
Aplicación de técnicas de aprendizaje automático
y reconocimiento de patrones a señales bioeléctricas
para el estudio del impacto de los pulsos binaurales
en el estado de ánimo, concentración y calidad
del sueño de las personas

Oscar Alexander Fuentes López



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Aplicación de técnicas de aprendizaje automático y reconocimiento de patrones a señales bioeléctricas para el estudio del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas

Trabajo de graduación presentado por Oscar Alexander Fuentes López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Aplicación de técnicas de aprendizaje automático y reconocimiento de patrones a señales bioeléctricas para el estudio del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas

Trabajo de graduación presentado por Oscar Alexander Fuentes López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

Vo.Bo.:

(f) 

Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

Tribunal Examinador:

(f) 

Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

(f) 

M. Sc. Andrés Monterroso

(f) 

Ing. Diego Morales

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de enero de 2024

Este trabajo es la continuación de una investigación que se ha estado desarrollando durante varias generaciones. Esta nació con la idea de poder ayudar en el rendimiento general de los atletas de Guatemala, apoyando sobre todo en el descanso por medio de estímulos no invasivos. Con el fin de poder ayudar a más personas sin diferenciar el ámbito en el que se desenvuelven, esta investigación explora el efecto producido por estos estímulos bajo diferentes escenarios adicionales, tales como la concentración y diversos estados de ánimo.

Estas investigaciones brinda la exploración de una solución para diversos problemas como podrían ser el insomnio, el estrés, la ansiedad, entre otros, de forma que no se recurra al consumo de fármacos que puedan desarrollar reacciones adversas. Aunque este trabajo se encuentra en fases exploratorias, puede impulsar el desarrollo de un producto que presente dicha solución.

Durante el desarrollo de esta investigación apliqué tanto conocimientos nuevos como adquiridos durante mis cinco años de carrera, lo cual no lo hubiera podido realizar sin el apoyo de muchas personas. En primer lugar le agradezco profundamente a Dios, que me ha estado acompañando y guiando durante todo el trayecto de mi vida. Agradezco a mis padres Rony Fuentes y Vilma López, por brindarme su apoyo y cariño incondicional, y todas las herramientas necesarias para poder desempeñarme en mis años de estudio. También a mi hermana Joselinne Fuentes, que siempre ha confiado en mí y me ha dado su eterno apoyo.

Mis agradecimientos a todas aquellas familias que me acogieron como un miembro más dentro del hogar. En especial a las familias Motta Pérez y Orozco Velásquez que me han brindado su apoyo en estos últimos años.

Un profundo agradecimiento a todos mis amigos que me han ayudado y acompañado durante estos últimos años, y a todos aquellos que me brindaron una mano cuando la situación lo ameritó. También agradezco a todas las personas que participaron en esta investigación, de las cuales dedicaron tiempo, comprensión y paciencia para llevar a cabo las diferentes actividades. En mención especial agradezco al Dr. Luis Alberto Rivera por su guía, su paciencia y su pasión por la enseñanza.

Prefacio	III
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	X
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	8
4. Objetivos	10
4.1. Objetivo general	10
4.2. Objetivos específicos	10
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Electroencefalograma (EEG)	13
6.2. Ondas cerebrales	14
6.3. Observación de estados de ánimo en EEG	14
6.4. Bioelectricidad	14
6.5. Medición de señales bioeléctricas	15
6.6. BIOPAC MP41	15
6.7. Electro-Cap y Cyton Board de OpenBCI	16
6.8. Electrodo	17
6.9. Electro gel	17
6.10. Sueño	17
6.10.1. Despierto	18

6.10.2. N1 (Etapa 1 NREM) - Sueño ligero	18
6.10.3. N2 (Etapa 2 NREM) - Sueño profundo	18
6.10.4. N3 (Etapa 3 NREM) - El sueño más profundo	18
6.10.5. REM	19
6.11. Aprendizaje de máquina o aprendizaje automático	19
6.11.1. Aprendizaje supervisado	19
6.11.2. Aprendizaje no supervisado	19
6.11.3. Aprendizaje semi-supervisado	20
6.11.4. Aprendizaje reforzado	20
6.12. Bosque aleatorio (<i>Random Forest</i>)	20
6.13. Máquina de soporte de vectores (<i>Support Vector Machine - SVM</i>)	20
6.14. Parámetros espectrales	21
6.14.1. Potencia en bandas de frecuencia	21
6.14.2. Frecuencia máxima	21
6.14.3. Descriptores de Hjorth	21
6.14.4. Índice de pureza espectral (SPI)	21
6.15. Pulsos binaurales	22
7. Pruebas preliminares para la recolección de señales EEG	23
7.1. Recolección de datos mediante BIOPAC-MP41	24
7.1.1. Conexión con lenguajes de programación	24
7.1.2. Inconvenientes con el uso del equipo en investigaciones	24
7.2. Recolección de datos mediante Electro-Cap y la Cyton Board de OpenBCI	25
8. Definición de experimentos para el estudio de sueño, concentración y estado de ánimo, y extracción de datos	27
8.1. Experimentos de sueño	27
8.1.1. Pulsos binaurales reproducidos	28
8.2. Pruebas de concentración	29
8.2.1. Prueba de concentración con operaciones aritméticas mentales	29
8.2.2. Prueba de reconocimiento de tres figuras en una serie de figuras	30
8.3. Pruebas de estado de ánimo	31
8.3.1. Prueba de estado de ánimo con inducción mediante vídeos y lecturas cortas	31
8.4. Protocolo de investigación	32
8.5. Trabajo colaborativo	33
9. Aprendizaje automático aplicado al estudio del sueño, concentración y estado de ánimo	34
9.1. Entrenamiento del modelo de aprendizaje automático para el estudio del sueño	35
9.2. Clasificador de concentración	37
9.3. Algoritmos de agrupamiento para el estudio del estado de ánimo	39
10. Estudio cuantitativo del impacto de los pulsos binaurales	44
10.1. Estudio del sueño	44
10.1.1. Resultados	45
10.1.2. Discusión de resultados	55
10.2. Estudio de concentración	57

10.2.1. Resultados	57
10.2.2. Discusión de resultados	60
10.3. Estudio de estado de ánimo	62
10.3.1. Resultados	64
10.3.2. Discusión de resultados	65
11. Conclusiones	68
12. Recomendaciones	69
13. Bibliografía	70
14. Anexos	73
14.1. Consentimiento informado del estudio de concentración y estado de ánimo, y sueño	73
14.2. Protocolo de investigación	80

Lista de figuras

1. Funcionamiento del pulso binaural [2].	3
2. Infografía del funcionamiento del sistema de reproducción de pulsos binaurales [6].	4
3. Señales EEG en color negro, señales de actividad ocular en color morado y electromiografía en color naranja [7].	5
4. Interfaz gráfica correspondiente a la generación de pulsos [8].	5
5. Plan de sueño propuesto por Alegría [8].	6
6. Electroencefalogramas medidas durante distintas etapas del sueño [11].	13
7. BIOPAC MP41 y accesorios [16].	16
8. Electro-Cap [17].	16
9. Sensor de oído [18].	17
10. Interfaz del programa de captura de datos BIOPAC.	23
11. Soldadura de cable de voltaje positivo de la Cyton Board al banco de baterías.	25
12. Obtención de datos mediante interfaz de OpenBCI.	26
13. Prueba aritmética mental [32].	30
14. Prueba de concentración Toulouse-Pieron [33].	31
15. Matriz de confusión realizado en la fase anterior [9].	36
16. Matriz de confusión utilizando otras características y parámetros del clasificador ajustados.	36
17. Matriz de confusión del clasificador de bosque aleatorio realizado en Python.	37
18. Matriz de confusión del clasificador SVM realizado en MATLAB con diferentes <i>kernels</i>	38
19. Algoritmo KMeans con diferente pre-procesamiento.	41
20. Algoritmo Agglomerative con diferente pre-procesamiento.	42
21. Algoritmo DBSCAN con diferente pre-procesamiento.	43
22. Flujo de extracción de características para la clasificación de las señales.	44
23. Noches de prueba del sujeto 1.	47
24. Noches de prueba del sujeto 2.	49
25. Noches de prueba del sujeto 3.	51

26. Noches de prueba del sujeto 4.	53
27. Noches de prueba del sujeto 5.	55
28. Porcentajes de error en la obtención de un sueño ideal por noche por sujeto.	56
29. Flujo de extracción de características para el estudio de concentración.	57
30. Tendencia de efecto de pulsos binaurales en los sujetos de prueba.	59
31. Agrupaciones de señales mediante el algoritmo <i>DBSCAN</i> aplicados en el estudio de concentración en la prueba Toulouse-Pieron.	59
32. Agrupación de datos mediante algoritmo <i>DBSCAN</i> de una actividad cotidiana con y sin pulsos binaurales.	60
33. Representación de las señales de la Figura 31 con líneas delimitando las medias de característica.	61
34. Representación de las señales de la Figura 32 con líneas delimitando las medias de característica.	62
35. Señales del minuto antes de realizar la prueba aritmética y del tercer minuto al realizar la prueba aritmética.	63
36. Figura 35 con la línea en la media de cada característica.	63
37. Señales del minuto después de haber realizado la prueba aritmética.	64
38. Algoritmo <i>DBSCAN</i> aplicado al estudio de estado de ánimo de la prueba de vídeos.	65
39. Algoritmo <i>DBSCAN</i> aplicado al estudio de estado de ánimo de la prueba de lecturas.	65
40. Algoritmo <i>Random Forest</i> aplicado a las señales recolectadas de las lecturas.	66
41. Figura 37 con líneas en las medias de las características.	66

Lista de cuadros

1. Cantidad de tiempo en minutos de cada una de las etapas según el ciclo [28]	28
2. Frecuencias para cada fase del sueño en Hertz [28]	29
3. Nivel de concentración según las métricas de la prueba de Toulouse-Pieron [33]	31
4. Vídeos para producir diferentes estados de ánimo	32
5. Lecturas para producir diferentes estados de ánimo	32
6. Características usadas en el clasificador de fases de sueño desarrollado en la fase anterior [9]	35
7. Características implementadas en el clasificador del sueño	37
8. Puntuaciones de los distintos algoritmos aplicados con diferentes técnicas de pre-procesamiento de datos	40
9. Cantidad de épocas por experimentar en cada fase de sueño según la cantidad de ciclos de sueño	45
10. Épocas clasificadas e ideales por fase de sueño por noche del sujeto 1, la duración de cada noche está en minutos	46
11. Error por fase y noche de sueño del sujeto 1	46
12. Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 2, la duración de cada noche está en minutos	48
13. Error por fase y noche de sueño del sujeto 2	48
14. Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 3, la duración de cada noche está en minutos	50
15. Error por fase y noche de sueño del sujeto 3	50
16. Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 4, la duración de cada noche está en minutos	52
17. Error por fase y noche de sueño del sujeto 4	52
18. Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 5	54
19. Error por fase y noche de sueño del sujeto 5	54
20. Cantidad de épocas en estado atento e inatento de cada uno de los sujetos en cada una de las pruebas	58
21. Cantidad de datos con una mayor y menor presencia de ondas beta obtenidos de la Figura [33]	61

22.	Cantidad de datos en concentración y en relajación de los resultados obtenidos en la Figura 34.	62
23.	Cantidad de señales en estado de relajación y estrés por cuadrante de la Figura 36.	64
24.	Cantidad de señales en cada cuadrante por estudio de la Figura 41.	67

En esta investigación se realizó una exploración acerca del efecto que tienen los pulsos binaurales mediante la recolección de electroencefalogramas de la mayor cantidad posible de sujetos de prueba en diferentes condiciones, tales como: sueño, concentración y distintos estados de ánimo. Esto se realizó mediante el uso de distintos algoritmos de aprendizaje automático, que ayudaron a determinar el estado en el que se encuentra el sujeto de prueba. Para cada uno de los estudios se diseñaron pruebas de manera que los sujetos de prueba se puedan encontrar en condiciones de sueño, concentración y distintos estados de ánimo. Asimismo, se realizó una continuación y ajuste al protocolo de investigación y al consentimiento informado para cada uno de los estudios.

El clasificador de sueño se realizó con base a la fase anterior, implementando una serie de mejoras en el algoritmo y en la extracción de las características. A pesar de ello, no se obtuvo una buena clasificación que se puede deber a que este clasificador estaba entrenado con datos de una base de datos pública, por lo que no se comparten las mismas condiciones en las que fueron tomados los datos de esta investigación. Sin embargo, se pudo realizar un análisis de los datos recolectados, obteniendo como resultado que los pulsos binaurales producen un efecto negativo en la calidad del sueño.

El clasificador realizado para el estudio de concentración demostró un buen porcentaje de acierto, usando como características la potencia de la banda alpha y beta. Al implementar este clasificador al estudio, se encontró que los pulsos binaurales son contraproducentes en el estado de concentración, ya que en la ausencia de estos, los sujetos de prueba tendían a tener un mayor estado de concentración. Sin embargo, al implementar el algoritmo *DBSCAN* en otra prueba de concentración más extendida se observó que estos son beneficiosos para permanecer en este estado.

Para las pruebas del estudio de estado de ánimo, se aplicó el algoritmo *DBSCAN*, utilizando como características principales la entropía diferencial y la potencia gamma, en señales con y sin pulsos binaurales. De los resultados otorgados por el algoritmo se observa que sí hay un impacto causado por los pulsos binaurales demostrando así que estos pueden influir en el estado de ánimo de las personas.

In this research, the effect of binaural beats was explored by collecting electroencephalograms from as many test subjects as possible in different conditions, such as sleep, concentration, and mood. This was done using different machine learning algorithms, which helped determine the test subject's state. For each of the studies, tests were designed to find the test subjects in different moods and conditions of sleep and concentration. Likewise, the research protocol and informed consent were continued and adjusted for each study.

The sleep classifier was made based on the previous phase, implementing improvements in the algorithm and the extractions of the features. Despite this, a good classification was not obtained, which could be due to the classifier being trained with data from a public database, so the exact conditions under which the data were taken are not shared. However, an analysis of the data collected was done. As a result, binaural beats negatively affect sleep quality.

The classifier made for the concentration study demonstrated a good percentage of success, using the power of the alpha and beta bands as characteristics. When implementing this classifier to the study, it was found that binaural beats are counterproductive in the state of concentration since the test subjects tended to have a higher state of concentration in the absence of these. However, implementing the DBSCAN algorithm in another extended concentration test verified that these are beneficial to remain in this state.

For the mood study tests, the DBSCAN algorithm was applied, using differential entropy and gamma power as main features in signals with and without binaural beats. From the results provided by the algorithm, it is observed that binaural beats have an impact, thus demonstrating that they can influence people's moods.

El sueño resulta ser una parte esencial de nuestro día a día. Es durante este momento en el que el cuerpo aprovecha a reponerse y obtener un debido descanso para presentarse dispuesto al día siguiente. Una falta constante de sueño puede desenvolverse en muchos problemas que se puedan desarrollar a largo o mediano plazo, como pueda ser el aumento de peso, una mayor probabilidad de padecer enfermedades cardíacas, respiratorias, gastrointestinales, metabólicas e incluso de padecer algunas enfermedades mentales. Considerando que pasamos alrededor de un tercio de nuestra vida durmiendo se vuelve necesario que podamos aprovechar de mejor manera este tiempo teniendo una buena calidad de sueño.

Dado que hay algunas personas que presentan una mayor dificultad para poder conciliar el sueño, se realiza esta investigación en busca de una solución alternativa que pueda mejorar la calidad de sueño de las personas. Este trabajo tiene como finalidad realizar mejoras de las herramientas desarrolladas en la fase anterior, tanto los clasificadores realizados como el protocolo de investigación, e implementarlas en un estudio con la mayor cantidad posible de sujetos de prueba. Esto se realizó mediante un estímulo, la cual es la reproducción de pulsos binaurales, que, mediante el uso de un clasificador de aprendizaje automático, se validó el efecto que estos desarrollan durante la etapa de sueño.

Con el avance de la tecnología, hoy en día, es más sencillo poder acceder a todo tipo de contenido digital, tanto para informarse como para comunicarse o entretenerse. Es por ello que hoy en día resulta mucho más sencillo que uno se distraiga que en décadas anteriores debido a los dispositivos que tenemos a la mano, como el celular y la computadora. La falta de concentración usualmente provoca bajo rendimiento educativo, ineficiencia en el trabajo, cometer errores seguidamente y perder u olvidar con frecuencia pertenencias propias. Debido a que los pulsos binaurales se pueden desarrollar a distintas frecuencias, esta investigación también tuvo como fin indagar el efecto que estos tienen en el estado de ánimo y la concentración de las personas. Igualmente que en el estudio anterior, se realizaron e implementaron múltiples clasificadores de aprendizaje automático y se realizó e implementó una adaptación del protocolo de investigación del sueño para este estudio con la mayor cantidad posible de sujetos de prueba. De esta manera, se buscó si se puede llegar a inducir un buen estado

de ánimo o bien a un estado de óptima concentración para poder ser más productivos en nuestras actividades cotidianas.

Para la validación del efecto de los pulsos binaurales en cada uno de los estudios se realizó un análisis cuantitativo. En lo que respecta al estudio del sueño y concentración, se verificó la cantidad de épocas en las que cada uno de los sujetos de prueba pasó en cada una de las fases del sueño o estado de concentración (dependiendo del estudio analizado) con y sin la estímulo de los pulsos binaurales. Para el estudio de estado de ánimo, al ser más complicado determinar en que estado se encuentra el sujeto de prueba (feliz, triste, aburrido, enojado, etc.) únicamente con la lectura EEG, se realizó un clasificador de agrupamiento de épocas que comparten una mayor similitud entre sus características, esto se realizó con señales con y sin pulsos binaurales, y mediante múltiples métricas se verifica el impacto de los mismos.

La perturbación del sueño o la ausencia de este, tiene varias consecuencias negativas tales como: depresión, ansiedad, reducción en la calidad de vida, deterioro cognitivo, enfermedades cardiacas, fatiga crónica, entre muchas otras enfermedades. Ante esto, se han producido algunos fármacos para ayudar a las personas a conciliar el sueño, sin embargo, estos no son efectivos sin causar algún efecto adverso como la sedación y en algunos casos se ha reportado dolores de cabeza, náuseas y mareos [1]. A partir de esta inquietud se empiezan a explorar otras alternativas.

Los pulsos binaurales, pulsos reproducidos a diferentes frecuencias en cada oído, referencia en Figura 1, han demostrado ser estimulantes para el ser humano. Se ha encontrado que hay un rango de frecuencias que resulta ser relajantes y otras que resultan ser estresantes, según experimentaciones en [2].

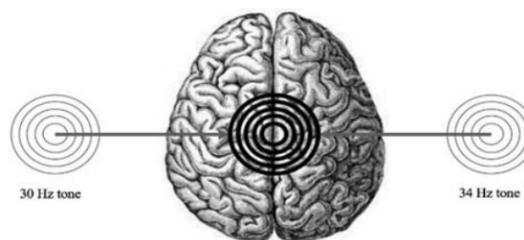


Figura 1: Funcionamiento del pulso binaural [2].

El sueño presenta ciclos de los cuales se alternan dos fases, sin movimiento rápido de los ojos, por sus siglas en inglés NREM (*Non-Rapid Eye Movement*) y movimiento rápido de los ojos, por sus siglas en inglés REM (*Rapid Eye Movement*) [3]. Dado que una persona, aparentemente no realiza mucha actividad al momento de estar durmiendo o descansando con los ojos cerrados, es difícil saber si la persona en cuestión está descansando bien o mal, si está despierta, *i.e.* en vigilia, o está durmiendo. De esto proviene la necesidad de medir señales eléctricas del cerebro, conocidos como encefalogramas (EEG).

De investigaciones realizadas en diferentes entidades, se ha podido realizar una clasificación prometedora entre las distintas etapas dentro de las fases del ciclo del sueño. Mediante la medición del tiempo en el que se permanece dentro de las distintas fases en cada uno de los ciclos es posible determinar la calidad de sueño que tiene una persona [4].

Estudio del sueño y pulsos binaurales en la UVG

Fase I

Durante este año, en la Universidad del Valle de Guatemala, se empezó a realizar la primera fase del proyecto “Estudio del sueño con pulsos binaurales”, realizada por José Pablo Muñoz [5]. Con el fin de realizar una investigación para ayudar a los atletas en la conciliación del sueño. Del trabajo realizado, se pudieron obtener mediciones exitosas de EEG mediante la CythonBoard de OpenBCI y la Electro-Cap, en diferentes lenguajes de programación, especialmente en MATLAB, del cuál se obtuvieron señales en tiempo real. Se realizó una generación de señales para producir los pulsos binaurales mediante Python y se realizó un clasificador, implementando aprendizaje automático, para clasificar en que fase del sueño se encuentra cada una de las señales recolectadas.

Para verificar el funcionamiento de lo realizado, se hizo una simulación en la cual, mediante la obtención de datos del EEG que se estuviesen captando en tiempo real, se reproduzcan diferentes pulsos binaurales dependiendo en la fase que se encontraba dentro del ciclo del sueño [5]. En la Figura 2 se puede observar más a detalle la explicación del funcionamiento del sistema. De la investigación realizada por Muñoz se publicó un artículo en el que se resume los avances realizados [6]. Sin embargo, como se mencionó previamente, en el estudio realizado solo se hizo una simulación, ya que no se experimentó con una persona para comprobar si los pulsos binaurales son efectivos en la mejora del sueño.

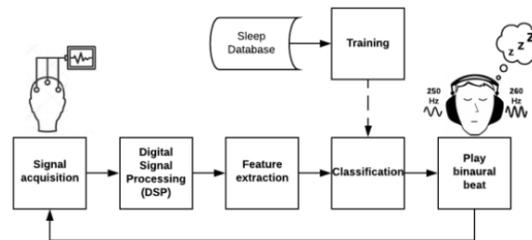


Figura 2: Infografía del funcionamiento del sistema de reproducción de pulsos binaurales [6].

Además de ello cabe recalcar que los datos recolectados, al momento de realizar esta fase, fueron solamente del autor del estudio, y datos de un repositorio público. Es decir, no se tomaron muchas mediciones propias y, por tanto, no se pudo comprobar que la clasificación fuera efectiva con más personas y con mediciones propias.

Fase II

Durante el año 2020, Oscar López [7] y Luis Andrés Guerrero [8] realizaron una tesis, cada uno, continuando el proyecto realizado en la fase I. López se centró en optimizar un

clasificador de las distintas fases del sueño y Guerrero se centró en la generación de pulsos binaurales.

López utilizó más características de las señales de las que utilizó Muñoz, usando en total 5 características. Asimismo, implemento este clasificador utilizando 4 canales EEG, señales de actividad ocular y electromiografía de la barbilla como se puede observar en la Figura 3. Esto lo realizó por medio del dispositivo CythonBoard con un post-procesado de datos mediante MATLAB, no se realizó en tiempo real. Intentó realizar una buena clasificación del sueño con una sesión de sueño de 2 horas pero la prueba falló, al realizarlo con una sesión de 7 horas, se obtuvo un mejor clasificador, demostrando así que se necesita una gran cantidad de datos para poder realizar un buen clasificador [7].

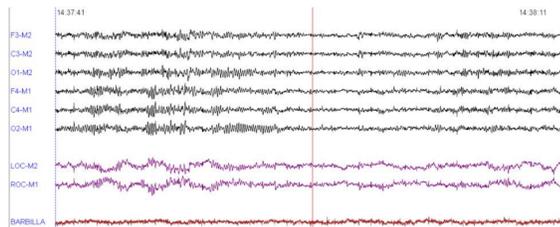


Figura 3: Señales EEG en color negro, señales de actividad ocular en color morado y electromiografía en color naranja [7].

A pesar de obtener un buen clasificador de las fases del sueño, este mismo solo se probó con datos de un sujeto, por lo cual no es posible validar si este clasificador pueda funcionar correctamente con los datos de una sesión de sueño de otro sujeto. Es decir, el clasificador es muy específico con la información proveniente de un sujeto y no se garantiza que se pueda utilizar con cualquier persona.

Guerrero, realizó un generador de pulsos binaurales desde una Raspberry Pi 3, tomando como base lo realizado por Muñoz, realizando la generación desde Python. Para que el archivo de audio pudiera ser compatible con otros reproductores de multimedia, dado que el archivo generado inicialmente no se podía ejecutar desde la Raspberry Pi, realizó una conversión de archivo wav a ogg. Además de ello implementó una interfaz gráfica realizada desde Python, de manera que la generación de pulsos pueda ser más amigable de interactuar con el usuario como se puede observar en la Figura 4.

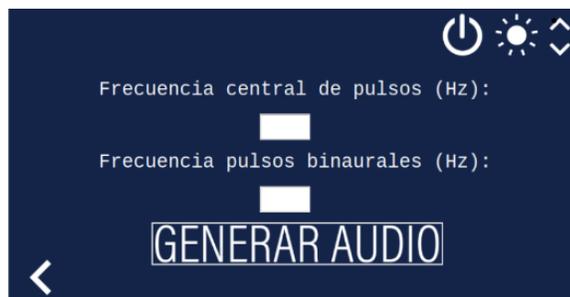


Figura 4: Interfaz gráfica correspondiente a la generación de pulsos [8].

Realizado la interfaz gráfica y la correcta generación de pulsos binaurales, se realizó un estudio del sueño con los integrantes de su familia. De este estudio, encontró que la interfaz

gráfica resultó sencilla de usar y que los pulsos binaurales con un espectro central de 175 Hz y una frecuencia de pulsos binaurales de 1 Hz resultó ser placentera, hasta cierto punto, para el descanso [8].

El estudio realizado contiene una población muy pequeña como para validar que la respuesta a los pulsos binaurales es beneficiosa. Además de ello, se debe de tomar en cuenta que durante las sesiones de sueño, no se modificó los pulsos binaurales dependiendo de la fase de sueño en la que se encontraba cada uno de los sujetos. Esto puede afectar la duración de tiempo que un sujeto permanezca en una fase del sueño y por tanto puede perjudicar la calidad de sueño que se puede experimentar.

Fase III

Durante el año 2021, Diego Alegría [9] continuó con la siguiente fase del proyecto. Realizó una colección de datos a través de la CythonBoard por medio del Electro-Cap, haciendo un procesamiento de datos en Python, en vez de realizarlo en MATLAB.

Alegría exploró un nuevo clasificador para las distintas fases del sueño, con implementación de otras características usando como principal fuente de datos una base de datos europea denominada como Sleep-EDFX [10]. Además de ello cambió el enfoque de utilizar la Raspberry Pi para implementar la ejecución de los pulsos binaurales por medio de una computadora portátil a través del lenguaje Python. Con ello pudo implementar una función de mayor comodidad para los sujetos el cual es el uso de auriculares inalámbricos. También, una nueva funcionalidad que se implementó fue la función de *crossfade* el cual permite una transición entre pulsos de una manera más suave y continua.

Se propuso que la generación de pulsos binaurales se realice a través de un plan de sueño, con una duración predeterminada en cada uno de los ciclos del sueño tal y como se presenta en la Figura 5. Donde W representa el estado de despierto, N1, N2 y N3 representan la fases 1, 2 y 3 del ciclo NREM, el eje vertical corresponde a las etapas y el eje horizontal al tiempo correspondiente en cada una de ellas.

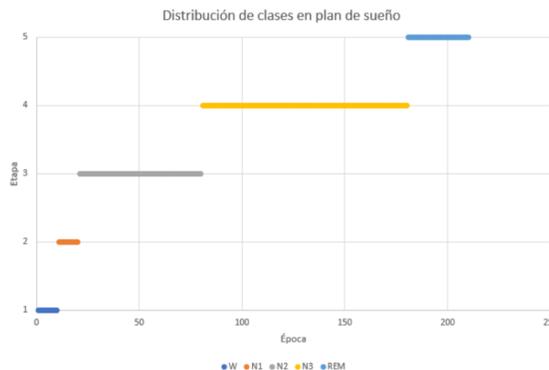


Figura 5: Plan de sueño propuesto por Alegría [8].

Además presenta un protocolo y documentos que se deben de presentar ante la universidad para realizar experimentos con personas y verificar si los pulsos binaurales son capaces de mejorar la calidad del sueño. Por último realiza un micro-estudio acerca del impacto que

generan los pulsos binaurales en el sueño. En dicho estudio solo participaron dos personas, de los cuales se obtuvo que solo hubo una buena inducción a la fase NREM 2 [9].

Dado que el estudio de impacto únicamente se realizó en dos personas, no fue posible asegurar que los pulsos binaurales no pueden inducir a que el sujeto experimente distintas fases del sueño. Se debe de realizar un estudio con una mayor población. Además de ello, no se especifica qué pulsos binaurales fueron generados en cada una de las fases del sueño, por lo que se debe de verificar que estos sean los adecuados para inducir a las mismas. Por último, se puede realizar medición EOG y EMG de la mandíbula para poder realizar una clasificación de las fases del sueño más precisa.

La privación del sueño tiene muchas causas negativas, tanto física como mentalmente, provocando nuevas enfermedades tales como: enfermedades cardíacas, enfermedades respiratorias, enfermedades gastrointestinales, enfermedades metabólicas, e incluso aumenta las probabilidades de sufrir Parkinson. Ante la lucha de este problema, se han hecho algunos fármacos que pueden mejorar la conciliación del sueño, sin embargo, estos regularmente poseen efectos secundarios adversos, cómo vómitos, dolores de cabeza, experimentación del efecto sedante, mareos entre otros [1].

Si se toma en cuenta lo mencionado anteriormente en atletas, su rendimiento físico y mental pueden ser gravemente reducidos, especialmente en épocas de competencia que es cuando más están sometidos ante una alta presión. Es por ello que se debe de realizar algún sistema que los ayude a poder conciliar el sueño especialmente cuando están presentando síntomas del insomnio. Estas son las principales causas por las que se empezó a realizar este estudio y desarrollo de un sistema capaz de realizar una inducción y mejora de la calidad del sueño.

Motivado por el avance realizado en las fases anteriores del estudio y desarrollo del sistema, tales como la realización de clasificadores de etapas del sueño como la reproducción de los pulsos binaurales, se plantea la mejora y la afinación del sistema. Realizando esto con el fin de que varias personas puedan utilizarla y mejorar progresivamente su calidad de vida.

Se debe de realizar un especial énfasis en la recolección de datos de una gran cantidad de personas, especialmente en este año que no hay tantas restricciones de locomoción y aglomeración de personas, como ocurrió en las fases anteriores [9], [7] y [8]. Evaluando que los clasificadores realizados puedan ser utilizados de manera efectiva con datos obtenidos por cualquier persona. Asimismo es de suma importancia verificar que, por medio de los pulsos binaurales, se pueda realizar una correcta inducción al sueño y sus fases, y poder verificar que realmente existe una mejoría en la calidad del sueño. Además se plantea realizar un estudio acerca del impacto que puede provocar los pulsos en el estado de ánimo de las personas y verificar si se puede estimular la relajación o la concentración con la reproducción de estos. Este último es un campo que no ha sido estudiado en fases anteriores.

Cabe recalcar que en fases anteriores no se especificaron frecuencias de los pulsos binaurales para realizar la inducción en cada una de las fases del sueño. Es por ello que en esta investigación se realiza un estudio del comportamiento de las ondas del cerebro durante el sueño, ante el estímulo de diferentes frecuencias y se pueda determinar las frecuencias correctas para cada etapa, asimismo para la inducción de algunos estados anímicos.

4.1. Objetivo general

Estudiar el impacto de pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas, aplicando técnicas de aprendizaje automático y reconocimiento de patrones a señales bioeléctricas.

4.2. Objetivos específicos

- Recolectar señales bioeléctricas de la mayor cantidad posible de sujetos de prueba en condiciones de sueño, concentración y distintos estados de ánimo.
- Revisar los algoritmos de aprendizaje automático y reconocimiento de patrones desarrollados en la fase anterior del proyecto, aplicarlos a las señales bioeléctricas recolectadas, y evaluar mejoras en los algoritmos y la extracción de características.
- Revisar el protocolo de investigación para el estudio del impacto de pulsos binaurales en la calidad del sueño desarrollados en la fase anterior, y adaptarlo para el estudio del impacto en el estado de ánimo y la concentración de las personas.
- Implementar el protocolo con la mayor cantidad posible de sujetos de prueba.
- Realizar un análisis cuantitativo del efecto de los pulsos binaurales a partir de señales bioeléctricas obtenidas de los sujetos de prueba.

Durante las fases previas, la experimentación y el estudio de los pulsos binaurales no fue posible por restricciones de aglomeración y contacto debido al COVID-19. Por lo que esta investigación tiene como propósito ampliar las investigaciones de las fases anteriores para comprender si los pulsos binaurales presentan un impacto. Para ello se realizó la recolección de señales bioeléctricas EEG de la mayor cantidad posible de sujetos de prueba, aplicándolas en una investigación cuyo principal enfoque es observar si hay indicios de un impacto en el estado de ánimo, concentración o sueño de las personas. Esta investigación no tiene como propósito dar una solución a problemas relacionados con el sueño, concentración o estado de ánimo de las personas.

En la investigación, se realizó el uso de técnicas de aprendizaje automático para analizar las señales bioeléctricas. De ello se utilizaron algoritmos de aprendizaje supervisado como: bosque aleatorio (*Random Forest*), máquina de soporte de vectores (*SVM*); y algoritmos de aprendizaje no supervisado, *K Means Clustering*, *Agglomerative Clustering* y *DBSCAN*.

Durante la realización de esta investigación sólo se pudo disponer de dos dispositivos para la recolección de datos, los cuales fueron el BIOPAC MP41 y el Electro-Cap con conexión a la placa de desarrollo Cyton Board de OpenBCI. El dispositivo BIOPAC MP41 tiene limitaciones para la adquisición de datos siendo los dos más importantes la recolección de datos de más de treinta minutos y la capacidad para conectarse con otros lenguajes de programación.

Por la naturaleza del estudio del sueño, no se pudieron recolectar muchas señales de diferentes sujetos de prueba. Por los datos usados para entrenar el clasificador de sueño, provistos por la fase anterior, y por la diferencia de parámetros en los que estos fueron recolectados, frecuencia de muestreo, ambiente, edades, etc., no se pudo obtener una buena clasificación de las fases del sueño al aplicarlos a señales recolectadas en esta investigación. De ello queda pendiente la realización de un clasificador adecuado para el estudio del sueño, siendo entrenado con datos recolectados para el mismo. Por otra parte, por la disponibilidad de tiempo de los sujetos de prueba, no se pudieron recolectar una gran cantidad de señales del estudio de ánimo y concentración, específicamente para corroborar si los pulsos binaurales

generan un impacto a lo largo del tiempo.

A pesar de las limitantes previamente mencionadas, se pudo descubrir que los pulsos binaurales sí presentan un impacto directo en las señales bioeléctricas, promoviendo la concentración si son aplicadas en un largo período de tiempo y promoviendo un estado de relajación ante pruebas aritméticas mentales que son propensas a producir estrés.

6.1. Electroencefalograma (EEG)

El cerebro funciona mediante procesos químicos y pulsos eléctricos. Con base en estos últimos es que se puede obtener una señal, mediante el uso de electrodos. El electroencefalograma es una grabación de señales eléctricas producidas por el cerebro, como se muestra en la Figura 6. Dado que se realiza una grabación de estas señales, a lo largo del tiempo, se pueden encontrar ondas de las cuales se pueden obtener distintas frecuencias y amplitudes. A lo anterior se le denomina, por tanto, ondas cerebrales [11].

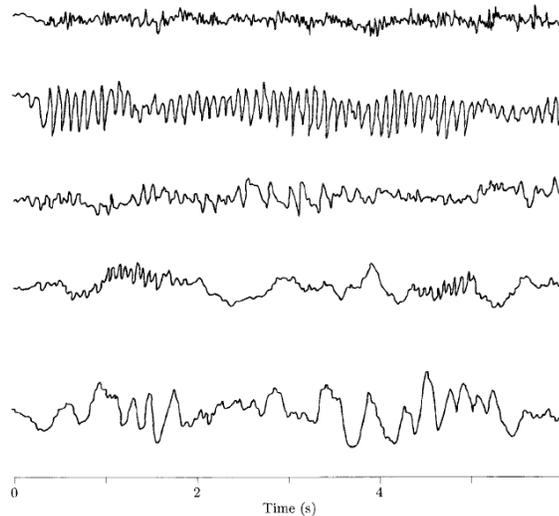


Figura 6: Electroencefalogramas medidas durante distintas etapas del sueño [11].

6.2. Ondas cerebrales

Las ondas cerebrales pueden contener amplitudes desde pocos microvoltios hasta aproximadamente 100 μV y una frecuencia desde los 0.5 a 30-40 Hz. Convencionalmente se clasifican los ritmos de las ondas en cinco bandas de frecuencia. Cabe recalcar que dependiendo de la edad y el estado mental se puede obtener diferentes comportamientos en cada una de las bandas. Por ejemplo, un recién nacido presenta considerablemente mayor contenido en frecuencias altas que un adulto [11].

Las bandas de frecuencias son las siguientes:

- **Delta (<4 Hz):** Las ondas delta regularmente se encuentran durante la fase del sueño profundo y tienen una larga amplitud. No es usual que se observen cuando la persona está despierta, pero puede ser un indicador de daño o una enfermedad cerebral.
- **Theta (4-7 Hz):** Las ondas theta ocurren durante la somnolencia y en ciertas etapas del sueño.
- **Alpha (8-13 Hz):** Estas ondas son más frecuentes en personas que se encuentran en estado de relajación, despiertas con los ojos cerrados. La actividad es suprimida cuando se abren los ojos. La amplitud de estas ondas son más altas en las regiones occipitales.
- **Beta (14-30 Hz):** Estas ondas regularmente tienen una baja amplitud, están asociados a la actividad de la corteza cerebral, que se puede observar durante ciertas etapas del sueño.
- **Gamma (>30 Hz):** Estas ondas están relacionadas al estado activo de procesamiento de información de la corteza cerebral.

6.3. Observación de estados de ánimo en EEG

Dado que se necesita verificar el estado de ánimo en el que se encuentra una persona, se han realizado varios estudios de los cuales, tienen como propósito realizar una clasificación de estados de ánimo mediante encefalogramas. Según estudios [12] y [13] las bandas más adecuadas para realizar una clasificación de los estados de ánimo son alpha, beta y gamma, siendo estas últimas dos las más confiables.

6.4. Bioelectricidad

Antes de adentrarnos más a fondo sobre este concepto, cabe recalcar que la piel es un órgano de nuestro cuerpo y por ende se compone de muchas células. La bioelectricidad se refiere a los fenómenos eléctricos de los procesos vitales de estas células. Uno de los mecanismos más básicos en los que se puede observar la bioelectricidad son las bombas de iones de la membrana celular, de la piel, que consumen energía y polarizan la célula.

Las bombas de iones tienen una función principal, la cual es la creación de gradientes de iones a cambio de energía metabólica. Análogos a los electrones, que fluyen a través de cables de cobre, los iones son los que transportan la carga en los tejidos vivos y los electrodos se encargan de ‘transformar’ los iones en electrones. El potencial de acción es generada si la célula se activa y los canales de iones se abren, esto sucede al haber una diferencia de concentración de iones de sodio y potasio entre el exterior y el interior de la célula. El proceso de la despolarización genera un flujo de corriente en el volumen extracelular, que de nuevo, resulta en un diferencia de bio-potencial en la piel.

Este proceso de apertura y cierre permite la propagación de señales eléctricas a lo largo de las células, como las neuronas permitiendo la transmisión por todo el sistema nervioso [14] [15].

6.5. Medición de señales bioeléctricas

La adquisición de señales bioeléctricas hoy en día es realizada mediante dispositivos de bajo costo, que amplifican y digitalizan la señal. Por ello, varios procedimientos basados en señales bioeléctricas son ampliamente usados en hospitales alrededor del mundo. En la mayoría de situaciones un sistema basado en computadora puede ser utilizado como una solución eficiente y de bajo costo para el análisis de las señales, especialmente considerando la disponibilidad de múltiples dispositivos para la adquisición de datos. Estos sistemas incluyen uno o varios sensores, aislamiento de la señal del paciente así como la amplificación de la misma, una ‘tarjeta’ de adquisición de datos incluyendo la capacidad de la conversión de la señal analógica a digital.

En el proceso de digitalización, usualmente es suficiente el uso de 12 a 14 bits para la cuantificación de la amplitud de manera que cubra el rango dinámico de la señal. La amplitud de señales bioeléctricas individuales van desde $1 \mu V$ a varios milivoltios. Muchas señales bioeléctricas obtenidas de la superficie del cuerpo tienen un espectro confinado debajo de 1 kHz y raramente excede unos kilohercios.

En sistemas basados en computadora, usualmente, las señales son procesadas localmente utilizando los recursos del procesador de la computadora o bien de un procesador de señales digitales. Sin embargo, con la disponibilidad de recursos basados en internet, no es totalmente necesario procesar la señal localmente. Por lo tanto, se puede adquirir la señal con el dispositivo físico y luego realizar el procesamiento en otra localización, como un servidor [11].

6.6. BIOPAC MP41

El dispositivo BIOPAC-MP41, es capaz de medir señales EOG (electrooculograma), ECG (electrocardiograma), EMG (electromiograma), EEG (electroencefalograma) y la resistencia mediante un puente Wheatstone. Para medir cada uno de las señales es necesario utilizar electrodos desechables, los cuales se pegan a la superficie de la piel en la posición deseada, según el tipo de señal a medir.

El dispositivo contiene únicamente un puerto del cual solo se puede establecer la lectura de un solo canal, es decir, solo se puede medir una señal EOG, ECG, EMG, etc. a la vez. Por ello, con este equipo, solo se es capaz de obtener una señal EEG y no múltiples señales EEG a la vez. Cuenta con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz.



Figura 7: BIOPAC MP41 y accesorios [16].

6.7. Electro-Cap y Cyton Board de OpenBCI

El equipo de medición Electro-Cap es un gorro de tela en el cual contiene electrodos a lo largo de su superficie ubicados según el sistema internacional 10-20, este se puede apreciar en la Figura 8. Adicional al Electro-Cap se utilizan sensores de oído los cuales sirven como referencia para las señales recolectadas por la Cyton Board, estos se pueden observar en la Figura 9.



Figura 8: Electro-Cap [17].

La Cyton Board es una placa desarrollada por la empresa OpenBCI, esta consta de 8 canales para la extracción de señales fisiológicas, los cuales se recolectan a una frecuencia de 250 Hz. La placa puede ser utilizada para la recolección de señales EEG, EMG y ECG. Este se comunica con la computadora inalámbricamente con un adaptador USB de OpenBCI [19].



Figura 9: Sensor de oído [18].

6.8. Electrodo

Los electrodos de biopotencia funcionan como una interfaz entre la piel y el circuito de medición electrónico actuando como un transductor de la corriente de iones del circuito. Generalmente están hechos de metales nobles tales como: plata, acero y oro en diferentes formas: circulares, rectangulares, etc., y están recubiertos con una sal, como cloruro de plata, o de polímeros como Nafion. La superficie de metal está acoplada con la piel a través de un gel electrolítico [20].

6.9. Electro gel

La piel, un órgano en constante renovación, está dividido en tres capas: epidermis, dermis y una capa subcutánea. La epidermis está dividida en cinco capas y la capa externa es la *stratum corneum* (estrato córneo) de la cual está formada por células cutáneas muertas que actúan como una barrera protectora contra el agua, microorganismos y el sol por ejemplo. El estrato córneo tiene alta resistencia eléctrica comparada con otras capas y su efecto es minimizado con una eliminación parcial [20].

Algunos electro gel están hechos a base de agua y otros a base de polietilenglicol con base de lípidos. Ambos son eficientes ya que disipan la capa de estrato córneo conductora mediante la hidratación y el llenado de los poros de la piel con electrolitos, cambiando así la capa de estrato córneo para que sea una capa altamente conductora de iones y puede reducir la impedancia eléctrica de la piel [21].

6.10. Sueño

El sueño ocurre en cinco etapas: despierto, etapas sin movimiento rápido de los ojos (NREM) los cuales se clasifican convencionalmente como N1, N2 y N3, y la etapa con movimiento rápido de los ojos (REM). Aproximadamente 75 % del sueño se consume en las etapas del NREM con una mayoría en la etapa N2. Una noche típica de sueño consiste en 4 a 5 ciclos del sueño, con la progresión de las etapas del sueño en el siguiente orden: N1, N2,

N3, N2 y REM. Un ciclo completo del sueño toma aproximadamente de 90 a 110 minutos. El primer período REM es corto y conforme la noche avanza se prolonga el tiempo del período REM y decrece el tiempo en sueño profundo (NREM) [3].

6.10.1. Despierto

Durante este período en la banda de frecuencias beta se obtiene frecuencias altas y una baja amplitud. Cuando la persona se encuentra con los ojos abiertos las ondas beta predominan, y cuando la persona se siente soñolienta y cierra sus ojos las ondas alpha se vuelven predominantes [3].

6.10.2. N1 (Etapa 1 NREM) - Sueño ligero

Se puede observar ondas theta con un bajo voltaje. Esta es la etapa más ligera del sueño y empieza cuando más del 50 % de las ondas alpha son reemplazados con una baja amplitud y con una frecuencia mezclada. Se obtiene una respiración tiene un ritmo regular. Esta etapa suele durar entre 1 a 5 minutos, consiste en el 5 % del tiempo total de sueño [3].

6.10.3. N2 (Etapa 2 NREM) - Sueño profundo

Se observan husos del sueño y complejos K. En esta etapa se obtiene un sueño más profundo a medida que el ritmo del corazón y la temperatura corporal decrece. Los husos del sueño son breves. Varios estudios sugieren que estos husos juegan un importante rol en la consolidación de la memoria [22].

Los complejos K son ondas delta que duran aproximadamente un segundo y son conocidos como los más largos y más distintos de todas las ondas cerebrales. Estas ondas mantienen el sueño y consolidan la memoria. Esta etapa del sueño dura aproximadamente 25 minutos en el primer ciclo y se alarga en cada ciclo, eventualmente consiste en el 45 % del sueño total. En esta etapa del sueño sucede el rechinado de dientes [3].

6.10.4. N3 (Etapa 3 NREM) - El sueño más profundo

Se pueden observar ondas delta con baja frecuencia y amplitudes altas. Esta etapa es la que está considerada como la etapa de sueño profundo. Durante la etapa es muy difícil despertarse o despertar a una persona, incluso con la reproducción de sonidos fuertes. A medida que las personas tienen más años, tienden a permanecer menos tiempo en esta etapa. Si una persona se despierta durante esta etapa experimentarían una fase transitoria de confusión mental conocido como la inercia del sueño. En esta etapa del sueño el cuerpo se repara a sí mismo, los tejidos se renuevan, se construyen los huesos y los músculos y se fortalece el sistema inmune. Durante esta etapa también ocurren los fenómenos de sonambulismo, los terrores nocturnos y la incontinencia urinaria. Esta etapa representa el 25 % del sueño total [3].

6.10.5. REM

Se observan ondas beta, similares a las ondas al momento de estar despiertos. Esta etapa esta relacionada con los sueños y no es considerado como una etapa de pleno descanso. Durante esta etapa los músculos no tienen movimiento, a excepción de los ojos y los músculos del diafragma. La respiración se vuelve irregular y más errática. Esta etapa usualmente empieza luego de los 90 minutos de quedarse dormido e incrementa su tiempo de duración conforme se realizan más ciclos del sueño. El primer período dura 10 minutos y el último periodo dura más de una hora. En esta etapa ocurren los sueños, pesadillas y sucede la hinchazón de los órganos reproductivos [3].

6.11. Aprendizaje de máquina o aprendizaje automático

El aprendizaje de máquina es un campo de las ciencias de la computación y otorga la habilidad de aprendizaje sin que este esté explícitamente programado. Una característica clave es el concepto del auto aprendizaje, a esto se refiere en la aplicación de modelos estadísticos para detectar patrones y mejorar el rendimiento basado en datos e información empírica. A diferencia de la programación tradicional, donde las salidas o decisiones son predefinidas por el programador, el aprendizaje automático usa los datos como entradas para construir un modelo de decisión.

El aprendizaje de máquina utiliza cientos de algoritmos basados en estadística y escoger el algoritmo adecuado para la tarea en cuestión es un constante reto de trabajo en esta área. Hay tres categorías de aprendizaje de máquina y su tratamiento de las variables de entrada y salida [23].

6.11.1. Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado imita nuestra propia habilidad de encontrar patrones de ejemplos conocidos y usa estos conocimientos para ingeniar un resultado. Cabe resaltar que en este tipo de algoritmos, al momento de realizar el entrenamiento, una entrada siempre debe de estar etiquetada, de lo contrario esta no puede ser utilizada.

Ejemplos de estos algoritmos incluyen los análisis de regresión, árboles de decisiones, k -vecinos más próximos (*k-nearest neighbors*), redes neuronales y máquinas de vectores de soporte [23].

6.11.2. Aprendizaje no supervisado

En el caso de este tipo de aprendizaje, las salidas no están etiquetadas. y las combinaciones de entradas y salidas son desconocidas. Se centra en realizar un análisis de la relación entre las entradas y el descubrimiento de patrones ocultos que pueden ser extraídos para crear nuevas posibles etiquetas de salida.

Algunos ejemplos de algoritmos son k -medias (*k-means clustering*) [23].

6.11.3. Aprendizaje semi-supervisado

Esta es un aprendizaje híbrido de no supervisado y supervisado, en el cual se utiliza datos que no están y están clasificados. El principio de “entre más datos mejor” es el motivo de este tipo de aprendizaje, el objetivo es aprovechar los datos no etiquetados para mejorar la confianza del modelo predictivo. Una técnica es construir un modelo usando los datos etiquetados y luego usar en el mismo modelo los datos no etiquetados para que estos sean etiquetados [23].

6.11.4. Aprendizaje reforzado

A diferencia de los aprendizajes anteriores, su modelo de predicción se construye mediante la retroalimentación de ensayos aleatorios y errores para aprovechar el aprendizaje de iteraciones anteriores. El objetivo es alcanzar una salida específica por ensayos aleatorios con un vasto número de posibles combinaciones de las entradas calificando su desempeño. Uno de los algoritmos es el *Q-learning* [23].

6.12. Bosque aleatorio (*Random Forest*)

El algoritmo bosque aleatorio es un algoritmo de aprendizaje supervisado que está constituido por varios árboles de decisión. Estos árboles están construidos por la selección aleatoria de datos de entrenamiento y por un subconjunto de características de entrada. La predicción final es generada por la combinación de todas las predicciones de los árboles.

Uno de los problemas de los algoritmos de aprendizaje automático es el sobre-ajuste (*overfitting*), el cual se relaciona con la exactitud en la predicción que, a su vez, pueda estar relacionado con la selección de los datos de entrenamiento. Como se realiza una construcción de cada árbol con datos aleatorios de entrenamiento, el sobre-ajuste no resulta ser un inconveniente para este tipo de clasificador [24].

6.13. Máquina de soporte de vectores (*Support Vector Machine - SVM*)

La máquina de soporte de vectores es un algoritmo de aprendizaje supervisado que realiza una separación entre los datos mediante el valor de sus características. El algoritmo crea uno o varios límites, líneas de separación, entre dos o más clases. El límite se ve acompañado de un margen, este es el espacio que hay entre las dos clases y el límite.

El límite también puede ser modificado para ignorar clases clasificadas erróneamente a través del hiperparámetro C . Generalmente en un algoritmo de aprendizaje automático se quiere generalizar patrones que descifrar precisamente los datos de entrenamiento, que también pueden llegar a producir algunos errores en la clasificación posterior por el ruido que presentan. Por ello se debe de buscar el balance entre que tantos errores se permiten en

el algoritmo para que este presente una buena clasificación de los datos [23].

6.14. Parámetros espectrales

Los parámetros espectrales han sido usados en varias aplicaciones, incluyendo el desarrollo de datos normativos para temas de salud, análisis de datos por parte de pacientes que sufren de problemas para conciliar el sueño, isquemia cerebral, problemas renales, entre otros. El primer paso por tomar en el desarrollo de un parámetro espectral es el evaluar las propiedades del espectro de potencia estimado utilizando una presentación gráfica adecuada. Esto es importante debido a que la evaluación visual es valiosa para poder determinar qué tan representativo es un parámetro al describir una determinada propiedad espectral. Para esto se pueden utilizar ya sea una escala lineal o una logarítmica [11].

Los parámetros espectrales más utilizados frecuentemente son los siguientes:

6.14.1. Potencia en bandas de frecuencia

Esta puede calcularse en bandas de frecuencia cuyos límites son determinados ya sea por convención clínica o por una técnica estadística que indica las bandas más importantes. Las relaciones de potencia entre diferentes bandas de frecuencia pueden apoyar para reflejar la relación entre la actividad lenta y rápida del EEG (Electroencefalograma) con el fin de caracterizar el grado de anormalidad del EEG [11].

6.14.2. Frecuencia máxima

La extracción de características espectrales de potencia se puede lograr identificando los picos más prominentes. Cada pico espectral es categorizado por parámetros como su frecuencia, amplitud y ancho [11].

6.14.3. Descriptores de Hjorth

Otra forma de acercarse a la extracción de características espectrales es por medio del cálculo de los momentos de potencia espectral. Luego de realizar varios cálculos, se puede observar que son altamente útiles para varias aplicaciones del EEG, como en las etapas del sueño. Los descriptores sirven como ejemplo sobre como una técnica clínica eficiente no es necesariamente parecida con una técnica donde se requieren múltiples cálculos complejos [11].

6.14.4. Índice de pureza espectral (SPI)

Es el parámetro utilizado principalmente en el estudio de señales del EEG. Fue diseñado para reflejar el ancho de banda de la señal y esta relacionado con el descriptor de complejidad

de Hjorth. Se define como la relación entre el cuadrado del momento de segundo orden en ejecución y la potencia total en ejecución y el momento de cuarto orden en ejecución. El término “pureza” se refiere en que tan bien la señal analizada es descrita por una sola frecuencia: el SPI es igual a la unidad por una señal sin ruido [11].

6.15. Pulsos binaurales

Los pulsos binaurales consisten en dos ondas sinusoidales con una ligera diferencia de frecuencia entre sí para crear una onda con esta frecuencia. La diferencia de frecuencias en dos tonos es usado para alterar la actividad cerebral de la persona. El cambio de los patrones eléctricos del cerebro pueden ser usados para mejorar el estado psicológico y físico.

Para realizar el pulso binaural se necesita introducir en el oído izquierdo la onda con una frecuencia específica y en el oído derecho una señal con una frecuencia diferente a la señal del oído izquierdo. Por ejemplo, en el oído izquierdo se reproduce una señal sinusoidal con una frecuencia de 100 Hz y en el oído izquierdo una señal con frecuencia de 110 Hz. El cerebro realizará una sincronización entre estas dos señales y la diferencia entre estas, 10 Hz, es la señal que se estará experimentando internamente [25].

Se han realizado varios estudios acerca del efecto que puede causar los pulsos binuarales y en muchos de ellos se han obtenido resultados contradictorios, aunque también cabe recalcar que en muchos de ellos no se utilizaron señales EEG o de magentoencefalografía (MEG) para cuantificar el efecto electrofisiológico. En estudios realizados del efecto de pulsos binaurales en la memoria, se ha descubierto que pulsos binaurales con frecuencia de 7 Hz con una sola sesión de 30 minutos ha provocado una pérdida de la memoria verbal inmediata, mientras que un pulso binaural con frecuencia de 5 Hz con sesiones de 15 minutos, dos veces al día por 15 días, ha demostrado un incremento en la memoria verbal inmediata. Otro estudio evaluó el efecto que tienen los pulsos en la creatividad obteniendo resultados positivos estimulando la creatividad en algunas personas. También se ha estudiado el efecto de los pulsos en la concentración, específicamente en niños y adolescentes con déficit de atención, en el cual se obtuvo que los pulsos no tuvieron un impacto significativo aunque los participantes declararon percibir menos problemas de concentración, este estudio tiene la limitante de que no se reportaron características del pulso binaurales que fueron reproducidos [26].

En un estudio correspondiente al efecto en el estado de animo mediante la reproducción de los pulsos binaurales en frecuencias de las bandas de delta y theta, se obtuvo que hubo un descenso en el estado de tensión, ansiedad, confusión y fatiga. Pero hubo un incremento en el estado de depresión y vigor. Un estudio similar demuestra que, aplicando pulsos binaurales en frecuencias correspondientes a la banda de frecuencia beta, se obtiene una disminución del estado de depresión [26].

Otro estudio, correspondiente al estado de vigilancia (alta concentración al realizar una tarea), obtuvo que los pulsos binaurales no representan efectos significativos en este estado, mientras que otro estudio sugiere que sí representan una mejora en la alta concentración. Cabe destacar que en el primer estudio entre cada sesión de estimulación se realizó un sesión de ruido blanco, mientras que en el segundo estudio mencionado contenían de fondo ruido rosa durante el estímulo y los pulsos contenían tonos más bajos [26].

Pruebas preliminares para la recolección de señales EEG

Durante las fases anteriores no se tenía una diversidad de equipos para obtener señales EEG, siendo el único equipo disponible el Electro-Cap. Luego de 2 años de la implementación de la tercera fase, que es en el momento en el que se realiza esta fase, se tiene la disposición del uso de dos equipos desarrollados por la empresa BIOPAC, siendo estos el equipo MP36 y MP41.

Estos equipos tiene como ventajas el soporte por parte de BIOPAC, dada la reciente adquisición, y que la interfaz del programa de captura de datos del equipo presenta un apartado de análisis de datos en el cual se puede visualizar las diferentes bandas de las que se puede descomponer la señal EEG (*alpha*, *beta*, *delta* y *theta*). Asimismo el programa permite seleccionar un rango de datos para obtener la media, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo, entre otras características de los datos, tal y como se puede observar en la Figura 10. Por lo mencionado anteriormente el MP36 y el MP41, son tomados como los principales dispositivos para la recolección de EEG.

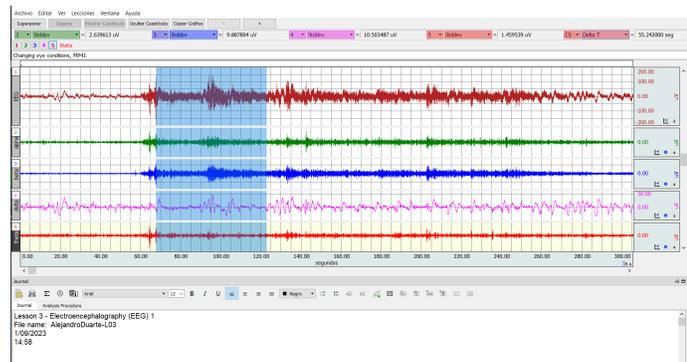


Figura 10: Interfaz del programa de captura de datos BIOPAC.

Dado el alto valor adquisitivo del equipo MP36 y a su limitada portabilidad, ya que es más pesado y ocupa un mayor espacio que el equipo MP41, se decide utilizar este último para la recolección de señales EEG de los sujetos de prueba.

7.1. Recolección de datos mediante BIOPAC-MP41

Como primeras pruebas se utilizó el dispositivo para captar señales EMG, ya que por la posición de los electrodos resulta ser una señal más cómoda de captar. En estas pruebas se observó un comportamiento anormal de la señal, la cual era que la señal se encontraba centrada en cero durante los primeros segundos luego presentaba una compensación negativa. Este problema se presentaba principalmente por la carga de la batería del dispositivo. Al reemplazar la batería ya no se presentó nuevamente este inconveniente.

7.1.1. Conexión con lenguajes de programación

Dado que se pensaba utilizar el dispositivo para recolectar una gran cantidad de señales EEG, se tenía contemplado realizar la conexión con Python. Sin embargo, después de varias investigaciones, solo se pudo encontrar información de cómo conectar los dispositivos MP150, MP160, MP36R, MP35 y MP36 con Python, la cual constaba del uso de una librería desarrollada por Edwin Dalmaijer [27]. No se encontró en ningún sitio algún indicio sobre la conexión del dispositivo MP41 con Python. Por lo tanto, se indagó un poco más acerca de la librería disponible para la conexión de los dispositivos previamente mencionados.

En el archivo README de la librería, especifica que se debe de realizar el uso del archivo mpdev.dll, el cual viene incluido en el paquete de desarrollador BHAPI (BIOPAC Hardware API) ofrecido por BIOPAC. El BHAPI resulta ser una librería que consta de archivos que son necesarios para la comunicación de los dispositivos con programas de terceros como MATLAB y diferentes lenguajes de programación. Por lo que se buscó el paquete de desarrollador para el MP41, en la página web oficial de BIOPAC, sin embargo, este no se pudo encontrar.

Dado esto, se contactó con el soporte de BIOPAC con el fin de saber si tienen un paquete de desarrollador para este equipo y si se ha realizado una conexión exitosa con Python, a lo que respondieron que no han realizado esa conexión y que tampoco tienen y tendrán una API para realizarla.

Por lo mencionado anteriormente se descarta el uso del BIOPAC MP41 con un lenguaje de programación como Python y MATLAB, y se decide utilizar el programa de recolección de señales de BIOPAC como única fuente para la recolección de señales EEG.

7.1.2. Inconvenientes con el uso del equipo en investigaciones

Se utiliza el dispositivo para la recolección de las señales EEG de la primera noche de sueño, sin embargo, a media recolección de datos se descubrió que el software solo puede almacenar hasta 30 minutos de actividad, teniendo que reiniciar la recolección de datos cada

30 minutos. Por lo que se descarta el uso del dispositivo para el estudio del sueño por las dos limitantes:

- No se puede habilitar la conexión con programas de terceros
- No se puede recolectar más de 30 minutos de actividad

Sin embargo, el dispositivo sigue siendo apto para el estudio de concentración y de estado de ánimo.

7.2. Recolección de datos mediante Electro-Cap y la Cyton Board de OpenBCI

Dado que no se puede utilizar el dispositivo BIOPAC MP41 para el estudio del sueño, se recurre a utilizar el Electro-Cap con conexión a la Cyton Board de OpenBCI. Estos dispositivos fueron utilizados en las fases anteriores.

En primera instancia la placa Cyton presentaba un problema, el cual era que el cable de que conectaba la placa al banco de baterías estaba roto por el continuo uso en distintos proyectos. Esto se pudo solucionar fácilmente realizando una soldadura, como se puede observar en la Figura [11](#).



Figura 11: Soldadura de cable de voltaje positivo de la Cyton Board al banco de baterías.

Posteriormente, se realizaron las pruebas de conexión del Electro-Cap con la placa Cyton, descargando el programa desarrollado por la empresa OpenBCI, los *drivers* necesarios y realizando la conexión del Electro-Cap con la placa teniendo como guía una tabla que describía la posición del electrodo y el color de cable al que estaba conectado publicado en una de las fases anteriores.

Las pruebas no estaban teniendo éxito, ya que a pesar de que el sujeto de prueba apretaba los dientes, no se miraba ninguna varianza en la señal EEG mostrada por la interfaz del

programa de OpenBCI. Por lo que se realizó una prueba de continuidad entre electrodos y pines del conector para verificar que si haya una conexión entre sí, resultando ser que la tabla provista contenía datos erróneos. Por lo tanto, se realizó la tabla con la información correcta. Otro factor que también estaba afectando la correcta visualización de los datos fue que no se tenía conocimiento de que en la interfaz se debía de realizar una configuración de hardware hasta que se realizó una mayor exploración dentro de la interfaz. Una vez conectado el Electro-Cap adecuadamente a la Cyton Board, con la configuración de hardware correspondiente, se empezaron a observar señales que sí estaban acorde con los movimientos de mandíbula, la apertura y el cierre de párpados del sujeto, como se puede observar en la Figura 12.

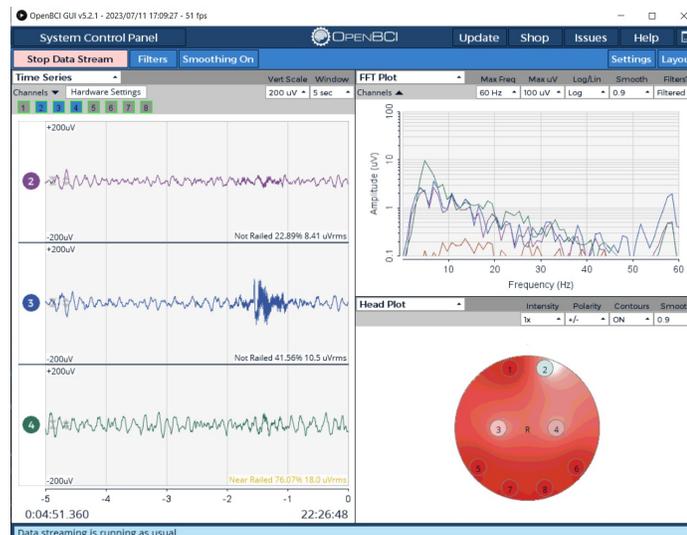


Figura 12: Obtención de datos mediante interfaz de OpenBCI.

Como siguiente paso se realizó la conexión de la placa Cyton con Python, continuando con el código realizado en la fase anterior 9. Al graficar los datos obtenidos en Python se visualizaba que estos no reflejaban los movimientos realizados por el sujeto de prueba, como el rechinar de dientes, o la apertura y cierre de los párpados. A pesar de realizar múltiples pruebas no se consiguió que los datos estuvieran a corde con el movimiento que realizaba el sujeto de prueba. Como la interfaz de OpenBCI presentaba la característica de poder almacenar los datos en un archivo de texto, se realizó un ajuste al código en Python para leer este archivo y procesar los datos, por lo tanto los datos no se procesaron en tiempo real.

Definición de experimentos para el estudio de sueño, concentración y estado de ánimo, y extracción de datos

Para realizar la extracción de datos de los sujetos de prueba es necesario definir en que condiciones estarán sometidos los sujetos de prueba, ya sea para el estudio de sueño, concentración o estado de ánimo. De esta manera se tiene una estandarización entre todos los sujetos de prueba para evitar la mayor cantidad posible de variables que puedan alterar el estudio y así se pueda observar una tendencia. A continuación se presenta el protocolo y los experimentos que se llevaron a cabo.

8.1. Experimentos de sueño

Para extraer los datos de sueño se definieron algunos parámetros que los sujetos de prueba deben de cumplir:

- **Contar con mayoría de edad sin pertenecer a la tercera edad:** Se excluye a todas las personas que sean de menor de edad ya que deben de ser conscientes plenamente de que están perteneciendo a un grupo de investigación, al igual que se excluyen a las personas de tercera edad ya que tienden a presentar una mayor probabilidad de sufrir anomalías en el sueño.
- **No consumir alcohol en el mismo día en el que se va a realizar la prueba:** Se tiene como control el consumo de alcohol al sujeto de prueba, ya que el alcohol afecta directamente el ciclo del sueño de las personas. Además que el consumo de esta sustancia suele ser ocasional.
- **No consumir café durante las últimas cinco horas antes de dormir:** El sujeto

de prueba debe de evitar el consumo de café mínimo cinco horas antes de dormir, a menos que tenga la costumbre de tomar esta bebida todas las noches.

- **No sufrir de ninguna enfermedad mental:** El sujeto de prueba no debe de padecer de ninguna enfermedad mental ya que en este estudio no se evalúa si los pulsos binaurales pueden ayudar o empeorar la condición de salud de estas personas. Además, las personas con alguna enfermedad mental presentan anomalías en el EEG lo cual incrementa el ruido en la información.

Adicionalmente como investigador se debe de cumplir con algunos parámetros:

- **Mantener el mismo ambiente durante las distintas noches de recolección de datos:** Como investigador se procura que el ambiente en el que se encuentra el sujeto de prueba se encuentre en el mismo ambiente en las distintas noches, de manera que este no juegue un papel importante en el estudio del sueño.
- **Procurar que el sujeto de prueba cumpla con las condiciones mencionadas:** El investigador debe de procurar que el sujeto de prueba cumpla con los requisitos establecidos, de esa manera la investigación no tendrá variables que perjudiquen al estudio.

Establecidos los parámetros a cumplir en el estudio, se contemplaron tres noches de sueño por sujeto. La primera noche sirve como control, en esta noche no se reproducirán los pulsos binaurales, y las siguientes dos noches sirven para conocer si hubo un impacto producido por los pulsos.

8.1.1. Pulsos binaurales reproducidos

Durante la realización de esta investigación se contó con trabajo colaborativo de una colega, la cual tenía como principales objetivos el desarrollo del módulo de pulsos binaurales, por lo cual debía de desarrollar los audios reproducidos en cada uno de los estudios. En la sección 8.5 se hablará más a detalle del trabajo colaborativo.

Los pulsos binaurales reproducidos para el estudio del sueño están compuestos por seis fases y cinco ciclos, teniendo como un total de 8 horas y 4 minutos de reproducción de pulsos binaurales. La duración de cada fase dentro de cada ciclo se encuentra en el Cuadro 1. Dado que cada fase del sueño presenta diferentes ondas cerebrales se utilizan pulsos binaurales específicos para cada una de las fases, estos están representados en el Cuadro 2.

Ciclo	Etapa N1	Etapa N2	Etapa N3	Etapa N4	Pre-etapa REM	Etapa REM
1	10	10	15	20	4	15
2	8	26	10	25	4	22
3	7	30	8	27	4	24
4	6	33	5	32	3	26
5	5	35	5	36	2	27

Cuadro 1: Cantidad de tiempo en minutos de cada una de las etapas según el ciclo [28]

Etapa	Freq. izquierda	Freq. derecha	Pulso binaural
N1	250	258	8
N2	250	256	6
N3	250	253	3
N4	250	252	2
REM	250	265	15

Cuadro 2: Frecuencias para cada fase del sueño en Hertz [28].

8.2. Pruebas de concentración

Para las pruebas de concentración se contemplaron dos pruebas. La primera de ellas consiste en la realización de operaciones matemáticas aritméticas mentalmente y la segunda consiste en reconocer tres figuras a lo largo de una serie de figuras.

Cada una de estas pruebas tiene un propósito. La primera prueba tiene como propósito distinguir el estado de atento e inatento, teniendo como las pruebas aritméticas mentales como estimulador ya que estas requieren un elevado nivel de concentración tal y como se indica en la siguiente base de datos [29], al igual que en múltiples estudios se encontró que esta actividad es un gran estimulador de la actividad cerebral como se puede leer en [30] y en [31]. De esta manera se obtuvieron las señales para entrenar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado. La segunda prueba tiene como propósito indagar si en primera instancia se nota una diferencia de concentración con y sin los pulsos, dado que la prueba en cuestión marca un puntaje de concentración dependiendo de los resultados obtenidos.

Adicionalmente se recolectaron datos de un sujeto de prueba haciendo una actividad cotidiana, como estudiar o hacer tarea, durante treinta minutos, sin y con pulsos. De esto se aplicó un algoritmo de agrupamiento con la información recolectada para validar si los pulsos binaurales tienen un efecto directamente en las ondas cerebrales.

El procedimiento que se utilizó para cada una de las pruebas se presenta a continuación.

8.2.1. Prueba de concentración con operaciones aritméticas mentales

Se repitió la prueba tres veces con variaciones específicas en cada una de ellas. Cada una de las pruebas tuvo una duración de cinco minutos. Para la realización de la prueba se utilizó la página web <https://olimato.it/mat> [32] que contiene una prueba de operaciones matemáticas simples como suma, resta, multiplicación y división. Un ejemplo se puede observar en la Figura 13. La prueba presenta tres dificultades, se tomó la dificultad media como estándar para asegurar que las personas puedan resolver las operaciones sin pasar demasiado tiempo en una única operación.

- **Primera prueba:** Se toma un minuto en el cual el sujeto de prueba no realiza ninguna actividad. En los siguientes tres minutos el sujeto de prueba realiza las operaciones aritméticas mentalmente. En el siguiente minuto el sujeto no realiza nada.
- **Segunda prueba:** Idéntica a la primera prueba con la variación de que, en el último

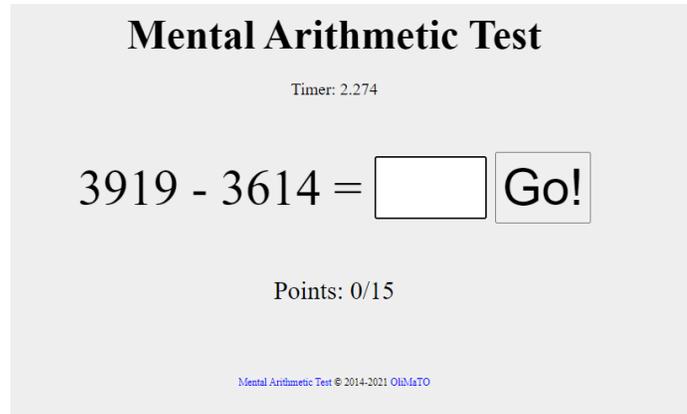


Figura 13: Prueba aritmética mental [32].

minuto, se reproducen los pulsos binaurales para validar si estos tienen un efecto relajante en el sujeto de prueba.

- **Tercera prueba:** Idéntica a la primera prueba con la variación de que, durante los tres minutos en el que el sujeto de prueba realiza las operaciones aritméticas, se reproducen los pulsos binaurales para validar si estos tienen un efecto en la concentración del sujeto de prueba.

Algunos de los sujetos de prueba que se sometieron a las pruebas se sintieron frustrados después de realizar la primera prueba ya que se les hizo complicada de realizar. Por ello, se tomaron los datos registrados en el último minuto para realizar una clasificación entre dos estados de ánimo frustrado y relajado.

8.2.2. Prueba de reconocimiento de tres figuras en una serie de figuras

Para la realización de la prueba se utilizó la página web https://metodorf.com/tests/bourdon/tuluz_peron.php [33], específicamente la prueba de Toulouse-Pieron para adultos [14]. Esta prueba tiene una duración aproximada de 15 minutos. En ella se debe de identificar tres figuras a lo largo de una serie de elementos que se encuentran horizontalmente, si el elemento corresponde a una de las tres figuras mostradas este se debe de marcar, caso contrario se debe de subrayar (marcar el cuadro que se encuentra debajo del elemento). Para marcar los elementos dentro de la serie se cuenta con treinta segundos, al pasar este tiempo se habilita una segunda serie y la serie anterior queda inhabilitada.

Esta prueba permite la evaluación de la calidad y la voluntad de concentración de personas mayores de 17 años, los cuales calcula mediante dos métricas. El primero de ellos es la velocidad de procesamiento el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{N}{c}$$

donde V es la velocidad de procesamiento, N es el número de elementos procesados y c es el número de series. La segunda característica es la precisión de procesamiento y es

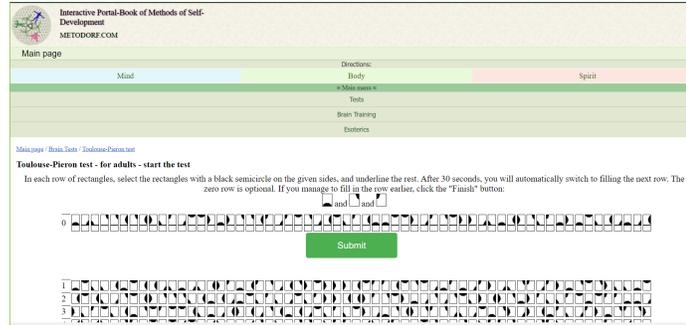


Figura 14: Prueba de concentración Toulouse-Pieron [33].

calculado mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{(N - A)}{N}$$

donde A es el número promedio de los errores cometidos (tanto en seleccionar un elemento que no pertenecía, como el no haberlo seleccionado y que este sí pertenecía a las figuras establecidas).

Los resultados de los índices anteriormente mencionados describen la concentración de la persona mediante una escala de índices, los cuales se describen en el Cuadro 3.

Métrica	Grado de concentración				
	Muy Bajo	Bajo	Promedio	Alto	Muy Alto
Velocidad de procesamiento	0-12	13-22	23-31	32-47	>48
Precisión de procesamiento	<0.89	0.90-0.91	0.92-0.95	0.96-0.97	0.98-1

Cuadro 3: Nivel de concentración según las métricas de la prueba de Toulouse-Pieron [33].

El resultado obtenido de estas pruebas también fueron útiles en un estudio que se realizó en paralelo a este trabajo del cuál se hablará en más adelante [28].

8.3. Pruebas de estado de ánimo

Para el estudio del estado de ánimo se contempló la recolección de datos mediante la aplicación de dos pruebas. La primera de ellas es mediante la recolección de datos del minuto inmediatamente después de haber terminado las pruebas aritméticas mentales, prueba utilizada para el estudio de concentración. Mientras que en la otra prueba se utiliza la reproducción de diferentes vídeos y lecturas para poder validar si los pulsos binaurales producen algún cambio en las señales EEG, de esta prueba se dará más detalle a continuación.

8.3.1. Prueba de estado de ánimo con inducción mediante vídeos y lecturas cortas

Esta prueba consiste en la reproducción de diferentes vídeos para producir diferentes estados de ánimo, entre ellos alegría, frustración y tristeza. Para seleccionar dichos vídeos

se realizó una recopilación de varios vídeos que producen los diferentes estados de ánimo y en conjunto con la investigadora del mismo estudio [28] se seleccionaron los vídeos que produjeran de mejor manera los estados de ánimo mencionados [4]. Cabe destacar que la selección de estos vídeos no tuvo un estudio estadístico que sustente que efectivamente estos produzcan los estados de ánimo previamente mencionados ya que realizar dicho estudio está fuera del alcance de este trabajo, además que la importancia del mismo recae en verificar si se percibe un cambio en las señales bioeléctricas del cerebro.

Estado de ánimo	Vídeo
Alegría	Fragmento de la película Norbit - escena de Rasputia en el tobogán.
	Mini aventuras de Winnie the Pooh - La gimnasia de Pooh
Frustración	Fragmento de episodio de la serie animada Bob Esponja - Las Crónicas del Autobús.
Tristeza	Fragmento de la película Marley y Yo - escena de la muerte de Marley
	Fragmento de la película Up: una avventura de altura - introducción de la película, la historia de Carl y Ellie.

Cuadro 4: Vídeos para producir diferentes estados de ánimo.

Dado que no se puede reproducir pulsos binaurales mientras se está reproduciendo los vídeos, es necesario utilizar otro medio para incitar los mismos estados de ánimo sin necesidad de escuchar música o un diálogo por lo que se recurrió a la lectura. Para ello se recolectó una recopilación de varios cuentos e historias cortas que produzcan las emociones anteriormente descritas. Para la selección de las lecturas nuevamente se tomó el criterio personal propio y de la investigadora que trabaja en un trabajo similar con el mismo estudio [28]. Al igual que en los vídeos, no se tiene una certeza de que las lecturas efectivamente produzcan los estados de ánimo mencionados, sin embargo, si se experimentó estos estados de ánimo desde el punto de vista del investigador. Las lecturas seleccionadas se encuentran en el Cuadro [5].

Estado de ánimo	Lectura
Alegría	Andrea y Giovanni - Roberto Fontanarrosa
Frustración	El ruiseñor y la rosa - Oscar Wilde
Tristeza	La niña de los fósforos - Hans Christian Andersen

Cuadro 5: Lecturas para producir diferentes estados de ánimo.

8.4. Protocolo de investigación

Siguiendo con el protocolo establecido en la fase anterior, se realizan adaptaciones al mismo para incluir en este el estudio de concentración y estado de ánimo, por tanto, se realizó el ajuste pertinente a los consentimientos informados para los estudios abarcados (sueño, concentración y estado de ánimo). También se detalla cómo se debe de utilizar cada uno de los dispositivos de recolección de señales: como posicionar los electrodos, el uso de gel conductor, conexión de electrodos con el dispositivo, conexión del dispositivo a la computadora y como utilizar el software de cada uno para realizar la recolección de datos.

Asimismo se dio detalle de cómo realizar cada una de las investigaciones, el propósito de cada una de las pruebas e información relevante de los algoritmos aplicados y los estudios estadísticos realizados en el trabajo colaborativo.

Cabe recalcar que a todos los sujetos de prueba que participaron en cualquiera de los estudios presentados se les implementó el consentimiento informado. Dentro del consentimiento informado se especifica lo siguiente:

- La información sobre la investigación.
- El propósito y objetivo del estudio.
- El procedimiento.
- El uso y la confidencialidad de los datos.
- Los riesgos poco frecuentes asociados a la participación.
- Beneficios relacionados a la participación.
- La voluntariedad.
- La declaración de consentimiento de participación.
- La declaración del encargado de la investigación.
- La firma y contacto del participante, del investigador y del asesor de la investigación.

Se puede observar el consentimiento informado como el protocolo elaborado en la sección de anexos.

8.5. Trabajo colaborativo

Durante la elaboración de esta investigación se llevó a cabo una investigación paralela cuyo nombre es “Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad de sueño de las personas” [28]. Este estudio tiene como objetivo realizar mejoras en el módulo generador de pulsos binaurales el cual se llevó a cabo en el lenguaje de programación de *Python*. Además de ello realiza un estudio estadístico cualitativo y cuantitativo de la percepción que tienen las personas al estar expuestas a pulsos binaurales y como estos puedan afectarlos o beneficiarlos.

Del estudio mencionado se obtiene toda retroalimentación por parte de las personas que participaron en este estudio.

Aprendizaje automático aplicado al estudio del sueño, concentración y estado de ánimo

Una vez obtenidos los datos se procede a realizar el entrenamiento de los algoritmos de aprendizaje automático. Para ello se realizó una investigación de las características a usar en cada uno de los estudios. Además, se exploró el uso de diferentes técnicas de pre-procesamiento de datos para el entrenamiento de los algoritmos de aprendizaje automático aplicados en los estudios de estado de ánimo y concentración, en el caso del estudio del sueño, el pre-procesamiento de datos no es necesario ya que el algoritmo utilizado, bosque aleatorio, no lo necesita tal y como se indica en [34] y [35]. Estas técnicas son:

- **Normalización de datos:** realiza un escalado para cada uno de los datos de manera que tengan una norma unitaria. De esta manera cada dato es escalado por un número diferente (por el inverso de su longitud). Esta normalización es regularmente utilizada cuando solo la dirección de los datos importan y no la longitud del vector de la característica [35].
- **Escalado estandarizado:** este pre-procesamiento de datos asegura que para cada característica se obtenga como promedio el valor de 0 y una varianza de 1, brindando a todas las características la misma magnitud [35].
- **Escalado de mínimo-máximo:** este desplaza las características de los datos para que se encuentre en valores entre 0 y 1. Para datos de dos dimensiones hace que los valores estén contenidos en un rectángulo teniendo valores en el eje x y en el eje y entre 0 y 1 [35].

9.1. Entrenamiento del modelo de aprendizaje automático para el estudio del sueño

De la fase anterior se pudo obtener los archivos que contienen todas las características de cada una de las épocas de las señales EEG de la base de datos de *Physionet*. Específicamente se utilizó la base de datos expandida *Sleep-EDF* realizada por Bob Kemp [36]. Esta base de datos se compone por la recolección de señales de 82 sujetos de prueba, de los cuales hay un registro de dos noches por sujeto, de la cual contiene señales EEG, EOG, EMG de la barbilla y marcadores de eventos. Cada noche de sueño tiene su correspondiente hipnograma, marcados por técnicos bien entrenados. Se descartaron los datos de los siguientes sujetos de prueba: 13, 36, 39, 52, 68, 69, 78 y 79, debido a falta de una noche de sueño o bien a la falta del hipnograma. Para el estudio, solamente se utilizaron las señales EEG, ya que no se cuentan con electrodos del dispositivo utilizado en el estudio para obtener señales EOG y EMG simultáneamente que puedan ayudar en la clasificación de las fases de sueño.

Luego de obtener las señales de sueño, se segmentan las señales en épocas, con una duración de 10 segundos en cada una de ellas. De cada época se extrajeron las características mencionadas en el trabajo de Alegría [9], mediante la librería de Python *PyEEG*. Estas se encuentran listadas en el Cuadro 6. Al realizar el entrenamiento del algoritmo bosque aleatorio (*Random Forest*) se obtiene la siguiente matriz de confusión mostrado en la Figura 15.

Nombre	Función
Detrended Fluctuation Analysis (DFA)	dfa()
Higuchi Fractal Dimension (HFD)	hfd()
Fisher Information	fisher_info()
Singular Value Decomposition entropy (SVD entropy)	svd_entropy()
Petrosian Fractal Dimension (PFD)	pfd()
Potencia normalizada de la banda Delta	bin_power()
Potencia normalizada de la banda Theta	bin_power()
Potencia normalizada de la banda Alpha	bin_power()
Potencia normalizada de la banda Beta	bin_power()
Hjorth Mobility	hjorth()
Hjorth Complexity	hjorth()

Cuadro 6: Características usadas en el clasificador de fases de sueño desarrollado en la fase anterior [9].

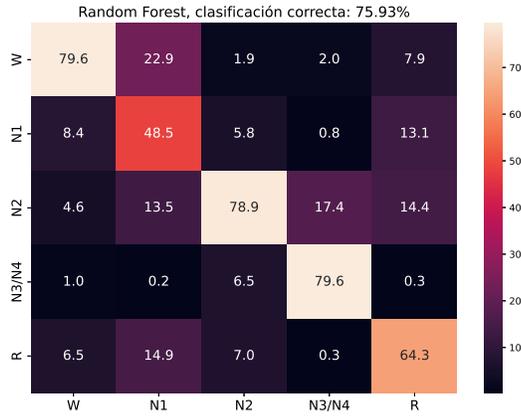


Figura 15: Matriz de confusión realizado en la fase anterior [9].

Al realizar algunas pruebas en el uso de otras características, como la potencia no normalizada de unas bandas, e ir variando los parámetros del clasificador, se pudo obtener un mejor resultado en la clasificación obteniendo la matriz de confusión mostrada en la Figura 16. Para encontrar las características a utilizar, se usó el algoritmo Eliminación de Características Recursivas (*Recursive Feature Elimination*), el cual funciona mediante el entrenamiento del algoritmo de aprendizaje automático, en este caso bosque aleatorio, con todas las características postuladas, del cual se obtiene la importancia de cada una de las características, de manera que las menos importantes sean descartadas. Este algoritmo se repite recursivamente hasta encontrar una cantidad de características deseada. Por ello se desarrollo un código para iterar la cantidad de características, de ello se obtuvo que la cantidad de características con el que mejor rendimiento del algoritmo se obtiene es de 11. Estas características se presentan en el Cuadro 7.

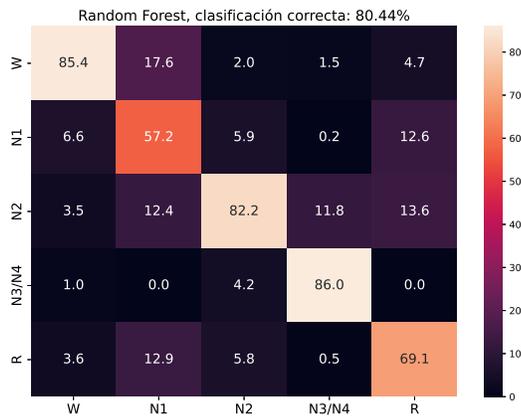


Figura 16: Matriz de confusión utilizando otras características y parámetros del clasificador ajustados.

Nombre	Función
Higuchi Fractal Dimension (HFD)	hfd()
Singular Value Decomposition entropy (SVD entropy)	svd_entropy()
Petrosian Fractal Dimension (PFD)	pdf()
Potencia Delta	bin_power()
Potencia Theta	bin_power()
Potencia Beta	bin_power()
Potencia Delta normalizada	bin_power()
Potencia Theta normalizada	bin_power()
Potencia Alpha normalizada	bin_power()
Potencia Beta normalizada	bin_power()
Hjorth Mobility	hjorth()

Cuadro 7: Características implementadas en el clasificador del sueño.

9.2. Clasificador de concentración

Tras la realización de varias investigaciones, se encontró un artículo el cual describe la realización de un clasificador para describir si un estudiante se encuentra atento o inatento durante una clase virtual de manera que el educador pueda llamar la atención de aquellos estudiantes que no están tan concentrados. En el artículo se utilizan varios clasificadores, el mejor de ellos fue el SVM, y se descubrió que las bandas que más registran la actividad de atención fueron las bandas Alpha y Beta [24].

Por lo anteriormente mencionado se empezó a realizar un algoritmo SVM en Python, con las características de potencia de Alpha y Beta, tanto las originales como las normalizadas, mediante la librería *PyEEG*. Sin embargo el clasificador presentó inconvenientes al momento de realizar la clasificación. Por ello se experimentó el uso de otro lenguaje, MATLAB, utilizando las características ya encontradas mediante el lenguaje de Python. Con ello se consiguió un mejor resultado, siendo el Gaussiano el mejor *kernel*, tal y como se puede apreciar en la Figura 18a, Figura 18b y Figura 18c. Además de realizar el clasificador SVM, se siguió experimentando con el uso de otros clasificadores, con lo cual se realizó un clasificador de bosque aleatorio (*Random Forest*) en Python, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 17.

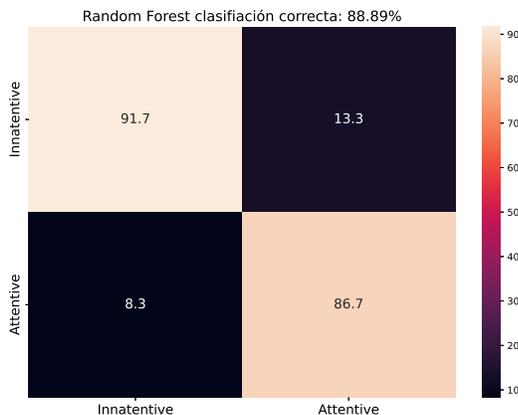


Figura 17: Matriz de confusión del clasificador de bosque aleatorio realizado en Python.

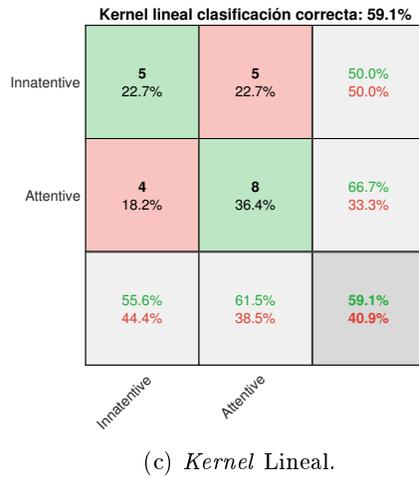
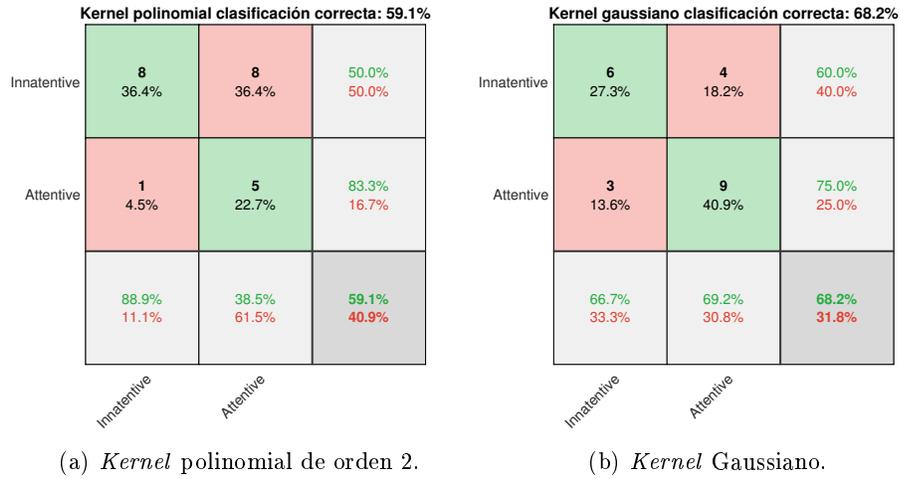


Figura 18: Matriz de confusión del clasificador SVM realizado en MATLAB con diferentes *kernels*

Para verificar si los pulsos binaurales tienen un efecto directo sobre el cerebro, se aplicó un algoritmo de agrupamiento. Este algoritmo realiza una cierta cantidad de agrupaciones entre todos los datos que comparten la mayor cantidad de similitudes entre sí. Se aplicó este algoritmo al sujeto realizando una actividad cotidiana como estudiar o realizar tareas de una duración aproximada de treinta minutos, con y sin pulsos. Dada la naturaleza de la prueba, y la poca cantidad de sujetos de prueba con disponibilidad de 30 minutos, este estudio tendrá en cuenta una menor cantidad de sujetos de prueba.

De los clasificadores mostrados, el que mejor comportamiento tuvo fue el clasificador Random Forest, siendo mejor que el clasificador SVM realizado en MATLAB, por lo que este es el que se utilizó para realizar el estudio de concentración.

9.3. Algoritmos de agrupamiento para el estudio del estado de ánimo

Los datos que fueron evaluados son las señales del minuto inmediatamente después realizada la prueba de concentración de operaciones aritméticas mentales, dado que esta prueba también conduce un estado de ánimo de estrés o alerta tal y como se menciona en el artículo [30] y [31]. Por otra parte, se analizaron señales de diferentes estados de ánimo, como alegría, tristeza y frustración, teniendo como estímulo la reproducción de diferentes vídeos los cuales se encuentran listados en el Cuadro 4.

Dado que la clasificación de estados de ánimo resulta ser más complicado de realizar con señales EEG, se aplican algoritmos de agrupamiento tanto en las señales sin presencia de pulsos binaurales como en presencia de estos. Para ello se utiliza entropía diferencial (DE por sus siglas en inglés) y la potencia de la banda *gamma* como las características de las señales. Estas son las más relevantes según el artículo [37] y [38] para poder diferenciar los estados de ánimo.

- **Coefficiente de silueta:** esta se calcula usando distancia media entre grupo (a) y la distancia media al grupo más cercano (b) por cada una de la muestras. La ecuación para el cálculo es el siguiente:

$$\text{Silhouette Coeff.} = \frac{(b - a)}{\max(a, b)}$$

El coeficiente tiene un valor entre -1 a 1, siendo el valor -1 un indicativo de un mal agrupamiento, el valor de 0 indica que los grupos se sobreponen y el valor de 1 indica un buen agrupamiento [39].

- **Coefficiente de Davies-Bouldin:** este se define como la similitud entre cada uno de los grupos. El valor se obtiene por el promedio de la similitud de todos los grupos. Entre menor sea el valor del coeficiente mejor es el agrupamiento de datos [39]. Para calcular el coeficiente se realiza la siguiente ecuación:

$$\text{Davies-Bouldin Coeff.} = \frac{1}{c} \sum_{n=1}^c \max_{j \neq i} \frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)}$$

Donde c es el número de grupos, c_i es el centroide del grupo i , $d(c_i, c_j)$ es la distancia entre centroides de dos grupos y σ_i es la distancia promedio de todos los datos en el grupo i de c_i .

- **Coefficiente de Calinski-Harabasz:** este mide la dispersión dentro de los grupos y la dispersión entre los grupos [39]. Esto se realiza mediante la suma de las distancias entre datos y los centros de cada grupo. Esto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\text{C.H. Coeff.} = \frac{\text{rastros}(B_c)}{\text{rastros}(W_c)} * \frac{n_E - c}{c - 1}$$

. Donde c es el número de grupos, n_E es el tamaño del conjunto de datos E , $\text{rastros}(B_c)$ es el rastro de la matriz de dispersión entre grupos y $\text{rastros}(W_c)$ es el rastro de la matriz

de dispersión en el grupo. A su vez B_c y W_c están definidos como:

$$W_c = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{C_i} (x_j - c_i)(x_j - c_i)^T$$

$$B_c = \sum_{i=1}^c n_i (c_i - c_E)(c_i - c_E)^T$$

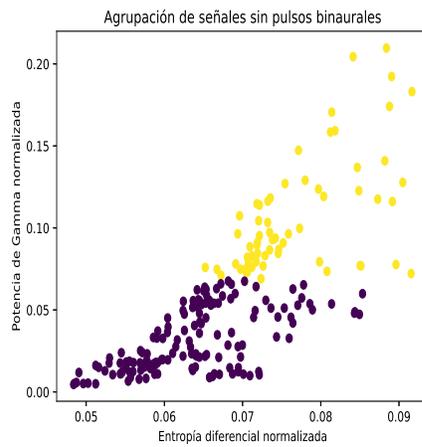
Donde c es el número de los grupos, C_i es el conjunto de datos en el grupo i , n_i es el número de puntos en el grupo i y c_E es el centroide global de los datos E .

Utilizando las métricas anteriormente mencionadas como evaluadores de desempeño y las diferentes técnicas de pre-procesamiento de datos se obtiene en el Cuadro 8 y las Figuras 19, 20 y 21.

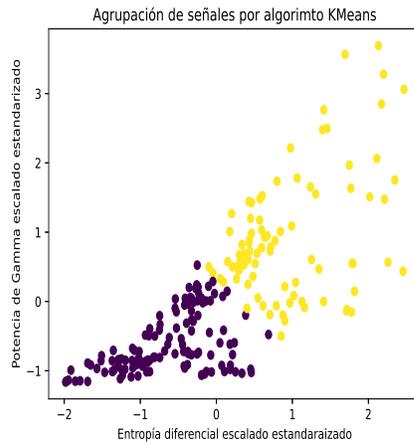
Algoritmo	Pre-procesamiento	Puntuaciones de las métricas		
		Silhouette	Davies-Bouldin	CHI
KMeans	Normalizado	0.58	0.63	376.85
	Escalado Estandarizado	0.50	0.74	298.99
	Escalado Mínimo-Maxímo	0.51	0.74	301.31
Agglomerative	Normalizado	0.61	0.53	269.81
	Escalado Estandarizado	0.50	0.73	295.47
	Escalado Mínimo-Máximo	0.51	0.74	300.35
DBSCAN	Normalizado	0.52	0.73	332.03
	Escalado Estandarizado	0.32	1.45	121.27
	Escalado Mínimo-Máximo	0.51	0.74	300.35

Cuadro 8: Puntuaciones de los distintos algoritmos aplicados con diferentes técnicas de pre-procesamiento de datos.

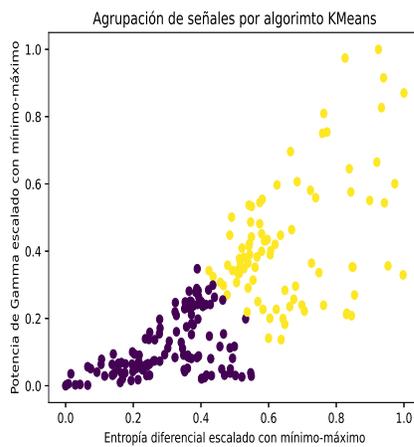
A pesar de que el algoritmo DBSCAN no presente puntuaciones elevadas en las métricas, es el algoritmo que parece tener más sentido al momento de agrupar los datos, sobre todo porque este algoritmo toma en cuenta que dentro de los datos existe ruido que puede interferir dentro de las agrupaciones. Por ello, a pesar de presentar las peores métricas de todos los algoritmos y técnicas de pre-procesamiento evaluadas, se escoge utilizar el algoritmo DBSCAN con un pre-procesamiento de escalado estandarizado. Esto se debe principalmente por las agrupaciones que se observa en la Figura 21b, las cuales se aprecia que los datos contenidos entre sus grupos tienen una mayor relación entre sí que en los demás algoritmos/técnicas de pre-procesamientos. Además, en el libro de Müller y Guido [35] se expresa que las métricas internas, como las expuestas en esta investigación, no resultan ser tan robustas y es por ello que en este libro se aconseja realizar una inspección manual que utilizar las métricas para decidir el algoritmo a utilizar.



(a) Normalizado.

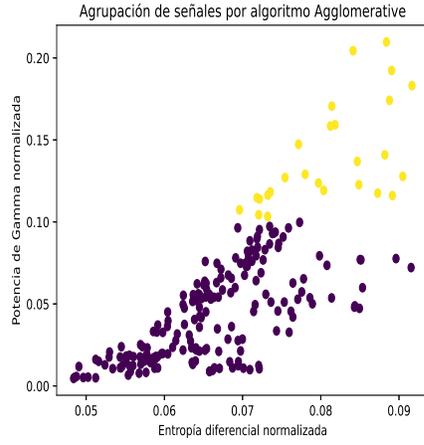


(b) Escalado estandarizado.

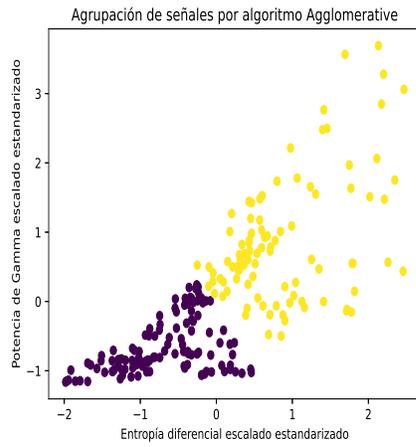


(c) Escalado mínimo-máximo.

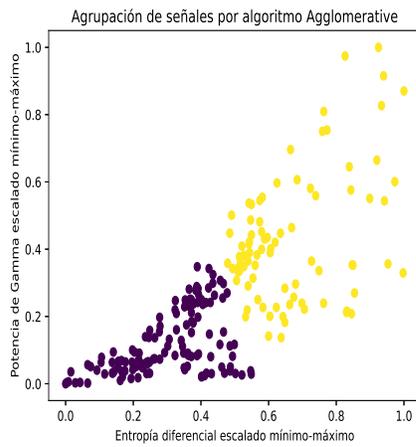
Figura 19: Algoritmo KMeans con diferente pre-procesamiento.



(a) Normalizado.

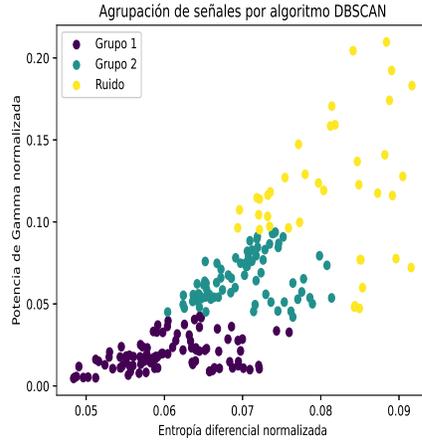


(b) Escalado estandarizado.

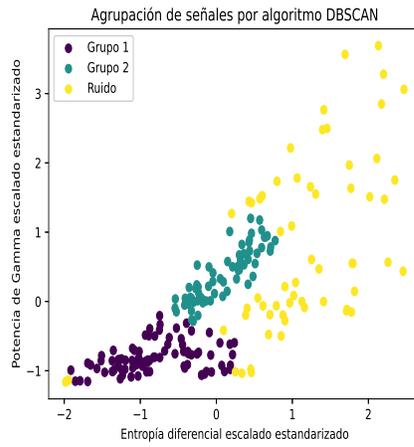


(c) Escalado mínimo-máximo.

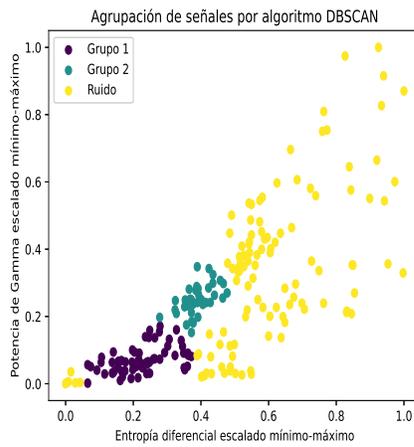
Figura 20: Algoritmo Agglomerative con diferente pre-procesamiento.



(a) Normalizado.



(b) Escalado estandarizado.



(c) Escalado mínimo-máximo.

Figura 21: Algoritmo DBSCAN con diferente pre-procesamiento.

Estudio cuantitativo del impacto de los pulsos binaurales

Al obtener los algoritmos ya entrenados se pueden aplicar las señales, con sus características respectivas, para predecir el estado en el que se encuentran las personas. En las siguientes secciones se explicará a detalle los resultados obtenidos en cada uno de los estudios.

10.1. Estudio del sueño

Con la ayuda del clasificador realizado en el capítulo anterior, se realizó la clasificación de cada una de las noches de cada sujeto. Para realizar la clasificación se realizó una serie de pasos, el primero de ellos fue extraer los datos recolectados de las noches de sueño y segmentar las señales cada 30 segundos, luego se realizó un remuestreo de la señal para que este coincida con la frecuencia de muestreo de las señales extraídas de la base de datos. Posteriormente, se centró la señal, mediante la resta de los valores de la señal y el promedio de la misma, una vez hecho esto se extrajeron las características especificadas en el Cuadro 7. Finalmente, se utilizó el clasificador realizado para predecir el estado en el que se encontraba el sujeto de prueba. Este proceso se puede observar en la Figura 22.

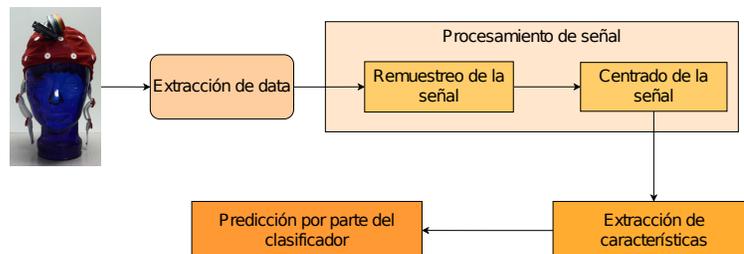


Figura 22: Flujo de extracción de características para la clasificación de las señales.

10.1.1. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los sujetos de prueba. Se presenta tanto el género y la edad del sujeto de prueba. Posteriormente se presenta un cuadro con el número total de épocas en cada una de las fases de sueño. Cada una de las épocas tiene una duración de 30 segundos. Cabe destacar que entre mayor sea el número de épocas en la tercera y cuarta fase del sueño (N3/N4) habrá una mayor calidad de sueño, dado que en estas fases se produce el mejor descanso [3].

Por la cantidad de tiempo de cada noche de sueño, se puede obtener la cantidad de ciclos de sueño que el sujeto de prueba tuvo que experimentar durante la noche. Del Cuadro [1] se puede obtener la cantidad de épocas ideales en cada una de las fases del sueño según la cantidad de ciclos que el sujeto de prueba tuvo que experimentar a lo largo de cada una de sus noches, obteniendo así la métrica de una noche ideal, esto se representa en el Cuadro [9]. A pesar de que en la primera noche no se reproducen pulsos binaurales, se toma en cuenta la métrica representada en el Cuadro [9] para discernir si efectivamente los pulsos binaurales mejoran la calidad de sueño.

Fases de sueño	Ciclos de sueño				
	1	2	3	4	5
N1	20	36	50	62	72
N2	20	72	132	198	268
N3/N4	70	140	210	284	366
REM	30	74	122	174	228
Duración noche (min)	70	161	257	359	467

Cuadro 9: Cantidad de épocas por experimentar en cada fase de sueño según la cantidad de ciclos de sueño.

Para comprender mejor este análisis se toma como ejemplo la noche 1 del sujeto 1. La primera noche del sujeto 1 tuvo una duración de 449 min, por lo cual estuvo más cercano a experimentar una cantidad de 5 ciclos de sueño según el Cuadro [9], por lo tanto se toma en cuenta la cantidad de épocas ideales que debe de presentarse en cada una de las fases del sueño al cumplir con los 5 ciclos de sueño. Esto se ve representado en el Cuadro [10].

Al obtener la cantidad de épocas clasificadas en cada noche de sueño se realiza una comparación con la cantidad de épocas ideal que se debieron obtener en cada noche de sueño, del cual se obtiene un porcentaje de error, este se calcula de la siguiente manera:

$$Error = \left| \frac{Epocas\ clasificadas\ por\ fase - Epocas\ ideales\ por\ fase}{Epocas\ ideales\ por\ fase} \right| * 100$$

Estos se presentan en el cuadro que está a continuación de las épocas clasificadas de cada una de las noches de cada sujeto.

Luego se presentan un gráficos de la evolución del sueño mientras transcurría cada una de las noches. Primero se muestran dos segmentos de las noches para comprender como es que se iban clasificando las épocas en cada una de las fases, cabe recalcar que una época no puede estar clasificada en dos fases a la vez. Luego se presenta la primera y segunda parte de las noches. Se presentan los gráficos mencionados para cada sujeto de prueba.

Sujeto 1:

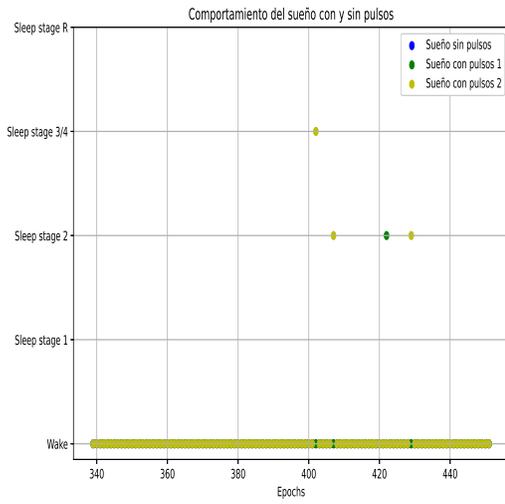
- Género: masculino
- Edad: 24 años

Fase	Noche 1	Noche 2	Noche 3	Ideal noche 1	Ideal noche 2	Ideal noche 3
Despierto	885	794	556	-	-	-
N1	0	0	1	72	62	50
N2	12	3	2	268	198	132
N3/N4	0	0	1	366	284	210
REM	1	0	0	228	174	122
Duración	449	399	280	467	359	257

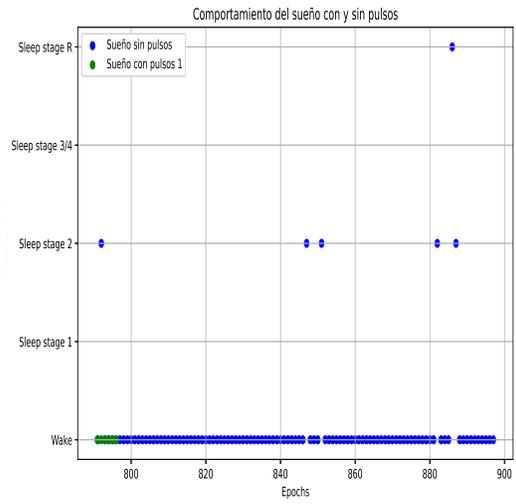
Cuadro 10: Épocas clasificadas e ideales por fase de sueño por noche del sujeto 1, la duración de cada noche está en minutos.

Fase	Error noche 1	Error noche 2	Error noche 3
N1	100 %	100 %	98 %
N2	95.52 %	98.48 %	98.48 %
N3/N4	100 %	100 %	99.52 %
REM	99.56 %	100 %	100 %
Error general	98.77 %	99.62 %	99 %

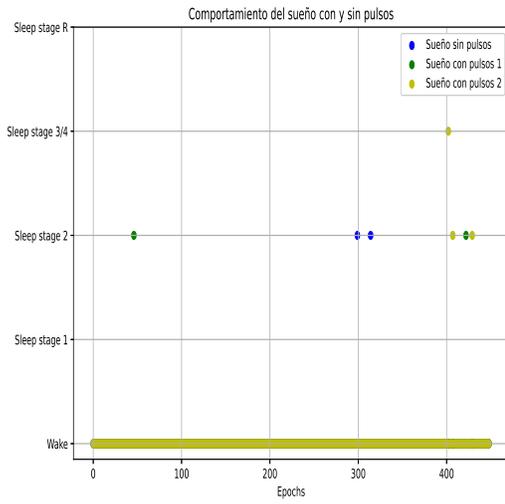
Cuadro 11: Error por fase y noche de sueño del sujeto 1.



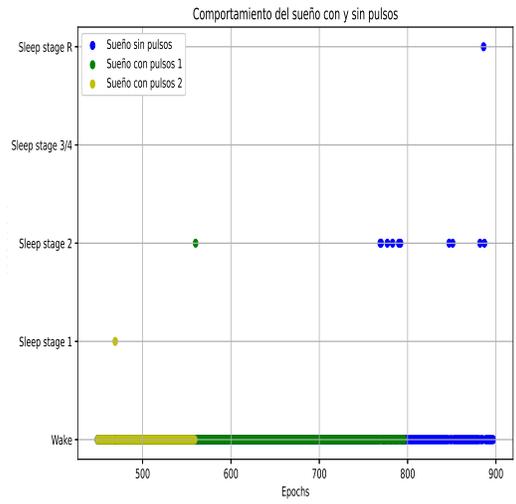
(a) Segmento de la mitad de las noches.



(b) Segmento al final de las noches.



(c) Primera parte de las noches.



(d) Segunda parte de las noches.

Figura 23: Noches de prueba del sujeto 1.

Sujeto 2:

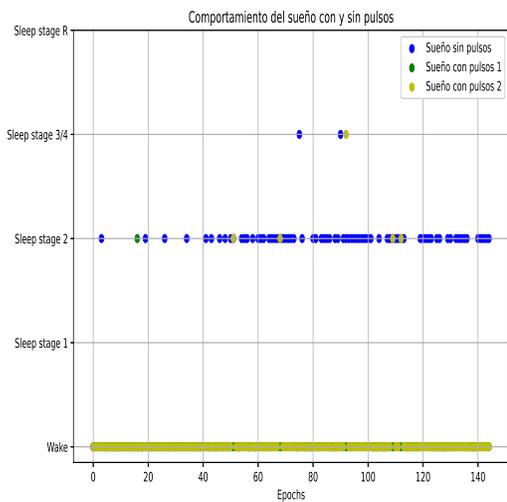
- Género: masculino
- Edad: 53 años

Fase	Noche 1	Noche 2	Noche 3	Ideal noche 1	Ideal noche 2	Ideal noche 3
Despierto	996	818	962	-	-	-
N1	2	0	0	72	72	72
N2	148	1	49	268	268	268
N3/N4	2	0	5	366	366	366
REM	5	0	0	228	228	228
Duración	576	410	508	467	467	467

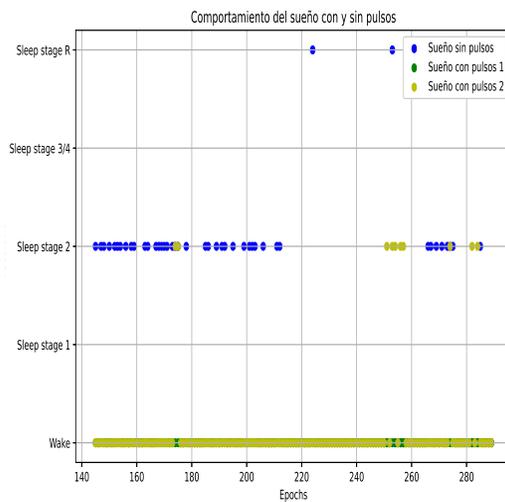
Cuadro 12: Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 2, la duración de cada noche está en minutos.

Fase	Error noche 1	Error noche 2	Error noche 3
N1	97.22 %	100 %	100 %
N2	44.77 %	99.63 %	81.72 %
N3/N4	99.45 %	100 %	98.63 %
REM	97.80 %	100 %	100 %
Error general	84.81 %	99.91 %	95.09 %

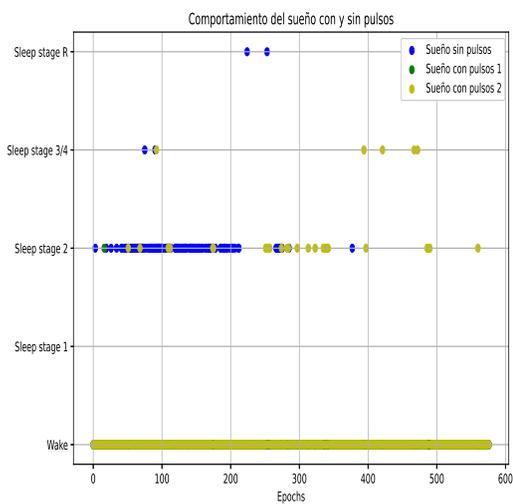
Cuadro 13: Error por fase y noche de sueño del sujeto 2.



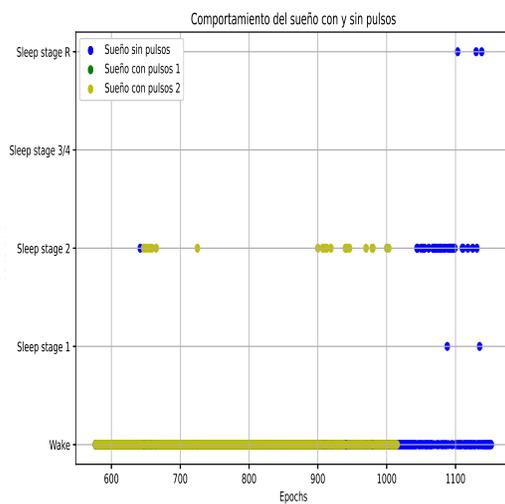
(a) Segmento al inicio de las noches.



(b) Segmento alrededor del inicio de las noches.



(c) Primera parte de las noches.



(d) Segunda parte de las noches.

Figura 24: Noches de prueba del sujeto 2.

Sujeto 3:

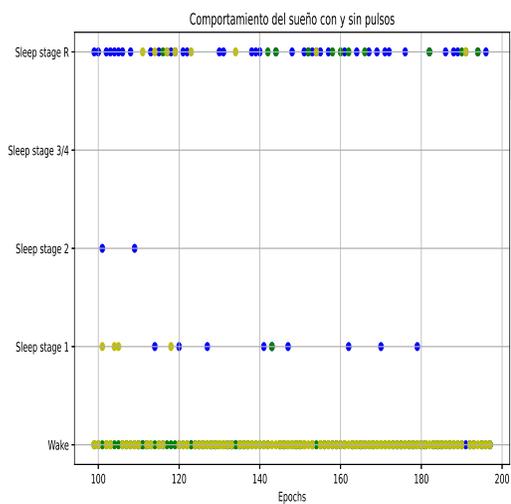
- Género: femenino
- Edad: 24 años

Fase	Noche 1	Noche 2	Noche 3	Ideal noche 1	Ideal noche 2	Ideal noche 3
Despierto	523	553	468	-	-	-
N1	34	11	4	62	62	50
N2	14	7	0	198	198	132
N3	0	0	0	284	284	210
REM	220	109	22	174	174	122
Duración	396	340	247	359	359	257

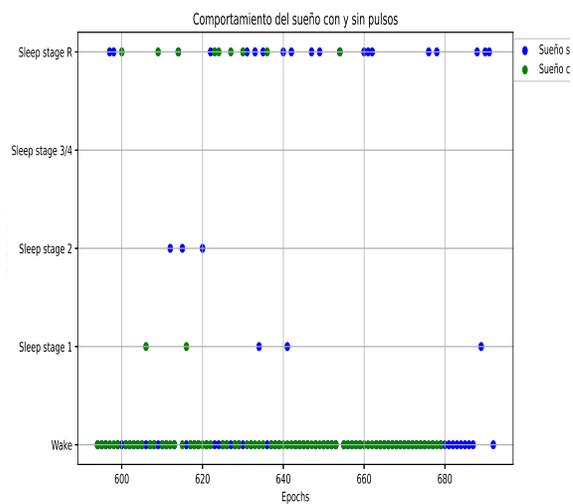
Cuadro 14: Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 3, la duración de cada noche está en minutos.

Fase	Error noche 1	Error noche 2	Error noche 3
N1	45.16 %	82.26 %	92 %
N2	92.93 %	96.46 %	100 %
N3/N4	100 %	100 %	100 %
REM	26.44 %	37.36 %	81.97 %
Error general	66.13 %	79.02 %	93.49 %

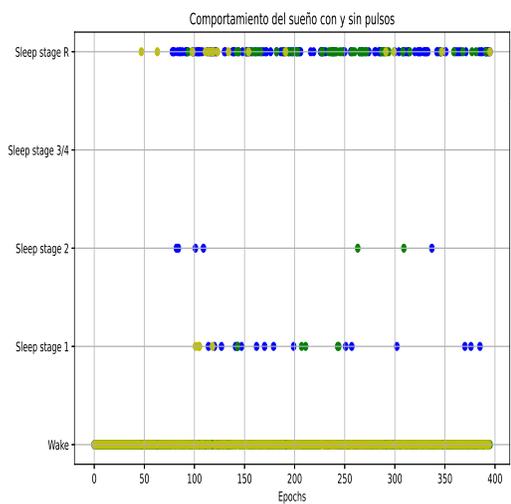
Cuadro 15: Error por fase y noche de sueño del sujeto 3.



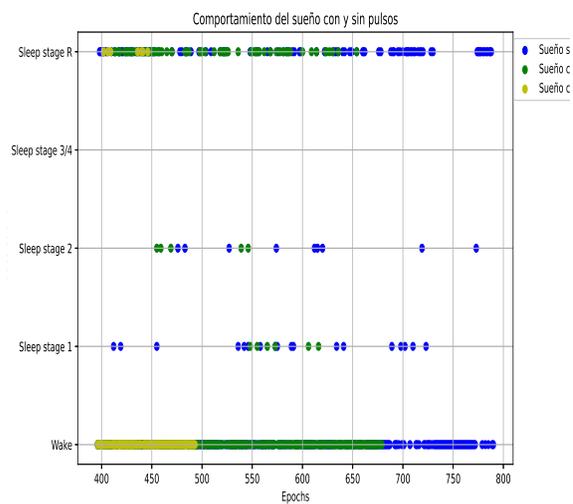
(a) Segmento alrededor del inicio de las noches.



(b) Segmento alrededor del final de las noches.



(c) Primera parte de las noches.



(d) Segunda parte de las noches.

Figura 25: Noches de prueba del sujeto 3.

Sujeto 4:

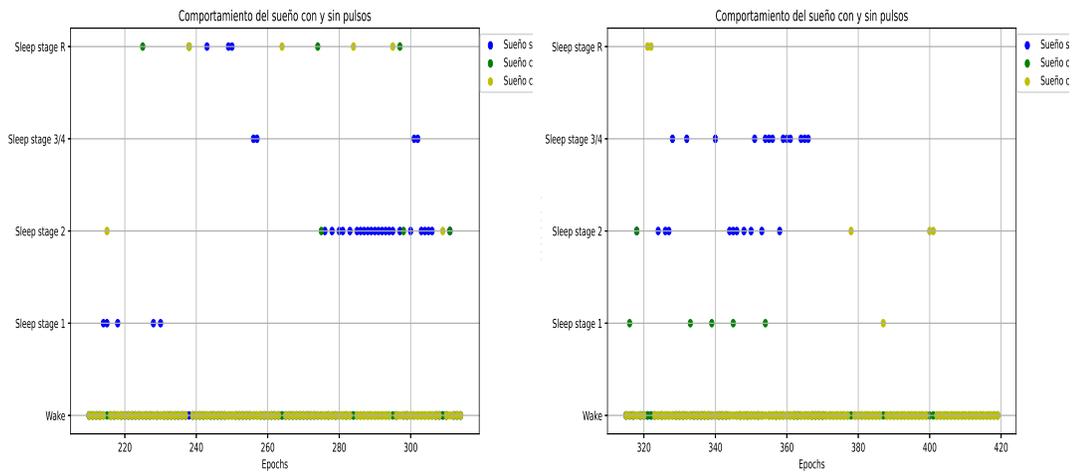
- Género: femenino
- Edad: 54 años

Fase	Noche 1	Noche 2	Noche 3	Ideal noche 1	Ideal noche 2	Ideal noche 3
Despierto	254	460	805	-	-	-
N1	36	8	1	36	50	72
N2	40	16	13	72	132	268
N3/N4	29	0	0	140	210	366
REM	12	13	16	74	122	228
Duración	186	249	418	161	257	467

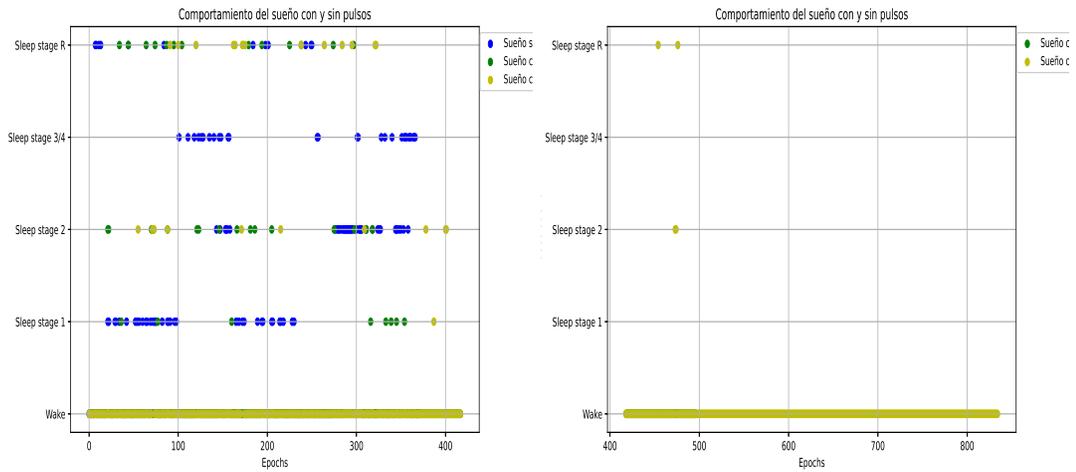
Cuadro 16: Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 4, la duración de cada noche está en minutos.

Fase	Error noche 1	Error noche 2	Error noche 3
N1	0 %	84 %	98.61 %
N2	44.44 %	87.88 %	95.14 %
N3/N4	79.29 %	100 %	100 %
REM	83.78 %	89.34 %	92.98 %
Error general	51.82 %	90.31 %	96.68 %

Cuadro 17: Error por fase y noche de sueño del sujeto 4.



(a) Segmento alrededor de la mitad de las noches. (b) Segmento alrededor de la mitad de las noches.



(c) Primera parte de las noches.

(d) Segunda parte de las noches.

Figura 26: Noches de prueba del sujeto 4.

Sujeto 5:

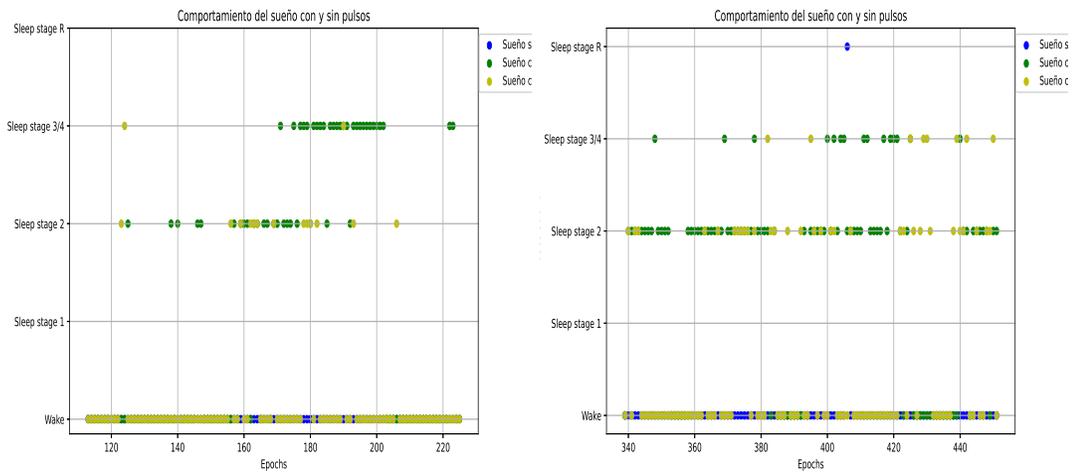
- Género: femenino
- Edad: 27 años

Fase	Noche 1	Noche 2	Noche 3	Ideal noche 1	Ideal noche 2	Ideal noche 3
Despierto	895	510	372	-	-	-
N1	0	3	0	72	72	50
N2	1	275	78	268	268	132
N3/N4	0	72	18	366	366	210
REM	3	14	2	228	228	122
Duración	450	437	235	467	467	257

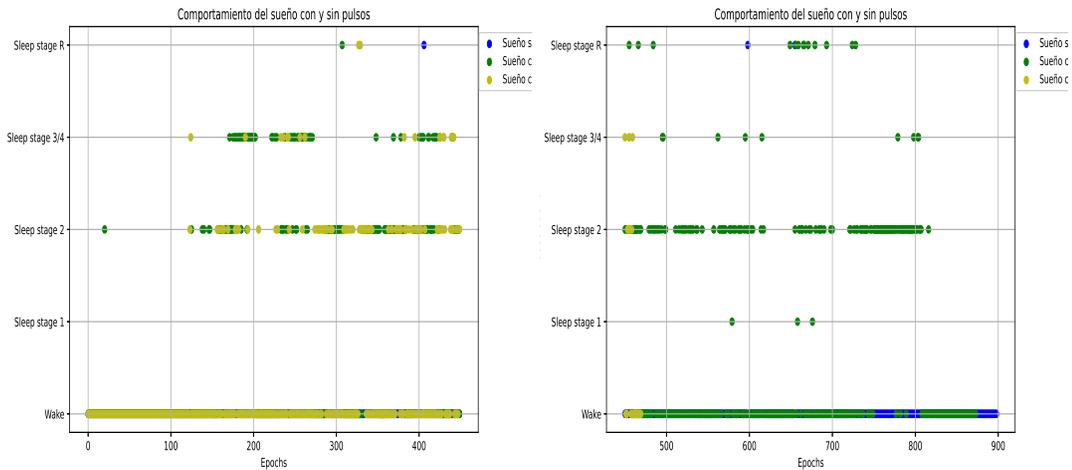
Cuadro 18: Épocas clasificadas e ideales por fase del sueño por noche del sujeto 5.

Fase	Error noche 1	Error noche 2	Error noche 3
N1	100 %	95.83 %	100 %
N2	99.63 %	2.61 %	40.91 %
N3/N4	100 %	80.32 %	91.42 %
REM	98.68 %	93.85 %	98.36 %
Error general	99.58 %	68.15 %	82.67 %

Cuadro 19: Error por fase y noche de sueño del sujeto 5.



(a) Segmento alrededor del inicio de las noches. (b) Segmento alrededor de la mitad de las noches.



(c) Primera parte de las noches. (d) Segunda parte de las noches.

Figura 27: Noches de prueba del sujeto 5.

10.1.2. Discusión de resultados

Por los resultados obtenidos se está observando que no se está obteniendo una buena clasificación en las señales obtenidas mediante el Electro-Cap, esto se puede ver claramente en la mayoría de los sujetos, ya que hay una gran cantidad de épocas que se encuentran clasificadas en la fase de despierto, lo que quiere decir que el algoritmo implementado no pueda ser tan fiable. Esto se puede deber por la naturaleza del estudio que se está implementando, el cual es un estudio inter-sujeto. Esto quiere decir que la data con la que fue entrenada el clasificador pertenece a un gran número de personas que no participaron en el estudio, lo cual puede evitar que se esté obteniendo una buena clasificación ya que las señales EEG pueden variar entre personas, además cabe recalcar que no se utilizó el mismo dispositivo y se está realizando un re-muestreo de la señal para que esta sea lo más parecida

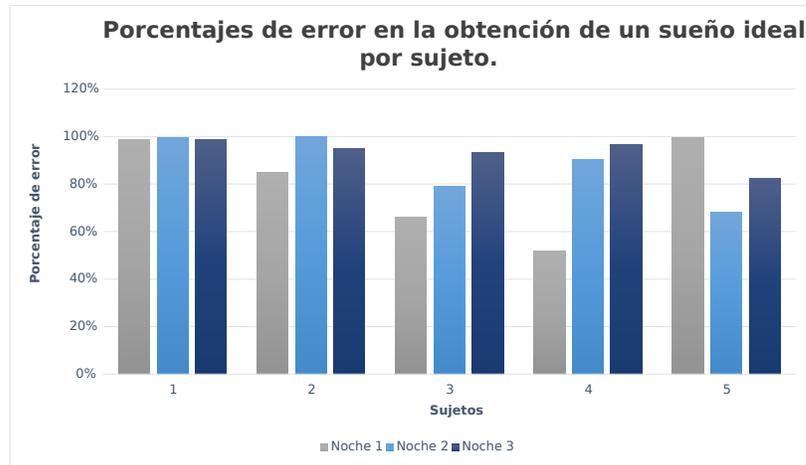


Figura 28: Porcentajes de error en la obtención de un sueño ideal por noche por sujeto.

a las señales con las que fue entrenado el algoritmo aunque no es una garantía para que los datos se parezcan entre sí, al igual que tampoco se conoce a profundidad las condiciones a las que se llevaron a cabo estas recolecciones de datos.

A pesar de los problemas anteriormente mencionado aún se puede analizar la información obtenida de la Figura 28. Durante las recolecciones de datos de los sujetos 1 y 2 se utilizó un ElectroCap viejo ya que era el que se había otorgado al inicio de esta investigación. Este gorro obstruía la recolección de datos ya que no todos los electrodos se encontraban en buenas condiciones, al igual que se notaba que este no lo limpiaban constantemente de lo cual se estuvo formando una capa de sarro en los electrodos. Meses después, durante una visita a la bodega de materiales y equipo de la universidad se descubrió que existía otro gorro ElectroCap, el cual se encontraba en óptimas condiciones ya que este se encontraba nuevo, por lo cual se solicitó el reemplazo del equipo y se realizó la recolección de datos de los sujetos 3, 4 y 5. De esto, se puede realizar un mayor énfasis al analizar los resultados otorgados por estos últimos sujetos de prueba.

Del sujeto 3 y del sujeto 4 se puede observar que presentan un mayor porcentaje de error en la obtención de un sueño ideal, esto se puede deber a condiciones específicas en las que se encontraron dichos sujetos de prueba. En el sujeto 3 se utilizó un gorro Electro-Cap de menor medida, por lo que pudo afectar en la conciliación del sueño dentro del estudio ya que el gorro representaba una incomodidad en el sujeto de prueba. El sujeto 4 presenta una mayor edad en comparación con el sujeto 3 y 5, la cual al estar más próxima a la tercera edad pudo afectar en el resultado final del estudio. Por tanto el sujeto 5, al contar con un gorro más cómodo y al ser joven, pueda ser que los pulsos binaurales sí hayan beneficiado su calidad del sueño, sin embargo, por lo presentado por los sujetos 3 y 4 se puede deducir que, a pesar de presentar distintos inconvenientes, los pulsos binaurales empeoran la calidad de sueño de las personas.

A pesar de que los resultados indican que los pulsos binaurales empeoran la calidad del sueño es necesario realizar un estudio más exhaustivo. Con la recolección de datos de un mayor número de personas, con el equipo recientemente utilizado y el manual realizado durante esta investigación para el uso de este equipo con la placa CytonBoard, se facilita de

gran manera la realización de esta tarea.

10.2. Estudio de concentración

A diferencia del estudio del sueño, en este estudio no se realizó un mayor procesamiento de señales ya que el dispositivo con el que se implementó, el cual es el BIOPAC MP41, ya presenta su señal centrada en cero, además de que el estudio se está implementando únicamente con los datos extraídos por este dispositivo por lo que no hace falta realizar un remuestreo. Adicionalmente se realizó un pre-procesamiento de datos, específicamente en las características de la señal, realizando un escalado estandarizado. El proceso que se realizó para la implementación del estudio se demuestra en la Figura 29.

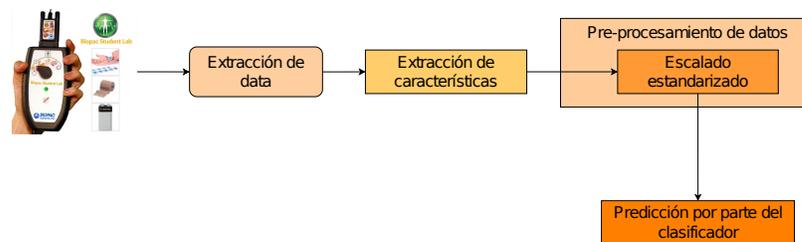


Figura 29: Flujo de extracción de características para el estudio de concentración.

Para verificar si hubo un cambio en el estado de concentración al momento de escuchar los pulsos, se tomó como señal de evaluación los tres minutos en los que se está realizando la prueba matemática, tanto de la prueba dos como de la prueba tres (sección 8.2.1).

10.2.1. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los sujetos de prueba. Estos se presentan en el Cuadro 20, donde se especifica el número de sujeto de prueba, y la cantidad de épocas clasificadas como atento e inatento tanto en la prueba con pulsos y sin pulsos binaurales. Además de ello se presenta la Figura 30 en el que se observa la distribución positiva y negativa del efecto de los pulsos binaurales en el estado de concentración.

Además de ello se presentan los agrupamientos de las señales EEG mediante el algoritmo *DBSCAN* de cinco sujetos de prueba en dos escenarios, uno de ellos sin el estímulo de pulsos binaurales y el otro con la presencia de estos. Se utilizó este algoritmo ya que es un algoritmo altamente conocido por agrupar datos con formas variadas y también por discernir datos valiosos entre la presencia de ruido. Durante los dos escenarios el sujeto de prueba realizó la prueba de concentración de Toulouse-Pieron. Las características usadas en el algoritmo fueron las potencias alpha y beta estandarizadas. Los resultados se pueden observar en la Figura 31.

Sujeto	Prueba	Épocas inatento	Épocas atento
1	Sin pulsos	10	8
	Con pulsos	9	9
2	Sin pulsos	5	13
	Con pulsos	11	7
3	Sin pulsos	9	9
	Con pulsos	5	13
4	Sin pulsos	9	9
	Con pulsos	13	5
5	Sin pulsos	1	17
	Con pulsos	5	13
6	Sin pulsos	11	7
	Con pulsos	8	10
7	Sin pulsos	8	10
	Con pulsos	10	8
8	Sin pulsos	5	13
	Con pulsos	10	8
9	Sin pulsos	8	10
	Con pulsos	13	5
10	Sin pulsos	10	8
	Con pulsos	9	9
11	Sin pulsos	3	15
	Con pulsos	9	9
13	Sin pulsos	16	8
	Con pulsos	19	5
14	Sin pulsos	17	7
	Con pulsos	17	7
15	Sin pulsos	23	1
	Con pulsos	24	0
16	Sin pulsos	24	0
	Con pulsos	24	0
17	Sin pulsos	24	0
	Con pulsos	22	2
18	Sin pulsos	23	1
	Con pulsos	24	0
19	Sin pulsos	23	1
	Con pulsos	24	0

Cuadro 20: Cantidad de épocas en estado atento e inatento de cada uno de los sujetos en cada una de las pruebas.

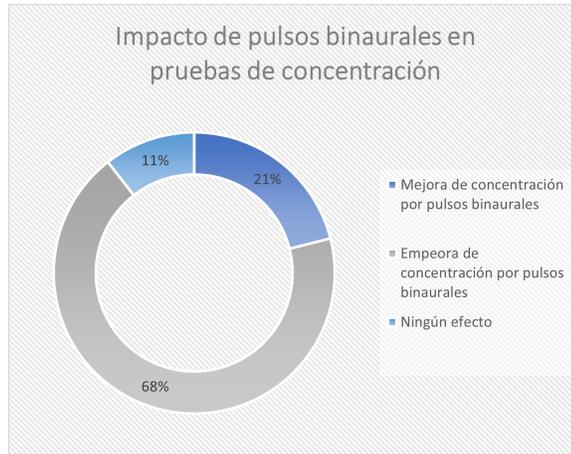


Figura 30: Tendencia de efecto de pulsos binaurales en los sujetos de prueba.

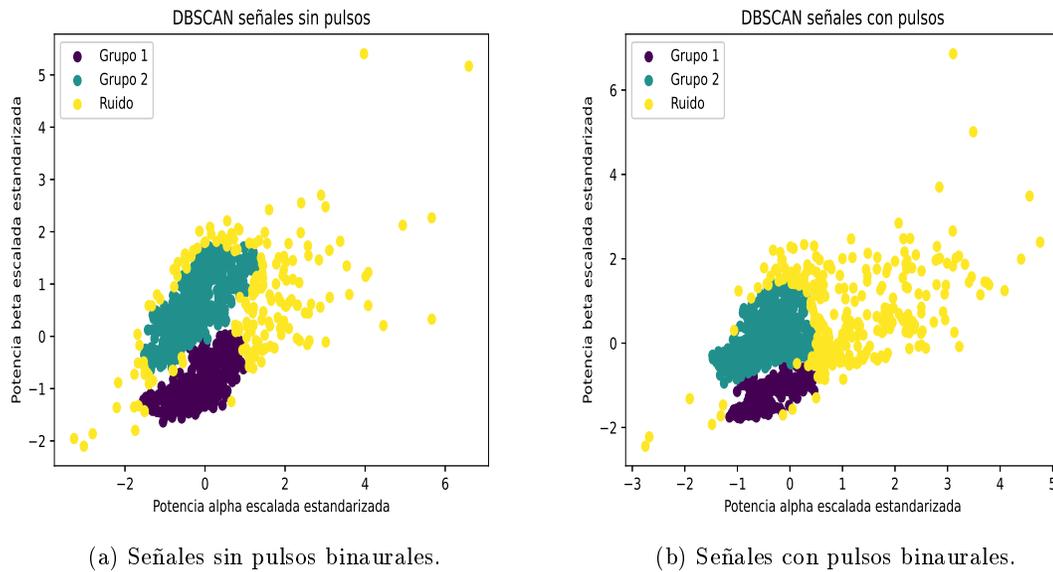
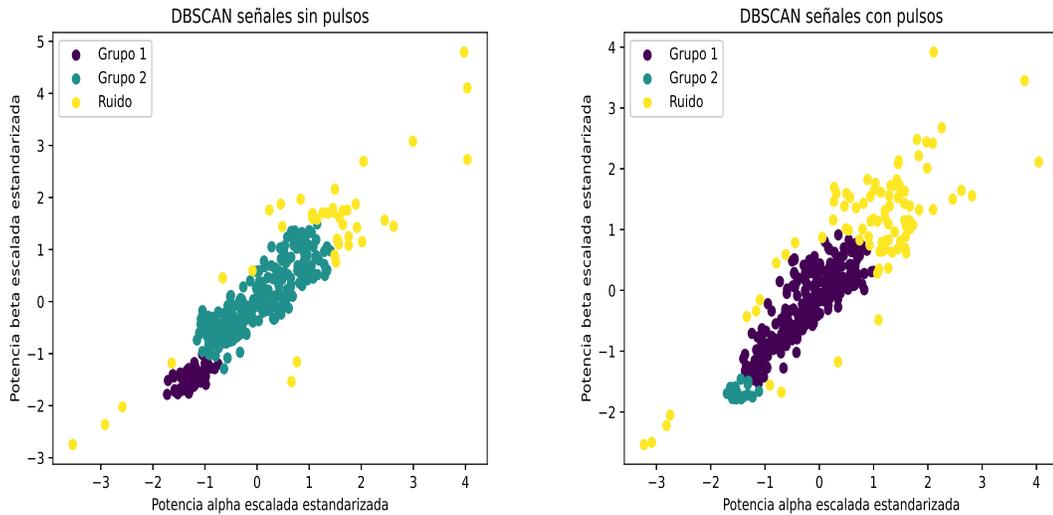


Figura 31: Agrupaciones de señales mediante el algoritmo *DBSCAN* aplicados en el estudio de concentración en la prueba Toulouse-Pieron.

Debido a que las dos pruebas anteriores necesitan una alta demanda de concentración en las personas, se realiza una prueba que sea más cotidiana para saber si los pulsos binaurales pueden ayudar a que una persona se enfoque más en lo que debe de hacer. En esta prueba el individuo realiza una acción que requiera concentrarse relativamente, como lo es la realización de una tarea, trabajar en un proyecto, etc; de esta manera se visualiza si el impacto de los pulsos. Los resultados se pueden observar en la Figura [32](#).



(a) Actividad sin pulsos binaurales.

(b) Actividad con pulsos binaurales.

Figura 32: Agrupación de datos mediante algoritmo *DBSCAN* de una actividad cotidiana con y sin pulsos binaurales.

10.2.2. Discusión de resultados

Tal y como se puede apreciar en la Figura 30 se ve una mayor tendencia de que los pulsos binaurales realmente están perjudicando la concentración de los sujetos de prueba, esto se evidencia en los datos del sujeto 1 al 14. Esto se puede deber a que los pulsos puedan llegar a ser un poco incómodos debido al sonido que producen, o bien que en lugar de estar produciendo un efecto de concentración estén produciendo un efecto relajante. Del sujeto 15 al sujeto 19 se puede observar que no hubo una buena clasificación por parte del algoritmo. Esto se puede deber a que, a diferencia de los demás participantes, estos estuvieron expuestos a ruido rosa sin y con pulsos binaurales de manera que sea más difícil para los participantes distinguir la diferencia entre cada prueba. De esto se puede observar que el ruido rosa interfiere en las señales EEG.

Observando detalladamente las figuras 31a y 31b se puede observar que efectivamente los pulsos binaurales presentan un impacto en las señales, cabe destacar que estas señales no tienen presencia de ruido rosa. Se aprecia que en la Figura 31a tanto el Grupo 1 como el Grupo 2 tienen una mayor dispersión de datos que en la Figura 31b. En esta última figura se observa que los grupos, y por lo tanto los datos, se encuentran más agrupados en el centro.

Para poder observar de mejor manera si es que los pulsos binaurales están produciendo un efecto positivo o negativo se puede realizar un segundo análisis de la Figura 31, de la cual se produce la Figura 33. En esta figura se aprecia una línea delimitando el valor medio de una de la característica de potencia beta. Cabe recalcar que el valor 0 de esta característica representa la media, de esta manera cualquier dato que se encuentre sobre la media, es decir un valor positivo, tendrá una mayor concentración de dicha característica. De la teoría se puede afirmar que una mayor concentración de ondas beta se obtiene una mayor cantidad de concentración. Si se realiza una sumatoria de datos que tienen una mayor y menor presencia

de ondas beta de las señales con y sin pulsos binaurales se produce el Cuadro 21.

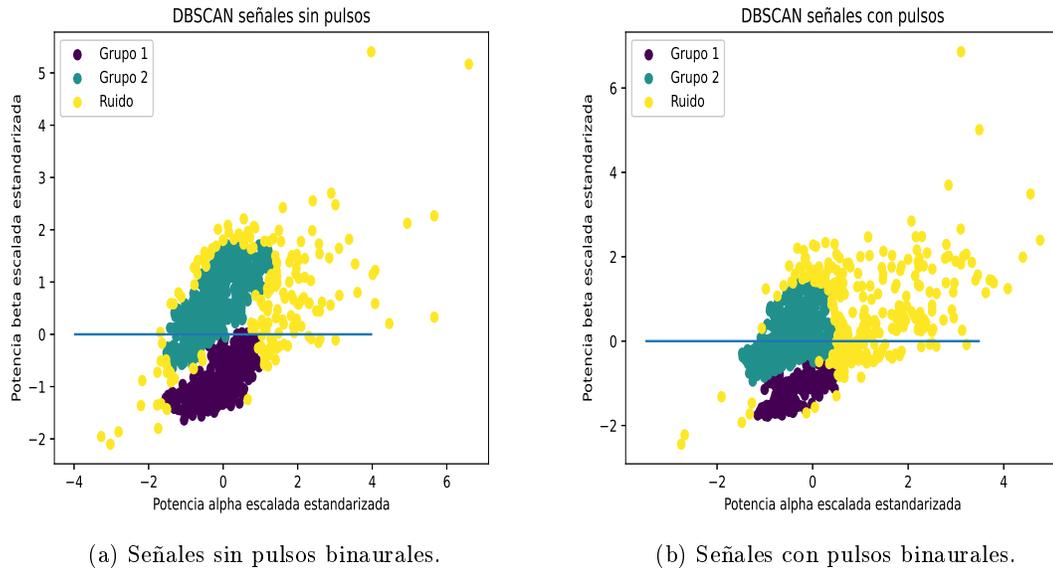


Figura 33: Representación de las señales de la Figura 31 con líneas delimitando las medias de característica.

Estudio	Mayor presencia	Menor presencia	Datos totales
Sin pulsos	526	517	1043
Con pulsos	478	560	1038

Cuadro 21: Cantidad de datos con una mayor y menor presencia de ondas beta obtenidos de la Figura 33.

Del Cuadro 21 se puede obtener un porcentaje de datos que tienen una mayor presencia de ondas beta en cada uno de los casos, con y sin presencia de los pulsos binaurales. De esto se puede observar que hay una menor cantidad de datos con mayor presencia de ondas beta cuando estos tienen la presencia de los pulsos binaurales, pasando de un 50.43 % a un 46.03 %. Con ello se puede afirmar que los pulsos binaurales producen un efecto negativo en una actividad que requiere mucha concentración.

De la prueba de concentración realizando una actividad cotidiana se observa la Figura 32. A pesar de que los colores de los grupos se ven intercambiados, se debe de prestar más atención a la ubicación de estos que propiamente al nombre o al color designado. Entre las dos sub-figuras se podría observar, a primera instancia, que la forma sigue relativamente similar, pero se puede observar una menor cantidad de datos agrupados en cada uno de los grupos. Al observar el ruido se puede apreciar como este, en presencia de los pulsos binaurales, se encuentra más concentrado en el centro y está menos disperso que en las señales sin presencia de los pulsos binaurales. Con ello se puede observar que los pulsos binaurales están afectando las señales, sin embargo, aún es pronto para discernir si estos producen un efecto positivo o negativo.

Para observar de mejor manera el impacto de los pulsos binaurales en estas últimas pruebas, se realiza el mismo análisis realizado para la prueba de Toulouse-Pieron. De ello se

obtiene la Figura 34 y el Cuadro 22.

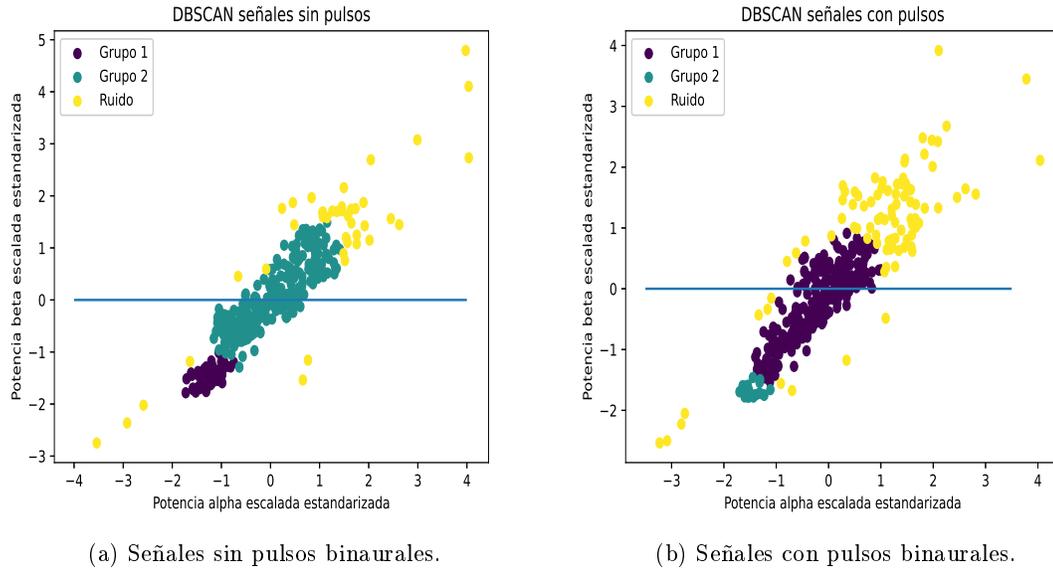


Figura 34: Representación de las señales de la Figura 32 con líneas delimitando las medias de característica.

Estudio	Mayor presencia	Menor presencia	Datos totales
Sin pulsos	162	203	365
Con pulsos	187	175	362

Cuadro 22: Cantidad de datos en concentración y en relajación de los resultados obtenidos en la Figura 34.

Del Cuadro 22 se puede observar que hay un considerable aumento en la cantidad de datos de concentración en las pruebas realizadas con pulsos binaurales, pasando de un 44.38 % a 51.66 %. Con estos resultados se puede afirmar que los pulsos binaurales pueden afectar de manera positiva la concentración con un mayor tiempo de exposición y en una actividad que no requiere una concentración intensa.

10.3. Estudio de estado de ánimo

Para la realización de este estudio se realizó el mismo procesamiento de señales que en el estudio de concentración. El cual se puede visualizar en la Figura 29. De manera de recordatorio, para este estudio se tomó en cuenta las señales recolectadas de la prueba aritmética y también se recolectaron señales en presencia de los vídeos, mostrados en el Cuadro 4 y de lecturas con presencia de los pulsos binaurales mostrados en el Cuadro 5.

De la prueba aritmética se puede reconocer dos estados de ánimo, los cuales son estrés y relajación. Antes de realizar la prueba aritmética se le pidió a los voluntarios que se relajaran lo más posible y al momento de realizar las pruebas aritméticas se obtiene un estado de estrés.

Por lo tanto se obtuvieron las señales del minuto antes de realizar la prueba y las señales del tercer minuto de realizar la prueba aritmética. De ello se obtuvo la Figura 35.

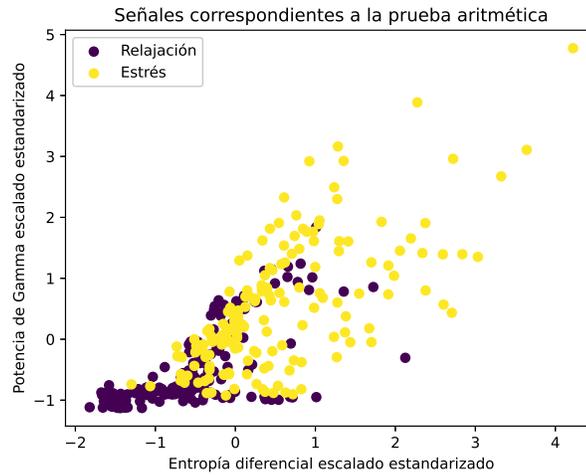


Figura 35: Señales del minuto antes de realizar la prueba aritmética y del tercer minuto al realizar la prueba aritmética.

De la Figura 35 se puede observar que los datos de relajación tienden a tener una baja presencia de entropía diferencial y de potencia gamma. Para realizar un mejor análisis se colocan líneas en la media de cada una de las características, que se encuentran en el valor 0 al estar estandarizadas, produciendo la Figura 36. De esta figura se puede realizar un recuento de las señales en estado de relajación y estrés en cada uno de los cuadrantes, del cual se obtiene el Cuadro 23. De este cuadro se puede observar que en el tercer cuadrante se obtiene una mayor presencia de señales en estado de relajación, mientras que en el primer cuadrante se observa una mayor concentración de datos en estado de estrés. A partir de esto se realiza el análisis para verificar el impacto de los pulsos binaurales en la prueba aritmética.

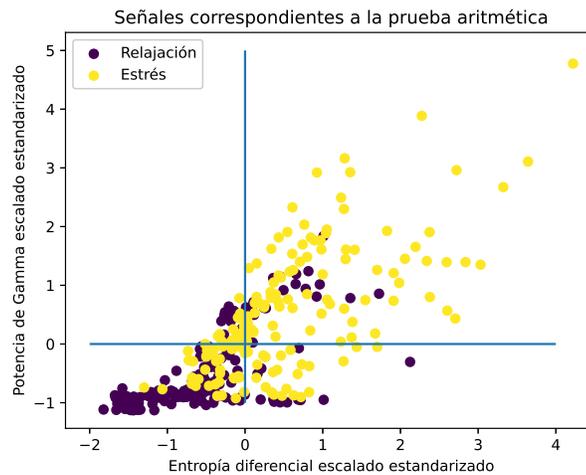


Figura 36: Figura 35 con la línea en la media de cada característica.

Ánimo	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4
Relajación	22 (13.10 %)	9 (5.36 %)	125 (74.40 %)	12 (7.14 %)
Estrés	85 (50.60 %)	17 (10.11 %)	43 (25.60 %)	23 (13.69 %)

Cuadro 23: Cantidad de señales en estado de relajación y estrés por cuadrante de la Figura 36

10.3.1. Resultados

De la prueba aritmética se utilizó el algoritmo *KMeans* para agrupar las señales ya que este demostró ser el más adecuado para este estudio, teniendo bastante relación con el análisis realizado en la Figura 36. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 37.

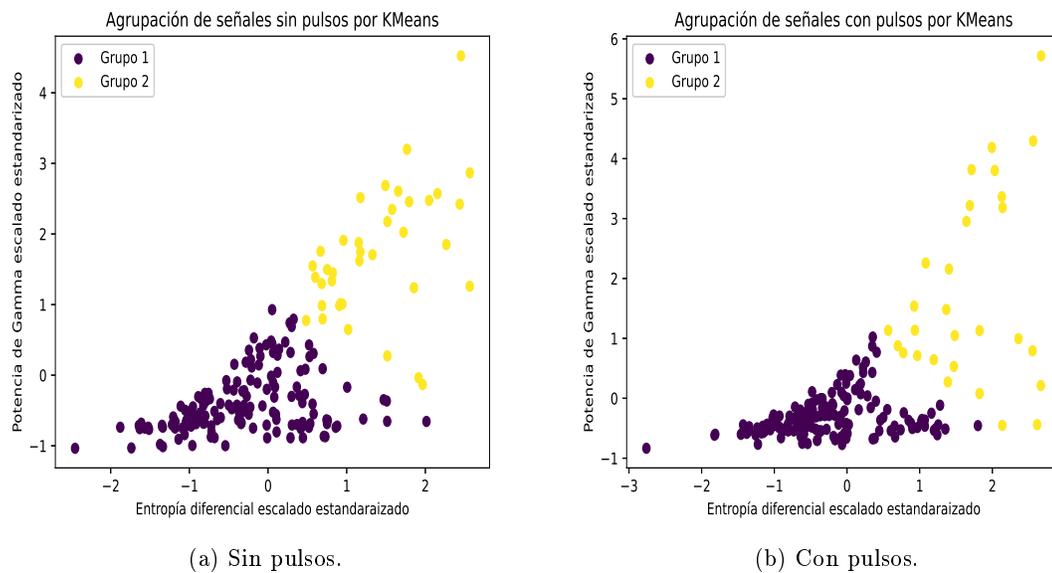
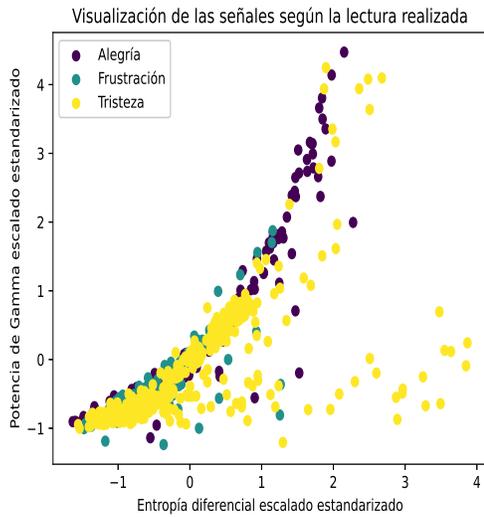


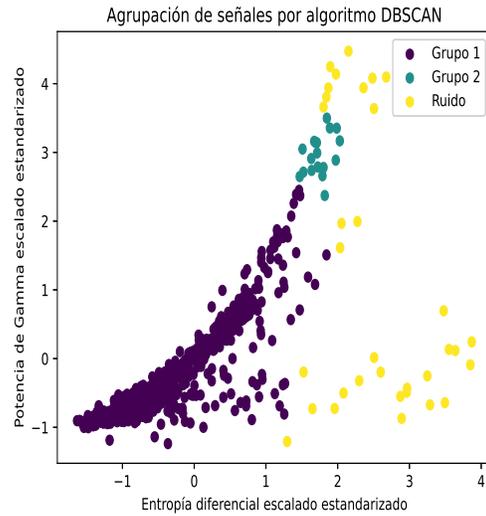
Figura 37: Señales del minuto después de haber realizado la prueba aritmética.

De la prueba de vídeos se obtuvo la Figura 38 en esta figura se puede apreciar tanto los estados de ánimo que se debieron de producir en cada una de las señales y la agrupación realizada por el algoritmo *DBSCAN*. De la misma manera se produjo la Figura 39 con la diferencia que en estas señales el voluntario realizó algunas lecturas con la presencia de pulsos binaurales. Las señales recolectadas en los vídeos y en las lecturas no pueden ser comparadas entre sí ya que en estas se realizaron diferentes actividades.

Además de ello se aplicó un algoritmo de aprendizaje automático a las señales de lectura, la cual se puede apreciar en la Figura 40. El resultado de este algoritmo puede ser útil para la investigación posterior a este trabajo para poder conocer el impacto de los pulsos binaurales a mayor profundidad en distintos estados de ánimo.

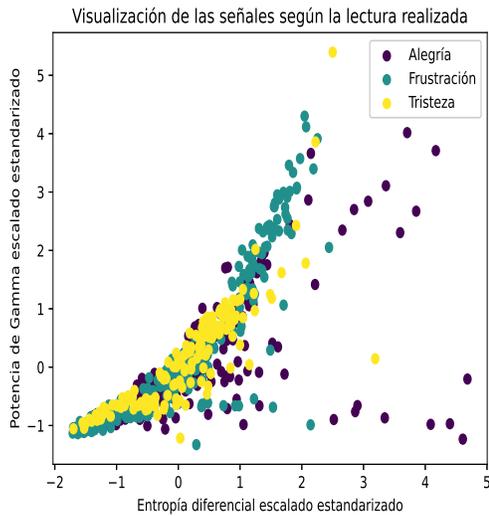


(a) Señales según el estado de ánimo que debe producir el vídeo.

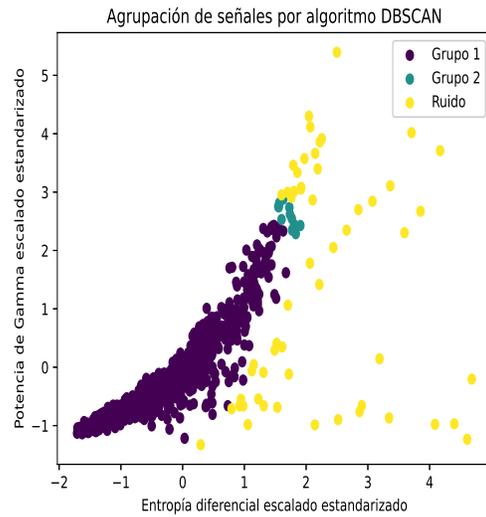


(b) Señales agrupados por el algoritmo *DBSCAN*.

Figura 38: Algoritmo *DBSCAN* aplicado al estudio de estado de ánimo de la prueba de vídeos.



(a) Señales según el estado de ánimo que debe producir la lectura.



(b) Señales agrupadas por el algoritmo *DBSCAN*.

Figura 39: Algoritmo *DBSCAN* aplicado al estudio de estado de ánimo de la prueba de lecturas.

10.3.2. Discusión de resultados

De la Figura 37 se puede apreciar como el Grupo 1, que en este caso indicaría señales en estado de relajación, se ven más juntos entre sí y también se puede observar una menor cantidad de datos agrupados en el Grupo 2, cuando estos están en presencia de los pulsos binaurales. De ello podría indicar que los pulsos binaurales producen un efecto de relajación.

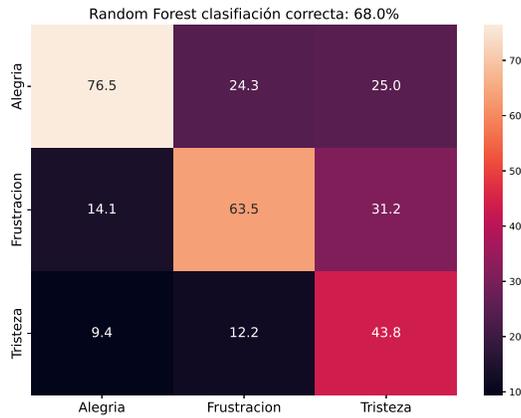


Figura 40: Algoritmo *Random Forest* aplicado a las señales recolectadas de las lecturas.

Para observarlo de una manera más clara se puede realizar un recuento de los datos que están en el primer y en el tercer cuadrante, de ello se produce la Figura 41 y el Cuadro 24

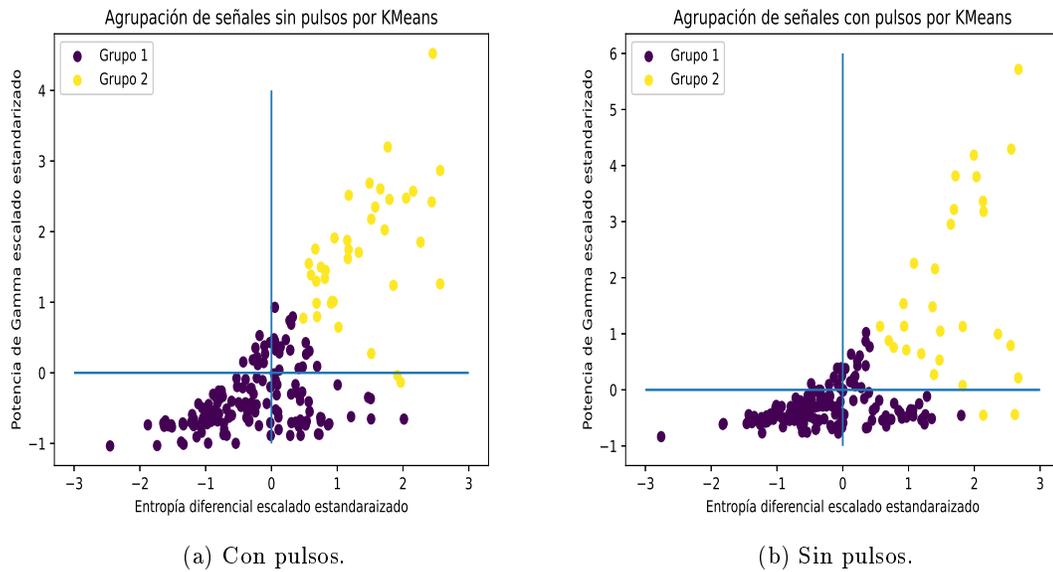


Figura 41: Figura 37 con líneas en las medias de las características.

Del Cuadro 24 se puede observar un incremento de señales que se encuentran en el tercer cuadrante cuando hay una presencia de pulsos binaurales, lo cual hace referencia que hay una mayor relajación por causa de estos. Además que también se puede observar una disminución de datos en el primer cuadrante, es decir hay una menor cantidad de señales en estado de estrés.

De la Figura 38a se puede observar como los estados de ánimo se traslapan entre sí. Esto se debe principalmente a que no se tenía una retroalimentación por parte del voluntario para saber si este estaba sintiendo la emoción que se quería inducir. Además cabe recalcar

Estudio	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4
Sin pulsos	54 (27.55 %)	10 (5.10 %)	93 (47.45 %)	39 (19.90 %)
Con pulsos	42 (21.43 %)	8 (4.08 %)	111 (56.63 %)	35 (17.86 %)

Cuadro 24: Cantidad de señales en cada cuadrante por estudio de la Figura 41

que para sentir una emoción esto no es inmediato, es progresivo, lo cual también ayuda a que los diferentes estados de ánimo se vean traslapadas entre sí. Sin embargo al observar la Figura 38b se puede observar que el Grupo 1 tiene una mayor relación al traslape entre los estados de ánimo, mientras que el Grupo 2 tiene una mayor relación con el estado de ánimo de alegría. Mientras que el ruido pareciera tener una mayor relación con el estado de ánimo de tristeza.

Al observar la Figura 39a se puede apreciar que también hay un traslape de estados de ánimo, sin embargo, si comparamos como es que se comportaron los estados de ánimo entre esta figura y la Figura 38a se observa que el estado de ánimo de frustración intercambia posición con el estado de alegría, lo cual se puede deber por la presencia de pulsos binaurales. Cabe recalcar que esto puede ser un indicio, sin embargo, no se puede tomar como un dato completamente válido debido a que estas dos figuras no se pueden comparar directamente.

Si se observa la Figura 39b se puede apreciar que el Grupo 1 tiene una mayor relación al traslape de los diferentes estados de ánimo, tal y como sucedía con la Figura 38b. Mientras que el Grupo 2 tiene una mayor relación con el estado de ánimo de frustración y el ruido tiene una mayor relación con el estado de ánimo de alegría.

De la Figura 40 se observa la matriz de confusión del algoritmo *Random Forest* con las señales de lectura para poder clasificar las mismas en los diferentes estados de ánimo. A pesar de que se necesitarían más datos para poder realizar un algoritmo lo suficientemente robusto, se puede empezar a apreciar que es factible implementar un algoritmo supervisado para la clasificación de diferentes estados de ánimo, que a pesar de no contar con la retroalimentación por parte de los voluntarios se pudo obtener una clasificación correcta del 68 %.

El algoritmo a desarrollar para la clasificación de diferentes estados de ánimo debe de contener una retroalimentación por parte de los individuos cuando estén experimentando cada uno de los estados de ánimo, al igual que se pueden obtener otras características de las señales. Además, se pueden incluir otros canales de señales bioeléctricas como EOG, ritmo cardíaco o inclusive se puede realizar un algoritmo de visión de computadora que ayude en la clasificación de los diferentes estados de ánimo.

- Se mejoró el clasificador realizado en la fase anterior haciendo el uso de otras características a las propuestas.
- Se elaboraron varios clasificadores para determinar el estado de atención e inatención, siendo el mejor de ellos el realizado mediante el algoritmo *Random Forest*.
- Se realizó un algoritmo para la extracción de características EEG, tanto para el estudio de sueño como el de concentración y estado de ánimo.
- Se pudo determinar el impacto que tuvieron los pulsos binaurales en la concentración de varios sujetos de prueba, el cual demuestra ser deficientes en actividades que requieran una alta concentración. Por otra parte, los pulsos binaurales demuestran ser beneficiosos en actividades que requieren una concentración relativamente media.
- Al aplicar el algoritmo de agrupamiento *DBSCAN* en el estudio de concentración, se determinó que los pulsos binaurales sí presentan un impacto directo en las señales EEG.
- Al aplicar el algoritmo de agrupamiento *KMeans* en el estudio de estado de ánimo se determinó que los pulsos binaurales sí afectan el estado de ánimo, otorgando una mayor relajación ante el estrés.
- Se realizaron cambios sustanciales al protocolo de investigación realizado en la fase anterior permitiendo así la realización de varios estudios del impacto de pulsos binaurales.
- De los resultados obtenidos se tiene indicios de que los pulsos binaurales pueden empeorar la calidad de sueño de las personas, aunque el estudio fue limitado por lo que no se puede concluir con certeza.
- Se realizó la implementación del consentimiento informado en todos los sujetos de prueba que participaron en los diferentes estudios realizados.

- Se recomienda acudir con alguien especializado en polisomnografía para identificar de manera correcta las diferentes fases del sueño mediante el uso de un electroencefalograma, utilizando solamente un dispositivo como estándar. Con los datos recolectados y etiquetados por el especialista se debe de realizar un clasificador para el estudio del impacto de los pulsos binaurales en la calidad de sueño de las personas.
- Se recomienda el uso de un dispositivo más robusto en lo que concierne a la recolección de señales EEG, al igual que tenga capacidad para obtener otras señales en simultáneo como EMG y EOG.
- Se debe de investigar la implementación de diferentes frecuencias de pulsos binaurales, para conocer si existe un impacto diferente entre las distintas frecuencias.
- Se recomienda realizar un estudio más exhaustivo con sujetos de prueba establecidos de manera que se pueda comprender a mayor profundidad el impacto que puedan tener los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad de sueño.
- Se recomienda utilizar el ritmo cardíaco y señales EOG para el estudio del sueño, de los cuales pueden facilitar la clasificación de algunas fases del sueño como el estado REM.
- Para la realización de un clasificador de estados de ánimo se recomienda contar con la retroalimentación de los voluntarios al momento de experimentar cada uno de los estados de ánimo, de manera que se pueda construir un clasificador robusto. Asimismo, se recomienda la exploración de otras características que puedan ser útiles.

-
- [1] M. E. Thase, «Correlates and consequences of chronic insomnia,» *General Hospital Psychiatry*, vol. 27, n.º 2, págs. 100-112, 1 de mar. de 2005, ISSN: 0163-8343. DOI: [10.1016/j.genhosppsy.2004.09.006](https://doi.org/10.1016/j.genhosppsy.2004.09.006), dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0163834304001264> (visitado 06-05-2023).
- [2] M. H. Martinez, R. A. Jimenez, O. A. Agudelo y S. G. Bustos, «Relaxation state induction through binaural acoustic stimuli,» en *2018 ICAI Workshops (ICAIW)*, 2018, págs. 1-3. DOI: [10.1109/ICAIW.2018.8554994](https://doi.org/10.1109/ICAIW.2018.8554994).
- [3] A. K. Patel, V. Reddy, K. R. Shumway y J. F. Araujo. «Physiology, Sleep Stages,» National Library of Medicine. (7 de sep. de 2022), dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK526132/>.
- [4] H. Sawai, M. Matsumoto y E. Koyama, «The relationship between each length of REM - NREM sleep cycle and sleep stage,» en *2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)*, 2021, págs. 171-172. DOI: [10.1109/LifeTech52111.2021.9391838](https://doi.org/10.1109/LifeTech52111.2021.9391838).
- [5] J. P. Muñoz, «Diseño de un sistema inteligente de monitoreo de ondas EEG y generador de pulsos binaurales para combatir desórdenes de sueño en los atletas,» Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2019, 119 págs.
- [6] J. P. Muñoz y L. A. Rivera, «Towards Improving Sleep Quality Using Automatic Sleep Stage Classification and Binaural Beats,» en *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 2020, págs. 4982-4985. DOI: [10.1109/EMBC44109.2020.9176385](https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176385).
- [7] O. López, «Análisis y Reconocimiento de Patrones de Señales Biomédicas Relacionadas a las Etapas de Sueño,» Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2021, 66 págs.
- [8] L. A. Guerrero, «Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulsos Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulsos en la Calidad de Sueño,» Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2021, 79 págs.

- [9] D. Alegría, «Estudio del Impacto de un Sistema Integrado de Detección de Patrones de Señales Biomédicas y de Generación de Pulsos Binaurales en la Calidad del Sueño de las Personas,» Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2021, 80 págs.
- [10] B. Kemp, A. Zwinderman, B. Tuk, H. Kamphuisen y J. Oberyé, *The Sleep-EDF Database [Expanded]*, 2018. DOI: [10.13026/C2X676](https://doi.org/10.13026/C2X676). dirección: <https://physionet.org/content/sleep-edfx/> (visitado 05-05-2023).
- [11] L. Sornmo y P. Laguna, *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications* (Biomedical Engineering). San Diego, CA: Academic Press, jun. de 2005.
- [12] E. S. Pane, M. A. Hendrawan, A. D. Wibawa y M. H. Purnomo, «Identifying Rules for Electroencephalograph (EEG) Emotion Recognition and Classification,» en *2017 5th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, 2017, págs. 167-172. DOI: [10.1109/ICICI-BME.2017.8537731](https://doi.org/10.1109/ICICI-BME.2017.8537731).
- [13] N. S. Suhaimi, J. Mountstephens y J. Teo, «EEG-based emotion recognition: A state-of-the-art review of current trends and opportunities,» en *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2020, pág. 8 875 426, sep. de 2020. DOI: [10.1155/2020/8875426](https://doi.org/10.1155/2020/8875426).
- [14] J. P. Reilly, *Applied bioelectricity*. Springer, oct. de 2012.
- [15] S. Grimnes y O. G. Martinsen, *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Academic Press, ago. de 2014.
- [16] *Practical Lab Kit with BSL 4 & MP41 | BSL-HOME-B | Education | BIOPAC*, abr. de 2023. dirección: <https://www.biopac.com/product/bsl-home-mp41/>.
- [17] *Electro-Cap size Medium (Red cap 54-58cm) REF=Cpz (pin 13) with 2 EOG electrodes and ear slits. 25 pin connector - ACEC100616*. dirección: <https://shop.cephalon.eu/Electro-Cap-size-Medium-%28Red-cap-54-58cm%29-REFCpz/ItemDetails.aspx?9=GB&5=ACEC100616&11=797>.
- [18] M. Rent, *Electrodo de arete - Med Rent*, jul. de 2023. dirección: <https://medrent.mx/producto/electrodo-de-arete/>.
- [19] O. O. Store, *Cyton Biosensing Board (8-channels)*. dirección: <https://shop.openbci.com/products/cyton-biosensing-board-8-channel>.
- [20] V. Button, *Principles of measurement and transduction of biomedical variables*. San Diego, CA: Academic Press, abr. de 2015.
- [21] K. Kleffner-Canucci, P. Luu, J. Naleway y D. M. Tucker, «A novel hydrogel electrolyte extender for rapid application of EEG sensors and extended recordings,» en *J. Neurosci. Methods*, vol. 206, n.º 1, págs. 83-87, abr. de 2012.
- [22] J. W. Antony, M. Schönauer, B. P. Staresina y S. A. Cairney, «Sleep spindles and memory reprocessing,» en *Trends Neurosci.*, vol. 42, n.º 1, págs. 1-3, ene. de 2019.
- [23] O. Theobald, *Machine learning for absolute beginners* (Machine Learning for Beginners). Independently Published, ene. de 2018.
- [24] S. Gupta, P. Kumar y R. Tekchandani, «A machine learning-based decision support system for temporal human cognitive state estimation during online education using wearable physiological monitoring devices,» *Decision Analytics Journal*, vol. 8, pág. 100 280, sep. de 2023. DOI: [10.1016/j.dajour.2023.100280](https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100280). dirección: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100280>.

- [25] J. D. Lane, S. J. Kasian, J. E. Owens y G. R. Marsh, «Binaural auditory beats affect vigilance performance and mood,» en, *Physiol. Behav.*, vol. 63, n.º 2, págs. 249-252, ene. de 1998.
- [26] L. Chaieb, E. C. Wilpert, T. P. Reber y J. Fell, «Auditory beat stimulation and its effects on cognition and mood States,» en, *Front. Psychiatry*, vol. 6, pág. 70, mayo de 2015.
- [27] D. Edwin, *GitHub - esdalmajer/MPy150: Python wrapper for BioPac's mpdev DLL to communicate with MP150 devices.* dirección: <https://github.com/esdalmajer/MPy150>.
- [28] M. M. Vela García, «Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad de sueño de las personas,» Tesis de licenciatura sin publicar, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, 2023, 79 págs.
- [29] M. D., *Personal EEG concentration tasks*, dic. de 2018. dirección: <https://www.kaggle.com/datasets/dqmonn/personal-eeeg-tasks/data>.
- [30] A. N. Belkacem, K. Kiso, E. Uokawa, T. Goto, S. Yorifuji y M. Hirata, «Neural processing Mechanism of mental calculation based on cerebral oscillatory changes: A comparison between Abacus experts and novices,» *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 14, abr. de 2020. DOI: [10.3389/fnhum.2020.00137](https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00137), dirección: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00137>.
- [31] A. Maghsoudi y A. Shalhaf, «Mental arithmetic task recognition using effective connectivity and hierarchical feature selection from EEG signals,» *Basic and clinical neuroscience*, vol. 12, n.º 6, págs. 817-826, nov. de 2021. DOI: [10.32598/bcn.2021.2034.1](https://doi.org/10.32598/bcn.2021.2034.1), dirección: <https://doi.org/10.32598/bcn.2021.2034.1>.
- [32] *Mental Arithmetic Test - a simple mental arithmetic test.* dirección: <https://olimato.it/mat/>.
- [33] *Toulouse Pieron test online.* dirección: https://metodorf.com/tests/bourdon/tuluz_peron.php.
- [34] S. Raschka, *Python Machine Learning.* ago. de 2015.
- [35] A. C. Müller y S. Guido, *Introduction to Machine Learning with Python.* O'Reilly Media, ene. de 2016.
- [36] K. Bob, *Sleep-EDF Database Expanded V1.0.0*, oct. de 2013. dirección: <https://www.physionet.org/content/sleep-edfx/1.0.0/>.
- [37] R.-N. Duan, J.-Y. Zhu y B.-L. Lu, «Differential entropy feature for EEG-based emotion classification,» págs. 81-84, 2013. DOI: [10.1109/NER.2013.6695876](https://doi.org/10.1109/NER.2013.6695876).
- [38] W.-L. Zheng y B.-L. Lu, «Investigating Critical Frequency Bands and Channels for EEG-Based Emotion Recognition with Deep Neural Networks,» *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 7, n.º 3, págs. 162-175, sep. de 2015. DOI: [10.1109/tamd.2015.2431497](https://doi.org/10.1109/tamd.2015.2431497), dirección: <https://doi.org/10.1109/tamd.2015.2431497>.
- [39] C. C. Aggarwal y C. K. Reddy, *Data clustering, Algorithms and Applications.* CRC Press, 21 de ago. de 2013.

14.1. Consentimiento informado del estudio de concentración y estado de ánimo, y sueño

A continuación se presentan los consentimientos informados para el estudio de concentración y estado de ánimo, y el respectivo para el estudio del sueño. En el consentimiento se detalla la información, el propósito y objetivo de la investigación, su procedimiento, el uso y la confidencialidad de los datos, los riesgos y beneficios asociados a la participación. Luego de ello, se detalla la declaración del participante como la del investigador sellando el documento con la firma del participante, del investigador y del asesor.



CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPACIÓN EN INVESTIGACIÓN

Este documento tiene el propósito de explicar todos los aspectos relacionados a la utilización y manejo de la información que se recabe durante las sesiones de evaluación y recolección de datos. Además, el de informar y solicitar su autorización para participar en el presente estudio de investigación. Léalo atentamente y consulte con el encargado de la investigación todas las dudas que tenga al respecto.

Información sobre la investigación

Nombre del estudio: Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas

Lugar y fecha: Guatemala, agosto de 2023

Número de participantes: 40

Encargados de la investigación: Margareth Marylú Vela Garcia y Oscar Alexander Fuentes López, estudiantes del programa de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad del Valle de Guatemala

Propósito y objetivo del estudio

El presente estudio de investigación tiene como objetivo analizar el impacto en el estado de ánimo y concentración de un sistema de generación de pulsos binaurales. Los resultados de este estudio permitirán obtener información preliminar sobre las terapias de neuro-retroalimentación y cómo estas pueden ser útiles para mitigar problemas emocionales como estrés, ansiedad, tensión, entre otras. Esto es de mucha importancia ya que dependiendo del estado de ánimo se puede presentar desinterés ante eventos de la vida cotidiana, falta de cognición, daño en las relaciones personales hasta llegar al punto de generar dolores musculares.

Procedimiento

Las personas que decidan participar en la investigación recibirán un trato digno, respetuoso y atento durante todo el procedimiento, recibiendo asesoría de personal capacitado. Si usted acepta participar en este estudio, se le solicitará la utilización de electrodos de superficie no invasivos, los cuales permiten detectar actividad eléctrica del cerebro mientras se le aplican diversas pruebas para observar su concentración o determinar su estado de ánimo.

A continuación, se detalla la estructura del protocolo de evaluación y recolección de datos:

1. El estudio consta de la realización de un electroencefalograma básico del cual se recolectarán los datos antes, durante y después de las pruebas.
2. Antes de realizar el procedimiento de recolección de datos se realizará una evaluación conductual sobre el estado de ánimo y/o concentración.
3. El procedimiento consiste en la medición de la actividad eléctrica del cerebro a través de electrodos de superficie no invasivos, la colocación de audífonos inalámbricos para la escucha de los pulsos binaurales con un volumen moderado y ajustable según la necesidad tal que esto no represente incomodidades al participante.
4. Se realizarán diversas pruebas para determinar el estado de ánimo y/o nivel de concentración.
5. Al finalizar se realizará una encuesta y evaluación posterior sobre los efectos percibidos durante el estudio.

Uso y confidencialidad de los datos

Si usted decide participar en el estudio, se le garantiza que toda la información proporcionada será manejada con absoluta confidencialidad. Sus datos personales no serán publicados ni revelados a nadie. El encargado de la investigación se hace responsable de la custodia y privacidad de estos, y del riguroso cumplimiento del secreto profesional en el uso y manejo de la información obtenida. Los datos que se obtengan de su participación serán utilizados únicamente con fines científicos y académicos por los encargados de la investigación dentro del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Riesgos poco frecuentes asociados a su participación en el estudio

A pesar de la adecuada selección de la técnica y el proceso de investigación detrás de este estudio, se pueden presentar efectos no deseados. Entre estos efectos no deseados asociados al procedimiento se puede presentar:

- Irritación en la piel por el contacto de los electrodos la cuál desaparecería en minutos o máximo una hora.
- Leve dolor de cabeza.

En el caso de presentarse alguna complicación asociada o no asociada al procedimiento el estudio será interrumpido de forma inmediata.

Beneficios asociados a su participación en el estudio

La falta de concentración es un factor que puede alterar de diversas maneras la calidad de vida de las personas provocando disminución de la capacidad de atención y rendimiento que impide la realización de las tareas cotidianas, dificultad para dormir o sensaciones inusuales de cansancio. Su participación en este estudio es muy valiosa ya que los resultados servirán para explorar problemas relacionados a la concentración a través de terapias de neuro-retroalimentación basada en pulsos binaurales. Con esta terapia se pretende ayudar a personas que presenten regularmente problemas con algunas emociones como estrés, ansiedad, tensión, entre otros.

Voluntariedad

Su participación es voluntaria. Si usted decide no participar o desea retirarse del estudio en cualquier momento, aun cuando haya iniciado la evaluación, puede hacerlo sin ningún problema.

Declaración de consentimiento de participación

Yo, _____
, he leído el presente documento de consentimiento informado y he comprendido las explicaciones en él facilitadas acerca de la participación en la investigación. También he podido resolver todas las dudas y preguntas que he planteado al respecto. Además, comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el consentimiento que ahora presento. Finalmente, he sido informado/a de que mis datos personales serán protegidos y serán utilizados únicamente con fines científicos y académicos. Tomando todo lo anterior en consideración y en tales condiciones, CONSIENTO participar en la investigación y que los datos que se deriven de mi participación sean utilizados para cubrir los objetivos especificados en el documento.

Declaración del encargado de la investigación

Yo, _____
, declaro no tener ningún conflicto de intereses y que he explicado la naturaleza y el objetivo de la investigación, y que el/la participante entiende en qué consiste su colaboración. He leído y explicado adecuadamente las partes del consentimiento informado. Así mismo, todas las preguntas que el/la participante ha hecho han sido contestadas de forma adecuada.

Fecha: _____ / _____ / _____

Firma del Participante

DPI _____

Firma del Investigador

DPI _____

Firma del Asesor

DPI _____

Contacto

Si tiene dudas puede comunicarse con:

Investigadores

Margareth Marylú Vela Garcia

Teléfono: +502 5944- 6898

Correo electrónico: vel19458@uvg.edu.gt

Oscar Alexander Fuentes López

Teléfono: +502 4196-4087

Correo electrónico: fue19816@uvg.edu.gt

Asesor

Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

Departamento de Ingeniería Electrónica,

Mecatrónica y Biomédica

Universidad del Valle de Guatemala

Correo electrónico: larivera@uvg.edu.gt



CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPACIÓN EN INVESTIGACIÓN

Este documento tiene el propósito de explicar todos los aspectos relacionados a la utilización y manejo de la información que se recabe durante las sesiones de evaluación y recolección de datos. Además, el de informar y solicitar su autorización para participar en el presente estudio de investigación. Léalo atentamente y consulte con el encargado de la investigación todas las dudas que tenga al respecto.

Información sobre la investigación

Nombre del estudio: Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas

Lugar y fecha: Guatemala, agosto de 2023

Número de participantes: 20

Encargados de la investigación: Margareth Marylú Vela Garcia y Oscar Alexander Fuentes López, estudiantes del programa de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad del Valle de Guatemala

Propósito y objetivo del estudio

El presente estudio de investigación tiene como objetivo analizar el impacto en la calidad de sueño de un sistema de generación de pulsos binaurales integrado a un clasificador automático de etapas de sueño. Los resultados de este estudio permitirán obtener información preliminar sobre las terapias de neuroretroalimentación y cómo estas pueden ser útiles para mitigar los problemas relacionados al sueño. Esto es de mucha importancia ya que la falta de sueño está asociada con importantes problemas médicos, psicológicos, sociales y económicos, los cuales pueden afectar el estado de ánimo y cognición de las personas.

Procedimiento

Las personas que decidan participar en la investigación recibirán un trato digno, respetuoso y atento durante todo el procedimiento, recibiendo asesoría de personal capacitado. Si usted acepta participar en este estudio, se le solicitará la utilización de un casco con electrodos de superficie no invasivos, los cuales permiten detectar actividad eléctrica del cerebro mientras usted duerme.

A continuación, se detalla la estructura del protocolo de evaluación y recolección de datos:

1. El estudio consta de una polisomnografía básica a través de un electroencefalograma, el cual se realiza durante la noche.
2. Antes de realizar el procedimiento de recolección de datos se realizará una evaluación conductual sobre la concepción del sueño.
3. El procedimiento consiste en la medición de la actividad eléctrica del cerebro a través de electrodos de superficie no invasivos, la colocación de audífonos inalámbricos para la escucha de los pulsos binaurales con un volumen moderado y ajustable según la necesidad tal que esto no represente incomodidades al participante.
4. Durante la recepción de la actividad eléctrica un clasificador automático predice la etapa del sueño y genera pulsos binaurales según la etapa que se detecte.
5. Al finalizar se realizará una encuesta y evaluación posterior sobre los efectos percibidos durante el estudio.

Uso y confidencialidad de los datos

Si usted decide participar en el estudio, se le garantiza que toda la información proporcionada será manejada con absoluta confidencialidad. Sus datos personales no serán publicados ni revelados a nadie. El encargado de la investigación se hace responsable de la custodia y privacidad de estos, y del riguroso cumplimiento del secreto profesional en el uso y manejo de la información obtenida. Los datos que se obtengan de su participación serán utilizados únicamente con fines científicos y académicos por los encargados de la investigación dentro del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Riesgos poco frecuentes asociados a su participación en el estudio

A pesar de la adecuada selección de la técnica y el proceso de investigación detrás de este estudio, se pueden presentar efectos no deseados. Entre estos efectos no deseados asociados al procedimiento se puede presentar:

- Irritación en la piel por el contacto con el gorro que contiene los electrodos, la cual desaparecería en horas.
- Dificultad para conciliar el sueño.
- Leve dolor de cabeza.

En el caso de presentarse alguna complicación asociada o no asociada al procedimiento el estudio será interrumpido de forma inmediata.

Beneficios asociados a su participación en el estudio

La deficiencia crónica de sueño, definida como el estado inadecuado o mínimo de sueño, es un factor determinante e infravalorado en lo que concierne al estado de salud, afectando de forma directa la longitud y calidad de vida de las personas. Su participación en este estudio es muy valiosa ya que los resultados servirán para explorar el tratamiento de trastornos de sueño a través de terapias de neuro-retroalimentación basada en pulsos binaurales. Con esta terapia se pretende ayudar a personas que tienen dificultad para conciliar el sueño y/o con sueño no reparador.

Voluntariedad

Su participación es voluntaria. Si usted decide no participar o desea retirarse del estudio en cualquier momento, aun cuando haya iniciado la evaluación, puede hacerlo sin ningún problema.

Declaración de consentimiento de participación

Yo, _____
, he leído el presente documento de consentimiento informado y he comprendido las explicaciones en él facilitadas acerca de la participación en la investigación. También he podido resolver todas las dudas y preguntas que he planteado al respecto. Además, comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el consentimiento que ahora presento. Finalmente, he sido informado/a de que mis datos personales serán protegidos y serán utilizados únicamente con fines científicos y académicos. Tomando todo lo anterior en consideración y en tales condiciones, CONSIENTO participar en la investigación y que los datos que se deriven de mi participación sean utilizados para cubrir los objetivos especificados en el documento.

Declaración del encargado de la investigación

Yo, _____
, declaro no tener ningún conflicto de intereses y que he explicado la naturaleza y el objetivo de la investigación, y que el/la participante entiende en qué consiste su colaboración. He leído y explicado adecuadamente las partes del consentimiento informado. Así mismo, todas las preguntas que el/la participante ha hecho han sido contestadas de forma adecuada.

Fecha: _____ / _____ / _____

Firma del Participante

DPI _____

Firma del Investigador

DPI _____

Firma del Asesor

DPI _____

Contacto

Si tiene dudas puede comunicarse con:

Investigadores

Margareth Marylú Vela Garcia

Teléfono: +502 5944- 6898

Correo electrónico: vel19458@uvg.edu.gt

Oscar Alexander Fuentes López

Teléfono: +502 4196-4087

Correo electrónico: fue19816@uvg.edu.gt

Asesor

Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Mecatrónica y Biomédica

Universidad del Valle de Guatemala

Correo electrónico: larivera@uvg.edu.gt

14.2. Protocolo de investigación

A continuación se presentan las primeras páginas del protocolo de investigación, del cual, se puede realizar una réplica del estudio presentado en este documento. En el documento se detalla la teoría, la metodología, los procedimientos a realizar y los dispositivos utilizados en la investigación. El mismo se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://drive.google.com/file/d/1UzbiVjTbRF-HJk3GvwPIQkMdVUV3x-ZT/view?usp=sharing>.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de los pulsos
binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del
sueño de las personas**

Protocolo de investigación

Guatemala,

2023

La calidad del sueño de las personas es un factor primordial para el bienestar general del ser humano. Este permite mantener un estilo de vida saludable, manteniendo un mejor control del estado de ánimo, así como, mayor concentración en las tareas del día a día. Sin embargo, cada vez más personas son afectadas por problemas relacionados al sueño o derivados de este problema como estrés, ansiedad, tensión, entre otras. A pesar que ya existen soluciones que permiten disminuir este problema como el uso de productos farmacéuticos, se necesita explorar otras alternativas que le permita a las personas poder mejorar su calidad de vida de una manera no invasiva como lo es el uso de pulsos binaurales.

En este protocolo se propone la realización de una investigación para analizar el impacto de los pulsos binaurales en la calidad del sueño, estado de ánimo y concentración de las personas. Debido a que ya se ha seguido esta línea de investigación, se va a tomar como punto de partida el software y los dispositivos desarrollados en fases anteriores, modificándolos a las nuevas necesidades del estudio y usándolos para poder realizar las pruebas con una mayor cantidad de muestras. Con ello, se busca determinar el impacto que tienen estos pulsos binaurales por medio de un análisis cualitativo y cuantitativo.