
Estudio de la aplicación de pulsos binaurales como método de inducción del sueño

Brandon Isai Cruz Escobar



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Estudio de la aplicación de pulsos binaurales como método de
inducción del sueño**

Trabajo de graduación presentado por Brandon Isai Cruz Escobar para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2024

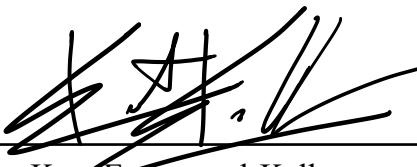
Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 03 de diciembre de 2024.

A lo largo de mi carrera, me ha fascinado la manera en que la tecnología puede aplicarse al estudio de fenómenos complejos y desarrollar soluciones innovadoras. Este trabajo representa la culminación de años de aprendizaje y esfuerzo, combinando conocimientos de ingeniería, biología, y procesamiento de señales para explorar el impacto de los pulsos binaurales en la inducción del sueño, un tema que no solo es relevante desde el punto de vista científico, sino que también puede tener aplicaciones prácticas en el bienestar y la calidad de vida de las personas.

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas que han estado a mi lado en cada etapa del camino. Primeramente, quiero agradecer a Dios, por darme la fortaleza y la oportunidad de llegar hasta este punto, guiándome en cada desafío. A mi familia, en especial a mis padres Miguel Cruz y Ana Rodríguez, por inculcarme el valor del esfuerzo y enseñarme a nunca rendirme ante los retos. A mis hermanos Ricardo y Michelle Cruz, y a mi prima Adriana, por brindarme su apoyo en los momentos más difíciles; y a mis sobrinos Valeria y André, quienes con su alegría y cariño me han motivado a seguir adelante. De igual forma agradezco a mi tía Iris Cruz y a mis abuelos Miguel Ángel e Irma Cruz, por su apoyo y confianza en mí a lo largo de este proceso, además de su ejemplo de trabajo y dedicación.

También quiero agradecer a mis amigos, quienes han sido un apoyo invaluable a lo largo de estos años, brindándome su compañía, motivación y palabras de aliento en los momentos más difíciles. Su ayuda ha sido fundamental para mantenerme enfocado y continuar adelante con determinación. De igual manera, quiero extender mi gratitud a todos los participantes del estudio y a todas las personas involucradas en la realización de esta investigación. Su colaboración y disposición hicieron posible la recolección de datos esenciales para este trabajo, permitiéndome llevar a cabo cada fase del experimento con éxito.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a mis catedráticos y mentores, quienes han compartido conmigo su conocimiento y experiencia, permitiéndome adquirir las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo. En especial, agradezco a mi asesor Dr. Luis Rivera, por su dedicación, paciencia y constante orientación durante todo el proceso. Asimismo, agradezco al Ingeniero Andrés Monterroso, cuya experiencia y apoyo fueron esenciales en la metodología y análisis de resultados, ayudándome a perfeccionar este estudio.

Índice

| | |
|--|------|
| Prefacio | III |
| Lista de figuras | XI |
| Lista de cuadros | XII |
| Resumen | XIII |
| Abstract | XIV |
| 1 Introducción | 1 |
| 2 Antecedentes | 2 |
| 3 Justificación | 6 |
| 4 Objetivos | 7 |
| 4.1 Objetivo General | 7 |
| 4.2 Objetivos Especificos | 7 |
| 5 Alcance | 8 |
| 6 Marco teórico | 10 |
| 6.1 Sueño | 10 |
| 6.2 Fisiología del sueño | 10 |
| 6.3 Fases del sueño | 11 |
| 6.3.1 Fase NREM (<i>No Rapid Eye Movement</i>) | 11 |
| 6.3.2 Fase REM (<i>Rapid Eye Movement</i>) | 11 |
| 6.4 Fisiología cardiovascular del sueño | 12 |
| 6.5 Trastornos del sueño | 13 |
| 6.6 Clasificación de ondas cerebrales | 14 |
| 6.7 Pulsos binaurales | 15 |
| 6.8 Ruido Rosa | 16 |
| 6.8.1 Efectos de Ruido Rosa | 16 |
| 6.9 Electroencefalograma (EEG) | 17 |
| 6.10 Electrocardiograma (ECG) | 17 |
| 6.11 Electrooculograma (EOG) | 18 |
| 6.12 Cythonboard | 19 |
| 6.13 Electro-Cap | 19 |

| | |
|--|-----------|
| 6.14 Biopac MP41 | 20 |
| 6.15 Recomendaciones para mejorar la calidad del sueño | 20 |
| 6.16 Aprendizaje automático | 21 |
| 6.16.1 Aprendizaje supervisado | 21 |
| 6.16.2 Aprendizaje no supervisado | 22 |
| 6.16.3 <i>Clustering</i> | 22 |
| 6.16.4 <i>Clustering</i> jerárquico | 22 |
| 6.17 Prueba estadística de Wilcoxon | 23 |
| 6.18 Índice de Rand | 24 |
| 7 Módulo generador de pulsos binaurales | 25 |
| 7.1 Pulsos binaurales mezclados con pista | 25 |
| 7.2 Pulsos binaurales con ruido rosa | 26 |
| 7.3 Generación de pulsos binaurales | 27 |
| 7.4 Reproducción de los pulsos y Configuración Experimental | 28 |
| 7.4.1 Dispositivos de reproducción | 28 |
| 7.4.2 Audífonos utilizados | 28 |
| 7.4.3 Implementación del experimento | 28 |
| 7.5 Experiencia y Retroalimentación de los Participantes | 28 |
| 7.5.1 Consideraciones sobre la percepción del sonido en las personas | 29 |
| 8 Protocolo de investigación | 30 |
| 8.1 Diseño Metodológico | 30 |
| 8.2 Consentimiento Informado | 31 |
| 8.2.1 Propósito y Objetivo del Consentimiento | 31 |
| 8.2.2 Información general sobre la investigación | 31 |
| 8.2.3 Procedimiento Experimental | 32 |
| 8.2.4 Confidencialidad de los Datos y Gestión de Riesgos en el Estudio | 32 |
| 8.2.5 Voluntariedad y Declaración de Consentimiento | 32 |
| 8.3 Colocación de electrodos | 33 |
| 8.3.1 Tipos de electrodos utilizados | 33 |
| 9 Obtención de señales fisiológicas | 35 |
| 9.1 Selección de señales a utilizar | 35 |
| 9.2 Sistema de procesamiento y análisis de señales | 37 |
| 9.3 Procesamiento y Clasificación de Señales EEG y EOG | 38 |
| 9.4 Colocación de Electrodos EEG (Electroencefalografía) | 40 |
| 9.5 Colocación de Electrodos EOG (Electrooculograma) | 40 |
| 9.6 Uso de banda de sujeción para estabilidad | 41 |
| 9.7 Capacitación sistema 10-20 | 42 |
| 10 Análisis del impacto de los pulsos binaurales a partir de los resultados de las encuestas realizadas a los sujetos de prueba | 43 |
| 10.1 Metodología utilizada para el análisis cualitativo de las respuestas de los participantes | 43 |
| 10.2 Resultados Hábitos del Sueño en Personas | 44 |
| 10.2.1 Perfil de Los Participantes | 44 |
| 10.2.2 Duración y Calidad del Sueño | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 10.2.3 Sensación de Descanso | 46 |
| 10.2.4 Calidad de Sueño | 46 |
| 10.2.5 Uso de Dispositivos Electrónicos Antes de Dormir | 47 |
| 10.2.6 Método para Inducir el Sueño | 47 |
| 10.2.7 Despertares Nocturnos | 48 |
| 10.2.8 Siestas Durante el Día | 49 |
| 10.2.9 Consumo de Alcohol Antes de Dormir | 49 |
| 10.2.10 Condiciones del Entorno | 50 |
| 10.2.11 Momento de Mayor Productividad | 50 |
| 10.2.12 Tiempo para Conciliar el Sueño | 51 |
| 10.2.13 Disposición a Probar Métodos Alternativos | 51 |
| 10.3 Resultados del estudio día 1 – Control (Sin Pulsos Binaurales) | 52 |
| 10.3.1 Perfil General de Los Participantes | 52 |
| 10.3.2 Edad | 53 |
| 10.3.3 Entorno adecuado | 53 |
| 10.3.4 Nivel de Estrés Antes de Dormir - Día 1 | 54 |
| 10.3.5 Nivel de Estrés Después de Dormir - Día 1 | 55 |
| 10.3.6 Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Día 1 | 55 |
| 10.3.7 Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Día 1 | 56 |
| 10.3.8 Facilidad para conciliar el sueño - Día 1 | 57 |
| 10.3.9 Percepción de la calidad del sueño - Día 1 | 57 |
| 10.4 Resultados del Estudio Días 2 y 3 - Pulsos Binaurales Mezclados con Ruido | |
| Rosa | 58 |
| 10.4.1 Nivel de Estrés Antes de Dormir - Días 2 y 3 | 58 |
| 10.4.2 Nivel de Estrés Después de Dormir - Días 2 y 3 | 59 |
| 10.4.3 Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Días 2 y 3 | 60 |
| 10.4.4 Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Días 2 y 3 | 60 |
| 10.4.5 Percepción Audio | 61 |
| 10.4.6 Nivel de Volumen Utilizado | 62 |
| 10.4.7 Percepción Calidad de Sueño | 62 |
| 10.4.8 Percepción Pulsos Binaurales | 63 |
| 10.5 Resultados del Estudio Días 4 y 5 - Pulsos Binaurales Mezclados con Pista | |
| de Fondo | 64 |
| 10.5.1 Nivel de Estrés Antes de Dormir - Días 4 y 5 | 64 |
| 10.5.2 Nivel de Estrés Después de Dormir - Días 4 y 5 | 64 |
| 10.5.3 Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Días 4 y 5 | 65 |
| 10.5.4 Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Días 4 y 5 | 66 |
| 10.5.5 Percepción de Audio | 66 |
| 10.5.6 Nivel de Volumen | 67 |
| 10.5.7 Percepción Calidad de Sueño | 68 |
| 10.5.8 Percepción Pulsos Binaurales | 68 |
| 10.6 Discusión | 69 |
| 11 Análisis cuantitativo a partir de los resultados de las encuestas realizadas | |
| a los sujetos de prueba | 71 |
| 11.1 Discusión de resultados | 73 |

| | |
|---|-----------|
| 12 Resultados del uso de pulsos binaurales como método de inducción al sueño mediante herramientas de aprendizaje automático | 74 |
| 12.1 Análisis utilizando algoritmos de agrupamiento | 75 |
| 12.2 Discusión | 79 |
| 13 Discusión de resultados sobre el impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño | 80 |
| 14 Conclusiones | 82 |
| 15 Recomendaciones | 84 |
| 16 Referencias bibliográficas | 86 |
| 17 Anexos | 89 |
| 17.1 Anexo 1: Protocolo de Investigación | 89 |
| 17.2 Anexo 2: Consentimiento Informado | 91 |
| 17.3 Anexo 3: Formularios | 95 |
| 17.3.1 Día 1 (control) | 95 |
| 17.3.2 Día 2 a 5 | 95 |
| 17.4 Anexo 4: Análisis de señales utilizando un algoritmo de agrupación | 95 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama pasos a seguir de la propuesta [4]. | 2 |
| Figura 2. Diagrama de sistema automático de clasificación usando pulsos binaurales [5]. | 3 |
| Figura 3. Captura de señales utilizando el algoritmo desarrollado [7]. | 4 |
| Figura 4. Impacto en el nivel de estrés antes y después de utilizar pulsos binaurales sin ruido rosa [9]. | 5 |
| Figura 5. Porcentajes de error en la obtención de un sueño ideal por noche del sujeto [10]. | 5 |
| Figura 6. Ritmo circadiano vigilia-sueño y la acción de la melatonina [15]. | 11 |
| Figura 7. Hipnograma de las diferentes etapas del sueño [16]. | 12 |
| Figura 8. Cambios cardiovasculares y pulmonares durante el sueño [17]. | 12 |
| Figura 9. Ondas cerebrales [20]. | 15 |
| Figura 10. Funcionamiento pulsos binaurales [22]. | 16 |
| Figura 11. Señal EEG [24]. | 17 |
| Figura 12. Electrocardiograma [18]. | 18 |
| Figura 13. Electrooculograma [24]. | 18 |
| Figura 14. Equipo completo Cythonboard [25]. | 19 |
| Figura 15. Equipo completo electro-Cap [26]. | 20 |
| Figura 16. Biopac MP41 [27]. | 20 |
| Figura 17. Dendograma generado por el método ward.D2 con distancia euclídea [30]. | 22 |
| Figura 18. Método del codo para determinar el número óptimo de clusters [30]. | 23 |
| Figura 19. Tanglegram que compara los métodos aglomerativos Complete y ward.D2 [30]. | 23 |
| Figura 20. Diagrama de flujo pulsos mezclado con pista. | 26 |
| Figura 21. Diagrama de flujo pulsos con ruido rosa. | 27 |
| Figura 22. Protocolo de investigación para aplicación a los sujetos de prueba. | 31 |
| Figura 23. Electroodos desechables por la empresa 3M. | 33 |
| Figura 24. Electroodos desechables por la empresa BIOPAC. | 34 |
| Figura 25. Prueba de señales bioelectricas. | 36 |
| Figura 26. Señal EEG y EOG. | 36 |
| Figura 27. Gráfica de señales obtenidas por el BIOPAC en MATLAB. | 37 |
| Figura 28. Señal dividida por segmentos de 30 segundos. | 38 |
| Figura 29. Diagrama de flujo programa de procesamiento de señales EEG Y EOG. | 39 |
| Figura 30. Colocación electroodos EEG según BIOPAC. | 40 |
| Figura 31. Colocación electroodos EOG según BIOPAC. | 41 |
| Figura 32. Colocación de banda. | 41 |
| Figura 33. Colocación electroodos sistema 10-20. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 34. <i>Edad de personas que contestaron el primer formulario.</i> | 44 |
| Figura 35. <i>Sexo de las personas que contestaron el formulario.</i> | 45 |
| Figura 36. <i>Resultado promedio de horas de sueño en las personas.</i> | 45 |
| Figura 37. <i>Percepción del descanso en las personas.</i> | 46 |
| Figura 38. <i>Calidad de Sueño en las personas.</i> | 46 |
| Figura 39. <i>Utilización de dispositivos antes de dormir.</i> | 47 |
| Figura 40. <i>Uso de métodos para facilitar el sueño.</i> | 48 |
| Figura 41. <i>Frecuencia de las personas al despertarse durante la noche.</i> | 48 |
| Figura 42. <i>Distribución de la frecuencia con la que las personas se despiertan durante la noche.</i> | 49 |
| Figura 43. <i>Entorno de sueño.</i> | 50 |
| Figura 44. <i>Momento de mayor productividad en las personas.</i> | 50 |
| Figura 45. <i>Tiempo para conciliar el sueño.</i> | 51 |
| Figura 46. <i>Disposición a probar métodos nuevos para dormir.</i> | 51 |
| Figura 47. <i>Sexo de los participantes.</i> | 52 |
| Figura 48. <i>Edad de los participantes.</i> | 53 |
| Figura 49. <i>Ambiente adecuado para dormir en los participantes.</i> | 54 |
| Figura 50. <i>Nivel de estrés en participante previo a realizar la prueba día 1.</i> | 54 |
| Figura 51. <i>Nivel de estrés en participante después de realizar la prueba.</i> | 55 |
| Figura 52. <i>Agotamiento en participantes previo a realizar la prueba.</i> | 56 |
| Figura 53. <i>Nivel de agotamiento en participantes después de realizar la prueba.</i> | 56 |
| Figura 54. <i>Facilidad para conciliar el sueño.</i> | 57 |
| Figura 55. <i>Percepción de la calidad del sueño.</i> | 58 |
| Figura 56. <i>Nivel de estrés en participante previo a realizar la prueba días 2 y 3.</i> | 59 |
| Figura 57. <i>Nivel de estrés en participante después de realizar la prueba días 2 y 3.</i> | 59 |
| Figura 58. <i>Nivel de agotamiento en participantes previo a realizar la prueba días 2 y 3.</i> | 60 |
| Figura 59. <i>Nivel de agotamiento después de realizar la prueba días 2 y 3.</i> | 61 |
| Figura 60. <i>Percepción de audio días 2 y 3.</i> | 61 |
| Figura 61. <i>Nivel de Volumen utilizado días 2 y 3.</i> | 62 |
| Figura 62. <i>Percepción de la calidad del sueño.</i> | 63 |
| Figura 63. <i>Percepción Pulsos Binaurales.</i> | 63 |
| Figura 64. <i>Comparación estrés-agotamiento en las personas en los días 4 y 5.</i> | 64 |
| Figura 65. <i>Nivel de estrés Después de realizar la prueba días 4 y 5.</i> | 65 |
| Figura 66. <i>Nivel de agotamiento antes de realizar la prueba días 4 y 5.</i> | 65 |
| Figura 67. <i>Nivel de agotamiento después de realizar la prueba días 4 y 5.</i> | 66 |
| Figura 68. <i>Percepción de audio de pulsos binaurales.</i> | 67 |
| Figura 69. <i>Nivel de volumen día 4 y 5.</i> | 67 |
| Figura 70. <i>Percepción calidad de sueño días 4 y 5.</i> | 68 |
| Figura 71. <i>Percepción pulsos binaurales para dormir días 4 y 5.</i> | 69 |
| Figura 72. <i>Diagrama de flujo de la prueba de Wilcoxon para estrés y agotamiento.</i> | 71 |
| Figura 73. <i>Flujo de Procesamiento de Señales bioeléctricas para Clustering Jerárquico.</i> | 74 |
| Figura 74. <i>Señal EEG con pulsos binaurales con ruido rosa, con pista y sin pulsos primer sujeto.</i> | 75 |
| Figura 75. <i>Gráfica de características para 3 señales EEG primer sujeto.</i> | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 76. <i>Clustering jerárquico para las 3 señales EEG primer sujeto.</i> | 76 |
| Figura 77. <i>Comparación señal EOG con pulsos binaurales con ruido rosa, con pista y sin pulsos primer sujeto.</i> | 77 |
| Figura 78. <i>Características extraídas para las 3 señales EOG del primer sujeto.</i> | 77 |
| Figura 79. <i>Clustering realizado a las características de las 3 señales sin saber las etiquetas para el primer sujeto.</i> | 78 |
| Figura 80. <i>Comparación señal EEG filtrada del día de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.</i> | 96 |
| Figura 81. <i>Gráfica de características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.</i> | 96 |
| Figura 82. <i>Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.</i> | 96 |
| Figura 83. <i>Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista sujeto 1.</i> | 97 |
| Figura 84. <i>Gráfica de características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista sujeto 1.</i> | 97 |
| Figura 85. <i>Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.</i> | 97 |
| Figura 86. <i>Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con ruido rosa sujeto 2.</i> | 98 |
| Figura 87. <i>Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada ruido rosa sujeto 2.</i> | 98 |
| Figura 88. <i>Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 2.</i> | 98 |
| Figura 89. <i>Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista de fondo sujeto 2.</i> | 99 |
| Figura 90. <i>Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2.</i> | 99 |
| Figura 91. <i>Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con pista de fondo sujeto 2.</i> | 99 |
| Figura 92. <i>Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.</i> | 100 |
| Figura 93. <i>Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.</i> | 100 |
| Figura 94. <i>Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo sujeto 2.</i> | 100 |
| Figura 95. <i>Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con ruido rosa sujeto 2.</i> | 101 |
| Figura 96. <i>Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada ruido rosa sujeto 2.</i> | 101 |
| Figura 97. <i>Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 2.</i> | 101 |
| Figura 98. <i>Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista de fondo sujeto 2.</i> | 102 |

| | |
|---|-----|
| Figura 99. Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2. | 102 |
| Figura 100. Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con pista de fondo sujeto 2. | 102 |
| Figura 101. Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2. | 103 |
| Figura 102. Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2. | 103 |
| Figura 103. Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo sujeto 2. | 104 |

Lista de cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. <i>consumo de alcohol antes de dormir.</i> | 49 |
| Cuadro 2. <i>Valor brindado al realizar la prueba Wilcoxon para el nivel de estrés.</i> . . | 72 |
| Cuadro 3. <i>Valor brindado al realizar la prueba Wilcoxon para el nivel de agotamiento.</i> | 72 |
| Cuadro 4. <i>Valor índice de Rand para diferentes sujetos señal EEG.</i> | 78 |
| Cuadro 5. <i>Valor randindex para diferentes sujetos señal EOG.</i> | 79 |

El sueño es un proceso fisiológico indispensable para el bienestar humano, y su alteración puede generar problemas significativos en la salud física y mental. En este contexto, los pulsos binaurales han surgido como una herramienta prometedora para mejorar la calidad del sueño. Este estudio tuvo como objetivo principal evaluar el impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño, centrándose en su capacidad para promover la relajación y reducir el tiempo necesario para conciliarlo.

La investigación se llevó a cabo mediante un protocolo experimental que incluyó cinco sesiones semanales. Durante estas sesiones, se utilizaron diferentes combinaciones de estímulos sonoros: pulsos binaurales puros, pulsos mezclados con ruido rosa y pulsos acompañados de una pista de fondo. Los datos se recopilaron mediante técnicas como electroencefalografía (EEG) y electrooculografía (EOG), complementadas con cuestionarios cualitativos aplicados antes y después de las pruebas.

Los resultados evidenciaron que los pulsos binaurales tienen cierto impacto positivo en la relajación y la inducción al sueño. En particular, las combinaciones con ruido rosa o pistas de fondo mostraron ser más efectivas que los pulsos binaurales puros. Sin embargo, se identificaron limitaciones, como la influencia de variables externas y las restricciones en la recolección de datos.

palabras clave: Sueño, pulsos binaurales, inducción al sueño, relajación, ruido rosa, pista de fondo, electroencefalografía (EEG), electrooculografía (EOG), calidad del sueño, experimentación.

This study evaluates the use of binaural beats as a method to induce sleep, focusing on their ability to promote relaxation and reduce the time needed to fall asleep. A structured experimental protocol was conducted over five weekly sessions, employing different auditory stimuli: pure binaural beats, beats mixed with pink noise, and beats combined with a background track.

Data were collected using electroencephalograms (EEG), electrooculograms (EOG), and pre- and post-experiment questionnaires. The results demonstrated that binaural beats, particularly when combined with pink noise or a background track, had a positive effect on relaxation and sleep induction. However, limitations such as external variables and logistical constraints influenced the outcomes.

This research provides valuable insights into the potential of binaural beats as a non-invasive tool to improve sleep quality. The findings lay the groundwork for future studies to optimize the effectiveness of binaural beats and explore their applications in clinical and everyday contexts.

Keywords: Sleep, binaural beats, sleep induction, relaxation, pink noise, background track, electroencephalography (EEG), electrooculography (EOG), sleep quality, experimentation.

CAPÍTULO 1

Introducción

El sueño es un proceso fisiológico esencial para la salud y el bienestar humano, que contribuye a la recuperación física, mental y emocional. Sin embargo, la falta de un sueño adecuado puede generar problemas como insomnio, ansiedad, estrés y disminución de la concentración, lo que afecta negativamente la calidad de vida. A pesar de la existencia de tratamientos convencionales como la farmacoterapia, estos suelen estar asociados con efectos secundarios, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas no invasivas que ofrezcan soluciones efectivas.

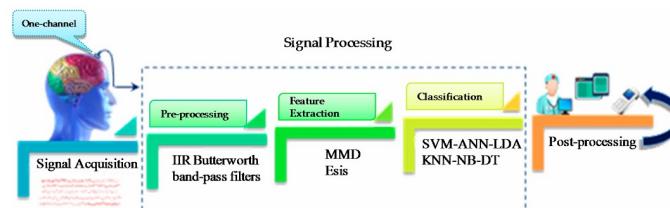
En este contexto, los pulsos binaurales han emergido como una herramienta prometedora. Este fenómeno auditivo, que se genera al procesar tonos de frecuencias ligeramente diferentes en cada oído, ha sido asociado con la capacidad de inducir relajación y facilitar la transición al sueño. Sin embargo, aunque los estudios preliminares han mostrado resultados alentadores, la investigación sobre su efectividad como método de inducción al sueño sigue siendo limitada, especialmente en el análisis de su impacto durante la transición entre vigilia y sueño.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño, centrándose en su capacidad para promover la relajación y reducir el tiempo necesario para conciliarlo. De manera específica, se busca analizar los efectos de diferentes configuraciones de pulsos binaurales, como pulsos puros, mezclados con ruido rosa, y combinados con una pista de fondo, utilizando métodos cualitativos y cuantitativos.

Con este trabajo, se espera no solo contribuir al conocimiento existente sobre los pulsos binaurales, sino también sentar las bases para futuras investigaciones que busquen optimizar su aplicación como una herramienta accesible y no invasiva para mejorar la calidad del sueño.

EL sueño es un proceso fisiológico vital para la salud en los seres humanos [1]. El dormir de una forma adecuada es tan importante como una buena alimentación o hacer ejercicio, el realizarlo nos ayuda a poder recuperarnos del estrés obtenido a través del día, tener un funcionamiento correcto física, emocional y mentalmente. El no tener un descanso adecuado puede llegar a afectar el estilo de vida o desarrollar problemas como insomnio, ansiedad, depresión o falta de concentración al momento de realizar actividades [2]. Debido a estas consecuencias en la actualidad se han realizado diferentes investigaciones acerca de métodos alternativos que ayuden a tener una mejor calidad del sueño, una de estas son la utilización de señales binaurales. Como puede verse en la Figura 1, en 2016 se realizó una investigación acerca de los diferentes métodos que usan señales binaurales para ayudar a dormir, con base en esto se desarrolló una propuesta a utilizar donde se filtra y descompone la señal usando filtros pasa banda como se puede observar en la Figura. En 2022 en Colombia se realizó un sintetizador de señales binaurales utilizando matlab, dando un resultado positivo para la utilización como método complementario para la inducción del sueño en las personas [3].

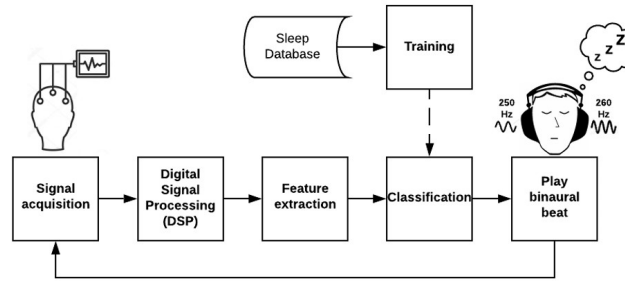
Figura 1: Diagrama pasos a seguir de la propuesta [4].



En la Universidad del Valle de Guatemala el estudio de señales binaurales en el sueño ha sido una línea de investigación que se ha desarrollado a través de estos últimos años. En 2019 se desarrolló la primera fase de la investigación con la creación de un sistema de monitoreo de señales binaurales aplicadas a personas, con el objetivo de tratar desórdenes de sueño [5]. Dividido en cinco etapas, el proyecto comenzó con la obtención de lecturas de ondas cerebrales mediante un Electro-Cap y un Cyton Board, seguido por el desarrollo de un

algoritmo en Python para la generación de los pulsos. Posteriormente se adquirieron datos en tiempo real del Cyton Board para procesarlos, de igual manera se utilizó la base de datos Sleep-EDF para obtener polisomnografías. Como puede verse en la Figura 2, la realización de este proyecto tuvo como resultado la definición de una estructura para la utilización de el sistema automático usando pulsos binaurales, sin embargo debido a que era una fase inicial no se llegó a implementar un sistema finalizado para uso en personas.

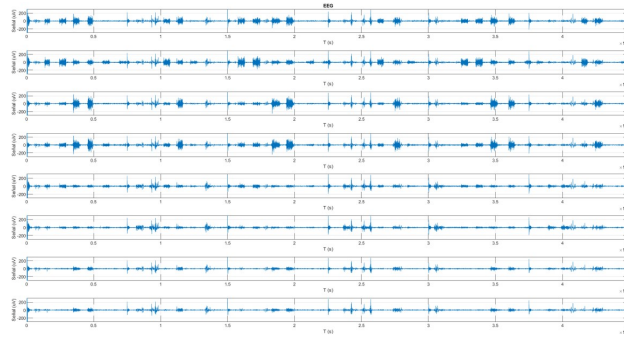
Figura 2: Diagrama de sistema automático de clasificación usando pulsos binaurales [5].



En el año 2020 se siguió con la siguiente fase donde se enfocó en diseñar e implementar un generador de pulsos binaurales para investigar sus efectos en la calidad del sueño de las personas [6]. Se dividió en tres etapas: adaptación de la fase inicial de investigación, desarrollo de una interfaz gráfica para producir los pulsos binaurales y evaluación cualitativa de la calidad del sueño de los participantes expuestos a dichos pulsos. Durante la investigación, se estimó que la banda de frecuencias centrales abarcaba entre 175 Hz y 3000 Hz, mientras que la del pulso binaural oscilaba entre 1 Hz y 30 Hz. A pesar de buscar determinar un rango de frecuencias inductoras del sueño, no se logró implementar la lectura de señales EEG ni realizar un análisis cuantitativo de los efectos de los pulsos binaurales, lo que constituyó una limitación de la investigación.

Simultáneamente se trabajó en el seguimiento de la clasificación automática de las etapas del sueño, mediante la creación de un algoritmo capaz de obtener datos provenientes de la conexión entre el Electro-cap y Cyton Board utilizando técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*- ML) [7]. Este algoritmo procesó las diferentes características de las señales para su extracción de información y clasificación, con el fin de monitorear las etapas del sueño como se puede observar en la Figura 3. Para lograr un resultado exitoso, se implementaron metas específicas y se utilizaron diferentes técnicas de reconocimiento de patrones para señales. Los resultados más importantes incluyeron la obtención de las diferentes ondas que se experimentan a lo largo del ciclo del sueño. Sin embargo, la necesidad de obtener datos de entrenamiento durante un periodo prolongado era necesario para una mejor clasificación de las señales.

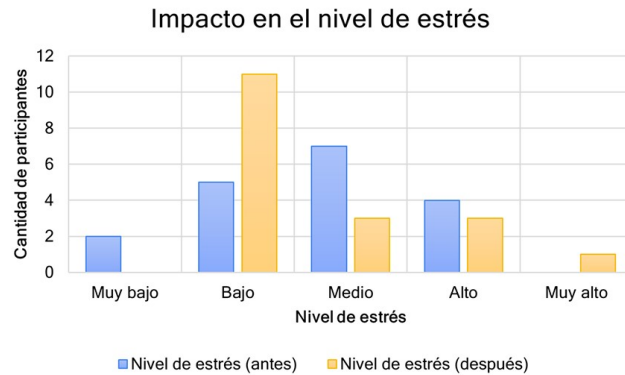
Figura 3: *Captura de señales utilizando el algoritmo desarrollado [7].*



Durante el año 2021, Diego Alegría [8] realizó una integración de las fases previas de la línea de investigación, se desarrolló un sistema de clasificación automática de las etapas del sueño, combinando el reconocimiento de patrones de señales biomédicas con la generación de pulsos binaurales para mejorar los clasificadores basados en algoritmos de aprendizaje automático. Se llevó a cabo una investigación de las fases anteriores, utilizando pruebas estadísticas para validar los resultados obtenidos. Los principales hallazgos incluyeron una mejora en la clasificación de las etapas del sueño y una exitosa integración de los módulos, aunque no se logró utilizar todas las herramientas ya que solo se usó un solo canal para extraer las características de las señales debido a interferencias por el movimiento de los sujetos.

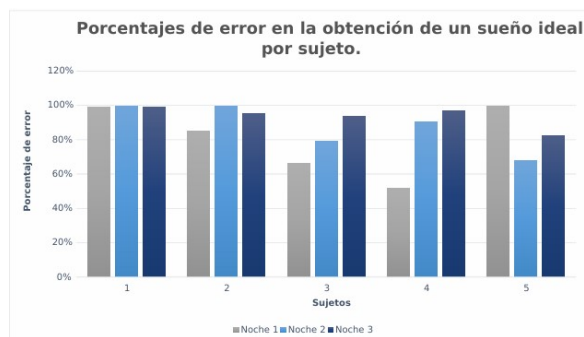
En el año 2023 se continuó la investigación, se centró en realizar un análisis estadístico del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño de las personas [9]. Para ello, se diseñaron documentos protocolarios y se implementaron cambios en la metodología de uso de los equipos. Se definieron pruebas experimentales que aprovecharon herramientas de fases anteriores, como el módulo generador de pulsos binaurales, aunque este se adaptó para cada caso de estudio. De igual forma se realizó un análisis cualitativo mediante cuestionarios completados antes y después de las pruebas experimentales, además de un análisis cuantitativo. Se utilizaron pruebas estandarizadas para contar con métodos de validación adicionales y llevar a cabo un estudio más riguroso. Con base a esto se logró identificar que existe un impacto significativo en los niveles de concentración y estado de ánimo de los participantes posteriormente a la aplicación de pulsos binaurales, tanto con como sin ruido rosa, como se puede observar en la Figura 4. Sin embargo, se observó que la aplicación de los pulsos sin ruido rosa no generó un impacto estadísticamente significativo en los niveles de concentración, aunque sí produjo un impacto moderado en el estado de ánimo de las personas.

Figura 4: Impacto en el nivel de estrés antes y después de utilizar pulsos binaurales sin ruido rosa [9].



Simultáneamente se trabajó en la exploración del efecto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo y calidad del sueño, mediante la recolección de electroencefalogramas (EEG) y el uso de distintos algoritmos de aprendizaje automático [10]. Se diseñaron pruebas específicas y se verificó la cantidad de etapas en las que los sujetos se encontraban en las distintas fases del sueño. Logrando identificar que los pulsos binaurales tuvieron un impacto negativo en la calidad del sueño como se puede ver en la Figura 5, pero sí afectaron el estado de ánimo de las personas. Se observó que los pulsos binaurales fueron deficientes en actividades que requerían alta concentración, mientras que fueron beneficiosos en aquellas que requerían una concentración moderada. Además, se desarrolló un algoritmo para la extracción de características de las señales EEG. Se empleó la lectura de señales EEG para clasificar el estado de ánimo de los sujetos debido a la complejidad del estudio. Sin embargo no hubo implementación de las señales binaurales con diferentes frecuencias para medir su impacto a las personas, así como la validación del análisis cuantitativo para validar el estudio.

Figura 5: Porcentajes de error en la obtención de un sueño ideal por noche del sujeto [10].



La ausencia de sueño puede llegar a generar alteraciones conductuales y afectar directamente el sistema inmune, haciendo que este no tenga una respuesta adecuada ante cualquier problema de salud. Del mismo modo esto tiene como consecuencia el desarrollo del insomnio, el cual es un tipo de trastorno del sueño, y el más frecuente en la población [11]. Una de las razones por la que se sigue luchando con este tipo de problemas actualmente se debe a las deficiencias en los tratamientos actuales, específicamente por los efectos secundarios de la farmacoterapia [12].

En 2017 se realizó una investigación en Colombia con el objetivo de identificar la viabilidad del uso de farmacoterapia como tratamiento del insomnio, dando como resultado que luego de 2 semanas de el tratamiento el 40 por ciento de los pacientes presentaron un signo de efecto secundario [13]. En la actualidad, se encuentran proyectos acerca de la utilización de señales binaurales en el sueño, sin embargo es muy difícil encontrar investigaciones utilizando estas señales como método de inducción al sueño, y es ahí donde surge la idea de este proyecto. El objetivo principal es realizar pruebas con personas utilizando pulsos binaurales para determinar si tienen algún tipo de impacto al momento de la inducción al sueño, ya sea promoviendo la relajación o reduciendo el tiempo necesario para quedarse dormido.

En fases anteriores se ha logrado identificar los impactos que las señales binaurales pueden tener en las personas en las fases del sueño [10], [9]. Sin embargo, un factor que no se ha estudiado a profundidad son los momentos previos al sueño, o la posibilidad de volver a inducir al sueño si la persona se despierta en el transcurso de la noche. En este trabajo se planteó seguir con el trabajo realizado anteriormente. Sin embargo, el enfoque estuvo en lo que sucede antes de que la persona llegue a dormir, para poder evaluar la utilidad de la aplicación de los pulsos binaurales como método para inducir el sueño.

4.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de la aplicación de pulsos binaurales como método de inducción del sueño en las personas.

4.2. Objetivos Específicos

- Revisar el protocolo de investigación para el estudio del impacto de pulsos binaurales en la calidad del sueño desarrollado en fases anteriores, y adaptarlo para el estudio del impacto de las señales como método para inducción del sueño.
- Implementar el protocolo de investigación con la mayor cantidad de sujetos de prueba posible.
- Realizar un análisis cualitativo del efecto de la aplicación de pulsos binaurales a partir de las respuestas de cuestionarios pasados a sujetos de prueba.
- Realizar un análisis cuantitativo del efecto de los pulsos binaurales a partir de señales bioeléctricas y respuestas corporales.

Este estudio forma parte de la línea de investigación sobre el uso de pulsos binaurales en el sueño. En fases anteriores, se exploró el efecto de estos pulsos en todas las etapas del sueño, haciendo una clasificación y evaluar si hubo algún cambio significativo. Sin embargo, debido a las restricciones impuestas por la pandemia, la muestra de participantes fue limitada. En 2023, se continuó con la investigación bajo condiciones más favorables, centrándose en evaluar el impacto de los pulsos binaurales en las emociones de los individuos.

En esta investigación, basándose en estudios previos, se adoptó un enfoque diferente. Se amplió la muestra tanto como fue posible y se diseñó un estudio controlado y no controlado. En el estudio controlado, se encontraba presente una persona durante las mediciones para poder realizar la extracción de señales del electroencefalograma y el electrooculograma, mientras que en el estudio no controlado, se proporcionaron instrucciones, material y formularios a los participantes para que los completaran después de cada sesión. Es importante señalar que este estudio no tuvo como objetivo ofrecer soluciones a problemas relacionados con el sueño ni desarrollar tratamientos. Su propósito fue analizar el impacto de los pulsos binaurales tanto cualitativa como cuantitativamente, explorando su influencia en las personas al momento de levantarse.

Para la toma de mediciones, se decidió utilizar el Biopac MP41. Inicialmente se consideró el uso de un electrocáp conectado a la Cytonboard, pero debido a que este equipo se había utilizado en las fases anteriores no estaba en la condición adecuada, la señal de los electrodos requeridos para realizar el análisis no funcionaba, por lo que se decidió probar con otro equipo para realizar las mediciones. Además, se tuvo acceso al equipo Biopac MP36 el cual tiene muchas más entradas para realizar mediciones, pero debido a las políticas de la universidad y la necesidad de proteger el equipo, no fue posible su traslado fuera del campus. Esto representó una limitación significativa, dado que las pruebas se realizaron en los hogares de los participantes. Debido a que el Biopac MP41 es un equipo para realizar pruebas portátiles se tenía la limitante que la cantidad máxima de tiempo que se puede realizar las pruebas es de treinta minutos.

Se consideraron múltiples variables que podrían influir en el estudio y se tomaron medidas para que estas no fueran tan significativas. Se aseguró un ambiente ideal para el sueño, con condiciones oscuras, silenciosas y tranquilas. Originalmente se planteó realizar el estudio durante cinco días consecutivos para cada persona. Sin embargo, viendo todas las variables que no se podían controlar se optó por una duración de un día por semana dando como resultado que el estudio iba a concluir en cinco semanas, para asegurar que los participantes mantuvieran una rutina lo más constante posible. En el primer día se tomaba una prueba de control para poder tener una información base con la que comparar, los días 2 y 3 se realizó el análisis utilizando solamente pulsos binaurales puros mezclados con ruido rosa, mientras que los días 4 y 5 se utilizaron los pulsos binaurales mezclados con una pista para poder armonizar el sonidos. A pesar de los esfuerzos por eliminar factores externos, hubo días en los que se presentaron inconvenientes o fallos durante las mediciones, lo que ocasionó que el estudio tomara más tiempo del previsto.

Finalmente, para el estudio del impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño, se implementó el protocolo de investigación con la mayor cantidad de sujetos posible, obteniendo resultados tanto cuantitativos como cualitativos. Sin embargo, el estudio se vio afectado debido a que las pruebas se realizaron un día por semana, lo que extendió el proceso de recolección de datos durante un largo período, lo que influyó en la realización de la prueba con más personas. Algo importante de aclarar es que debido al enfoque del estudio en esta fase sólo se evaluó cuando la persona pasa de estado vigilia a cualquier fase de sueño.

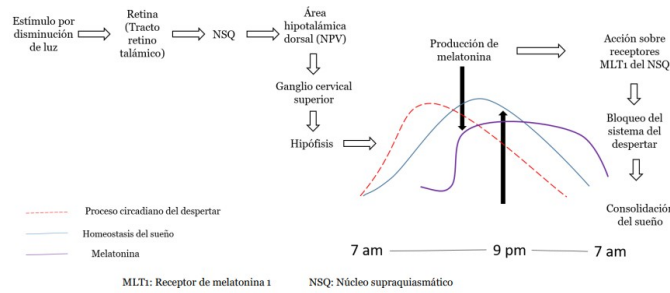
6.1. Sueño

El sueño es un estado de inactividad natural, que se repite periódicamente, caracterizado por la pérdida del conocimiento y una capacidad de respuesta reducida a los estímulos externos, se puede despertar fácilmente o difícilmente dependiendo en qué etapa se encuentre. Es una parte esencial de la vida, tan importante para nuestra salud y bienestar como el aire, la comida y el agua. En promedio, las personas pasan alrededor de un tercio de sus vidas durmiendo. Debido a su importancia, la interrupción del sueño reparador puede llevar a una disminución en la calidad de vida y salud. Se cree que el sueño contribuye a la restauración del sistema nervioso central, ahorro de energía, regulación de la temperatura corporal, eliminación de memorias irrelevantes y procesamiento de información [14].

6.2. Fisiología del sueño

El ciclo circadiano es un patrón regular de fluctuación en procesos fisiológicos que está ligado al ciclo de sueño y vigilia, y que se extiende a lo largo de aproximadamente 24 horas. Este ciclo está coordinado y controlado por el sistema nervioso central. El ciclo sueño-vigilia regula varios procesos corporales y se ajusta al entorno a través de la exposición a la luz solar, actividad física, alimentación y el sueño. Cada persona tiene sus propias características en relación con los ritmos circadianos, principalmente relacionados con la hora de dormir, la hora de despertarse y las actividades diarias. Estos patrones individuales estables en el tiempo se denominan cronotipos, y están determinados por factores genéticos, edad, género y ambiente, se pueden identificar personas que tienden a acostarse y levantarse temprano (diurnos) versus aquellos que lo hacen más tarde (vespertinos). Se ha observado que los cronotipos vespertinos están asociados con menos horas de sueño, bajo rendimiento académico y hábitos alimenticios menos saludables, lo que aumenta el riesgo de desarrollar problemas metabólicos como la obesidad [15].

Figura 6: *Ritmo circadiano vigilia-sueño y la acción de la melatonina* [15].



6.3. Fases del sueño

El sueño se compone de ciclos entre las fases NREM y REM, cada una con características únicas en términos de actividad cerebral, funciones fisiológicas y experiencias subjetivas como los sueños. Estos ciclos de sueño son esenciales para la salud física y mental, y su alteración puede tener efectos significativos en el bienestar general y la función cognitiva [16].

6.3.1. Fase NREM (*No Rapid Eye Movement*)

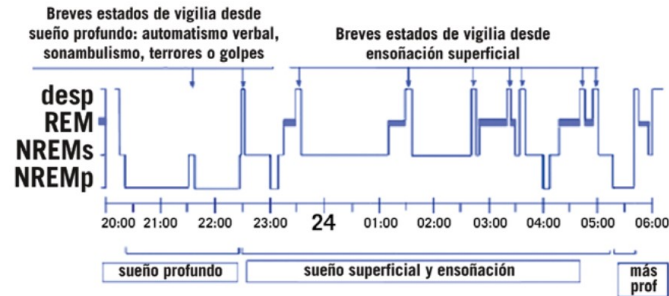
- **Fase N1:** esta fase es superficial y corta. Es fácil despertar al sujeto desde este estado. Durante la fase N1, los ojos se mueven lentamente bajo los párpados cerrados sin un patrón rítmico, la respiración es tranquila y la frecuencia cardíaca es lenta. Los movimientos corporales son groseros mientras el sujeto busca una posición cómoda para dormir. Aunque se puede estar pensando en problemas diurnos, después de 10 minutos en esta fase, no se recuerda lo que se ha escuchado, leído o preguntado justo antes de dormirse [16].
- **Fase N2:** esta fase constituye aproximadamente el 50 por ciento del sueño total. Durante la fase N2, aparecen ondas cerebrales características, como los complejos K y los husos de sueño (a partir de los 3 meses de edad). No hay movimientos oculares, la frecuencia cardíaca es lenta con alguna arritmia y los sueños son poco comunes y generalmente no se recuerdan [16].
- **Fase N3:** es una fase de sueño profundo y reparador. Se caracteriza por la presencia de ondas delta cerebrales, ausencia de movimientos oculares, frecuencia cardíaca y respiratoria muy lentas, y ausencia de sueños [16].

6.3.2. Fase REM (*Rapid Eye Movement*)

- Esta fase se caracteriza por movimientos oculares rápidos (*Rapid Eye Movements*), irregularidades en la frecuencia cardíaca y respiración, y una aparente parálisis del cuerpo, excepto por pequeños movimientos musculares periféricos y sacudidas leves. Durante el sueño REM, se experimentan sueños emocionales vívidos y activos. Esta fase es más frecuente hacia el final de la noche y el EEG (electroencefalograma) se asemeja

al estado de vigilia. La fase REM se ve favorecida durante procesos de aprendizaje activo y se asocia con una alta actividad cerebral [16].

Figura 7: Hipnograma de las diferentes etapas del sueño [16].



6.4. Fisiología cardiovascular del sueño

Desde el punto de vista cardiovascular, el sueño se divide en dos fases principales con cambios en los parámetros cardiovasculares y respiratorios: sueño NREM y REM. Como se puede observar en la Figura 8 durante el sueño NREM, que abarca los estadios I-III, predomina el control parasimpático, reduciendo el gasto cardíaco, la resistencia periférica, la presión arterial y la frecuencia cardíaca. Además, la resistencia pulmonar aumenta, la PaCO₂ (Presión parcial de dióxido de carbono en sangre arterial) se incrementa ligeramente, mientras que la PaO₂ (presión arterial de oxígeno) y la frecuencia respiratoria disminuyen, reduciendo la tasa metabólica corporal. En el estadio N3 del sueño NREM, la presión arterial y la frecuencia cardíaca alcanzan sus niveles más bajos [17].

Figura 8: Cambios cardiovasculares y pulmonares durante el sueño [17].

| Características fisiológicas | Sueño NREM | Sueño REM |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|
| Frecuencia cardíaca | Disminuye | Sin cambios |
| Eyección cardíaca | Disminuye | Sin cambios |
| Presión arterial sistémica | Disminuye | Sin cambios |
| Presión arterial pulmonar | Aumenta | Aumenta |
| Resistencia vascular periférica | Disminuye | Disminuye |
| Flujo sanguíneo cerebral | Disminuye | Aumenta |
| Frecuencia Respiratoria | Disminuye | Variable |
| Ventilación alveolar | Disminuye | Disminuye |
| PaCO ₂ | Aumenta levemente | Aumenta levemente |
| PaO ₂ | Disminuye levemente | Disminuye levemente |
| SaO ₂ | Disminuye levemente | Disminuye levemente |
| Respuesta ventilatoria hipóxica | Disminuye | Disminuye |
| Respuesta ventilatoria hipercápnic | Disminuye levemente | Disminuye marcadamente |
| Tono muscular VAS | Disminuye | Disminuye |
| Resistencia VAS | Aumenta | Aumenta |

En contraste, durante el sueño REM, predomina la actividad simpática, con ligeros incrementos en los parámetros cardiovasculares, aproximándose a los niveles de vigilia, aunque generalmente son inferiores. Respiratoriamente, se mantienen los cambios observados en el sueño NREM, con aumento de la resistencia pulmonar, PaCO₂ elevada y ligera disminución

de PaO₂ y SatO₂. Estos cambios cardiovasculares se asocian con un aumento de la resistencia en las vías aéreas superiores debido a la disminución del tono muscular, más marcado en el sueño REM. El sistema nervioso autónomo modula el control cardiovascular y respiratorio durante el sueño. El control ventilatorio central puede verse alterado por la edad, factores genéticos, enfermedades o la sensibilidad del sistema [17].

6.5. Trastornos del sueño

Los trastornos del sueño, frecuentes en nuestra sociedad, pueden originarse por diversas condiciones de índole. Una clasificación común de estos trastornos es la siguiente [18]:

- **Insomnio:** el insomnio es cuando se tiene dificultades para iniciar o mantener el sueño. Además genera un deterioro diurno que afecta el rendimiento funcional y la calidad de vida de la persona. Es un motivo común de consulta en la práctica clínica y su diagnóstico se basa principalmente en la información proporcionada por la persona. La depresión se asocia con un sueño de mala calidad y provoca una reducción significativa del sueño profundo (etapas 3 y 4), lo que causa cansancio durante el día. El abuso de alcohol y drogas también es un factor que puede causar insomnio. Para el diagnóstico de insomnio crónico, las nuevas clasificaciones requieren que los problemas de sueño ocurran al menos tres noches por semana durante un mínimo de tres meses [11].
- **Hipersomnias:** la hipersomnia es un trastorno que causa sueño excesivo y somnolencia. La narcolepsia es un ejemplo de hipersomnia, se caracteriza por ataques incontrolables de sueño diurno, mientras que el sueño nocturno permanece relativamente normal. La apnea del sueño es otra condición que indirectamente causa hipersomnia. Durante el sueño nocturno, el paciente sufre de suspensiones frecuentes y prolongadas de la respiración (>10 s), lo que provoca despertares debido a los ronquidos. Como resultado, un paciente con apnea del sueño tiene un sueño profundo interrumpido y está muy cansado durante el día (la apnea del sueño también puede clasificarse como insomnio).
- **Trastorno del ritmo circadiano:** los trastornos del ritmo circadiano son alteraciones en el ciclo sueño-vigilia. El ejemplo más conocido es el *jet lag*, que resulta de volar a través de varios horarios. Una condición más seria ocurre en personas cuyo ritmo diurno es ligeramente superior a 24 horas, llevando a un desplazamiento progresivo del sueño diurno al nocturno y viceversa, lo que dificulta mantener un horario de trabajo y descanso normal.
- **Parasomnias:** las parasomnias son las desviaciones en el patrón normal de sueño. Estos trastornos están relacionados con desviaciones del bienestar normal durante el sueño, sin necesariamente provocar despertares. La pesadilla es el tipo más común, siendo un sueño que contiene situaciones amenazantes y está relacionado con un aumento de la actividad autonómica, reflejada por un drástico aumento de la frecuencia cardíaca. El terror nocturno es una condición más grave, no relacionada con sueños, caracterizada por gritos agudos; esta condición se observa principalmente en niños.

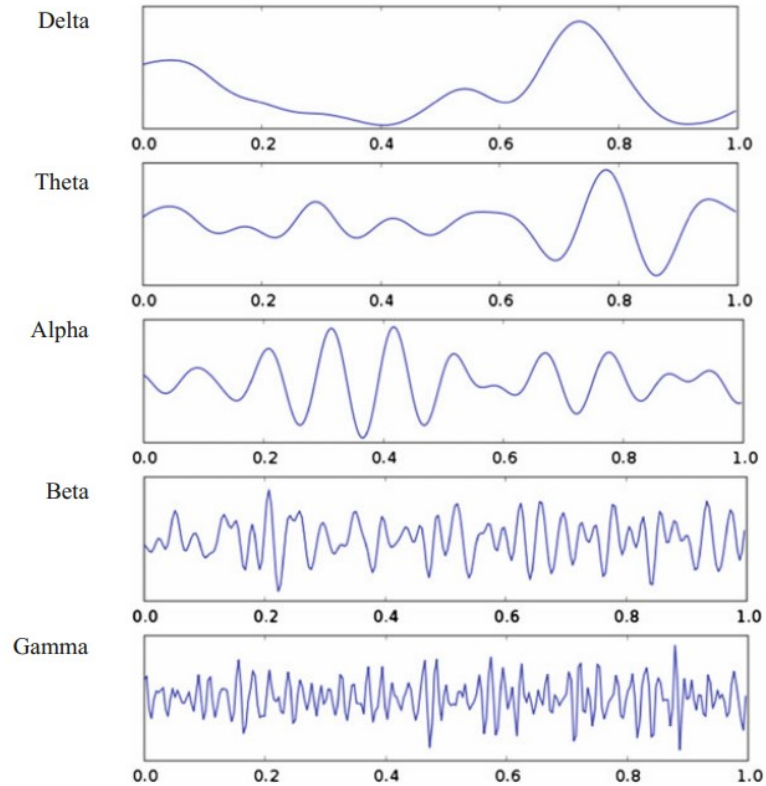
6.6. Clasificación de ondas cerebrales

Las ondas cerebrales y la clasificación de características de la señal EEG se realizan mediante técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales, como la transformada rápida de Fourier (FFT). Normalmente, la amplitud de voltaje de la señal EEG oscila entre 10 y 100 μV , siendo comúnmente utilizada en el rango de 10 a 50 μV . El espectro de frecuencia de la señal EEG varía desde componentes ultra lentos hasta ultra rápidos [19].

Hay cinco tipos principales de ondas cerebrales, cada una relacionada con diferentes estados mentales [19]:

- **Ondas Alfa:** estas ondas cerebrales se producen cuando una persona cierra los ojos y está en un estado relajado, lo que indica una forma de onda normal. La frecuencia de las ondas alfa está en el rango de 7 a 12 Hz y se genera rítmicamente en la parte occipital del cerebro.
- **Ondas Beta:** las ondas beta se producen cuando una persona está alerta o ansiosa, siendo un ritmo dominante. Normalmente se generan en la parte frontal y central del cerebro, presentes en todas las edades. La frecuencia de las ondas beta está en el rango de 13 a 30 Hz.
- **Ondas Delta:** estas ondas se producen cuando una persona está en un sueño profundo o sin sueños. La frecuencia de las ondas delta está en el rango de 0.5 a 3 Hz.
- **Ondas Theta:** las ondas theta se producen cuando una persona está en sueño. La frecuencia de las ondas theta está en el rango de 4 a 7 Hz. Son las ondas más lentas y aparecen al cerrar los ojos, desapareciendo al abrirlos, principalmente en adultos.
- **Ondas Gamma:** las ondas Gamma que se producen en condiciones anormales o trastornos mentales y tienen una frecuencia entre 30 Hz y 100 Hz, asociadas con actividad mental superior y función motora.

Figura 9: Ondas cerebrales [20].



6.7. Pulsos binaurales

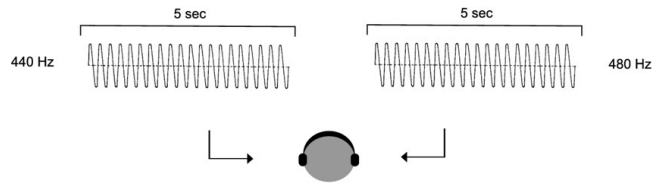
Los pulsos binaurales son un fenómeno perceptual que ocurre cuando dos tonos de frecuencias ligeramente diferentes se presentan por separado a cada oído a través de audífonos estéreo. Aunque cada oído percibe solo uno de los tonos, el cerebro procesa estas señales de manera que el oyente percibe un solo tono que varía en amplitud a una frecuencia igual a la diferencia entre los dos tonos originales [21].

Este fenómeno se debe a que cada oído escucha solo una de las frecuencias, la persona percibe un tono único que varía en amplitud a una frecuencia igual a la diferencia entre las dos frecuencias originales. Por ejemplo como se puede ver en la Figura 10 al escuchar tonos de 440 Hz y 480 Hz, la diferencia entre las dos frecuencias es de 40Hz por lo que el cerebro percibe una señal con una modulación de frecuencia de 40 Hz. Este efecto no ocurre en el espacio físico, sino que es generado por el procesamiento auditivo del cerebro en los núcleos olivares del tronco encefálico [22].

Los pulsos binaurales permiten la estimulación del sistema auditivo a frecuencias muy bajas, por debajo del umbral de audición, y se ha sugerido que puede inducir cambios en el estado de conciencia del oyente, con aplicaciones potenciales en la mejora del rendimiento cognitivo y emocional. Por ejemplo, se ha observado que los pulsos binaurales en el rango de frecuencias beta pueden mejorar la atención y el desempeño en tareas de memoria, mientras

que los pulsos en el rango alfa pueden aumentar la relajación mientras que los pulsos en el rango theta/delta (asociadas con estados de somnolencia) pueden inducir estados similares a la meditación o al trance [22].

Figura 10: *Funcionamiento pulsos binaurales* [22].



Los pulsos binaurales se diferencian de los pulsos monaurales en que estos últimos son detectados de manera periférica en la cóclea cuando se presentan frecuencias compuestas a ambos oídos simultáneamente. En contraste, los pulsos binaurales son procesados de manera central, requiriendo la acción combinada de ambos oídos y se perciben subjetivamente “dentro” de la cabeza [21].

6.8. Ruido Rosa

El ruido rosa, también conocido como ruido $1/f$, es un tipo de señal caracterizada por su densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia. Esta propiedad lo distingue de otros tipos de ruido como el ruido blanco y el ruido marrón. El ruido rosa se encuentra de manera natural en múltiples sistemas complejos, incluyendo procesos fisiológicos como la variabilidad del ritmo cardíaco y la actividad cerebral [23].

A diferencia del ruido blanco, que tiene una distribución uniforme de energía en todas las frecuencias, el ruido rosa concentra más energía en las frecuencias bajas, lo que genera un sonido suave y continuo. Estudios recientes han explorado su capacidad para influir en la actividad cerebral, destacando su potencial para reducir la complejidad de las ondas cerebrales y mejorar la calidad del sueño [23].

6.8.1. Efectos de Ruido Rosa

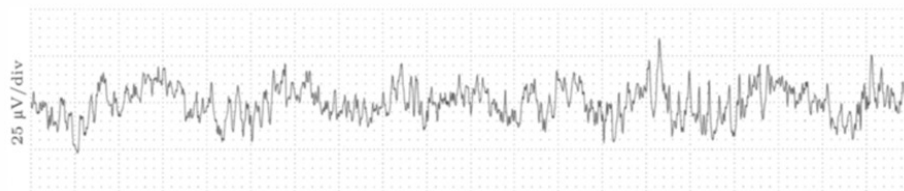
Según un estudio de Zhou, la exposición al ruido rosa puede sincronizar las ondas cerebrales, reduciendo su complejidad. Este fenómeno fue evaluado mediante análisis de señales electroencefalográficas (EEG) en un experimento que alternó períodos de silencio y ruido rosa. Los resultados mostraron una disminución significativa en la dimensión fractal de las señales cerebrales durante la exposición al ruido rosa, lo que sugiere una tendencia hacia un estado cerebral más estable. También evaluó la influencia del ruido rosa en la consolidación del sueño, la exposición al ruido rosa incrementó significativamente el porcentaje de tiempo de sueño estable [23].

6.9. Electroencefalograma (EEG)

El electroencefalograma (EEG) es una técnica fundamental para estudiar la actividad eléctrica del cerebro humano. El cerebro, siendo la materia orgánica más compleja conocida por el hombre, ha sido objeto de una extensa investigación a lo largo del tiempo. Después de Richard Caton, los experimentos de Hans Berger sentaron las bases de la electroencefalografía (EEG), una herramienta clínica no invasiva crucial para entender el cerebro humano y diagnosticar diversas alteraciones funcionales cerebrales. El EEG sigue siendo una herramienta poderosa en el diagnóstico de enfermedades como la epilepsia, trastornos del sueño y demencia, así como en la monitorización en tiempo real en quirófanos y unidades de cuidados intensivos. A diferencia de las técnicas de neuroimagen más avanzadas, el EEG ofrece una resolución temporal excepcionalmente alta y es mucho más económico de implementar [18].

Las señales del cerebro son registradas utilizando electrodos colocados en el cuero cabelludo o, en ocasiones, en la corteza del paciente. La captura de la forma de onda resultante mediante componentes informáticos se conoce como la señal EEG. Esta señal es muy compleja y su análisis también presenta desafíos. El electroencefalograma (EEG) es una herramienta que proporciona información detallada sobre la función cerebral y los trastornos neurológicos. Se utiliza para detectar y evaluar daños cerebrales, así como para determinar la muerte cerebral en algunos casos [19].

Figura 11: Señal EEG [24].



6.10. Electrocardiograma (ECG)

El electrocardiograma (ECG) mide la actividad eléctrica del corazón utilizando electrodos situados en el pecho, brazos y piernas. Cada latido genera un impulso que atraviesa el corazón, estableciendo su ritmo y frecuencia, lo que provoca la contracción del músculo cardíaco y el bombeo de sangre. El ECG es un procedimiento clínico comúnmente empleado para investigar enfermedades cardíacas, como el infarto de miocardio. Por su parte, el electrograma (EG) es un registro intracardíaco con electrodos colocados directamente en el corazón, utilizado en dispositivos como marcapasos y desfibriladores [18].

Si la actividad eléctrica del corazón reflejada por el ECG se mide en el cuero cabelludo puede interferir con el electroencefalograma (EEG). Aunque la amplitud de la actividad cardíaca en el cuero cabelludo es generalmente baja en comparación con la del EEG (1-2 Microvoltios frente a 20-100 Microvoltios), puede afectar significativamente el EEG dependiendo de la posición de los electrodos y la forma corporal, especialmente en individuos bajos y robustos con cuellos cortos y gruesos. Sin embargo, el patrón regular y repetitivo de los latidos normales facilita la identificación de esta interferencia. Además, las ondas en forma

de pico del ECG pueden ser confundidas con actividad epileptiforme si el ECG es apenas visible en el EEG. El ECG puede registrarse por separado con uno o varios electrodos para eliminar la actividad del ECG superpuesta al EEG. De igual forma se puede medir la señal en otros puntos claves del cuerpo [18].

Figura 12: *Electrocardiograma* [18].

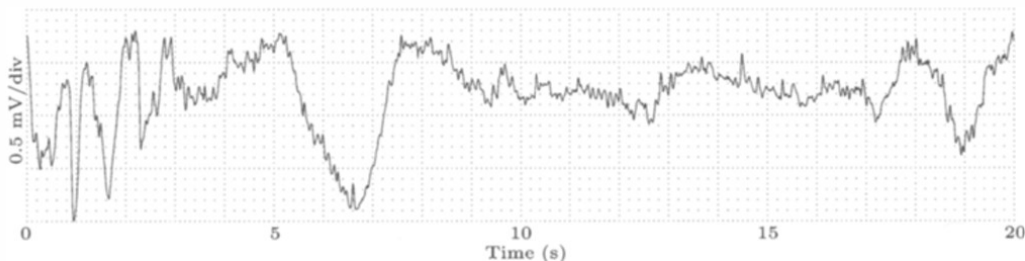


6.11. Electrooculograma (EOG)

El electrooculograma (EOG) es el registro del potencial constante entre la córnea y la retina, que varía con los movimientos verticales y horizontales del ojo, proporcionando una medida objetiva de la dirección de la mirada. Es especialmente útil en personas con trastornos del sueño para identificar etapas del sueño mediante movimientos oculares rápidos (REM), y en el estudio del nistagmo, una oscilación rápida e involuntaria de los ojos común en personas con vértigo y mareos. También es útil en realidad virtual para el seguimiento ocular. El EOG se menciona en el contexto del procesamiento de señales EEG porque los movimientos oculares generan actividad eléctrica que interfiere con el EEG y debe ser eliminada. El movimiento ocular también ocurre durante la vigilia.

El movimiento ocular produce actividad eléctrica (EOG) visible en el EEG. El EOG mide la diferencia de potencial entre la córnea y la retina, proporcional al ángulo de la mirada. La intensidad de la interferencia del EOG depende de la proximidad del electrodo al ojo y de la dirección del movimiento. Los artefactos del EOG, a pesar de ser repetitivos y fáciles de identificar, pueden confundirse con actividad lenta del EEG, como las ondas theta y delta. Los parpadeos también causan artefactos en el EEG, produciendo ondas más abruptas y de alta frecuencia. Obtener una señal de EOG pura con electrodos de referencia cerca del ojo es útil para eliminar confusiones de señales en el EEG [24].

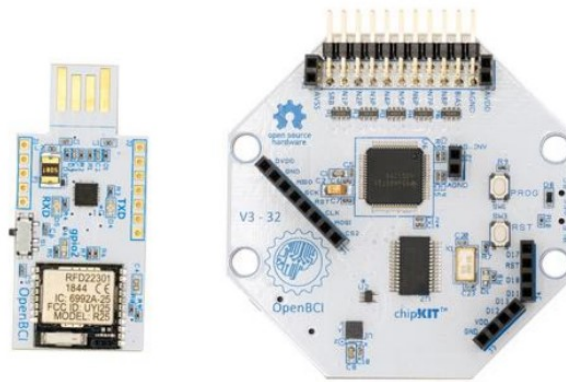
Figura 13: *Electrooculograma* [24].



6.12. Cythonboard

La *Cythonboard* es una tarjeta que incorpora un microcontrolador compatible con Arduino. Dispone de 8 canales para recibir señales y utiliza un procesador de 32 bits, el PIC32MX250F128B, que permite un procesamiento rápido a 250 Hz. Tiene una memoria integrada suficiente y viene con el *bootloader* preinstalado en su última versión. Esta tarjeta es capaz de monitorear señales electroencefalográficas, musculares y cardíacas. Además, permite la comunicación inalámbrica a través de un dispositivo USB conocido como Dongle, que utiliza radiofrecuencia. También es compatible con el protocolo Bluetooth Low Energy (BLE), lo que permite la comunicación con otros dispositivos que soportan esta tecnología. [25].

Figura 14: Equipo completo Cythonboard [25].



6.13. Electro-Cap

El Electro-Cap es un dispositivo conformado por un gorro de electrodos diseñado para extraer señales electroencefalográficas. Este gorro cuenta con un mayor número de electrodos que se ubican siguiendo el principio del sistema de posicionamiento 10-20. Los electrodos están adheridos a la tela elástica que forma el gorro, lo que facilita su uso en aplicaciones de EEG. Al colocar el gorro en la cabeza de una persona, los electrodos se posicionan automáticamente según los estándares del sistema 10-20.

Este diseño es especialmente útil para estudios detallados que requieren la lectura de ondas cerebrales desde múltiples puntos alrededor del cerebro, ya que puede contener hasta 19 electrodos. Una de las principales ventajas del ElectroCap es que elimina la necesidad de medir y calcular la ubicación exacta de cada electrodo, simplificando el proceso en comparación con otras alternativas que también miden EEG [26].

Figura 15: *Equipo completo electro-Cap* [26].



6.14. Biopac MP41

El Biopac MP41 es un dispositivo de adquisición de datos utilizado principalmente en investigaciones y aplicaciones científicas. Este equipo es capaz de capturar y analizar datos fisiológicos como señales cardíacas (ECG), ondas cerebrales (EEG), actividad muscular (EMG), movimientos oculares (EOG) y la resistencia mediante un puente *Wheatstone*. Para realizar estas mediciones, utiliza conjuntos de cables de electrodos y electrodos desechables que se aplican en puntos específicos del cuerpo para obtener las señales. Para su uso, es necesario contar con la compatibilidad del sistema BSL Home con Biopac Student Lab 4.1 o una versión más actualizada [27].

Figura 16: *Biopac MP41* [27].



6.15. Recomendaciones para mejorar la calidad del sueño

Para mejorar el sueño, es importante mantener un horario regular, acostándose y levantándose a la misma hora todos los días, incluso los fines de semana. Hacer ejercicio regularmente, al menos 30 minutos la mayoría de los días, pero evitar hacerlo 2 a 3 horas antes de dormir. Evitar la cafeína y la nicotina, ya que la cafeína puede tardar hasta 8 horas

en desaparecer y la nicotina también es un estimulante. Limitar el alcohol antes de acostarse, ya que aunque una bebida puede ayudar a dormir, el alcohol interfiere con el sueño profundo y puede provocar despertares nocturnos. Evitar comidas y bebidas abundantes por la noche, ya que las comidas pesadas pueden causar indigestión y las bebidas pueden hacer que te levantes frecuentemente para orinar.

De igual forma, se recomienda evitar medicamentos que alteren el sueño, como algunos para el corazón, la presión arterial, el asma y ciertos remedios para la tos, resfriados o alergias. Además, es importante no dormir siestas después de las 3:00 p.m., ya que las siestas tardías pueden dificultar el sueño nocturno y deben limitarse a menos de una hora. También se sugiere relajarse antes de acostarse con actividades como leer o escuchar música. Otra recomendación es tomar un baño caliente antes de acostarse, ya que la disminución de la temperatura corporal después del baño puede inducir el sueño y ayudar a la relajación. Asimismo, es fundamental crear un buen ambiente para dormir, eliminando distracciones como ruidos, luces brillantes, una cama incómoda, televisión o computadora, y mantener la habitación fresca. Por otro lado, exponerse adecuadamente al sol es clave, ya que la luz del día regula los patrones de sueño diarios, procurando al menos 30 minutos de luz natural al día. Igualmente, no se debe permanecer despierto en la cama; si no se puede dormir después de 20 minutos, es mejor levantarse y hacer algo relajante hasta sentirse somnoliento, porque la ansiedad por no dormir puede empeorar el insomnio. Finalmente, se recomienda consultar a un médico si persisten los problemas de sueño, ya que podría tratarse de un trastorno del sueño que necesita tratamiento especializado [28].

6.16. Aprendizaje automático

El aprendizaje automático, o *machine learning*, es una rama de la inteligencia artificial que se centra en enseñar a las computadoras a aprender de los datos y la experiencia, sin necesidad de ser programadas explícitamente para cada tarea. Básicamente, consiste en crear modelos matemáticos que analizan patrones y tendencias en los datos, para luego hacer predicciones o tomar decisiones basadas en esa información. Es como si le diéramos a la máquina la capacidad de aprender por sí misma a partir de ejemplos previos [29].

6.16.1. Aprendizaje supervisado

Este enfoque se centra en enseñar al modelo a partir de datos etiquetados. Es decir, el modelo recibe un conjunto de entradas (características) junto con sus salidas correspondientes y aprende a mapearlas. Si las salidas pertenecen a un conjunto discreto de valores, como sí o no, se considera un problema de clasificación. Por otro lado, si las salidas son continuas, como el precio de una casa o la temperatura, se trata de un problema de regresión. En resumen, el modelo aprende mediante ejemplos donde ya se conoce el resultado esperado [29].

6.16.2. Aprendizaje no supervisado

El modelo trabaja con datos que no tienen etiquetas ni salidas asignadas. Su tarea es identificar patrones, relaciones o estructuras dentro de los datos, basándose únicamente en la información intrínseca de los mismos. Por ejemplo, puede agrupar elementos similares (agrupamiento o *clustering*) o encontrar formas de representar los datos de manera más compacta (reducción de dimensionalidad). Este tipo de aprendizaje es útil cuando no se dispone de información previa sobre cómo clasificar los datos, permitiendo descubrir patrones ocultos [29].

6.16.3. Clustering

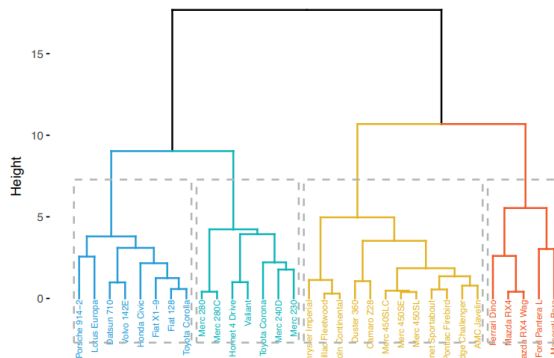
Es una técnica de análisis de datos que permite agrupar observaciones en conjuntos denominados *clusters*, basándose en su similitud. El objetivo principal es maximizar la homogeneidad dentro de cada *cluster* (*intra-cluster*) y la heterogeneidad entre *clusters* (*inter-cluster*). Esta técnica es ampliamente utilizada en problemas donde no se cuenta con etiquetas predefinidas, permitiendo descubrir patrones o estructuras ocultas en los datos [30].

6.16.4. Clustering jerárquico

El *clustering* jerárquico es un método que organiza los datos en una estructura jerárquica, representada comúnmente mediante un dendrograma. Este método agrupa iterativamente las observaciones basándose en su similitud, comenzando con cada observación como un *cluster* individual y fusionándolos hasta formar un único grupo. Es útil en análisis donde no se conoce el número de *clusters* previamente, permitiendo explorar diferentes niveles de agrupación [30].

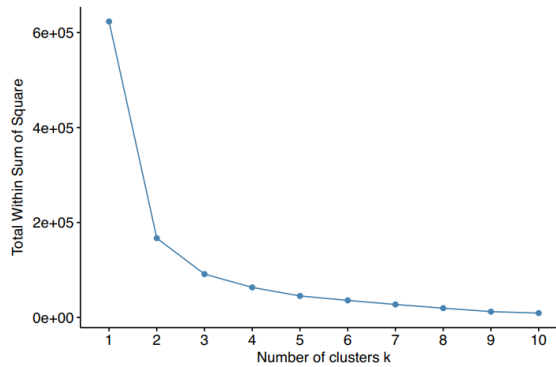
Como se muestra en la Figura 17, el clustering jerárquico organiza los datos en una estructura de árbol, agrupando iterativamente observaciones similares.

Figura 17: Dendrograma generado por el método *ward.D2* con distancia euclídea [30].



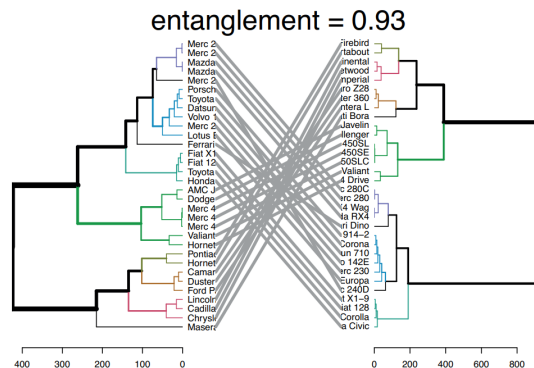
Para identificar el número óptimo de clusters, se utiliza el método del codo (*Elbow*), como se observa en la Figura 18.

Figura 18: Método del codo para determinar el número óptimo de clusters [30].



Una comparación entre diferentes métodos jerárquicos puede visualizarse mediante un tanglegram, como se ilustra en la Figura [19].

Figura 19: Tanglegram que compara los métodos aglomerativos Complete y ward.D2 [30].



6.17. Prueba estadística de Wilcoxon

La prueba de Wilcoxon es una técnica estadística no paramétrica utilizada para comparar dos conjuntos de datos relacionados. Es especialmente útil cuando no se cumplen los supuestos de normalidad requeridos por pruebas paramétricas como la prueba t para muestras dependientes. En lugar de trabajar con medias, la prueba de Wilcoxon se basa en los rangos de las diferencias entre pares de observaciones [31].

La hipótesis nula (H_0) establece que no existen diferencias significativas entre los dos conjuntos de datos, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) sugiere que sí hay diferencias. Esta prueba es particularmente útil para datos que no siguen una distribución normal [31].

6.18. Índice de Rand

El Índice de Rand es una métrica utilizada para validar la calidad del *clustering*. Es utilizada para evaluar la similitud entre dos particiones de un conjunto de datos, especialmente en análisis de agrupamiento. Valores altos del Índice de Rand indican una mayor correspondencia entre los *clusters* generados y las etiquetas conocidas, lo que valida la efectividad del algoritmo de *clustering* [32].

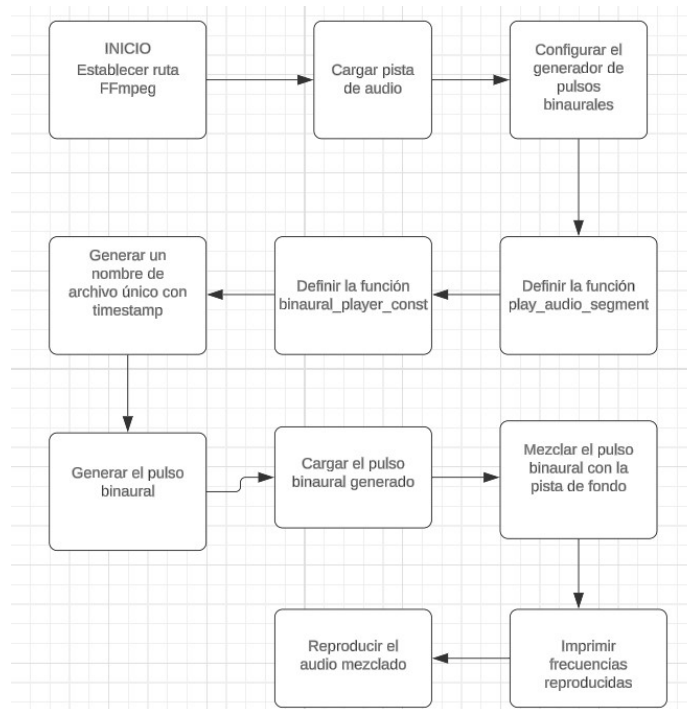
Módulo generador de pulsos binaurales

Durante todas las fases de esta línea de investigación se ha utilizado un módulo generador de pulsos binaurales. Anteriormente, se habían realizado diferentes códigos debido a que las personas utilizan pulsos binaurales con frecuencias específicas dependiendo en qué fase del sueño se encontraban. Para este estudio, debido a que solo se está analizando cuando la persona se queda dormida, no se necesitaba utilizar ese código, por lo que se realizaron ajustes necesarios para utilizarlos.

7.1. Pulsos binaurales mezclados con pista

Como se puede apreciar en la Figura [20](#), el código genera y reproduce un pulso binaural mezclado con una pista de fondo, aplicando efectos de entrada y salida gradual (*fade-in* y *fade-out*). Utiliza la librería `AccelBrainBeat` para generar el pulso binaural a partir de dos frecuencias configurables (por ejemplo, 250 Hz en un oído y 260 Hz en el otro). El pulso se guarda como un archivo de audio temporal, se superpone con una pista de fondo preexistente, y luego se reproduce utilizando la librería `sounddevice`. También se ajustan parámetros como el volumen y la duración del audio, con la reproducción final mostrando las frecuencias empleadas.

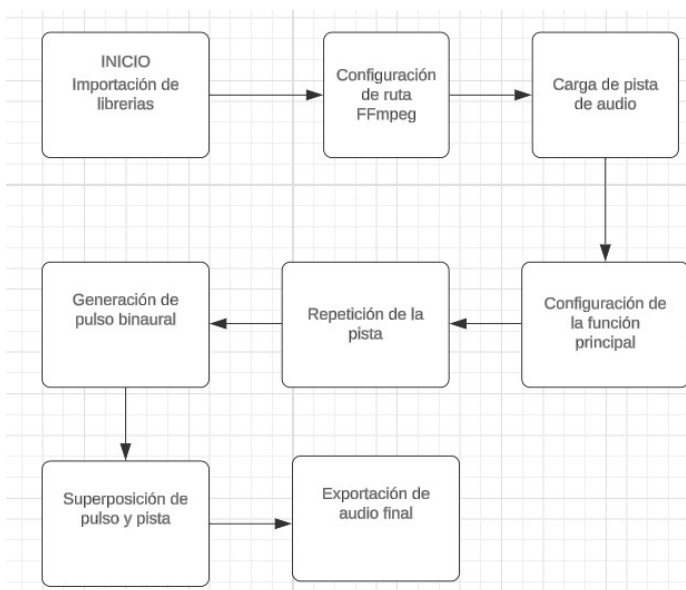
Figura 20: *Diagrama de flujo pulsos mezclado con pista.*



7.2. Pulsos binaurales con ruido rosa

La Figura 21 muestra un diagrama de uno de los algoritmos de generación de pulsos binaurales, este código casi no tuvo modificación con respecto a fases anteriores debido a que funcionó de manera correcta. Las únicas modificaciones que se realizaron fue la duración del audio y las frecuencias a utilizar. Este programa genera un archivo de audio que combina un pulso binaural con una pista de ruido rosa. Comienza importando las librerías necesarias y configurando las rutas para los ejecutables de ffmpeg, esenciales para procesar audio. Luego, se carga una pista de ruido rosa, que se ajusta para que tenga una duración específica repitiéndola las veces necesarias y ajustando su volumen. Este código tiene una función llamada binauralplayer, con la que se generaron dos tonos con frecuencias diferentes para el oído izquierdo y derecho (creando el pulso binaural). Este pulso se mezcla con la pista de ruido rosa, aplicando un fundido de entrada y salida para suavizar la transición, y finalmente se exporta el resultado como un archivo de audio en formato wav.

Figura 21: Diagrama de flujo pulsos con ruido rosa.



7.3. Generación de pulsos binaurales

Para este estudio, los pulsos binaurales fueron generados mediante el uso de la librería AccelBrainBeat en Python, la cual permite la creación de señales binaurales ajustando parámetros como frecuencia, duración y volumen. Los estímulos fueron generados con las siguientes configuraciones:

- **Frecuencia portadora:** 250 Hz
- **Frecuencias binaurales utilizadas:** 50 Hz (izquierda) y 260 Hz (derecha), generando una diferencia de 10 Hz
- **Duración del estímulo:** 30 minutos (1800 segundos)
- **Modulación y mezcla:**
 - Pulsos binaurales puros.
 - Pulsos binaurales mezclados con ruido rosa (pink noise).
 - Pulsos binaurales combinados con una pista de fondo relajante.

La elección de estas frecuencias se deben a dos factores, primero en la parte experimental del estudio se realizaron pruebas con las personas los cuales mencionaron que este rango era el adecuado y más cómodo para escuchar, además una diferencia de 10 Hz se encuentra dentro del rango de las ondas alfa (8-12 Hz), las cuales están asociadas con estados de relajación y transición hacia el sueño.

7.4. Reproducción de los pulsos y Configuración Experimental

7.4.1. Dispositivos de reproducción

Los pulsos binaurales fueron reproducidos utilizando diferentes dispositivos según la disponibilidad de cada participante. Computadoras personales (PC o laptop), Dispositivos móviles (teléfonos inteligentes o tabletas). Cada dispositivo debía ser capaz de reproducir archivos de audio en calidad sin pérdida (WAV) para evitar distorsiones en las frecuencias de los pulsos binaurales.

7.4.2. Audífonos utilizados

Para garantizar que cada participante percibiera correctamente los pulsos binaurales, se utilizaron audífonos los cuales permiten una reproducción balanceada de las frecuencias. Se priorizaron que los audífonos tuvieran respuesta de frecuencia plana para evitar alteraciones en los estímulos auditivo, aislamiento acústico pasivo, reduciendo interferencias externas, conexión por Bluetooth o cable, preferiblemente por cable para evitar la compresión de audio típica de audífonos Bluetooth.

El volumen de reproducción se ajustó individualmente, manteniéndose moderado para evitar molestias. Estas consideraciones se tomaron debido a que la mayoría de los participantes contaban con audífonos que cumplieran con estas características. Sin embargo, para futuras aplicaciones similares a este estudio, sería posible utilizar audífonos convencionales, siempre y cuando se verifique que puedan reproducir sonidos distintos en cada canal (izquierdo y derecho), permitiendo así la correcta percepción del efecto binaural.

7.4.3. Implementación del experimento

1. Los participantes se ubicaron en un ambiente controlado, libre de ruido externo y con las luces apagadas.
2. Se les colocaron electrodos para la medición de señales EEG y EOG.
3. Se ajustaron los audífonos y se verificó que percibieran correctamente los pulsos binaurales.
4. Se inició la reproducción del estímulo, registrando simultáneamente las señales fisiológicas.
5. Al finalizar, se retiraron los dispositivos y los participantes completaron un cuestionario sobre su experiencia.

7.5. Experiencia y Retroalimentación de los Participantes

Para complementar los datos fisiológicos obtenidos a través del análisis de las señales EEG y EOG, se recopilaron las opiniones y experiencias de los participantes con respecto

a la exposición a los pulsos binaurales. Se buscó evaluar aspectos como la comodidad del estímulo auditivo, su percepción sobre la relajación inducida y posibles efectos en la facilidad para conciliar el sueño.

En general, la mayoría de los participantes reportó una experiencia positiva con la reproducción de los pulsos binaurales, aunque se observaron diferencias en la percepción del sonido según sus hábitos previos al dormir.

Dos de los participantes mencionaron que habitualmente no duermen con ningún tipo de sonido de fondo. De estos, uno expresó que al inicio del estudio le resultó un poco incómodo escuchar el audio mientras intentaba relajarse, aunque con el paso del tiempo se acostumbró y no afectó su experiencia. El otro participante, a pesar de no estar acostumbrado a dormir con sonidos, no reportó ninguna incomodidad ni efectos negativos al escucharlo.

Por otro lado, los demás participantes indicaron que la experiencia fue agradable y que la presencia del sonido binaural, ya sea puro, con ruido rosa o con pista relajante, les ayudó a relajarse más fácilmente. Una persona destacó que, comparado con su rutina habitual de sueño, el uso de estos estímulos le facilitó significativamente quedarse dormido.

Un participante mencionó tener dificultades frecuentes para conciliar el sueño. Tras la exposición a los pulsos binaurales durante el estudio, indicó que la experiencia fue positiva y que, desde entonces, ha optado por reproducir el audio cuando enfrenta problemas para dormir. Esto sugiere que los pulsos binaurales pueden ser una alternativa viable para personas con dificultades para iniciar el sueño, motivando futuras investigaciones sobre su impacto en individuos con insomnio u otros trastornos del sueño.

7.5.1. Consideraciones sobre la percepción del sonido en las personas

Si bien la mayoría de los participantes experimentó efectos positivos con los pulsos binaurales, las diferencias individuales en la percepción del sonido resaltan la importancia de adaptar este tipo de intervención a las preferencias personales. Para algunas personas, especialmente aquellas no acostumbradas a dormir con sonidos, puede ser necesario un período de adaptación. Sin embargo, el hecho de que un participante haya integrado el uso de estos estímulos en su rutina de sueño sugiere que los pulsos binaurales tienen el potencial de ser utilizados como una herramienta accesible y efectiva para mejorar la calidad del sueño.

8.1. Diseño Metodológico

La metodología de este estudio se diseñó para evaluar la efectividad de los pulsos binaurales en la inducción del sueño, adaptando lo realizado en fases anteriores al nuevo enfoque del estudio. En primer lugar, se seleccionaron participantes siguiendo criterios específicos. Antes de iniciar cada sesión, los participantes completaron cuestionarios sobre su estado de ánimo, nivel de estrés y calidad del sueño los cuales se encuentran en el apartado de anexos [17.3.1](#). Posteriormente, se procedió a la colocación de electrodos para registrar las señales de electroencefalografía (EEG) y electrooculografía (EOG), asegurando tanto la comodidad del participante como la calidad de los datos obtenidos.

Como se observa en la Figura [22](#), durante el experimento, los participantes fueron expuestos a tres combinaciones de estímulos auditivos: pulsos binaurales puros, pulsos binaurales con ruido rosa y pulsos binaurales combinados con una pista de fondo relajante. Las señales obtenidas, tanto de EEG como de EOG, fueron registradas mientras se reproducían estos estímulos. La señal EEG permitió monitorizar la actividad eléctrica del cerebro, ayudando a identificar patrones relacionados con la relajación y la inducción del sueño. Por otro lado, la señal EOG se utilizó para analizar los movimientos oculares, lo cual proporciona información sobre el estado de alerta y la posible somnolencia del participante. Estas señales fueron fundamentales para evaluar las diferencias en la respuesta cerebral y ocular ante los diferentes estímulos. Al finalizar la sesión, los electrodos se retiraron cuidadosamente y los participantes completaron formularios adicionales para evaluar su nivel de relajación y percepción de somnolencia tras el estímulo.

Para la instrumentación, se utilizó el equipo Biopac MP41 para el registro de señales fisiológicas, electrodos desechables, auriculares estéreo para la reproducción precisa de los estímulos auditivos y software especializado para el análisis de los datos.

Figura 22: *Protocolo de investigación para aplicación a los sujetos de prueba.*



8.2. Consentimiento Informado

Como parte de los principios éticos de la investigación, se diseñó un consentimiento informado para garantizar que todos los participantes conocieran detalladamente la naturaleza del estudio, sus objetivos, procedimientos, posibles riesgos y beneficios, así como la confidencialidad de sus datos. Este documento fue desarrollado tomando como referencia fases anteriores de la investigación, así como recomendaciones brindadas por el ingeniero Andrés Monterroso basadas en su experiencia en su clínica del sueño.

8.2.1. Propósito y Objetivo del Consentimiento

El consentimiento informado tenía como finalidad explicar con claridad todos los aspectos relacionados con la participación en el estudio, garantizar que los participantes tomaran una decisión informada y voluntaria antes de participar, proteger la identidad y la privacidad de los datos obtenidos, e informar sobre los posibles riesgos y beneficios asociados con el experimento. Este consentimiento fue entregado previo al inicio de cualquier sesión experimental, asegurando que cada participante tuviera el tiempo suficiente para leerlo, hacer preguntas y firmarlo si estaba de acuerdo en participar.

Dentro del documento se brindaba la siguiente información:

8.2.2. Información general sobre la investigación

- Título del estudio.
- Ubicación y duración del estudio.
- Protección de la identidad y la privacidad de los datos obtenidos.

- Número de participantes.
- Investigador responsable.

8.2.3. Procedimiento Experimental

El consentimiento especificó los pasos del experimento para que los participantes comprendieran lo que ocurriría en cada sesión:

- Polisomnografía básica.
- Evaluación conductual previa.
- Aplicación de electrodos y estímulos auditivos.
- Registro de actividad cerebral y ocular.
- Evaluación post-estímulo.

8.2.4. Confidencialidad de los Datos y Gestión de Riesgos en el Estudio

El manejo de los datos personales y resultados se realizó de forma confidencial, asegurando que la información recopilada fuera utilizada exclusivamente para fines científicos y académicos dentro del programa de Ingeniería Mecatrónica. De igual forma se informó que el almacenamiento de los datos cumple con las normas estipuladas de confidencialidad.

En cuanto a los posibles riesgos, aunque el estudio fue diseñado para minimizar cualquier inconveniente, se informó a los participantes sobre efectos poco frecuentes que podrían experimentar, como irritación leve en la piel debido al uso de electrodos, dificultad temporal para conciliar el sueño después de la sesión y leve dolor de cabeza o incomodidad por el uso prolongado de audífonos. Como medida de seguridad, si algún participante experimentaba molestias significativas, su participación sería interrumpida de inmediato.

8.2.5. Voluntariedad y Declaración de Consentimiento

Un principio fundamental del estudio fue el derecho a la participación voluntaria.

- Derecho de retiro.
- Firma del consentimiento.
- Firma del investigador y asesor.
- Datos de contacto.

El consentimiento informado fue un pilar clave en la investigación, asegurando que los participantes estuvieran completamente informados antes de participar. Se garantizó que la investigación se llevara a cabo de manera ética y transparente, protegiendo la integridad de los participantes y obteniendo datos confiables para futuros estudios.

8.3. Colocación de electrodos

El registro de señales EEG y EOG es un proceso fundamental en estudios sobre sueño y actividad cerebral, ya que permite analizar cambios en la actividad eléctrica del cerebro y los movimientos oculares durante diferentes estados de relajación. Para este estudio, se utilizó el sistema de medición Biopac MP41, el cual permite la captura de señales fisiológicas mediante electrodos de superficie asegurando una correcta adherencia y ubicación para minimizar interferencias y obtener datos confiables. Cada sesión tuvo una duración de 30 minutos en las cuales se registraron señales EEG y EOG para los 7 participantes.

8.3.1. Tipos de electrodos utilizados

Los electrodos empleados en este estudio fueron de dos tipos:

- **Electrodos desechables de la empresa 3M:** como se observa en la Figura 23, unos de los electrodos utilizados en el estudio fueron los 3M en las mediciones de señales EOG y EEG esto debido a que proporcionan una excelente adherencia y calidad de señal, además de que están diseñados para minimizar la resistencia eléctrica y evitar interferencias externas.

Figura 23: *Electrodos desechables por la empresa 3M.*



- **Electrodos desechables de la empresa Biopac:** Otra de las marcas de electrodos utilizadas en el estudio fue la de la misma empresa que fabricó el equipo Biopac empleado para realizar las mediciones, como se muestra en la Figura 49. Estos electrodos están específicamente diseñados para la obtención de señales bioeléctricas y están optimizados para garantizar la estabilidad en el registro de las señales durante periodos prolongados. Además, ofrecían una mejor adherencia, lo que evitaba accidentes como el desplazamiento durante la obtención de las señales. Sin embargo, al momento de

retirarlos, resultaba complicado hacerlo sin cuidado, ya que podría causar molestias o incluso lastimar si no se retiraban con delicadeza.

Figura 24: *Electrodos desechables por la empresa BIOPAC.*



Obtención de señales fisiológicas

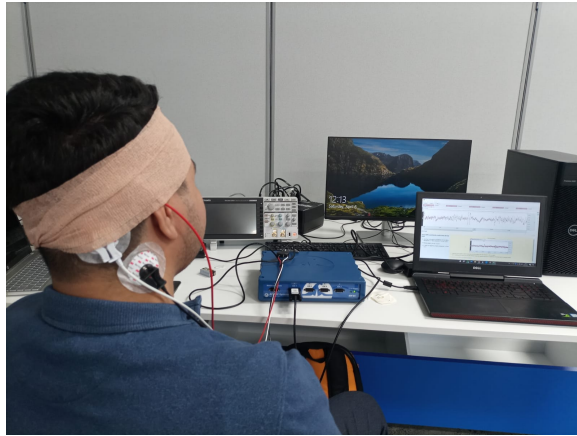
La obtención de las señales fisiológicas se llevó a cabo utilizando el sistema Biopac MP41, el cual permitió registrar con precisión la actividad cerebral mediante electroencefalografía (EEG) y los movimientos oculares mediante electrooculografía (EOG). Aunque Biopac cuenta con diversas herramientas para la visualización y análisis de señales, su interfaz presenta limitaciones en la segmentación y selección de periodos específicos de interés. Debido a esto, los datos fueron exportados en formato .txt para ser procesados y analizados en MATLAB, lo que permitió una mayor flexibilidad en el tratamiento de las señales.

En MATLAB se implementaron técnicas para el filtrado de ruido, segmentación y extracción de características relevantes, facilitando el estudio detallado de los efectos de los pulsos binaurales en la actividad cerebral y ocular. Además, se diseñó un sistema que permitió la selección manual de puntos de interés dentro de la señal, lo que hizo posible evaluar cambios específicos en las diferentes bandas cerebrales. La combinación del hardware de Biopac con el procesamiento en MATLAB permitió obtener datos más limpios y estructurados para el análisis, optimizando la identificación de patrones relacionados con la relajación y la inducción del sueño.

9.1. Selección de señales a utilizar

En el proceso de selección de las señales a utilizar en el estudio, como se observa en la Figura 25 se realizó una revisión de las señales disponibles, incluyendo ECG, señales respiratorias, EEG y EOG. Cada una de estas señales ofrece ventajas y características específicas que podrían contribuir a los objetivos del estudio.

Figura 25: Prueba de señales bioeléctricas.

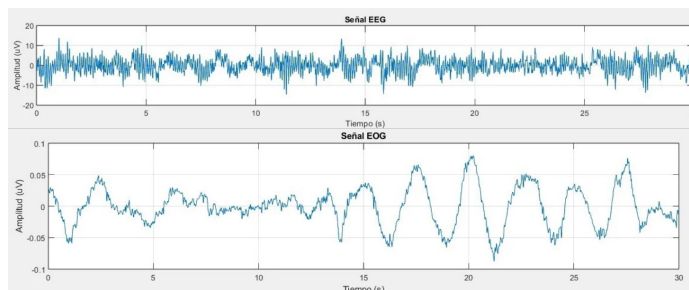


Se comenzó por evaluar las señales de ECG, que proporcionan información sobre la actividad cardíaca y pueden ser útiles para observar la relación entre la frecuencia cardíaca y la inducción del sueño. Sin embargo, al momento de realizar pruebas preliminares con personas las respuestas de las señales al momento de dormir no mostraban mucha diferencia, por lo que se decidió sustituir con un pulsioxímetro para poder tener los latidos ya la oxigenación de las personas antes de realizar las pruebas.

De igual forma se analizaron las señales respiratorias, que son fundamentales para monitorear los patrones de respiración durante el sueño, además de detectar si una persona sufre de apnea. Aunque estas señales proporcionan datos valiosos sobre la inducción del sueño, su medición requiere una calibración precisa, no son muy cómodas al momento de dormir y el poder validar si la persona sufría de algún impedimento no estaba en nuestro enfoque, por lo que se decidió no utilizar esta señal.

Tras evaluar estas opciones, se decidió utilizar las señales EEG y EOG para este estudio tal y como se observa en la Figura 26. La elección de las señales EEG se basó en su capacidad para ofrecer una comprensión detallada de las ondas cerebrales y su respuesta dadas tanto en las pruebas como en las fases anteriores, mientras que las señales EOG se seleccionaron debido a ciertos patrones que suceden en las personas al momento de dormir como el movimiento rápido de ojos.

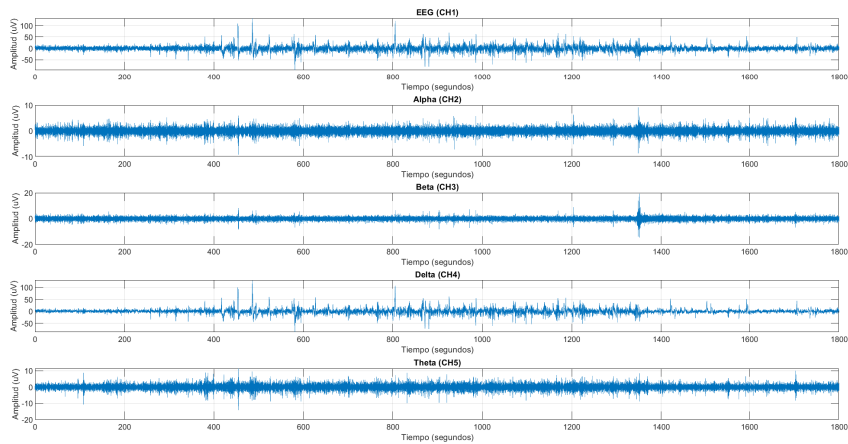
Figura 26: Señal EEG y EOG.



9.2. Sistema de procesamiento y análisis de señales

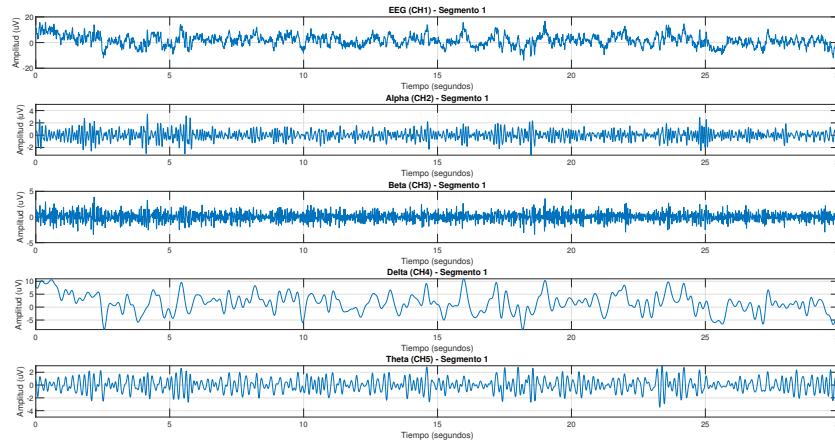
Para el procesamiento y análisis de señales se diseñó un programa el cual fuera capaz de procesar, visualizar y analizar datos de señales EEG y otras bandas cerebrales (alfa, beta, delta y theta), con un enfoque en la selección manual de puntos de interés y la división en segmentos de tiempo. En la primera parte del programa se carga un archivo de texto que contiene las señales grabadas, extrayendo los datos relevantes para el análisis. Se importan las señales y se grafican, como se observa en la Figura 27, permitiendo que se visualice la señal EEG, y las otras bandas de frecuencia extraídas (filtradas) de la señal cerebrales a lo largo del tiempo. Posteriormente, se interactúa con las gráficas, seleccionando manualmente puntos importantes (eventos fisiológicos o artefactos en la señal).

Figura 27: Gráfica de señales obtenidas por el BIOPAC en MATLAB.



Después de la selección manual, el código divide las señales en segmentos de 30 segundos y les asigna un número. Si es necesario acceder a un segmento específico, se puede indicar en el programa, lo que resulta útil para la identificación de patrones o eventos relevantes en la señal. Cada segmento se guarda para su posterior análisis, lo que permite estudiar la variación de las señales cerebrales en diferentes periodos y realizar análisis más detallados. Si se desean ver los primeros 30 segundos de las señales solo le indican al programa que se desea ver el segmento 1 y el resultado lo brinda tal y como se ve en la Figura 28.

Figura 28: Señal dividida por segmentos de 30 segundos.



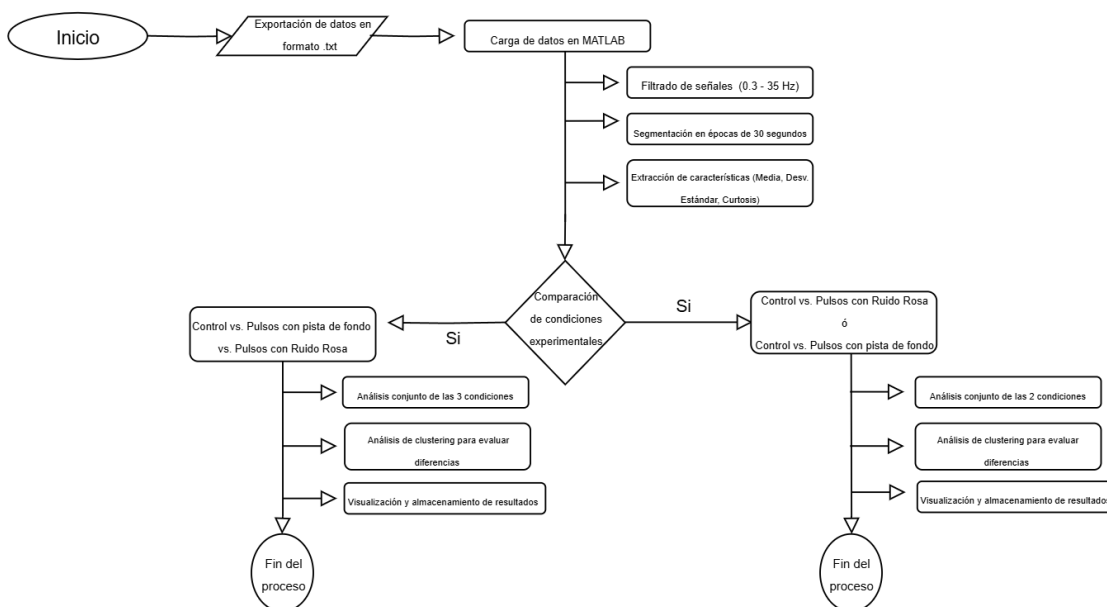
Este código es solamente para verificación de las señales obtenidas a través del BIOPAC, esto sirve para poder identificar que la señal es buena para el análisis y de ser esto pasar a la siguiente etapa. Para cada uno de los participantes se tenía que tener 3 señales bioelectricas, una de control donde no se le aplicaba ningun estimulo auditivo, otra con pulsos binaurales mezclados con ruido rosa, y la tercera pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo.

9.3. Procesamiento y Clasificación de Señales EEG y EOG

Para llevar a cabo el análisis de los datos, se desarrolló un programa encargado de comparar las señales, ya sea en pares o de manera conjunta, con el fin de identificar las diferencias entre ellas. Esta misma lógica se aplica tanto a las señales EEG como a las señales EOG obtenidas durante el estudio. Las señales analizadas corresponden a tres condiciones específicas: la condición de control, en la que no se aplican pulsos binaurales, la condición de pulsos con ruido rosa, donde los pulsos binaurales se superponen con ruido rosa; y la condición de pulsos con pista de fondo relajante, que consiste en pulsos binaurales combinados con una pista de audio relajante.

El programa realiza el análisis de las señales EEG y EOG paso a paso, desde su carga hasta la aplicación de técnicas de agrupamiento. Como se observa en el diagrama de flujo [29](#). Primero, se carga un archivo de texto que contiene los datos de la señal, extrayendo la información relevante, como el tiempo y la amplitud de la señal EEG. Luego, se visualiza la señal en una gráfica para tener una idea general de su comportamiento.

Figura 29: Diagrama de flujo programa de procesamiento de señales EEG Y EOG.



Después de la carga de datos, se lleva a cabo una limpieza de la señal para eliminar valores no válidos que podrían afectar el análisis. Posteriormente, se aplica un filtro pasa banda para eliminar componentes de frecuencia no deseadas, asegurando que solo se mantengan las frecuencias de interés en un rango específico. Este proceso permite mejorar la calidad de la señal y reducir el ruido presente en la medición.

Una vez que la señal ha sido filtrada, se divide en segmentos de 30 segundos, lo que facilita su análisis en porciones más manejables. Para cada segmento, se extraen tres características clave: la media, que proporciona información sobre el nivel general de la señal, la desviación estándar, que mide la variabilidad dentro del segmento, y la curtosis, que indica la presencia de picos o eventos extremos en los datos.

Después de la extracción de características, se aplica un método de agrupamiento jerárquico para identificar patrones en los segmentos de la señal. Este método organiza los datos en grupos con características similares, lo que permite explorar posibles clasificaciones de la actividad cerebral registrada. Para visualizar los resultados, se genera un dendrograma que muestra la relación entre los diferentes segmentos y se representa gráficamente la distribución de los grupos obtenidos.

Finalmente, se calcula una medida de validación conocida como el índice de Rand, que evalúa qué tan bien se han agrupado los segmentos en comparación con una clasificación de referencia. Este índice permite medir la calidad del agrupamiento.

9.4. Colocación de Electroodos EEG (Electroencefalografía)

Como se observa en la Figura 30, para la medición de actividad cerebral, se colocaron los electrodos siguiendo las recomendaciones del Biopac. La configuración utilizada se centró en la captura de actividad en la zona occipital, permitiendo un análisis detallado de las variaciones en la señal EEG durante la exposición a los pulsos binaurales. Estos son 3 electrodos, uno llamado electrodo activo que es el encargado de recibir la señal, el electrodo de referencia asegurando la estabilidad de la señal y electrodo de tierra el cual minimiza la interferencia.

Figura 30: Colocación electrodos EEG según BIOPAC.



9.5. Colocación de Electroodos EOG (Electrooculograma)

De igual forma la Figura 31 muestra la colocación de electrodos que se utilizó para la medición de movimientos oculares se realizó siguiendo el protocolo estándar de Biopac, el cual recomienda la colocación de los electrodos en las sienes y la frente para obtener una señal clara y minimizar interferencias. El electrodo colocado en la sien derecha captura la actividad al realizar movimiento ocular del ojo derecho mientras el electrodo de la parte izquierda registra el movimiento del ojo izquierdo, de igual forma el electrodo colocado en la frente es para reducir interferencias, además de que actua como un punto de control de la señal.

para todas las colocaciones de electrodos se limpió la zona de las sienes y la frente ya sea con agua o con alcohol y una gasa para eliminar grasa y mejorar la adherencia de los electrodos.

Figura 31: Colocación electrodos EOG según BIOPAC.



9.6. Uso de banda de sujeción para estabilidad

Para asegurar la estabilidad de los electrodos y minimizar interferencias en la señal, se utilizó una banda de sujeción elástica, colocada alrededor de la cabeza del participante. Como se observa en la Figura 32, esta banda permitió mantener los electrodos en su posición correcta durante toda la sesión experimental, evitando desplazamientos involuntarios que pudieran generar artefactos en las señales EEG y EOG. Además, al aplicar una presión ligera pero constante, la banda mejoró el contacto entre los electrodos y la piel, optimizando la conductividad y reduciendo la impedancia. Su uso también contribuyó a la comodidad del participante, evitando la necesidad de reajustar los electrodos manualmente y asegurando que las mediciones se llevaran a cabo sin interrupciones.

Figura 32: Colocación de banda.



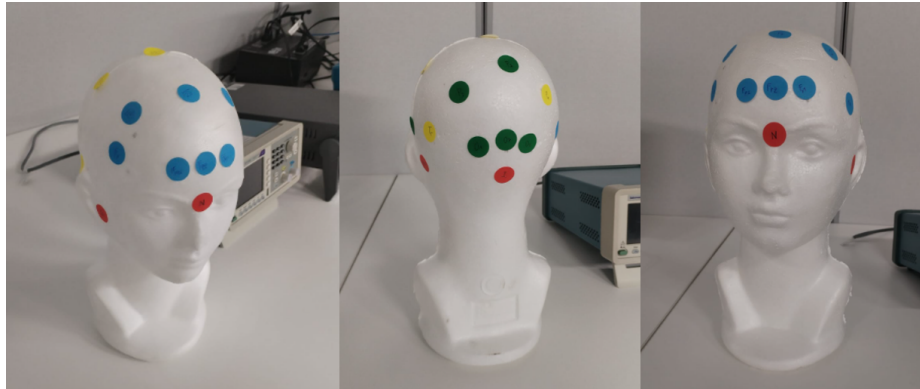
9.7. Capacitación sistema 10-20

Para mejorar la precisión en la colocación de los electrodos EEG, se asistió a un taller especializado sobre el sistema 10-20 brindada por el ingeniero Andres Monterroso experto en sueño, este sistema es estándar internacional en neurofisiología. El sistema 10-20 se basa en la colocación proporcional de los electrodos sobre el cuero cabelludo, asegurando una distribución homogénea de los sensores y maximizando la calidad de los datos obtenidos.

En el taller, se abordaron los siguientes aspectos:

1. Identificación de puntos anatómicos clave para la colocación de electrodos.
2. Como se observa en la Figura 33, la distribución de electrodos se realiza en base a porcentajes del tamaño del cráneo.
3. Diferencias entre electrodos activos, de referencia y de tierra.
4. Corrección de artefactos en la señal EEG mediante una colocación precisa.

Figura 33: *Colocación electrodos sistema 10-20.*



Análisis del impacto de los pulsos binaurales a partir de los resultados de las encuestas realizadas a los sujetos de prueba

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante herramientas que permitieron medir de forma cualitativa las respuestas de los participantes en el estudio sobre el impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño. Es importante señalar que a los participantes se les proporcionó un formulario realizado en Google, en el cual se les preguntaron diversos parámetros relacionados con su estado antes y después de dormir, con el objetivo de obtener resultados claros para el análisis de los datos. En ambos formularios se incluyó un apartado donde los participantes podían mencionar factores que, según ellos, podrían haber afectado directamente el estudio. Del mismo modo, se analizaron los hábitos de sueño de los participantes para evaluar si seguían una rutina adecuada al dormir. Para ello, se diseñó un formulario el cuál tenía las siguientes preguntas.

10.1. Metodología utilizada para el análisis cualitativo de las respuestas de los participantes

Para realizar el análisis cualitativo se utilizó la plataforma *Google Forms* para realizar cuestionarios con preguntas específicas, y así estandarizar las respuesta brindadas por las personas y poder compararlas. En total lo contestaron 68 personas, entre las preguntas que incluía este formulario se encontraban hábitos al momento de dormir, costumbres, horas de sueño, entre otras variables. Después de obtener las repuesta del formulario se realizó un análisis de las respuestas. Aparte del formulario para saber los hábitos de las personas al dormir, se realizó más formularios que fueron brindados a las personas antes y después de realizar las pruebas, en total fueron 10 formularios aparte del primero que se realizó

Para realizar las pruebas se tomaron en consideración que las personas contaran con la

mayoría de edad, haciendo énfasis que si estos sufrían alguna enfermedad mental o eran de la tercera edad, las señales obtenidas por el electroencefalograma se podrían ver afectadas. De igual forma algo en lo que sí se hizo bastante énfasis fue en que no se consumiera cafeína debido a que afecta la latencia de sueño en las persona.

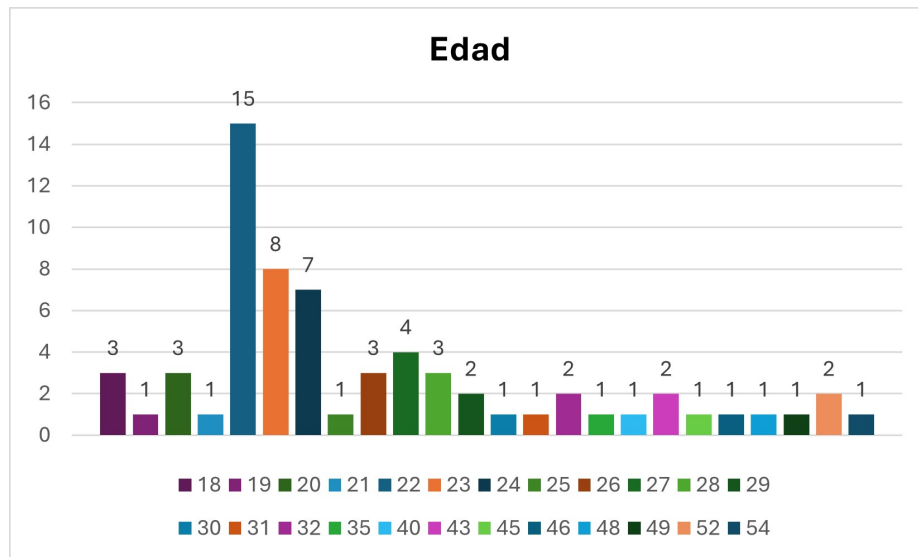
10.2. Resultados Hábitos del Sueño en Personas

Este cuestionario inicial fue diseñado para recopilar información sobre los hábitos de sueño de los participantes antes del experimento. Se exploraron aspectos clave como la cantidad de horas dormidas, la calidad del sueño, el uso de dispositivos electrónicos antes de dormir, y la disposición de los sujetos a probar métodos alternativos para mejorar su descanso. Para esta ocasión fueron un total de 66 personas las que participaron.

10.2.1. Perfil de Los Participantes

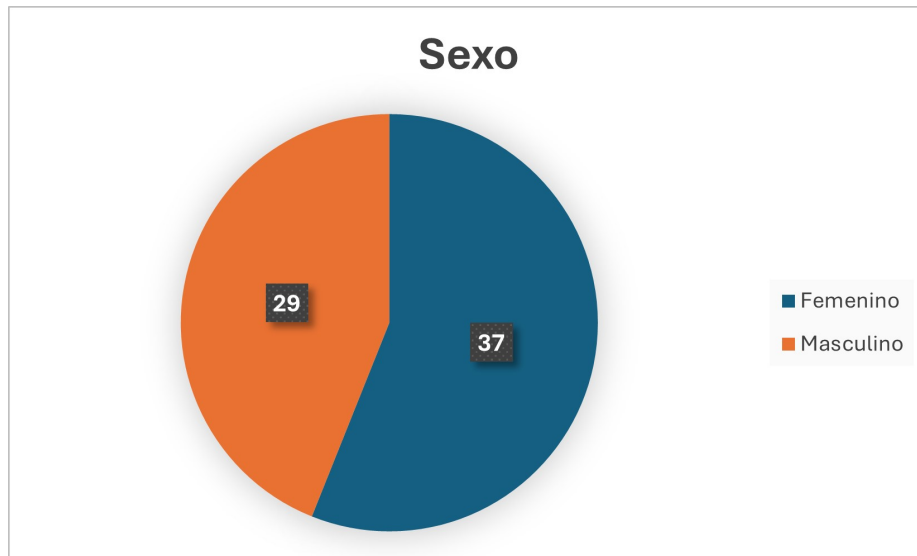
El estudio contó con una muestra compuesta por sujetos de diferentes edades y géneros. Como se observa en la Figura 34, existe una distribución variada de edades entre los participantes, la cual va desde los 18 años a los 54.

Figura 34: *Edad de personas que contestaron el primer formulario.*



La mayoría de los participantes fueron del sexo femenino, en total fueron 37 mujeres y 29 hombres 35.

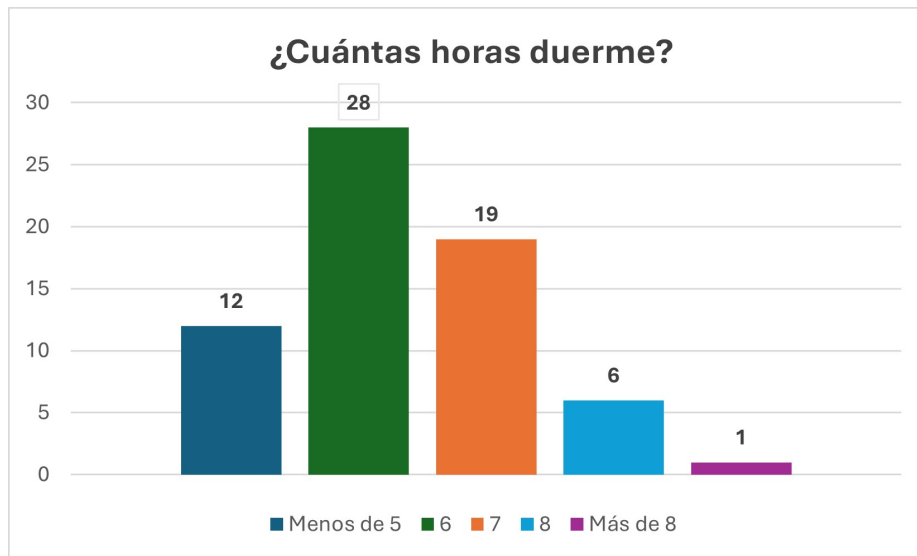
Figura 35: Sexo de las personas que contestaron el formulario.



10.2.2. Duración y Calidad del Sueño

En la Figura 36, se puede apreciar que resultados indican que la mayoría de los participantes duermen entre 6 y 7 horas por noche, siendo menos frecuente dormir menos de 5 horas o más de 8 horas.

Figura 36: Resultado promedio de horas de sueño en las personas.

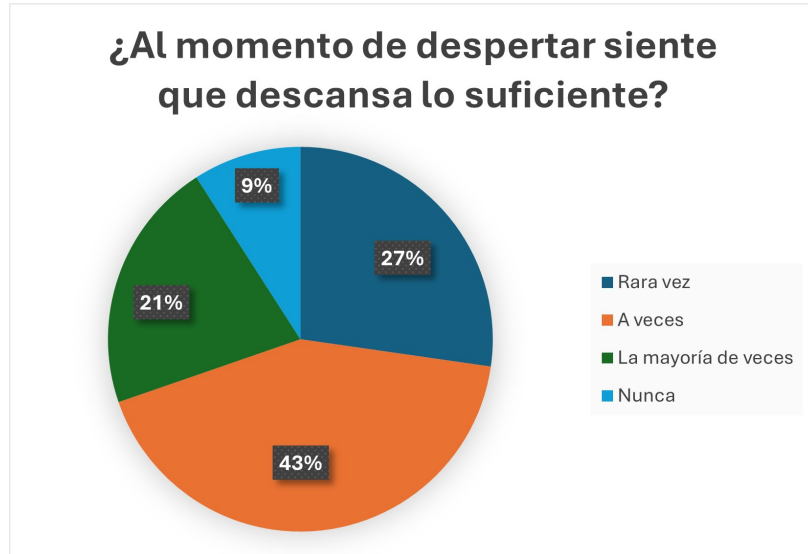


Esta información es clave, ya que dormir menos de 6 horas puede estar asociado con una disminución en la calidad del sueño y un mayor riesgo de fatiga durante el día.

10.2.3. Sensación de Descanso

Se evaluó la percepción de descanso al despertar. Como se observa en la Figura 37, un 43 por ciento de los participantes indicaron que a veces sienten que descansan lo suficiente, mientras que un 27 por ciento rara vez lo siente.

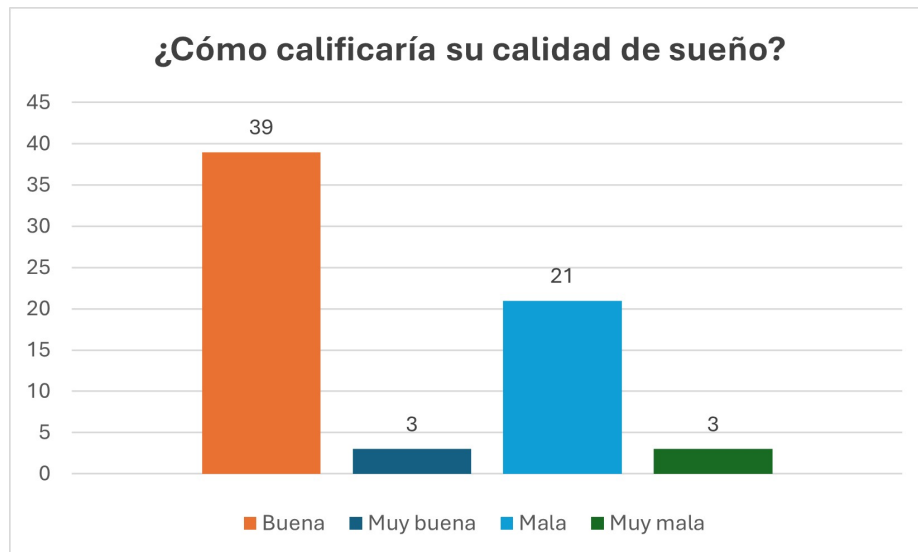
Figura 37: *Percepción del descanso en las personas.*



10.2.4. Calidad de Sueño

Como se observa en la Figura 38 cuando se pidió a los participantes calificar la calidad de su sueño, la mayoría la consideró buena, aunque también hubo sujetos que reportaron una calidad mala y muy mala.

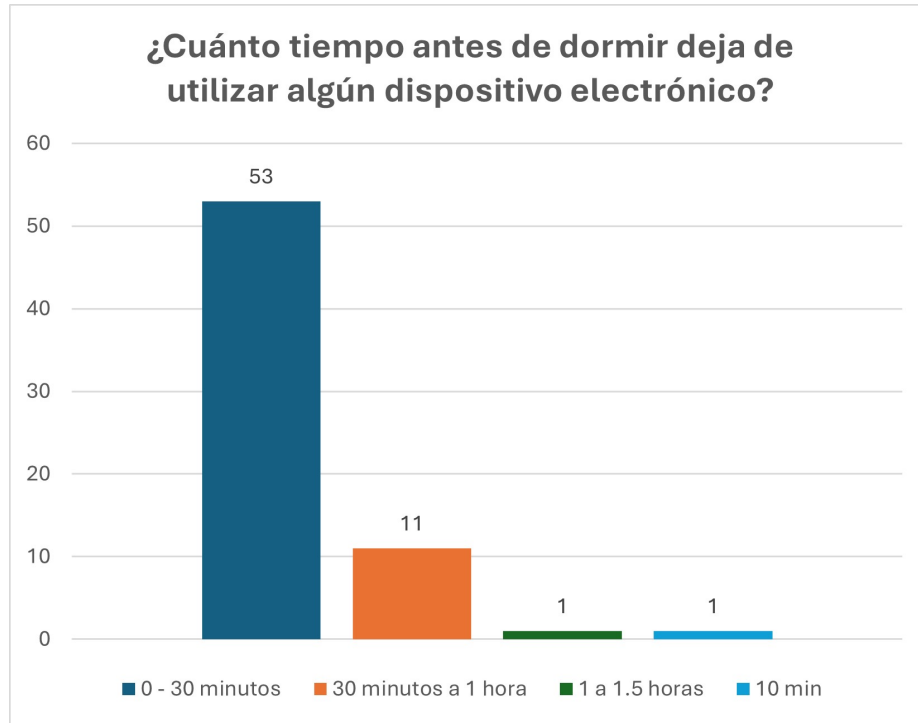
Figura 38: *Calidad de Sueño en las personas.*



10.2.5. Uso de Dispositivos Electrónicos Antes de Dormir

En los resultados de la Figura 39, uno de los aspectos más relevantes evaluados fue el uso de dispositivos electrónicos antes de acostarse. Se encontró que 53 de los participantes usa su teléfono, computadora o televisor hasta 30 minutos antes de dormir, mientras que otros 11 lo usa entre 30 minutos y una hora antes, y un participante lo usa entre una hora y una hora y treinta minutos antes de dormir y otro los utiliza 10 minutos antes de dormir.

Figura 39: Utilización de dispositivos antes de dormir.

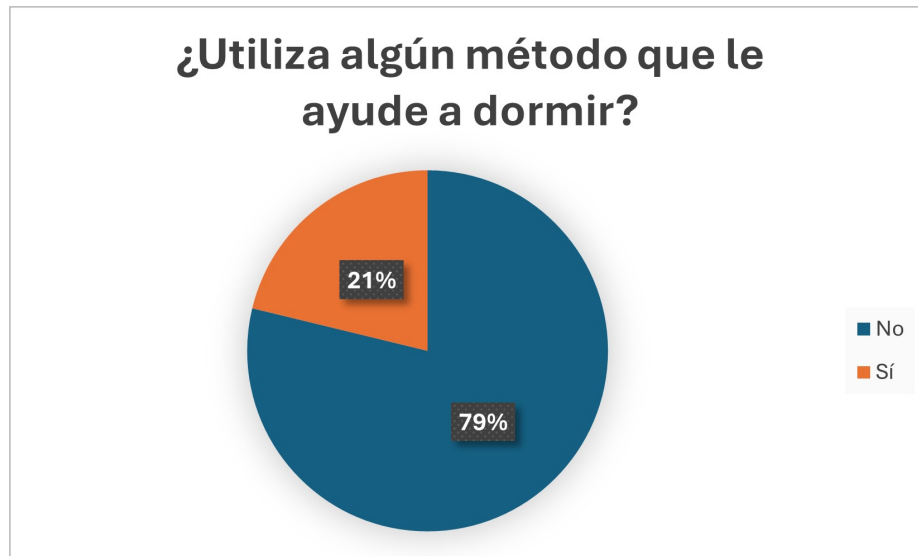


El uso de pantallas antes de acostarse puede afectar la producción de melatonina, retrasando el inicio del sueño y reduciendo su calidad.

10.2.6. Método para Inducir el Sueño

Se preguntó a los participantes si utilizaban algún método para conciliar el sueño. Como se observa en la Figura 40, el 79 por ciento indicó que no emplea ningún método específico, mientras que el 21 por ciento sí recurre a estrategias como escuchar música o tomar infusiones relajantes.

Figura 40: *Uso de métodos para facilitar el sueño.*

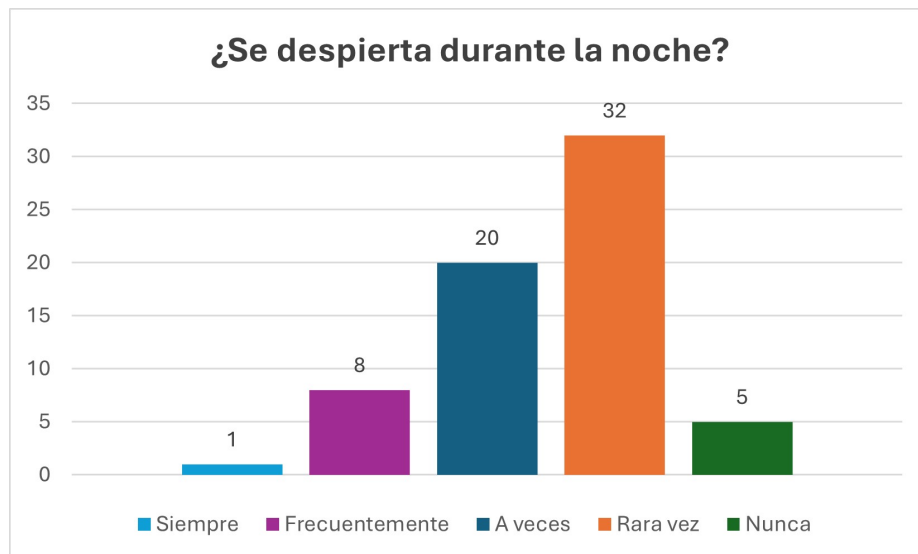


Esto sugiere que una parte de los sujetos podría estar de acuerdo a probar nuevas estrategias, como los pulsos binaurales para mejorar la calidad de su descanso.

10.2.7. Despertares Nocturnos

Se evaluó la frecuencia con la que los sujetos se despiertan durante la noche. Una parte importante indicó que se despierta ocasionalmente. Otro grupo reportó despertares frecuentes, lo que puede estar relacionado con la calidad de su sueño [41].

Figura 41: *Frecuencia de las personas al despertarse durante la noche.*



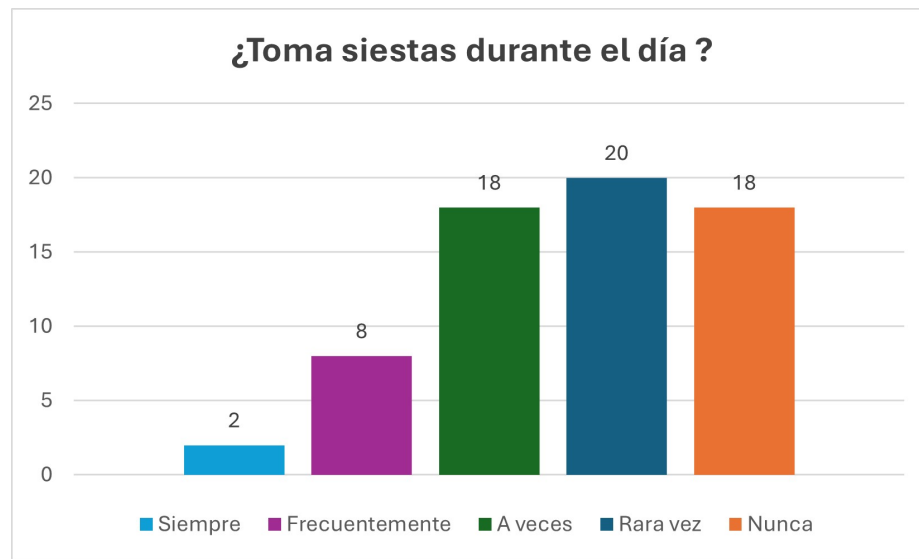
Si la persona tiende a despertarse de forma intermitente pueden ser indicativos de un

sueño ligero o fragmentado.

10.2.8. Siestas Durante el Día

De igual forma se realizó el análisis de la frecuencia con la que los participantes toman siestas diurnas. Los resultados sugieren que las siestas no son un hábito regular para la mayoría de los encuestados, sino más bien una práctica ocasional, tal y como se observa en la Figura 42.

Figura 42: Distribución de la frecuencia con la que las personas se despiertan durante la noche.



10.2.9. Consumo de Alcohol Antes de Dormir

El consumo de alcohol antes de dormir fue reportado como rara vez o nunca en la mayoría de los participantes, tal y como se observa en el Cuadro 1.

| Cantidad de Personas | Valoración |
|----------------------|------------|
| 2 | A veces |
| 20 | Rara vez |
| 44 | Nunca |

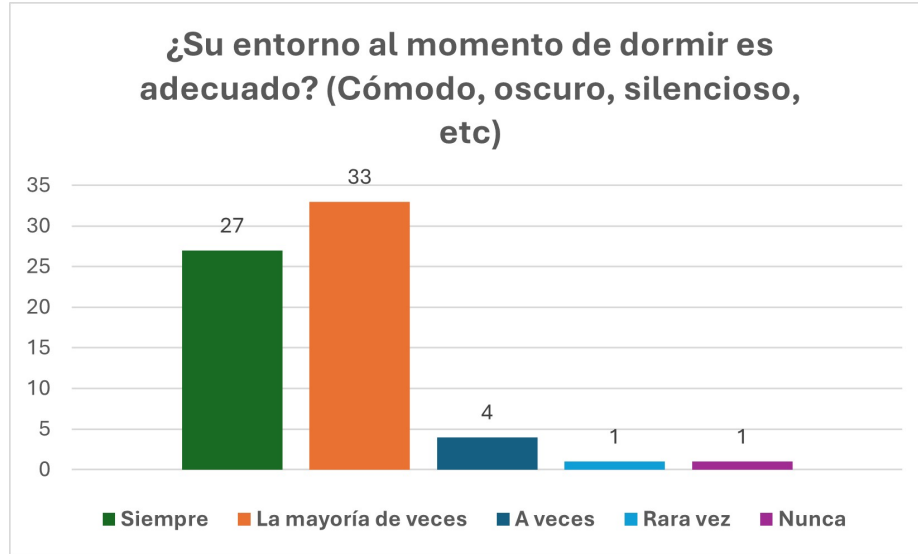
Cuadro 1: consumo de alcohol antes de dormir.

Aunque el alcohol puede inducir somnolencia, también puede afectar negativamente la arquitectura del sueño, reduciendo las fases de sueño profundo. Similar a la tendencia observada con el alcohol, la mayoría de los participantes no fuma antes de dormir.

10.2.10. Condiciones del Entorno

Un aspecto clave en la calidad del sueño es el entorno en el que se duerme. Como se ve en la Figura 43, se evaluaron condiciones como el nivel de comodidad, oscuridad y silencio. 27 personas dijeron que siempre tenían un lugar con buenas condiciones para dormir, mientras que 33 dijeron que la mayoría de las veces. Los demás reportaron condiciones menos favorables.

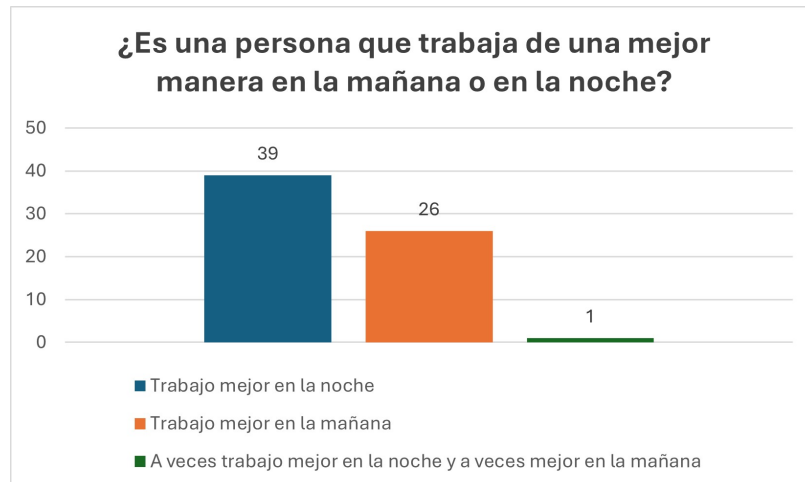
Figura 43: Entorno de sueño.



10.2.11. Momento de Mayor Productividad

Los participantes fueron consultados sobre su rendimiento en diferentes momentos del día. Se encontró que una mayoría se considera más productiva en la noche, mientras que otros trabajan mejor en la mañana o varía según el día 44.

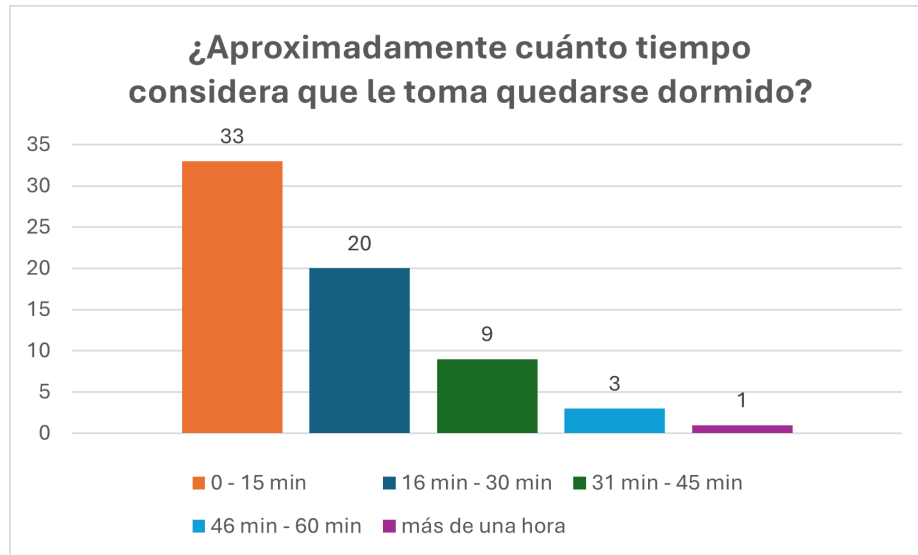
Figura 44: Momento de mayor productividad en las personas.



10.2.12. Tiempo para Conciliar el Sueño

Se preguntó a los sujetos cuánto tiempo tardan en quedarse dormidos. La mayoría indicó que se duerme en menos de 30 minutos, mientras que un grupo reducido reportó que le toma más de una hora conciliar el sueño, tal y como se ve en la Figura 45.

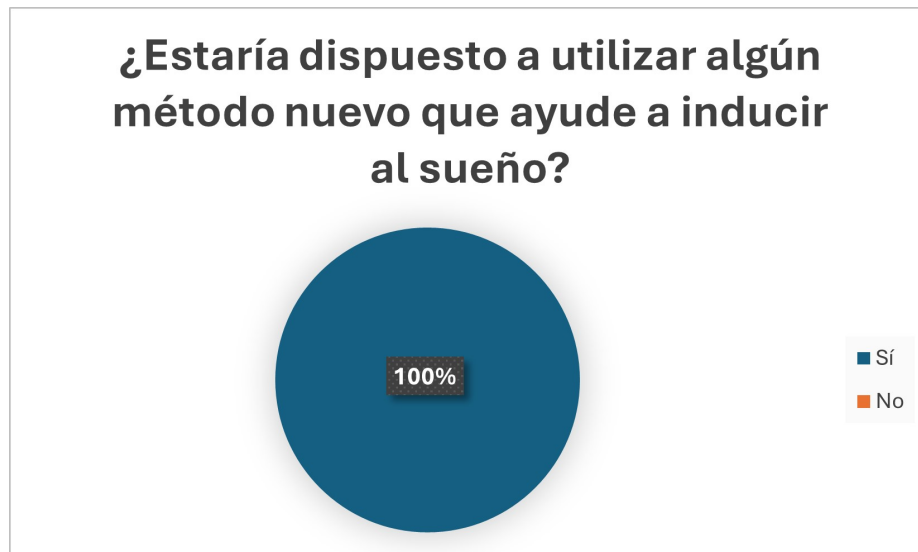
Figura 45: *Tiempo para conciliar el sueño.*



10.2.13. Disposición a Probar Métodos Alternativos

Finalmente, como se observa en la Figura 46 se consultó si los participantes estarían dispuestos a probar un método nuevo para mejorar su sueño. El 100 por ciento respondió de forma positiva, lo que sugiere una alta apertura a experimentar con los pulsos binaurales.

Figura 46: *Disposición a probar métodos nuevos para dormir.*



Este formulario inicial permitió obtener información valiosa sobre los hábitos de sueño de los participantes, identificando factores como el uso de dispositivos electrónicos, la calidad del sueño y los despertares nocturnos. La alta disposición de los sujetos a probar nuevas estrategias para dormir sugiere que los pulsos binaurales podrían ser bien recibidos como una alternativa para mejorar la calidad del sueño.

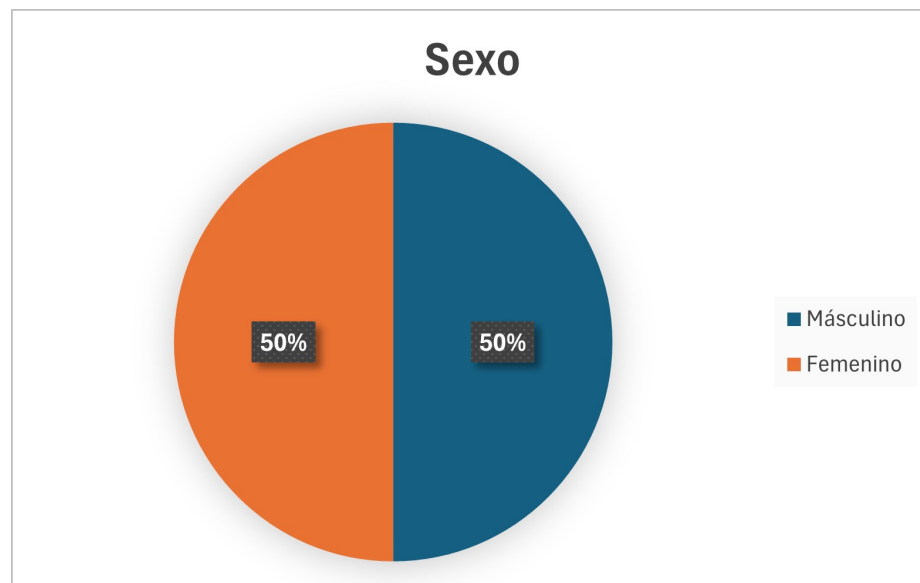
10.3. Resultados del estudio día 1 – Control (Sin Pulsos Binaurales)

Los resultados presentados en esta y la otra sección son los obtenidos después de realizar el estudio de los pulsos binaurales como método de inducción al sueño. Los resultados se dividieron en 3 secciones, el día de control donde no se aplicó ningún fenómeno auditivo, segundo y tercer día donde se realizó la aplicación de pulsos binaurales mezclados con ruido rosa, y por último cuarto y quinto día donde se utilizan pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo para amenizar el sonido.

10.3.1. Perfil General de Los Participantes

Como se observa en la Figura 47, en el estudio participaron un total de seis personas, divididas equitativamente en términos de género, con un 50 por ciento de participantes masculinos y un 50 por ciento femeninos. Esta distribución asegura que los datos obtenidos no estén sesgados por diferencias de género y permite analizar posibles variaciones en las respuestas sin que un grupo predomine sobre el otro, además todos son estudiantes universitarios.

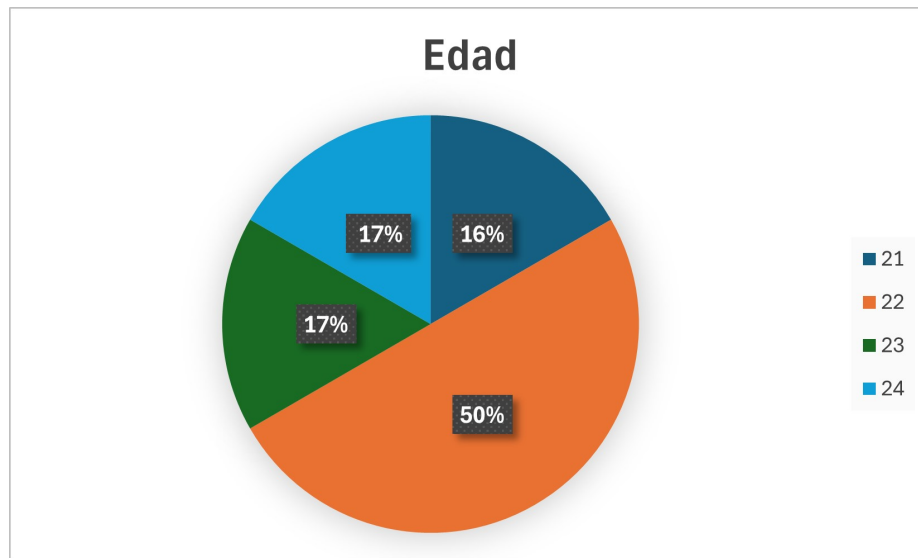
Figura 47: *Sexo de los participantes.*



10.3.2. Edad

En la Figura 48, se muestra la edad de los participantes, la mayoría pertenece al grupo de 22 años, representando el 50 por ciento de la muestra. Los demás participantes se distribuyen en los grupos de 21, 23 y 24 años, cada uno con un 16-17 por ciento de representación. Esto indica que la muestra está compuesta por jóvenes adulto.

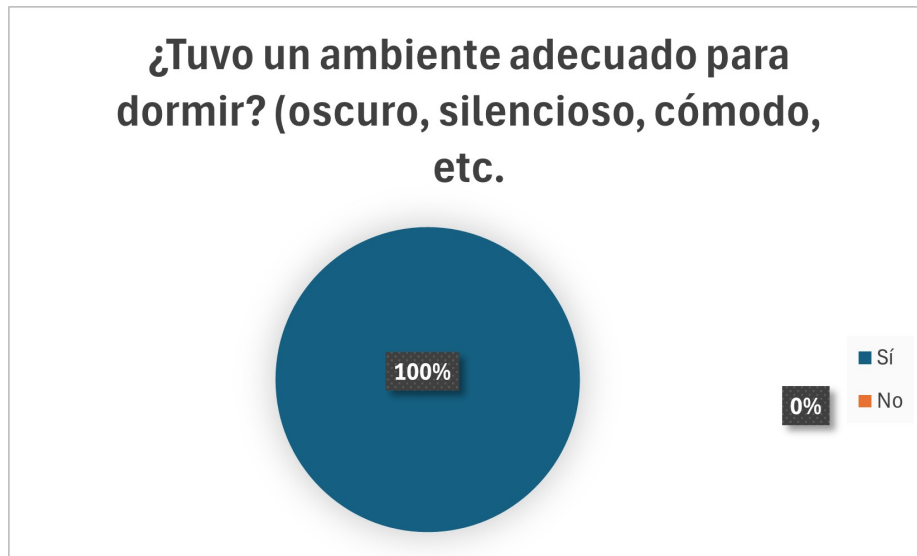
Figura 48: *Edad de los participantes.*



10.3.3. Entorno adecuado

los participantes cada vez que se realizaban las pruebas indicaron haber tenido un ambiente adecuado para dormir en todas las noches del estudio, tal y como se ve en la Figura 49. Esto significa que las condiciones externas, como la oscuridad, el silencio y la comodidad, no representaron un factor que pudiera afectar negativamente la calidad del sueño. Es decir que las condiciones para dormir fueron adecuadas, exceptuando algunos factores externos que no podían ser controlados.

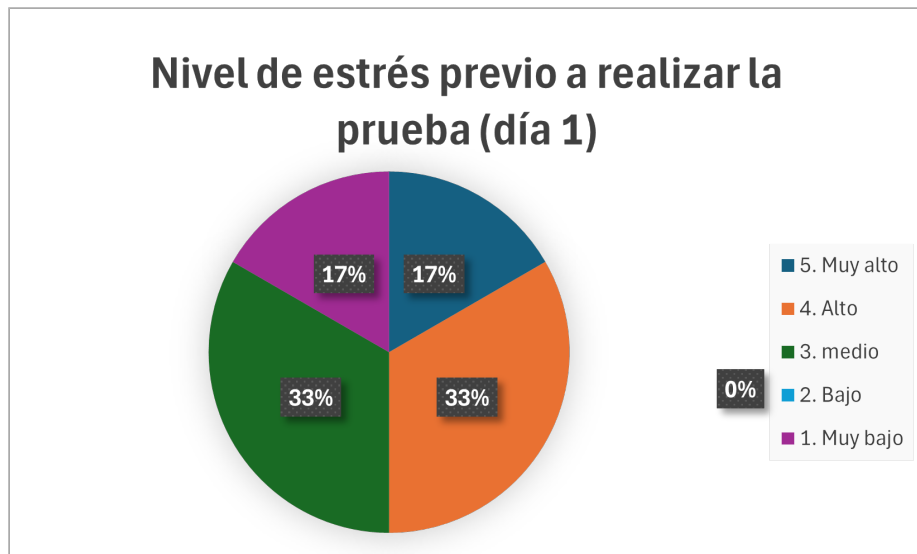
Figura 49: Ambiente adecuado para dormir en los participantes.



10.3.4. Nivel de Estrés Antes de Dormir - Día 1

Como se observa en la Figura 50, un 33 por ciento de los participantes reportó niveles altos de estrés, reflejando una tensión significativa antes de acostarse, mientras que el resto se distribuyó entre niveles moderados y bajos de estrés.

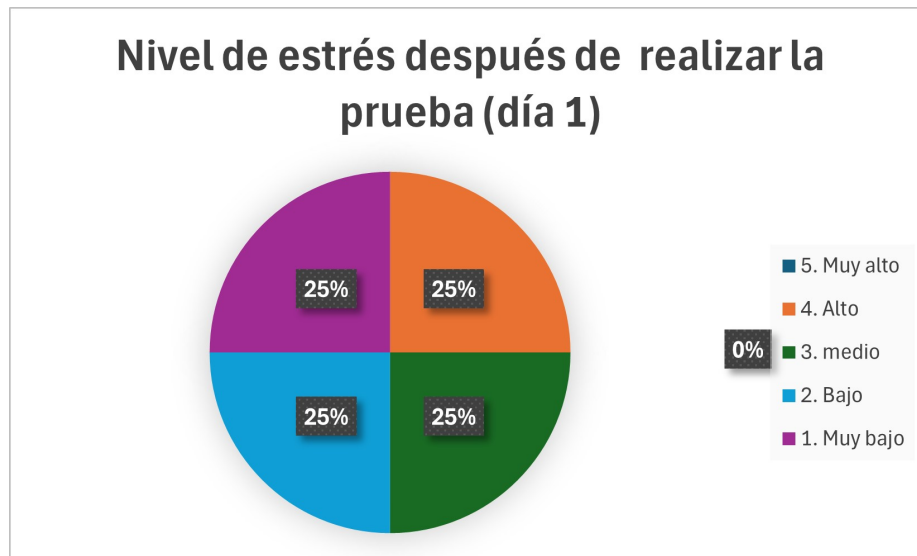
Figura 50: Nivel de estrés en participante previo a realizar la prueba día 1.



10.3.5. Nivel de Estrés Después de Dormir - Día 1

En la Figura 51 se logra observar una disminución del estrés después de la prueba. Antes de realizarla, el 17 por ciento de los participantes tenía un nivel de agotamiento muy alto, pero después ninguno lo reportó. Además, aumentó la cantidad de personas con niveles de agotamiento bajo y muy bajo, pasando del 17 por ciento al 40 por ciento en total. También se observó una ligera reducción en los niveles medio y alto de agotamiento. Estos cambios sugieren que el dormir tuvo un efecto positivo en la reducción del agotamiento, aunque aún un porcentaje de los participantes mantuvo niveles medios o altos.

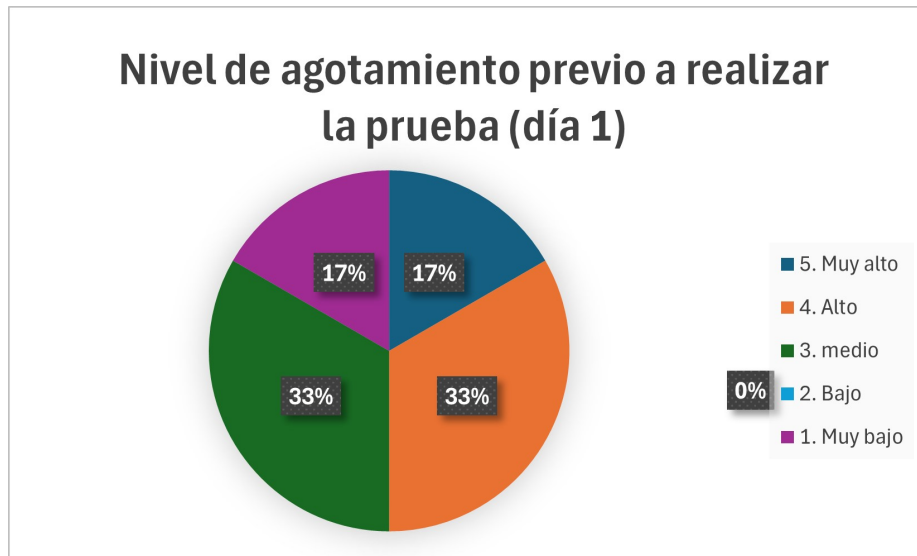
Figura 51: Nivel de estrés en participante después de realizar la prueba.



10.3.6. Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Día 1

Como se observa en la Figura 47, los resultados del nivel de agotamiento muestran que un 33 por ciento reportó un nivel de agotamiento medio, mientras que otro 33 por ciento indicó un agotamiento alto. Un 17 por ciento mencionó sentirse muy agotado y otro 17 por ciento señaló un agotamiento bajo. Ningún participante reportó un nivel muy bajo de agotamiento. Esto indica que la mayoría de los sujetos (83 por ciento) presentaban cierto grado de cansancio antes de la prueba.

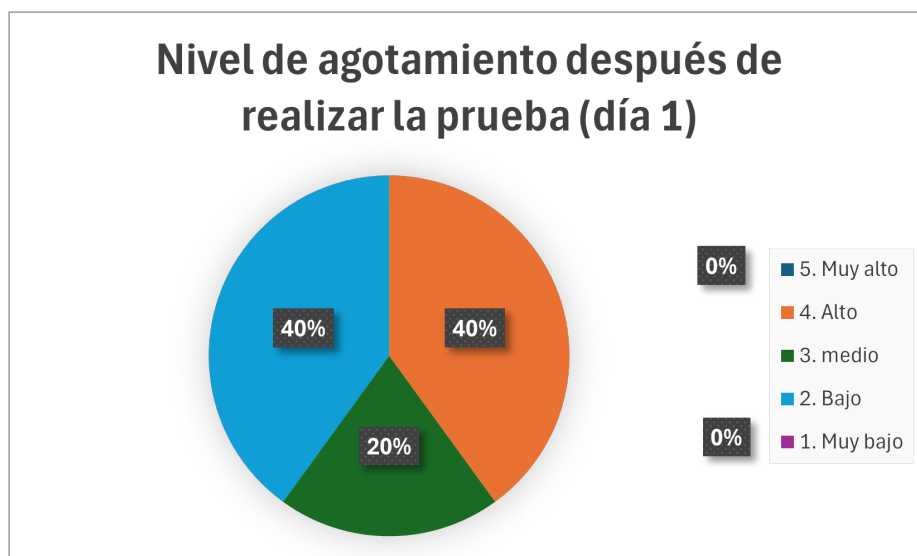
Figura 52: *Agotamiento en participantes previo a realizar la prueba.*



10.3.7. Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Día 1

En la Figura 53 el nivel de agotamiento de las personas después de dormir muestran una disminución del estrés después de la prueba. Antes de realizarla, el 17 por ciento de los participantes tenía un nivel de estrés muy alto, pero después ninguno lo reportó. Además, aumentó la cantidad de personas con niveles de estrés bajo y muy bajo, pasando del 17 por ciento al 50 por ciento en total. También se observó una ligera reducción en los niveles medio y alto de estrés. Estos cambios sugieren que la prueba tuvo un efecto positivo en la reducción del estrés, aunque aún un porcentaje de los participantes mantuvo niveles medios o altos.

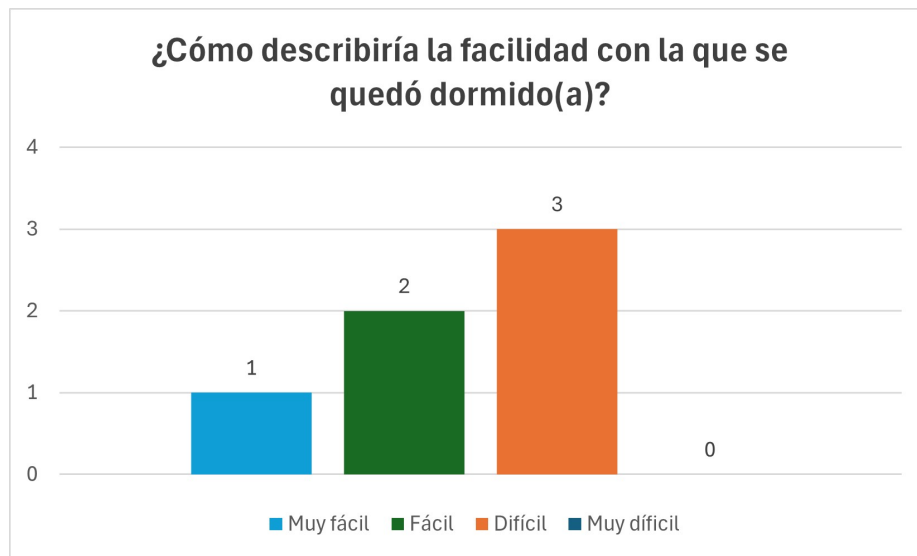
Figura 53: *Nivel de agotamiento en participantes después de realizar la prueba.*



10.3.8. Facilidad para conciliar el sueño - Día 1

La facilidad de las personas para quedarse dormidos como se observa en la Figura 54, reflejan una variabilidad significativa en la facilidad con la que los participantes lograron conciliar el sueño. Tres de ellos (la mayoría) indicaron que quedarse dormidos les resultó muy difícil, lo que sugiere una barrera importante en la iniciación del sueño. Dos participantes reportaron que les fue fácil dormirse, mientras que solo uno lo calificó como muy fácil. No se registraron respuestas en la categoría muy difícil, lo que indica que quienes tuvieron dificultades extremas para dormirse fueron una proporción considerable dentro del grupo estudiado.

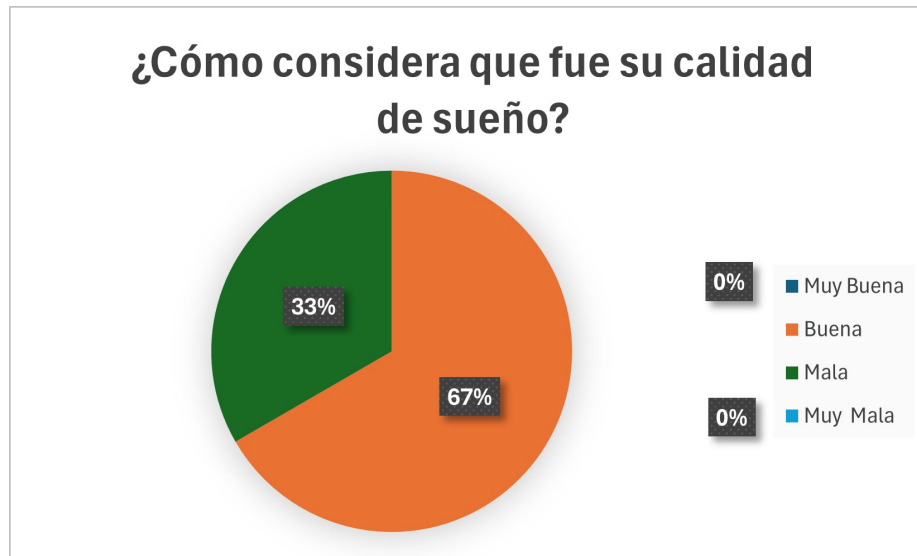
Figura 54: *Facilidad para conciliar el sueño.*



10.3.9. Percepción de la calidad del sueño - Día 1

En cuanto a la percepción de la calidad del sueño, como se observa en la Figura 55, el 67 por ciento de los participantes la calificó como buena, mientras que el 33 por ciento la consideró mala. No se registraron respuestas en las categorías muy buena o muy mala. A pesar de que varios participantes tuvieron dificultades para dormirse, la mayoría percibió su calidad de sueño como aceptable. No obstante, el hecho de que un tercio de los participantes haya calificado su sueño como malo indica que hubieron algunos factores que pudieron haber afectado negativamente su descanso.

Figura 55: *Percepción de la calidad del sueño.*



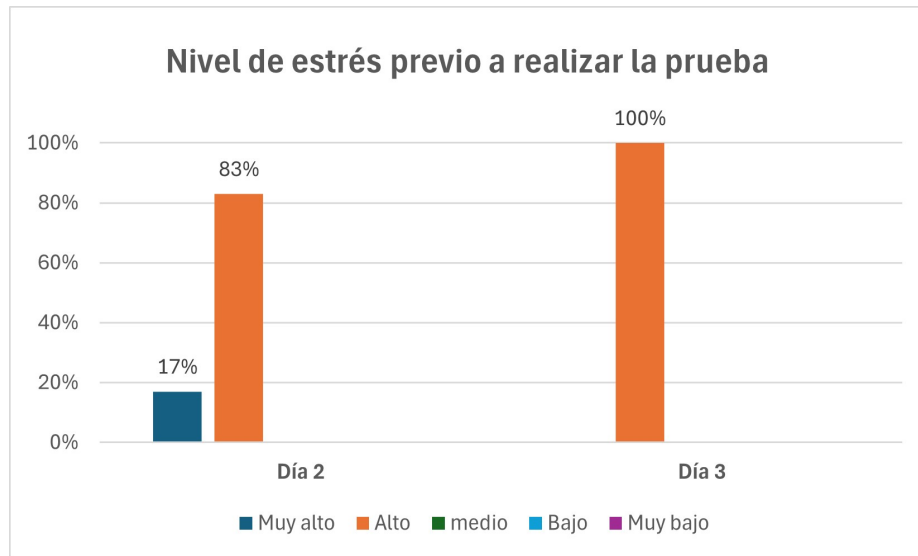
10.4. Resultados del Estudio Días 2 y 3 - Pulsos Binaurales Mezclados con Ruido Rosa

A continuación, se presentan los resultados de los días 2 y 3 mediante gráficas para ilustrar las respuestas de los participantes. Para estos días con estímulos auditivos, los resultados se juntaron en pares donde se aplicaron el mismo fenómeno auditivo para facilitar la comparación entre condiciones.

10.4.1. Nivel de Estrés Antes de Dormir - Días 2 y 3

Los resultados de la Figura 56, en el día 2, un 83 por ciento de los participantes indicó tener un nivel de estrés alto antes de la prueba, mientras que el 17 por ciento restante reportó un nivel de estrés muy alto. No se registraron niveles medios, bajos o muy bajos de estrés. En el día 3, el 100 por ciento de los participantes reportó un nivel de estrés alto. Estos resultados indican que el estrés previo a la prueba se mantuvo elevado en ambos días.

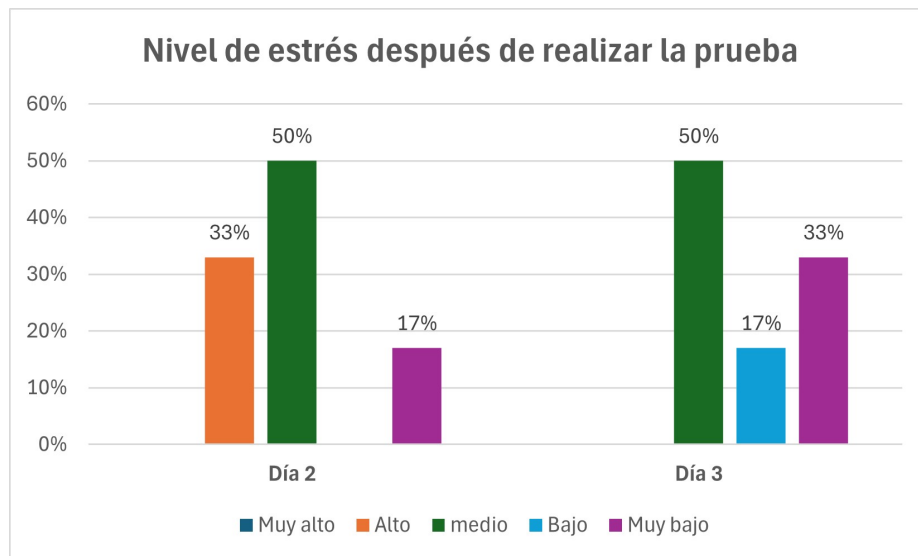
Figura 56: Nivel de estrés en participante previo a realizar la prueba días 2 y 3.



10.4.2. Nivel de Estrés Después de Dormir - Días 2 y 3

La gráfica 57 muestra los niveles de estrés después de la prueba en los días 2 y 3, tras la aplicación de pulsos binaurales con ruido rosa. En ambos días, el nivel más frecuente fue el medio (50 por ciento). En el día 2, un 33 por ciento aún reportó estrés alto, mientras que un 17 por ciento indicó estrés muy bajo, lo que sugiere una reducción parcial del estrés. En el día 3, desapareció el estrés alto, y aumentaron las respuestas de muy bajo (33 por ciento) y bajo (17 por ciento), indicando una mayor relajación. Estos resultados sugieren que los estímulos auditivos podrían haber reducido el estrés, especialmente en el día 3, evidenciando un posible efecto acumulativo o adaptación.

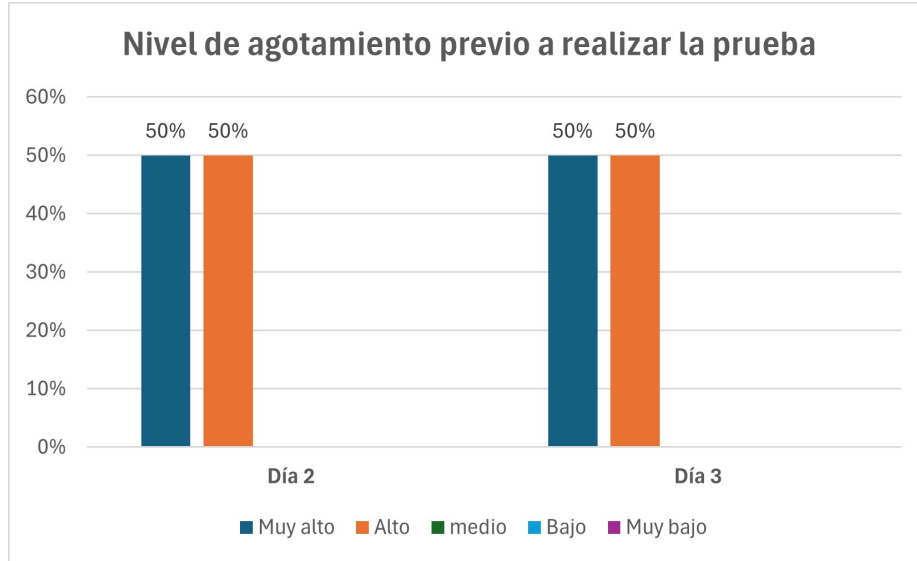
Figura 57: Nivel de estrés en participante después de realizar la prueba días 2 y 3.



10.4.3. Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Días 2 y 3

Con respecto al agotamiento, como se ve en la Figura 56, en ambos días, los participantes reportaron únicamente niveles de agotamiento muy alto (50 por ciento) y alto (50 por ciento), sin presencia de niveles medios, bajos o muy bajos. Esto indica que los participantes llegaron a la prueba con un alto grado de fatiga constante en ambos días, lo que podría influir en su desempeño y en la percepción del estrés posterior a la prueba.

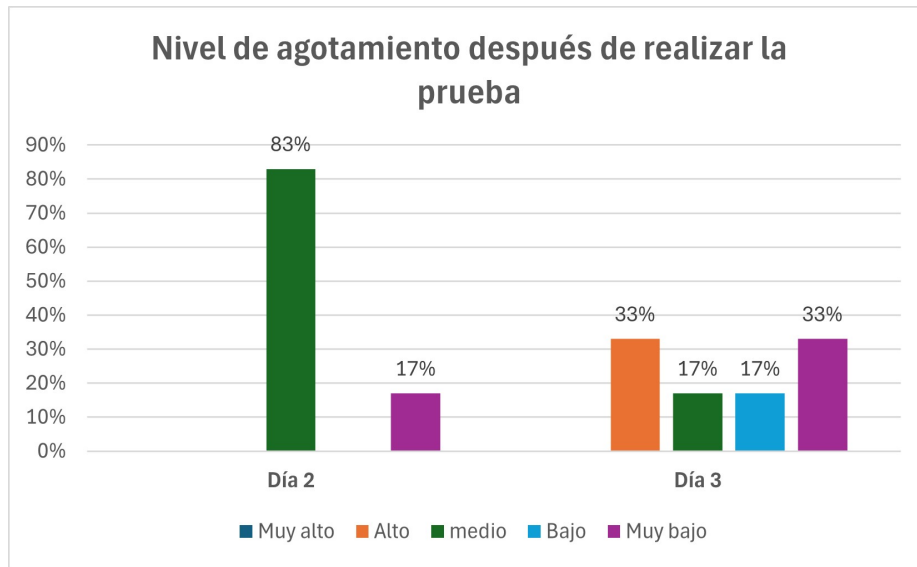
Figura 58: Nivel de agotamiento en participantes previo a realizar la prueba días 2 y 3.



10.4.4. Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Días 2 y 3

Después de la prueba, en el día 2, el agotamiento disminuyó en intensidad, con un 83 por ciento en nivel medio y un 17 por ciento muy bajo, mostrando una reducción del agotamiento muy alto. En el día 3, la distribución cambió aún más, con 33 por ciento en alto, 33 por ciento en muy bajo, y el resto repartido en medio (17 por ciento) y bajo (17 por ciento), reflejando una mayor variabilidad y una tendencia a menores niveles de agotamiento, tal y como se ve la Figura 59.

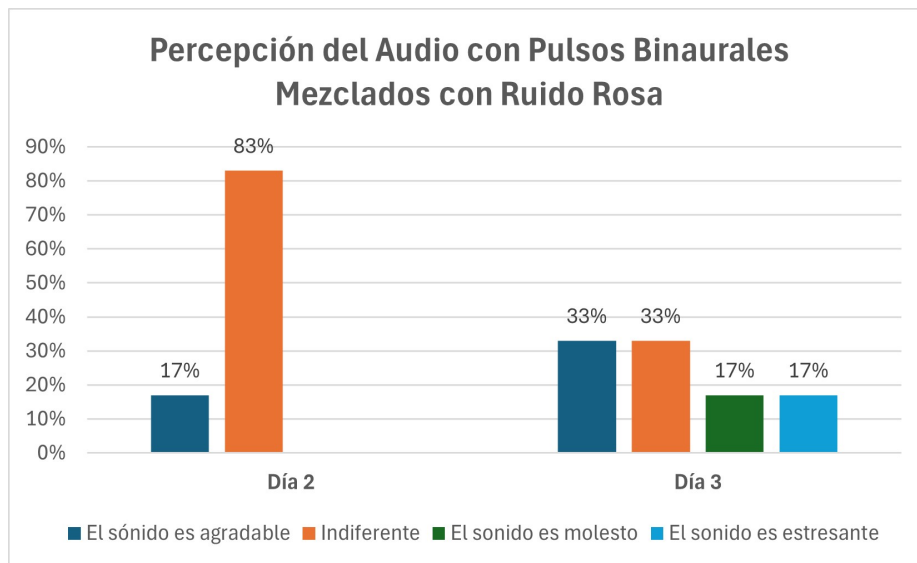
Figura 59: Nivel de agotamiento después de realizar la prueba días 2 y 3.



10.4.5. Percepción Audio

Como se observa en la Figura 60, en el día 2, la mayoría de los participantes (83 por ciento) percibieron el audio con pulsos binaurales y ruido rosa de manera indiferente, mientras que solo el 17 por ciento lo encontró agradable, sin reportes de molestias o estrés. En contraste, en el día 3, la percepción se diversificó, un 33 por ciento lo encontró agradable, otro 33 por ciento fue indiferente, pero aparecieron valoraciones negativas, con un 17 por ciento calificándolo como molesto y otro 17 por ciento como estresante. Este día aumentaron tanto las percepciones positivas como las negativas, sugiriendo una mayor sensibilidad al sonido con el tiempo.

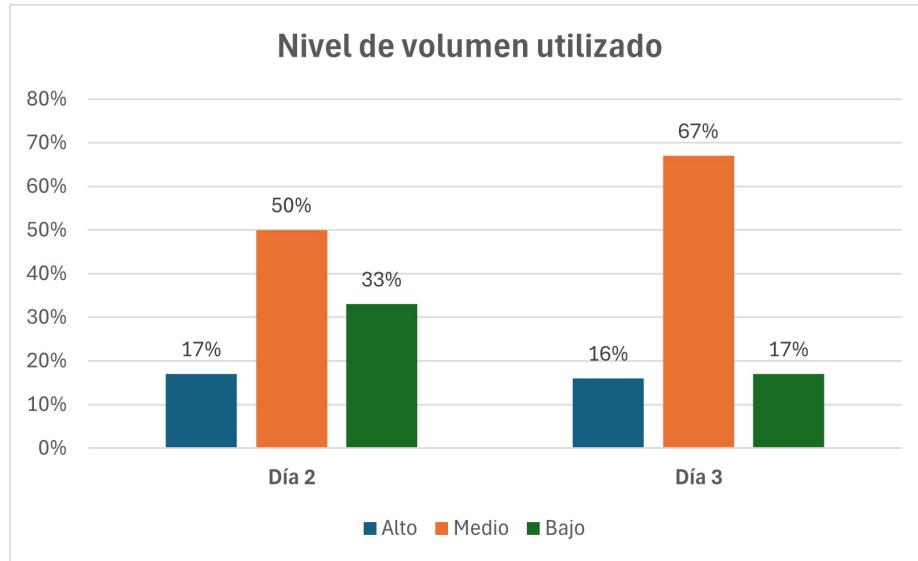
Figura 60: Percepción de audio días 2 y 3.



10.4.6. Nivel de Volumen Utilizado

Como se ve en la Figura 61, el volumen medio fue el más utilizado en ambos días, con un incremento notable el día 3, lo que indica una posible preferencia o necesidad de mayor claridad en el audio. El volumen bajo disminuyó en comparación con el día 2, lo que sugiere que algunos participantes optaron por aumentar la intensidad del sonido, esto podría estar relacionado con la percepción del audio.

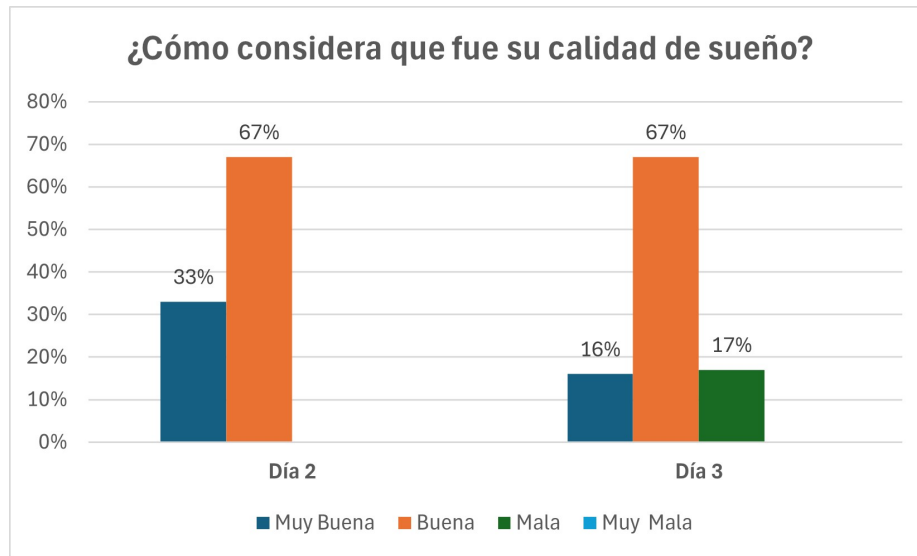
Figura 61: Nivel de Volumen utilizado días 2 y 3.



10.4.7. Percepción Calidad de Sueño

Con respecto a la calidad del sueño en las personas, como se observa en la Figura 62, La mayoría de los participantes calificaron su calidad de sueño como Buena en ambos días, manteniéndose en un 67 por ciento. Sin embargo, hubo una disminución en la percepción de un sueño Muy Bueno el día 3 (16 por ciento en comparación con 33 por ciento el día 2), acompañada de un aumento en la categoría de Mala (17 por ciento), lo que sugiere una ligera variación en la experiencia del descanso. Esto podría estar influenciado por factores como la adaptación al sonido.

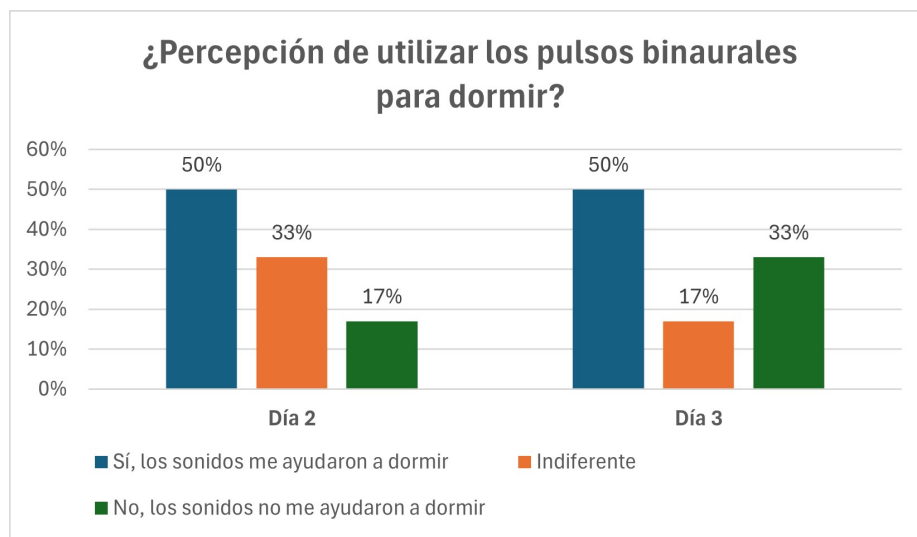
Figura 62: *Percepción de la calidad del sueño.*



10.4.8. Percepción Pulsos Binaurales

En ambos días, el 50 por ciento de los participantes consideró que los pulsos binaurales les ayudaron a dormir, lo que indica una percepción positiva constante del estímulo sonoro. Sin embargo, hubo una disminución en la categoría Indiferente del día 2 al día 3 (de 33 por ciento a 17 por ciento), mientras que la percepción de que los sonidos no ayudaron a dormir aumentó del 17 por ciento al 33 por ciento. Esto sugiere que, aunque la mayoría encontró los pulsos beneficiosos, algunos participantes pudieron experimentar una menor efectividad o un efecto de habituación con el tiempo.

Figura 63: *Percepción Pulsos Binaurales.*



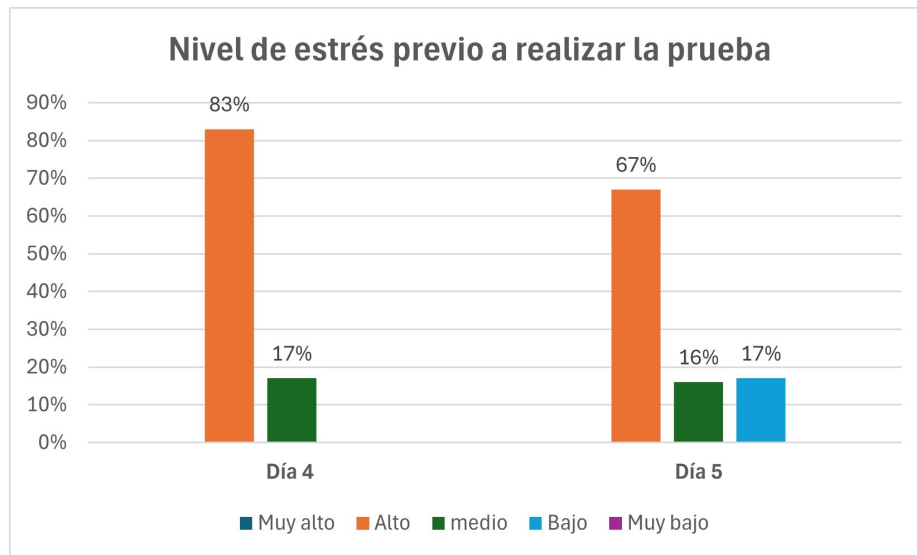
10.5. Resultados del Estudio Días 4 y 5 - Pulsos Binaurales Mezclados con Pista de Fondo

En los días 4 y 5 se realizó el estudio utilizando los pulsos binaurales mezclados con una pista el cual tenía como proposito amenizar el sonido.

10.5.1. Nivel de Estrés Antes de Dormir - Días 4 y 5

Como se puede apreciar en la Figura 64, esta muestra una el nivel de estrés Alto de los participantes entre el Día 4 (83 por ciento) y el Día 5 (67 por ciento). Además, en el Día 5 aparecen en las categorías Bajo (17 por ciento) y Muy bajo (16 por ciento), mientras que la categoría Medio se mantiene estable.

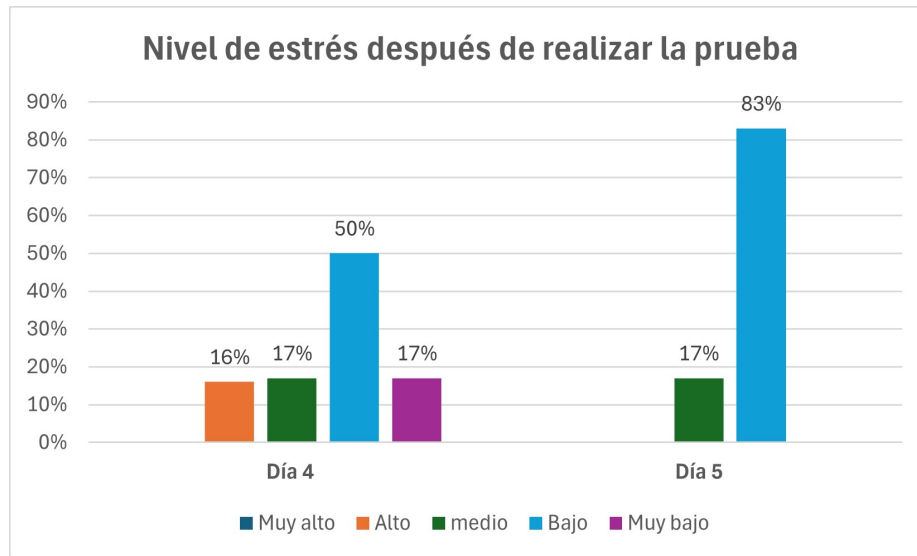
Figura 64: Comparación estrés-agotamiento en las personas en los días 4 y 5.



10.5.2. Nivel de Estrés Después de Dormir - Días 4 y 5

En el día 4, el 50 por ciento de los participantes reportaron un nivel de estrés bajo después de la prueba, mientras que un 17 por ciento indicó un nivel medio y otro 17 por ciento reportó un nivel muy bajo 65. Solo el 16 por ciento de los participantes mencionó haber sentido un nivel alto de estrés. En el día 5, se observa una disminución aún mayor del estrés, con un 83 por ciento de los participantes indicando un nivel bajo después de la prueba y un 17 por ciento reportando un nivel medio. No se registraron niveles de estrés muy alto ni alto, lo que sugiere que el efecto de los pulsos binaurales con una pista de fondo fue más efectivo en la reducción del estrés, además que esta combinación de audio pudo haber sido más relajante y efectiva para disminuir el estrés tras la prueba.

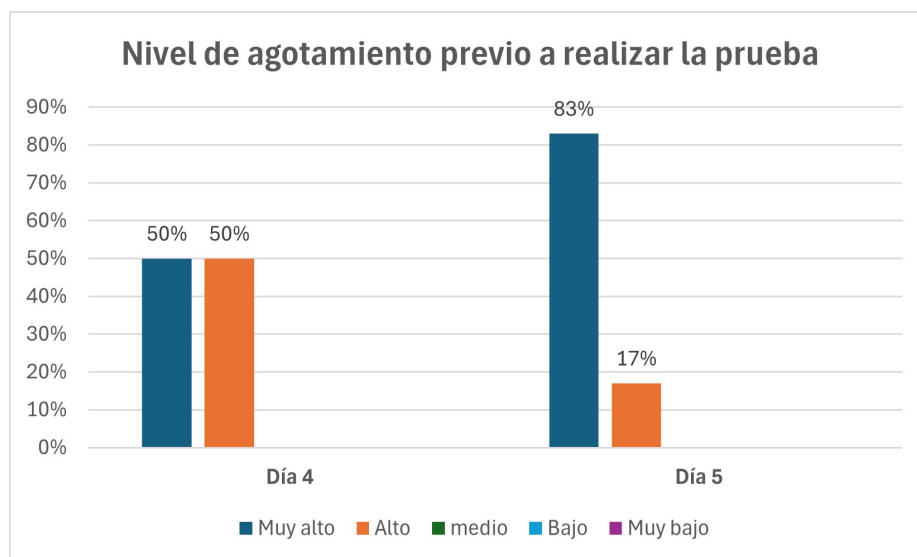
Figura 65: Nivel de estrés Después de realizar la prueba días 4 y 5.



10.5.3. Nivel de Agotamiento Antes de Dormir - Días 4 y 5

La gráfica 66 muestra que en el día 4, el 50 por ciento de los participantes reportaron un nivel de agotamiento muy alto, mientras que el otro 50 por ciento indicó un nivel alto. Esto sugiere que el agotamiento antes de la prueba era considerablemente elevada en todos los participantes. Para el día 5, el 83 por ciento de los participantes reportaron un nivel de agotamiento muy alto, mientras que el 17 por ciento indicó un nivel alto, lo que indica un aumento en el agotamiento en comparación con el día anterior. Este incremento podría deberse a factores externos, como la acumulación de fatiga a lo largo de los días de estudio, o a la propia naturaleza de la prueba.

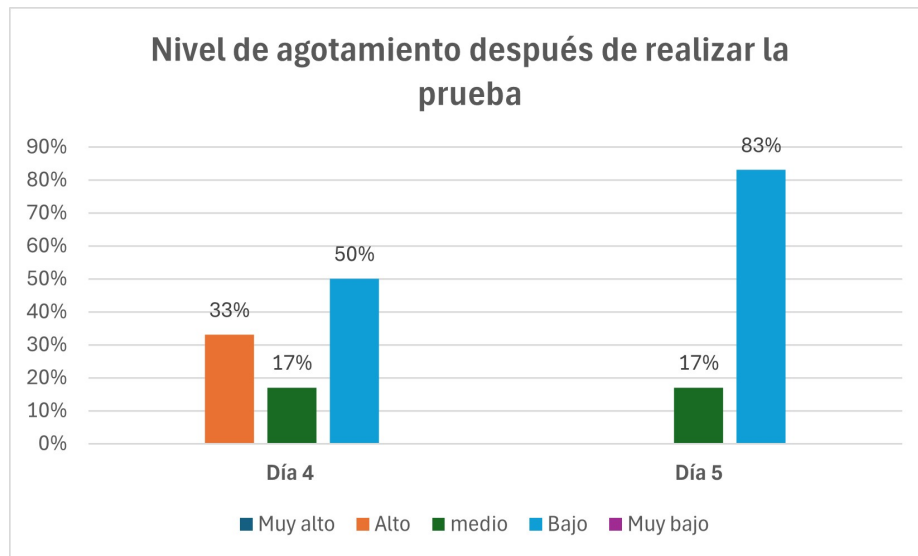
Figura 66: Nivel de agotamiento antes de realizar la prueba días 4 y 5.



10.5.4. Nivel de Agotamiento Después de Dormir - Días 4 y 5

En el día 4, antes de la prueba, el 50 por ciento de los participantes reportó un agotamiento muy alto y el otro 50 por ciento Alto, mientras que después de la prueba, el 50 por ciento indicó un nivel bajo, el 33 por ciento alto y el 17 por ciento medio, lo que sugiere una disminución en el agotamiento. El día 5 refuerza esta tendencia, ya que antes de la prueba el 83 por ciento reportó un agotamiento muy alto y el 17 por ciento alto, pero después el 83 por ciento indicó un nivel bajo y solo el 17 por ciento medio. Estos resultados sugieren que la exposición a los estímulos auditivos pudo haber contribuido a una reducción notable del agotamiento percibido, tal y como se observa en la Figura 67.

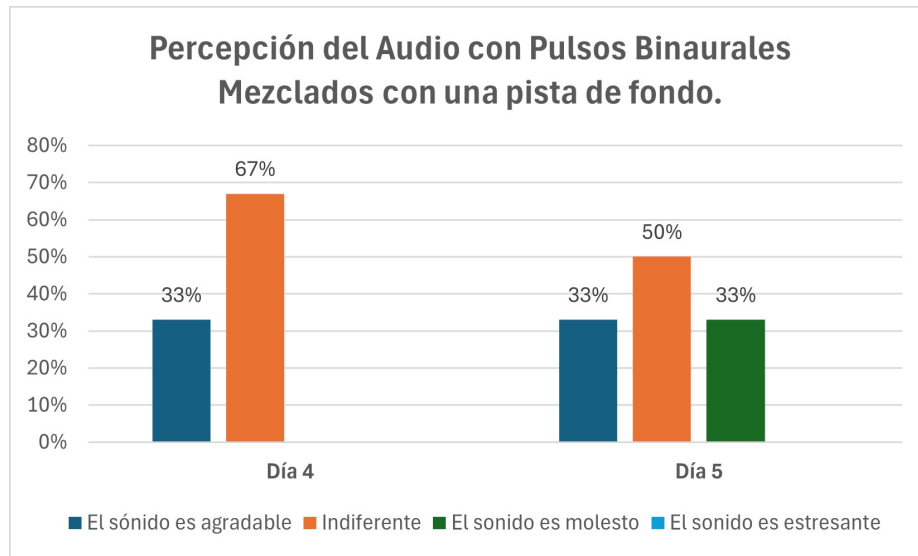
Figura 67: Nivel de agotamiento después de realizar la prueba días 4 y 5.



10.5.5. Percepción de Audio

Como se observa en la Figura 68, la percepción del audio con los pulsos binaurales varió entre el día 4 y el día 5. En el día 4, el 67 por ciento de los participantes se mostró indiferente al sonido, mientras que el 33 por ciento lo encontró agradable. No se reportaron respuestas negativas como molestia o estrés. Para el día 5, aunque la mayoría aún se mantuvo en la categoría de indiferente (50 por ciento), un 33 por ciento calificó el sonido como agradable y otro 33 por ciento lo percibió como molesto, lo que indica una mayor diversidad en las respuestas. Esto sugiere que, aunque la mayoría no tuvo una reacción negativa al audio, algunos participantes experimentaron incomodidad con el sonido en el segundo día, lo que podría deberse a factores individuales de percepción o habituación.

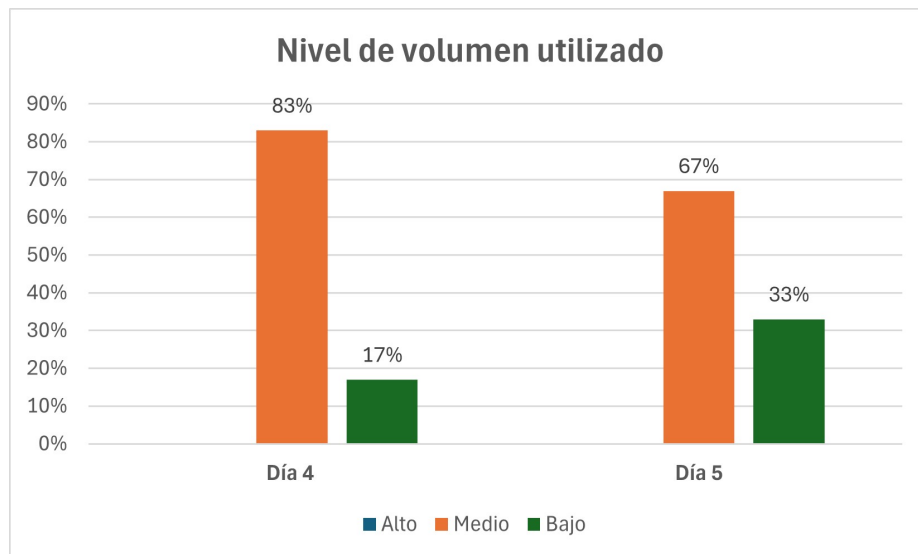
Figura 68: *Percepción de audio de pulsos binaurales.*



10.5.6. Nivel de Volumen

Como se observa en la Figura 69, inicialmente la mayoría de los participantes prefirió un volumen moderado, pero al día siguiente, más personas optaron por reducirlo. Esto podría indicar que con el tiempo los participantes se sintieron más cómodos con un volumen más bajo o que encontraron el sonido más relajante a menor intensidad. Además, la ausencia de un volumen alto sugiere que, desde el inicio, los participantes evitaron un sonido demasiado fuerte, posiblemente buscando una experiencia más agradable o menos invasiva.

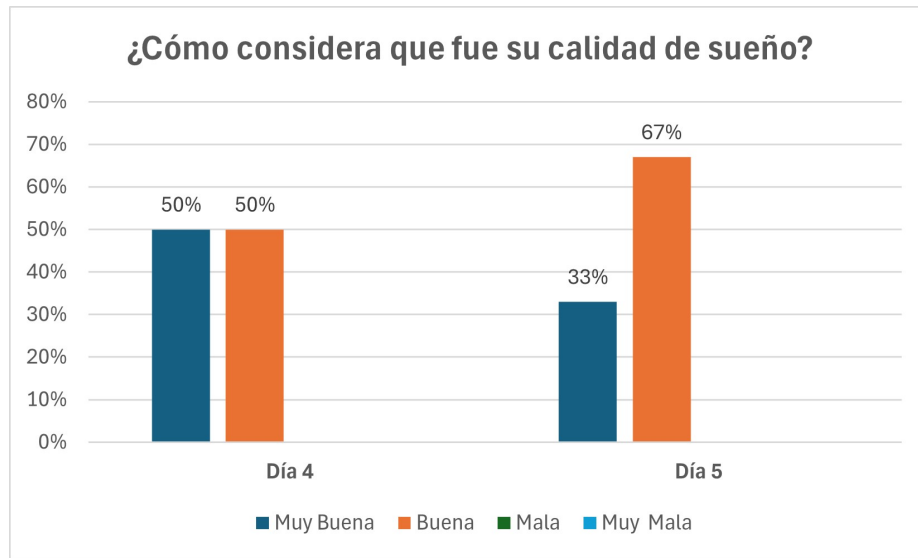
Figura 69: *Nivel de volumen día 4 y 5.*



10.5.7. Percepción Calidad de Sueño

En el día 4, hubo un equilibrio entre quienes consideraron su sueño como muy bueno y bueno, lo que sugiere una experiencia positiva en general. Sin embargo, en el día 5, la mayoría lo calificó solo como bueno, y hubo una disminución en la cantidad de personas que lo consideraron muy bueno. Esto podría indicar que, aunque la calidad del sueño siguió siendo aceptable, hubo una ligera reducción en la percepción de un descanso óptimo, tal y como se observa en la Figura 70.

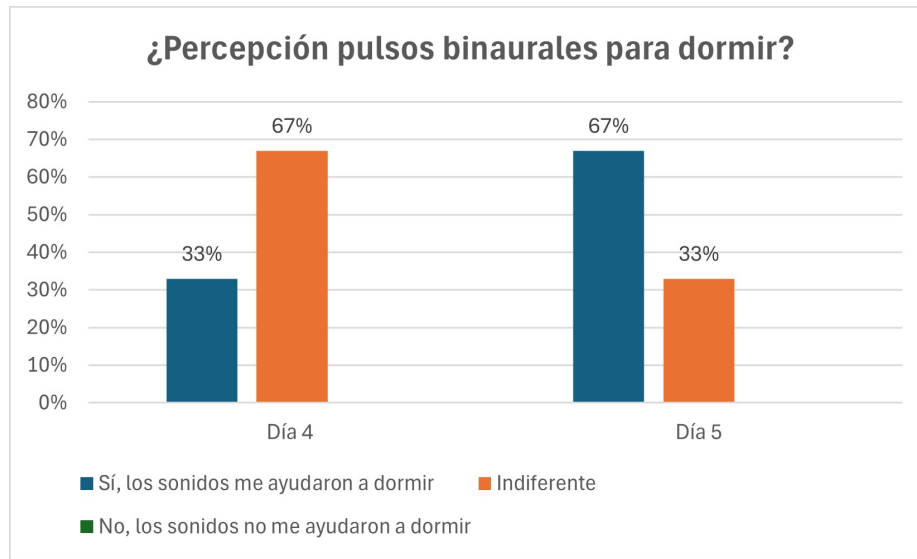
Figura 70: Percepción calidad de sueño días 4 y 5.



10.5.8. Percepción Pulsos Binaurales

En el día 4, la mayoría de los participantes se mostraron indiferentes respecto a la utilidad de los pulsos binaurales para dormir, mientras que una minoría afirmó que sí les ayudaron. Sin embargo, en el día 5 se observa un cambio en la percepción, ya que una mayor cantidad de personas consideraron que los sonidos les fueron útiles para conciliar el sueño, reduciendo así el grupo de quienes eran indiferentes. Este cambio sugiere que, con el tiempo, los participantes pueden haber desarrollado una mejor percepción de los efectos de los pulsos binaurales o haberse adaptado a su uso.

Figura 71: *Percepción pulsos binaurales para dormir días 4 y 5.*



10.6. Discusión

La evaluación del impacto de los pulsos binaurales en la inducción del sueño a través de los cuestionarios aplicados antes y después de las pruebas permitió identificar ciertas tendencias en la respuesta de los participantes. En primer lugar, el análisis de los hábitos de sueño antes del experimento mostró que la mayoría de los participantes tenían rutinas variables, con algunos sujetos experimentando dificultades para conciliar el sueño y otros reportando patrones más regulares. Además permitió identificar que las personas están dispuestas a utilizar un método alternativo que les ayude a dormir.

En el Día 1, que sirvió como control sin exposición a pulsos binaurales, los niveles de estrés y agotamiento mostraron solo reducciones leves tras el descanso, lo que sugiere que el sueño sin estímulos auditivos no generó una diferencia significativa en la relajación. La calidad del sueño percibida varió entre los participantes, con algunos reportando una noche de descanso satisfactoria mientras que otros no percibieron una mejora notable. Esto establece una línea base para comparar los efectos de los estímulos auditivos en los días posteriores.

Cuando se introdujeron los pulsos binaurales combinados con ruido rosa en los días 2 y 3, se observó una mayor reducción en los niveles de estrés y agotamiento. Específicamente, el porcentaje de personas que reportaron altos niveles de estrés antes de dormir disminuyó significativamente al despertar, lo que indica que la presencia de los estímulos auditivos pudo haber favorecido un estado de mayor relajación. Además, la percepción del sueño mejoró en comparación con el día 1, con más participantes calificando su descanso como muy bueno. Esta tendencia sugiere que los pulsos binaurales combinados con ruido rosa podrían haber contribuido a una mejor conciliación del sueño y una mayor sensación de descanso.

En los Días 4 y 5, en los cuales los pulsos binaurales se combinaron con una pista de fondo relajante, los resultados mostraron una tendencia similar, con una reducción significativa del estrés y el agotamiento. Sin embargo, en comparación con los Días 2 y 3, el impacto sobre la

calidad del sueño percibida no fue tan alto. Aunque un número considerable de participantes reportó que la pista de fondo les ayudó a dormir, algunos manifestaron indiferencia hacia el sonido. Esto podría indicar que, si bien los estímulos auditivos pueden tener un efecto positivo, su impacto puede depender de la preferencia personal y de la predisposición de cada sujeto.

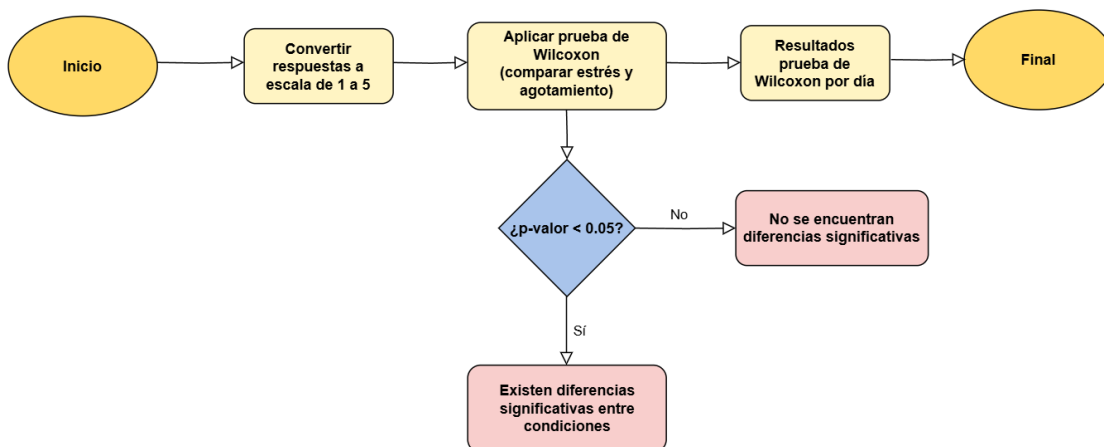
Al comparar los resultados de los días con estímulos auditivos con el día 1 de control, se observa que la presencia de pulsos binaurales, especialmente en combinación con ruido rosa, estuvo asociada con una mayor reducción del estrés y el agotamiento, así como con una percepción más positiva del sueño. Esto sugiere que los estímulos auditivos pueden influir en la experiencia subjetiva del sueño, promoviendo la relajación y reduciendo el estrés previo a dormir. Sin embargo, es importante destacar que los efectos variaron entre los participantes, lo que indica que otros factores individuales, como la familiaridad con los sonidos o la sensibilidad auditiva, pueden influir en los resultados.

En conclusión, los resultados obtenidos a partir de los cuestionarios indican que los pulsos binaurales pueden tener un impacto positivo en la reducción del estrés y agotamiento, además de la percepción de la calidad del sueño, especialmente cuando se combinan con ruido rosa. Sin embargo, la variabilidad en las respuestas de los participantes sugiere que su efectividad no es uniforme y que pueden existir factores adicionales que modulan su impacto. Esto plantea la necesidad de estudios adicionales que consideren un mayor número de participantes y una evaluación más detallada de las diferencias individuales en la respuesta a los estímulos auditivos.

Análisis cuantitativo a partir de los resultados de las encuestas realizadas a los sujetos de prueba

Para realizar el análisis cuantitativo con base en resultado de encuesta se utilizó la prueba de Wilcoxon. Esta prueba evalúa si hay una diferencia significativa en las personas respecto al estrés y agotamiento (mejoría o empeoramiento) entre dos momentos. Si el valor p es menor que 0.05, se considera que hay una diferencia significativa entre las dos condiciones. Como se muestra en la Figura 72, el análisis inició con la conversión de respuestas en una escala de puntuación (muy alto = 5, alto = 4, medio = 3, bajo = 2, muy bajo = 1). Esto permitió comparar cómo variaron las respuestas en relación con el uso de pulsos binaurales.

Figura 72: Diagrama de flujo de la prueba de Wilcoxon para estrés y agotamiento.



Como se observa en el cuadro 2, el día 1 (control) no presentó diferencias significativas entre las mediciones de antes y después del estímulo, con un valor estadístico de 7.5 y un valor p de 0.524. Esto era esperado, ya que este día no se aplicaron estímulos, estableciendo una línea base para comparar los efectos de los otros días.

Cuadro 2: *Valor brindado al realizar la prueba Wilcoxon para el nivel de estrés.*

| Día | Valor P |
|------------|----------------|
| Día 1 | 0.524 |
| Día 2 | 0.111 |
| Día 3 | 0.031 |
| Día 4 | 0.035 |
| Día 5 | 0.031 |

En los días con ruido rosa, los resultados fueron mixtos. El Día 2 no mostró un cambio significativo en los niveles de estrés, con un valor estadístico de 3.0 y un valor p de 0.1108. Sin embargo, en el Día 3, sí se encontraron diferencias significativas, con un valor estadístico de 0.0 y un valor p de 0.031, lo que indica que el ruido rosa tuvo un impacto medible en los niveles de estrés en este día.

Por su parte, los días con pista de fondo (Días 4 y 5) mostraron resultados consistentes, con diferencias significativas en ambos días. En el Día 4, el valor estadístico fue de 0.5 y el valor p de 0.0350, mientras que en el Día 5, los valores fueron 0.5 y 0.0310, respectivamente. Estos resultados sugieren que la pista de fondo tuvo un efecto constante en la reducción de los niveles de estrés.

Con respecto al agotamiento, como se observa en el cuadro 3 en el día 1 (control) tampoco mostró diferencias significativas entre las mediciones de antes y después, con un valor estadístico de 3.0 y un valor p de 0.1108, confirmando nuevamente la falta de intervención en este día.

Cuadro 3: *Valor brindado al realizar la prueba Wilcoxon para el nivel de agotamiento.*

| Día de prueba | Valor P |
|----------------------|----------------|
| Día 1 | 0.1108 |
| Día 2 | 0.0313 |
| Día 3 | 0.0355 |
| Día 4 | 0.0313 |
| Día 5 | 0.0313 |

En los días con ruido rosa (Días 2 y 3), ambos mostraron diferencias significativas en los niveles de agotamiento. El Día 2 tuvo un valor estadístico de 0.0 y un valor p de 0.0313, mientras que el Día 3 presentó un valor estadístico de 0.5 y un valor p de 0.0355. Esto sugiere que el ruido rosa tiene un impacto consistente en la percepción de agotamiento de los participantes.

Finalmente, en los días con pista de fondo (Días 4 y 5), también se encontraron diferencias significativas en los niveles de agotamiento. En ambos días, el valor estadístico fue de 0.0 y el

valor p de 0.03123. Estos resultados refuerzan la idea de que la pista de fondo es un estímulo efectivo para influir en el agotamiento, con un impacto constante en ambas sesiones.

11.1. Discusión de resultados

Los resultados de la prueba estadística de Wilcoxon mostraron que el Día 1 (control) no presentó diferencias significativas en ninguna de las variables medidas, lo cual era esperado, ya que en esta condición no se aplicó ningún estímulo auditivo, lo que confirma que los cambios en los días siguientes pueden atribuirse a los estímulos auditivos.

En los días con ruido rosa (Día 2 y 3), los resultados fueron mixtos. Mientras que el Día 2 no mostró cambios significativos en los niveles de estrés, el Día 3 sí evidenció una diferencia significativa ($p = 0.031$), lo que sugiere que el ruido rosa podría haber tenido un impacto medible en la percepción del estrés. En cuanto al agotamiento, ambos días presentaron diferencias significativas, lo que indica que el ruido rosa podría influir en la sensación de fatiga o cansancio de los participantes.

Por otro lado, los días con pista de fondo (Día 4 y 5) mostraron resultados más consistentes. Tanto para el estrés como para el agotamiento, los valores p fueron menores a 0.05 en ambas condiciones, lo que indica un efecto constante de la pista de fondo en la reducción del estrés y el agotamiento. Esto podría indicar que la combinación de pulsos binaurales con una pista de fondo podría ser más efectiva para mejorar la sensación de bienestar en los participantes.

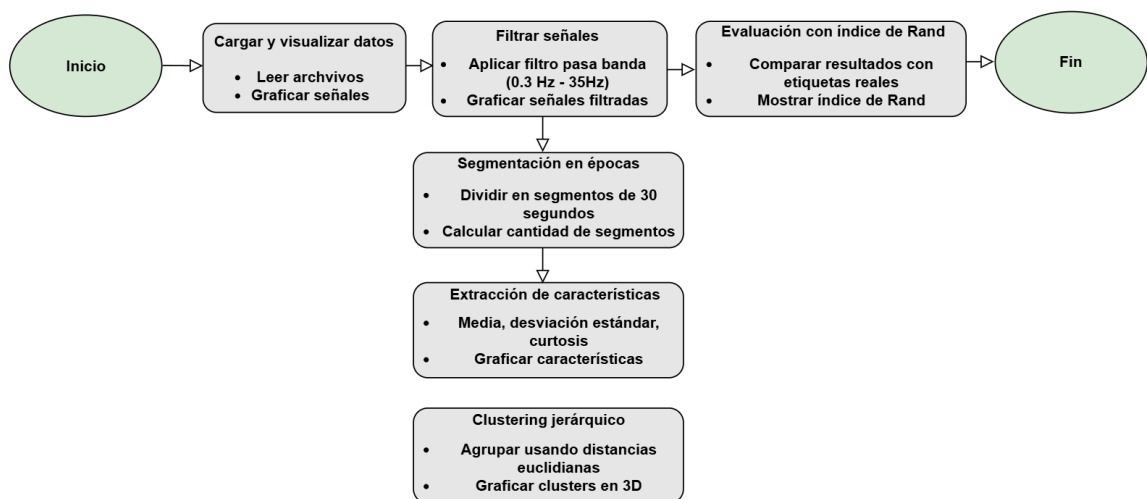
En general, los resultados indican que los estímulos auditivos utilizados en el estudio sí tuvieron un impacto en la percepción de estrés y agotamiento de los sujetos. Sin embargo, este impacto varió dependiendo del tipo de estímulo. Mientras que el ruido rosa mostró efectos más variables, la pista de fondo presentó un efecto más consistente. Esto podría deberse a que la combinación de una pista de fondo con los pulsos binaurales genera una experiencia auditiva más envolvente, facilitando la relajación.

Finalmente, aunque los resultados sugieren que los pulsos binaurales pueden tener efectos beneficiosos en la reducción del estrés y agotamiento, es importante considerar posibles factores externos que podrían haber influido en los resultados, como diferencias en la percepción del sonido o en las condiciones del entorno al momento de dormir en futuros estudios.

Resultados del uso de pulsos binaurales como método de inducción al sueño mediante herramientas de aprendizaje automático

En este capítulo se presenta uno de los métodos utilizados para realizar el análisis cuantitativo a los datos obtenidos de las pruebas. Para esto se utilizaron algoritmos de agrupamiento implementados en MATLAB, siguiendo la lógica presentada en la Figura 73.

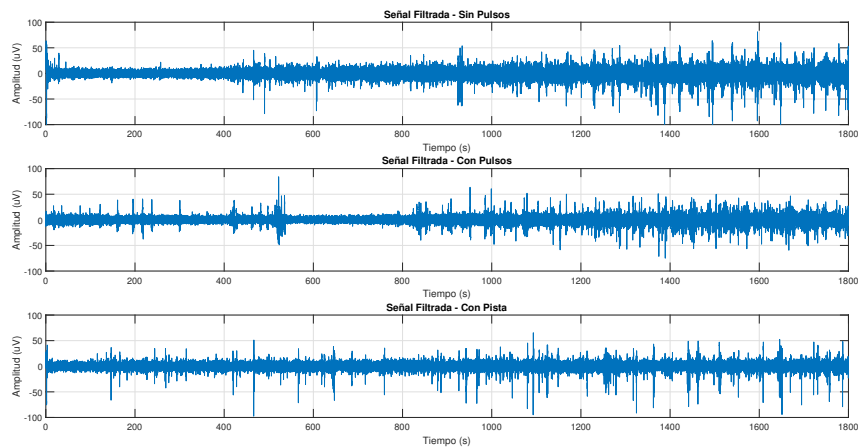
Figura 73: Flujo de Procesamiento de Señales bioelectricas para Clustering Jerárquico.



12.1. Análisis utilizando algoritmos de agrupamiento

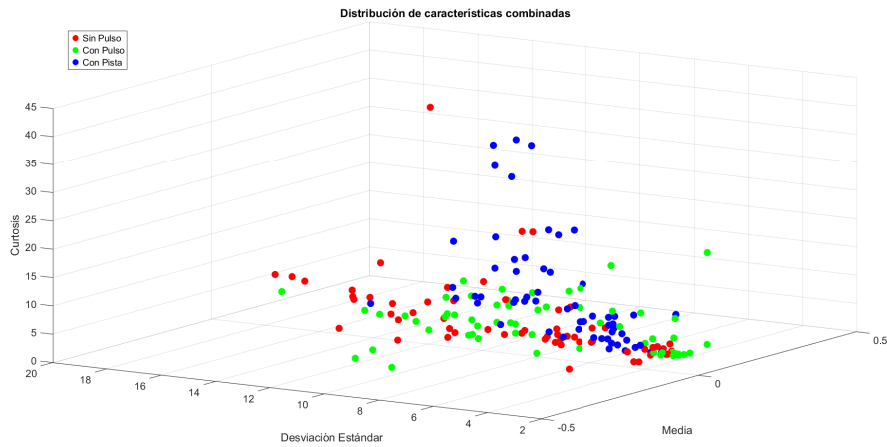
Se utilizó un algoritmo de agrupamiento realizado en MATLAB para analizar las señales fisiológicas obtenidas de los sujetos de prueba por medio del equipo BIOPAC, con el fin de identificar si existían diferencias entre los segmentos con y sin pulsos. Como se ve en la Figura 74, el algoritmo iniciaba graficando las señales que se desean comparar, después de esto se aplicó un filtro pasa banda con parámetros de 0.35 Hz y 35 Hz, con le objetivo de eliminar ruido y aislar las frecuencia de interés.

Figura 74: Señal EEG con pulsos binaurales con ruido rosa, con pista y sin pulsos primer sujeto.



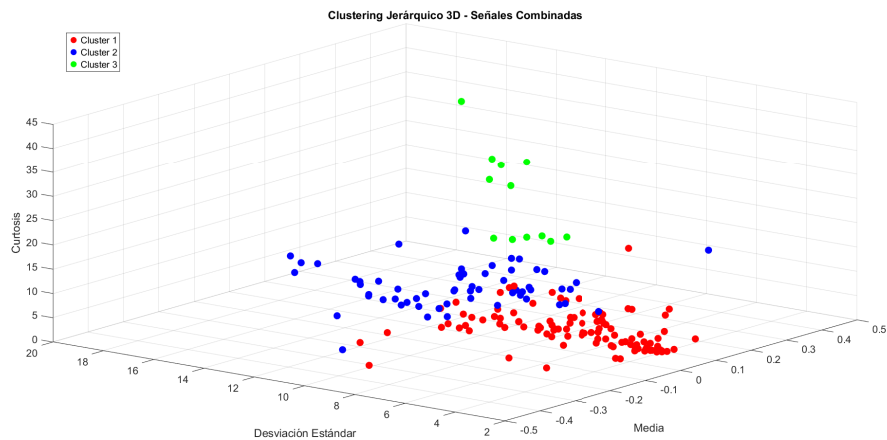
Después de realizar la configuración de las señales, estas se dividieron en épocas de 30 segundos. Cada época fue representada por un vector de características, incluyendo media, desviación estándar y curtosis. Estas características fueron seleccionadas porque permiten capturar diferentes aspectos de la señal EEG. La media refleja la actividad general de la señal en cada época, la desviación estándar mide la variabilidad o dispersión de la señal, y la curtosis ayuda a identificar la presencia de picos o valores atípicos en los datos. Luego, se graficaron estas características para observar las diferencias entre los distintos tipos de agrupación antes de aplicar el algoritmo de clustering, como se muestra en la Figura 75.

Figura 75: Gráfica de características para 3 señales EEG primer sujeto.



El algoritmo de agrupación no utilizó etiquetas predefinidas, a pesar de que se conocían las etiquetas de los datos (pulsos o sin pulsos), para permitir que el algoritmo detectara por sí mismo posibles diferencias en las señales, además las características de las señales fueron todas mezcladas en un solo vector. Como se observa en la Figura 76 el algoritmo de agrupamiento tomó todas las muestras y trató de separarlas en dos clases dependiendo la distancia que había en los datos, y las agrupó.

Figura 76: Clustering jerárquico para las 3 señales EEG primer sujeto.



Posteriormente, se empleó el índice de Rand, el cual es una métrica utilizada para evaluar la similitud entre un conjunto de etiquetas reales y los agrupamientos generados por un algoritmo de clustering. Su valor varía entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una clasificación más precisa. En este análisis, el índice de Rand permitió medir qué tan congruente fue el agrupamiento en relación con la clasificación basada en las características y considerando las etiquetas de referencia. El objetivo fue validar el procedimiento cuantitativo, ya que un valor alto confirmaría que el algoritmo realizó correctamente la agrupación.

Se realizaron dos tipos de pruebas a los participantes: EEG y EOG, por lo que el análisis se centró en estas señales. Primero, se compararon las mediciones del día de control con las obtenidas en los días 2 y 3, en los que se aplicaron pulsos binaurales mezclados con ruido rosa. Luego, se contrastaron las señales del día de control con las de los días 4 y 5, donde los pulsos binaurales se combinaron con una pista de fondo. Finalmente, se compararon las tres señales entre sí para evaluar diferencias en las respuestas cerebrales bajo cada condición.

En total, para cada una de las personas se realizaron 3 comparaciones entre las señales EEG obtenidas de las personas y 3 de EEG para la mayoría de casos, debido a que para dos personas se tuvo la limitante de no tener dos computadoras para realizar la obtención de señales EOG. En total se realizaron 30 análisis de de señales. Los resultados a continuación es el análisis de las señales EOG para la primera persona. Todas siguen el mismo procedimiento explicado anteriormente. Los resultados de los demás sujetos de prueba se presentan en el Anexo [17.4](#).

Figura 77: Comparación señal EOG con pulsos binaurales con ruido rosa, con pista y sin pulsos primer sujeto.

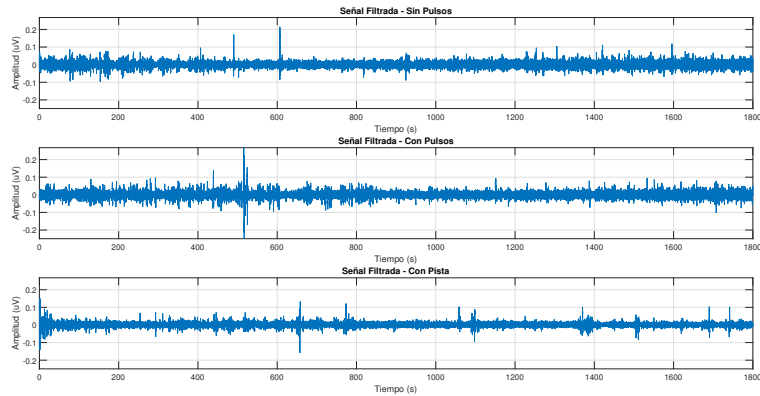


Figura 78: Características extraídas para las 3 señales EOG del primer sujeto.

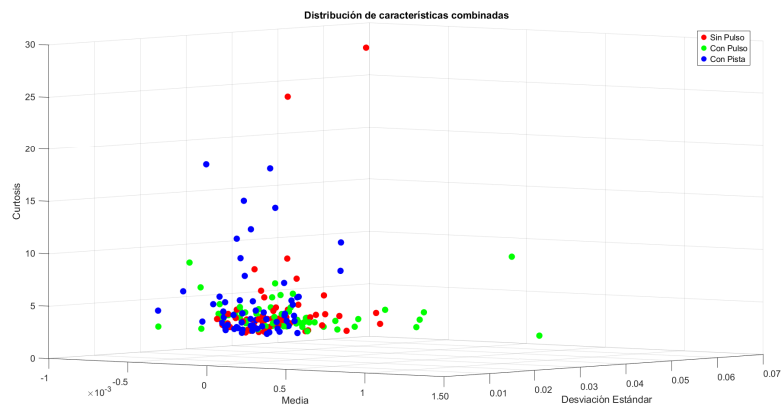
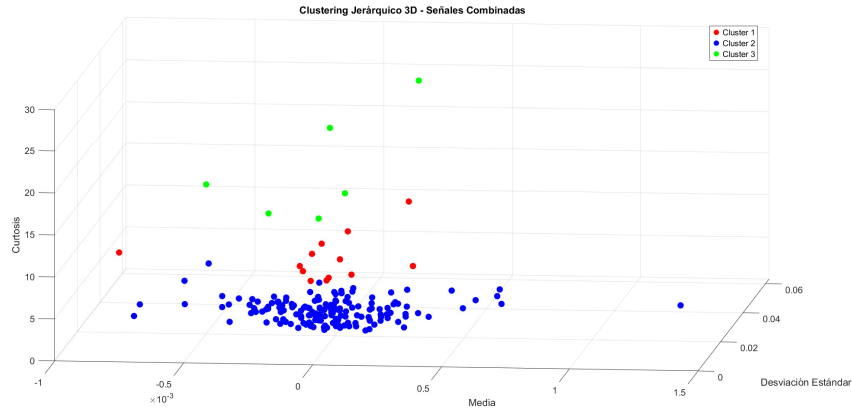


Figura 79: *Clustering realizado a las características de las 3 señales sin saber las etiquetas para el primer sujeto.*



Un IR cercano a 1 indica una alta concordancia entre las etiquetas reales y los clusters generados. Esto significa que el agrupamiento fue muy efectivo al clasificar correctamente las señales según las categorías definidas. Por otro lado, un IR cercano a 0.5 refleja una concordancia moderada, evidenciando que el agrupamiento tiene cierta capacidad de distinguir entre categorías, pero no de manera muy precisa. Finalmente, un IR cercano a 0 sugiere una baja correspondencia entre las etiquetas reales y los clusters generados, indicando que el algoritmo no logró identificar patrones consistentes.

Cuadro 4: *Valor índice de Rand para diferentes sujetos señal EEG.*

| Nombre | control y pulsos con ruido rosa | control y pulsos con pista | tres señales |
|----------|---------------------------------|----------------------------|--------------|
| Sujeto 1 | 0.4970 | 0.5427 | 0.5147 |
| Sujeto 2 | 0.5317 | 0.4980 | 0.4774 |
| Sujeto 3 | 0.4993 | 0.5556 | 0.5103 |
| Sujeto 4 | 0.7289 | 0.4961 | 0.6394 |
| Sujeto 5 | 0.4964 | 0.5765 | 0.5494 |
| Sujeto 6 | 0.6136 | 0.4993 | 0.4847 |

En el Cuadro 4, los valores del IR para las señales EEG varían entre 0.4774 y 0.7289. Los valores más altos, cercanos a 1 (por ejemplo, 0.7289), se observan en condiciones como control y pulsos con ruido rosa. Esto sugiere que esta condición tiene características más claramente distinguibles entre las categorías analizadas. Por el contrario, los valores más bajos (por ejemplo, 0.4774) corresponden a la condición tres señales, reflejando una menor diferenciación entre las categorías experimentales.

Cuadro 5: *Valor randindex para diferentes sujetos señal EOG.*

| Nombre | control y pulsos con ruido rosa | control y pulsos con pista | tres señales |
|----------|---------------------------------|----------------------------|--------------|
| Sujeto 1 | 0.4964 | 0.4993 | 0.3978 |
| Sujeto 2 | 0.4959 | 0.4959 | 0.3654 |
| Sujeto 3 | 0.4980 | 0.4959 | 0.4457 |
| Sujeto 4 | 0.5027 | 0.5048 | 0.4061 |

En el caso de las señales EOG, como se observa en el cuadro 5 los valores son en general más bajos, oscilando entre 0.3654 (mínimo, en la condición tres señales) y 0.5048 (máximo, en control y pulsos con pista). Esto indica que las señales EOG presentan menor discriminación entre las categorías experimentales, probablemente debido a características menos definidas o a la presencia de ruido en los datos.

12.2. Discusión

Los resultados del análisis cuantitativo muestran que los pulsos binaurales generan cambios en la actividad cerebral durante la inducción al sueño, aunque la magnitud del efecto varía según la condición auditiva utilizada. La aplicación de técnicas de clustering permitió segmentar y comparar las señales EEG y EOG en distintas condiciones, evidenciando diferencias en la respuesta neuronal ante los estímulos auditivos.

Los valores del Índice de Rand (IR) reflejan una mayor diferenciación en los datos cuando se utilizaron pulsos binaurales con ruido rosa ($IR = 0.7289$), lo que sugiere que esta condición genera un efecto más pronunciado en la actividad cerebral. En contraste, los valores más bajos observados en la condición de tres señales ($IR = 0.4774$) indican que los patrones neuronales presentan una mayor superposición, lo que podría deberse a una menor capacidad del estímulo para inducir cambios significativos.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos que sugieren que la combinación de pulsos binaurales con un sonido de fondo (como el ruido rosa) puede facilitar la transición al sueño al estabilizar la actividad cerebral. Sin embargo, la variabilidad observada entre condiciones sugiere que el efecto de los pulsos binaurales no es homogéneo en todos los participantes, lo que podría estar relacionado con diferencias individuales en la percepción auditiva y la susceptibilidad a los estímulos sonoros.

Una de las limitaciones del estudio es la duración del experimento, ya que las pruebas se realizaron en sesiones de 30 minutos, lo que podría no ser suficiente para evaluar completamente los efectos a largo plazo de los estímulos auditivos en la calidad del sueño. Además, aunque los algoritmos de clustering permitieron identificar diferencias entre condiciones, la segmentación de las señales podría mejorarse mediante el uso de métodos de aprendizaje profundo, como redes neuronales, para lograr una clasificación más precisa.

Discusión de resultados sobre el impacto de los pulsos binaurales como método de inducción del sueño

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que los pulsos binaurales pueden influir en la inducción al sueño, aunque su efecto varía según el tipo de sonido utilizado y la forma en que se evaluaron los datos. Las encuestas reflejaron que los participantes percibieron una reducción en el estrés y el agotamiento cuando se usaron pulsos binaurales con una pista de fondo, lo que sugiere que esta combinación facilita la relajación. Sin embargo, los días con ruido rosa tuvieron resultados más variables, lo que indica que su impacto puede depender de factores individuales.

El análisis de las señales EEG y EOG con técnicas de agrupamiento mostró diferencias en la actividad cerebral entre el día de control y los días en los que se usaron estímulos auditivos. Se observó que los pulsos binaurales con ruido rosa generaron patrones cerebrales más definidos, con un índice de Rand (IR) igual y más bajos de 0.72, lo que sugiere una respuesta neuronal diferenciada. En cambio, la condición con tres señales presentó valores más bajos (0.4774), indicando que los cambios fueron menos claros.

A pesar de estos hallazgos, el estudio tiene algunas limitaciones. La forma en que cada persona percibe los pulsos binaurales puede ser distinta debido a diferencias individuales en sensibilidad al sonido o calidad del sueño previa. Además, las sesiones de prueba fueron de solo 30 minutos, lo que puede no haber sido suficiente para evaluar completamente los efectos a largo plazo. Otro factor a considerar es que los participantes realizaron las pruebas en sus hogares, lo que significa que las condiciones del entorno no fueron completamente controladas. En cuanto al análisis de las señales, aunque el método de agrupamiento permitió identificar diferencias entre condiciones, podrían utilizarse técnicas más avanzadas, como redes neuronales, para mejorar la precisión en la clasificación de los datos.

Al comparar los resultados de las encuestas con los obtenidos a través del análisis de señales, se observan algunas diferencias. Mientras que los participantes reportaron mejoras

en la calidad del sueño con la pista de fondo, el análisis de EEG mostró efectos más marcados en la condición con ruido rosa. Esto sugiere que los pulsos binaurales pueden generar cambios en la actividad cerebral que no siempre son percibidos conscientemente.

Para mejorar la investigación en el futuro, sería recomendable extender la duración de los experimentos para evaluar los efectos de los pulsos binaurales en el sueño a largo plazo. También sería útil realizar las pruebas en un ambiente controlado para reducir la influencia de factores externos. El uso de algoritmos más avanzados, como redes neuronales, permitiría analizar con mayor precisión los cambios en la actividad cerebral. Además, aumentar el número de participantes haría que los resultados fueran más representativos y compararlos con otras técnicas de relajación, como la meditación guiada, podría ayudar a determinar si los pulsos binaurales son una herramienta efectiva en la mejora del sueño.

En conclusión, los resultados sugieren que los pulsos binaurales pueden influir en la actividad cerebral y en la percepción del sueño, especialmente cuando se combinan con otros sonidos. Sin embargo, debido a la variabilidad individual en la respuesta a estos estímulos, es necesario seguir investigando con metodologías más precisas y muestras más grandes para confirmar su efectividad.

- Utilizando la prueba estadística Wilcoxon muestra que ambos estímulos auditivos (pulsos binaurales mezclados con ruido rosa y pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo) influyen en cierto valor los niveles de estrés y agotamiento, pero la pista de fondo mostró ser más efectiva y constante en sus efectos, siendo más confiable para reducir los niveles de estrés y agotamiento.
- Los participantes reportaron sentirse más relajados y con menor nivel de estrés antes de dormir en las noches en las que utilizaron pulsos binaurales. Aunque esta percepción no siempre coincidió con los resultados obtenidos en las señales fisiológicas.
- Se implementó el protocolo de investigación con éxito, lo que permitió realizar las pruebas necesarias con seis participantes y obtener datos relevantes para el estudio.
- El análisis de las señales EEG y EOG mediante algoritmos de agrupamiento evidenció una tendencia positiva en el uso de pulsos binaurales para dormir. En particular, se observó que los pulsos binaurales con ruido rosa y con pista de fondo generaron cambios en la actividad cerebral en comparación con la noche de control. Los datos sugieren que los pulsos binaurales pueden inducir un estado de relajación medible, aunque no fueron concluyentes para determinar una inducción efectiva del sueño en todos los casos.
- las señales EEG lograron mejores agrupaciones en comparación con las etiquetas reales que las EOG, aunque en general la separación no fue la deseada.
- La condición con pista de fondo fue mejor valorada en las encuestas, mientras que la condición con ruido rosa mostró diferencias más notorias en los datos fisiológicos. Esto sugiere que la percepción del sueño y los cambios en la actividad cerebral pueden no estar completamente alineado.
- El análisis de *clustering* permitió identificar diferencias entre condiciones experimentales. El índice de Rand mostró que el agrupamiento fue más preciso en las condiciones con ruido rosa y pista de fondo, mientras que en la condición de tres señales la separación de los grupos fue menos clara.

- En cuanto al estudio de los pulsos binaurales, se reconoce que es necesario contar con una muestra más amplia para realizar un análisis más completo. Sin embargo, se observa una tendencia positiva en la influencia sobre la actividad cerebral y la percepción del sueño, especialmente cuando se combinan con otros sonidos.

Recomendaciones

- Se aconseja realizar las pruebas con una mayor cantidad de participantes, abarcando diferentes edades, géneros y patrones de sueño. Esto podría permitir identificar posibles variaciones en la efectividad de los pulsos binaurales según características individuales.
- Se sugiere la implementación de pruebas de seguimiento con los participantes, para analizar cómo la exposición continua a los pulsos binaurales influye en la inducción y calidad del sueño a largo plazo, permitiendo evaluar posibles efectos de habituación o sensibilización.
- Se recomienda explorar la influencia de distintos tipos de sonidos de fondo (sonidos de la naturaleza, frecuencias moduladas, música relajante) para determinar cuál es la combinación más efectiva en la inducción del sueño.
- Se sugiere realizar el estudio utilizando diferentes tipos de señales bioeléctricas adicionales, como el electrocardiograma (ECG) y la señal respiratoria, para ampliar los resultados y llevar a cabo un análisis integral de los patrones fisiológicos del sueño.
- Se aconseja aplicar herramientas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) u otras que permitan representar de mejor forma los datos, buscando mejorar los agrupamientos.
- se recomienda realizar comparaciones con técnicas como la meditación guiada, ejercicios de respiración o sonidos ambientales. Esto permitiría evaluar si los pulsos binaurales ofrecen ventajas adicionales o si podrían combinarse con otras estrategias para optimizar su efectividad.
- se sugiere evaluar si los pulsos binaurales pueden ser efectivos en otros momentos del día, como durante siestas cortas o en situaciones de alta demanda cognitiva para reducción del estrés. Esto permitiría determinar si su uso puede extenderse más allá y aplicarse en contextos como el manejo del estrés laboral o la mejora del rendimiento mental.

- Se sugiere explorar diferentes combinaciones de frecuencias y duración de audio para maximizar el impacto de los pulsos binaurales. Adicionalmente, sería útil evaluar su efecto en condiciones específicas, como insomnio o trastornos del sueño.
- se recomienda utilizar herramientas avanzadas como el análisis espectral para evaluar cómo varían las bandas de frecuencia (delta, theta, alfa, beta) con y sin pulsos binaurales. Esto permitiría identificar cambios más sutiles en la actividad cerebral y evaluar con mayor precisión si los estímulos afectan patrones específicos del sueño.
- Se recomienda utilizar un sistema de monitoreo con una capacidad de grabación más extensa, como otros modelos de BIOPAC (MP150 o MP160) u otros dispositivos los cuales permitan un registro de mayor duración y con más canales de medición simultánea
- Se sugiere incluir una condición de placebo con un audio sin diferencias de frecuencia en los oídos. De esta manera, se podría comparar si los cambios en el sueño y la relajación se deben a la estimulación auditiva o a la expectativa del participante sobre el efecto del sonido.

Referencias bibliográficas

- [1] P. C. Mora, J. R. Peris y K. M. Vásquez, “Neurobiología del sueño y su importancia: antología para el estudiante universitario,” *Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México*, vol. 56, n.º 4, págs. 5-15, 2013.
- [2] L. Serra, “Trabajo en turnos, privación de sueño y sus consecuencias clínicas y médico-legales,” *Revista Médica Clínica Condes*, págs. 1-19, 2013.
- [3] E. A. Díaz y S. M. Pabón, “Desarrollo de un sintetizador de ondas auditivas utilizando Matlab como método complementario para la inducción del sueño,” Trabajo de grado, Universidad el Bosque, 2022.
- [4] K. A. I. Aboalayon, M. Faezipour, W. S. Almuhammadi y S. Moslehpour, “Sleep Stage Classification Using EEG Signal Analysis: A Comprehensive Survey and New Investigation,” *Entropy*, vol. 18, pág. 272, 2016. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:5439415>.
- [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 atelatas,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2019.
- [6] 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, 2020.
- [7] O. R. López, “Análisis y Reconocimiento de Patrones de Señales Biomédicas Relacionadas a las Etapas de Sueño,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2020.
- [8] D. A. 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, 2021.
- [9] M. M. Vela, “Análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de los pulsos binaurales en el estado de ánimo, concentración y calidad del sueño en las personas,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.

- [10] O. A. Fuentes, “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,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [11] C. Á. González, “Insomnio,” Investigación, Fundación para la formación médica, 2016.
- [12] S. Diego Castaño et al., “Terapia grupal cognitivo-conductual para el insomnio: evaluación de resultados tras su introducción en un departamento de salud,” *Revista de neurología*, vol. 70, págs. 246-250, abr. de 2020. DOI: [10.33588/rn.7007.2019385](https://doi.org/10.33588/rn.7007.2019385).
- [13] G. Oviedo Lugo, P. Verhelst Forero y V. Jordan Mondragón, “Manejo no farmacológico del insomnio,” *Universitas Medica*, vol. 57, n.º 3, págs. 348-366, 2016. DOI: [10.11144/Javeriana.umed57-3.mnfi](https://doi.org/10.11144/Javeriana.umed57-3.mnfi), dirección: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.umed57-3.mnfi>.
- [14] R. W. McCarley y C. M. Sinton, “Neurobiology of sleep and wakefulness,” *Scholarpedia*, vol. 3, n.º 4, pág. 3313, 2008, revision #91567. DOI: [10.4249/scholarpedia.3313](https://doi.org/10.4249/scholarpedia.3313).
- [15] B. Valladares Macarena and Campos, C. Zapata, S. Dur y M. Ana, “Asociación entre cronotipo y obesidad en jóvenes,” es, *Nutrición hospitalaria*, vol. 33, págs. 1336-1339, dic. de 2016, ISSN: 0212-1611. dirección: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112016000600013&nrm=iso.
- [16] G. Arboledas y M. Campos, “Fisiología del sueño y sus trastornos. Ontogenia y evolución del sueño a lo largo de la etapa pediátrica. relación del sueño con la alimentación. clasificación de los problemas y trastornos del sueño,” *Pediatría Integral*, vol. 22, págs. 358-371, dic. de 2018.
- [17] D. I. V. Cadavid y P. A. F. Garrido, *Fisiología del sueño*. Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular, Fundarritmia - Fundación Cardiovascular, 2019.
- [18] L. Sörnmo y P. Laguna, “Chapter 2 - The Electroencephalogram—A Brief Background,” en *Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications*, ép. Biomedical Engineering, L. Sörnmo y P. Laguna, eds., Burlington: Academic Press, 2005, págs. 25-53, ISBN: 978-0-12-437552-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012437552-9/50002-7>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124375529500027>.
- [19] S. Suwanto, M. H. Bisri, D. C. R. Novitasari y A. H. Asyhar, “Classification of EEG Signals using Fast Fourier Transform (FFT) and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS),” *Jurnal Matematika MANTIK*, vol. 5, n.º 1, págs. 35-44, mayo de 2019. DOI: [10.15642/mantik.2019.5.1.35-44](https://doi.org/10.15642/mantik.2019.5.1.35-44). dirección: <https://journalsaintek.uinsby.ac.id/index.php/mantik/article/view/538>.
- [20] S. Siuly, Y. Li e Y. Zhang, *EEG Signal Analysis and Classification: Techniques and Applications*. ene. de 2016, ISBN: 978-3-319-47652-0. DOI: [10.1007/978-3-319-47652-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47652-7).
- [21] J. Lane, S. Kasian, J. Owens y G. Marsh, “Binaural auditory beats affect vigilance performance and mood,” *Physiology & Behavior*, vol. 63, n.º 2, págs. 249-252, 1998.
- [22] L. Chaieb, V. C. Wilpert, J.-M. Reber, J. G. Borner, M. Axmacher y J. Fell, “Auditory Beat Stimulation and Its Effects on Cognition and Mood States,” *Frontiers in Psychiatry*, vol. 6, pág. 70, 2015. DOI: [10.3389/fpsy.2015.00070](https://doi.org/10.3389/fpsy.2015.00070). dirección: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsy.2015.00070>.

- [23] J. Zhou, D. Liu, X. Li, J. Ma, J. Zhang y J. Fang, “Pink noise: Effect on complexity synchronization of brain activity and sleep consolidation,” Tesis de mtría., abr. de 2012, págs. 68-72. DOI: [10.1016/j.jtbi.2012.04.006](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.04.006).
- [24] L. Sörnmo y P. Laguna, “Chapter 1 - Introduction,” en *Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications*, ép. Biomedical Engineering, L. Sörnmo y P. Laguna, eds., Burlington: Academic Press, 2005, págs. 1-24, ISBN: 978-0-12-437552-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012437552-9/50001-5>, dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124375529500015>.
- [25] O. Documentation, *Cyton Board*, Accedido en mayo 18, 2024. dirección: <https://docs.openbci.com/Cyton/CytonLanding/>.
- [26] T. M. P. V. Laboratory, *Biomedical Signals Acquisition*, accedido en mayo, 2024, 2005. dirección: https://www.medicine.mcgill.ca/physio/vlab/biomed_signals/eeg_n.htm#:~:text=The%20recorded%20waveforms%20reflect%20the,amplitude%20and%20the%20slowest%20waves.
- [27] *Practical Lab Kit with BSL 4 & MP41 | BSL-HOME-B | Education | BIOPAC*, <https://www.biopac.com/product/bsl-home-mp41/>, jun. de 2024.
- [28] N. H. I. Center, “Su guía para un Sueño Saludable,” *NHLBI Health Information Center*, 2013.
- [29] M. Khosrow-Pour, *Machine Learning: Concepts, Methodologies, Tools and Applications*, I. R. M. Association, ed. Information Science Reference, 2012, pág. 2124, ISBN: 978-1-60960-819-4. dirección: <https://www.igi-global.com/book/machine-learning-concepts-methodologies-tools/52584>.
- [30] X. Font, *Técnicas de clustering*. Barcelona: FUOC, Universitat Oberta de Catalunya, 2019, Primera edición: marzo 2019. Coordinación por Jordi Ayza Graells.
- [31] C. de Datos, *Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon*, Consultado el 15 de noviembre de 2024, s.f. dirección: https://cienciadedatos.net/documentos/18_prueba_de_los_rangos_con_signo_de_wilcoxon.
- [32] J. E. Chacón, “A close-up comparison of the misclassification error distance and the adjusted Rand index for external clustering evaluation,” *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 2020. DOI: [10.1111/bmsp.12212](https://doi.org/10.1111/bmsp.12212).

17.1. Anexo 1: Protocolo de Investigación

A continuación se presenta el inicio del protocolo de investigación utilizado para realización del estudio hacia las personas. Este documento describe la fundamentación teórica, los antecedentes, cronograma y metodología utilizada para evaluar el impacto de los pulsos binaurales en la inducción del sueño. Para consultar el documento completo, se puede acceder al siguiente enlace: [Protocolo de investigación](#).

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Estudio de la aplicación de pulsos binaurales como método de inducción del sueño

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Brandon Isai Cruz Escobar, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

17.2. Anexo 2: Consentimiento Informado

A continuación, se presenta el documento de Consentimiento Informado utilizado en este estudio. Este consentimiento explica los detalles de la investigación, los procedimientos aplicados, las medidas de confidencialidad y los derechos de los participantes. Además, informa sobre los posibles riesgos y beneficios asociados a la participación en el estudio. Para consultar el documento de forma digital, puede acceder al siguiente enlace: [Consentimiento informado](#).



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 en la investigación. Además, tiene 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: Estudio de la aplicación de pulsos binaurales como método de inducción del sueño.

Lugar y fecha: Guatemala, agosto–septiembre de 2024

Número de participantes: 7

Encargado de la investigación: Brandon Isai Cruz Escobar, estudiante 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 al utilizar un sistema de generación de pulsos binaurales en la fase previa a dormir. Los resultados de este estudio permitirán obtener información preliminar sobre las terapias de neuroretroalimentación y comprobar si 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, y contarán con la asesoría de personal capacitado. Si usted acepta participar en este estudio, se le solicitará el uso de electrodos de superficie no invasivos, los cuales permiten detectar la actividad eléctrica del cerebro, así como registrar las señales generadas por el movimiento ocular mientras usted se encuentra en el proceso de quedarse dormido.

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 y un electrooculograma el cuál se realiza preferiblemente durante la noche.
2. Antes de la recolección de datos, se realizará una evaluación conductual sobre la percepción del sueño. También se le pedirá completar un formulario con preguntas sobre su día, para identificar cualquier factor que pudiera afectar el estudio.
3. El procedimiento consiste en la medición de la actividad eléctrica del cerebro y los movimientos oculares mediante electrodos de superficie no invasivos. Además, se colocarán audífonos inalámbricos para escuchar pulsos binaurales a un volumen moderado y ajustable según sea necesario, de manera que no cause incomodidad al participante.
4. Al finalizar, se llevará a cabo una encuesta y una evaluación posterior para analizar 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 el encargado 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 cual desaparecería en minutos.
- Dificultad para conciliar el sueño.
- Leve dolor de cabeza.
- Incomodidad.

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, incluso 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 brindadas 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

Firma del Investigador

Firma del Asesor

Contacto

Si tiene dudas puede comunicarse con:

Investigador

Brandon Isai Cruz Escobar

Teléfono: +502 5964-8051

Correo electrónico: cru20938@uvg.edu.gt

Asesor:

Luis Alberto Rivera Estrada

Departamento de ingeniería Electrónica,
Mecatrónica y biomédica

Universidad del Valle de Guatemala

Correo electrónico: larivera@uvg.edu.gt

17.3. Anexo 3: Formularios

Para poder realizar tanto el análisis cualitativo y cuantitativo se utilizaron formularios, estos formularios se aplicaron antes y después de cada prueba, en los cuales se registraron aspectos como el nivel de estrés y agotamiento antes de dormir, la percepción de la calidad del sueño y la comodidad con los estímulos sonoros. Los resultados obtenidos permitieron complementar el análisis de las señales fisiológicas, proporcionando una perspectiva subjetiva sobre los efectos de los pulsos binaurales en la inducción y calidad del sueño. A continuación están algunos de los formularios pasados a las personas:

17.3.1. Día 1 (control)

[Formulario pre- prueba día 1.](#)

[Formulario post- prueba día 1.](#)

17.3.2. Día 2 a 5

[Formulario Pre - prueba día 2 a 5.](#)

[Formulario Post - prueba día 2 a 5.](#)

17.4. Anexo 4: Análisis de señales utilizando un algoritmo de agrupación

La aplicación del algoritmo encargado de poder agrupar las características de las señales fue aplicado a todos las personas que tomaron el estudio. A continuación, se presenta los resultados del sujeto de prueba 1 y 2, el resto de resultados se pueden consultarse a través del siguiente enlace: [Resultados algoritmo de agrupación](#).

Figura 80: Comparación señal EEG filtrada del día de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.

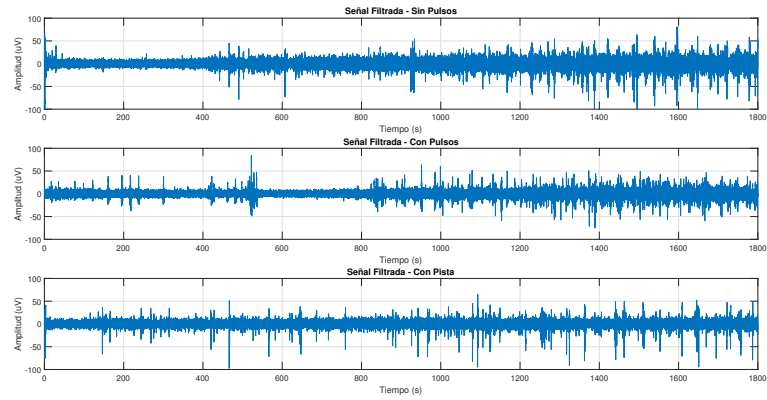


Figura 81: Gráfica de características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.

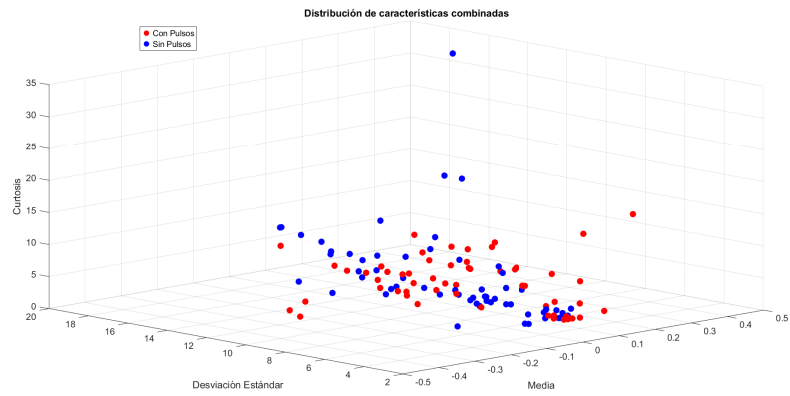


Figura 82: Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.

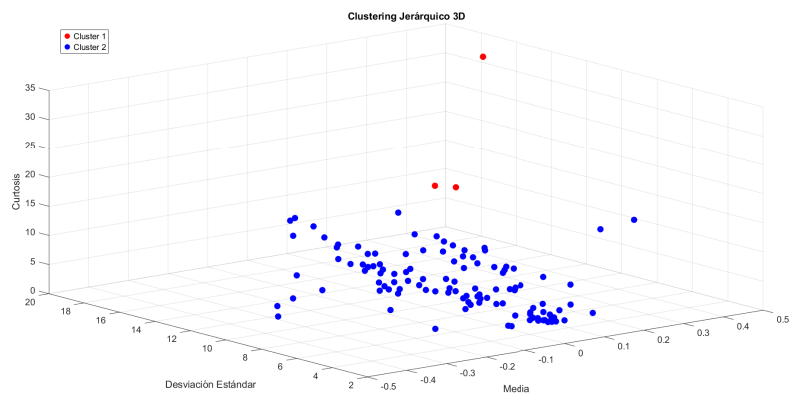


Figura 83: Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista sujeto 1.

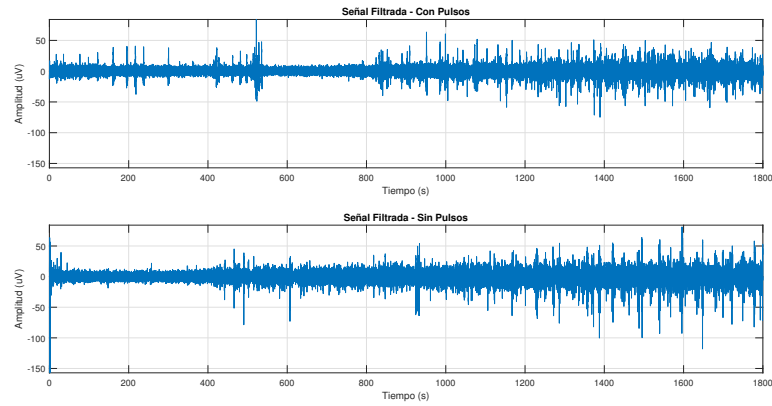


Figura 84: Gráfica de características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista sujeto 1.

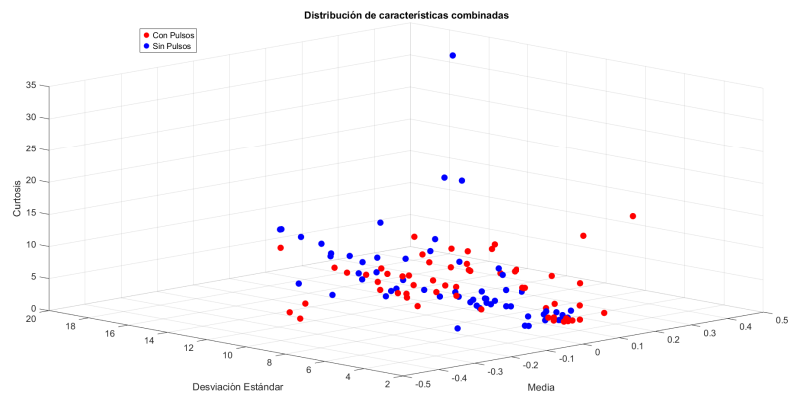


Figura 85: Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 1.

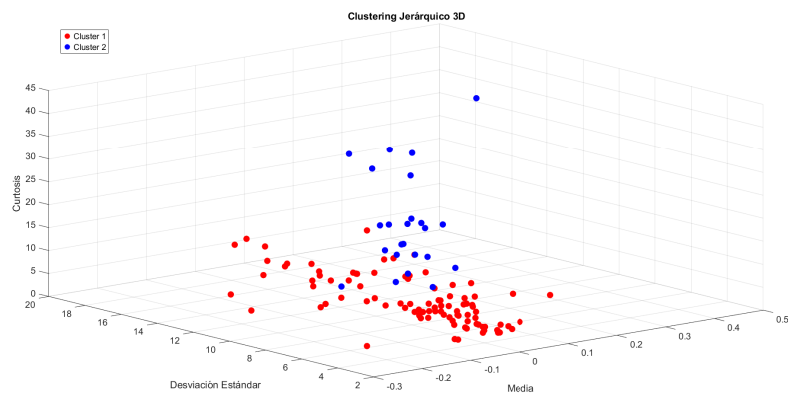


Figura 86: Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con ruido rosa sujeto 2.

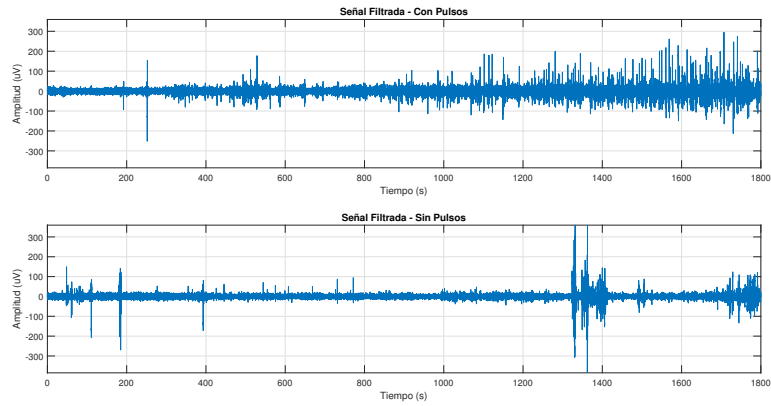


Figura 87: Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada ruido rosa sujeto 2.

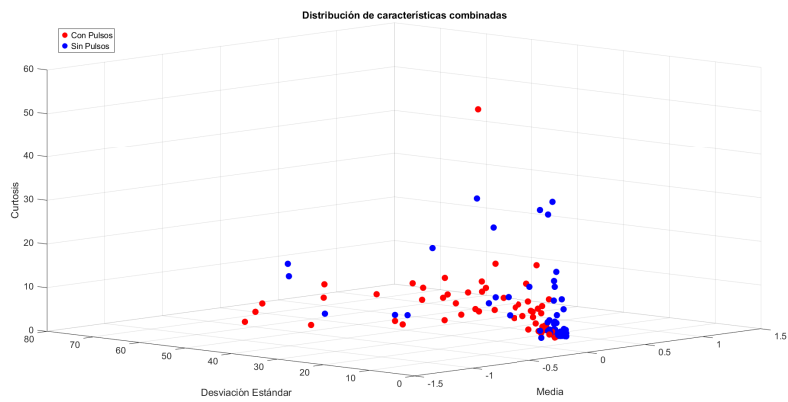


Figura 88: Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 2.

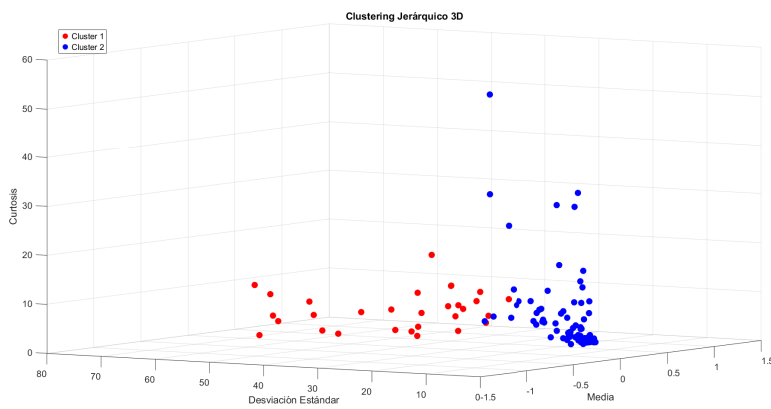


Figura 89: Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2.

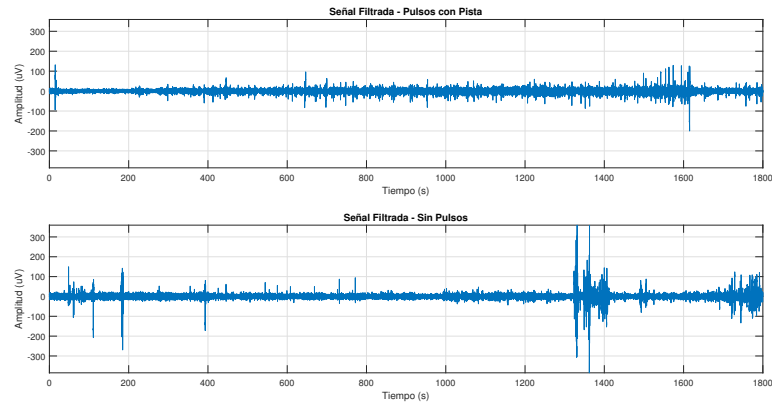


Figura 90: Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2.

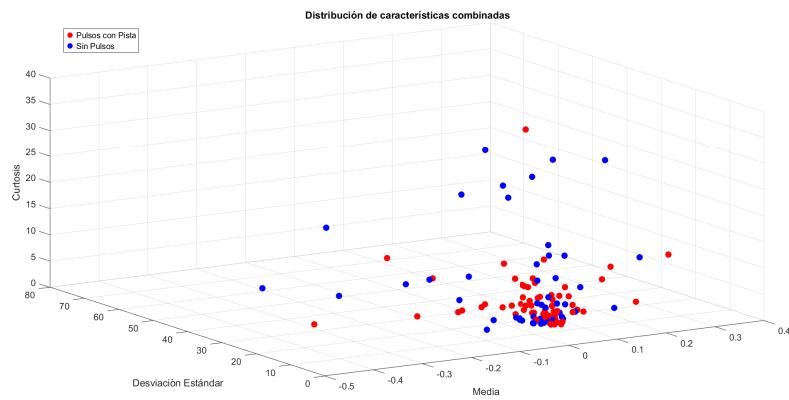


Figura 91: Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con pista de fondo sujeto 2.

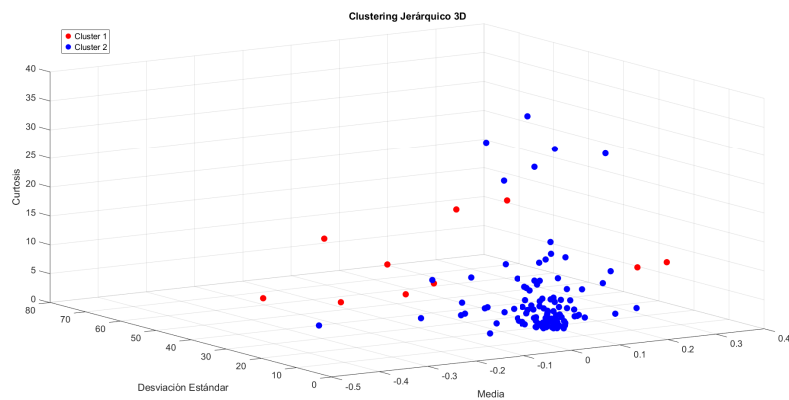


Figura 92: Comparación señal EEG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.

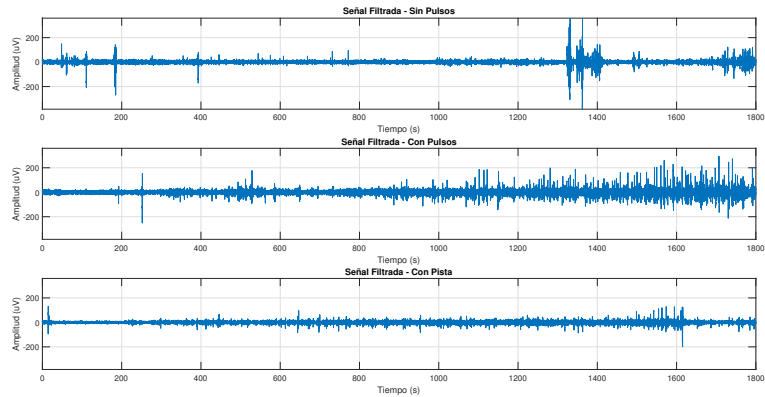


Figura 93: Características de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.

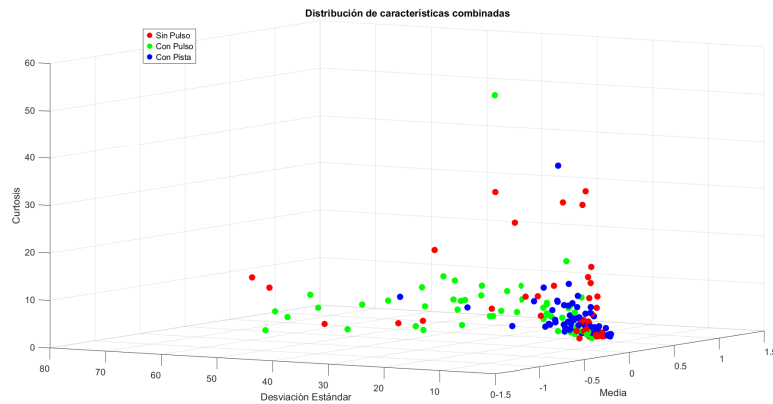


Figura 94: Clustering jerárquico de la señal EEG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo sujeto 2.

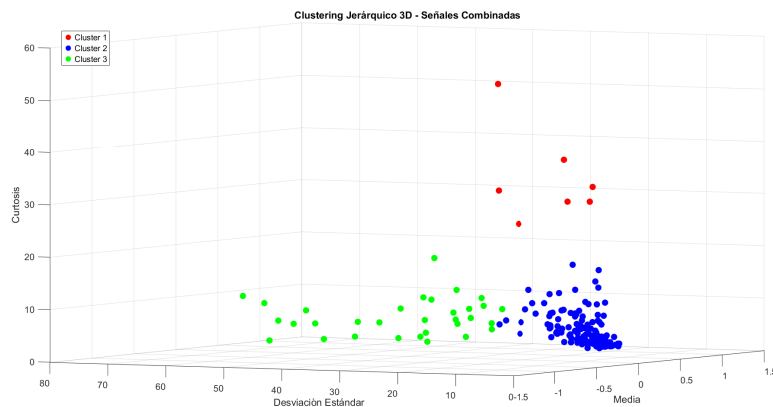


Figura 95: Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con ruido rosa sujeto 2.

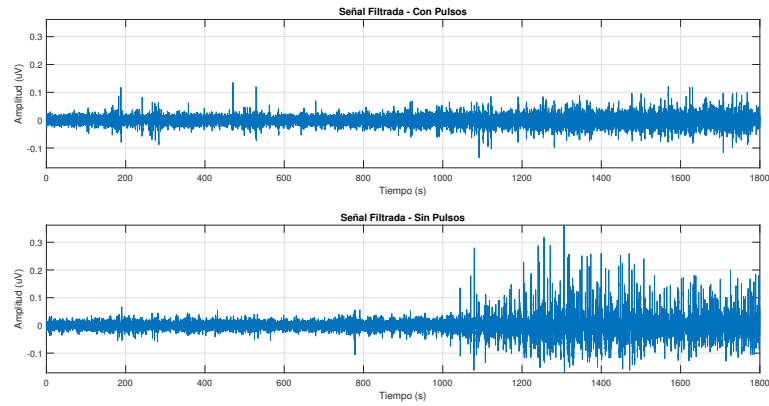


Figura 96: Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada ruido rosa sujeto 2.

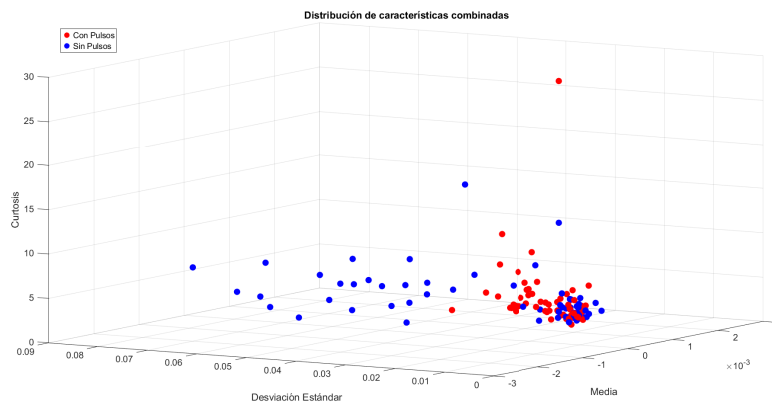


Figura 97: Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa sujeto 2.

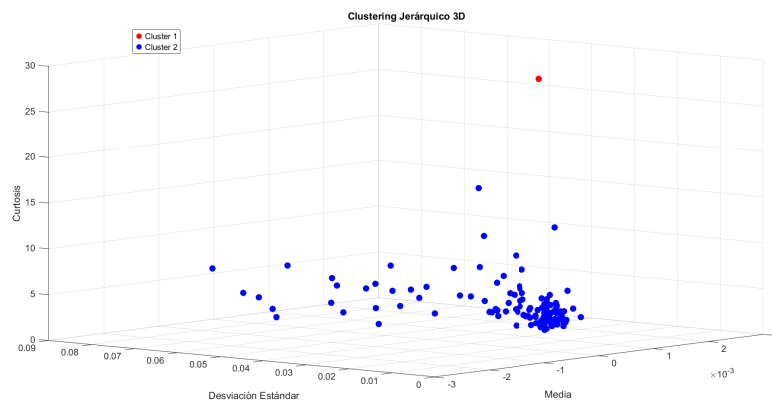


Figura 98: Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2.

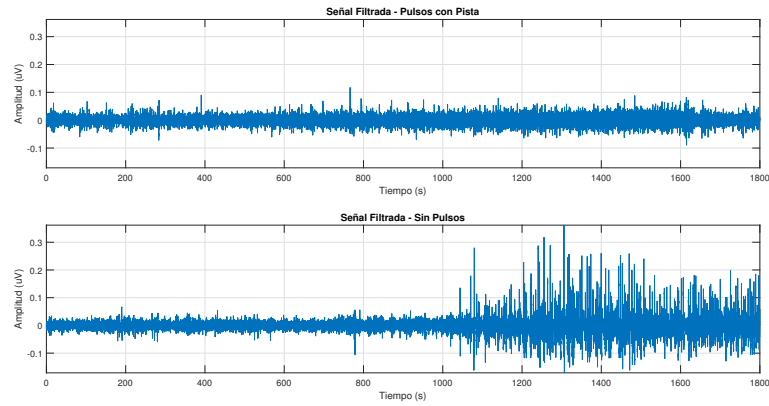


Figura 99: Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo sujeto 2.

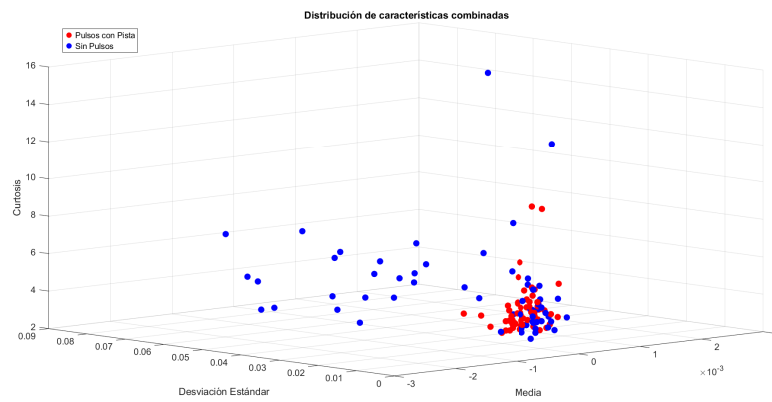


Figura 100: Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con pista de fondo sujeto 2.

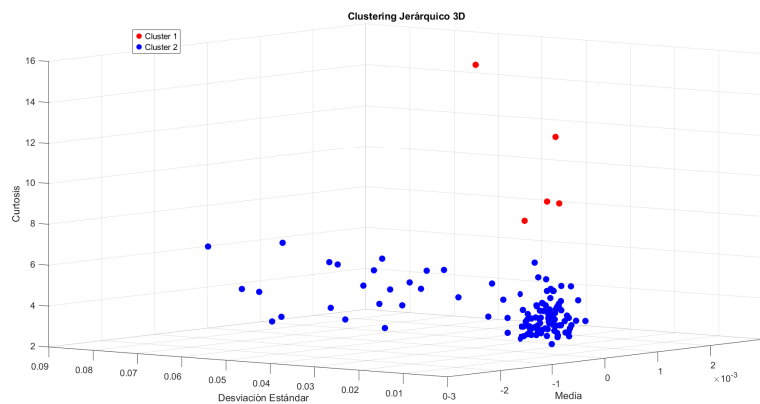


Figura 101: Comparación señal EOG filtrada del control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclado con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.

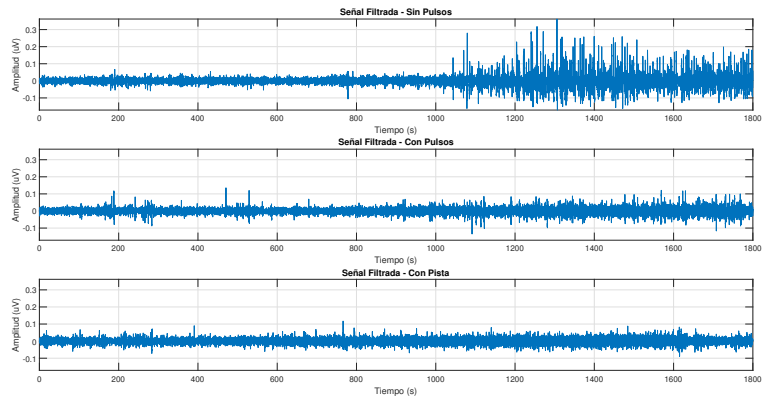


Figura 102: Características de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales mezclada con pista de fondo y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con ruido rosa sujeto 2.

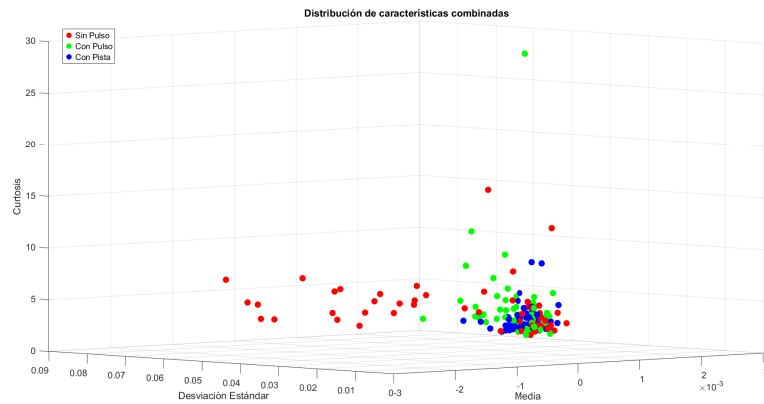


Figura 103: *Clustering jerárquico de la señal EOG de control con señal obtenida utilizando pulsos binaurales con ruido rosa y señal utilizando pulsos binaurales mezclados con una pista de fondo sujeto 2.*

