

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Análisis y Anotación de Señales Bioeléctricas de Pacientes con
Epilepsia Utilizando Técnicas de Aprendizaje Automático
Supervisado y No Supervisado**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Camila Lemus Lone,
estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

Resumen

Con este proyecto, se busca mejorar la herramienta de *software* para el estudio de la epilepsia desarrollada en fases anteriores dentro de la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo es incorporar el análisis de distintas señales bioeléctricas, características en el dominio de la frecuencia, y técnicas de aprendizaje automático no supervisado.

Para cumplir con el objetivo se utilizarán bases de datos disponibles en la red y datos no etiquetados de pacientes con epilepsia proporcionados por el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional, HUMANA. Se pretende hacer un procesamiento de dichas señales, posteriormente una segmentación de los datos para extraer características de interés y finalmente el entrenamiento de algoritmos de aprendizaje automático supervisado y no supervisado para identificar los segmentos de interés y hacer anotaciones relevantes. Se espera validar los resultados con médicos especialistas de HUMANA.

Antecedentes

La epilepsia es una de las afecciones cerebrales graves más comunes y afecta alrededor de 50 millones de personas en todo el mundo [1]. En los últimos años ha aumentado la disponibilidad de aplicaciones clínicas y experimentales de métodos de aprendizaje automático (*machine learning*) para la epilepsia y otros trastornos neurológicos y psiquiátricos. Mundialmente, se han realizado algunas aplicaciones de aprendizaje automático para la epilepsia, entre las cuales se encuentran, el análisis de neuroimágenes [2], la detección automatizada de convulsiones a partir de electroencefalografía (EEG), videos y datos cinéticos, predicción de la respuesta a la medicación, predicción de los resultados médicos y quirúrgicos, entre otras [3].

En Guatemala se encuentra el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional, HUMANA, que es una organización formada por profesionales en Neurociencias que trabajan con pacientes que padecen problemas Neurológicos de difícil control tales como la epilepsia [4]. HUMANA cuenta con el único laboratorio de Video Electro Encefalograma en Guatemala, el cuál permite obtener señales electroencefalográficas (EEG) de pacientes con posibles episodios epilépticos. En una entrevista realizada en 2020 al Dr. Juan Carlos Lara, director de HUMANA, se informó que las anotaciones de las señales EEG se realizan manualmente por profesionales especializados del hospital, lo que implica una gran cantidad de horas de trabajo para resaltar los segmentos de interés y finalmente dar el diagnóstico. El tiempo de esta operación generalmente puede ir desde cuatro horas hasta incluso algunos días, dependiendo de la duración del registro.

En la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) se realizó en 2020 la primera iteración de una herramienta software de aprendizaje automático, presentada en el trabajo de graduación titulado *Análisis y Reconocimiento de Patrones de Señales Biomédicas de Pacientes con Epilepsia*, por María Jesús Angulo Tijerino [5]. En este trabajo, se encontró que es posible la detección de crisis epilépticas en señales EEG mediante aprendizaje automático, al realizar la correcta caracterización y división de segmentos. Paralelo a esto, se creó e implementó una base de datos con señales biomédicas de pacientes de HUMANA, presentada en el trabajo de graduación de María Fernanda Pineda Esmieu, llamado *Diseño e Implementación de una*

Base de Datos de Señales Biomédicas de Pacientes con Epilepsia [6]. La base de datos se enlazó con el sistema de aprendizaje automático mencionado anteriormente, y se comprobó que las características del dominio del tiempo utilizadas en el análisis directo son suficientes para generar una exactitud 95 % .

En 2021, David Alejandro Vela Aguilera presentó la segunda iteración de la herramienta de aprendizaje automático en su trabajo de graduación nombrado *Automatización del Proceso de Anotación de Señales EEG de Pacientes con Epilepsia por Medio de Técnicas de Aprendizaje Automático* [7]. Se realizó ajustes a la interfaz realizada en la fase anterior, la cual fue capaz de emplear algoritmos de aprendizaje automático supervisado para clasificar la señal EEG en una de cuatro clases, obteniendo un promedio de exactitud del 96.7 % en el clasificador con mejor desempeño en tiempo continuo. Se utilizó vectores de soporte con características en tiempo continuo y kernel gaussiano. Adicional a esto, se agregó una nueva sección a la herramienta iniciada en 2020, la cual se encarga de la generación de anotaciones dentro de un apartado con varias opciones de personalización para la visualización. Cabe resaltar que tanto en la fase de 2020, como en la de 2021, se trabajó, principalmente, con señales EEG en dominio del tiempo, dejando oportunidad para analizar las señales en otro dominio (como el de la frecuencia), y de analizar otro tipo de señales bioeléctricas. Una de las limitaciones que se tuvo en este trabajo, es que principalmente se utilizó técnicas de aprendizaje supervisado, lo que abre espacio para profundizar el análisis de los datos con diferentes técnicas de aprendizaje automático.

En 2022, el trabajo de graduación de Jorge Diego Manrique Sáenz, llamado *Herramienta de Software con una Base de Datos Integrada para el Estudio de la Epilepsia - Fase II* [8], buscó principalmente expandir el modelo relacional de la base de datos para poder almacenar características y clasificadores para el análisis automático de señales EEG. También se adaptó la herramienta para almacenar información confidencial de forma segura y se buscó reducir tiempos en los procesos internos.

Justificación

La epilepsia es uno de los trastornos neurológicos más frecuentes. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) cerca del 80 % de las personas con epilepsia viven en países de ingresos bajos y medianos. Se estima que el 70 % de las personas con epilepsia podría vivir sin convulsiones si se diagnosticaran y trataran adecuadamente [1]. En los últimos años ha aumentado la disponibilidad de aplicaciones clínicas y experimentales de métodos de aprendizaje automático para la epilepsia. No obstante, Guatemala no cuenta con acceso a estas herramientas. Esto implica un gran costo de oportunidad tanto para los doctores como para los pacientes, ya que el análisis de señales consume mucho tiempo y esto atrasa el diagnóstico.

En la UVG se han desarrollado dos fases de una herramienta de *software* para el análisis de señales EEG de pacientes con epilepsia, donde se logró clasificar y realizar anotaciones de estas señales. Sin embargo, la herramienta está limitada para el análisis de un solo tipo de señal bioeléctrica (EEG) y únicamente en el dominio del tiempo. Es importante resaltar que para las fases anteriores se utilizó principalmente algoritmos de aprendizaje automático supervisado. Por tanto, el campo aún está abierto para explorar e incorporar otro tipo de

técnicas de aprendizaje automático.

Con este trabajo se busca ampliar el alcance de esta herramienta para reducir el tiempo empleado por los especialistas al analizar las señales de epilepsia en dominio de la frecuencia. También se pretende evaluar técnicas de aprendizaje automático no supervisado e incorporarlas a la herramienta. Finalmente se busca generar anotaciones automáticas según la clasificación de las señales y validar los resultados con especialistas.

Objetivos

Objetivo General

Mejorar la herramienta de software para el estudio de la epilepsia desarrollada en fases anteriores, incorporando el análisis de distintas señales bioeléctricas, características en el dominio de la frecuencia, y técnicas de aprendizaje automático no supervisado.

Objetivos Específicos

- Evaluar señales bioeléctricas, adicionales a las electroencefalográficas, que sean relevantes en el estudio de la epilepsia, y adaptar la herramienta de software para el análisis de dichas señales.
- Explorar características en el dominio de la frecuencia de las señales bioeléctricas, y evaluar el rendimiento de los algoritmos desarrollados anteriormente usando dichas características.
- Evaluar algoritmos de aprendizaje no supervisado e incorporarlos a la herramienta de software.
- Generar anotaciones relevantes automáticamente y validar los resultados con especialistas de HUMANA.

Marco teórico

Epilepsia

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la epilepsia se define como “una enfermedad cerebral crónica no transmisible que se caracteriza por convulsiones recurrentes, que son episodios breves de movimiento involuntario que pueden involucrar una parte del cuerpo (parcial) o todo el cuerpo (generalizado), y que en ocasiones se acompañan de pérdida de consciencia y control de la función intestinal o vesical”. Este tipo de convulsiones (crisis epilépticas) pueden originarse por diversas causas, que pueden ser estructurales, genéticas, infecciosas, metabólicas, inmunológicas. No obstante, en aproximadamente el 50 % de los casos, las causas son desconocidas [1].

Es importante resaltar que no todas las personas que tienen convulsiones, padecen de epilepsia. Una persona puede tener convulsiones debido a causas físicas, por ejemplo enfermedades médicas agudas o traumas que comienza antes de la convulsión o bien pueden relacionarse con alguna sustancia o evento al que su cuerpo responde. En estos casos, las convulsiones se denominan “provocadas” y no se diagnostican como epilepsia. La epilepsia se define por dos o más convulsiones no provocadas [9].

Características

Las características de las convulsiones varían y dependen de en qué parte del cerebro comienza la alteración y cómo se propaga [1]. Para describir los tipos de crisis epilépticas de una persona, los médicos y otros profesionales de la salud a menudo utilizan un grupo de características que generalmente ocurren juntas, llamadas síndromes [9]. Estas características pueden incluir problemas que el paciente presente (síntomas) y resultados que la persona médica encuentre mediante exámenes y pruebas de laboratorio (signos). Entre el conjunto de características que definen a la mayoría de síndromes de epilepsia se encuentran:

- El tipo y la causa de las convulsiones.
- La edad del paciente cuando las convulsiones comienzan.
- La parte del cerebro involucrada.
- Información genética del paciente.
- Patrones específicos encontrados en el electroencefalograma (EEG) durante y entre convulsiones.
- Hallazgos encontrados en imágenes cerebrales, por ejemplo, imágenes por resonancia magnética (MRI) o tomografías computarizadas (CT).
- Las perspectivas de recuperación o empeoramiento.

Cabe mencionar que la epilepsia es un trastorno del espectro, por lo que hay muchos tipos diferentes de convulsiones y de síndromes de epilepsia. Es importante tener conocimiento de que no necesariamente, todas las características mencionadas, describen a todos los síndromes de epilepsia [9].

Tipos de Crisis Epilépticas

Es de enorme importancia saber distinguir y clasificar los distintos tipos de crisis y encuadrarlos dentro de alguno de los síndromes epilépticos conocidos, ya que, de ello dependerá un pronóstico acertado y el éxito del tratamiento [10].

La Liga Internacional contra la Epilepsia (ILAE) presenta una clasificación operacional revisada de los tipos de crisis epilépticas. Las principales categorías son: las crisis generalizadas, las crisis focales que también se conocen como crisis parciales y las de inicio desconocido.

Entre las subcategorías de estos tipos de crisis se encuentran las motoras y no motoras, y específicamente para las crisis focales, está la subcategoría de sin y con alteración del nivel de conciencia [11].

El que se produzcan un tipo u otro de crisis depende del grupo de neuronas que se activen. Durante las crisis generalizadas hay una activación conjunta de todas las neuronas de la superficie cerebral, mientras que durante las crisis focales solo producen descargas anómalas las neuronas de una zona limitada de la superficie cerebral [12]. Adicional a estos tipos, existen las crisis de inicio desconocido.

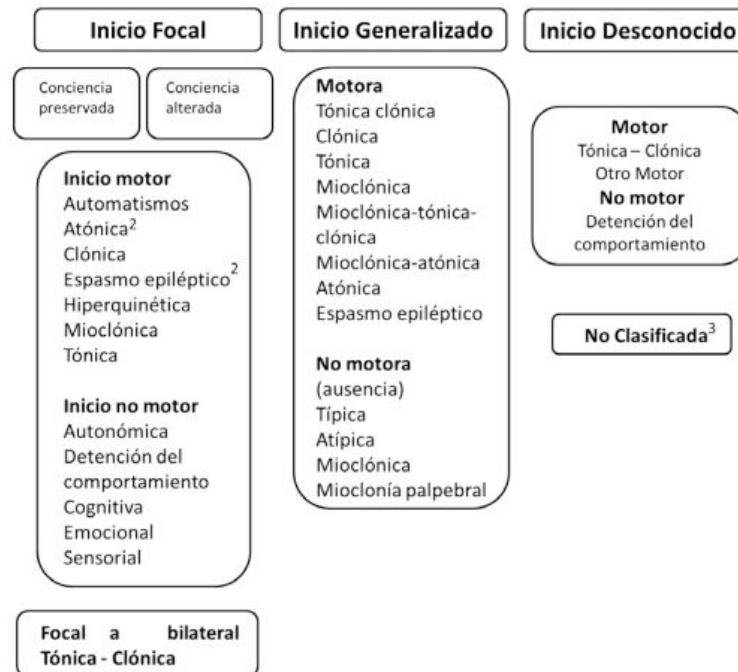


Figura 1: Clasificación Operacional de los Tipos de Crisis, Versión Extendida ILAE 2017 [11].

Tratamiento

Existen diferentes tipos de tratamientos para controlar la epilepsia. El más común es la medicación, en donde los doctores especialistas suelen recetar drogas antiepilépticas (AEDs) que funcionan cambiando el nivel de químicos en el cerebro para controlar y detener los ataques epilépticos [13]. El medicamento es prescrito según el tipo de convulsión, historial médico y edad de la persona. Si el medicamento no funciona, los especialistas pueden recetar combinación de diferentes AEDs. Cabe mencionar, que algunos medicamentos funcionan solo para un tipo de convulsión específica, mientras que otros pueden controlar varios tipos de convulsiones. Entre las AEDs mas comunes se encuentran:

- Valproato de sodio
- Carbamazepina
- Lamotrigina

- Levetiracetam
- Topiramato

La mayoría de las personas que tienen epilepsia responden bien a esta forma de tratamiento, no obstante, algunas personas son resistentes a las AEDs. Lo que significa que su epilepsia no se puede controlar usando las medicaciones prescritas. Entre el 33 % de los adultos y el 20-25 % de los niños con epilepsia no responden a la primera línea de tratamiento, por lo que se deben considerar opciones alternativas [13]. Entre ellas se encuentran:

- Cirugía: Esta opción generalmente funciona mejor para las personas que tienen convulsiones que se originan en una parte específica del cerebro. Se trata de eliminar de forma segura el punto focal, o la parte del cerebro donde comienzan las convulsiones.
- Cambios de Dieta: Algunas dietas pueden ayudar a controlar las convulsiones. Las dietas recomendadas incluyen la dieta Atkins modificada, la dieta cetogénica y la dieta de bajo índice glucémico. Estas dietas deben llevarse a cabo con el apoyo de un especialista.
- Estimulación del Nervio Vago (VNS): Esta terapia trata a las personas con convulsiones focales. Funciona enviando pulsos eléctricos a través del nervio vago que conduce al cerebro.

Señales Bioeléctricas

El análisis de las señales bioeléctricas en el cuerpo humano es de gran importancia para el diagnóstico médico, el monitoreo de signos vitales durante ciertas actividades físicas, en aplicaciones biónicas, entre otras. Estas señales proporcionan información del funcionamiento de los órganos del cuerpo humano, que interpretadas por un especialista se convierten en una poderosa fuente de información del estado de salud de un individuo. Estas señales deben captarse por medios no invasivos para no provocar molestias o daños, así como para simplificar el proceso de adquisición, lo cual se refleja en sistemas más simples y económicos y por lo tanto accesibles a un mayor número de personas [14]. Entre las señales bioeléctricas se encuentran:

Electroencefalograma (EEG)

El electroencefalograma (EEG) es el registro de la actividad eléctrica del cerebro, obtenida a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. Las señales EEG son empleadas en el estudio de varias enfermedades, pero generan volúmenes de datos que dificultan su procesamiento. El electroencefalograma es particularmente útil para el diagnóstico de la epilepsia, ya que permite detectar el momento en que aparece la anomalía así como su localización, la extensión de la alteración, es decir, si es focal, multifocal, regional o bilateral, su reactividad a estímulos sensoriales (como la luz) y la respuesta a fármacos. Asimismo, se

pueden apreciar lentificaciones o aceleraciones de los ritmos cerebrales, y si éstas son pasajeras o permanentes. De igual manera, la morfología que adquieren estos ritmos es útil para identificar el tipo de epilepsia [15].

Los patrones más frecuentes en las señales EEG para describir la actividad cerebral son los ritmos. Estos ritmos cerebrales cambian con la edad, con el estado de sueño o vigilia y con la presencia de patología [16]. Como se puede ver en la Figura 2, los ritmos cerebrales se pueden dividir según su rango de frecuencia y amplitud relativa en:

- Ondas Delta: (0.5–3 Hz)
- Ondas Theta: (4–7 Hz)
- Ondas Alpha: (8–12 Hz)
- Ondas Beta: (13–30 Hz)
- Ondas Gamma: (30–120 Hz)

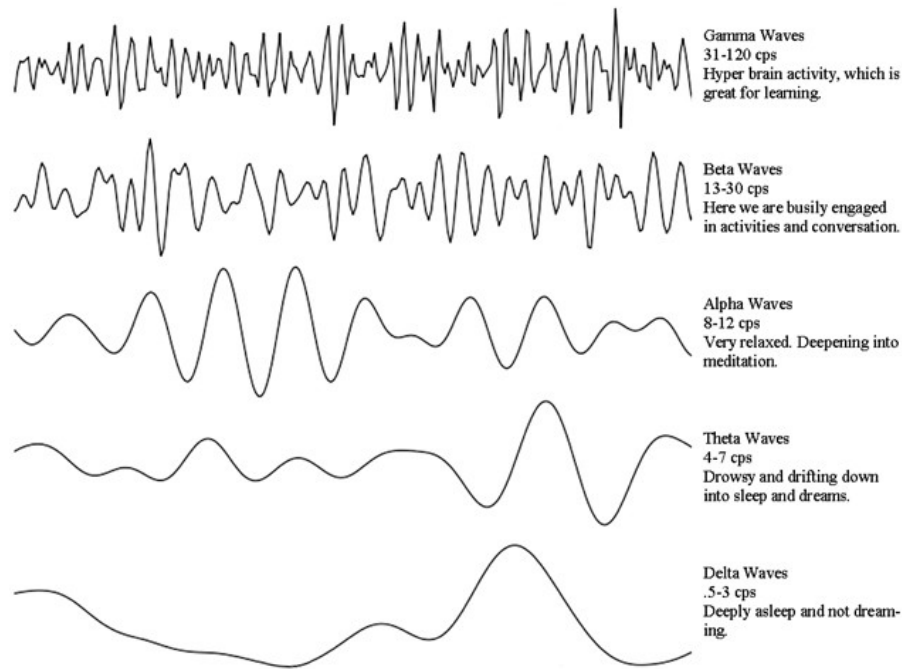


Figura 2: Ondas cerebrales [17].

Electrocardiograma (ECG)

El electrocardiograma o ECG, consiste en la captación de las señales eléctricas originadas por la actividad de biopotenciales en el corazón. La señal captada presenta características diferentes en función del ángulo en que se coloquen los electrodos sobre el cuerpo [18]. Además es útil para detectar problemas cardiacos, como defectos del miocardio, agrandamiento del

corazón, defectos congénitos, enfermedades de válvula cardíaca, arritmias, taquicardia o bradicardia, enfermedades de la arteria coronaria, cambios en la cantidad de electrolitos, etc. [19].

El instrumento que se utiliza para adquirir la señal cardíaca se denomina electrocardiógrafo. Los electrocardiógrafos comerciales normalmente adquieren una derivación a la vez. La presentación gráfica del ECG se realiza en una tira de papel con formato cuadriculado estándar, en la mayoría de los casos trazada con una velocidad de 25 milímetros por segundo (mm/s) y con una resolución de amplitud de 10 milímetros por milivoltios (mm/mV) [18].

Electromiograma (EMG)

La electromiografía es un procedimiento de diagnóstico utilizado para evaluar la salud de los músculos y las células nerviosas que los controlan, mejor conocidas como neuronas motoras. Los resultados de la electromiografía pueden revelar una disfunción nerviosa, una disfunción muscular o problemas con la transmisión de señales de nervios a músculos.

En la electromiografía se utilizan electrodos para traducir las señales eléctricas que las neuronas motoras transmiten para contraer los músculos, en gráficos, sonidos o valores numéricos que después interpreta un especialista. [19].

Aprendizaje Automático (Machine Learning)

El aprendizaje automático (*machine learning*) es una rama de la inteligencia artificial que, mediante principios estadísticos e informáticos, permite que las máquinas aprendan por si mismas a realizar una tarea, sin la necesidad de instrucciones explícitas para resolverla. Con el aprendizaje automático, las máquinas desarrollan algoritmos capaces de hacer ajustes y mejorar su rendimiento a través de la inferencia de datos, identificación e interpretación de patrones [3]. Hay más de una manera en que podemos hacer de esta idea una realidad, pero principalmente se reconocen en tres categorías. Estas categorías son aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje por refuerzo.

Aprendizaje Supervisado

El aprendizaje automático más conocido es el aprendizaje automático supervisado. En este tipo de aprendizaje, se alimenta al algoritmo con iteraciones de datos, lo que permite que los ordenadores interpreten la tarea deseada sin necesidad de programar la tarea de manera explícita. Existen dos tipos principales de aprendizaje supervisado: clasificación y regresión. La clasificación es el lugar donde se entrena a un algoritmo para clasificar los datos de entrada en variables discretas. Durante el entrenamiento, los algoritmos reciben datos de entrada con una etiqueta de clasificación [20].

La regresión es un método de aprendizaje supervisado en el que se entrena a un algoritmo para predecir una salida a partir de un rango continuo de valores posibles. En la regresión, un algoritmo necesita identificar una relación funcional entre los parámetros de entrada y

salida. A diferencia de la clasificación, el valor de salida no es discreto, sino que es una función de los parámetros de entrada. La exactitud de un algoritmo de regresión se calcula en función de la desviación entre la salida precisa y la salida prevista [20].

Aprendizaje No Supervisado

Los algoritmos de aprendizaje no supervisado deducen patrones de conjuntos de datos sin tener como referencia resultados previamente etiquetados o conocidos. A diferencia del aprendizaje supervisado, este método no se puede aplicar directamente a un problema de clasificación o regresión de datos, ya que no se tiene conocimiento de cuáles pueden ser los valores de salida. Esto hace que sea imposible entrenar al algoritmo de la forma usual. El aprendizaje no supervisado se utiliza para descubrir la estructura subyacente de los datos [21].

Como los datos que se introducen en los algoritmos de aprendizaje no supervisados no están etiquetados, el algoritmo intenta dar sentido a los datos por sí mismos, mediante la búsqueda de características y patrones. Este método de aprendizaje automático utiliza el agrupamiento, los componentes principales, las redes neuronales y las máquinas de vectores de soporte [20].

- **Agrupación:** Se trata principalmente de encontrar una estructura o patrón en una colección de datos no categorizados. Los algoritmos de agrupamiento o clústeres, como se le conoce en inglés, procesarán los datos y encontrarán grupos o clústeres naturales si existen en los datos. También se puede modificar cuántos grupos deben identificar sus algoritmos. Permite ajustar la granularidad de estos grupos.
- **Asociación:** Esta técnica no supervisada trata de descubrir relaciones interesantes entre variables en grandes bases de datos.

Aprendizaje por Refuerzo

El aprendizaje por refuerzo es un modelo de aprendizaje conductual. Se trata de una forma de optimización basada en datos, en donde la máquina aprende de su propia experiencia, interactuando con el entorno. En el aprendizaje por refuerzo, el algoritmo recibe retroalimentación del análisis de datos, conduciendo al usuario hacia el resultado óptimo. El aprendizaje por refuerzo difiere de otros tipos de aprendizaje supervisado, porque el sistema no está entrenado con el conjunto de datos de ejemplo. Más bien, el sistema aprende a través de la prueba y el error. [21].

Metodología

Obtención de las señales bioeléctricas

Para iniciar con el proyecto, se debe obtener las señales en crudo de alguna fuente. Al igual que en las fases anteriores del proyecto, se utilizará principalmente la base de datos

de *American Epilepsy Society Seizure Prediction Challenge*, ya que cuenta con registros de electroencefalogramas intracraneales (iEEG) que cumplen con anotaciones de interés. Adicional a esto, se utilizarán algunos datos no etiquetados, proporcionados por HUMANA para hacer las validaciones correspondientes. Estos últimos serán útiles especialmente en la sección de validación de anotaciones y en la parte de aprendizaje no supervisado.

Transformación del formato de la señal

La herramienta de software sobre la cual se estará trabajando, se desarrolló en el software Matlab. Por lo cual, es importante que los datos que se vayan a utilizar, estén en un formato aceptable para el programa (.mat). Esto implica que, de ser necesario, se debe transformar el formato de donde se extraigan las señales. Finalmente se deben importar los datos al *software*, pero para ello, se debe verificar que los datos estén convertidos en matrices o vectores, ya que de no ser así, no será posible utilizar las herramientas de redes neuronales en Matlab.

Procesamiento de señales

Para tener buenos resultados al momento de analizar las señales, es necesario filtrarlas. Para ello se explorarán diferentes filtros que ayuden a eliminar el ruido de artefacto y otras posibles interferencias. Se tomará como guía [22] y [23]. De ser posible, se validarán los resultados utilizando las mismas referencias.

Segmentación de datos

Generalmente las muestras de señales bioeléctricas duran varias horas, lo que implica una alta carga computacional al analizar los datos. Con el fin de optimizar estos procesos, se emplearán técnicas de inventanado para dividir las señales en n muestras.

Extracción y selección de características

Se investigarán características que se han usado en la literatura, y se evaluará el rendimiento de dichas características para determinar las más adecuadas. En este proyecto, las características se obtendrán principalmente de métodos en el dominio de la frecuencia.

Implementación de algoritmos de aprendizaje automático

- Aprendizaje Supervisado: Se evaluarán distintas opciones para caracterizar, entre ellos redes neuronales y la máquina de vectores de soporte (SVM).
- Aprendizaje No Supervisado: Se pretende encontrar grupos similares en el conjunto de datos evaluando algoritmos de agrupación en clústeres. Por ejemplo jerárquicos, k-medias, modelos de mezcla gaussiana entre otros encontrados en la literatura.

Validación de resultados con HUMANA

La idea principal del trabajo, es que la herramienta de *software* les sirva a los especialistas de HUMANA para optimizar su tiempo y recursos en el análisis de señales de epilepsia. Es por ello que se espera tener reuniones con los especialistas, para corroborar los resultados constantemente y obtener la retroalimentación respectiva.

Cronograma de actividades

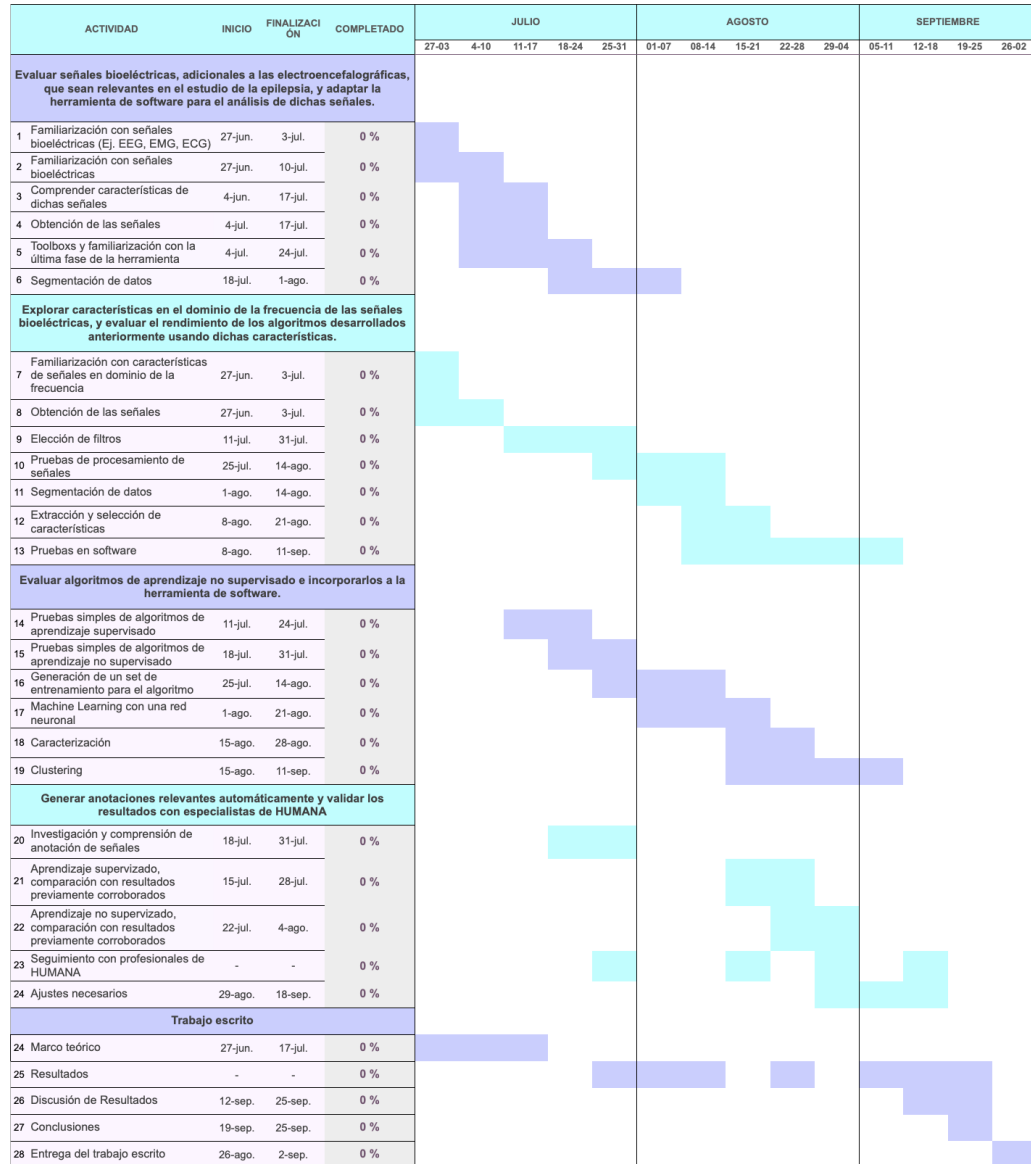


Figura 3: Cronograma de trabajo

Índice preliminar

Índice

Prefacio	i
Lista de Figuras	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
1. Introducción	3
2. Antecedentes	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo General	7
4.2. Objetivos Específicos	8
5. Alcance	11
6. Marco Teórico	9
6.1. Epilepsia	10
6.1.1. Características	11
6.1.1. Tipos de Crisis Epilépticas	12
6.1.1. Diagnóstico	13
6.1.1. Tratamiento	14
6.2. Señales Bioeléctricas	15
6.2.1. Electroencefalograma (EEG)	16
6.2.1. Electrocardiograma (ECG)	17
6.2.1. Electromiograma (EMG)	18
6.2. Características de las Señales	19
6.2.1. Dominio del Tiempo	20
6.2.1. Dominio de la Frecuencia	21
6.3. Aprendizaje Automático (Machine Learning)	22
6.3.1. Aprendizaje Supervisado	23
6.3.2. Aprendizaje No Supervisado	24
7. Diseño Experimental	25
7.1. Obtención de las señales	25
7.2. Segmentación de las señales	26
7.3. Procesamiento de señales	27
7.3. Extracción y Selección de Características	28
7.3. Implementación de Algoritmos de Aprendizaje Automático	29
7.3. Validación de Resultados con HUMANA	30
8. Resultados	31
8.1. Señales en Dominio de la Frecuencia	31
8.2. Aprendizaje Automático Supervisado	32
8.3. Aprendizaje Automático No Supervisado	33
9. Conclusiones	34
10.Recomendaciones	35
11.Referencias	36
12.Glosario	37

Referencias

- [1] O. Organización Mundial de la Salud, *Epilepsia*, Último acceso 30 Abril 2022, 2022. dirección: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/epilepsy>.
- [2] D. Sone e I. Beheshti, "Clinical Application of Machine Learning Models for Brain Imaging in Epilepsy: A Review," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 15, 2021.
- [3] B. Abbasi y D. M. Goldenholz, "Machine learning applications in epilepsy," *Epilepsia*, vol. 60, n.º 10, págs. 2037-2047, 2019.
- [4] H. Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional, *HUMANA*, Último acceso 25 Abril 2022, 2022. dirección: <https://humanagt.org/>.
- [5] M. J. A. Tijerino, "Análisis y Reconocimiento de Patrones de Señales Biomédicas de Pacientes con Epilepsia," Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2020.
- [6] M. F. P. Esmieu, "Diseño e Implementación de una Base de Datos de Señales Biomédicas de Pacientes con Epilepsia," Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2020.
- [7] D. A. V. Aguilera, "Automatización del Proceso de Anotación de Señales EEG de Pacientes con Epilepsia por Medio de Técnicas de Aprendizaje Automático," Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2021.
- [8] J. D. M. Sáenz, "Herramienta de Software con una Base de Datos Integrada para el Estudio de la Epilepsia - Fase II," Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2022.
- [9] E. C. Foundation, *Epilepsy*, Último acceso 08 Mayo 2022, 2022. dirección: <https://www.epilepsy.com/what-is-epilepsy>.
- [10] C. V. Torres, "Epilepsia," *Medicine - Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, vol. 11, n.º 73, págs. 4364-4373, 2015.
- [11] R. S, "Clasificación operacional de los tipos de crisis por la Liga Internacional contra la Epilepsia: Documento - Posición de la Comisión para Clasificación y Terminología de la ILAE," *Epilepsia*, vol. 58, n.º 4, págs. 522-530, 2017.
- [12] A. A. de Epilepsia, *Diferentes tipos de crisis epilépticas*, Último acceso 09 Mayo 2022, 2022. dirección: <https://www.apicepilepsia.org/que-es-la-epilepsia/diferentes-tipos-de-crisis-epilepticas/>.
- [13] N. H. Service, *Treatment - Epilepsy*, Último acceso 08 Mayo 2022, 2020. dirección: <https://www.nhs.uk/conditions/epilepsy/treatment/>.
- [14] J. Varela-Benítez, "Electrodo capacitivo de alta sensibilidad para la detección de biopotenciales eléctricos," *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, vol. 2, n.º 36, págs. 14-23, 2015.
- [15] S. Brailowsky, *Epilepsia*, 1.^a ed. Fondo de Cultura Económica, 2014.
- [16] C. Bazán, M. Blanco, J. Cárdenas y F. Cruz, "Compresión de señales electroencefalográficas epilépticas y normales," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 33, n.º 1, págs. 25-32, 2012.
- [17] N. Centro de Rehabilitación Neurológica, *¿Para qué es útil el Mapeo Cerebral?* Último acceso 15 Mayo 2022, 2018. dirección: <http://nepsa.es/para-que-es-util-el-mapeo-cerebral/>.

- [18] N. Dugarte, “Técnicas de procesamiento de la señal ECGAR aplicadas en el prototipo DIGICARDIAC,” *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, vol. 46, n.º 1-2, 2015.
- [19] L. A. Osorio, “Acondicionamiento de Señales Bioeléctricas,” Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [20] TIBCO, *¿Qué es el aprendizaje supervisado?* Último acceso 08 Mayo 2022, 2022. dirección: <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-supervised-learning#:~:text=E1%5C%20aprendizaje%5C%20supervisado%5C%20es%5C%20una,de%5C%20manera%5C%20expl%5C%C3%5C%ADcita%5C%20d%5C%C3%5C%B3nde%5C%20buscar.>
- [21] L. Gonzalez, *Aprendizaje no Supervisado*, Último acceso 08 May 2022, 2020. dirección: <https://aprendeia.com/aprendizaje-no-supervisado-machine-learning/>.
- [22] J. González Murillo, *Filtrado Básico de Señales Biomédicas*, mayo de 2014. DOI: 10.13140/2.1.1757.2168.
- [23] J. y. B. Esqueda Chavez, “Análisis de señales electroencefalográficas de personas desarrollando actividades de dibujo,” *Revista de Tecnología e Innovación*, vol. 4, n.º 11, págs. 14-23, 2017.