



INAOE

Comportamiento hemodinámico cortical ante estímulos visuales y vestibulares orientados a la inspección horizontal

Por

Manuel Alejandro Ramírez Cruz

Tesis para obtener el grado de

Maestría en Ciencias y Tecnologías Biomédicas

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Julio, 2024

Santa María Tonantzintla, Puebla

Asesores:

Dra. Anabel Socorro Sánchez Sánchez

Dr. Carlos Alberto Reyes García

Posgrado en Ciencias y Tecnologías Biomédicas

INAOE

©INAOE 2024

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente



Agradecimientos

Al desarrollar este trabajo, entendí que no solamente se genera conocimiento científico, sino que además representa una formación de vida donde cada contribución es determinante, y considero preciso destacar estos reconocimientos:

La formación y generación de recursos es indispensable para cumplir el propósito de estudiar un posgrado, por eso agradezco al CONAHCYT, por ser el medio que hace posible el desarrollo de estos proyectos.

Agradezco al INAOE, por ser un espacio de conocimiento y desarrollo científico y humano. La calidad de su personal ha sido indispensable en mi formación durante esta etapa. Destaco la labor extraordinaria de quienes, con sus conocimientos compartidos, me han brindado apoyo, impulso y guía; mis asesores: la Dra. Anabel Socorro Sánchez Sánchez y el Dr. Carlos Alberto Reyes García.

He comprobado que se llega más lejos con buena compañía. Agradezco, por haber formado líneas de amistad, a mis compañeros del laboratorio y del instituto. Su compañía e inspiración, ha hecho este camino mucho más amigable.

Agradezco a quien me hace complementar las categorías de vida del ser humano, que me ha hecho sentir este espacio geográfico como un nuevo hogar.

Pero el camino no podría haberse hecho sin un inicio. Por eso, el agradecimiento más profundo lo extiendo hasta mi origen: el hermoso estado de Chiapas, al mágico Comitán de Domínguez. He llegado hasta este momento gracias al permanente, infaltable y motivador apoyo de mi familia. Mis padres, mis tías, mis primas, mis sobrinos. A quienes están presentes y a quienes ahora están ausentes.

A todos quienes fueron aludidos en las líneas anteriores, que son por quienes se han podido crear las líneas posteriores: Gracias.

Dedicatoria

A mi mamá: Eva, por quien he sido, soy y seré.

A mis sobrinitos: Christian y Lupita, por quienes he sido y quiero seguir siendo.

Modelo y ejemplo. Ejemplo y modelo.

Resumen

Los sentidos más complejos del ser humano, cuyos órganos sensoriales se encuentran en la cabeza, son conocidos como sentidos especiales; entre ellos, los sistemas sensoriales visual y vestibular, adquieren información que tras integrarse en el plano cortical, es determinante para ejecutar movimientos finos y de desplazamiento. El efecto de la información procesada, puede registrarse mediante técnicas de exploración de la actividad cerebral.

Este trabajo se enfoca en identificar las áreas cerebrales con mayor actividad al ejecutar tareas de inspección espacial horizontal, a través de la espectroscopia funcional del cercano infrarrojo (fNIRS); una técnica óptica basada principalmente, en las propiedades del tejido humano y el metabolismo neuronal. Las regiones corticales de interés contemplan las principales zonas atribuidas a los sistemas visual y vestibular, y se diseñaron tareas para estimularlos específicamente.

El procesamiento de las señales se realizó, principalmente, mediante el lenguaje de programación Python, utilizando la librería MNE; después de haber comparado algunas muestras con los resultados del software (NIRSLab) del fabricante del equipo. En el análisis, se compararon las actividades conjunta y separada de ambos sistemas sensoriales.

Los resultados obtenidos muestran que a través del flujo hemodinámico, es posible diferenciar la actividad entre ambos sistemas y detectar zonas que varían en función de la actividad visual; logrando así, un acercamiento a la localización de grupos neuronales especializados en la orientación espacial. Adicionalmente, se distinguieron métodos más convenientes para evaluar las señales pertinentes, y consecuentemente, algunas de las características más relevantes para cada uno. Estos hallazgos permiten establecer nuevos modelos para posteriores análisis con mayor profundidad, lo que podría impulsar la investigación futura en este campo.

Abstract

Human sensory systems often referred to as special senses, encompass intricate mechanisms primarily located in the head. Among these, the visual and vestibular systems are crucial in facilitating movement, navigation, and interaction within one's environment. The integration of information from these systems is essential for adaptive behavior. This integration can be examined through brain activity analysis.

This study focuses on identifying cortical areas activated by stimuli related to horizontal inspection. Using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), an optical method that relies on human tissue characteristics and neural metabolism, it was designed specific tasks targeting cortical regions associated with vestibular and visual systems.

Signal processing was predominantly conducted using a custom algorithm developed in the Python programming language, using the MNE library; such approach was exemplery compared with the NIRSLab software provided by the equipment manufacturer. Data analysis involved comparing activity patterns within each sensory system and between the two groups.

The findings reveal discernible differences in activity within the visual and vestibular systems, and when exists or not visual stimuli through fNIRS data, and thus achieving an approach to the localization of specialized neuronal groups in spatial orientation. Additionally, it was posible to identify optimal methods and signal characteristics for analysis, shedding light on effective approaches for future research.

Índice general

Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Resumen	IV
Abstract	v
1. Introducción	18
1.1. Problema de investigación	19
1.2. Pregunta de investigación	20
1.3. Hipótesis	20
1.4. Objetivos	20
1.5. Contribución	21
1.6. Alcances de la tesis	21
1.7. Estructura del documento	22
2. Marco Teórico	23
2.1. Sistema Nervioso	23
2.2. Neurona	23

2.2.1.	Estructura de la neurona	24
2.2.2.	Propiedades fisiológicas	24
2.2.3.	Tipos de neuronas	24
2.2.4.	Metabolismo neuronal	25
2.3.	Corteza cerebral	26
2.3.1.	Lóbulo frontal	26
2.3.2.	Lóbulo parietal	26
2.3.3.	Lóbulo temporal	27
2.3.4.	Lóbulo occipital	27
2.3.5.	Ínsula	27
2.4.	Sistemas sensoriales	27
2.5.	Sistema visual	28
2.5.1.	Composición anatómica	28
2.5.2.	Actividad neuronal	31
2.5.3.	Métodos de evaluación	32
2.6.	Sistema vestibular	34
2.6.1.	Composición anatómica	34
2.6.2.	Actividad neuronal	36
2.7.	Integración sensorial	37
2.7.1.	Relación: visual-vestibular	38
2.8.	Espectroscopia funcional del cercano infrarrojo	39
2.8.1.	El cercano infrarrojo	39
2.8.2.	Principio de funcionamiento	41
2.8.3.	Ley de Lambert-Beer	42

2.9.	Procesamiento de señales	44
2.9.1.	Preprocesamiento	45
2.9.2.	Segmentación	46
2.9.3.	Extracción de características	46
2.9.4.	Análisis de información	47
2.9.5.	Clasificación	48
3.	Trabajos Relacionados	49
3.1.	Sistema vestibular y fNIRS	49
3.2.	Sistemas visual y vestibular	50
3.3.	Análisis de datos por fNIRS	51
3.4.	Discusión	52
4.	Método	54
4.1.	Definición de áreas de interés	55
4.2.	Preparación de las evaluaciones	56
4.2.1.	Características de la población de muestra	57
4.2.2.	Desarrollo del programa para evaluación	58
4.3.	Condiciones ambientales	60
4.3.1.	Laboratorio de bioseñales	60
4.4.	Características técnicas del equipamiento	61
4.5.	Procedimiento de las evaluaciones	62
4.5.1.	Evaluación de agudeza visual	62
4.5.2.	Evaluación de espectroscopia por el cercano infrarrojo	62
4.5.3.	Descripción de las pruebas	63

4.5.4.	Descripción de las tareas	65
4.6.	Procesamiento de información	68
4.6.1.	Herramientas	68
4.6.2.	Segmentación	69
4.6.3.	Visualización	70
4.6.4.	Preprocesamiento	72
4.6.5.	Extracción de características	73
4.6.6.	Clasificación con selección automática	74
4.6.7.	Categorías sometidas a comparación	79
5.	Resultados	85
5.1.	Resultados de los principales modelos de clasificación	85
5.1.1.	Clasificación movimientos visuales	85
5.1.2.	Atención visual binocular directa central y periférica	89
5.1.3.	Movimiento lateral de la cabeza	93
5.2.	Visualización gráfica	96
5.3.	Interpretación de resultados	98
5.3.1.	Procesamiento de datos	98
5.3.2.	Modelos de clasificación	98
5.3.3.	Comportamiento de la señal y agudeza visual	99
5.3.4.	Trabajo de divulgación	99
6.	Discusión, conclusión y trabajos futuros	100
6.1.	Discusión	100
6.2.	Conclusión	102

6.3. Trabajos futuros	103
A. Apéndice Marco Teórico	110
A.1. Sistema nervioso	110
A.1.1. Sistema Nervioso Central (SNC)	110
A.1.2. Sistema Nervioso Periférico (SNP)	112
A.2. Clasificación de los sentidos	113
A.2.1. Clasificación por tipo de estímulo	113
A.2.2. Clasificación por distribución de receptores	114
A.3. Momentos estadísticos	114
B. Apéndice Resultados	116
B.1. Resultados de clasificación desarrollados	116
B.1.1. Clasificación movimientos visuales	116
B.1.2. Clasificación actividad ojo izquierdo y ojo derecho	123
B.1.3. Atención visual binocular directa en espacios central y periférico	129
B.1.4. Atención binocular indirecta en espacios central y periférico .	135
B.1.5. Movimiento lateral de la cabeza	141
C. Apéndice Trabajo Adicional	148
C.1. Artículo de divulgación	148
C.1.1. El sistema vestibular, los sentidos y la ubicación espacial . . .	148

Índice de figuras

2.1. Recorrido de impulsos nerviosos en el sistema visual humano [Torrades and Pérez-Sust, 2008].	2
2.2. Aparato vestibular [Commission, 2016]	35
2.3. Espectro electromagnético (frecuencia y longitud de onda). Fuente: [Young and Freedman, 2009].	40
4.1. Desarrollo del método ejecutado	54
4.2. Montaje 1. Enfoque en lóbulos occipital y temporales	55
4.3. Montaje 2. Enfoque en lóbulos occipital y parietales	56
4.4. Datos para cálculo de ruta de optotipo: al campo central de la visión y ajuste al tamaño del monitor	58
4.5. Interfaz de parámetros de la evaluación	59
4.6. Test de contraste LCD de <i>lagom.nl</i>	60
4.7. Etapa I. Parche en ojo derecho, ojo izquierdo habilitado.	63
4.8. Etapa II. Parche en ojo izquierdo, ojo derecho habilitado.	64
4.9. Etapa II. Vista binocular (movimiento de persecución).	64
4.10. Etapa IV. Vista binocular (mov. fijación) y movimientos de cabeza con ojos cerrados.	65
4.11. Interfaz NIRStar 15.2	68
4.12. Visualización de marcadores (<i>annotations</i>). Arriba, nirsLAB. Abajo, por Python.	69

4.13. Ejemplo de una nueva señal, creada a partir de la información de interés (<i>Arriba, en promedio, por nirsLAB. Abajo, multicanal, por Python.</i>	70
4.14. Comparación visualización promedio de señal por canal: <i>a) Interfaz nirsLAB, b) Representación en Python</i>	71
4.15. Diferentes tipos de visualización por Python-MNE.	71
4.16. Señal en valores crudo (izq) y de hemoglobina (der)	72
4.17. Matriz de correlación usada en uno de los casos de estudio.	74
4.18. Matriz de correlación con todas las características estadísticas	75
4.19. Matriz de correlación con mejores características valoradas	75
4.20. Región somatosensorial	77
4.21. Región visual	78
4.22. Canales con diferencia significativa (por Wilcoxon), movimientos de visión.	79
4.23. Área de enfoque (movimientos de visión).	80
4.24. Canales significativamente diferentes (por Wilcoxon), entre ojos izquierdo y derecho.	81
4.25. Área de enfoque (comparación de ojos)	81
4.26. Canales significativamente distintos (por Wilcoxon), atención visual persecutoria binocular.	82
4.27. Área cortical con mayor diferencia en rango de acción de la atención visual persecutoria	82
4.28. Canales significativamente distintos (por Wilcoxon), atención indirecta binocular.	83
4.29. Área con mayor diferencia en vista central y periférica.	83
4.30. Canales significativamente distintos (por Wilcoxon), movimiento horizontal de cabeza.	84

4.31. Área con mayor diferencia en movimientos de cabeza, con y sin estímulo visual	84
5.1. Actividad en primeros segundos, ojo izquierdo. Etapa I, Tarea I. (izq, AV = 0.5; der, AV = 1)	97
5.2. Actividad en primeros segundos, ojo derecho. Etapa II, Tarea I. (izq, AV = 1; der, AV = 1)	97
A.1. Anatomía del Sistema Nervioso Central (SNC): Encéfalo y médula espinal	112
C.1. Figura 1. Canales semicirculares. Elaboración propia.	150
C.2. Figura 2. Órganos otolíticos. Elaboración propia.	150

Índice de tablas

3.1. Métodos de clasificación y precisión obtenida, por [Khan et al., 2021]	52
4.1. Características generales de la muestra	57
4.2. Condiciones ambientales en sala de experimentación	60
4.5. Características de monitor	61
4.3. Detalles equipo de espectroscopia (fNIRS)	62
4.4. Características gorro	62
5.1. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 56 canales.	86
5.2. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbO).	86
5.3. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbR).	86
5.4. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial.	87
5.5. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial (HbO).	87
5.6. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial (HbR).	87

5.7. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual.	87
5.8. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual (HbO).	88
5.9. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual (HbR).	88
5.10. Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión.	88
5.11. Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión (HbO).	89
5.12. Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión (HbR).	89
5.13. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 56 canales.	89
5.14. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales (HbO).	90
5.15. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales (HbR).	90
5.16. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área somatosensorial.	90
5.17. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbO).	90
5.18. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbR).	91
5.19. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual.	91
5.20. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbO).	91

5.21. Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbR).	91
5.22. Familias de algoritmos con mejores resultados, atención visual persecutoria binocular.	92
5.23. Familias de algoritmos con mejores resultados, atención visual persecutoria binocular (HbO).	92
5.24. Familias de algoritmos con mejores resultados, canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular (HbR).	92
5.25. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 56 canales.	93
5.26. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales (HbO).	93
5.27. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales (HbR).	93
5.28. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial.	94
5.29. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial (HbO).	94
5.30. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial (HbR).	94
5.31. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual.	94
5.32. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual (HbO).	95
5.33. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual (HbR).	95
5.34. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos.	95

5.35. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos (HbO).	95
5.36. Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos (HbR).	96
B.1. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 56 canales.	117
B.2. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbO).	117
B.3. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbR).	118
B.4. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial.	119
B.5. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial HbO.	119
B.6. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial HbR.	120
B.7. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual.	120
B.8. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual HbO.	121
B.9. Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual HbR.	121
B.10. Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión.	122
B.11. Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión, HbO.	122
B.12. Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión, HbR.	123

B.13.Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 56 canales.	123
B.14.Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 28 canales HbO.	124
B.15.Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 28 canales HbR.	124
B.16.Mejores resultados de clasificación, actividad de ojo izquierdo y derecho, área somatosensorial.	125
B.17.Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área somatosensorial HbO.	125
B.18.Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área somatosensorial HbR.	126
B.19.Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, área visual.	126
B.20.Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área visual HbO.	127
B.21.Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área visual HbR.	127
B.22.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho.	128
B.23.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho, HbO.	128
B.24.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho, HbR.	129
B.25.Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 56 canales.	129
B.26.Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales HbO.	130

B.27. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales HbR.	130
B.28. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área somatosensorial.	131
B.29. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbO).	131
B.30. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbR).	132
B.31. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual.	132
B.32. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbO).	133
B.33. Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbR).	133
B.34. Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular.	134
B.35. Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular, HbO.	134
B.36. Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular, HbR.	135
B.37. Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 56 canales.	135
B.38. Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 28 canales HbO.	136
B.39. Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 28 canales HbR.	136
B.40. Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial.	137

B.41.Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial HbO.	137
B.42.Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial HbR.	138
B.43.Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual.	138
B.44.Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual HbO.	139
B.45.Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual HbR.	139
B.46.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica).	140
B.47.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica), HbO.	140
B.48.Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica), HbR.	141
B.49.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 56 canales.	141
B.50.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales HbO.	142
B.51.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales HbR.	142
B.52.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial.	143
B.53.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial HbO.	143
B.54.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial HbR.	144

B.55.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual.	144
B.56.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual HbO.	145
B.57.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual HbR.	145
B.58.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos.	146
B.59.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos HbO.	146
B.60.Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos HbR.	147

Capítulo 1

Introducción

La mayoría de las acciones que un individuo realiza, ocurren después de haber procesado buena parte de la información obtenida desde los sistemas sensoriales con los que cuenta (por ejemplo: los sistemas auditivo, visual o táctil). Cada sistema se compone de receptores sensoriales propios, normalmente localizados en los distintos órganos; y éstos, a través del sistema nervioso, logran transmitir la información al área cerebral, donde podrá ser procesada e integrada para crear nuevas conexiones hacia distintas partes del organismo a manera de reacción o respuesta. Las vías por donde esta información es transmitida se conocen como tractos nerviosos o tractos neurales, y constituyen una red de comunicación neuronal que hace posible la conducción de la información por todo el organismo; tanto para transmitirla desde los órganos receptivos hacia el cerebro; como para dar paso a alguna instrucción motora planeada en el mismo órgano. De acuerdo con la acción a ejecutar, se activa un tracto específico que sería similar a un canal de comunicación entre las diferentes partes anatómicas involucradas.

La visión es un sistema sensorial destacado; gracias a este sentido es posible transformar la información del ambiente en datos neurales para la interpretación del medio; y su importancia se reafirma al estar directamente conectado con el cerebro, a través de la vía óptica. Normalmente, para guiar la mayoría de sus procesos, un individuo requiere la información que este sistema proporciona después de ser relacionada en las distintas zonas cerebrales, de acuerdo con la actividad a realizar. Por ejemplo, cuando la visión asiste al movimiento, es posible percibir actividad importante en las zonas relacionadas con los sistemas motor y vestibular.

En cuanto al movimiento, el proceso cognitivo que permite que sea realizado se conoce como praxis, y se considera que consta de tres partes principales: ideación, planeación y ejecución. Debido a que la ideación (la primer etapa en la praxis) ocurre en el cerebro; para comprender de mejor manera la evolución de un movimiento específico, se han desarrollado varias técnicas de exploración cerebral que consideran diferentes propiedades de las células nerviosas, y permiten reconocer la actividad cortical mientras se ejecuta cada etapa del proceso cognitivo.

La espectroscopia funcional del cercano infrarrojo (fNIRS), es una de las técnicas de recreación de imagen cerebral más recientes. Las funciones de su uso son múltiples; desde mantener un monitoreo de la función cerebral, hasta el estudio de la fisiología del cerebro en condiciones normales o de algún padecimiento. El principio de funcionamiento de fNIRS, se enfoca en el metabolismo neuronal que ocurre cuando se ejecuta una acción; es decir, cuando las neuronas de áreas corticales específicas sufren un cambio en los niveles de hemoglobina oxigenada (HbO) y desoxigenada (HbR). Esta característica hace posible la identificación de las zonas de la corteza cerebral con mayor actividad al realizar tareas específicas como ver o mover un objeto, tocar o sentir superficies; o cuando un sistema sensorial es propiamente estimulado.

1.1. Problema de investigación

Se ha asumido que la percepción del entorno y la conciencia de movimiento están estrechamente relacionadas durante las tareas de navegación espacial. Sin embargo, no hay suficiente claridad sobre el grado de influencia cognitiva presentado por estímulos visuales y vestibulares. Para abordar esta incertidumbre, es esencial investigar cómo la presencia o ausencia de estímulos visuales modula la actividad hemodinámica cortical y afecta los patrones de procesamiento espacial durante la navegación en alguna dimensión específica.

El objetivo de esta investigación es explorar cómo varía la actividad hemodinámica cortical cuando se presentan o se omiten estímulos visuales y vestibulares durante la navegación en el plano horizontal. A través de la identificación de las zonas corticales asociadas, se abonaría a una mejor comprensión sobre los mecanismos neurales y el procesamiento cognitivo involucrados en la navegación espacial.

1.2. Pregunta de investigación

- ¿Cuáles son las zonas corticales específicas con variaciones en la actividad hemodinámica en respuesta a la presencia o ausencia de estímulos visuales y vestibulares, durante la navegación espacial?

1.3. Hipótesis

La técnica de fNIRS, permitirá distinguir patrones hemodinámicos en áreas asociadas a los sistemas visual y vestibular, revelando la interacción entre ellos, en respuesta a estímulos durante la exploración espacial en el plano horizontal.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Identificar y distinguir el comportamiento hemodinámico de las zonas corticales atribuidas a los sistemas visual y vestibular, durante la exploración espacial unidimensional sobre el plano horizontal, de manera integrada y aislada, para diferenciar la aportación individual de cada sistema.

Objetivos específicos

- Conocer el comportamiento general de los sistemas visual y vestibular.
- Estimar las áreas cerebrales mayormente activadas en acciones visuales y vestibulares.
- Desarrollar las evaluaciones para la adquisición de datos y señales de interés.
- Definir métodos de procesamiento de las señales obtenidas.
- Desarrollar algoritmos que permitan el análisis de la señal de fNIRS.
- Reconocer el comportamiento relacionado entre los grupos de datos, mediante un algoritmo de clasificación a través de los valores alcanzados.

1.5. Contribución

Este trabajo ha sido elaborado con el objetivo de abonar a la comprensión de las aportaciones cognitivas presentes en la percepción espacial, basado en el flujo hemodinámico de las principales zonas atribuidas a reacciones visuales y vestibulares; para brindar un acercamiento a la exploración de grupos neuronales involucrados en la orientación espacial humana.

Durante su desarrollo, se ha generado una base conveniente para la creación de un software personalizado, enfocado en el procesamiento de señales obtenidas a través de la espectroscopia funcional del cercano infrarrojo (fNIRS). Los resultados pueden considerarse como un adecuado prelude de líneas de estudio relacionadas con las neuronas de direccionamiento en el ser humano, la atención o la orientación espacial, así como con la técnica empleada. A su vez, el producto de este trabajo se convierte en un marco de referencia útil para estudios relacionados en cuanto a métodos y características utilizados.

1.6. Alcances de la tesis

Esta investigación tiene como objetivo hallar métodos de diferenciación para distinguir la actividad correspondiente a los sistemas visual y vestibular mientras se hace una inspección en el plano horizontal.

El estudio está limitado a una población específica de estudiantes de posgrado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) activos en el momento del desarrollo, lo que podría afectar la generalización de los resultados.

El análisis se ha realizado a partir del comportamiento hemodinámico en áreas corticales relacionadas a ambos sistemas (visual y vestibular), obtenido a través de la espectroscopia funcional del cercano infrarrojo; teniendo la consideración de que las mediciones están restringidas a las capacidades y limitaciones técnicas de la tecnología fNIRS empleada.

Las variables principales del estudio incluyen la actividad hemodinámica y los métodos de diferenciación.

Esta investigación contribuirá al campo de la neurociencia al proporcionar nuevos métodos para diferenciar la actividad de los sistemas visual y vestibular. Además, se espera que los resultados obtenidos sirvan de base para futuros estudios y desarrollos en el tratamiento de señales de fNIRS, con posibles aplicaciones en el diagnóstico y tratamiento de desórdenes relacionados con la integración sensorial.

1.7. Estructura del documento

El trabajo que se presenta a continuación, consta de siete capítulos que se desarrollan de la siguiente manera: *Marco teórico*, donde se exponen conceptos útiles para la comprensión de los temas a los que la investigación se dirige; *trabajos relacionados*, que contiene la reseña de investigaciones que guardan cierto grado de relación en cuanto los conceptos, métodos o técnicas que fueron utilizados en este mismo trabajo; la *metodología*, explica la manera en que se desarrolló este trabajo, considerando todos los factores técnicos, científicos y teóricos; *los resultados*, son expuestos en el capítulo cinco, describiendo todas las configuraciones, métodos y enfoques que se abarcaron; el penúltimo capítulo se ha destinado a la *discusión, conclusión* y planteamientos de *trabajos prospectivos*; y finalmente se ha asignado el último capítulo como el espacio que contiene información adicional para una explicación más extensa sobre conceptos relacionados a la comprensión de los temas de investigación.

Capítulo 2

Marco Teórico

Para el desarrollo de este trabajo ha sido necesaria la ampliación del conocimiento en temas relacionados. A continuación se reseñan los temas que aportan al sustento de esta investigación:

2.1. Sistema Nervioso

El sistema nervioso, a través del óptimo funcionamiento de todos sus componentes, atribuye a un organismo la capacidad de ser consciente y de realizar acciones o movimientos; y, al igual que el sistema endocrino, hace posible que el sujeto mantenga una coordinación interna.

Anatómicamente, se ha dividido en dos estructuras: sistema nervioso central y sistema nervioso periférico A.1.

2.2. Neurona

La neurona se considera el elemento fundamental del sistema nervioso; es la principal célula presente en todos los órganos que lo componen, como el cerebro, los nervios y la médula. Comunica y transmite mensajes mediante reacciones químicas y eléctricas, a través de todo el organismo. Tienen la capacidad de procesar, almacenar y recordar información, lo que se conoce como integración neural.

2.2.1. Estructura de la neurona

De manera general, se puede considerar que una neurona está compuesta por tres principales partes [Gerstner et al., 2014]:

- **Dendrita.** Es un conjunto de ramificaciones que constituyen la región de la neurona por dónde llega la información.
- **Soma.** Se considera como el cuerpo de una neurona; contiene el núcleo, que es esencial para la integración de las señales.
- **Axón.** Es la ramificación por dónde la señal de salida de cada neurona, es enviada a las neuronas destino.

2.2.2. Propiedades fisiológicas

El cumplimiento de las tareas de comunicación de esta célula estructural, ocurre principalmente gracias a tres propiedades fisiológicas:

- **Excitabilidad.** También es conocido como irritabilidad y se refiere a la capacidad de respuesta ante cambios por fuentes físicas o químicas.
- **Conductividad.** Es la propiedad que permite a las neuronas ser el agente comunicador, mediante los impulsos eléctricos que se transmiten de una célula a otra.
- **Secreción.** Hace posible transmitir el impulso desde una célula a otra, al finalizar la fibra nerviosa; al segregar un neurotransmisor, en el proceso conocido como sinapsis.

2.2.3. Tipos de neuronas

De acuerdo con la función que desempeñan, perteneciendo a las propias funciones del sistema nervioso, las neuronas pueden clasificarse en tres tipos:

- **Sensoriales.** Son de formación aferente; es decir, son las neuronas receptoras de estímulos externos. Se encuentran en los órganos, y le dan función a los sentidos. Permiten que la información sea transmitida al sistema nervioso central.
- **Interneuronas.** Funcionan como neuronas vinculantes entre neuronas sensoriales y neuronas motoras, por eso también se conocen como neuronas de asociación. Se encuentran únicamente en el sistema nervioso central y tienen la capacidad de analizar y almacenar información obtenida de las otras neuronas.
- **Motoneuronas.** Conducen las señales fuera del sistema nervioso central, de ellas parten los impulsos motores y hacen llegar la información neuronal a las células musculares y glandulares. También son conocidas como neuronas eferentes.

2.2.4. Metabolismo neuronal

La actividad neuronal y el metabolismo energético están estrechamente relacionadas [Lowry, 1975].

La energía neuronal se obtiene a partir de dos distintos procesos: glicolítico y oxidativo, sin embargo, con excepción de la glía, para la mayoría de las células del sistema nervioso, la energía necesaria depende principalmente del metabolismo oxidativo [Wong-Riley, 2010]; es por eso que ante un evento de falta de oxígeno, las primeras células en extinguirse son las mismas neuronas [Winkler et al., 2000].

Un factor muy importante para el metabolismo energético de las neuronas, además del consumo de glucosa y el metabolismo oxidativo, es el flujo sanguíneo; debido a que la fuente de donde se obtienen los elementos necesarios para el metabolismo neuronal es la sangre, que lleva consigo oxígeno y glucosa. La neurona no tiene un consumo homogéneo, la parte con mayor demanda de energía en el sistema nervioso es la dendrita, que es el compartimento neuronal donde se recibe la mayor parte de la despolarización [Wong-Riley, 2010]. Debido a eso, la energía es generada solamente en el momento y en el lugar en que es requerida.

2.3. Corteza cerebral

Además de las funciones que cumple el sistema nervioso, para el ser humano como especie cognoscitiva, existe otra estructura indispensable para llevar a cabo los procesos de orden superior: la corteza cerebral.

La corteza cerebral es la porción más externa del cerebro, está cubriendo al encéfalo, justo debajo de las meninges. Es el resultado de una compleja asociación de neuronas, y en ella se produce el nivel más alto de atención y análisis de información en el ser humano. Es conocida como la materia gris, el principal tejido de procesamiento de información del cerebro.

En la composición anatómica del cerebro, es posible distinguir pliegues de tejido cerebral conocidos como 'giros', delimitados por una especie de hendidura llamada 'surco'. Los surcos están presentes en toda la superficie, mas existen algunos que destacan al ser más profundos, permitiendo entonces, la agrupación de conjuntos de neuronas que además de actuar en las mismas funciones, forman las regiones conocidas como lóbulos. En este contexto, se han designado cinco tipos de lóbulos cerebrales, que a su vez pueden estar subdivididos en otras áreas. Los más conocidos que son los más visibles, toman su nombre con base en los huesos craneales que los cubren [Saladin, 2018]:

2.3.1. Lóbulo frontal

Es el más prominente de todos y está asociado principalmente con tareas motoras, específicamente con los movimientos voluntarios y con las expresiones faciales. Como puede intuirse desde su denominación, se localiza en el frente del cerebro. Su buen funcionamiento, también está relacionado con la capacidad de análisis para un individuo.

2.3.2. Lóbulo parietal

Está en la parte superior del encéfalo. Se considera el lugar en donde se interpretan y reciben las señales de los sentidos conocidos como generales y las provenientes del sentido del gusto. Además interviene en situaciones del procesamiento visual.

2.3.3. Lóbulo temporal

Los lóbulos temporales se encuentran a los laterales, debajo de los lóbulos parietales. Las neuronas de esta área están relacionadas con la actividad auditiva, el olfato, memoria y aprendizaje, además de algunos procesos emocionales y visuales. Especialmente son los lóbulos de percepción consciente del sonido, indispensables para la audición binaural [Saladin, 2018].

2.3.4. Lóbulo occipital

Está ubicado en la parte posterior. Es el área cerebral especializada en el procesamiento visual, que permite la asociación de las distintas características necesarias para un análisis del espacio, como distancia, forma, color.

Recibe información directamente de la retina a través de la vía óptica. [Saladin, 2018]

2.3.5. Ínsula

La ínsula es el lóbulo menos conocido. Puede describirse como un lóbulo interno, que es visible únicamente al retraer una parte del cerebro supra-yacente [Saladin, 2018].

Aunque actualmente no se ha explorado como los demás, se considera que es un área en donde se integra la información sensitiva visceral.

2.4. Sistemas sensoriales

Tener conocimiento y conciencia sobre las condiciones ambientales es indispensable para la sobrevivencia de un individuo, la integridad de su personalidad e incluso su desarrollo intelectual [Saladin, 2018]. En el ser humano, es posible gracias a receptores sensoriales especializados en captar estímulos físicos o químicos, que son convertidos en señales nerviosas (eléctricas), para posteriormente poder ser interpretadas.

Los procesos cognitivos que ocurren en el organismo tienen lugar en el cerebro, que es la estructura connatural de procesamiento de información.

Muchos de ellos, principalmente los que ocurren en los lóbulos temporales, parietales y occipital, consideran las referencias de los sistemas sensoriales que obtienen información exterior al organismo, a través de los receptores propios de cada sentido. Sin embargo, la información también puede ser directamente procesada desde los receptores sensoriales con el objetivo de prevenir estímulos continuos hacia el sistema nervioso. En ocasiones, este proceso ocurre en momentos de exposición prolongada hacia un estímulo, convirtiéndolo en uno insensible; o, cuando se ha registrado desde eventos anteriores, y ha sido categorizado en la memoria [Kriesel, 2007].

Este trabajo se enfoca en dos de estos sistemas: visual y vestibular.

2.5. Sistema visual

El sistema visual es un sentido exteroceptor y por la distribución de sus receptores, es un sentido especial A.2. Es uno de los principales sistemas para los mamíferos, y principalmente para el ser humano; por ejemplo, el olfato en los humanos es el más deficiente entre los mamíferos, ya que el desarrollo olfativo en los primates fue declinando gradualmente, mientras el sistema visual se especializaba [Saladin, 2018]. Por esto, es considerado como el aparato sensorial en el se deposita la mayor confianza para navegar y explorar de manera segura en el ambiente. Gracias a las funciones e información obtenida y transmitida por sus componentes, es posible conocer formas, color o localización de objetos y sujetos circundantes, aún en distancias lejanas.

Por sus actividades tan complejas, este sistema y en especial la retina, genera la mayor demanda de consumo energético neuronal, y es de los más vulnerables o sensibles a la hipoxia cuando existe alguna deficiencia en el metabolismo energético [Wong-Riley, 2010].

2.5.1. Composición anatómica

Se compone por tres principales estructuras: ojos, vía óptica y corteza visual. La información como señal visual (eléctrica), va al cerebro por medio de la vía visual: comienza en la retina, continúa por el nervio óptico hacia el quiasma y el tracto óptico, para ser interpretado en la corteza visual en el lóbulo occipital.

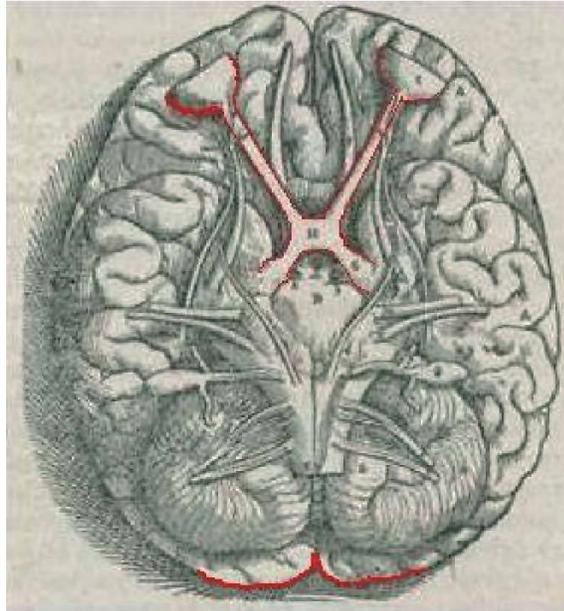


Figura 2.1: Recorrido de impulsos nerviosos en el sistema visual humano [Torrades and Pérez-Sust, 2008].

Los ojos

Los ojos son los órganos sensoriales de este sistema, y por su composición, son considerados como una extensión del cerebro. Se divide en dos segmentos: anterior y posterior. La capa más externa es la córnea (en el segmento anterior) y en la capa más interna está la retina (en el segmento posterior) [Addo et al., 2016, Galloway et al., 2016].

La retina está al fondo del ojo y se compone de 10 capas de donde se distinguen tres grupos de células con funciones específicas. Uno de los tipos de células son los fotorreceptores, que se dividen en dos subtipos:

- **Bastones**, que son principalmente activos en condiciones de baja iluminación y durante visión de campo amplio [Baylor et al., 1979, Galloway et al., 2016].
- **Conos**, que funcionan en condiciones de iluminación brillante; y son responsables de la visión aguda y detallada [Baylor et al., 1979, Galloway et al., 2016].

Este grupo representa la primer etapa para convertir la luz en una señal eléctrica que pueda ser transmitida al cerebro; crean sinapsis con otro tipo de células:

las células bipolares, que a su vez conectan con las *células ganglionares*, las cuales son consideradas las neuronas más grandes en la retina, pero no contribuyen directamente a la formación de imágenes visuales; detectan la intensidad de luz [Saladin, 2018], y sus axones sirven como el punto de formación del nervio óptico [Gupta et al., 2022].

La vía óptica

La vía óptica también es conocida como nervio óptico; es por donde las señales visuales son transmitidas al encéfalo [Saladin, 2018].

Su origen es la retina, donde los axones de las células ganglionares y una capa de fibras nerviosas coinciden. Existen dos tipos de fibras nerviosas; *temporal y nasal*, que se encargan del control de sus respectivos campos visuales. Estas estructuras convergen en el disco óptico y se redireccionan para crear la parte orbital del nervio óptico [Gupta et al., 2022]. Más adelante, se forma el quiasma óptico, donde ocurre una división de la mitad de las fibras de cada nervio, lo que es conocido como *hemidecusación*. A partir de este cruce, cada hemisferio del cerebro interpreta el campo visual contrario.

El tracto óptico pasa posteriormente donde la mayoría de los axones hacen sinapsis en la capa del cuerpo geniculado lateral del tálamo, que hará posible la constricción pupilar. La mayoría de las fibras se convierten en los tractos geniculocalarinos, los cuales, por la vía dorsal, contemplan bucles en los lóbulos parietal y temporal que terminan en la corteza visual [Gupta et al., 2022].

Corteza visual

La corteza visual involucra áreas del encéfalo en donde se procesa la información visual; se incluye la *corteza visual primaria*, que es el lugar donde ocurre la primer etapa del procesamiento visual (es conocida como la zona donde se genera consciencia de la visión); ubicada en el lóbulo occipital, conecta directamente con la retina a través de la vía óptica; y por medio de las vías de asociación, conecta con áreas de asociación visual cercanas en la parte posterior del lóbulo parietal y la parte inferior del lóbulo temporal. Extrae información como ubicación, movimiento, color, entre otros; así como almacena recuerdos visuales, para que el cerebro identifique qué está viendo [Saladin, 2018, Rehman and Al Khalili, 2023].

La corteza visual primaria (conocida también como *V1*), recibe la información de la retina, directamente del tálamo; y posteriormente la transmite a áreas circundantes dentro del mismo lóbulo, conocidas como *V2*, *V3*, *V4* y *V5*; que conforman la corteza visual secundaria. Esto ocurre a través de dos vías:

- Dorsal, *conecta al lóbulos parietal y está asociada a características como localización*[Rehman and Al Khalili, 2023]
- Ventral, *se relaciona con funciones de reconocimiento, y transmite la información al lóbulo temporal*[Rehman and Al Khalili, 2023]

2.5.2. Actividad neuronal

En el cerebro, las señales visuales pueden unirse con otras señales sensoriales por toda la superficie de la corteza cerebral; y de acuerdo con el propósito del individuo, establecería algunas referencias, por ejemplo, para controlar o precisar movimientos o acciones.

Hasta los últimos años, se han reconocido al menos 30 zonas visuales extendidas en los lóbulos parietal, temporal o frontal, que se activan de acuerdo con el tipo de información requerida para las acciones a ejecutar; sin embargo, la zona que tiene mayor actividad y de manera permanente, es la que corresponde al lóbulo occipital [Torrades and Pérez-Sust, 2008].

De acuerdo con algunos estudios, el surco temporal superior (STS) ha mostrado ser mayormente activado cuando la orientación de la cabeza y la mirada son iguales; o cuando se trata de acciones relacionadas a la percepción del movimiento de organismos (en este caso, es posible percibir la proyección ampliada hacia la corteza pre-motora ventral) [Wu et al., 2021, Hooker et al., 2003]. En otras aproximaciones de investigación, se ha detectado que al ejecutar movimientos de desviación de mirada de manera pasiva, la actividad en la región del surco temporal superior está correlacionada con la actividad en la región del surco intraparietal (que ha sido implicada en las redes neuronales relacionadas con la atención espacial) [Corbetta, 1998, George et al., 2001]. También se ha reconocido al área *V5* y el espacio medio temporal, como zonas que desempeñan un importante papel en las transformaciones viso-motoras.

Otra acción importante en el sistema visual, que atañe al propósito de investigación de este trabajo, es la mirada conjunta o sincrónica, donde los músculos de ambos ojos deben actuar coordinadamente. La acción es controlada en las áreas del campo ocular frontal, un espacio ubicado en el lóbulo frontal, cercano a la corteza pre-motora [Gupta et al., 2022].

2.5.3. Métodos de evaluación

Por su propia composición, el desempeño del sistema visual puede ser afectado principalmente en dos de los componentes anatómicos: los ojos (primordialmente en la retina) y la corteza visual (contemplando las zonas de asociación).

Debido a que es uno de los sistemas primordiales, se han desarrollado distintas pruebas que permiten conocer el estado de salud visual de un individuo. Las pruebas de visión potencial, por ejemplo, evalúan la integridad de la retina e incluso la integridad neuronal del sistema visual. La prueba de la agudeza visual se considera el punto de inicio de las pruebas de visión potencial y de las evaluaciones de la vista en general; asocia la resolución espacial con el desempeño del sistema [Maurer and Lewis, 2018, Moshkovitz et al., 2020, Parthasarathi and Stokkermans, 2023].

Agudeza visual estática

Las pruebas de agudeza visual estática (AVE) son las evaluaciones más comunes; buscan determinar la habilidad que tiene un sujeto para distinguir detalles en algunas formas (o las formas mismas), la distancia de captación y la definición, en un ambiente controlado y en una posición fija.

Los valores normales para la agudeza visual se definen en la habilidad de discriminar entre dos contornos mantenidos en una separación de *1 minuto arco* (1.75mm), desde una distancia de 6 pies; y es importante también considerar las habilidades y capacidades del sujeto en estudio, tales como un adecuado nivel cognitivo y buenas funciones motoras [Moshkovitz et al., 2020, Hamilton et al., 2021]. El desarrollo de esta evaluación se debe llevar a cabo en un espacio con condiciones de iluminación adecuadas, que ofrezca comodidad al sujeto, donde habrá de colocarse a una distancia de 6m, frente a un *tablero de Snellen*, que consiste en una tabla de escala geométrica donde se disponen nueve distintos optotipos: C, D, E, F, L, O, P, T, Z.

Las letras que fungen como optotipos van reduciendo su tamaño, que es el factor que al final determinará el nivel de agudeza visual [Azzam and Ronquillo, 2023].

Agudeza visual dinámica

De manera similar a la AVE, la agudeza visual dinámica (AVD) se define como la habilidad para identificar detalles visuales en objetivos, pero cuando existe movimiento entre los sujetos y objetos. Puede ser dividido en dos clases:

- **Optotipos estáticos.** Normalmente la prueba se ejecuta haciendo que el sujeto sea quien lleve a cabo el movimiento de la cabeza de manera lenta y controlada. Esta prueba es bastante recurrida para evaluar el RVO [Wu et al., 2021].
- **Optotipos móviles.** En esta prueba, se presenta, normalmente mediante una proyección, un optotipo que ejecuta un movimiento y tendrá que ser seguido por la vista del sujeto, permitiendo así conocer la función visual dinámica [Wu et al., 2021].

Las pruebas de AVD pueden tener distintas variaciones en velocidad, rotación o elección de optotipos, sin embargo, en esencia, es una evaluación que permite conocer al mismo tiempo las funciones visuales y las funciones vestibulares.

Sensibilidad de contraste

Otra de las pruebas que toman mayor relevancia en el análisis visual es la sensibilidad de contraste, que es una habilidad para detectar cambios finos en luminancia y contornos finos de objetos pequeños. Es considerada, al igual que la agudeza visual, una prueba muy efectiva para conocer el estado del sistema visual; incluso se consideran complementarias para evaluar la función visual eficaz en actividades deportivas o en actividades de conducción. Ambas son determinantes en las habilidades espaciales [Zimmerman et al., 2011, Kaur and Gurnani, 2023]. Tener una agudeza visual muy buena no es un hecho que permita suponer que también existe una buena sensibilidad de contraste; existen varias enfermedades oculares con pérdida de sensibilidad en las que un sujeto puede lograr una agudeza de 20/20. En muchas ocasiones, el detalle con la sensibilidad puede tener más implicaciones psicológicas que la agudeza [Zimmerman et al., 2011, Moshkovitz et al., 2020, Kaur and Gurnani, 2023].

El umbral de contraste es la diferencia de contraste mínima para que un objeto se distinga claramente, siendo que el contraste se define como el nivel de oscuridad (negro) sobre el de iluminación (blanco) de un objeto [Kaur and Gurnani, 2023]; y es el que incentiva mayores respuestas neuronales y sensoriales en la mayoría de las tareas visuales [Himmelberg et al., 2022].

2.6. Sistema vestibular

El sistema vestibular es el responsable de la coordinación de los movimientos y también ayuda a mantener el equilibrio del cuerpo. Sus funciones permiten que un individuo pueda ser capaz de detectar los movimientos propios y externamente generados, tener noción de los mismos, mejorar la habilidad de movimientos voluntarios, poseer un buen control autónomo, postura y navegación, e incluso ayuda a estabilizar las imágenes visuales. Esta información es obtenida principalmente por la descripción de la posición y movimiento de la cabeza con respecto a las tres dimensiones del espacio [Maure et al., 2000, Day and Fitzpatrick, 2005, Hitier et al., 2014].

2.6.1. Composición anatómica

El principal componente del sistema vestibular es el aparato vestibular; una estructura anatómica ubicada bilateralmente en el oído interno, que es conformada por tres canales semicirculares y dos órganos otolíticos, los cuales contienen un líquido endolinfático en el interior, que es el agente que provee sensibilidad a los movimientos de la cabeza y del cuerpo; respondiendo ante fuerzas físicas como la inercia y la gravedad, para proyectar señales visuales hacia el tronco encefálico mediante el par craneal VII, a través del segmento vestibular [Maure et al., 2000, Frank and Greenlee, 2018].



Figura 2.2: Aparato vestibular [Commission, 2016]

Órganos otolíticos

Los órganos otolíticos también se conocen como máculas, porque en la estructura interna se asemeja a una saco conteniendo células pilosas.

- **Sáculo (mácula sacular).** Dentro del sáculo, la mácula está dispuesta en posición vertical, por lo que es sensible a las aceleración y desaceleración sobre el mismo plano; es decir, en movimientos hacia arriba o hacia abajo, como ocurre cuando se hace uso de un elevador.
- **Utrículo (mácula utricular).** En el utrículo, la mácula está en posición horizontal en el piso del mismo. Las respuestas emanadas desde esta estructura se generan cuando se ocurren en el plano horizontal, captando los movimientos hacia atrás y hacia adelante; y los movimientos horizontales laterales [Bernal et al., 2011].

Las células pilosas de los órganos otolíticos convierten el estímulo mecánico que provocan los movimientos, en señales eléctricas que son transmitidas hacia el encéfalo, teniendo una tasa de estimulación proporcional a la magnitud del estímulo. Posteriormente, esta información también se envía a la corteza para interpretar que ha ocurrido un movimiento lineal. Cuando el movimiento alcanza una velocidad constante, la excitación a las células cesa, y deja de detectarse movimiento vestibular hasta que ocurre otra variación (aceleración o desaceleración) [Bernal et al., 2011].

Canales semicirculares

Los tres canales semicirculares están formados de acuerdo a las tres planos dimensionales (x, y, z), y son nombrados como anterior (o superior), posterior y horizontal (o lateral). Los canales anterior y posterior están orientados en sentido vertical y forman un ángulo recto entre sí; mientras el canal lateral está a un ángulo de 30° respecto al plano horizontal.

Al momento de girar la cabeza, la endolinfa se queda atrás y empuja la cúpula, que al final estimula las células pilosas. Si la rotación es continua, después de 20 a 25 segundos la endolinfa se sincroniza con el movimiento del conducto y cesa la estimulación de las células pilosas [Saladin, 2018].

Estos canales son, primordialmente, detectores de la aceleración; es decir, no del propio movimiento, sino de la variación de velocidad que ocurre en él. Se activan cuando existe un movimiento angular.

2.6.2. Actividad neuronal

Cuando las células pilosas son estimuladas, envían las señales relacionadas con la posición y movimiento del cuerpo, a los cuatro núcleos vestibulares (ubicados en el tronco encefálico), a través del nervio vestibular; y enseguida, la información se retransmite a cinco destinos [Saladin, 2018]:

- **Cerebelo**, permitiendo el control de movimientos de cabeza y ojo, el tono muscular y la postura.
- **Núcleos de pares craneales III, IV y VI**, haciendo posible que se ejecuten los movimientos musculares de la órbita ocular que compensan los movimientos de la cabeza.
- **Formación reticular**, habilitando los ajustes de respiración y circulación sanguínea en los cambios de postura.
- **Médula espinal**, haciendo posible la ejecución de movimientos rápidos del tronco y extremidades, para mantener el equilibrio.

- **Tálamo**, permitiendo la retransmisión de señales principalmente, a dos áreas cerebrales: *el giro postcentral* (donde se genera conciencia sobre la posición y movimiento del cuerpo), y *la zona de transición de la corteza sensitiva primaria motora* (considerada con participación en el control motor de cabeza y cuerpo) [Saladin, 2018].

Debido a que el sistema vestibular participa en distintas actividades, se han identificado varias áreas corticales en donde las señales relativas llegan a influenciar; la corteza vestibular tiene al menos 10 áreas incluyendo la corteza somatosensorial que incluye el sulco intraparietal, la corteza posterior parietal, el área temporal media superior (MST), la corteza frontal, el giro cingulado (*gyrus cinguli, cingulum*), el hipocampo y la corteza visual extraestriada. Se considera, además, que estas regiones están conectadas al menos con cuatro rutas neuronales: vestibulo-tálamo-cortical, dorsal-tegmental nucleus (relacionada a la corteza entorrinal), una vía del núcleo reticular *pontis oralis*, y una vía del cerebelo (relacionada a la corteza parietal) [Lopez and Blanke, 2011, Hitier et al., 2014, Lopez, 2015]. El grupo de neuronas correspondientes a la ruta talámica, también se proyecta a distintas zonas de la corteza asociativa parietotemporal, que son los centros de integración sensorio-motora que también es el origen de la percepción del movimiento del cuerpo humano [Bernal et al., 2011].

2.7. Integración sensorial

Anteriormente se ha hecho mención de los sistemas sensoriales en los organismos, profundizando principalmente sobre dos de ellos. Sin embargo, es importante destacar que la habilidad de recrear el ambiente, y a su vez, poder relacionarlo con la propia percepción del organismo, así como la capacidad de ejecutar la mayoría de las acciones que un individuo lleva a cabo, no depende únicamente de la información individual que proporciona un sistema sensorial, sino que ocurre a partir de la unión de la información que proveen los sistemas; a través de la integración sensorial.

La integración sensorial ocurre cuando un individuo es capaz de procesar la información proveniente de distintas fuentes sensoriales para lograr interactuar de manera segura y eficaz, ya sea con los objetos del entorno, o con los sujetos próximos.

Uno de los sistemas primordiales para el éxito de estos procesos, si no es que el más importante, es el *sistema vestibular*; ya que recibe información de fuerzas físicas a través del aparato vestibular; del espacio a través del tacto, y de los movimientos, a través de las articulaciones. Todas ellas indispensables para generar conciencia de las sensaciones, e incluso de las emociones.

Las siguientes líneas, se limitarán a mencionar algunos ejemplos en los que el sistema vestibular genera una relación directa con el sistema visual:

2.7.1. Relación: visual-vestibular

Como ya ha sido evidenciado, la información que un individuo puede obtener de los sistemas visual y vestibular, incide principalmente en la capacidad de una correcta postura, buena orientación y ubicación espacial, teniendo distintas maneras de relacionarse.

Reflejo vestíbulo-ocular (RVO)

Probablemente, el caso más representativo de cómo el sistema vestibular es capaz de crear una representación estable del espacio visual exterior, es la capacidad de ejercer control sobre los movimientos de los ojos [Day and Fitzpatrick, 2005].

Uno de los ejemplos más conocidos en donde se encuentra la relación más directa entre estos sistemas (visual y vestibular), es un tipo de reflejo conocido como *reflejo vestíbulo-ocular*, abreviado como *RVO*, o *VOR* (por su denominación en el idioma inglés). Es un mecanismo sumamente importante para los eventos cotidianos de los individuos, y al ser un reflejo, su funcionamiento es automático ante los estímulos que lo proyectan. Permite estabilizar los ojos con precisión, aún en movimientos angulares [Broussard et al., 2011].

El RVO responde a movimientos de rotación y traslación, a partir de las señales que genera el aparato vestibular. Es considerado un evento relativamente corto, y depende absolutamente de la información vestibular para activar las motoneuronas [Broussard et al., 2011]. Como valor de entrada, el sistema vestíbulo-ocular detecta la velocidad de la cabeza, la procesa y emite como señal de salida, la velocidad del movimiento del ojo.

Coordinación motora

A diferencia del ejemplo anterior (RVO), donde la señal de entrada provenía de un órgano para ejecutarse en el otro, hay otros eventos en donde ambos generan la fuente de información que habrá de permitir llevar a cabo más acciones. La ejecución de movimientos, en general, es una actividad absolutamente dependiente de ambos sistemas sensoriales: para llevar a cabo un movimiento, es preciso conocer el espacio en donde se está realizando; y para poder hacerlo con precisión, también es necesario tener noción de la posición de uno mismo, esta conjugación de datos es posible, gracias a ambos sistemas.

Así, gracias a la visión y a la función vestibular, se pueden llevar a cabo acciones como caminar/correr, conducir un vehículo o una bicicleta, tener equilibrio, o navegar en un entorno con la intención de desplazamiento.

2.8. Espectroscopia funcional del cercano infrarrojo

La espectroscopia funcional del cercano infrarrojo funcional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS), es una técnica óptica usada para la exploración de la actividad cerebral; aunque su uso aún no es tan popular, esta técnica comienza a tener mayor incidencia en diversos estudios. Existe una publicación alusiva desde 1977, por Frans Jobsis [Jobsis, 1977], donde comenzaba a proponerse como una herramienta no invasiva para el monitoreo del comportamiento hemodinámico y la evaluación del estado de oxigenación de órganos *in situ*; partiendo del conocimiento del comportamiento de la luz y el contacto con el tejido biológico.

Con esto, para comprender un poco más el empleo de esta tecnología para tales fines, es recomendable detallar sus propios conceptos.

2.8.1. El cercano infrarrojo

En 1865, James Clerk Maxwell sentó las bases para comprender la naturaleza de la luz al demostrar que un campo magnético puede actuar como fuente de campo eléctrico, y que un campo eléctrico puede generar un campo magnético, al variar en el tiempo; ambos campos pueden sostenerse, y así forman una onda electromagnética.

La luz visible es un ejemplo de onda de esta categoría [Young and Freedman, 2009].

Existen distintos tipos de ondas electromagnéticas, las cuales no requieren un medio material para su propagación y solamente difieren en frecuencia y longitud, en donde cubren un espectro muy amplio conocido justamente como *espectro electromagnético*. De manera natural, a través de la vista, para el ser humano solamente es posible detectar una porción de este espectro: la longitud comprendida desde los 400nm a los 700nm (con frecuencias aproximadas de 750Hz a 430THz), correspondiente a la luz visible (ver 2.3).

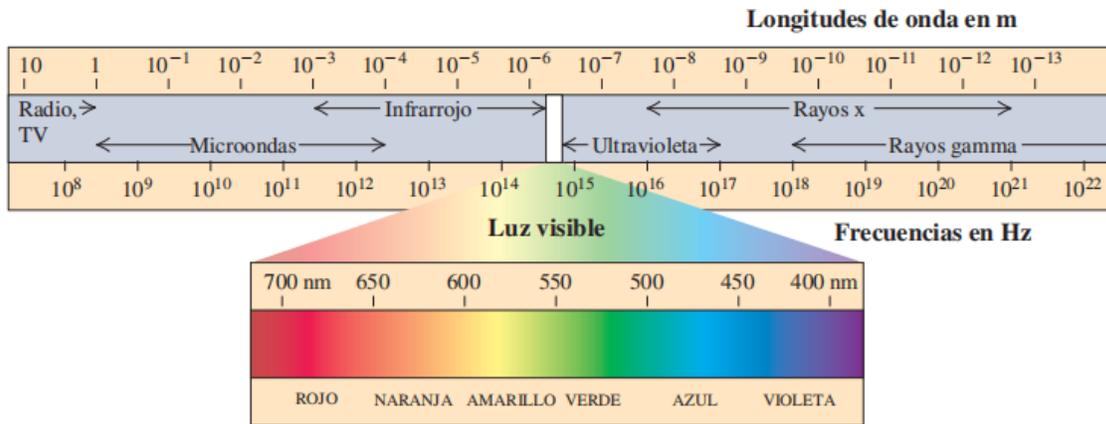


Figura 2.3: Espectro electromagnético (frecuencia y longitud de onda). Fuente: [Young and Freedman, 2009].

Como puede apreciarse en la imagen 2.3, adyacentes a las longitudes de onda visibles (que van del rojo al violeta), existen dos tipos de radiación: ultravioleta (más allá de la luz violeta) e infrarrojo (debajo de la luz roja); cada una con distintas propiedades que les otorgan aptitudes especiales para ciertas aplicaciones.

La dimensión infrarroja se ubica entre la dimensión visible y las microondas, comprendida en el amplio rango que se extiende desde aproximadamente 700nm hasta 1mm, y se divide en tres regiones: cercano infrarrojo (Near Infrared: NIR), infrarrojo medio (Middle Infrared: MIR) y lejano infrarrojo (Far Infrared: FIR). Precisamente, el cercano infrarrojo es la transición entre los espectros visible e infrarrojo: desde alrededor de los 700nm hasta $1.3\mu\text{m}$.

2.8.2. Principio de funcionamiento

Los materiales biológicos como el tejido humano, asumen diferentes comportamientos al exponerse a las ondas electromagnéticas, las cuales también tienen distintos procesos al interactuar con los materiales.

En cuanto a los detalles biológicos, esta tecnología opera basada principalmente en dos características del tejido humano y su reacción al exponerse ante la luz [Jöbsis, 1977]:

- **Transparencia:** El tejido humano es especialmente sensible a la exposición electromagnética y presenta una relativa transparencia ante la luz en el rango del cercano infrarrojo (700nm hasta $1.3\mu\text{m}$).
- **Absorción:** Uno de los principales componentes detectables en el tejido humano es la hemoglobina, un cromóforo biológico que tiene especiales características de absorción dependientes de la oxigenación. Tiene dos variantes: Hemoglobina oxigenada (HbO) y hemoglobina desoxigenada(HHb/HbR).

En general, las células del cuerpo consumen oxígeno constantemente, y aseguran su correcto suministro, a través del flujo sanguíneo. En este aspecto, el cerebro es especialmente más sensible dependiendo del oxígeno para ejecutar sus funciones con normalidad, haciendo que sea fácilmente accesible a la evaluación [Jöbsis, 1977].

Respecto al curso de las ondas electromagnéticas, se tienen que tomar en cuenta las siguientes propiedades de propagación:

- **Reflexión:** Se presenta cuando un haz luminoso impacta una superficie en su camino y provoca una separación parcial, reflejando o regresando una porción; actúa en función del ángulo formado entre el haz luminoso y la superficie.
- **Refracción:** En este caso, una porción es parcialmente transmitida hacia un segundo material. Su valor cuantitativo varía en función del material por el que se transmite, y se define por el *índice de refracción*, que puede ser definido como la razón entre la rapidez de la luz en el vacío (c) y la rapidez de la luz en el material (ν), expresado en la siguiente fórmula 2.1 [Young and Freedman, 2009]:

$$n = \frac{\nu}{c} \tag{2.1}$$

- **Dispersión:** De manera general, la dispersión puede describirse como un fenómeno donde se reordena la dirección de un haz luminoso, al incidir sobre otra materia; dependiente de la estructura molecular del objeto (entre otras cosas, de la rapidez de onda y el índice de refracción) [Young and Freedman, 2009, Hahn, 2009].

2.8.3. Ley de Lambert-Beer

Al conjugar los conceptos anteriores, se crean dos aspectos definitivos que dictan el modo de operación de este tipo de espectroscopia:

Absorbancia

Cuando un haz luminoso penetra un cuerpo o una materia, se puede detectar fácilmente a partir de dos datos cuantitativos: la cantidad de luz que ingresa (l_i) y la cantidad de luz que emerge (l_o). La razón entre estos dos valores es la absorbancia, y puede ser expresada con la siguiente fórmula 2.2:

$$A = \frac{l_i}{l_o} \quad (2.2)$$

Se puede deducir que en un material transparente, la absorbancia tendría un valor nulo.

Transmitancia

La transmitancia puede definirse como la relación opuesta a la absorbancia; es decir, la cantidad de luz que emerge (l_o), sobre la cantidad de luz que ha ingresado (l_i) en un cuerpo o materia. Por ejemplo, en un material transparente, habría absoluta transmisión.

La transmitancia se definiría con la siguiente ecuación 2.3:

$$T = \frac{l_o}{l_i} \quad (2.3)$$

Densidad óptica

La densidad óptica, es la magnitud física usada para expresar la cantidad de luz que ha sido absorbida al incidir en alguna solución; es decir, la absorbancia. La expresión matemática correspondiente es la siguiente:

$$A = \log_{10} \frac{I_t}{I_0} = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

En la equiparación anterior, se ha expresado la relación cuantitativa de la luz de forma básica, ya que no contempla otros factores que pueden alterar. Por ejemplo, en 1760, Johann Lambert estipuló que otro elemento importante a considerar es la distancia. Por lo tanto, en un tejido, la absorbancia dependerá de la distancia que la luz tendría que atravesar a través del mismo, y se expresaría en la siguiente fórmula 2.5:

$$A = \varepsilon \cdot d \quad (2.5)$$

Donde ε = Coeficiente de extinción molecular, y d = Distancia

Aunado a eso, en 1852, August Beer descubrió que también es dependiente de otro factor: la concentración. Es decir, en un tejido humano, el valor dependerá de la concentración de cromóforos que existan. Su expresión matemática puede describirse de la siguiente manera:

$$A = \varepsilon \cdot c \quad (2.6)$$

Donde ε = Coeficiente de extinción molecular, y c = Concentración

Con ambos entendimientos, es posible comprender el estatuto que se conoce como la *Ley de Lambert-Beer*, que expresa la densidad óptica cubriendo las condiciones de fragmento de materia, y cuya fórmula se define de la siguiente forma:

$$\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = \varepsilon \cdot d \cdot c \quad (2.7)$$

Ley modificada de Lambert-Beer

Para el caso de la espectroscopia del cercano infrarrojo (fNIRS), aún existe otro factor por agregar. Esto se debe a que con las consideraciones anteriores expresadas en 2.7, no se toma en cuenta que en el comportamiento del tejido biológico al exponerse a la luz, también existe dispersión, provocando variación en los niveles de concentración; y por consiguiente, pérdidas de absorción.

El ajuste entonces, es resuelto añadiendo un *factor diferencial de longitud de trayectoria* (*Differential Pathlength Factor -DPF-*), para compensar la pérdida de absorción; y además, considerando un incremento en la concentración. De esta manera, la fórmula que desarrollaría la *Ley modificada de Lambert-Beer (mBLL)*, se expresa a continuación:

$$\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = \varepsilon \cdot d \cdot \Delta c \cdot DPF \quad (2.8)$$

Donde:

Δ representa un incremento o variación.

DPF es una constante (En tejido cerebral: 6, y en tejido muscular: 4).

Es así como, a través de esta técnica, es posible calcular la absorción de los cromóforos y llevar a cabo el monitoreo hemodinámico de los órganos y tejidos. En cuanto a la señal que produce, que será la información a analizar, se pueden obtener valores correspondientes hasta a tres tipos de categorías: hemoglobina oxigenada (HbO), hemoglobina desoxigenada (HHb/HbR) y hemoglobina total (HbT).

2.9. Procesamiento de señales

Generalmente, después de haber adquirido los datos mediante el uso de cualquiera de las tecnologías existentes relacionadas al monitoreo de la actividad cerebral, como son la electroencefalografía (EEG), la resonancia magnética (RMI), o la espectroscopia de cercano infrarrojo (NIRS); es necesario conducir otro proceso en el manejo de la información, para su interpretación. En este caso, se efectúa el procesamiento de señales.

La acción de procesar las señales, comprende varias etapas con el fin de encontrar un dato relevante para un propósito específico. A continuación, se describe la manera en la que ha tenido lugar esta fase.

2.9.1. Preprocesamiento

Una señal fisiológica (o bioseñal), independientemente de la técnica de adquisición empleada, contiene un tipo de información no deliberada (muchas veces provocada por factores ambientales, o por la misma naturaleza del método), que suele provocar alteraciones sobre los datos buscados. A este segmento de información, normalmente no deseado, se le conoce como *ruido* o *artefacto*.

El trabajo de la remoción del ruido o artefactos de una señal es posible gracias a la implementación de algunos métodos que pueden usarse de manera individual o combinada.

Aplicación de filtros

La utilización de filtros, es uno de los métodos elementales. Asegura una señal más limpia, libre de componentes que no corresponden a la información buscada. Para mayor productividad, es importante tener en cuenta los valores normales en los que oscila la señal de interés; así es posible ejecutar filtros que admitan solamente datos relacionados a ella. Algunos de los filtros más conocidos, se reseñan a continuación:

- **Filtro de banda (pasa-banda).** Permite trabajar con un rango de frecuencia específico. Es la combinación de dos filtros: uno que permite el paso de frecuencias con valores mayores al indicado; y otro que establece el valor máximo, para permitir frecuencias menores a este.
- **Filtro notch (rechaza-banda).** De forma similar al filtro mencionado anteriormente, se establece un rango de frecuencias por un valor máximo y otro valor mínimo; pero en esta ocasión, este rango se usa para señalar la frecuencia que no se pretende considerar, es decir, la rechaza. Los valores útiles son los que quedan fuera del rango.

- **Transformada Wavelet.** Es uno de los principales métodos usados para reducir el ruido en la señal. Su uso permite fragmentar o separar una señal en distintos componentes de frecuencia, que generalmente, son de corta duración. Existen algunas variaciones de este método. Entre otros, dos de los más comunes son: la transformada continua (CWT), que permite un análisis continuo donde la frecuencia varía con el tiempo; y la transformada discreta (DWT), cuyo uso es recomendado principalmente en análisis de multiresolución, y la señal se descompone en diferentes escalas para permitir examinaciones localizadas, es principalmente útil en el procesamiento de imágenes.

Existen trabajos donde se ha analizado información adquirida considerando el cercano infrarrojo, que han demostrado una buena eliminación de ruido causado por fenómenos fisiológicos, aplicando filtros que abarcan desde 0.01Hz a 0.8Hz [Naseer and Hong, 2015], o más recientemente contemplando un rango de 0.1Hz a 0.5Hz [Luu and Chau, 2009]; por lo que se considera que una banda en esas frecuencias es un filtro adecuado para el análisis de los datos de fNIRS.

2.9.2. Segmentación

Es importante, en la mayoría de los estudios, llevar a cabo una segmentación o división de los datos con respecto a la tarea ejecutada o a las condiciones experimentales. Esto significa clasificar grupos de datos que comparten una condición previamente planteada desde la hipótesis, o desde la planeación. De esta manera, la identificación de los patrones de comportamiento o de las características propias de la tarea efectuada, permiten un análisis más objetivo después de volverse, de alguna manera, más fácilmente detectables.

2.9.3. Extracción de características

Cuando ya se cuenta con una señal considerada útil para continuar hacia el análisis, sin tanto ruido o corregida; es momento de hallar comportamientos o características relevantes que den paso a una posible nueva categorización o que destaquen algunas propiedades. Normalmente, en esta etapa, con el objetivo de agrupar datos a partir de sus similitudes, se ejecutan métodos que involucran dominios de tiempo, frecuencia o morfología de la señal.

La implementación de técnicas estadísticas también contribuye a la profundización de las investigaciones, como ocurre al utilizar las pruebas 'T' (también conocida como *T-Student*), o Wilcoxon; que ayudan a determinar cuando existe una diferencia significativa entre dos grupos de datos comparados. A través de ambas pruebas es posible determinar si los conjuntos o condiciones a comparar entre sí, tienen un comportamiento estadístico distinto. Sin embargo su empleo suele perseguir propósitos diferentes; mientras la prueba T se desarrolla desde un enfoque general, la ejecución de la prueba de Wilcoxon puede ser preferida para un resultado más preciso, ya que de acuerdo con su procedimiento, es menos susceptible a valores atípicos en exámenes más robustas [Flores, 1989].

Otro tipo de características obedece a la aplicación de métodos de aprendizaje automático (o *machine learning*), sin embargo, su mayor utilidad se reserva a los casos donde se cuenta con una base de datos muy amplia.

2.9.4. Análisis de información

Cuando se ha podido distinguir información importante después de buscar características particulares entre los grupos de datos, es posible establecer diversas relaciones entre las categorías y su comportamiento. Esta etapa de interpretación es una parte fundamental para los resultados del trabajo.

Existen numerosos métodos para hacer posible un buen análisis, no obstante, no todos pueden generar los mejores resultados. Lograr un producto exitoso, además de la elección del método para el análisis, dependerá del tipo de datos que se utiliza, la cantidad de información con la que se cuenta, la calidad de la información adquirida, entre otras propiedades.

Es importante tener conocimiento sobre la naturaleza del tipo de datos con los que se está trabajando, para poder elegir los métodos o los fragmentos de información adecuados. En el caso de los estudios que emplean la técnica de fNIRS, es posible llevar a cabo el análisis desde distintos enfoques, partiendo del mismo conjunto de información. Por ejemplo, podría considerarse incluir exclusivamente la información correspondiente a la hemoglobina oxigenada (HbO), o en su lugar, la información correspondiente a la hemoglobina desoxigenada (HbR); e incluso, considerar ambos valores del cromóforo.

El objetivo de cada trabajo, también forma zonas de interés y aporta un tipo de información que contribuyen al análisis. Así, por ejemplo, se pueden explorar regiones cerebrales que se relacionen a funciones específicas previamente identificadas.

2.9.5. Clasificación

Una forma común de implementar estos métodos es mediante la agrupación de datos estadísticos, que como se menciona en A.3, pueden incluir distintos momentos de análisis. La eficacia de estos métodos también depende de la constitución de la base de datos, como que los datos no tengan impurezas o reciban ciertos ajustes; y la eficiente selección de las características representativas.

Al relacionar la información, es posible elegir el análisis de algunas características, en un determinado tipo de actividad o con un tipo de dato en especial. En cuanto a la clasificación, es posible conducirla de dos maneras:

- **Clasificación supervisada**, requiere de la intervención personal para poder reconocer patrones o características específicas. Cuando se cuenta con información de análisis limitada por cantidad, es recomendable acudir a un evento de estos.
- **Clasificación no supervisada**, ocurre de manera automática por la sola intervención del algoritmo. Ofrece mucho mejores resultados cuando se cuenta con una base de datos considerablemente nutrida.

Sin embargo, los modelos de algoritmos también pueden tener otra manera de agrupamiento según el principio de funcionamiento con el que operan, formando así distintas familias. En este aspecto, los modelos de algoritmos empleados en este trabajo, pueden dividirse de la siguiente manera [Hastie et al., 2009]:

- *Support Vector Machines (SVM)*: SVM SVM Standard Scaler (SVM with data preprocessing using standard scaling)
- *Modelos lineales*: Logistic Regression GLM (Generalized Linear Models)
- *Métodos bayesianos*: Gaussian Naive Bayes
- *Modelos basados en árboles*: Random Forest Boosted Trees
- *Métodos basados en instancias*: K-Nearest Neighbors (KNN)

Capítulo 3

Trabajos Relacionados

Los temas abordados en este trabajo son de reciente exploración o han sido retomados para un mayor desarrollo en los últimos años. Existen algunos estudios que han tratado estas temáticas, aunque persisten ciertas diferencias.

A continuación, se exponen detalles relevantes de algunos trabajos de investigación que de la misma forma, contribuyeron a ampliar la información que se trata a lo largo de este documento:

3.1. Sistema vestibular y fNIRS

En el lado oriental del planeta, específicamente en Hong Kong, un trabajo reportado por Zhao et al. [Zhao et al., 2023], se orientó al descubrimiento de zonas corticales relacionadas al sistema vestibular, usando la técnica óptica de fNIRS. Se desarrolló sobre la función que desempeña en la percepción del movimiento y balance; planteando el análisis a partir de tres distintas formas de estimulación basadas en tres tipos de movimientos: circular, lateral y hacia adelante y atrás; generados mediante el uso de una plataforma móvil construida por la *Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong (HKUST)*. Su análisis consideró los niveles de hemoglobina oxigenada (HbO) detectados en 12 sujetos, donde se destacan resultados que demuestran que las regiones cerebrales somatosensoriales activadas, varían de acuerdo con la dirección del estímulo vestibular presentado. Al mismo tiempo, confirma a la técnica de fNIRS como una herramienta eficiente para la identificación de áreas corticales de interés.

En un trabajo de revisión reportado por Ertl y Boegle [Ertl and Boegle, 2019], han enfocado su investigación al uso de técnicas novedosas de exploración cerebral, como también refieren, es el caso de fNIRS; para evaluar más funciones del sistema vestibular. En esta ocasión también se detallan las ventajas y desventajas que presenta el uso de esta tecnología ante otras conocidas como son: la Resonancia Magnética Funcional (fMRI, por las siglas en inglés), o la Tomografía por Emisión de Positrones (PET, por las siglas en inglés). Hacen una extensa recopilación de métodos de estimulación hacia el sistema vestibular, y la compatibilidad que éstos tienen con las técnicas de exploración de la actividad cerebral. Finalmente, se reconoce que el uso de fNIRS es una buena opción por no interferir con los métodos de estimulación, aunque también se precisan algunas limitaciones de esta tecnología.

3.2. Sistemas visual y vestibular

El interés por el sistema visual y sus implicaciones neurológicas siempre ha sido uno de los temas que más congrega a los investigadores, sin embargo, es tan amplio que aún quedan muchas cosas por conocer y descubrir. Uno de esos temas, es acerca de cómo se relaciona cognitivamente con otros sistemas sensoriales; y para varias de las funciones más relevantes del ser humano, como el desplazamiento, la relación más importante es la que se genera con el sistema vestibular. Un trabajo al respecto, reportado en [Wibble et al., 2020], demuestra la manera en que se analiza la integración de señales visuales y vestibulares haciendo mediciones en tres categorías: visual, vestibular y visual + vestibular. Utilizan un *eye-tracker* como herramienta para recolección de datos, con el propósito de profundizar la exploración de la manera en la que las señales proporcionadas por cada sistema se ven afectadas por las aceleraciones y cómo se lleva a cabo la integración de ambas señales, que permiten tener la percepción final. Los experimentos realizados, permitieron a los investigadores concluir en que la visión suele ser más sensible de lo que se consideraba ante la aceleración; al demostrar que a medida que la aceleración o la rotación del cuerpo entero aumenta, la visión pierde importancia en cuanto al sistema predominante de percepción de movimiento. Lo que es claro, es que la integración de las señales provenientes de ambos sistemas, representan un procesamiento de alto nivel; así también lo presenta un grupo de investigadores en Reino Unido, con un estudio reportado en [Arshad et al., 2023]. La investigación partió con el objetivo de com-

probar si los conflictos entre ambos sistemas afectan la sensibilidad de la integración multisensorial. El estímulo consistió en presentar a los sujetos una proyección que pretendía inducir a un conflicto por la información que provenía del flujo óptico, al mantener una posición estacionaria. Después de llevar a cabo las distintas etapas de los experimentos, se tuvo el descubrimiento de que la exposición a un conflicto vestíbulo-visual, provoca una reducción de sensibilidad principalmente ante estímulos verticales; entendiéndose que la demanda que puede representar la verticalidad para el sistema visual, inhibe o reduce la información vestibular y somática.

En otras investigaciones, también se han relacionado las señales de ambos sistemas para comprobar y generar mayor entendimiento en las actividades por las que son mayormente conocidas. Por ejemplo, un trabajo descrito en [Karim et al., 2012], que además destaca el uso de fNIRS, analiza el comportamiento de la corteza cerebral de sujetos mientras son expuestos a una simulación de descenso de montaña, en la plataforma de videojuegos Nintendo Wii. Los resultados, aunque confirmatorios, no dejan de ser interesantes al demostrar que la zona cortical con mayor activación en tareas de balance, es una de las áreas asociadas a la actividad vestibular: el giro temporal superior.

3.3. Análisis de datos por fNIRS

Aunque en los últimos años, el uso de la tecnología de fNIRS ha incrementado en el interés científico, aún no se establecen métodos estándares o recomendados para procesar y analizar la señales. Muchos de los acercamientos en este rubro, parten de los trabajos que se han realizado con mayor incidencia como el procesamiento de datos obtenido por *Resonancia Magnética Funcional (fMRI)*; como se puede encontrar en el trabajo reportado en [Zhang et al., 2017], donde analizan información de fNIRS, a partir de los métodos comunes usados para fMRI. La comparación que los autores realizan, permite comprobar que este tipo de procesamiento, incluyendo los métodos de filtración de datos, puede ser exitosamente aplicado al tomar en cuenta la información correspondiente a la hemoglobina desoxigenada (HbR), que fue la que registró datos similares a los que previamente había arrojado un estudio de fMRI; una situación que no ocurrió en el análisis de los datos de hemoglobina oxigenada (HbO), y que los investigadores justifican con la probabilidad de que esta señal (HbO), es más sensible a la modulación de las fuentes sistémicas.

Es importante señalar que este estudio se basó en el análisis del lenguaje, la cual también es un área de exploración compleja, ya que las áreas encefálicas relacionadas a estas tareas, se involucran a mayor profundidad que el área cortical. En otro estudio más reciente [Lee et al., 2018], también se hace alusión a la adaptación de los métodos para el análisis de ambos tipos de datos, pero concuerdan en el hecho de que no todos son apropiados para la implementación en señales de fNIRS, en este caso el modelo lineal general (GLM); por lo que exploran el uso del método de correlación cruzada como una de las nuevas técnicas para la remoción de artefactos. El resultado es un prometedor precedente para la aplicación de posteriores análisis, sin embargo, no deja de haber una aclaración con respecto a las características consideradas en esas señales. Un ejemplo optimista más, puede encontrarse en el trabajo donde un grupo de investigadores de Noruega y Estados Unidos, reporta la clasificación de señales de fNIRS provocadas por tareas de movimientos de los dedos [Khan et al., 2021]. Implementan ocho distintos métodos de clasificación, de donde se presentan los siguientes resultados, reportando los que alcanzan mejor precisión 3.1.

Método implementado	Precisión
K-Nearest Neighbours (kNN)	0.75 ± 0.04
Random Forest (RF)	0.75 ± 0.05
Extreme Gradient Boosting (XGBoost)	0.77 ± 0.06

Tabla 3.1: Métodos de clasificación y precisión obtenida, por [Khan et al., 2021]

3.4. Discusión

En los artículos y trabajos de investigación reseñados, es posible distinguir coincidencias, que a la vez, suman destellos de importancia a los resultados que este propio trabajo puede arrojar. Se reafirma el papel fundamental del sistema vestibular, gracias a su contribución en las funciones ordinarias de cada individuo; lo que brinda fundamentos para incentivar e impulsar el desarrollo de más investigaciones sobre este tema. La tendencia de los resultados y la información desarrollada, también sugiere que estas investigaciones no solamente tendrán un aprovechamiento científico, al comprender de mejor manera las aportaciones cognitivas que el sistema vestibular otorga; sino también clínico, para mejorar los diagnósticos y tratamientos en casos de desórdenes vestibulares como vértigo y mareos, por mencionar algunos.

La importancia se vuelve aún más evidente cuando se vincula con el otro sistema que incumbe a este trabajo: el sistema visual. Es cada vez más reconocida la importancia de la relación de este par de sistemas, pero profundizar la información representaría un buen soporte de conocimiento que permitiría desarrollar soluciones para los casos en los que existe un déficit en el desempeño de actividades como el desplazamiento, orientación o equilibrio, o para facilitar asistencias sobre los mismos.

En lo que respecta a la técnica empleada para conocer el comportamiento cerebral (fNIRS), de acuerdo con varios de los trabajos aludidos, su aplicación aún comienza a generalizarse, mediante un despegue en varios trabajos recientemente realizados; lo que al mismo tiempo, genera tanto mayor interés como más conocimiento y dominio del tema. En la misma circunstancia, también es posible ir reconociendo las ventajas y los usos adecuados en los experimentos de investigación. Por lo pronto, es importante destacar que para los fines de reconocimiento de zonas corticales en tareas que implican movimiento, es probablemente la técnica que sufre menos alteraciones; volviéndola una herramienta ideal para el análisis relacionado al sistema vestibular. Acerca de los métodos de procesamiento de información a partir de las señales generadas por fNIRS, aún no es posible hallar coincidencias plenas, pero sí se registran avances en cuanto a corrientes de conocimiento que pueden ser adoptadas de acuerdo con los fines propios de cada trabajo de investigación. Una de las contribuciones de este trabajo, corresponde a este rubro; detectando métodos y modelos útiles para clasificar señales del cercano infrarrojo.

Capítulo 4

Método

El flujo de trabajo en este proyecto de investigación, comenzó desde el acopio de información hasta lograr la clasificación de distintas categorías. El desarrollo se explica a continuación, y se ilustra en el siguiente diagrama:

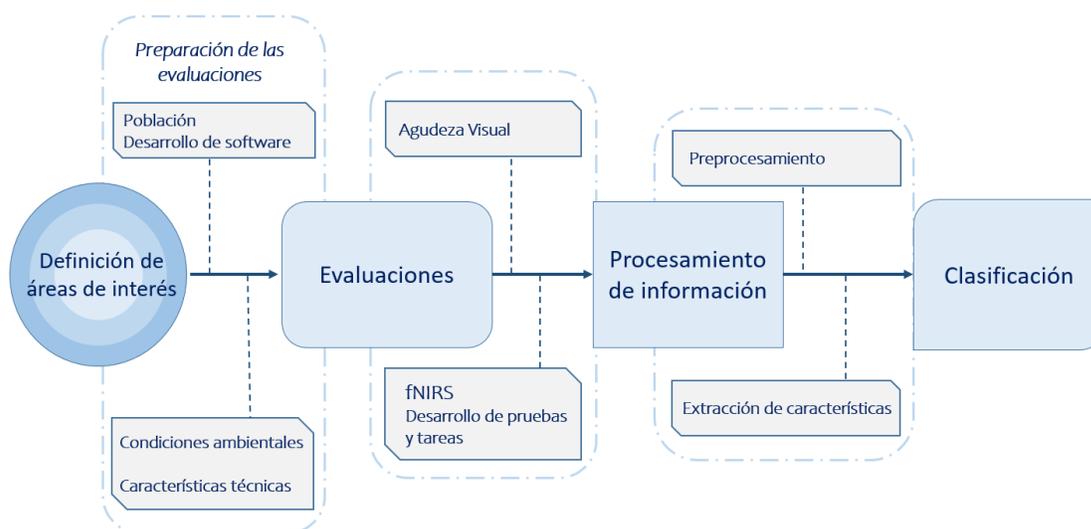


Figura 4.1: Desarrollo del método ejecutado

Para llevar a cabo la obtención de datos relevantes a este proyecto, se atendieron consideraciones en cada aspecto: anatómico y fisiológico; con el objetivo de desarrollar una estructura de clasificación de señales obtenidas a partir de los niveles de flujo hemodinámico cortical, que permitiera distinguir el comportamiento asociado a la acción de atención lateral en los sistemas vestibular y visual.

Después de reunir segmentos de información general pertinente, se diseñó un experimento que habría de desarrollarse en distintas etapas: definición de áreas a explorar, definición de evaluaciones, adquisición de datos, procesamiento de la información adquirida.

4.1. Definición de áreas de interés

Teniendo en cuenta que la información sensorial creada al tener un estímulo sobre el sistema vestibular es principalmente procesada en 2.6.2; y de la misma manera, el área cortical donde existe mayor influencia de la información generada al tener un incentivo dedicado al sistema visual es la correspondiente a la parte occipital 2.5.1; se diseñaron dos configuraciones diferentes para la exploración de la actividad hemodinámica en estos espacios de interés.

Los montajes creados se muestran a continuación:

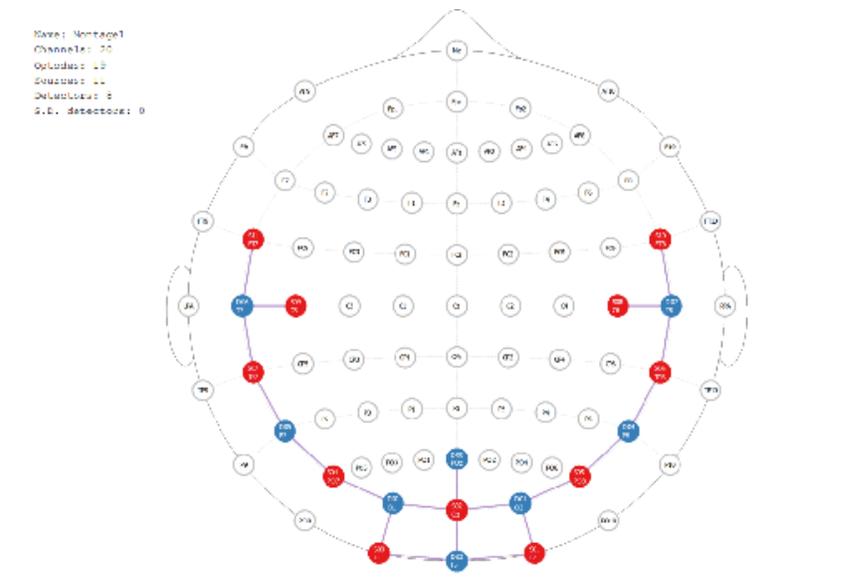


Figura 4.2: Montaje 1. Enfoque en lóbulos occipital y temporales

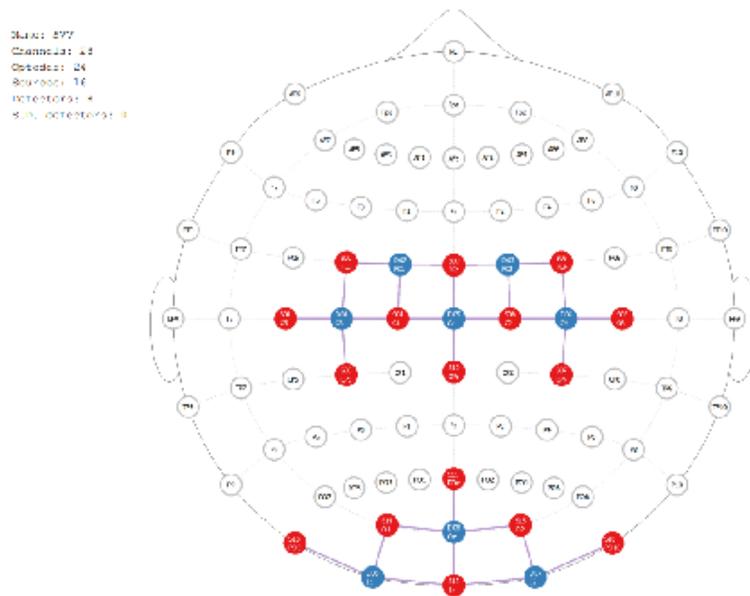


Figura 4.3: Montaje 2. Enfoque en lóbulos occipital y parietales

Después de probar ambos arreglos, considerando el propósito de este trabajo, se tomó la decisión de conducir la siguiente etapa con el montaje presentado en 4.3; tomando en cuenta que registra mayor información de las señales afines a los sistemas, asociadas al estímulo de las tareas; y que la influencia de los estímulos externos es menor (por ejemplo, las reacciones ante movimientos y la incorporación no deseada de señales relacionadas a la audición, respectivamente).

4.2. Preparación de las evaluaciones

Debido a que los sistemas sensoriales de interés (visual y vestibular), pueden estar involuntariamente activos y reaccionan permanentemente a estímulos espaciales cotidianos, las pruebas para la primera etapa fueron diseñadas para descubrir la reacción cortical ante un estímulo dedicado específicamente sobre una sola dimensión: el eje horizontal.

Los resultados están directamente relacionados con las capacidades visuales, por eso, los criterios de inclusión de la población se centran principalmente en las condiciones de salud visual de los sujetos de estudio.

Población muestra	
Edad	24 - 30 (años)
Agudeza visual	20/20
Género	Masculino

Tabla 4.1: Características generales de la muestra

4.2.1. Características de la población de muestra

Para definir la población, se consideró el entorno en donde se realiza este proyecto: el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; tomando en cuenta la población de estudiantes activos en los posgrados de maestría, de las generaciones 2021 y 2022.

Las consideraciones de la edad fueron definidas a partir de las características orgánicas que se han registrado en el ser humano 2.5.1. Y como se mencionaba anteriormente, las condiciones del estado de salud visual de los sujetos, también resultaban determinantes. Con esto, la composición de la población muestra se describe a continuación y se resume en la tabla 4.1:

- *Al momento del estudio, se contaba con una población activa de 87 individuos masculinos inscritos en el posgrado de maestría, dentro del rango de edad entre 24 años y 30 años.*
- *En este proyecto, se evaluaron 19 sujetos, que de acuerdo con la fórmula para cálculo de población (4.1), considerando la población total (N), para los resultados obtenidos, se estima que el nivel de confianza es del 90 %, teniendo un margen de error del 17 %.*

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p_0 \cdot q_0}{d^2} \quad (4.1)$$

- *Todos los sujetos gozaban de plenas capacidades físicas y facultades mentales, con un estilo de vida considerado saludable.*

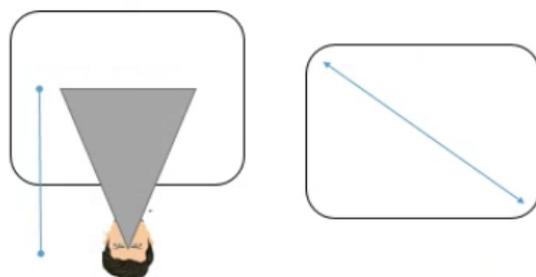


Figura 4.4: Datos para cálculo de ruta de optotipo: al campo central de la visión y ajuste al tamaño del monitor

4.2.2. Desarrollo del programa para evaluación

Durante las pruebas de espectroscopia, se consideró evaluar las respuestas sensoriales ante un estímulo focalizado; para esto se ha desarrollado un programa que consiste en la proyección de un optotipo móvil con rutas definidas, inspirado en las evaluaciones de agudeza visual dinámica (AVD). Para la caracterización del optotipo, se tomó en cuenta el uso de uno de los nueve optotipos presentes en los tableros de Snellen (2.5.3), con el propósito de presentar un objetivo más familiar para los sujetos; así mismo, se procuró generar un óptimo contraste de color (considerando que éste sucede al tener una superficie de un color junto a otra superficie en un color opuesto).

Con esto, el optotipo seleccionado está inspirado en la letra O, con una superficie en color blanco que se proyecta sobre un fondo negro, con la intención de conseguir el mayor contraste posible entre ambas superficies; permitiendo además, disminuir componentes de información en la señal, que pudiera atribuirse a un esfuerzo visual para el sujeto respecto a la apreciación del objetivo. Acerca del tamaño, el mismo programa desarrollado permite personalizarlo de acuerdo a las condiciones de la evaluación; para eso, se habilita una ventana para configurar los valores que generarán un optotipo adaptable a las características técnicas propias de las herramientas de evaluación, como el tamaño del monitor, la densidad del monitor y la distancia a la que se encuentra el sujeto.

La trayectoria del optotipo, también se establece de acuerdo con la distancia formada entre el sujeto y el monitor donde se proyecta, y el tamaño de éste último.

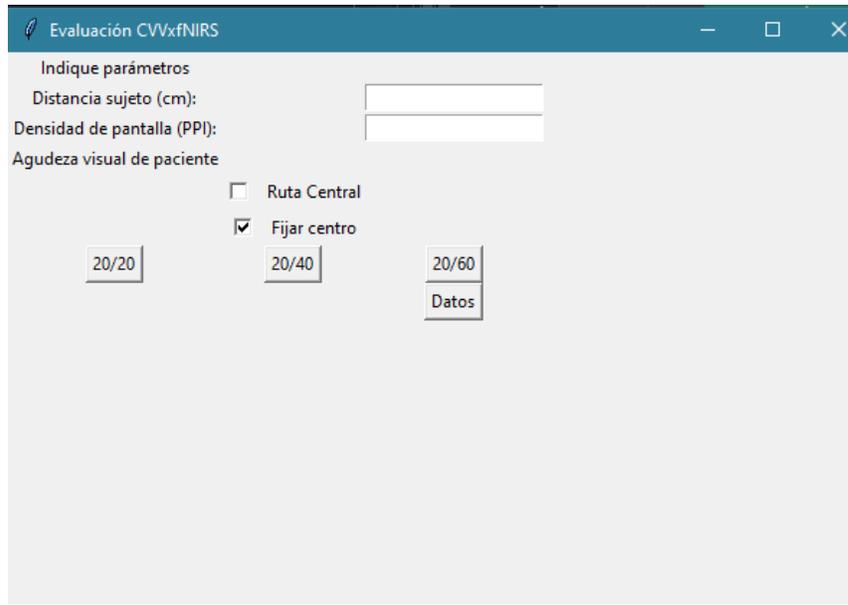


Figura 4.5: Interfaz de parámetros de la evaluación

Como se describe a continuación, el programa toma la información del hardware para calcular el alcance de dos trayectorias que habrá de repetir al momento de realizar las evaluaciones: A partir de la fórmula trigonométrica expresada en 4.2, el programa es capaz de determinar el punto en el monitor, en el que desde la distancia en la que se encuentra el sujeto, se genera un ángulo de 15° partiendo del centro del monitor hacia cada lado, respecto a su posición visual. En la siguiente trayectoria, el optotipo concluye el recorrido partiendo del centro hacia cada uno de los bordes.

$$\tan \angle = \frac{\textit{opuesto}}{\textit{adyacente}} \quad (4.2)$$

Adicionalmente, cuando se cuenta con un monitor con tecnología LCD, al momento de iniciar el programa, se despliega una imagen con el test de contraste de **lagom.nl** (4.6), procurando ajustar las propiedades técnicas de la pantalla con el ambiente, para conseguir una mejor calidad de imagen, brillo y contraste.

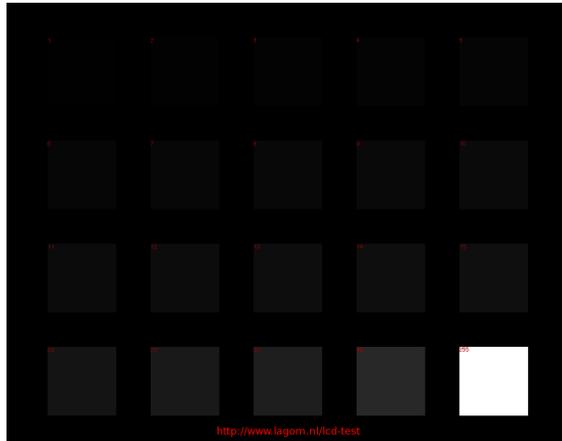


Figura 4.6: Test de contraste LCD de *lagom.nl*

4.3. Condiciones ambientales

4.3.1. Laboratorio de bioseñales

Las evaluaciones fueron realizadas en el laboratorio de bioseñales del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Las características de la sala son mencionadas en 4.2.

Características de la sala de experimentación	
Superficie de trabajo	4m ²
Exposición a fuentes de iluminación	Controlado
Condiciones auditivas	Sujeto a condiciones externas
Privacidad	Adecuada y controlada
Temperatura	Templada
Ventilación	Adecuada /opción de ventilador

Tabla 4.2: Condiciones ambientales en sala de experimentación

Considerando entonces las propiedades de este espacio, al momento de realizar las evaluaciones de espectroscopia, la situación del ambiente de experimentación fue la siguiente:

- El sujeto se situó a una distancia de 80cm desde el objetivo proyectado.
- La habitación permaneció sin otra fuente de iluminación activa, distinta a la de los monitores o las propias del equipo de evaluación.
- Las condiciones de temperatura, por lo general, fueron adecuadas para mantener un estado de tranquilidad en los sujetos. Cuando el horario lo demandaba, el uso de un ventilador mantenía estable el ambiente.
- Los ruidos externos quedan fuera de la capacidad de control, pero por las consideraciones realizadas desde la planeación de la prueba, no fueron relevantes al momento de adquisición de las señales.

4.4. Características técnicas del equipamiento

En cuanto a las especificaciones técnicas del equipo para la adquisición de señales por espectroscopia del cercano infrarrojo, así como el gorro empleado para la colocación de los optodos como principal accesorio, también se detallan en las tablas 4.3 y 4.4, respectivamente.

Finalmente, en lo que respecta a las proyecciones en la evaluación dónde se recogen las bioseñales relacionadas al flujo hemodinámico cortical, se presentaron a través de un monitor con las características que se incluyen en la tabla 4.5.

Características de monitor de proyección	
Marca	Samsung
Tamaño	32"
Densidad	100 DPI
Tecnología	LED

Tabla 4.5: Características de monitor

Características de equipamiento fNIRS	
Marca	NIRx
Modelo	NIRScout
Cantidad de optodos	24
Detectores	8
Fuentes de luz	16

Tabla 4.3: Detalles equipo de espectroscopia (fNIRS)

Características gorro para medición	
Marca	Easycap
Modelo	NIRScap
Tamaño	Adulto

Tabla 4.4: Características gorro

4.5. Procedimiento de las evaluaciones

4.5.1. Evaluación de agudeza visual

La información relacionada con el estado de salud visual, se obtuvo después de llevar a cabo evaluaciones de agudeza visual estática, conducidas por personal especializado. La información correspondiente a los resultados de estas evaluaciones, se ha adherido a la base de datos de manera individual.

4.5.2. Evaluación de espectroscopia por el cercano infrarrojo

Para llevar a cabo el estudio, los sujetos fueron citados en el laboratorio de experimentaciones y permanecían en descanso aproximadamente durante 15 minutos para garantizar un estado de reposo previo a la evaluación.

Al pasar al área de evaluación, se dispuso de un asiento frente al monitor donde habría de proyectarse el optotipo y se les colocó el gorro (4.4) con el arreglo de optodos y fuentes luminosas situados en las zonas de interés (4.3). Durante el registro de las bioseñales, los sujetos permanecían sentados justo frente al centro del monitor, a una distancia de 80cm.



Figura 4.7: Etapa I. Parche en ojo derecho, ojo izquierdo habilitado.

Como se mencionaba en subsecciones anteriores, las señales se obtuvieron con el equipo de espectroscopia NIRScout (4.3), a una frecuencia de muestreo de 3.9Hz (predeterminada por el sistema); mediante el uso de 16 fuentes de iluminación y 8 detectores, generando en total 28 canales directos 4.3.

La habitación se condicionó para permanecer oscura durante la adquisición de las señales ópticas, en cada prueba por sujeto.

Como inicio de la evaluación, el programa era ejecutado para presentar la proyección a los individuos portando el casco, frente al monitor y con las luces de la habitación apagadas.

La evaluación se condujo en cuatro pruebas que evaluaban distintos características; tres de ellas con cuatro diferentes tareas, y la última prueba con tres. Los detalles se describen a continuación:

4.5.3. Descripción de las pruebas

Etapa I

Para llevar a cabo la primera etapa, se colocaba un parche en el ojo derecho de los sujetos, que inhibía los estímulos hacia el órgano, y permitía incentivar solamente al ojo izquierdo (4.7). Después de permitir un momento para lograr una habituación, el programa de la proyección se ponía en marcha y se llevaban a cabo las tareas designadas (4.5.4, 4.5.4, 4.5.4, 4.5.4).



Figura 4.8: Etapa II. Parche en ojo izquierdo, ojo derecho habilitado.

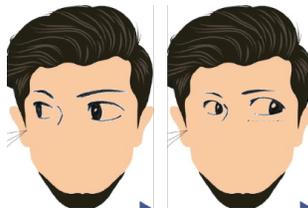


Figura 4.9: Etapa II. Vista binocular (movimiento de persecución).

Etapa II

Después de realizar las cuatro actividades con las condiciones de la *etapa I*, el parche del ojo derecho se retiraba y se les permitía un descanso para volver a adaptarse a la visión binocular. Enseguida, el parche era colocado sobre el ojo izquierdo, con la misma intención de la etapa anterior: permitir que solamente un ojo sea estimulado (4.8).

Nuevamente se presentaban las primeras cuatro actividades descritas en las tareas (4.5.4).

Etapa III

En esta etapa, el parche era retirado del ojo izquierdo para permitir nuevamente la vista binocular (4.9). Después de un tiempo de descanso que permitiera una buena adaptación, nuevamente se proyectaban las cuatro actividades descritas en 4.5.4, 4.5.4, 4.5.4 y 4.5.4.



Figura 4.10: Etapa IV. Vista binocular (mov. fijación) y movimientos de cabeza con ojos cerrados.

Etapa IV

Para esta última etapa, con los dos ojos habilitados, se llevaban a cabo las tareas 4.5.4 y 4.5.4. Destacando que con los datos generados con esta y la primera parte de la etapa anterior, se puede realizar una comparación entre los dos tipos de visión (de persecución y fijación). Después de realizar estas dos actividades, es ejecutada la última tarea (4.5.4); con el objetivo de permitir detectar solamente la actividad vestibular por movimiento de cabeza. 4.10

4.5.4. Descripción de las tareas

Manteniendo el propósito de evaluar las variaciones del flujo hemodinámico respecto a las acciones que ejecutan los sistemas visual y vestibular, las tareas fueron diseñadas con la intención de comparar la respuesta ante diferentes maneras de estimulación; por ejemplo movimientos puramente visuales, movimientos de cabeza persiguiendo un objetivo con la vista, o movimientos de cabeza sin estímulo visual. Además, se presentaron tareas adicionales con la intención de comparar la información obtenida al presentar estimulación que provocaba dedicar la atención al campo central y al campo periférico.

Este conjunto de tareas que se ejecutaba por cada una de las etapas anteriormente señaladas, es detallado a continuación:

Tarea I

La tarea consistía en seguir al optotipo con la vista, moviendo los ojos de acuerdo con la trayectoria, pero procurando mantener la posición de la cabeza fija.

La proyección del optotipo partía desde el centro del monitor hasta alcanzar el borde de un lado. En ese momento vuelve a aparecer en el centro para ir hacia el lado contrario. Estos movimientos ocurren tres veces hacia cada dirección, antes de volver a aparecer en el centro del monitor y permanecer por unos segundos en esa posición. Enseguida, las apariciones permanentes ocurren nuevamente en los límites de manera alternada. Los sujetos debían ubicar la vista hacia el optotipo, nuevamente sin permitirse movimientos de la cabeza. Al igual que con el objetivo en movimiento, los cambios de posición ocurren tres ocasiones por cada acción.

Tarea II

Después de un descanso por algunos segundos, se hacían las configuraciones para modificar la trayectoria del optotipo en la siguiente acción.

De acuerdo con los cálculos hechos a partir de las condiciones de la evaluación, nuevamente el optotipo parte del centro del monitor pero se detiene al llegar al punto donde habría de generarse un ángulo de 15° con respecto a la posición del sujeto. Después de eso, nuevamente parte del centro hacia la otra dirección al punto donde también formará 15° respecto al ángulo visual. Como en la tarea previa, esta acción se repite tres veces por cada dirección.

En cuanto a los eventos de aparición permanente del optotipo, también comienza en el centro y el siguiente punto es el límite hacia la derecha marcado anteriormente; el último punto es el límite hacia la izquierda también marcado anteriormente. Ocurre tres veces durante cinco segundos, por cada posición.

De forma similar a la primer tarea, los sujetos siguen la ruta del optotipo con la vista, sin permitirse el movimiento de la cabeza.

Tarea III

En esta tarea, el optotipo en el centro del monitor, es acompañado por una pequeña línea que funge como referencia de la posición. El optotipo nuevamente emprende las mismas rutas y movimientos que se describen en la segunda tarea (en la superficie del monitor, a 15° en cada lado con respecto a la posición visual del sujeto), pero ahora los sujetos mantienen la vista fija en la marca de referencia.

Tarea IV

Al igual que en la tarea inmediata anterior, la aparición del optotipo es acompañada por una marca de referencia. En esta ocasión, la trayectoria y posiciones que cubre el objetivo visual, usan los mismos datos que fueron descritos en la primera tarea (el centro y los bordes del monitor). También, como en la tarea número tres, los sujetos deben posar la vista en la marca de referencia mientras el optotipo ejecuta los cambios de posición.

Tarea V

Para llevar a cabo esta tarea, se ejecutaba la proyección descrita en 4.5.4, donde el optotipo alcanza como dimensiones máximas los bordes del monitor. Esta actividad, tenía que realizarse permitiendo el movimiento de cabeza para ubicar la posición del objetivo, es decir, ejecutando la visión de fijación.

Tarea VI

De manera similar a la tarea anterior, el propósito de esta tarea era analizar la actividad de la vista de fijación, siguiendo al optotipo con la vista fija y moviendo la cabeza de acuerdo con el cambio de posición. La ruta que seguía en esta ocasión, es similar a la que se proyectaba en 4.5.4: con los límites de la trayectoria en el punto donde se forman los 15° respecto al sujeto.

Tarea VII

Esta actividad consistía principalmente en incentivar las señales vestibulares; para esto, al iniciar se pedía a los sujetos mantener los ojos cerrados con la posición de la cabeza hacia el frente, durante los siguientes cinco segundos movían la cabeza hacia el lado derecho, después nuevamente volvían al centro, y en los siguientes cinco segundos movían la cabeza hacia el lado izquierdo. Estas acciones eran repetidas tres veces, cada una. Siempre manteniendo los ojos cerrados.

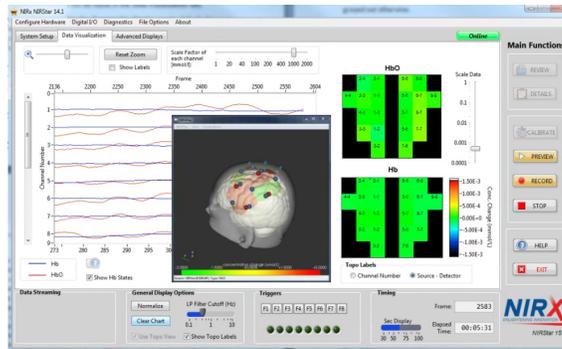


Figura 4.11: Interfaz NIRStar 15.2

4.6. Procesamiento de información

4.6.1. Herramientas

En la adquisición de la información se utilizaron un par de programas diseñados por el fabricante del equipo de espectroscopia (NIRx); el software NIRStar, en su versión 15.2, que es un programa desarrollado principalmente para el control y visualización de la información obtenida por cualquiera de los equipos de la gama de NIRx (de los cuales, en esta ocasión se usó un NIRScout)(4.11); y NIRSPay, que funciona como un programa complementario para generar representaciones topográficas de la medición cortical.

El procesamiento de la señal, que es el tratamiento de los datos, también es normalmente conducido con herramientas digitales, es decir, vía *software*. Dentro de estos, existen numerosos métodos disponibles con algunas variaciones en resultados, de acuerdo con la aplicación utilizada. Muchos programas desarrollados para el análisis científico (como *MATLAB*), tienen prestaciones especializadas que permiten obtener ligeras mejorías en los resultados en algunos estudios comparado contra otros *softwares* generales, con el inconveniente de ser de uso bajo licencia. En este rubro, al llevar a cabo este trabajo, se contemplaron dos opciones: *nirsLAB*, otro de los programas desarrollados por el fabricante del equipo de espectroscopia (NIRx); y un programa ejecutado por un código creado a través del lenguaje de programación *Python*. Este último es el que se consideró de manera general.

En las siguientes líneas, se efectúa una breve descripción del procedimiento practicado para el análisis de este conjunto de datos.

4.6.2. Segmentación

En la planeación del experimento, se procuró tener una primera segmentación desde la adquisición de datos de acuerdo con las etapas que se llevaron a cabo: 1) Prueba de ojo izquierdo (4.5.3), 2) Prueba de ojo derecho (4.5.3), 3) Prueba con ambos ojos (4.5.3), 4) Prueba con movimiento de cabeza (4.5.3).

Una nueva división de la información de interés también ha tenido que realizarse después de la adquisición; la grabación de cada prueba tiene un tiempo variable entre cada sujeto evaluado, mas no difiere en lo correspondiente a la exposición al estímulo. Para mejorar la selección de las zonas de interés, durante la captación de datos se aprovechó una de las funciones que provee NIRStar, referente a los marcadores de tiempo. Así, dentro de cada grabación, es posible detectar los intervalos útiles correspondientes a las tareas a evaluar (4.5.4). Esta actividad se llevó a cabo a través de los dos programas designados para la evaluación. La imagen (4.12) mostrada a continuación, demuestra la forma en la que es posible identificar los segmentos de información de interés en la señal, tanto por medio de nirsLAB, como a través del programa creado con Python, para su posterior extracción.

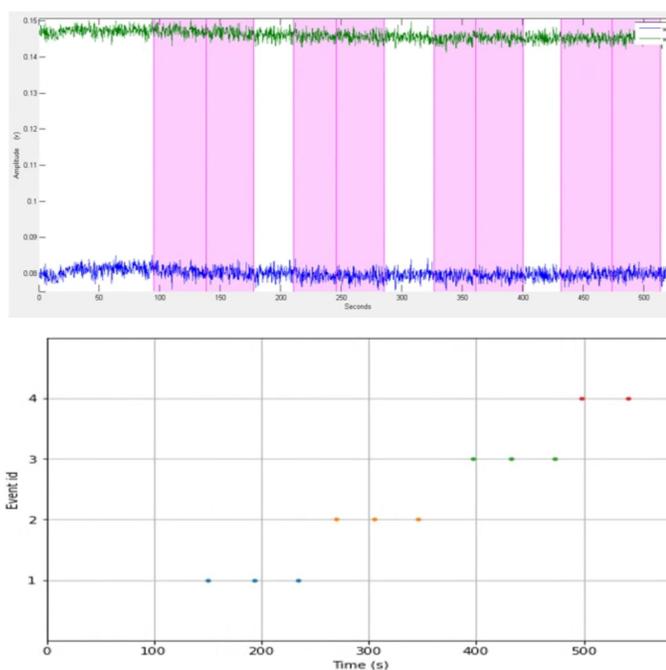


Figura 4.12: Visualización de marcadores (*annotations*). Arriba, nirsLAB. Abajo, por Python.

Después de haber identificado en la señal, el tiempo correspondiente a la información de interés, en este trabajo, se prosiguió a la unión de dichos segmentos, para formar una señal completa de utilidad. En la imagen (4.13), es posible apreciar un ejemplo del resultado de una señal extraída y formada, comparando ambas herramientas digitales de análisis.

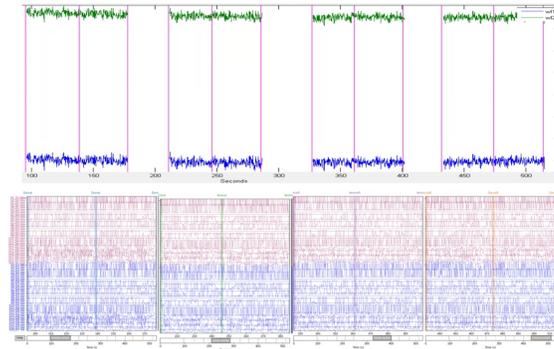


Figura 4.13: Ejemplo de una nueva señal, creada a partir de la información de interés (Arriba, en promedio, por nirsLAB. Abajo, multicanal, por Python).

4.6.3. Visualización

Una de las partes necesarias para interpretar la información, que probablemente es el primer acercamiento, es la visualización; la cual puede llevarse a cabo en distintas maneras: a través de la morfología de la señal, mediante una exposición gráfica que represente un mapa de calor o simplemente de manera numérica. Para el tratamiento de los datos de este estudio, al igual que en la etapa de segmentación fueron utilizadas las dos herramientas digitales: Python y nirsLAB (NIRx). El trabajo llevado a cabo en Python, se desarrolló basado en el uso de la librería MNE [Gramfort et al., 2013], cuyo enfoque es precisamente hacia la visualización y análisis de datos neurofisiológicos.

En la imagen 4.14, nuevamente se presenta el ejemplo basado en uno de los casos del estudio, para realizar una comparación entre ambos programas respecto a la visualización de la señal de un sujeto. Otra de las maneras en las que es posible visualizar la información obtenida, es a través de un representación topográfica a manera de un mapa de calor de la información cortical. Por ejemplo, en la imagen 4.15, se presentan algunas de las formas en las que es posible apreciar la información por medio del programa desarrollado en Python.

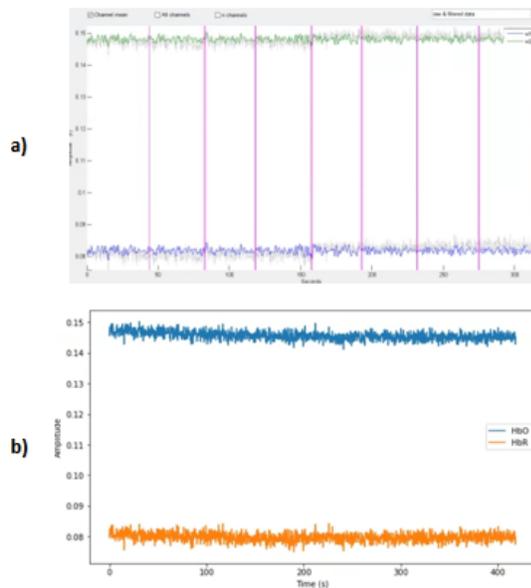


Figura 4.14: Comparación visualización promedio de señal por canal: a) *Interfaz nirsLAB*, b) *Representación en Python*

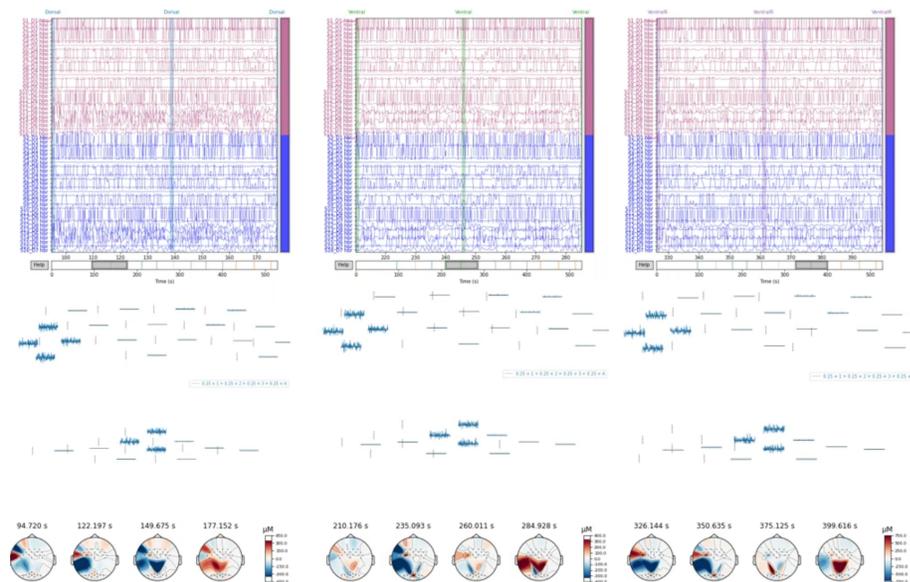


Figura 4.15: Diferentes tipos de visualización por Python-MNE.

4.6.4. Preprocesamiento

Durante el preprocesamiento de la señal, se procura llevar a cabo intervenciones que permitan lograr un tipo de información depurada, libre de componentes que no pertenecen a la información que se busca; para esto, es necesario conducir la aplicación de filtros, que eliminan principalmente las secciones correspondientes a artefactos o ruido no deseados. En este caso, como se ha indicado en trabajos previos, los filtros apropiados para eliminar ruidos fisiológicos oscilan entre 0.1Hz - 0.5Hz; sin embargo, la librería usada en este estudio (MNE), sugiere un óptimo funcionamiento con un filtro de banda comprendida entre 0.05Hz a 0.72Hz.

De acuerdo con el procedimiento en el tratamiento de los datos referentes a fNIRS, al obtener la información en formato crudo, es preciso hacer una conversión de la información a valores de la densidad óptica (absorbancia). Y como se ha visto en 2.8.3, también se tienen que considerar factores como la distancia y la concentración de la sustancia; esto es posible aplicando la propiedad de la ley de Lambert-Beer, desarrollada dentro de la misma librería de Python-MNE [Gramfort et al., 2013].

Como resultado, después del procesamiento anterior, se obtiene la separación de la información en valores de hemoglobina (oxigenada y desoxigenada), como se muestra en la imagen 4.16.

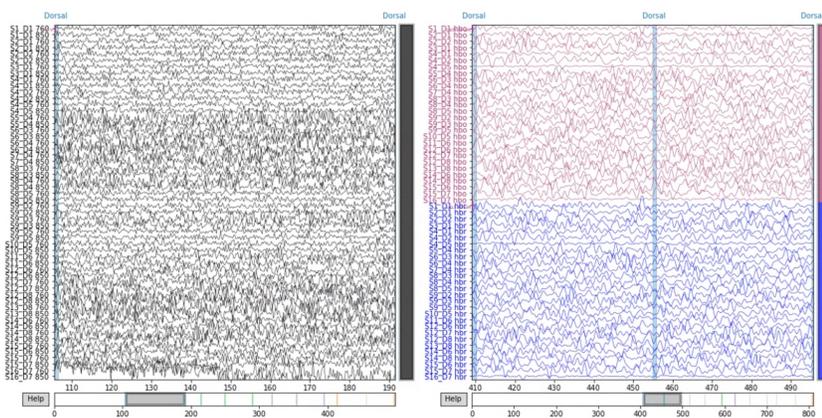


Figura 4.16: Señal en valores crudo (izq) y de hemoglobina (der)

4.6.5. Extracción de características

Cuando se trabaja con datos de fNIRS, es posible llevar a cabo distintos tipos de análisis a partir del mismo conjunto de información, es decir, la información puede ser tratada desde enfoques distintos, por ejemplo:

- **Hemoglobina oxigenada (HbO)**. En ciertas ocasiones, tomar en cuenta solamente a los valores correspondientes a HbO, puede aportar un resultado más útil y distinto al que se tendría si se incluye más información sobre los datos analizados. La manera en la que se procesó la información pertinente en este trabajo, es a través de la selección de los canales correspondientes a la hemoglobina oxigenada. Creando una base de datos que contempla este tipo de datos, para su posterior tratamiento.
- **Hemoglobina desoxigenada (HbR)**, de manera similar a HbO, en otras ocasiones, es posible considerar solamente los valores de hemoglobina desoxigenada. Aún no se ha identificado, en condiciones específicas, algún momento o evento que permita discernir el uso del tipo de dato; sin embargo, sí ha sido evidenciado, que los resultados obtenidos a partir de una muestra u otra, pueden ser distintos en varios estudios.

De la misma manera, también se tiene la opción de llevar a cabo un análisis considerando la información completa, es decir, ambos valores del cromóforo. En este trabajo, se ha implementado un análisis distinguido entre estos dos tipos de información.

Además, en esta etapa se contempló la obtención de los valores estadísticos correspondientes a todos los tiempos del método del tiempo estadístico (desde el primer momento hasta el cuarto momento), como son: el valor máximo, promedio, raíz cuadrada, varianza, kurtosis, entre otros (A.3). La aplicación de una matriz de correlación, se tomó como una medida para conocer y seleccionar las características más útiles, con el objetivo de conocer los valores que generarían mayor efectividad en los siguientes pasos para realizar una correcta clasificación de categorías. Este método también ofrece como ventaja, la claridad y facilidad de manejo de la información. En la imagen a continuación (4.17), se presentan ejemplos de las matrices de correlación en alguno de los casos de estudio en este trabajo.

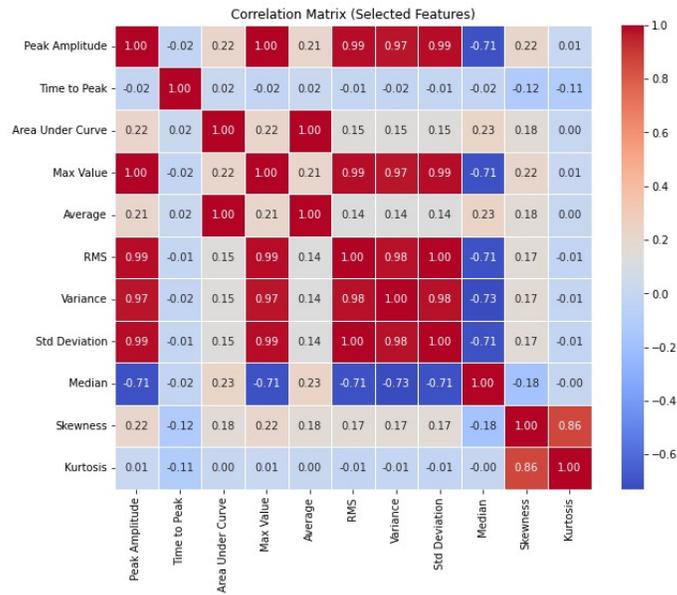


Figura 4.17: Matriz de correlación usada en uno de los casos de estudio.

4.6.6. Clasificación con selección automática

Basado en las observaciones que permite la matriz de correlación, se determinan las variables estadísticas que son más útiles para detectar similitudes en los grupos de información. Al principio de esta investigación, las observaciones y la selección de tales características se realizó de forma manual y cavilada, en lo que se podría considerar como un método supervisado, persiguiendo la obtención de un resultado con mayor precisión. Las imágenes 4.18 y 4.19 describen de manera resumida en que se lleva a cabo la selección de las características basada en una matriz de correlación.

Después de haber valorado las características que pudieran generar mejor rendimiento, se llevó a cabo la aplicación de los modelos de clasificación. Como otro de los productos derivados de este trabajo, se hacen comparaciones entre la precisión de cada modelo en las distintas categorías. La consideración de los modelos se basó en algunos que han sido previamente usados en otros estudios, y en la implementación de otros que han sido probados para el análisis de otro tipo de datos; estos se mencionan a continuación:

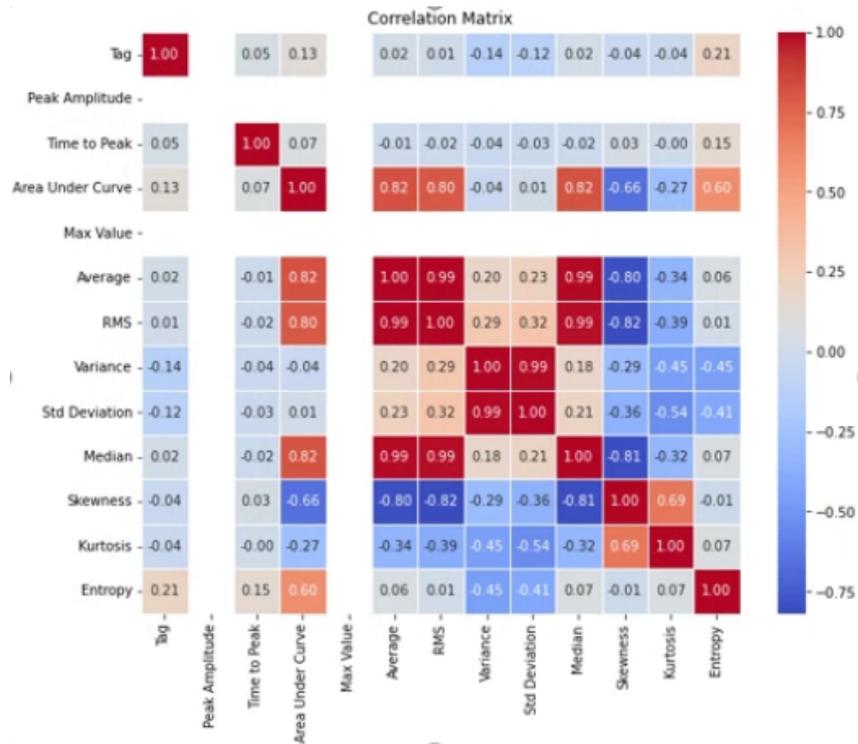


Figura 4.18: Matriz de correlación con todas las características estadísticas



Figura 4.19: Matriz de correlación con mejores características valoradas

- **SVM** (con todos los tipos de kernel)
- **SVM - (StandardScaler)** (con todos los tipos de kernel)
- **Regresión logística**
- **Gaussian Naive Bayes**
- **Modelo Lineal General (binario)**
- **Random Forest**
- **Boosted Trees**
- **KNN**

Como se ha mencionado anteriormente, todos los procesos han sido desarrollados en el lenguaje de programación Python.

Como una alternativa que pudiera mejorar y simplificar el proceso, se buscó implementar un código que permite conocer la precisión obtenida al contemplar todas las características planteadas, y posteriormente ir dejando fuera de consideración cada propiedad que se ajusta menos a una distribución esperada; claramente, esta acción es proseguida por una evaluación en cada nueva configuración, con el objetivo de hallar la mejor combinación entre método, número y selección de características.

Esta etapa selectiva automática, en principio, utiliza la evaluación de *chi cuadrada* (X^2), para determinar las características a considerar en cada implementación. El mismo código contiene la instrucción de almacenar los resultados de estas combinaciones en dos nuevas bases de datos; una conteniendo todos los resultados, y otra que separa los mejores resultados.

Estas estimaciones son aplicadas a diferentes configuraciones que incluyen distintos canales, y mejoramientos de ajuste y escalamiento de los mismos; es decir, se contemplan diferentes arreglos que hacen posible la comparación entre los mismos grupos de datos que comparten semejanzas en cuanto a la acción, pero también presentan diferentes detalles de ejecución; así, respecto a los canales examinados, las inclusiones en general, originan las siguientes categorías:

Todos los canales

A partir del arreglo de los optodos que se ha elegido (4.3), se han generado 28 canales con dos tipos de longitud de onda; haciendo que en total se cuente con 56 canales de información. La clasificación referente a estos canales se ejecutó con tres enfoques:

- Clasificación de 56 canales (total).
- Clasificación de 28 canales (HbO).
- Clasificación de 28 canales (HbR).

Región somatosensorial

La formación de la configuración de los optodos, desde el inicio fue pensada en evaluar dos sistemas en específico. Uno de ellos es referente a las sensaciones internas y de movimientos, donde tiene una participación activa el sistema vestibular, de tal manera que se ha enfocado en una zona cortical atribuida a este mismo sistema: la corteza somatosensorial. Teniendo esto en cuenta, como es posible apreciar en la 4.20, que señala la zona, esta configuración produce 18 canales, a partir de cinco detectores y 10 emisores de luz infrarroja; en consecuencia, de estos mismos hay 36 canales, considerando 18 correspondientes a HbO y 18 que corresponden a HbR.

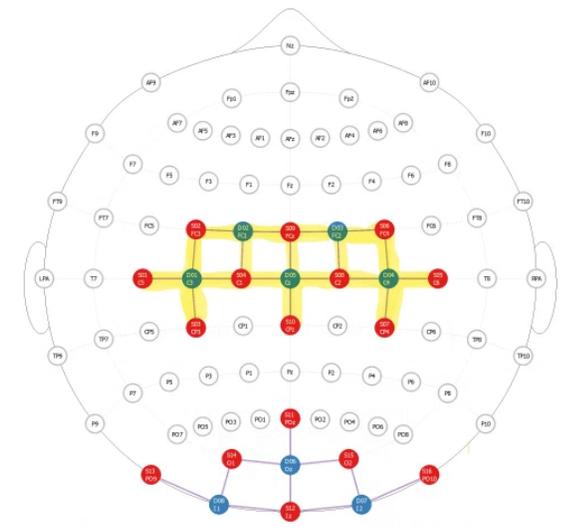


Figura 4.20: Región somatosensorial

Región visual

En una situación similar a la explicada anteriormente, la otra región a la que se enfoca esta configuración del estudio, es la región visual (4.21).

Aquí se tienen tres detectores y seis emisores de luz, que generan 10 canales, donde cada tipo de longitud de onda es representado con cinco canales.

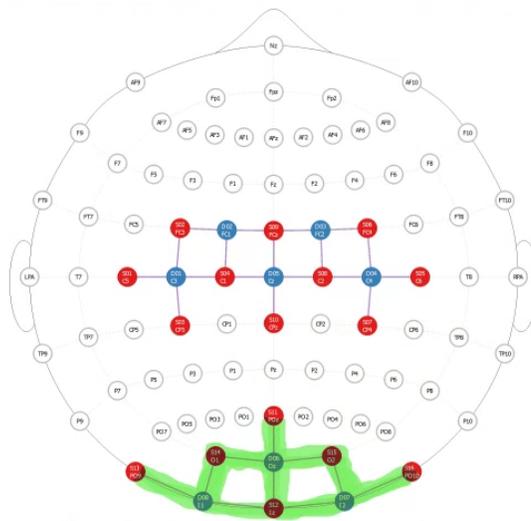


Figura 4.21: Región visual

A cada conjunto de datos correspondiente a esas tres categorías generales, se le sometió a los procesos de ajuste al aplicar las técnicas de estandarización y normalización, lo que significa que por cada grupo de datos se tienen nueve bases de datos, de los cuales, los mejores resultados de clasificación se presentan en la tabla que es separada desde la composición del algoritmo, obtenidos después de la selección descrita en 4.6.6.

Además, a partir de las mismas configuraciones de información, también se llevan a cabo procesos de clasificación que consideran tres estados diferentes en cuanto a los datos:

- **Datos puramente preprocesados**
- **Datos normalizados**
- **Datos estandarizados**

Con esto, de las bases de datos mencionadas con anterioridad, se tienen tres versiones distintas que corresponden a estos últimos ajustes de la información.

Existe un grupo más que se crea a partir de la comparación particular que se realiza. El objetivo es averiguar si es posible mejorar la precisión, al ajustarse a canales específicos. En la siguiente subsección, se señalan las categorías que fueron examinadas en este trabajo.

4.6.7. Categorías sometidas a comparación

Otra de las técnicas estadísticas de las que se hizo uso en el desarrollo de este trabajo, es la evaluación de Wilcoxon, con la que se han podido detectar los canales específicos en los que existe una diferencia significativa en cuanto al comportamiento de la señal, al ejecutar las mediciones mientras se llevaban a cabo las tareas.

Movimientos de visión

En el caso de la comparación referente a los movimientos de la visión, se consideró la información obtenida en las grabaciones correspondientes a la tarea de visión del optotipo con ambos ojos, manteniendo la cabeza fija, mientras se desplazaba (4.5.4); y la grabación mientras se veía al optotipo, siguiendo su ruta y permitiendo el movimiento de la cabeza (4.5.4). El resultado que arrojó la evaluación de Wilcoxon destaca que existe una diferencia en tres canales.

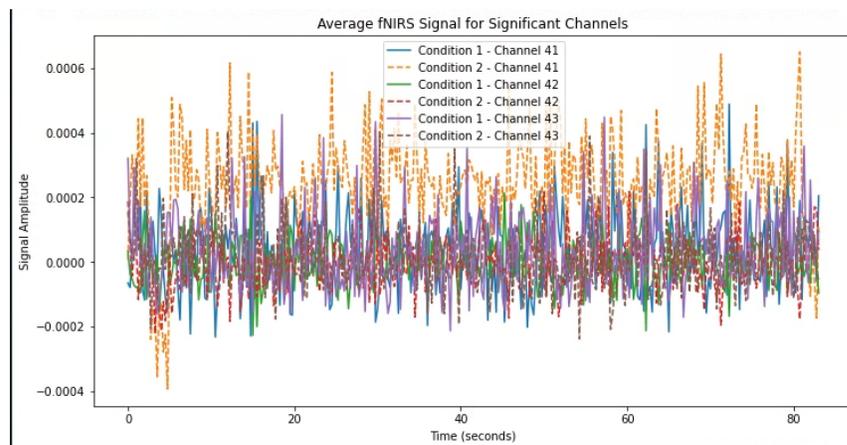


Figura 4.22: Canales con diferencia significativa (por Wilcoxon), movimientos de visión.

Después de colocar los canales indicados en un algoritmo de identificación, se ha obtenido que la zona que permite diferenciar entre estas actividades, se localiza principalmente en la parte cortical visual (4.23):

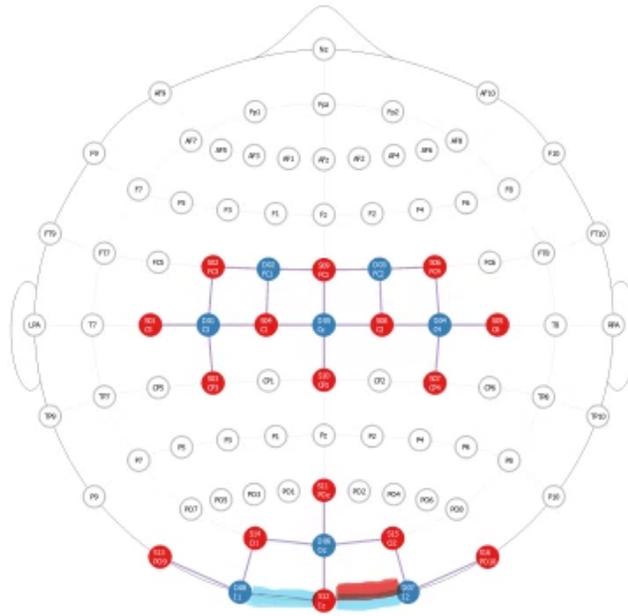


Figura 4.23: Área de enfoque (movimientos de visión).

Actividad entre ojos izquierdo y derecho

De entre todas las tareas que se diseñaron como parte de este experimento para los sujetos, también es posible llevar a cabo una comparación entre la respuesta individual que presenta la actividad de cada ojo cuando es particularmente examinado. La aplicación de la evaluación de Wilcoxon a la información obtenida referente a las pruebas de movimiento de persecución en la ruta total (4.5.4), destaca que existen 14 canales con comportamiento distinto al compararse la actividad de cada ojo (4.24).

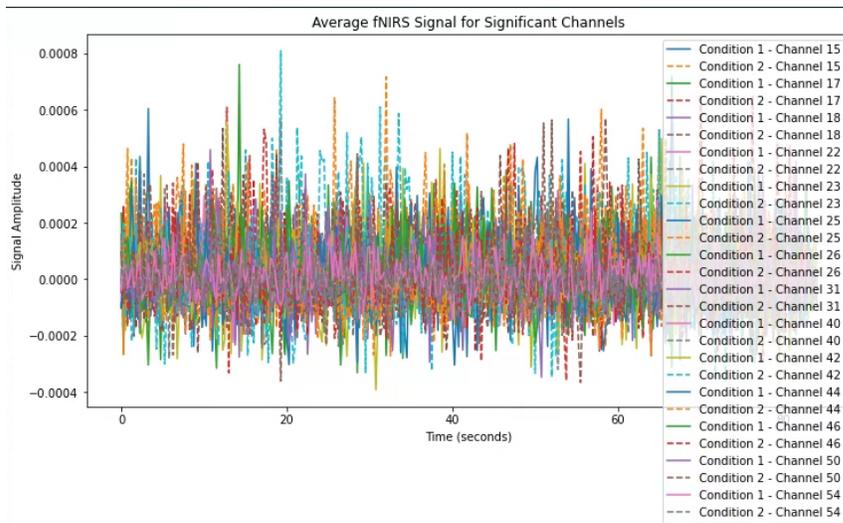


Figura 4.24: Canales significativamente diferentes (por Wilcoxon), entre ojos izquierdo y derecho.

La ubicación de estos canales se representa en la siguiente imagen:

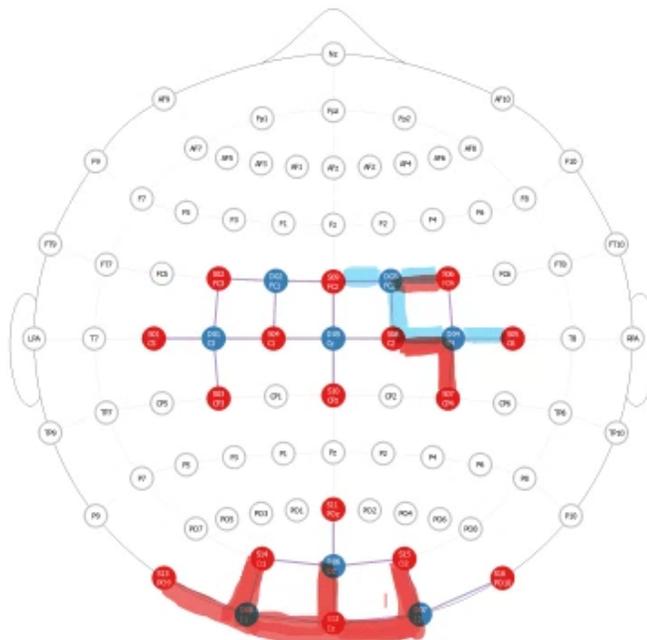


Figura 4.25: Área de enfoque (comparación de ojos)

Atención visual binocular indirecta en espacios central y periférico

En las pruebas realizadas, también podría haber un acercamiento a la detección de la actividad cortical cuando se detecta actividad en el espacio visual central y más allá de esos límites, al considerar la información obtenida desde la evaluación binocular (4.5.3), específicamente en las pruebas 4.5.4 y 4.5.4. La aplicación de Wilcoxon señala que en este caso existe una diferencia en seis canales, como se muestra en la gráfica 4.28.

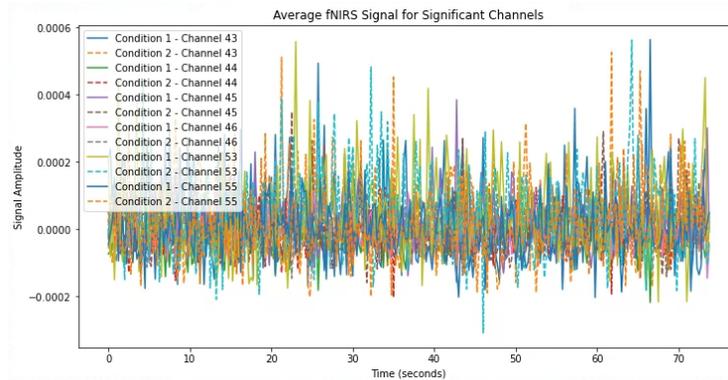


Figura 4.28: Canales significativamente distintos (por Wilcoxon), atención indirecta binocular.

En cuanto a la ubicación en la corteza cerebral, se puede identificar en la siguiente imagen:

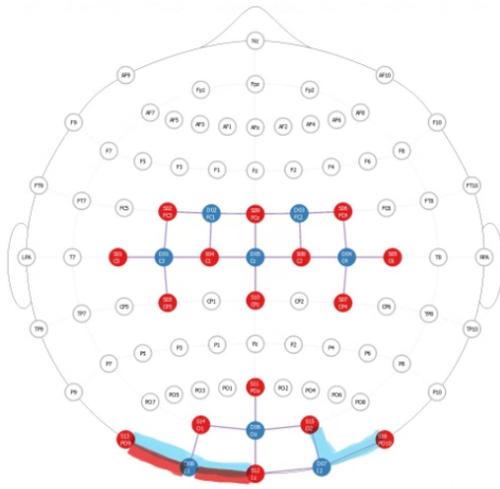


Figura 4.29: Área con mayor diferencia en vista central y periférica.

Movimiento lateral de la cabeza

Finalmente, en la última categoría que estima este trabajo, donde se pretende distinguir la actividad cortical que puede registrar las diferencias cuando hay inspección del ambiente por medio del giro lateral de la cabeza, con ojos abiertos y cerrados, se considera la diferencia que existiría al ejecutar dos de las tareas planteadas en la evaluación (4.5.3) que incluye mayor actividad vestibular: 4.5.4 y 4.5.4. En este caso, la evaluación de Wilcoxon distingue diferencia en la actividad presentada en dos canales (4.30).

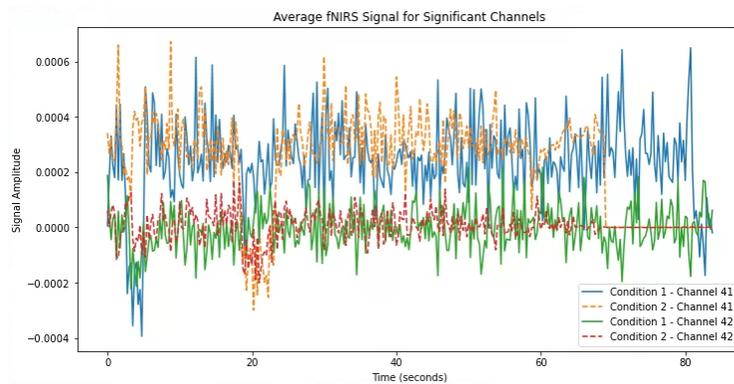


Figura 4.30: Canales significativamente distintos (por Wilcoxon), movimiento horizontal de cabeza.

La ubicación de estos canales, se muestran a continuación:

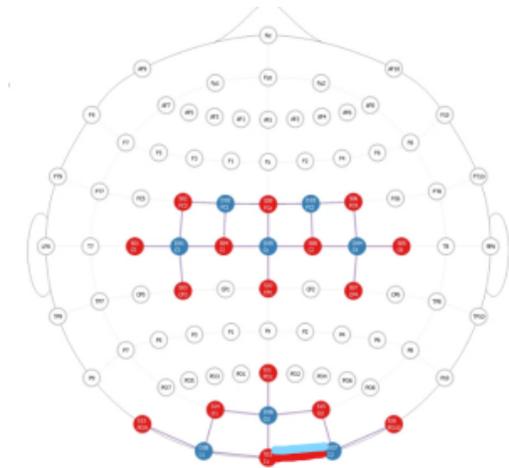


Figura 4.31: Área con mayor diferencia en movimientos de cabeza, con y sin estímulo visual

Capítulo 5

Resultados

5.1. Resultados de los principales modelos de clasificación

De acuerdo con el método de trabajo expuesto, después de desarrollar y ejecutar los modelos de clasificación, a continuación se exponen las familias de algoritmos que generaron mayor precisión en sus respectivas categorías, a partir de los 10 mejores resultados:

5.1.1. Clasificación movimientos visuales

En las tablas que se presentan a continuación, se destacan las familias de algoritmos con mejores resultados en cuanto al ejercicio de clasificación correspondiente a dos categorías relativas a los movimientos visuales: de fijación y de persecución. Todas ellas, al mismo tiempo, permiten visualizar la variación de resultados que ocurren al aplicarse los ajustes a las señales, como se explica en 4.6.6.

Tal como se explica en la descripción del método concerniente a los canales considerados, las tablas B.1, B.2 y B.3, indican la precisión indicada al considerar los canales sin distinción de áreas (4.6.6).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	6	Árboles	9	Árboles	9
KNN	4	KNN	1	KNN	1

Tabla 5.1: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 56 canales.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	Árboles	8	Árboles	10
KNN	3	KNN	2		
SVM	3				

Tabla 5.2: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	5	Árboles	7	Árboles	10
Árboles	5	KNN	3		

Tabla 5.3: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbR).

En la misma comparativa (4.6.7), contemplando los análisis posibles al trabajar con fNIRS (HbO y HbR), se tienen los datos que corresponden a las dos áreas del interés de este trabajo:

Área somatosensorial

De acuerdo con la configuración de la evaluación, los datos que corresponden a esta área se obtienen de la zona señalada en (4.6.6). Los resultados se describen a continuación:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	7	Árboles	10	Árboles	10
KNN	3				

Tabla 5.4: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	5	KNN	3	KNN	1
KNN	2	SVM	6	Árboles	9
SVM	1	Árboles	1		

Tabla 5.5: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	1	Árboles	5	KNN	1
Árboles	6	Linear	2	Árboles	2
Bayesiana	3	SVM	3		

Tabla 5.6: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área sensorial (HbR).

Área visual

De manera semejante, la zona de donde se obtiene información correspondiente a la actividad visual, para este trabajo está indicada en (4.6.6). Los datos obtenidos permiten obtener los siguientes resultados:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	5	Árboles	5	Árboles	10
Árboles	5	KNN	5		

Tabla 5.7: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	5	Árboles	7	Árboles	10
Árboles	5	SVM	1		
		KNN	1		
		Bayesiana	1		

Tabla 5.8: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	5	Árboles	10	Árboles	10
Árboles	5				

Tabla 5.9: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimientos de fijación y persecución, área visual (HbR).

Canales específicos

Al comparar directamente la actividad registrada en ambos conjuntos de datos, como se ha indicado en 4.6.7, es posible detectar canales específicos donde existe mayor diferencia de manera dependiente a las actividades que se evalúan. De acuerdo con la evaluación para esta categoría (de movimientos de la visión), como se muestra en 4.22, se sugiere que la comparación se ejecute con atención especial en tres canales.

El resultado es el siguiente:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	6	Árboles	2	Árboles	7
KNN	1	SVM	8	SVM	3
Linear	3				

Tabla 5.10: Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión.

HbO:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
SVM	10	Árboles	4	Árboles	7
		SVM	6	SVM	1
				Linear	2

Tabla 5.11: Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión (HbO).

HbR:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	SVM	4	Árboles	9
SVM	6	Árboles	3	SVM	1
		Linear	2		
		KNN	1		

Tabla 5.12: Familias de algoritmos con mejores resultados, canales específicos para movimientos de visión (HbR).

5.1.2. Atención visual binocular directa central y periférica

Como se ha indicado en el capítulo anterior, es posible crear un acercamiento a la detección de la atención en el área central y cuando se exceden los límites de esta zona. Los resultados de los métodos de clasificación que contemplan estos datos, arrojan los siguientes resultados de acuerdo a los canales que se toman en cuenta:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	7	SVM	8	Árboles	10
KNN	3	Linear	2		

Tabla 5.13: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 56 canales.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	5	SVM	10	KNN	1
SVM	4			Árboles	9
KNN	1				

Tabla 5.14: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	9	Árboles	4	Árboles	10
KNN	1	SVM	4		
		Linear	2		

Tabla 5.15: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales (HbR).

Área somatosensorial

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	9	SVM	6	Árboles	9
KNN	1	Linear	3	KNN	1
		KNN	1		

Tabla 5.16: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área somatosensorial.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	5	SVM	8	KNN	1
KNN	3	Árboles	1	Árboles	9
SVM	2	Linear	1		

Tabla 5.17: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	8	KNN	2	Árboles	10
SVM	2	Linear	1		
		SVM	7		

Tabla 5.18: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbR).

Área visual

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	2	Árboles	1	Árboles	10
SVM	6	SVM	8		
Bayesiana	2	Linear	1		

Tabla 5.19: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	6	SVM	9	Árboles	9
Árboles	3	KNN	1	KNN	1
SVM	1				

Tabla 5.20: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	6	Árboles	5	Árboles	9
KNN	4	KNN	2	KNN	1
		Linear	1		
		SVM	2		

Tabla 5.21: Familias de algoritmos con mejores resultados, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbR).

Canales específicos

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Linear	9	SVM	6	Árboles	9
Árboles	1	Árboles	2	KNN	1
		KNN	1		
		Linear	1		

Tabla 5.22: Familias de algoritmos con mejores resultados, atención visual persecutoria binocular.

HbO

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
SVM	9	SVM	8	Árboles	9
Árboles	1	KNN	1	KNN	1
		Árboles	1		

Tabla 5.23: Familias de algoritmos con mejores resultados, atención visual persecutoria binocular (HbO).

HbR

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	Árboles	4	Árboles	9
SVM	6	SVM	5	KNN	1
		KNN	1		

Tabla 5.24: Familias de algoritmos con mejores resultados, canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular (HbR).

5.1.3. Movimiento lateral de la cabeza

La última categoría que se creó en este trabajo corresponde a la que compara la actividad de la evaluación 4.5.3. El principal factor se relaciona con el movimiento lateral de la cabeza. En la comparativa de los modelos de clasificación, se generaron los resultados que se exponen a continuación:

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	3	Árboles	10	Árboles	10
KNN	6				
SVM	1				

Tabla 5.25: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 56 canales.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
SVM	9	Árboles	9	Árboles	10
KNN	1	SVM	1		

Tabla 5.26: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	7	Árboles	10	Árboles	10
KNN	3				

Tabla 5.27: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales (HbR).

Área somatosensorial

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	6	Árboles	10	Árboles	10
KNN	4				

Tabla 5.28: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	Árboles	9	Árboles	10
KNN	4	SVM	1		
SVM	2				

Tabla 5.29: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	Árboles	10	Árboles	10
KNN	5				
SVM	1				

Tabla 5.30: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial (HbR).

Área visual

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	5	Árboles	10	Árboles	10
KNN	5				

Tabla 5.31: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual.

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	3	Árboles	10	Árboles	10
Linear	4				
KNN	2				
SVM	1				

Tabla 5.32: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual (HbO).

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
KNN	3	Árboles	9	Árboles	10
Árboles	5	SVM	1		
SVM	2				

Tabla 5.33: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual (HbR).

Canales específicos

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
SVM	5	Árboles	6	Árboles	3
KNN	4	SVM	4	SVM	7
Bayesiana	1				

Tabla 5.34: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos.

HbO

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
SVM	5	Árboles	6	Árboles	3
KNN	4	SVM	4	SVM	7
Bayesiana	1				

Tabla 5.35: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos (HbO).

HbR

Preprocesado		Normalizado		Estandarizado	
<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>	<i>Familia</i>	<i>Casos</i>
Árboles	4	SVM	6	Árboles	8
SVM	6	Árboles	1	SVM	2
		Linear	2		
		KNN	1		

Tabla 5.36: Familias de algoritmos con mejores resultados, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos (HbR).

5.2. Visualización gráfica

Como parte de las acciones llevadas a efecto en la etapa de preprocesamiento, también se contaba con herramientas que proyectaban la actividad en la corteza cerebral en una especie de mapa de calor. A través de ellas, es posible comparar la intensidad de acción que ocurre en la corteza cerebral de un sujeto al llevar a cabo cada una de las tareas indicadas.

A continuación se presentan a manera de ejemplo, casos de comparación en las evaluaciones de algunos sujetos evaluados. Se comparan las mediciones correspondientes a la actividad de cada ojo por separado (etapas I y II (4.5.3)), mientras se lleva a cabo la tarea I (4.5.4); los ejemplos corresponden a dos sujetos con buena agudeza visual en ambos ojos, y dos sujetos con agudeza visual regular en el ojo izquierdo:

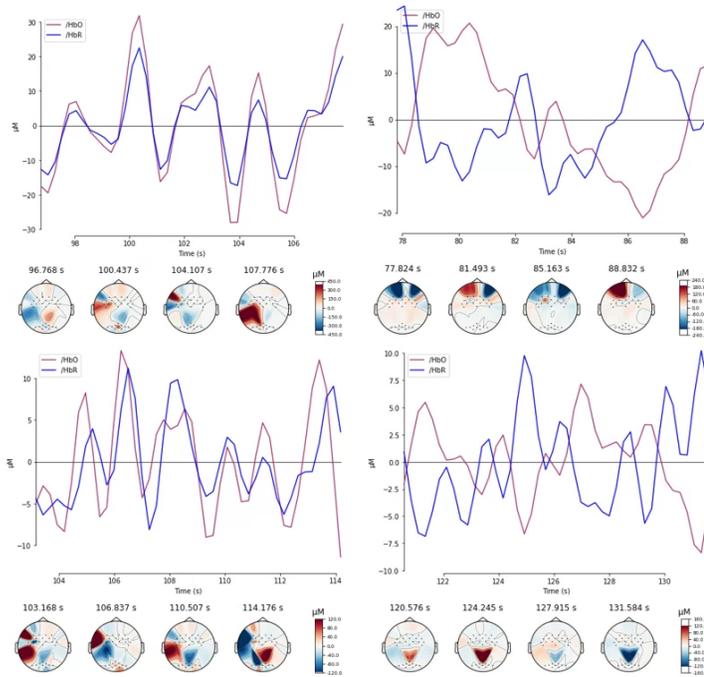


Figura 5.1: Actividad en primeros segundos, ojo izquierdo. Etapa I, Tarea I. (izq, AV = 0.5; der, AV = 1)

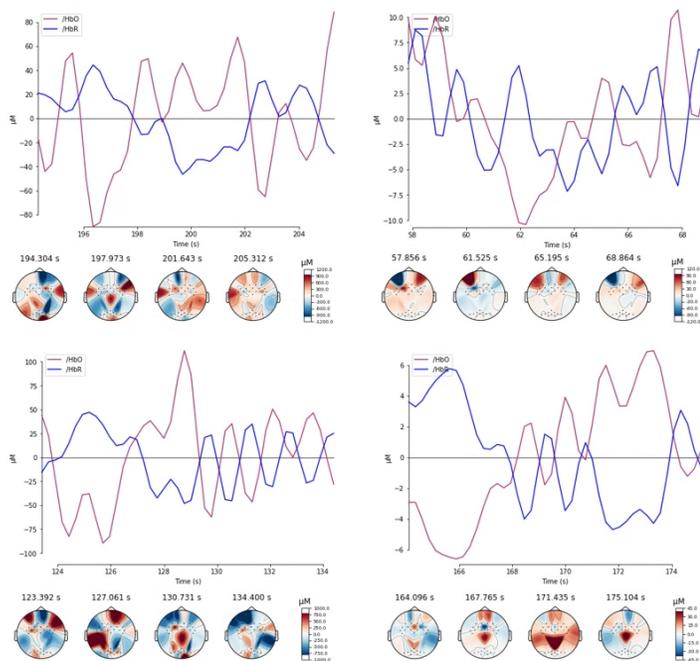


Figura 5.2: Actividad en primeros segundos, ojo derecho. Etapa II, Tarea I. (izq, AV = 1; der, AV = 1)

5.3. Interpretación de resultados

5.3.1. Procesamiento de datos

Después de comparar los resultados de la vasta cantidad de bases de datos procesadas por modelos de clasificación, en la mayoría de ellos se aprecia que someter los datos a ajuste y escalamiento, produce mejores resultados de categorización automática.

La subdivisión que permite la naturaleza de la información por fNIRS, al separar análisis por tipo de hemoglobina, deja ver que aunque ambas tienen resultados destacables, la que predomina con mayor precisión es la relacionada a la hemoglobina desoxigenada (HbR).

La cantidad de características estadísticas que generan mayor precisión, oscila de tres a 11, siendo más comunes los casos de 11, 10 y 7.

5.3.2. Modelos de clasificación

Se han probado varios modelos, de donde es posible destacar los más efectivos respecto a la información que se obtuvo en este estudio. Los modelos que, en general tienen mejor rendimiento, son:

- **Random Forest**
- **Boosted Trees**
- **Support Vector Machine**
- **KNN**

En cuanto su división familiar de algoritmos, se dividen en:

- **Árboles de decisión**
- **Support Vector Machine**
- **KNN**

Aunado a esto, se ha podido obtener que el método de escalamiento que generó más casos con mejor precisión, corresponde a la normalización de los datos.

Estos resultados permiten afirmar que el uso de la técnica fNIRS es efectiva para diferenciar la actividad proveniente de los estímulos visual y vestibular, además de distinguir las zonas en donde existe mayor diferencia de acuerdo a las actividades comparadas, por ejemplo, los movimientos de visión (4.23).

5.3.3. Comportamiento de la señal y agudeza visual

En cuanto a la relación directa de la actividad hemodinámica con la agudeza visual de cada órgano sensorial, se han generado indicios de interpretación a partir de la morfología de la señal y el mapa topográfico de los datos. En los casos expuestos, representados en 5.1 y 5.2, se puede interpretar que la señal correspondiente a ambos cromóforos presenta un comportamiento similar cuando la agudeza visual de los sujetos no es óptima; mientras que cuando los sujetos poseen una buena agudeza visual, el comportamiento de la señal correspondiente a ambos cromóforos es distinta.

5.3.4. Trabajo de divulgación

Durante el desarrollo de este trabajo, también se procuró contribuir a la difusión de información relacionada con el tema de investigación. Gracias a esta iniciativa, ha sido posible colaborar en una edición de la revista de divulgación científica del CINVESTAV, a través de una publicación sobre el sistema vestibular, los sentidos y la ubicación espacial. La información correspondiente a este trabajo se puede consultar en C.1.

Capítulo 6

Discusión, conclusión y trabajos futuros

6.1. Discusión

El análisis de los estudios previos, así como el de los resultados de este estudio, convergen en la relevancia del sistema vestibular y su relación con el sistema visual en funciones cognitivas y sensoriales. Esta información subraya la importancia de profundizar en la comprensión de cómo estos sistemas se interrelacionan y contribuyen a la orientación, el equilibrio y otras funciones cotidianas. Respecto a la técnica utilizada, fNIRS emerge como una herramienta prometedora para analizar el comportamiento cerebral relacionado con los sistemas evaluados en este trabajo. Un punto coincidente entre los estudios revisados y los resultados propios, es la utilidad de la técnica fNIRS para investigar el comportamiento cerebral, especialmente en relación con el sistema vestibular; debido a que ofrece una notable estabilidad en la detección de zonas corticales durante tareas de movimiento, pudiendo ser una herramienta prometedora para futuras investigaciones en este campo [Ertl and Boegle, 2019, Zhao et al., 2023]. Aunque su aplicación aún está en proceso de generalización, se observa un creciente interés que conllevará a mayor conocimiento en su uso. Por ejemplo, en cuanto a los métodos de procesamiento de información, si bien aún no existe un consenso absoluto, se evidencian avances que pueden ser adoptados según los objetivos específicos de cada estudio. Este mismo trabajo abona a un mejor discernimiento.

En cuanto a los resultados específicos de este estudio, se destaca la efectividad de ciertos métodos de clasificación, como K-Nearest Neighbours (KNN), a pesar de las limitaciones en la cantidad de datos disponibles. Puede considerarse como un aporte dirigido a la clasificación de esta información, que complementa trabajos previos como los presentados por [Lee et al., 2018] y [Khan et al., 2021]. Además, la precisión mejorada al analizar la actividad de HbR, resalta la importancia de identificar diferentes tipos de actividad neuronal para una interpretación más precisa. Es importante reconocer que existen aspectos por cubrir entre las expectativas y los hallazgos específicos de este trabajo. Por ejemplo, mientras se esperaba hallar una relación más marcada entre las áreas vestibulares y visuales respecto a la atención lateral, las categorías evaluadas en esta ocasión, aún no se exploran a profundidad, para generar una interpretación que permita confirmar plenamente esta hipótesis. Sin embargo, se observaron diferencias significativas al comparar la actividad visual de persecución entre ambos ojos. La información generada con este trabajo, proporciona un nuevo enfoque que refuerza la idea de la conexión existente entre estos dos sistemas, como anteriormente se había estudiado [Karim et al., 2012, Arshad et al., 2023]; motivando a un análisis más detallado para comprender completamente su naturaleza.

Aunque el número de sujetos incluidos en el análisis es aceptable, es fundamental continuar evaluando la consistencia de los resultados y la generalización de las conclusiones. Por eso, se destaca la necesidad de ampliar el tamaño de la muestra en futuros estudios para validar y profundizar los resultados obtenidos.

En resumen, la combinación de los hallazgos de investigaciones previas con los resultados propios, proporciona un nuevo acercamiento a una visión más completa y matizada de la interacción entre los sistemas vestibular y visual. Los resultados presentados sugieren una dirección prometedora para futuros estudios, con la necesidad de ampliar el número de sujetos como una manera de confirmar las tendencias. Así mismo, se subraya la importancia de continuar explorando esta relación, con el afán de avanzar tanto en el conocimiento científico como en la aplicación clínica, al comprender de mejor manera las aportaciones cognitivas y la relación de estos dos sistemas.

6.2. Conclusión

Este trabajo establece una correspondencia entre los sistemas visual y vestibular, basada en el flujo hemodinámico cerebral, al explorar la dimensión horizontal. Se confirma la existencia de zonas corticales especializadas y se sugiere un análisis más profundo del comportamiento neuronal y cognitivo relacionado con estos sistemas. Los hallazgos subrayan la importancia de los sistemas visual y vestibular en la orientación y ubicación espacial, esenciales para la navegación segura en el entorno.

El análisis sugiere que la relación entre estos dos sistemas es más amplia de lo reconocido, con posibles aplicaciones en métodos de comunicación, de diagnóstico y en tecnologías de asistencia donde existen alteraciones negativas al respecto.

Al mismo tiempo, confirma la utilidad de la técnica de fNIRS, en estudios relacionados a estas actividades. Los resultados obtenidos en modelos de clasificación y selección de características son comparables y favorables respecto a estudios recientes.

La importación de procedimientos de análisis de otros campos ha contribuido al desarrollo de este área emergente, aunque aún sin procedimientos definidos. Este trabajo ha alcanzado niveles máximos de precisión en la clasificación de tareas a partir de la actividad hemodinámica cortical, confirmando la utilidad de métodos previos y abriendo nuevas posibilidades de discernimiento. Finalmente, se destaca la creación de algoritmos útiles para la espectroscopia funcional del cercano infrarrojo, que fácilmente puede considerarse como una sólida base aplicable a la creación de un programa especializado con mayor robustez, con oportunidad de generalización en su uso. La decisión de trabajar con softwares libres de licencia, también perseguía ese objetivo.

6.3. Trabajos futuros

Los resultados producidos en este trabajo pueden expandirse para generar distintas líneas de investigación, sometiendo a comprobación los métodos de procesamiento presentados, en trabajos que involucren datos de fNIRS; lo que tendría mucha utilidad, ya que en los antecedentes, aún no se encuentran métodos estandarizados para clasificar este tipo de señales.

La intención de este trabajo, aún puede llevarse a un análisis más profundo y extenso, basado en la exploración espacial. Por ahora, se ha considerado el estudio del comportamiento hemodinámico al presentar estímulos establecidos sobre una dimensión, sin embargo, la orientación espacial se desarrolla en tres distintos ejes, por lo que el análisis sobre una nueva dimensión, representa la continuación para lograr una mejor comprensión sobre cómo estos sistemas sensoriales se corresponden para interpretar el espacio donde interactuamos, a través del comportamiento hemodinámico. En esta misma línea, podría incluirse el uso de nuevas herramientas para generar estímulos, como la realidad aumentada o la realidad virtual.

En otra posible categoría, el enfoque mismo de este trabajo, también contiene mucha más información por revelar; dentro de las categorías creadas para conducir este análisis, también puede expandirse hacia la dilucidación de conceptos como la lateralidad, o la diferenciación de la respuesta de acuerdo al campo de visión (central y periférico), por mencionar algunos.

Una alternativa más, se presenta después de obtener una comparación de las señales correspondientes a un par de sujetos con agudeza visual efectiva en ambos ojos, y otro par de sujetos que presentan algún grado de deficiencia en uno de los órganos, como puede observarse en 5.2. En las imágenes, es posible notar un comportamiento distinto de las señales correspondientes a los dos cromóforos (HbO y HbR) cuando la agudeza visual tiene un valor mejor valuado, sin embargo, cuando la agudeza visual no es óptima, ambas señales presentan un comportamiento más similar. Esta comparativa, también propone una nueva tendencia a comprobar, ampliando el número de sujetos de estudio y ejecutando un análisis más profundo con la inclusión de nuevas áreas de atención.

Bibliografía

- [Addo et al., 2016] Addo, E., Bamiro, O. A., and Siwale, R. (2016). Anatomy of the eye and common diseases affecting the eye. In (eds), R., editor, *Ocular Drug Delivery: Advances, Challenges, and Applications*. Springer.
- [Arshad et al., 2023] Arshad, I., Gallagher, M., and Ferrè, E. (2023). Visuo-vestibular conflicts within the roll plane modulate multisensory verticality perception. *Neuroscience Letters*, 792:136963.
- [Azzam and Ronquillo, 2023] Azzam, D. and Ronquillo, Y. (2023). Snellen chart.
- [Baylor et al., 1979] Baylor, D. A., Lamb, T. D., and Yau, K. W. (1979). Responses of retinal rods to single photons. *J. Physiol.*
- [Bellomo, 2020] Bellomo, E. (2020). Eeg-fnirs setup. Online. Brain Products Press Release.
- [Bernal et al., 2011] Bernal, J. G.-V., Arias, A. A., and Montilla, C. A. (2011). Fisiología del sistema vestibular. *Libr virtual Form en ORL*, pages 1–14.
- [Broussard et al., 2011] Broussard, D. M., Titley, H. K., Antflick, J., and Hampson, D. R. (2011). Motor learning in the VOR: the cerebellar component. *Experimental Brain Research*, 210(3-4):451–463. Epub 2011 Feb 19.
- [Commission, 2016] Commission, E. (2016). Los efectos del sistema vestibular en otros sistemas del organismo. Accessed: 2024-06-27.
- [Corbetta, 1998] Corbetta, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eye to visual locations: identical, independent, or overlapping neural systems? *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95:831–838.

- [Day and Fitzpatrick, 2005] Day, B. L. and Fitzpatrick, R. C. (2005). The vestibular system. *Current Biology*, 15(15).
- [Ertl and Boegle, 2019] Ertl, M. and Boegle, R. (2019). Investigating the vestibular system using modern imaging techniques—a review on the available stimulation and imaging methods. *Journal of Neuroscience Methods*, 326:108363.
- [Facultad de Medicina, nd] Facultad de Medicina, U. (n.d.). Sistema nervioso. Online. Accessed on October 12, 2023.
- [Flores, 1989] Flores, B. E. (1989). The utilization of the wilcoxon test to compare forecasting methods: A note. *International Journal of Forecasting*, 5(4):529–535.
- [Forbes et al., 2020] Forbes, P. A., Kwan, A., Rasman, B. G., Mitchell, D. E., Cullen, K. E., and Blouin, J.-S. (2020). Neural mechanisms underlying high-frequency vestibulocollic reflexes in humans and monkeys. *Journal of Neuroscience*, 40(9):1874–1887.
- [Frank and Greenlee, 2018] Frank, S. M. and Greenlee, M. W. (2018). The parieto-insular vestibular cortex in humans: More than a single area? *J Neurophysiol.*, 120:1438–1450.
- [Galloway et al., 2016] Galloway, N. R., Amoaky, W. M. K., Galloway, P. H., and Brownin, A. C. (2016). Basic anatomy and physiology of the eye. In *Common Eye Diseases and Their Management*. Springer.
- [George et al., 2001] George, N., Driver, J., and Dolan, R. (2001). Seen gaze-direction modulates fusiform activity and its coupling with other brain areas during face processing. *Neuroimage*, 13:1102–1112.
- [Gerstner et al., 2014] Gerstner, W., Kistler, W. M., Naud, R., and Paninski, L. (2014). *Neuronal Dynamics: From Single Neurons to Networks and Models of Cognition*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Gramfort et al., 2013] Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Goj, R., Jas, M., Brooks, T., Parkkonen, L., and Hämäläinen, M. S. (2013). MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience*, 7(267):1–13.
- [Gupta et al., 2022] Gupta, M., Ireland, A. C., and Bordoni, B. (2022). Neuroanatomy, visual pathway.

- [Hahn, 2009] Hahn, D. W. (2009). Light scattering theory. Technical Report 18, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida.
- [Hamilton et al., 2021] Hamilton, R., Bach, M., Heinrich, S. P., Hoffmann, M. B., Odom, J. V., McCulloch, D. L., and Thompson, D. A. (2021). Vep estimation of visual acuity: A systematic review. *Doc Ophthalmol*, 142(1):25–74.
- [Hastie et al., 2009] Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, 2 edition.
- [Himmelberg et al., 2022] Himmelberg, M. M., Winawer, J., and Carrasco, M. (2022). Linking individual differences in human primary visual cortex to contrast sensitivity around the visual field. *Nat Commun*, 13(3309).
- [Hitier et al., 2014] Hitier, M., Besnard, S., and Smith, P. F. (2014). Vestibular pathways involved in cognition. *Integrative Neuroscience, Frontiers in*, 8.
- [Hooker et al., 2003] Hooker, C. I., Paller, K. A., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Mesulam, M.-M., and Reber, P. J. (2003). Brain networks for analyzing eye gaze. *Brain Res Cogn Brain Res*, 17(2):406–418.
- [Jöbsis, 1977] Jöbsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198(4323):1264–1267.
- [Karim et al., 2012] Karim, H., Schmidt, B., Dart, D., Beluk, N., and Huppert, T. (2012). Functional near-infrared spectroscopy (fnirs) of brain function during active balancing using a video game system. *Gait & Posture*, 35(3):367–372.
- [Kaur and Gurnani, 2023] Kaur, K. and Gurnani, B. (2023). Contrast sensitivity.
- [Khan et al., 2021] Khan, H., Noori, F. M., Yazidi, A., Uddin, M. Z., Khan, M. N. A., and Mirtaheri, P. (2021). Classification of individual finger movements from right hand using fnirs signals. *Sensors*, 21(23).
- [Kriesel, 2007] Kriesel, D. (2007). *A Brief Introduction to Neural Networks*.
- [Kukurin and Audren, 2023] Kukurin, G. and Audren, C. (2023). The emerging role of vestibular stimulation in brain rehabilitation: A representative case report. *Medical Research Archives*, 11(11).

- [Lee et al., 2018] Lee, G., Jin, S. H., Yang, S. T., An, J., and Abibulaev, B. (2018). Cross-correlation between hbo and hbr as an effective feature of motion artifact in fmirs signal. In *2018 6th International Conference on Brain-Computer Interface (BCI)*, pages 1–3.
- [Lopez, 2015] Lopez, C. (2015). Vestibular cortex. In Toga, A. W., editor, *Brain Mapping*, pages 305–312. Academic Press, Waltham.
- [Lopez and Blanke, 2011] Lopez, C. and Blanke, O. (2011). The thalamocortical vestibular system in animals and humans. *Brain Res Rev*, 67(1-2):119–146.
- [Lowry, 1975] Lowry, O. (1975). Energy metabolism in brain and its control. In *Brain Work, Alfred Benzon Symposium VIII*, pages 48–64. Academic Press Copenhagen.
- [Luu and Chau, 2009] Luu, S. and Chau, T. (2009). Decoding subjective preference from single-trial near-infrared spectroscopy signals. *Journal of Neural Engineering*, 6:016003.
- [Maure et al., 2000] Maure, C., Mergner, T., Bolha, B., and Hlavacka, F. (2000). Vestibular, visual, and somatosensory contributions to human control of upright stance. *Neuroscience Letters*, 281:99–102.
- [Maurer and Lewis, 2018] Maurer, D. and Lewis, T. L. (2018). Chapter 8 - visual systems. In Gibb, R. and Kolb, B., editors, *The Neurobiology of Brain and Behavioral Development*, pages 213–233. Academic Press.
- [MedlinePlus en español, 2019] MedlinePlus en español (2019). El cerebelo. Online. Actualizado el 27 de agosto de 2019. Actualizado el 1 de mayo de 2019. Revisado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/18008.htm#:~:text=El%20cerebelo%20procesa%20informaci%C3%B3n%20proveniente,suaves%20del%20sistema%20muscular%20esquel%C3%A9tico.
- [Moshkovitz et al., 2020] Moshkovitz, A., Lev, M., and Polat, U. (2020). Monocular and binocular temporal visual perception of infantile nystagmus. *Sci Rep*, 10(1):4946.

- [Naseer and Hong, 2015] Naseer, N. and Hong, K.-S. (2015). fnirs-based brain-computer interfaces: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9:3. Erratum in: *Front Hum Neurosci*. 2015;9:172.
- [National Cancer Institute, 2019] National Cancer Institute (2019). Diccionario del cáncer - encéfalo. Online. Accessed on October 18, 2023.
- [Parthasarathi and Stokkermans, 2023] Parthasarathi, P. and Stokkermans, T. J. (2023). Tests for potential vision.
- [Rehman and Al Khalili, 2023] Rehman, A. and Al Khalili, Y. (2023). Neuroanatomy, occipital lobe.
- [Saladin, 2018] Saladin, K. S. (2018). *Anatomy & Physiology: The Unity of Form and Function*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 8th edition.
- [Torrades and Pérez-Sust, 2008] Torrades, S. and Pérez-Sust, P. (2008). Sistema visual: La percepción del mundo que nos rodea. *Ámbito Farmacéutico. Neurobiología, Elsevier*, 27:98–105.
- [Wibble et al., 2020] Wibble, T., Engström, J., and Pansell, T. (2020). Visual and Vestibular Integration Express Summative Eye Movement Responses and Reveal Higher Visual Acceleration Sensitivity than Previously Described. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 61(5):4–4.
- [Winkler et al., 2000] Winkler, B. S., Arnold, M. J., Brassell, M. A., and Puro, D. G. (2000). Energy metabolism in human retinal müller cells. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 41(10):3183–3190.
- [Wnuk et al., 2012] Wnuk, A., Davis, A., and et al., C. P. (2012). *Brain Facts*. Society for Neuroscience, Washington, DC. Retrieved January 17, 2018, from <<http://www.brainfacts.org/The-Brain-Facts-Book>>.
- [Wong-Riley, 2010] Wong-Riley, M. (2010). Energy metabolism of the visual system. *Eye Brain*, 2:99–116.
- [Wu et al., 2021] Wu, T.-Y., Wang, Y.-X., and Li, X.-M. (2021). Applications of dynamic visual acuity test in clinical ophthalmology. *Int J Ophthalmol*, 14(11):1771–1778.

- [Young and Freedman, 2009] Young, H. D. and Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria, con Física Moderna Volumen 2*. Pearson Educación, México, 12th edition. Área: Ciencias.
- [Zhang et al., 2017] Zhang, X., Noah, J. A., Dravida, S., and Hirsch, J. (2017). Signal processing of functional NIRS data acquired during overt speaking. *Neurophotonics*, 4(4):041409.
- [Zhao et al., 2023] Zhao, Y., Wei, Y., Wang, Y., So, R. H. Y., Chan, C. C. H., Cheung, R. T. F., and Wilkins, A. (2023). Identification of the human cerebral cortical hemodynamic response to passive whole-body movements using near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Neurology*, 14:1280015.
- [Zimmerman et al., 2011] Zimmerman, A. B., Lust, K. L., and Bullimore, M. A. (2011). Visual acuity and contrast sensitivity testing for sports vision. *Eye Contact Lens*, 37(3):153–159.

Apéndice A

Apéndice Marco Teórico

A.1. Sistema nervioso

A.1.1. Sistema Nervioso Central (SNC)

Representa al área donde es procesada la mayor parte de la información. Está compuesta por el encéfalo y la médula espinal, los cuales están protegidos por el cráneo y la columna vertebral, respectivamente.

Encéfalo

Prácticamente la composición absoluta del encéfalo consiste en millones de neuronas. Para su distinción anatómica, se considera que está constituido por tres partes:

- **Cerebro.** Se localiza en la parte superior y es mayormente prominente respecto a las otras dos secciones. A esta fracción se le atribuye acciones como el aprendizaje, la memoria, pensamiento o emociones, entre otras. [Wnuk et al., 2012, National Cancer Institute, 2019]
- **Cerebelo.** Esta sección está justo por debajo del cerebro. Es considerada un área muy importante para poder efectuar correctamente los movimientos. En esta sección convergen distintas líneas de información provenientes tanto de las

otras áreas del encéfalo, como de los músculos y órganos sensoriales acústicos y visuales; por eso se reconoce que controla la motricidad fina, el equilibrio, coordinación y la postura [Wnuk et al., 2012, National Cancer Institute, 2019, MedlinePlus en español, 2019, Kriesel, 2007].

- **Tallo encefálico.** Es el punto de conexión entre el conjunto del encéfalo y la médula espinal. Se considera la región más antigua y más interna del cerebro. Está ubicado debajo en la parte inferior del cerebelo y se le ha relacionado con funciones más autónomas como la respiración, la digestión o la frecuencia cardíaca, así como con el control de movimientos. [Wnuk et al., 2012, National Cancer Institute, 2019, Facultad de Medicina, nd]

Médula espinal

La medula espinal puede ser apreciada como la central de vías nerviosas que funciona como el medio de comunicación entre el sistema nervioso periférico y el sistema nervioso central. De esta manera, dentro de la médula se tienen redes neurales que llevan la información en ambos sentidos; cuando la información es transmitida desde la central del cerebro hacia los órganos en forma de comandos motores, lo hace a través de los tractos descendentes (o eferentes); mientras que al ser llevados desde los órganos o los receptores sensoriales hacia el cerebro, son conducidos mediante los tractos ascendentes (o aferentes). [Wnuk et al., 2012] [Facultad de Medicina, nd]

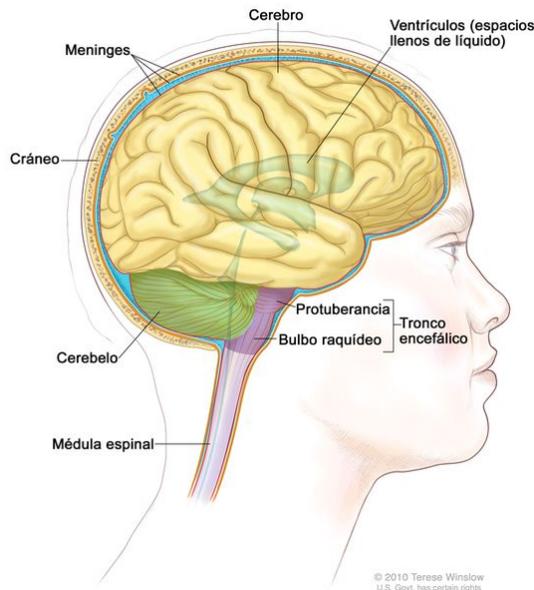


Figura A.1: Anatomía del Sistema Nervioso Central (SNC): Encéfalo y médula espinal

A.1.2. Sistema Nervioso Periférico (SNP)

Brevemente, se puede destacar como una función principal del sistema nervioso periférico, ser la unión o el medio que hace posible transmitir la información del SNC a los órganos efectores, así como la información obtenida por los receptores sensoriales hacia el mismo SNC. Anatómicamente se distinguen como los componentes del SNP a los nervios (que son un conjunto de axones cubiertos por tejido fibroso), que tienen el origen en la médula espinal y están extendidos a lo largo del cuerpo; y a los ganglios nerviosos (protuberancias en los nervios, que concentra cuerpos celulares neuronales).

Por la forma en la que desempeña sus funciones, el SNP se divide en dos sistemas: *sensorial* (correspondiente a las vías ascendentes), y *motor* (correspondiente a las vías descendentes), que a su vez también se subdividen en autónomo (o visceral) y somático.

Sensorial

- **Somático**, conduce las señales de los receptores de la piel, músculos, huesos y articulaciones.
- **Autónomo**, conduce las señales de las vísceras de las cavidades torácicas y abdominales.

Motor

- **Somático**, conduce las señales hacia los músculos estriados, que se manifiestan en los movimientos voluntarios o las contracciones involuntarias conocidas como reflejos somáticos.
- **Autónomo**, conduce las señales a las glándulas, el músculo cardíaco y el músculo liso. Este tipo de control es involuntario, y sus respuestas se conocen como reflejos viscerales. Este sistema, también tiene dos divisiones más conocidas: *Simpático* (que prepara al cuerpo para alguna acción), y *parasimpático* (que genera un efecto tranquilizante). De esta manera, es posible generar un equilibrio en el estado interno del organismo. [Facultad de Medicina, nd, Saladin, 2018]

A.2. Clasificación de los sentidos

Los sentidos se pueden categorizar en función de los estímulos y los receptores:

A.2.1. Clasificación por tipo de estímulo

De acuerdo con el origen que presenta el estímulo captado, los sentidos pueden dividirse en tres categorías [Saladin, 2018]:

Exteroceptores

Los receptores son estimulados por elementos externos al organismo. Aquí se incluyen la visión, audición, el gusto, olfato y tacto (sensaciones cutáneas: calor, frío y dolor).

Interoceptores

Reaccionan a estímulos en órganos internos como estómago, intestinos y vejiga, además de que producen sensaciones de estiramiento, presión, dolor visceral y náuseas [Saladin, 2018].

Propioceptores

Hacen posible conocer la posición o los movimientos del cuerpo. Los principales elementos son los músculos, tendones y articulaciones.

A.2.2. Clasificación por distribución de receptores

Según la forma en la que los receptores sensoriales están distribuidos en el cuerpo, se pueden distinguir dos tipos de sentidos:

Sentidos generales

Estos sentidos se basan principalmente en los receptores interiores y propioceptivos, y que consisten en una estructura simple, es decir, normalmente no tienen más que una sola dendrita.

Sentidos especiales

Son sistemas más complejos pero limitados a los órganos perceptivos de la cabeza; reciben inervación de los pares craneales. Se consideran sentidos especiales a la audición, equilibrio, gusto, olfato y la visión [Saladin, 2018]).

A.3. Momentos estadísticos

En una vasta cantidad de los procedimientos actuales, esta etapa se lleva a cabo considerando en primera instancia, técnicas estadísticas, cuyos métodos, como se explica a continuación, pueden ser clasificados por momentos:

- **Primer momento**, denota un valor esperado. Es el valor *promedio* del conjunto de datos.
- **Segundo momento**, describe la dispersión de los valores, expresado mediante la *varianza* o la *desviación estándar*.
- **Tercer momento**, refleja la *asimetría* que existe en el conjunto de datos, que puede ser más positiva o negativa.
- **Cuarto momento**, permite reconocer los valores extremos, describiendo las formas de las colas. La operación matemática que lo representa es la *curtosis*.

Apéndice B

Apéndice Resultados

B.1. Resultados de clasificación desarrollados

A partir del método explicado en la parte que refiere a la clasificación, en el método, se obtuvieron rendimientos convenientes respecto a la generación de algoritmos de clasificación en distintas categorías relativas a las áreas de estudio pertinentes a este trabajo.

B.1.1. Clasificación movimientos visuales

En las tablas que se presentan a continuación, se destacan los mejores resultados en cuanto al ejercicio de clasificación correspondiente a dos categorías relativas a los movimientos visuales: de fijación y de persecución. Todas ellas, al mismo tiempo, permiten visualizar la variación de resultados que ocurren al aplicarse los ajustes a las señales, como se explica en 4.6.6.

Tal como se explica en la descripción del método concerniente a los canales considerados, las tablas B.1, B.2 y B.3, indican la precisión indicada al considerar los canales sin distinción de áreas (4.6.6).

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.6190	Boosted Trees	9	0.6696	Random Forest	3	0.9286
Random Forest	11	0.6161	Random Forest	10	0.6369	KNN	3	0.9167
Boosted Trees	9	0.6101	Random Forest	7	0.6310	Random Forest	4	0.8080
KNN	11	0.6042	Random Forest	11	0.6280	Boosted Trees	3	0.7604
KNN	10	0.5982	Boosted Trees	10	0.6280	Random Forest	5	0.7411
Random Forest	6	0.5923	Random Forest	3	0.6250	Boosted Trees	5	0.7277
Random Forest	7	0.5893	KNN	3	0.6250	Boosted Trees	4	0.7247
KNN	9	0.5893	Boosted Trees	11	0.6220	Random Forest	6	0.7158
KNN	5	0.5804	Boosted Trees	4	0.6220	Boosted Trees	11	0.7083
Random Forest	9	0.5804	Random Forest	9	0.6190	Boosted Trees	9	0.7039

Tabla B.1: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 56 canales.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.5893	Random Forest	8	0.6310	Random Forest	4	0.7976
KNN	6	0.5893	Random Forest	7	0.6310	Boosted Trees	4	0.7857
KNN	9	0.5833	Random Forest	3	0.6250	Boosted Trees	3	0.7619
KNN	7	0.5833	Boosted Trees	9	0.6131	Boosted Trees	6	0.7530
Boosted Trees	4	0.5714	Random Forest	11	0.6131	Boosted Trees	5	0.7262
SVC-sig	3	0.5655	Random Forest	10	0.6131	Random Forest	5	0.7232
SVC-sig	4	0.5655	Random Forest	6	0.6131	Random Forest	6	0.7083
SVC-sig	5	0.5655	Random Forest	9	0.6012	Random Forest	3	0.6994
Boosted Trees	5	0.5655	KNN	7	0.6012	Boosted Trees	8	0.6964
Random Forest	10	0.5655	KNN	5	0.6012	Boosted Trees	7	0.6964

Tabla B.2: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbO).

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	6	0.6488	Random Forest	5	0.6667	Boosted Trees	5	0.7560
KNN	7	0.6190	Boosted Trees	11	0.6548	Boosted Trees	6	0.7500
Random Forest	3	0.6190	Boosted Trees	10	0.6548	Boosted Trees	3	0.7351
KNN	11	0.6190	Random Forest	3	0.6429	Boosted Trees	4	0.7292
Boosted Trees	5	0.6131	KNN	3	0.6369	Boosted Trees	10	0.7024
Boosted Trees	6	0.6071	Random Forest	7	0.6310	Boosted Trees	7	0.7024
Random Forest	11	0.6012	Boosted Trees	6	0.6250	Boosted Trees	9	0.7024
KNN	3	0.6012	Random Forest	4	0.6250	Boosted Trees	11	0.6994
KNN	4	0.5952	KNN	5	0.6190	Random Forest	5	0.6667
Random Forest	5	0.5952	KNN	6	0.6190	Random Forest	9	0.6667

Tabla B.3: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, 28 canales (HbR).

En la misma comparativa (4.6.7), contemplando los análisis posibles al trabajar con fNIRS (HbO y HbR), se tienen los datos que corresponden a las dos áreas del interés de este trabajo:

Área somatosensorial

De acuerdo con la configuración de la evaluación, los datos que corresponden a esta área se obtienen de la zona señalada en (4.6.6). Los resultados se describen a continuación:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	10	0.6852	Random Forest	9	0.6759	Random Forest	3	0.9259
KNN	11	0.6667	Random Forest	11	0.6713	KNN	3	0.9213
KNN	9	0.6620	Random Forest	6	0.6620	Random Forest	4	0.8403
KNN	8	0.6481	Random Forest	3	0.6620	Boosted Trees	3	0.8356
Random Forest	4	0.6435	Random Forest	8	0.6574	Boosted Trees	4	0.7546
Random Forest	3	0.6435	Random Forest	4	0.6528	Boosted Trees	5	0.7546
Random Forest	8	0.6389	Boosted Trees	11	0.6435	Random Forest	5	0.7384
Boosted Trees	8	0.6389	Random Forest	5	0.6435	Boosted Trees	8	0.7222
Random Forest	7	0.6389	Random Forest	10	0.6435	Boosted Trees	6	0.7153
Random Forest	11	0.6389	Boosted Trees	7	0.6389	Boosted Trees	7	0.7153

Tabla B.4: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	11	0.6667	KNN	9	0.6389	KNN	3	0.9259
Boosted Trees	8	0.6667	SVCstd-l	8	0.6389	Boosted Trees	3	0.9167
Boosted Trees	7	0.6667	SVCstd-l	7	0.6389	Random Forest	3	0.8981
KNN	11	0.6481	Boosted Trees	4	0.6389	Random Forest	4	0.8241
KNN	10	0.6389	SVCstd-l	9	0.6296	Boosted Trees	6	0.8194
SVCstd-r	9	0.6389	SVCstd-l	5	0.6296	Boosted Trees	5	0.8194
Boosted Trees	6	0.6389	KNN	4	0.6296	Boosted Trees	4	0.8056
Gaussian Class	4	0.6296	SVCstd-r	4	0.6296	Random Forest	5	0.7407
Boosted Trees	5	0.6296	KNN	5	0.6296	Boosted Trees	7	0.7083
Gaussian Class	5	0.6204	SVCstd-r	8	0.6204	Random Forest	11	0.6944

Tabla B.5: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	7	0.6574	Boosted Trees	5	0.6481	KNN	3	0.9444
Boosted Trees	8	0.6111	Log Reg	3	0.6296	Random Forest	3	0.9352
Gaussian Class	5	0.6019	Log Reg	4	0.6204	Boosted Trees	3	0.9167
Gaussian Class	3	0.6019	Random Forest	11	0.6204	Boosted Trees	4	0.7824
Gaussian Class	4	0.6019	Random Forest	9	0.6111	Random Forest	4	0.7824
Random Forest	11	0.6019	SVCstd-p	9	0.6019	Boosted Trees	5	0.7778
Random Forest	9	0.5926	Random Forest	10	0.6019	Boosted Trees	7	0.7685
Boosted Trees	9	0.5926	SVC-pol	3	0.6019	Boosted Trees	6	0.7269
Random Forest	7	0.5926	SVCstd-p	10	0.6019	Random Forest	7	0.7176
Boosted Trees	5	0.5926	Boosted Trees	4	0.6019	Random Forest	5	0.7130

Tabla B.6: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área sensorial HbR.

Área visual

De manera semejante, la zona de donde se obtiene información correspondiente a la actividad visual, para este trabajo está indicada en (4.6.6). Los datos obtenidos permiten obtener los siguientes resultados:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	9	0.7000	Random Forest	9	0.7083	Boosted Trees	4	0.7875
KNN	11	0.6750	Random Forest	8	0.7083	Boosted Trees	6	0.7833
KNN	10	0.6750	Random Forest	11	0.7000	Boosted Trees	8	0.7750
Random Forest	10	0.6750	KNN	5	0.7000	Boosted Trees	7	0.7750
Boosted Trees	10	0.6583	KNN	4	0.6917	Boosted Trees	9	0.7375
Boosted Trees	8	0.6500	KNN	3	0.6833	Boosted Trees	10	0.7375
Random Forest	8	0.6500	Boosted Trees	7	0.6833	Boosted Trees	11	0.7375
KNN	8	0.6500	KNN	8	0.6833	Boosted Trees	5	0.7292
Boosted Trees	9	0.6500	Random Forest	10	0.6833	Boosted Trees	3	0.7000
KNN	7	0.6333	KNN	6	0.6750	Random Forest	8	0.6917

Tabla B.7: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	4	0.6833	Boosted Trees	5	0.7000	Boosted Trees	6	0.8583
KNN	7	0.6667	Random Forest	3	0.6667	Boosted Trees	3	0.8417
KNN	6	0.6667	Boosted Trees	8	0.6500	Boosted Trees	7	0.8000
KNN	5	0.6667	Boosted Trees	3	0.6333	Boosted Trees	4	0.7583
KNN	8	0.6500	Boosted Trees	11	0.6333	Boosted Trees	8	0.7000
Boosted Trees	11	0.6500	SVC-sig	4	0.6333	Random Forest	6	0.6750
Boosted Trees	9	0.6500	Random Forest	4	0.6333	Boosted Trees	11	0.6667
Boosted Trees	4	0.6333	KNN	7	0.6167	Random Forest	10	0.6500
Random Forest	10	0.6333	Boosted Trees	9	0.6167	Boosted Trees	10	0.6500
Boosted Trees	8	0.6167	Gaussian Class	9	0.6167	Random Forest	7	0.6500

Tabla B.8: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	3	0.6667	Boosted Trees	3	0.7500	Boosted Trees	5	0.8667
Boosted Trees	9	0.6667	Boosted Trees	9	0.7333	Boosted Trees	6	0.8250
Random Forest	4	0.6667	Random Forest	5	0.7167	Boosted Trees	3	0.8083
KNN	4	0.6500	Boosted Trees	11	0.7000	Boosted Trees	4	0.8083
Random Forest	7	0.6500	Random Forest	8	0.7000	Random Forest	5	0.7667
KNN	9	0.6500	Boosted Trees	4	0.7000	Boosted Trees	8	0.7333
Random Forest	11	0.6500	Random Forest	11	0.7000	Random Forest	6	0.7167
KNN	5	0.6500	Boosted Trees	8	0.6833	Boosted Trees	10	0.7000
KNN	8	0.6333	Random Forest	7	0.6833	Random Forest	10	0.7000
Random Forest	3	0.6333	Random Forest	10	0.6833	Boosted Trees	9	0.7000

Tabla B.9: Mejores resultados de clasificación, movimientos de fijación y persecución, área visual HbR.

Canales específicos

Al comparar directamente la actividad registrada en ambos conjuntos de datos, como se ha indicado en 4.6.7, es posible detectar canales específicos donde existe mayor diferencia de manera dependiente a las actividades que se evalúan. De acuerdo con la evaluación para esta categoría (de movimientos de la visión), como se muestra en 4.22, se sugiere que la comparación se ejecute con atención especial en tres canales. El resultado es el siguiente:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	6	0.7778	Boosted Trees	3	0.9444	Boosted Trees	5	0.8611
Random Forest	4	0.7222	SVCstd-l	8	0.9444	Boosted Trees	4	0.8333
KNN	8	0.7222	SVCstd-l	6	0.9444	Boosted Trees	3	0.8333
Random Forest	10	0.7222	Boosted Trees	4	0.9444	Random Forest	4	0.8056
GLM Binary	6	0.6667	SVC-pol	3	0.9444	Boosted Trees	6	0.8056
Random Forest	7	0.6667	SVCstd-r	3	0.9444	Boosted Trees	7	0.7778
GLM Binary	7	0.6667	SVC-pol	4	0.9444	Random Forest	3	0.7222
GLM Binary	5	0.6667	SVCstd-l	7	0.9444	SVCstd-l	5	0.7222
Random Forest	5	0.6667	SVCstd-p	9	0.8889	SVCstd-l	3	0.7222
Boosted Trees	8	0.6667	SVCstd-l	9	0.8889	SVC-lin	3	0.7222

Tabla B.10: Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión.

HbO:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-s	6	0.7500	Boosted Trees	5	0.9167	Boosted Trees	3	0.9167
SVCstd-p	3	0.7500	Boosted Trees	7	0.9167	Boosted Trees	4	0.9167
SVC-rbf	3	0.6667	Boosted Trees	8	0.9167	Boosted Trees	7	0.7917
SVC-pol	6	0.6667	SVCstd-l	3	0.9167	Boosted Trees	8	0.7917
SVCstd-p	4	0.6667	Random Forest	6	0.8333	Boosted Trees	5	0.7500
SVCstd-r	4	0.6667	SVC-pol	9	0.8333	SVCstd-p	3	0.7500
SVCstd-r	5	0.6667	SVC-pol	11	0.8333	Boosted Trees	10	0.7083
SVCstd-p	5	0.6667	SVCstd-l	9	0.8333	Gaussian Class	10	0.7083
SVCstd-s	5	0.6667	SVCstd-l	5	0.8333	Gaussian Class	9	0.7083
SVC-rbf	4	0.6667	SVCstd-s	5	0.8333	Boosted Trees	9	0.7083

Tabla B.11: Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión, HbO.

HbR:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.8333	SVC-pol	4	1.0000	Boosted Trees	3	0.7500
Random Forest	4	0.8333	SVCstd-s	3	1.0000	Random Forest	3	0.7500
Boosted Trees	4	0.8333	Random Forest	8	1.0000	Boosted Trees	5	0.6667
SVCstd-p	3	0.6667	SVCstd-r	7	0.8333	Boosted Trees	4	0.6667
SVCstd-p	7	0.6667	Log Reg	8	0.8333	Boosted Trees	8	0.6667
SVCstd-p	9	0.6667	SVCstd-r	5	0.8333	Random Forest	11	0.5833
SVCstd-p	10	0.6667	Log Reg	5	0.8333	Random Forest	9	0.5833
Random Forest	9	0.6667	Boosted Trees	8	0.8333	Boosted Trees	9	0.5833
SVC-pol	3	0.6667	Random Forest	5	0.8333	Boosted Trees	11	0.5833
SVCstd-p	4	0.6667	KNN	5	0.8333	SVCstd-p	3	0.5833

Tabla B.12: Mejores resultados de clasificación, canales específicos para movimientos de visión, HbR.

B.1.2. Clasificación actividad ojo izquierdo y ojo derecho

Referente a la categoría que distingue la actividad entre los ojos (4.6.7), los mejores resultados de clasificación cuando se toman en cuenta todos los canales son los siguientes:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	4	0.6190	Random Forest	9	0.6488	Boosted Trees	5	0.6905
SVCstd-l	10	0.6190	Random Forest	4	0.6250	Boosted Trees	8	0.6562
SVCstd-r	5	0.6190	Random Forest	10	0.6220	Boosted Trees	6	0.6533
SVCstd-r	3	0.6190	KNN	5	0.6190	Boosted Trees	7	0.6414
SVC-rbf	5	0.6161	Boosted Trees	9	0.6131	Boosted Trees	3	0.6250
SVC-rbf	4	0.6161	Boosted Trees	7	0.6131	Boosted Trees	4	0.6250
SVCstd-l	9	0.6161	Random Forest	11	0.6131	Boosted Trees	9	0.6235
KNN	9	0.6161	Random Forest	5	0.6071	Boosted Trees	10	0.6190
SVCstd-l	11	0.6161	Boosted Trees	5	0.6042	Boosted Trees	11	0.6176
Boosted Trees	3	0.6131	Random Forest	3	0.6042	Random Forest	5	0.6146

Tabla B.13: Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 56 canales.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	3	0.6667	SVCstd-r	5	0.6190	Random Forest	3	0.9405
KNN	9	0.6488	KNN	10	0.6012	KNN	3	0.9048
Log Reg	11	0.6488	KNN	9	0.6012	Boosted Trees	3	0.8452
Log Reg	10	0.6429	Boosted Trees	5	0.6012	Boosted Trees	5	0.7768
Log Reg	9	0.6429	Boosted Trees	11	0.6012	Boosted Trees	4	0.7738
SVC-rbf	5	0.6369	KNN	11	0.6012	Random Forest	4	0.7500
SVC-lin	8	0.6369	Boosted Trees	10	0.5952	Random Forest	5	0.6875
Log Reg	8	0.6369	SVCstd-r	6	0.5952	Boosted Trees	6	0.6845
SVC-lin	7	0.6369	SVC-pol	10	0.5952	Boosted Trees	7	0.6786
SVC-pol	6	0.6369	Random Forest	10	0.5952	Boosted Trees	8	0.6577

Tabla B.14: Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 28 canales HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	7	0.6607	Random Forest	10	0.6488	Boosted Trees	6	0.7560
Boosted Trees	3	0.6488	KNN	8	0.6131	Boosted Trees	7	0.7173
Log Reg	7	0.6488	KNN	9	0.6131	Boosted Trees	4	0.6905
Random Forest	10	0.6488	Boosted Trees	10	0.6071	Boosted Trees	8	0.6786
Random Forest	3	0.6488	Boosted Trees	11	0.6071	Boosted Trees	5	0.6726
Log Reg	4	0.6429	Random Forest	11	0.5952	Boosted Trees	3	0.6637
Log Reg	5	0.6429	KNN	11	0.5952	Boosted Trees	9	0.6488
Log Reg	9	0.6429	KNN	10	0.5952	Boosted Trees	11	0.6458
Log Reg	10	0.6429	SVCstd-p	11	0.5893	Random Forest	3	0.6310
SVCstd-l	3	0.6429	Random Forest	8	0.5893	Boosted Trees	10	0.6280

Tabla B.15: Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, 28 canales HbR.

Área somatosensorial

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	6	0.6667	SVC-pol	10	0.6435	Boosted Trees	3	0.7292
Random Forest	3	0.6620	SVC-pol	9	0.6389	Boosted Trees	6	0.7106
KNN	3	0.6528	SVC-rbf	7	0.6204	Boosted Trees	8	0.6968
Random Forest	8	0.6481	Random Forest	7	0.6204	Random Forest	3	0.6921
Random Forest	7	0.6435	Random Forest	6	0.6204	Boosted Trees	7	0.6921
Boosted Trees	8	0.6435	SVCstd-r	7	0.6157	Boosted Trees	11	0.6736
KNN	6	0.6343	SVC-rbf	6	0.6111	Boosted Trees	10	0.6736
KNN	4	0.6343	SVC-rbf	8	0.6111	Boosted Trees	9	0.6713
Random Forest	5	0.6343	KNN	8	0.6065	Random Forest	7	0.6620
Boosted Trees	3	0.6343	SVCstd-r	10	0.6065	Random Forest	6	0.6481

Tabla B.16: Mejores resultados de clasificación, actividad de ojo izquierdo y derecho, área somatosensorial.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	6	0.7037	SVCstd-s	9	0.6389	Boosted Trees	3	0.8194
KNN	5	0.6852	SVCstd-s	8	0.6111	Boosted Trees	4	0.7454
KNN	7	0.6759	KNN	9	0.5833	Boosted Trees	10	0.7222
Random Forest	7	0.6667	KNN	11	0.5741	Boosted Trees	11	0.7176
Random Forest	5	0.6667	Random Forest	4	0.5741	Boosted Trees	9	0.7176
Boosted Trees	5	0.6574	KNN	10	0.5741	Random Forest	3	0.6898
KNN	4	0.6481	SVC-rbf	10	0.5648	Random Forest	9	0.6759
Boosted Trees	4	0.6481	SVCstd-r	10	0.5648	Boosted Trees	8	0.6667
Boosted Trees	11	0.6296	SVCstd-r	11	0.5648	Random Forest	5	0.6667
Random Forest	4	0.6204	Boosted Trees	11	0.5556	Random Forest	11	0.6528

Tabla B.17: Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área somatosensorial HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-p	8	0.6204	KNN	4	0.6389	Boosted Trees	3	0.8981
Boosted Trees	8	0.6204	Random Forest	10	0.6296	KNN	3	0.8981
KNN	4	0.6019	Random Forest	6	0.6204	Random Forest	3	0.8981
SVCstd-p	11	0.6019	Random Forest	11	0.6204	Boosted Trees	4	0.8796
SVCstd-r	5	0.5926	KNN	5	0.6111	Random Forest	4	0.8009
Random Forest	4	0.5926	SVCstd-p	9	0.6111	Boosted Trees	5	0.7315
SVCstd-s	9	0.5926	KNN	6	0.6111	Boosted Trees	8	0.7315
SVCstd-p	9	0.5926	Boosted Trees	11	0.6019	Boosted Trees	6	0.7315
Gaussian Class	8	0.5926	SVCstd-r	5	0.5926	Boosted Trees	7	0.7037
Boosted Trees	3	0.5926	SVCstd-p	10	0.5926	Boosted Trees	9	0.6898

Tabla B.18: Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área somatosensorial HbR.

Área visual

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.6500	Boosted Trees	7	0.6417	Boosted Trees	3	0.8042
SVC-rbf	4	0.6333	Boosted Trees	10	0.6250	Boosted Trees	4	0.8042
SVC-rbf	5	0.6333	Boosted Trees	11	0.6167	Boosted Trees	7	0.7708
SVCstd-r	3	0.6333	Random Forest	10	0.6167	Boosted Trees	11	0.7333
SVCstd-r	5	0.6333	Random Forest	9	0.6083	Boosted Trees	10	0.7292
SVCstd-r	4	0.6333	Random Forest	8	0.5917	Boosted Trees	8	0.7208
SVC-rbf	3	0.6333	Random Forest	5	0.5917	Boosted Trees	5	0.7167
SVCstd-r	7	0.6250	Boosted Trees	6	0.5917	Boosted Trees	9	0.7000
Log Reg	9	0.6250	Random Forest	11	0.5917	Random Forest	3	0.6875
SVCstd-l	8	0.6250	Random Forest	6	0.5833	Boosted Trees	6	0.6750

Tabla B.19: Mejores resultados de clasificación, actividad de ojos izquierdo y derecho, área visual.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	7	0.7000	Boosted Trees	11	0.6667	KNN	3	0.9500
KNN	6	0.6667	Boosted Trees	10	0.6500	Random Forest	3	0.9333
Gaussian Class	11	0.6667	KNN	7	0.6500	Boosted Trees	3	0.9167
Boosted Trees	11	0.6500	KNN	8	0.6167	Boosted Trees	5	0.8667
Gaussian Class	5	0.6500	KNN	3	0.6167	Boosted Trees	4	0.8500
KNN	8	0.6500	Random Forest	9	0.6167	Random Forest	4	0.7833
Gaussian Class	4	0.6500	Random Forest	10	0.6167	Boosted Trees	6	0.7500
Gaussian Class	10	0.6500	Boosted Trees	7	0.6000	Boosted Trees	8	0.7417
Random Forest	11	0.6500	Random Forest	7	0.6000	Boosted Trees	10	0.7000
Gaussian Class	6	0.6333	Boosted Trees	6	0.6000	Boosted Trees	7	0.6917

Tabla B.20: Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área visual HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Log Reg	9	0.7000	KNN	11	0.7333	Boosted Trees	4	0.8917
Log Reg	8	0.7000	KNN	10	0.7333	Random Forest	4	0.8333
Log Reg	7	0.7000	KNN	9	0.7000	Boosted Trees	3	0.8000
SVCstd-r	7	0.6833	KNN	8	0.6833	Boosted Trees	8	0.7750
Log Reg	6	0.6833	Boosted Trees	9	0.6833	Boosted Trees	5	0.7667
Gaussian Class	3	0.6833	KNN	5	0.6667	Random Forest	3	0.7500
Log Reg	10	0.6833	Boosted Trees	8	0.6667	Boosted Trees	7	0.7250
SVCstd-l	10	0.6833	KNN	7	0.6500	Boosted Trees	6	0.7250
SVCstd-l	11	0.6833	KNN	6	0.6333	Random Forest	5	0.7250
Log Reg	11	0.6833	SVCstd-l	5	0.6333	Boosted Trees	10	0.6917

Tabla B.21: Mejores resultados de clasificación, actividad ojos izquierdo y derecho, área visual HbR.

Canales específicos

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	8	0.6548	Boosted Trees	5	0.6548	Boosted Trees	3	0.8095
KNN	6	0.6429	Boosted Trees	7	0.6548	Boosted Trees	4	0.8095
SVCstd-p	5	0.6429	Boosted Trees	4	0.6548	Boosted Trees	6	0.7857
Boosted Trees	9	0.6429	Random Forest	6	0.6429	Boosted Trees	5	0.7381
KNN	9	0.6310	Random Forest	7	0.6310	Boosted Trees	7	0.7143
SVCstd-p	3	0.6310	KNN	7	0.6190	Boosted Trees	9	0.7024
Boosted Trees	7	0.6190	Boosted Trees	11	0.6190	Boosted Trees	8	0.7024
SVC-lin	6	0.6071	SVC-sig	5	0.5952	Boosted Trees	10	0.6964
SVC-lin	5	0.6071	Random Forest	5	0.5952	Boosted Trees	11	0.6964
SVC-lin	7	0.6071	KNN	11	0.5952	Random Forest	3	0.6369

Tabla B.22: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho.

HbO

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	5	0.7000	KNN	5	0.7000	Boosted Trees	8	0.7833
Boosted Trees	4	0.7000	SVCstd-s	9	0.7000	Boosted Trees	6	0.7167
Boosted Trees	3	0.6667	SVCstd-s	8	0.7000	Boosted Trees	11	0.7167
Random Forest	11	0.6667	KNN	7	0.6667	Boosted Trees	10	0.6833
Boosted Trees	7	0.6667	SVCstd-s	10	0.6667	Boosted Trees	5	0.6667
Random Forest	5	0.6667	SVCstd-r	4	0.6667	Boosted Trees	4	0.6667
Random Forest	7	0.6667	Random Forest	8	0.6667	Boosted Trees	9	0.6500
Random Forest	3	0.6667	KNN	8	0.6667	Random Forest	4	0.6500
Boosted Trees	8	0.6333	Random Forest	9	0.6667	Boosted Trees	7	0.6333
Random Forest	4	0.6333	KNN	6	0.6667	SVCstd-s	8	0.6333

Tabla B.23: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho, HbO.

HbR

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	4	0.7963	KNN	7	0.7037	Boosted Trees	3	0.8148
Boosted Trees	4	0.7593	Random Forest	10	0.7037	Boosted Trees	7	0.7685
Random Forest	3	0.7407	KNN	6	0.6481	Random Forest	3	0.7500
Boosted Trees	8	0.7407	Random Forest	9	0.6481	Boosted Trees	6	0.7500
Boosted Trees	3	0.7407	Random Forest	11	0.6481	Boosted Trees	5	0.7407
Boosted Trees	6	0.7222	KNN	8	0.6481	Boosted Trees	8	0.7130
KNN	10	0.7222	Random Forest	4	0.6296	Boosted Trees	4	0.7130
Random Forest	11	0.7222	Boosted Trees	8	0.6296	Random Forest	8	0.7037
Boosted Trees	10	0.7037	Boosted Trees	11	0.6296	Random Forest	7	0.6944
Random Forest	6	0.6852	Random Forest	5	0.6296	Random Forest	10	0.6852

Tabla B.24: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en actividad en ojos izquierdo y derecho, HbR.

B.1.3. Atención visual binocular directa en espacios central y periférico

Como se ha indicado en el capítulo anterior, es posible crear un acercamiento a la detección de la atención en el área central y cuando se exceden los límites de esta zona. Los resultados de los métodos de clasificación que contemplan estos datos, arrojan los siguientes resultados de acuerdo a los canales que se toman en cuenta:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.6905	SVC-pol	7	0.9375	Boosted Trees	6	0.7411
KNN	5	0.6458	SVCstd-l	10	0.9375	Boosted Trees	7	0.7307
KNN	3	0.6458	SVC-lin	7	0.9375	Boosted Trees	4	0.7202
KNN	4	0.6458	SVCstd-l	8	0.9375	Boosted Trees	3	0.7202
Random Forest	11	0.6339	Log Reg	6	0.9375	Random Forest	6	0.7188
Boosted Trees	3	0.6250	Log Reg	8	0.9375	Random Forest	5	0.7039
Boosted Trees	5	0.6220	SVCstd-l	6	0.9375	Random Forest	3	0.7009
Random Forest	5	0.6190	SVC-lin	9	0.9375	Random Forest	9	0.6964
Random Forest	3	0.6190	SVCstd-r	4	0.9375	Boosted Trees	9	0.6949
Random Forest	9	0.6131	SVCstd-l	9	0.9375	Boosted Trees	11	0.6935

Tabla B.25: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 56 canales.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.6429	SVCstd-p	11	0.9107	KNN	3	0.8869
Boosted Trees	11	0.6071	SVCstd-p	10	0.9107	Random Forest	3	0.8869
SVC-pol	3	0.5952	SVC-lin	9	0.9048	Boosted Trees	3	0.8810
Boosted Trees	9	0.5952	SVC-lin	10	0.9048	Random Forest	4	0.8185
Boosted Trees	8	0.5893	SVCstd-l	4	0.9048	Boosted Trees	4	0.7857
Boosted Trees	3	0.5893	SVCstd-p	7	0.9048	Random Forest	5	0.7321
SVCstd-p	3	0.5893	SVC-lin	6	0.9048	Boosted Trees	5	0.7202
SVC-rbf	3	0.5833	SVC-pol	6	0.9048	Boosted Trees	10	0.6994
SVCstd-p	4	0.5833	SVC-lin	5	0.9048	Boosted Trees	11	0.6994
KNN	3	0.5774	SVC-pol	8	0.9048	Boosted Trees	8	0.6905

Tabla B.26: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	10	0.6369	Random Forest	10	0.9107	Boosted Trees	5	0.7708
Random Forest	6	0.6310	Random Forest	8	0.9107	Boosted Trees	6	0.7560
Boosted Trees	10	0.6310	Random Forest	9	0.9107	Boosted Trees	3	0.7321
Random Forest	3	0.6250	SVCstd-l	9	0.9048	Boosted Trees	11	0.7262
Random Forest	9	0.6250	Log Reg	8	0.9048	Random Forest	5	0.7262
KNN	10	0.6012	SVC-lin	6	0.9048	Boosted Trees	9	0.7262
Boosted Trees	9	0.6012	SVC-pol	6	0.9048	Boosted Trees	10	0.7262
Random Forest	7	0.5893	Log Reg	4	0.9048	Boosted Trees	4	0.7262
Boosted Trees	7	0.5893	SVC-lin	9	0.9048	Boosted Trees	7	0.7262
Random Forest	8	0.5893	Random Forest	7	0.9048	Boosted Trees	8	0.7054

Tabla B.27: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, 28 canales HbR.

Área somatosensorial

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.6713	SVCstd-r	7	0.9167	Random Forest	3	0.9398
Boosted Trees	11	0.6574	Log Reg	7	0.9167	KNN	3	0.9213
Random Forest	9	0.6528	KNN	10	0.9167	Boosted Trees	3	0.8588
Random Forest	11	0.6528	SVCstd-l	7	0.9167	Random Forest	4	0.8380
Boosted Trees	9	0.6435	Log Reg	5	0.9167	Boosted Trees	4	0.7616
Random Forest	5	0.6389	SVC-rbf	7	0.9167	Boosted Trees	5	0.7546
Random Forest	10	0.6389	SVC-lin	9	0.9167	Boosted Trees	6	0.7546
Boosted Trees	3	0.6296	SVC-rbf	9	0.9167	Random Forest	5	0.7546
Random Forest	4	0.6250	Log Reg	4	0.9167	Boosted Trees	10	0.7546
KNN	4	0.6157	SVC-lin	7	0.9167	Random Forest	6	0.7523

Tabla B.28: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área somatosensorial.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	3	0.6667	SVCstd-r	7	0.9722	KNN	3	0.9537
KNN	3	0.6667	SVCstd-r	4	0.9722	Boosted Trees	3	0.9444
Random Forest	10	0.6481	SVC-rbf	4	0.9722	Random Forest	3	0.9259
Random Forest	6	0.6389	SVC-rbf	7	0.9722	Boosted Trees	4	0.8426
Random Forest	8	0.6389	SVC-lin	7	0.9722	Random Forest	4	0.8380
SVC-rbf	11	0.6111	SVC-pol	7	0.9722	Boosted Trees	10	0.8102
SVCstd-l	11	0.6111	Boosted Trees	8	0.9722	Boosted Trees	11	0.8056
Boosted Trees	10	0.6111	SVCstd-l	4	0.9722	Boosted Trees	9	0.8056
KNN	10	0.6111	Log Reg	8	0.9722	Boosted Trees	7	0.7546
KNN	11	0.6111	SVCstd-l	9	0.9722	Random Forest	5	0.7500

Tabla B.29: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbO).

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.6944	KNN	3	0.9815	Boosted Trees	5	0.8472
Boosted Trees	10	0.6944	KNN	4	0.9815	Boosted Trees	6	0.7917
Random Forest	11	0.6759	Log Reg	5	0.9722	Boosted Trees	3	0.7454
Random Forest	5	0.6667	SVC-rbf	6	0.9722	Boosted Trees	4	0.7454
Random Forest	3	0.6574	SVC-lin	9	0.9722	Boosted Trees	11	0.7407
Random Forest	10	0.6574	SVC-rbf	9	0.9722	Boosted Trees	10	0.7361
Boosted Trees	4	0.6481	SVCstd-l	5	0.9722	Boosted Trees	8	0.7361
Boosted Trees	3	0.6481	SVC-rbf	5	0.9722	Boosted Trees	9	0.7315
SVC-pol	3	0.6389	SVCstd-l	9	0.9722	Boosted Trees	7	0.7176
SVC-rbf	3	0.6389	SVC-lin	5	0.9722	Random Forest	6	0.6991

Tabla B.30: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área sensorial (HbR).

Área visual

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	11	0.6583	Random Forest	5	0.9417	Boosted Trees	5	0.8042
Boosted Trees	5	0.6417	SVCstd-p	4	0.9333	Boosted Trees	3	0.7667
SVCstd-l	11	0.6333	SVC-pol	4	0.9333	Boosted Trees	4	0.7625
SVCstd-l	10	0.6333	SVC-lin	9	0.9333	Boosted Trees	6	0.7500
Gaussian Class	4	0.6250	SVC-pol	11	0.9333	Boosted Trees	7	0.7250
SVCstd-l	9	0.6250	SVCstd-l	4	0.9333	Random Forest	5	0.7000
SVCstd-l	8	0.6250	SVCstd-p	9	0.9333	Boosted Trees	10	0.6958
SVCstd-p	8	0.6250	SVCstd-l	9	0.9333	Random Forest	3	0.6917
SVC-pol	9	0.6083	SVCstd-l	7	0.9333	Boosted Trees	9	0.6917
Gaussian Class	3	0.6083	Log Reg	9	0.9333	Boosted Trees	11	0.6917

Tabla B.31: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	5	0.6833	SVCstd-r	7	0.9500	Random Forest	3	0.9500
KNN	9	0.6667	SVC-rbf	3	0.9500	KNN	3	0.9333
KNN	3	0.6500	SVCstd-r	9	0.9500	Boosted Trees	3	0.9167
KNN	10	0.6500	SVC-lin	3	0.9500	Boosted Trees	4	0.8417
KNN	4	0.6500	SVC-pol	3	0.9500	Boosted Trees	5	0.8417
Random Forest	10	0.6500	KNN	9	0.9500	Random Forest	4	0.8417
Random Forest	11	0.6333	SVC-pol	8	0.9500	Boosted Trees	6	0.8250
SVC-sig	4	0.6333	SVC-lin	8	0.9500	Boosted Trees	9	0.8167
KNN	11	0.6167	SVC-rbf	8	0.9500	Boosted Trees	7	0.7917
Random Forest	3	0.6167	SVCstd-l	8	0.9500	Random Forest	5	0.7500

Tabla B.32: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbO).

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	11	0.6500	Boosted Trees	5	0.9667	Boosted Trees	3	0.9167
KNN	3	0.6500	Random Forest	6	0.9667	Random Forest	3	0.9167
Boosted Trees	9	0.6333	Random Forest	5	0.9667	KNN	3	0.9000
KNN	8	0.6333	KNN	3	0.9667	Boosted Trees	6	0.8500
KNN	4	0.6333	Boosted Trees	6	0.9667	Boosted Trees	5	0.8250
Random Forest	4	0.6333	Random Forest	8	0.9667	Boosted Trees	4	0.8250
Boosted Trees	10	0.6333	Log Reg	8	0.9500	Random Forest	4	0.8083
Random Forest	9	0.6333	SVC-pol	4	0.9500	Boosted Trees	7	0.7667
Random Forest	5	0.6333	KNN	8	0.9500	Random Forest	9	0.7500
KNN	6	0.6000	SVC-lin	4	0.9500	Random Forest	5	0.7417

Tabla B.33: Mejores resultados de clasificación, visión por persecución en área central y extendida, área visual (HbR).

Canales específicos

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
GLM Binary	5	0.6667	SVCstd-r	7	0.9444	Boosted Trees	3	0.8611
GLM Binary	6	0.6667	SVC-rbf	5	0.9444	Boosted Trees	8	0.8611
GLM Binary	8	0.6667	SVC-pol	5	0.9444	Boosted Trees	4	0.8611
GLM Binary	10	0.6667	Boosted Trees	6	0.9444	Random Forest	4	0.8333
GLM Binary	7	0.6667	KNN	6	0.9444	Boosted Trees	5	0.7778
GLM Binary	3	0.6667	Random Forest	6	0.9444	KNN	3	0.7778
GLM Binary	9	0.6667	Log Reg	6	0.9444	Random Forest	3	0.7778
GLM Binary	4	0.6667	SVCstd-r	6	0.9444	Boosted Trees	7	0.7778
GLM Binary	11	0.6667	SVCstd-l	6	0.9444	Boosted Trees	9	0.7500
Random Forest	4	0.6111	SVC-rbf	6	0.9444	Random Forest	7	0.7500

Tabla B.34: Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular.

HbO

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-p	5	0.6667	SVCstd-r	7	1.0000	Boosted Trees	3	0.7500
Boosted Trees	6	0.6667	SVCstd-l	6	1.0000	KNN	3	0.7500
SVCstd-p	6	0.6667	SVCstd-l	5	1.0000	Boosted Trees	4	0.7500
SVCstd-p	4	0.6667	SVC-rbf	5	1.0000	Random Forest	3	0.7500
SVCstd-p	7	0.6667	SVC-pol	5	1.0000	Boosted Trees	5	0.7083
SVCstd-p	3	0.6667	KNN	6	1.0000	Random Forest	4	0.7083
SVCstd-p	10	0.6667	Random Forest	6	1.0000	Random Forest	7	0.7083
SVCstd-p	8	0.6667	SVCstd-r	6	1.0000	Boosted Trees	8	0.7083
SVCstd-p	11	0.6667	SVC-rbf	6	1.0000	Boosted Trees	11	0.6667
SVCstd-p	9	0.6667	SVCstd-l	9	1.0000	Boosted Trees	10	0.6667

Tabla B.35: Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular, HbO.

HbR

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.8333	Random Forest	5	1.0000	Boosted Trees	3	1.0000
SVCstd-r	7	0.6667	Random Forest	8	1.0000	Boosted Trees	4	1.0000
Boosted Trees	11	0.6667	SVCstd-l	9	1.0000	Random Forest	5	0.9167
Boosted Trees	7	0.6667	SVC-rbf	6	1.0000	Random Forest	4	0.9167
SVCstd-r	6	0.6667	Random Forest	9	1.0000	KNN	4	0.9167
SVCstd-p	5	0.6667	KNN	9	1.0000	Boosted Trees	6	0.9167
SVCstd-p	10	0.6667	Boosted Trees	9	1.0000	Boosted Trees	9	0.8333
Random Forest	5	0.6667	SVC-pol	8	1.0000	Random Forest	6	0.8333
SVCstd-p	9	0.6667	SVCstd-s	5	1.0000	Random Forest	3	0.8333
SVCstd-s	4	0.6667	SVCstd-s	8	1.0000	Boosted Trees	11	0.8333

Tabla B.36: Mejores resultados de clasificación de canales significativamente distintos, atención visual persecutoria binocular, HbR.

B.1.4. Atención binocular indirecta en espacios central y periférico

Al igual que en la subsección anterior, la atención de manera indirecta a los espacios que ocupan la visión central cuando se tiene la vista de frente (15° a cada lado), también puede distinguirse al comparar dos tareas realizadas en este estudio. Los resultados de clasificación que se tienen en esta categoría se expresan a continuación:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	8	0.6667	Random Forest	5	0.9524	Boosted Trees	4	0.7396
Boosted Trees	9	0.6637	Random Forest	8	0.9524	Boosted Trees	8	0.7262
Boosted Trees	10	0.6577	KNN	4	0.9494	Boosted Trees	7	0.7068
Boosted Trees	11	0.6458	KNN	9	0.9494	Boosted Trees	10	0.7054
Boosted Trees	3	0.6399	Random Forest	6	0.9494	Boosted Trees	11	0.7054
Random Forest	9	0.6369	Random Forest	4	0.9494	Boosted Trees	6	0.6994
Random Forest	8	0.6310	KNN	5	0.9464	Boosted Trees	9	0.6949
Random Forest	7	0.6280	Random Forest	10	0.9464	Random Forest	9	0.6920
KNN	4	0.6190	KNN	7	0.9464	Random Forest	7	0.6920
Random Forest	3	0.6161	Random Forest	11	0.9464	Random Forest	11	0.6890

Tabla B.37: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 56 canales.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	5	0.6905	KNN	4	0.9286	Boosted Trees	3	0.7411
Boosted Trees	8	0.6250	KNN	3	0.9226	Boosted Trees	4	0.7411
Gaussian Class	3	0.6190	Random Forest	9	0.9226	Boosted Trees	11	0.7351
Boosted Trees	7	0.6190	Random Forest	8	0.9226	Boosted Trees	10	0.7292
Random Forest	8	0.6071	Gaussian Class	8	0.9226	Boosted Trees	9	0.7232
Boosted Trees	6	0.6012	Gaussian Class	7	0.9167	Boosted Trees	5	0.7173
Random Forest	6	0.6012	Gaussian Class	6	0.9167	Random Forest	6	0.6756
Random Forest	9	0.5952	Boosted Trees	8	0.9167	Boosted Trees	6	0.6637
Random Forest	10	0.5952	Boosted Trees	5	0.9167	Random Forest	4	0.6607
Random Forest	4	0.5952	Boosted Trees	7	0.9167	Boosted Trees	8	0.6607

Tabla B.38: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 28 canales HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	3	0.6250	Boosted Trees	5	0.9167	Boosted Trees	8	0.7470
Boosted Trees	11	0.6131	Boosted Trees	7	0.9167	Boosted Trees	11	0.6786
Boosted Trees	7	0.6071	Boosted Trees	4	0.9167	Boosted Trees	10	0.6786
Random Forest	6	0.5893	Boosted Trees	3	0.9107	Boosted Trees	9	0.6756
Boosted Trees	8	0.5893	Random Forest	11	0.9107	Random Forest	9	0.6607
KNN	5	0.5893	Random Forest	5	0.9107	Random Forest	11	0.6577
Boosted Trees	5	0.5893	Boosted Trees	10	0.9107	Boosted Trees	7	0.6577
Random Forest	8	0.5833	Boosted Trees	6	0.9107	Random Forest	8	0.6518
Boosted Trees	4	0.5833	Random Forest	4	0.9107	Boosted Trees	6	0.6399
KNN	6	0.5833	KNN	6	0.9107	Random Forest	7	0.6399

Tabla B.39: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, 28 canales HbR.

Área somatosensorial

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	5	0.6759	KNN	3	0.9444	Boosted Trees	5	0.8009
Random Forest	7	0.6667	KNN	5	0.9352	Boosted Trees	3	0.7523
Random Forest	9	0.6667	KNN	4	0.9352	Boosted Trees	4	0.7500
Boosted Trees	9	0.6620	Boosted Trees	3	0.9213	Random Forest	5	0.7407
Random Forest	10	0.6574	KNN	6	0.9213	Boosted Trees	7	0.7338
Random Forest	8	0.6574	KNN	8	0.9213	Boosted Trees	6	0.7338
Random Forest	3	0.6528	Boosted Trees	4	0.9213	Boosted Trees	8	0.7315
Boosted Trees	4	0.6528	KNN	7	0.9167	Boosted Trees	11	0.7222
Boosted Trees	5	0.6481	Log Reg	6	0.9167	Boosted Trees	9	0.7222
KNN	6	0.6481	SVCstd-r	6	0.9167	Random Forest	6	0.7199

Tabla B.40: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	8	0.6481	Random Forest	9	0.9815	Boosted Trees	3	0.7870
Random Forest	10	0.6111	SVC-lin	8	0.9722	Boosted Trees	4	0.7870
KNN	10	0.6019	Log Reg	8	0.9722	Boosted Trees	8	0.7639
Boosted Trees	7	0.6019	SVC-rbf	7	0.9722	Boosted Trees	11	0.7500
KNN	9	0.6019	SVC-lin	7	0.9722	Boosted Trees	10	0.7500
Random Forest	9	0.5926	SVC-pol	7	0.9722	Boosted Trees	9	0.7176
KNN	7	0.5926	Random Forest	8	0.9722	Boosted Trees	7	0.7130
KNN	11	0.5833	SVCstd-l	4	0.9722	Random Forest	10	0.6991
Boosted Trees	8	0.5833	SVCstd-r	4	0.9722	Boosted Trees	6	0.6944
Boosted Trees	5	0.5833	SVCstd-l	8	0.9722	Boosted Trees	5	0.6944

Tabla B.41: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	3	0.6389	SVCstd-r	7	0.9722	Boosted Trees	3	0.7593
Boosted Trees	8	0.6204	Log Reg	9	0.9722	Boosted Trees	4	0.7454
Boosted Trees	6	0.6204	SVC-lin	4	0.9722	Boosted Trees	6	0.7454
SVC-rbf	3	0.6204	SVC-rbf	7	0.9722	Boosted Trees	5	0.7454
KNN	4	0.6204	SVC-lin	7	0.9722	KNN	3	0.7269
SVCstd-p	5	0.6111	SVC-pol	7	0.9722	Boosted Trees	7	0.7083
KNN	3	0.6111	SVC-rbf	4	0.9722	Boosted Trees	8	0.7083
Boosted Trees	7	0.6111	KNN	8	0.9722	Boosted Trees	10	0.7083
Boosted Trees	3	0.6019	SVCstd-l	4	0.9722	Boosted Trees	11	0.7037
Boosted Trees	11	0.6019	SVCstd-r	4	0.9722	Boosted Trees	9	0.7037

Tabla B.42: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área somatosensorial HbR.

Área visual

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.6917	Boosted Trees	10	0.9583	Boosted Trees	3	0.8458
KNN	5	0.6417	Boosted Trees	11	0.9583	Boosted Trees	4	0.8458
KNN	9	0.6417	Boosted Trees	7	0.9500	Boosted Trees	7	0.7500
Boosted Trees	6	0.6417	KNN	6	0.9417	Boosted Trees	5	0.7500
Boosted Trees	3	0.6333	Boosted Trees	8	0.9417	Boosted Trees	6	0.7083
KNN	7	0.6250	KNN	5	0.9417	Random Forest	9	0.7000
Boosted Trees	7	0.6250	Boosted Trees	6	0.9417	Boosted Trees	9	0.6917
KNN	8	0.6250	Random Forest	10	0.9417	Boosted Trees	10	0.6917
KNN	10	0.6167	Random Forest	6	0.9417	Boosted Trees	11	0.6875
KNN	6	0.6083	Random Forest	4	0.9417	KNN	5	0.6875

Tabla B.43: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	3	0.7000	KNN	9	1.0000	Boosted Trees	3	0.9167
Random Forest	5	0.7000	Random Forest	6	1.0000	Boosted Trees	8	0.8667
Random Forest	6	0.7000	Boosted Trees	10	1.0000	KNN	3	0.8083
Random Forest	8	0.7000	Random Forest	4	1.0000	Boosted Trees	4	0.7750
Random Forest	10	0.7000	Random Forest	9	1.0000	Boosted Trees	5	0.7750
Random Forest	11	0.7000	Boosted Trees	11	1.0000	Boosted Trees	6	0.7500
Boosted Trees	6	0.7000	KNN	11	1.0000	Boosted Trees	10	0.7500
KNN	4	0.6833	Random Forest	11	1.0000	Boosted Trees	9	0.7417
Boosted Trees	10	0.6833	KNN	10	1.0000	Boosted Trees	7	0.7417
Random Forest	7	0.6833	KNN	8	1.0000	Boosted Trees	11	0.7417

Tabla B.44: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	10	0.7000	Boosted Trees	9	0.9833	Boosted Trees	3	0.8833
Boosted Trees	11	0.6833	Boosted Trees	5	0.9833	Random Forest	3	0.7667
Boosted Trees	7	0.6667	Boosted Trees	4	0.9833	Boosted Trees	9	0.7667
KNN	10	0.6167	Random Forest	4	0.9667	Boosted Trees	8	0.7583
Random Forest	9	0.6167	SVCstd-r	7	0.9500	Boosted Trees	10	0.7583
Boosted Trees	6	0.6167	SVCstd-l	7	0.9500	Boosted Trees	11	0.7500
KNN	9	0.6000	SVC-rbf	6	0.9500	Random Forest	4	0.7500
KNN	8	0.6000	SVC-lin	6	0.9500	Random Forest	9	0.7417
KNN	5	0.6000	SVC-pol	6	0.9500	Boosted Trees	5	0.7250
SVC-sig	5	0.6000	Random Forest	7	0.9500	Random Forest	10	0.7250

Tabla B.45: Mejores resultados de clasificación, atención indirecta a áreas visuales central y periférica, área visual HbR.

Canales específicos

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.7222	SVCstd-r	7	0.9167	Boosted Trees	3	0.8611
Boosted Trees	10	0.6944	Log Reg	6	0.9167	Boosted Trees	6	0.8472
KNN	9	0.6667	SVCstd-l	6	0.9167	Boosted Trees	9	0.8194
KNN	10	0.6667	SVC-rbf	6	0.9167	Boosted Trees	4	0.8194
SVC-sig	5	0.6667	SVC-lin	6	0.9167	Random Forest	6	0.7917
Boosted Trees	3	0.6389	SVC-pol	6	0.9167	Random Forest	4	0.7917
KNN	8	0.6389	Log Reg	7	0.9167	Boosted Trees	10	0.7917
Boosted Trees	4	0.6389	SVC-pol	11	0.9167	Boosted Trees	11	0.7917
SVC-sig	4	0.6389	SVCstd-l	7	0.9167	Boosted Trees	5	0.7778
Boosted Trees	5	0.6111	SVC-rbf	7	0.9167	Boosted Trees	7	0.7639

Tabla B.46: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica).

HbO

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.7083	SVCstd-r	7	0.8750	Boosted Trees	3	0.9167
SVCstd-s	3	0.7083	Boosted Trees	7	0.8750	KNN	3	0.9167
SVCstd-s	5	0.7083	Boosted Trees	6	0.8750	Random Forest	3	0.8750
Random Forest	8	0.6667	KNN	6	0.8750	Boosted Trees	7	0.8542
SVCstd-s	4	0.6667	Random Forest	6	0.8750	Boosted Trees	5	0.8542
SVCstd-s	6	0.6667	SVCstd-r	6	0.8750	Boosted Trees	11	0.8333
SVCstd-p	5	0.6667	SVCstd-l	6	0.8750	Boosted Trees	6	0.8333
Boosted Trees	6	0.6667	SVCstd-s	6	0.8750	Random Forest	9	0.8125
SVC-pol	8	0.6250	SVC-rbf	6	0.8750	Boosted Trees	10	0.8125
Log Reg	5	0.6250	SVC-lin	6	0.8750	Random Forest	4	0.8125

Tabla B.47: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica), HbO.

HbR

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-s	3	0.8333	Boosted Trees	3	1.0000	Boosted Trees	6	0.7500
SVCstd-s	4	0.7500	SVC-lin	9	1.0000	Boosted Trees	4	0.7500
SVCstd-p	4	0.7500	SVCstd-p	9	1.0000	Boosted Trees	3	0.7083
SVCstd-p	3	0.7500	SVC-pol	4	1.0000	Random Forest	4	0.7083
SVCstd-s	6	0.6667	Boosted Trees	5	1.0000	Boosted Trees	11	0.6667
SVCstd-l	5	0.6667	SVCstd-r	5	1.0000	Boosted Trees	10	0.6667
SVCstd-p	5	0.6667	SVCstd-l	5	1.0000	Boosted Trees	9	0.6250
SVCstd-s	7	0.6667	SVCstd-s	5	1.0000	Boosted Trees	5	0.6250
SVCstd-p	6	0.6667	SVC-rbf	5	1.0000	KNN	3	0.6250
SVCstd-l	6	0.6667	SVC-lin	5	1.0000	SVC-rbf	4	0.5833

Tabla B.48: Mejores resultados de clasificación, canales específicos en campo de visión (central y periférica), HbR.

B.1.5. Movimiento lateral de la cabeza

La última categoría que se creó en este trabajo corresponde a la que compara la actividad de la evaluación 4.5.3. El principal factor se relaciona con el movimiento lateral de la cabeza. En la comparativa de los modelos de clasificación, se generaron los resultados que se exponen a continuación:

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	11	0.7173	Boosted Trees	5	0.9762	Boosted Trees	6	0.7560
KNN	7	0.6429	Boosted Trees	10	0.9673	Boosted Trees	7	0.7262
KNN	6	0.6399	Boosted Trees	9	0.9673	Boosted Trees	5	0.7188
KNN	10	0.6280	Boosted Trees	8	0.9673	Boosted Trees	9	0.7143
KNN	11	0.6250	Boosted Trees	7	0.9673	Boosted Trees	10	0.7128
KNN	8	0.6220	Boosted Trees	11	0.9673	Boosted Trees	11	0.7128
SVCstd-r	11	0.6220	Random Forest	4	0.9643	Random Forest	5	0.7083
KNN	9	0.6220	Random Forest	6	0.9643	Boosted Trees	8	0.7009
Random Forest	11	0.6220	Boosted Trees	6	0.9643	Random Forest	10	0.6905
Boosted Trees	10	0.6190	Boosted Trees	3	0.9613	Boosted Trees	4	0.6890

Tabla B.49: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 56 canales.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	6	0.6786	Random Forest	7	0.9643	Boosted Trees	3	0.7649
SVCstd-r	7	0.6726	Random Forest	8	0.9583	Boosted Trees	4	0.7649
SVCstd-r	5	0.6726	SVCstd-r	7	0.9524	Boosted Trees	6	0.7589
SVC-rbf	5	0.6726	Random Forest	11	0.9524	Boosted Trees	10	0.7470
SVC-rbf	6	0.6726	Random Forest	9	0.9524	Boosted Trees	11	0.7440
SVC-rbf	7	0.6726	Boosted Trees	10	0.9524	Boosted Trees	7	0.7262
KNN	10	0.6667	Random Forest	10	0.9524	Random Forest	8	0.7202
SVCstd-r	4	0.6667	Boosted Trees	3	0.9524	Boosted Trees	5	0.7143
SVCstd-r	11	0.6667	Boosted Trees	5	0.9464	Random Forest	9	0.7054
SVC-pol	3	0.6607	Boosted Trees	11	0.9464	Random Forest	6	0.7024

Tabla B.50: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Random Forest	11	0.7083	Random Forest	8	0.9464	Boosted Trees	6	0.7649
Random Forest	6	0.7083	Boosted Trees	8	0.9464	Boosted Trees	7	0.7411
Random Forest	3	0.6964	Boosted Trees	4	0.9345	Boosted Trees	3	0.7262
Random Forest	9	0.6905	Random Forest	4	0.9345	Boosted Trees	4	0.7262
Boosted Trees	5	0.6905	Random Forest	7	0.9345	Random Forest	4	0.7054
KNN	8	0.6845	Boosted Trees	5	0.9345	Boosted Trees	8	0.7024
KNN	7	0.6845	Random Forest	11	0.9345	Boosted Trees	5	0.6964
Random Forest	4	0.6845	Boosted Trees	7	0.9345	Boosted Trees	9	0.6815
KNN	5	0.6786	Random Forest	9	0.9286	Boosted Trees	11	0.6786
Random Forest	8	0.6726	Random Forest	3	0.9286	Boosted Trees	10	0.6786

Tabla B.51: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, 28 canales HbR.

Área somatosensorial

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	5	0.6944	Boosted Trees	9	0.9769	Boosted Trees	5	0.8009
KNN	3	0.6852	Random Forest	6	0.9676	Boosted Trees	6	0.7685
KNN	4	0.6713	Random Forest	8	0.9676	Boosted Trees	9	0.7616
Random Forest	3	0.6620	Boosted Trees	10	0.9676	Random Forest	5	0.7292
Random Forest	4	0.6620	Boosted Trees	11	0.9676	Boosted Trees	8	0.7269
Random Forest	5	0.6620	Boosted Trees	6	0.9676	Boosted Trees	4	0.7269
Boosted Trees	11	0.6574	Random Forest	9	0.9676	Boosted Trees	3	0.7269
KNN	11	0.6528	Boosted Trees	4	0.9630	Boosted Trees	7	0.7245
Random Forest	7	0.6481	Random Forest	5	0.9630	Boosted Trees	10	0.7106
Random Forest	9	0.6481	Boosted Trees	5	0.9630	Random Forest	7	0.7060

Tabla B.52: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	3	0.6667	Boosted Trees	9	0.9537	Boosted Trees	7	0.7870
KNN	4	0.6481	Random Forest	8	0.9537	Boosted Trees	5	0.7731
KNN	8	0.6296	Boosted Trees	10	0.9537	Boosted Trees	3	0.7361
SVCstd-p	7	0.6204	Random Forest	11	0.9537	Boosted Trees	4	0.7315
KNN	5	0.6204	Boosted Trees	11	0.9537	Random Forest	5	0.7083
Boosted Trees	3	0.6111	Random Forest	9	0.9444	Boosted Trees	6	0.7037
Random Forest	9	0.6111	Boosted Trees	6	0.9444	Random Forest	6	0.6944
Random Forest	10	0.6111	SVC-rbf	3	0.9444	Random Forest	8	0.6852
Boosted Trees	9	0.6111	Boosted Trees	8	0.9444	Boosted Trees	8	0.6806
SVCstd-p	10	0.6111	Boosted Trees	7	0.9444	Random Forest	4	0.6806

Tabla B.53: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	7	0.7037	Boosted Trees	4	0.9722	Boosted Trees	5	0.8426
Boosted Trees	8	0.6944	Boosted Trees	5	0.9722	Boosted Trees	7	0.8148
Random Forest	5	0.6852	Boosted Trees	10	0.9630	Boosted Trees	6	0.8009
KNN	11	0.6759	Random Forest	9	0.9630	Boosted Trees	3	0.7778
KNN	10	0.6759	Boosted Trees	11	0.9630	Boosted Trees	4	0.7778
Boosted Trees	6	0.6667	Random Forest	10	0.9537	Boosted Trees	8	0.7546
KNN	8	0.6667	Random Forest	8	0.9537	Boosted Trees	9	0.7269
KNN	9	0.6667	Boosted Trees	8	0.9537	Boosted Trees	11	0.7269
Boosted Trees	4	0.6574	Random Forest	7	0.9537	Boosted Trees	10	0.7222
KNN	6	0.6574	Random Forest	6	0.9537	Random Forest	5	0.7083

Tabla B.54: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical somatosensorial HbR.

Área visual

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	8	0.7083	Boosted Trees	7	0.9833	Boosted Trees	3	0.7708
KNN	9	0.7083	Boosted Trees	10	0.9750	Boosted Trees	4	0.7708
Boosted Trees	9	0.6917	Boosted Trees	11	0.9667	Boosted Trees	7	0.7583
Random Forest	4	0.6917	Boosted Trees	6	0.9667	Boosted Trees	10	0.7500
KNN	10	0.6917	Boosted Trees	3	0.9583	Boosted Trees	11	0.7500
Random Forest	5	0.6750	SVC-rbf	3	0.9583	Random Forest	5	0.7375
KNN	7	0.6750	Boosted Trees	4	0.9583	Random Forest	7	0.7375
KNN	3	0.6750	Boosted Trees	8	0.9583	Boosted Trees	5	0.7250
Random Forest	3	0.6750	Random Forest	10	0.9583	Random Forest	9	0.7208
Boosted Trees	10	0.6750	Boosted Trees	9	0.9500	Random Forest	8	0.7167

Tabla B.55: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Gaussian Class	4	0.6500	Boosted Trees	3	0.9667	Boosted Trees	3	0.8333
Boosted Trees	9	0.6500	Boosted Trees	11	0.9667	Boosted Trees	4	0.8000
Boosted Trees	8	0.6500	Boosted Trees	7	0.9667	Boosted Trees	5	0.7417
Gaussian Class	5	0.6500	Boosted Trees	9	0.9667	Boosted Trees	6	0.7250
Gaussian Class	3	0.6500	Boosted Trees	6	0.9667	Random Forest	11	0.7083
Random Forest	9	0.6333	Boosted Trees	10	0.9667	Boosted Trees	7	0.7000
KNN	9	0.6167	Boosted Trees	5	0.9667	Random Forest	8	0.7000
KNN	11	0.6167	Boosted Trees	4	0.9667	Random Forest	9	0.6917
Gaussian Class	6	0.6167	Boosted Trees	8	0.9667	Random Forest	7	0.6833
SVC-rbf	4	0.6000	Random Forest	8	0.9500	Boosted Trees	11	0.6750

Tabla B.56: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual HbO.

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
KNN	8	0.7333	Boosted Trees	11	0.9833	Boosted Trees	9	0.7917
KNN	9	0.7000	Boosted Trees	10	0.9833	Boosted Trees	7	0.7750
Boosted Trees	3	0.6833	Boosted Trees	3	0.9667	Boosted Trees	8	0.7417
Random Forest	9	0.6833	Boosted Trees	9	0.9667	Random Forest	10	0.7333
KNN	10	0.6833	SVC-pol	8	0.9667	Random Forest	7	0.7250
Random Forest	11	0.6833	Random Forest	10	0.9667	Random Forest	9	0.7250
Boosted Trees	9	0.6667	Random Forest	6	0.9667	Random Forest	8	0.7167
Boosted Trees	4	0.6500	Random Forest	5	0.9667	Boosted Trees	10	0.7167
SVC-pol	8	0.6500	Boosted Trees	5	0.9667	Boosted Trees	11	0.7167
SVC-pol	9	0.6500	Random Forest	9	0.9667	Random Forest	11	0.7000

Tabla B.57: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, área cortical visual HbR.

Canales específicos

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	7	0.7500	Boosted Trees	11	1.0000	Boosted Trees	3	0.8750
KNN	5	0.7500	Boosted Trees	7	1.0000	Boosted Trees	4	0.8750
KNN	3	0.7500	Boosted Trees	10	1.0000	SVCstd-l	10	0.8333
KNN	6	0.7500	Random Forest	10	0.9167	SVCstd-l	3	0.8333
Gaussian Class	3	0.7500	SVCstd-l	9	0.9167	SVCstd-l	4	0.8333
SVCstd-r	3	0.7500	SVC-lin	9	0.9167	SVCstd-l	8	0.8333
KNN	4	0.7500	Boosted Trees	5	0.9167	SVCstd-l	9	0.8333
SVC-rbf	9	0.6667	SVCstd-l	7	0.9167	SVCstd-l	7	0.8333
SVCstd-s	9	0.6667	SVCstd-l	8	0.9167	SVCstd-l	11	0.8333
SVCstd-r	9	0.6667	Boosted Trees	9	0.9167	Random Forest	8	0.7917

Tabla B.58: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos.

HbO

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
SVCstd-r	7	0.7500	Boosted Trees	11	1.0000	Boosted Trees	3	0.8750
KNN	5	0.7500	Boosted Trees	7	1.0000	Boosted Trees	4	0.8750
KNN	3	0.7500	Boosted Trees	10	1.0000	SVCstd-l	10	0.8333
KNN	6	0.7500	Random Forest	10	0.9167	SVCstd-l	3	0.8333
Gaussian Class	3	0.7500	SVCstd-l	9	0.9167	SVCstd-l	4	0.8333
SVCstd-r	3	0.7500	SVC-lin	9	0.9167	SVCstd-l	8	0.8333
KNN	4	0.7500	Boosted Trees	5	0.9167	SVCstd-l	9	0.8333
SVC-rbf	9	0.6667	SVCstd-l	7	0.9167	SVCstd-l	7	0.8333
SVCstd-s	9	0.6667	SVCstd-l	8	0.9167	SVCstd-l	11	0.8333
SVCstd-r	9	0.6667	Boosted Trees	9	0.9167	Random Forest	8	0.7917

Tabla B.59: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos HbO.

HbR

Preprocesado			Normalizado			Estandarizado		
<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>	<i>Modelo</i>	<i>K</i>	<i>Precisión</i>
Boosted Trees	9	0.8333	SVC-pol	4	1.0000	Random Forest	3	0.8333
SVC-pol	3	0.6667	SVCstd-s	3	1.0000	Boosted Trees	3	0.7500
SVCstd-p	6	0.6667	Random Forest	8	1.0000	Boosted Trees	5	0.6667
SVCstd-p	4	0.6667	SVCstd-r	7	0.8333	Boosted Trees	8	0.6667
SVCstd-p	9	0.6667	SVCstd-r	8	0.8333	Random Forest	8	0.6667
Random Forest	5	0.6667	SVCstd-l	5	0.8333	Boosted Trees	4	0.6667
SVCstd-p	10	0.6667	SVCstd-r	5	0.8333	SVCstd-p	3	0.5833
Random Forest	4	0.6667	Log Reg	5	0.8333	Boosted Trees	9	0.5833
Random Forest	9	0.6667	KNN	5	0.8333	Random Forest	10	0.5833
SVCstd-s	4	0.6667	Log Reg	8	0.8333	SVC-pol	6	0.5000

Tabla B.60: Mejores resultados de clasificación, movimiento lateral de la cabeza, canales específicos HbR.

Apéndice C

Apéndice Trabajo Adicional

C.1. Artículo de divulgación

El artículo de divulgación científica, publicado en julio de 2022. Puede ser visitado a través de la siguiente liga: <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/el-sistema-vestibular-los-sentidos-y-la-ubicacion-espacial/>

De igual forma, a continuación, se presenta el contenido de esa publicación:

C.1.1. El sistema vestibular, los sentidos y la ubicación espacial

Las actividades que realizamos diariamente presentan procesos internos más complejos de lo que parecen. El aparato vestibular localizado en una parte interna de la cabeza del cuerpo humano, recibe señales del exterior a través de los órganos sensoriales que le permiten conocer cómo es el ambiente y cuál es su ubicación en el mismo.

Sentidos del cuerpo humano

Desde la gestación, los sonidos representan un medio de comunicación para el humano. La comprensión de los sentidos es un trabajo multidisciplinario y existen muchas clasificaciones.

Los sentidos pueden catalogarse en físicos y químicos por la forma en que captan y transmiten estímulos. Hay cinco sentidos considerados clásicos: vista, oído, tacto, olfato, y gusto. Cada uno constituye un sistema con órganos y componentes propios; los sentidos recogen un determinado tipo de información desde el exterior y generan una señal eléctrica que llega al cerebro a través de nervios. Gracias a ellos, se construye la percepción.

Sentidos Químicos

La nariz, principal órgano del olfato, detecta y reconoce olores mediante reacciones químicas cuando una molécula estimula al receptor (cilio) de la mucosa nasal. Se relaciona estrechamente con el sentido del gusto, con la lengua como órgano fundamental. Suelen actuar juntos, por ejemplo, al detectar el sabor de los alimentos; cuando el sistema olfativo no es adecuado, no es posible reconocer plenamente los sabores. Similar al olfato, el gusto reacciona químicamente a la unión entre moléculas con sus receptores (papilas gustativas).

Sentidos Físicos

Los ojos, principales órganos de la visión, actúan en función de la luz captando la frecuencia electromagnética reflejada por cada objeto (reaccionan a estímulos físicos).

De esta manera, es posible recrear una realidad gráfica.

Los oídos, órganos fundamentales de la audición, actúan como transductores detectando ondas sonoras. Normalmente la señal viaja por el medio aéreo, sin embargo, al ser un principio mecánico puede desarrollarse a través de vibraciones en otras partes sólidas.

La piel, principal órgano del tacto, está presente a lo largo del cuerpo (es el órgano más grande). La piel detecta cambios de temperatura y reconoce el contacto físico directo generando señales a partir de un estímulo mecánico obtenido por los propioceptores ubicados en músculos, articulaciones y tendones; los vellos detectan las señales más sensibles.

Además de estos sentidos, existen otros que contribuyen a la ubicación en el espacio. A continuación, se describe uno, llamado Sistema Vestibular.

El sistema vestibular (SV) comienza a formarse en los primeros días de gestación; desde entonces, permite conocer la posición que ocupamos en el espacio. Su principal estructura anatómica es el aparato vestibular, se localiza al interior de la cabeza del cuerpo humano, yuxtapuesto al oído interno. Está formado por tres canales semicirculares (anterior, posterior y lateral) orientados en las tres diferentes direcciones del espacio, que detectan la aceleración angular y todos inician y terminan en el utrículo.

Con la cabeza erguida, los conductos laterales están inclinados aproximadamente 30° hacia arriba respecto a la mirada; los canales anteriores se hallan a 45° en relación con la posición sagital, y los posteriores forman un ángulo de 55° con el plano frontal (Garza, 2015) . (Figura 1)

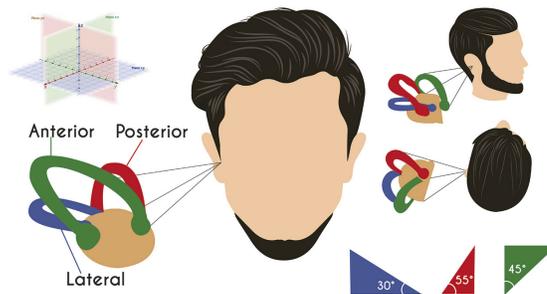


Figura C.1: Figura 1. Canales semicirculares. Elaboración propia.

Órganos otolíticos: Utrículo y sáculo. Detectan aceleraciones lineales y actúan influenciados por la gravedad. El utrículo actúa en función de movimientos horizontales y el sáculo en movimientos verticales (Figura 2).

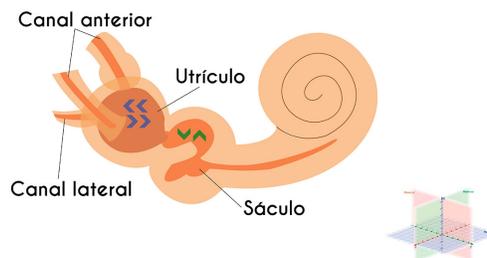


Figura C.2: Figura 2. Órganos otolíticos. Elaboración propia.

Ubicación espacial: SV + sentidos clásicos

En la etapa de gestación, la conciencia sobre el medio exterior se adquiere a partir del desarrollo de receptores sensoriales (que preceden el desarrollo de los sentidos) (Vélez-Coto, 2022): el sistema vestibular, al formarse antes que el sistema visual, permite al feto reconocer el medio dónde se encuentra al crear conexiones con centros de control postural, movimiento, alerta e integración sensorial; así puede establecer su sistema de comunicación. De este modo, durante los primeros años de vida la visión es guiada por el movimiento; luego, con la maduración de la visión, el proceso se invierte. (Aribau, 2020).

Comprender el entorno a través de exploración e interacción, requiere un proceso de trabajo conjunto: un sistema visual capaz de detectar imágenes no sería bien aprovechado sin un procesamiento cognitivo que relacione las características físicas obtenidas por otros sentidos. Este tipo de procesos ocurren gracias a un sistema sensorial² que involucra sentidos conocidos como internos (o somáticos).

La integración sensorial permite interactuar con el medio ambiente formando un propio esquema personal de la realidad creado con información visual, táctil y auditiva que se relaciona en el SV. Así es posible guiar los primeros movimientos.

Sistema vestibular y vista

El SV y la vista representan la relación más conocida en la capacidad de ubicarse en el espacio. Crean una representación estable del espacio exterior y el desarrollo de habilidades visoespaciales (Donoso & Novoa, 2019). La capacidad visoespacial considera funciones necesarias para analizar, comprender y manejar espacios bidimensionales, tridimensionales, reconocimiento de imágenes, navegación mental, percepción de distancia y profundidad. La visión identifica objetos a distancias largas.

Sistema vestibular y oído

La relación entre SV y oído es evidentemente anatómica porque comparten estructura. El SV es determinante para un buen desarrollo de la audición. La audición espacial permite conocer e interpretar características del entorno a través del sonido, detectando fuente y lugar o dirección de donde proviene. Así, logra advertir objetos circundantes desde distancias medias. Problemas al interpretar sonidos generan distorsión en la relación cuerpo-espacio; por ejemplo, las frecuencias graves tienen relación directa con el equilibrio.

Sistema vestibular y tacto

Una función del tacto, tan grande como el cuerpo humano es la propiocepción: facultad de tener conciencia física de cada parte del organismo. Los propioceptores correspondientes a este sentido permiten conocer la posición que el cuerpo ocupa en el espacio y los movimientos que efectúa; al realizar acciones que estimulan a articulaciones o músculos creando una base neurológica para la estabilización, movimientos eficientes y relaciones espaciales (Toledo, 2007). El sistema táctil permite identificar objetos en la distancia corta inmediata.

Sistema vestibular, la central de operaciones

El SV es una central sensorial que reacciona de manera instantánea a través de dos vías:

Directa: actúan neuronas primarias vestibulares, neuronas secundarias vestibulares, y motoneuronas efectoras del movimiento. Indirecta: son neuronas más específicas y con mayor alcance en estructuras cerebrales. Tres tipos de reflejos vestibulares se relacionan con el sistema motor:

Vestibulocervical: Mantiene la cabeza estacionaria y en posición correcta en el espacio; por ejemplo, activa los músculos cervicales antagonistas cuando la cabeza es girada.

Vestibuloespinal: Compensa los movimientos corporales, corrige inestabilidad de la cabeza y del cuerpo a través de sus conexiones centrales para el control de los ojos, la cabeza y los movimientos corporales. Contribuye a mantener la cabeza erguida y el equilibrio.

Vestíbulo-ocular. Conserva la posición de los ojos en un lugar fijo para lograr que la imagen permanezca estable en la retina cuando la cabeza o el cuerpo están en movimiento.

Así entonces. . .

Los sentidos son fundamentales para la supervivencia; explorar profundamente nos lleva al SV, cuyo desarrollo es importante para continuar la adaptación al medio, además de contribuir en la motricidad, movilidad, propiocepción, y percepción espacial. El aparato vestibular se desarrolló aumentando su tamaño comparado con especies antecesoras y animales demostrando su importancia para lograr la bipedestación y el desplazamiento (Day & Fitzpatrick, 2005).

El SV es determinante para establecer un grado de propiocepción de un individuo, principal responsable del equilibrio, involucrado en la percepción auditiva y visual, e interviene con el sistema nervioso. Además, permite una reacción automática en situaciones que incluyen espacio y movimiento, sin recurrir a la información visual, como tener la sensación de estar al borde del escalón o cerca de un objeto. Gracias a las operaciones del SV, los movimientos se controlan y dirigen automáticamente.

El ser humano interactúa con el medio exterior gracias a los sentidos. Su desarrollo y evolución no habrían sido posibles sin la capacidad de desplazarse, conocer y reconocer desde cualquier distancia el espacio que habita, advirtiéndose de peligros y aprovechando los beneficios del entorno; o sin la facultad de sentir superficies y reaccionar ante sensaciones generadas por el contacto físico directo. Sin embargo, los sentidos no actúan solos, y convergen en un punto oculto profundamente en la cabeza.