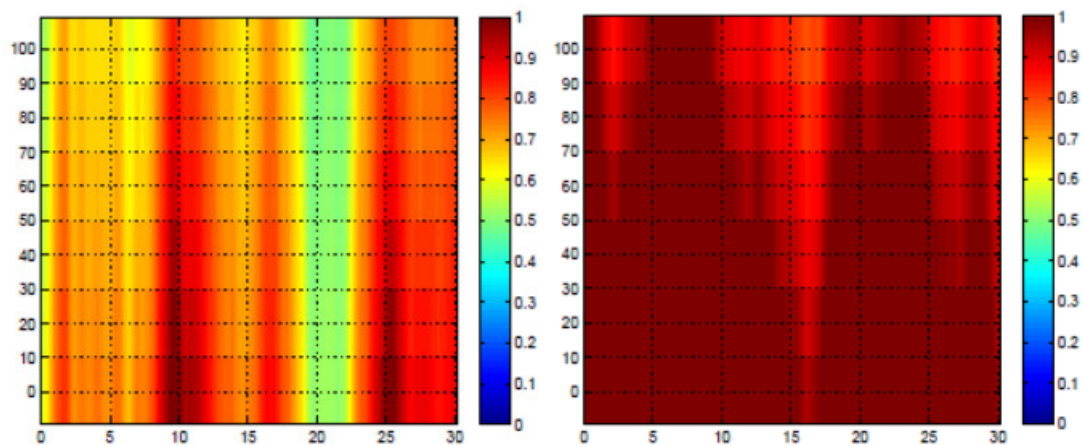


Figura 6. A la izquierda, Rafael Epilepsia, 24 años, Canal 7 y a la derecha, Arcides Demencia, 61 años, Canal 7

- [3] BOTELHO, T., SOPRANI, D., RODRIGUES, C., FERREIRA, A. y FRIZERA, A., *Nuevo enfoque para la clasificación de señales eeg usando la varianza de la diferencia entre las clases de un clasificador bayesiano*, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, Vol 14, N° 4, pp.362–371, 2017.
- [4] CARVALHO, R., *Transformada wavelet na detecção de patologias da laringe*, 2012.
- [5] GRASMAN, R., *Sensor array signal processing and the neuro-electromagnetic inverse problem in functional connectivity analysis of the brain*, Universiteit van Amsterdam [Host], 2004.
- [6] Mario GUARASCIO, M. y PUTHUSSERYPADY, S., *Automatic minimization of ocular artifacts from electroencephalogram: A novel approach by combining complete emd with adaptive noise and renyi's entropy*, Biomedical Signal Processing and Control, Vol. 36, pp. 63–75, 2017.
- [7] JURADO, M., *Aprendiendo de las consecuencias de los actos: estudio electrofisiológico del hipocampo, corteza prefrontal y núcleo accumbens*, 2012.
- [8] KOROVAICHUK, M., *Descomposición de potenciales de campo local en sus fuentes presinápticas y su aplicación al estudio de dinámica de redes neuronales en el hipocampo*, PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2013.

- [9] KRASKOV, A., *Synchronization and Interdependence Measures and their Applications to the Electroencephalogram of Epilepsy Patients and Clustering of Data*, PhD thesis, Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, 2004.
- [10] LENZI, E., Mendes, S. y DA SILVA, R., *Statistical mechanics based on Renyi entropy*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 280, N° 4, pp. 337–345, 2000.
- [11] MANISH, T., HIMANSHU, D., MANJUNATHA, M., RAY, A. y MALOKAR, M., *Multiple entropies performance measure for detection and localization of multi-channel epileptic eeg*, Biomedical Signal Processing and Control, Vol. 38, pp. 158–167, 2017.
- [12] USECHE, J., *Desarrollo de un sistema de adquisición de eeg, para estimulación y procesamiento de potenciales visuales evocados en estado estable sobre una plataforma móvil, con aplicación a juegos didácticos*, B.S. thesis, Uniandes, 2016.
- [13] VILLADA, H., *Monitoreo electroencefalográfico invasivo en epilepsia refractaria a tratamiento médico*, Índice de Autores, Las Epilepsias del lóbulo temporal, ISBN: 978-958-8483-13-9, Medellín-Colombia, pp. 135–151, 2011.

Sobre el/los autor/es:

Nombre: Marlene Leyva Martínez
Correo electrónico: mleyvm@udg.co.cu
Institución: Universidad de Granma.

Nombre: Luis Manuel Díaz Granado Bricuyet
Correo electrónico: ldiazb@udg.co.cu
Institución: Universidad de Granma.

Nombre: Aidara Carrazana Aguilar
Correo electrónico: acarrazanaaguilar@udg.co.cu
Institución: Universidad de Granma.