



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

ESTUDIO DEL GRADO DE ACOPLAMIENTO DEL REGISTRO ELECTROMIOGRÁFICO DE LOS DISTINTOS MÚSCULOS DEGLUTORIOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CAUSALIDAD DE GRANGER

AUTORA: MARINA GALIANO BOTELLA

TUTOR: FRANCISCO JAVIER GARCÍA CASADO

COTUTORA: YIYAO YE LIN

Curso Académico: 2020-21



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Javi y Yiyao y a Gema por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Gracias por ayudarme y aconsejarme para obtener el mejor resultado del proyecto.

A mi familia y María por levantarme el ánimo cuando más lo necesitaba.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA**



RESUMEN

La disfagia es la dificultad o la incapacidad para deglutir los alimentos o bebidas y puede ser de origen muscular o neurológico. Una de cada 17 personas durante el transcurso de su vida presentará alguna forma de disfagia con posibles consecuencias como la desnutrición, la aspiración pulmonar, la mortalidad y la mala calidad de vida. La electromiografía de superficie (sEMG) se ha propuesto como herramienta prometedora para evaluar la fisiología de la deglución. Tradicionalmente su estudio se ha centrado en el análisis temporal y espectral.

En este trabajo se estudió el grado de acoplamiento del registro sEMG de tres pares de músculos deglutorios (maseteros, suprahioides, infrahioides) de sujetos sanos y patológicos mediante el análisis de la causalidad de Granger (GC) durante la ingesta de saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL. Se computó GC en ventanas móviles de 0.5 y 1s, quedando cada registro caracterizado por su valor máximo. Se determinaron los pares musculares con mayor acoplamiento y se estudiaron mediante pruebas estadísticas las diferencias significativas de GC entre los sujetos sanos y patológicos, el efecto del bolo y de la direccionalidad de las conexiones.

Los resultados muestran un alto grado de acoplamiento en conexiones horizontales (lados del mismo músculo) tanto en sujetos sanos como en patológicos. Las conexiones verticales ipsilaterales son moderadas, encontrando pérdida de coordinación en sujetos patológicos que parece compensada por una elevada GC en las conexiones horizontales. Las conexiones verticales contralaterales son débiles sujetos sanos y patológicos. En el análisis del efecto del bolo se encontraron diferencias significativas en las conexiones verticales ipsilaterales izquierdas en sujetos patológicos. El análisis de la direccionalidad muestra pérdida de asimetría en los músculos suprahioides-infrahioides. Estos aspectos ayudarán a identificar futuros biomarcadores basados en las conexiones musculares para el diagnóstico precoz de la disfagia y la evaluación de su progreso.

PALABRAS CLAVE: Electromiografía; disfagia; causalidad de Granger; acoplamiento; sincronización



RESUM

La disfàgia és la dificultat o la incapacitat per a deglutir els aliments o begudes i pot ser d'origen muscular o neurològic. Una de cada 17 persones durant el transcurs de la seua vida presentarà alguna forma de disfàgia amb possibles conseqüències com la desnutrició, l'aspiració pulmonar, la mortalitat i la mala qualitat de vida. L'electromiografia de superfície (sEMG) s'ha proposat com a eina prometedora per a avaluar la fisiologia de la deglució. Tradicionalment el seu estudi s'ha centrat en l'anàlisi temporal i espectral.

En aquest treball es va estudiar el grau d'acoblament del registre sEMG de tres parells de músculs deglutorios (masseters, suprahoidals, infrahoidals) de subjectes sans i patològics mitjançant l'anàlisi de la causalitat de Granger (GC) durant la ingesta de saliva, aigua 10 mL i iogurt 10 mL. Es va computar GC en finestres mòbils de 0.5 y 1s, quedant cada registre caracteritzat pel seu valor màxim. Es van determinar els parells musculars amb major acoblament i es van estudiar mitjançant proves estadístiques les diferències significatives de GC entre els subjectes sans i patològics, l'efecte del bol alimentari i de la direccionalitat de les connexions.

Els resultats mostren un alt grau d'acoblament en connexions horitzontals (costats del mateix múscul) tant en subjectes sans com en patològics. Les connexions verticals ipsilaterales són moderades, trobant pèrdua de coordinació en subjectes patològics que sembla compensada per una elevada GC en les connexions horitzontals. Les connexions verticals contralaterales són febles per a subjectes sans i patològics. En l'anàlisi de l'efecte del bol es van trobar diferències significatives en les connexions verticals ipsilaterales esquerres en subjectes patològics. L'anàlisi de la direccionalitat mostra pèrdua d'asimetria en els músculs suprahoidals-infrahoidals. Aquests aspectes ajudaran a identificar futurs biomarcadores basats en les connexions musculars per al diagnòstic precoç de la disfàgia i l'avaluació del seu progrés.

PARAULES CLAU: Electromiografia; disfàgia; causalitat de Granger; acoblament; sincronització



ABSTRACT

Dysphagia is the difficulty or inability to swallow food or drink and can be muscular or neurological in its origin. One in 17 people in their lifetime will experience some form of dysphagia with possible consequences such as malnutrition, pulmonary aspiration, mortality and poor quality of life. Surface electromyography (sEMG) has been proposed as a promising tool to assess swallowing physiology. Traditionally, its study has focused on temporal and spectral analysis.

In this work the degree of coupling of the sEMG recording of three pairs of swallowing muscles (masseter, suprahyoid, infrahyoid) from healthy and pathological subjects was studied using Granger causality (GC) analysis during the swallowing of saliva, 10 mL water and 10 mL yoghurt. GC was computed in moving windows of 0.5 and 1s, with each recording characterised by its maximum value. The muscle pairs with the highest coupling were determined and significant differences in GC between healthy and pathological subjects, the effect of the bolus and the directionality of the connections were studied by statistical tests.

The results show a high degree of coupling in horizontal connections (sides of the same muscle) in both healthy and pathological subjects. Ipsilateral vertical connections are moderate, finding a loss of coordination in pathological subjects that seems to be compensated by a high GC in horizontal connections. Contralateral vertical connections are weak in healthy and pathological subjects. In the bolus effect analysis, significant differences were found in left ipsilateral vertical connections in pathological subjects. Directionality analysis shows loss of asymmetry in the suprahyoid-infrahyoid muscles. These aspects will help to identify future biomarkers based on muscle connections for early diagnosis of dysphagia and assessment of its progression.

KEY WORDS: Electromyography; dysphagia; Granger causality; coupling; synchronisation.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA**



ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I: MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	19
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
5. CONCLUSIONES	72
6. REFERENCIAS	73

DOCUMENTO II: PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN AL PRESUPUESTO.....	79
2. CUADRO DE PRECIOS DE MANO DE OBRA.	80
3. CUADRO DE PRECIOS DE MAQUINARIA.....	81
4. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS	82
5. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS	86
6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL Y POR CONTRATA	102



TABLA DE ABREVIATURAS

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
AIC	Criterio de Información de Akaike
BBDD	Base de Datos
BIC	Criterio de Información Bayesiano
Ci2B	Centro de Investigación e Innovación de Bioingeniería
EEG	Electroencefalografía
EEUU	Estados Unidos
EMG	Electromiografía
fMRI	Resonancia Magnética Funcional
GC	Causalidad de Granger
LIH	Infrahioideo izquierdo
LM	Masetero Izquierdo
LSH	Suprahioideo izquierdo
LWR	<i>Locally Weighted Regression</i>
MAR	Modelo Autorregresivo
MECV-V	Método de Exploración Clínica Volumen-Viscosidad
MEG	Magnetoencefalografía
MVGC	Causalidad de Granger Multivariable
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i>
RIH	Infrahioideo derecho
RM	Masetero Derecho
RSH	Suprahioideo derecho
sEMG	Electromiografía de superficie
VAR	Vector Autorregresivo

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Corte sagital de la región de la faringe y anatomía simplificada implicada en la deglución. Modificada de [3].	20
Figura 2. Anatomía de la región anterior de la cara. Anatomía del músculo masetero implicado en la deglución.	21
Figura 3. Vista anterior del cuello. Anatomía de los músculos suprahioides implicada en la deglución.	21
Figura 4. Vista anterior del cuello. Anatomía de los músculos infrahioides implicada en la deglución.	21
Figura 5. Localización del bolo en cada una de las fases de la deglución. Modificado de [7]....	23
Figura 6. Representación del método de exploración clínica volumen-viscosidad (MECV-V). 27	
Figura 7. Ubicaciones de los electrodos de electromiograma para probar los músculos orbiculares (OO), maseteros (M), suprahioides (SH) e infrahioides (IH). Imagen obtenida en [30]......	30
Figura 8. Esquema del procedimiento seguido durante el proyecto.....	34
Figura 9. Esquema de la disposición de los datos en la base de datos utilizada.....	35
Figura 10. Izquierda: esquema de la colocación de los electrodos en los sujetos. Derecha: colocación de electrodos en un sujeto. Imagen obtenida en [45].	35
Figura 11. Ejemplo de visualización de las señales de actividad eléctrica de los músculos medidos en un sujeto y bolo específicos. Remarcado en amarillo se encuentra el reflejo deglutorio, el trago del bolo, caracterizado por un aumento del voltaje en la señal.	36
Figura 12. Izda: Representación de la GC directa. Dcha: Representación de GC indirecta. La línea continua representa la causalidad directa; la línea discontinua representa la causalidad indirecta.	38
Figura 13. Esquema del algoritmo para el cálculo de la causalidad de Granger.	41
Figura 14. Esquema de las ventanas móviles de señal utilizadas en el proyecto.	42
Figura 15. 3s de señal EMG de los músculos suprahioides derecha e izquierda del sujeto C633 sano y el valor de causalidad Granger en ventana móvil de 0.5s. Se remarca los tramos de señal asociado a la deglución de agua 10 mL y un ejemplo de la actividad basal en amarillo y en azul respectivamente. (A) EMG del músculo suprahiideo derecho. (B) EMG del músculo suprahiideo izquierdo. (C) Causalidad Granger del suprahiideo derecho a izquierdo. (D) Causalidad Granger del suprahiideo izquierdo a derecho.	44
Figura 16. 3s de señal EMG de los músculos suprahioides derecha e izquierda del sujeto C633 y el valor de causalidad Granger en ventana móvil de 1s. Se remarca los tramos de señal asociado	

a la deglución de agua de 10 mL y un ejemplo de la actividad basal en amarillo y en azul respectivamente. (A) EMG del músculo suprahiodeo derecho. (B) EMG del músculo suprahiodeo izquierdo. (C) Causalidad Granger del suprahiodeo derecho a izquierdo. (D) Causalidad Granger del suprahiodeo izquierdo a derecho. 44

Figura 17. Esquema explicativo del algoritmo para destacar los pares de músculos con mayores GC. 46

Figura 18. Conexiones de los pares musculares que se van a analizar..... 58

Figura 19. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos maseteros. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 59

Figura 20. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos suprahiodeos. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 60

Figura 21. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos infrahiodeos. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 61

Figura 22. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical izquierda entre los músculos masetero-suprahiodeo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 63

Figura 23. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical derecha entre los músculos masetero-suprahiodeo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 63

Figura 24. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical izquierda entre los músculos suprahiodeo-infrahiodeo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 65

Figura 25. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical derecha entre los músculos suprahiodeo-infrahiodeo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos. 65

Figura 26. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. El bolo saliva se muestra con línea continua, el bolo agua con línea discontinua y el bolo yogur con línea continua de mayor grosor. 69



Figura 27. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. Los sujetos sanos se muestran con línea continua y los sujetos patológicos con línea discontinua. 70

Figura 28. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. El bolo saliva se muestra con línea continua, el bolo agua con línea discontinua y el bolo yogur con línea continua de mayor grosor. La ilustración de la izquierda pertenece a los sujetos sanos y la de la derecha a los sujetos patológicos..... 71



TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Síntomas de la disfagia orofaríngea y esofágica.	25
Tabla 2. Patologías que causan disfagia orofaríngea.	25
Tabla 3. Patologías que causan disfagia esofágica.	26
Tabla 4. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	49
Tabla 5. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	49
Tabla 6. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	49
Tabla 7. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	50
Tabla 8. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	50
Tabla 9. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	50
Tabla 10. Porcentaje promedio de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).	51
Tabla 11. Porcentaje promedio de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).	51
Tabla 12. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo salivar y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	53
Tabla 13. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).	53



Tabla 14. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para)..... 53

Tabla 15. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). 54

Tabla 16. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). 54

Tabla 17. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). 54

Tabla 18. Promedio en porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).. 55

Tabla 19. Promedio en porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).. 55

Tabla 20. Diferencia en porcentaje entre sanos y patológicos de los promedios que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 0.5s. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para)..... 57

Tabla 21. Diferencia en porcentaje entre sanos y patológicos de los promedios que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 1s. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). 57

Tabla 22. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo saliva. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos..... 68

Tabla 23. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo agua 10 mL. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal



(para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos..... 68

Tabla 24. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo yogur 10 mL. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos..... 69

Tabla 25. Resultados en p-valores del análisis estadístico del efecto del bolo para sujetos sanos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. 70

Tabla 26. Resultados en p-valores del análisis estadístico del efecto del bolo para sujetos patológicos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. 70

Tabla 27. Resultados en p-valores del análisis estadístico de la direccionalidad de las conexiones musculares por pares musculares para sujetos sanos y patológicos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. Diferencia significativa en negrita. 71

Tabla 28. Cuadro de precios MANO DE OBRA. 80

Tabla 29. Cuadro de precios MAQUINARIA..... 81

Tabla 30. Cuadro de precios unitarios..... 82

Tabla 31. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 1 del presente proyecto..... 86

Tabla 32. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 2 del presente proyecto..... 90

Tabla 33. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 3 del presente proyecto..... 92

Tabla 34. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 4 del presente proyecto..... 98

Tabla 35. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 5 del presente proyecto..... 100

Tabla 36. Presupuesto genérico del presente proyecto (I)..... 102

Tabla 37. Presupuesto genérico del presente proyecto (II). 103



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA**



DOCUMENTO I:

MEMORIA



ÍNDICE DE MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN	20
1.1.	Musculatura implicada en la deglución.....	20
1.1.1.	Anatomía de la musculatura implicada en la deglución	20
1.1.2.	Actividad electromecánica de la musculatura implicada en la deglución	22
1.2.	Disfagia	24
1.2.1.	Descripción general de la disfagia.....	24
1.2.2.	Clasificación de la disfagia y síntomas	24
1.2.3.	Patologías relacionadas con la disfagia	25
1.2.4.	Diagnóstico y tratamiento de la disfagia	26
1.3.	Electromiografía de superficie (sEMG)	29
1.3.1.	Consideraciones generales de la sEMG	29
1.3.2.	Casos de uso de sEMG en deglución	30
1.3.3.	Estado del arte de la causalidad de Granger en sEMG.....	31
2.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	33
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1.	Composición de la base de datos.....	34
3.2.	Causalidad de Granger	36
3.2.1.	Descripción general de la causalidad de Granger.....	36
3.2.2.	Modelo autorregresivo	37
3.2.3.	Orden del modelo	37
3.2.4.	Causalidad de Granger (no condicionada) en el dominio temporal	38
3.2.5.	Causalidad de Granger condicionada en el dominio temporal	39
3.2.6.	Requisitos para el cálculo de la causalidad de Granger	40
3.2.7.	Cálculo de la causalidad de Granger en MVGC	41
3.2.8.	Parámetros establecidos para el cálculo de la causalidad de Granger.....	42
3.3.	Análisis de los resultados de la causalidad de Granger	43
3.4.	Análisis estadístico de los datos	47
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1.	Selección de ventana móvil.....	48
4.2.	Evaluación de las conexiones de pares musculares.....	58
4.2.1.	Conexiones horizontales	59
4.2.2.	Conexión vertical ipsilateral masetero-suprahioideo	62
4.2.3.	Conexión vertical ipsilateral suprahioideo-infrahioideo	64



4.3. Líneas futuras de trabajo	72
5. CONCLUSIONES	73
6. REFERENCIAS	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Musculatura implicada en la deglución

1.1.1. Anatomía de la musculatura implicada en la deglución

La deglución es una función innata. Esta función tiene procesos tanto voluntarios como involuntarios al dar comienzo. Además, la deglución puede parecer una función simple, sin embargo, es compleja y envuelve en su ejecución a un gran grupo de más de 30 músculos y nervios. Estos nervios y músculos tienen dos funciones biológicas esenciales: el paso de los alimentos desde la cavidad oral hasta el estómago y la protección de las vías respiratorias [1], [2].

La deglución es el inicio del transporte del bolo hacia el estómago. Varios nervios y músculos son componentes integrales de este acto fisiológico. La coordinación de los nervios permite masticar, elevar el paladar y propulsar el bolo alimenticio hacia el esófago. Por otro lado, los grupos musculares están implicados en todas las fases de la deglución regulando y coordinando el acto psicológico [1]. La anatomía simplificada de la región faríngea implicada en la deglución se muestra en la Figura 1.

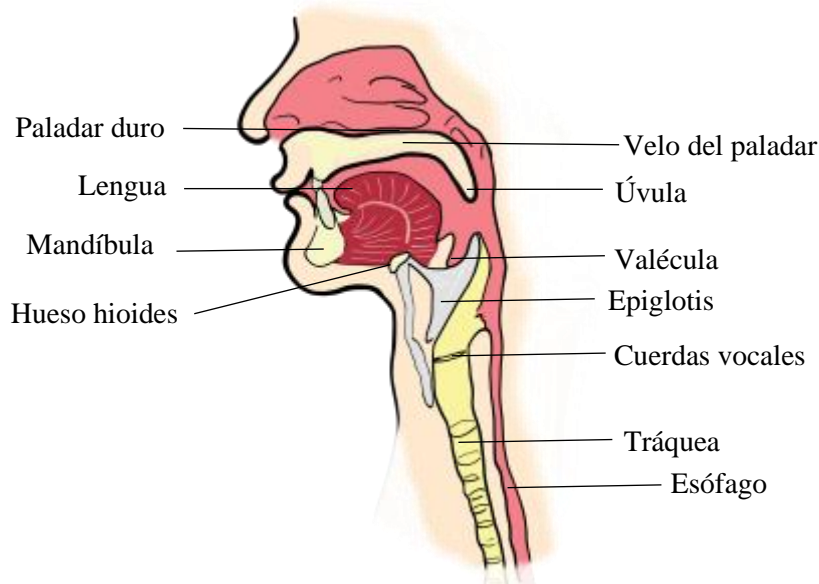


Figura 1. Corte sagital de la región de la faringe y anatomía simplificada implicada en la deglución. Modificada de [3].

La deglución humana se distingue en tres fases: fase oral, fase faríngea y fase esofágica, la primera de estas fases es voluntaria y las otras dos son acciones reflejas. Existen tres grupos musculares importantes participantes en las distintas fases de la deglución: maseteros, suprahioides e infrahioides. Los músculos maseteros ayudan a impulsar hacia la faringe un bolo alimenticio, el inicio de la fase faríngea. Además, estos músculos participan en la masticación ayudando a descomponer el alimento ingerido [1]. La localización anatómica de los músculos maseteros se muestra en la Figura 2.

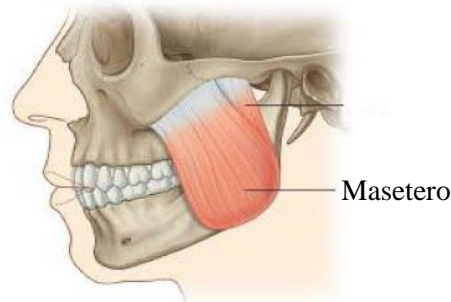


Figura 2. Anatomía de la región anterior de la cara. Anatomía del músculo masetero implicado en la deglución.

Los músculos suprahioides ayudan a elevar el hueso hioides durante la deglución. Este grupo muscular incluye a los músculos superficiales (digástrico y estilohioideo), medio (milohioideo) y profundo (geniohioideo) [1]. Su anatomía se muestra en la Figura 3.

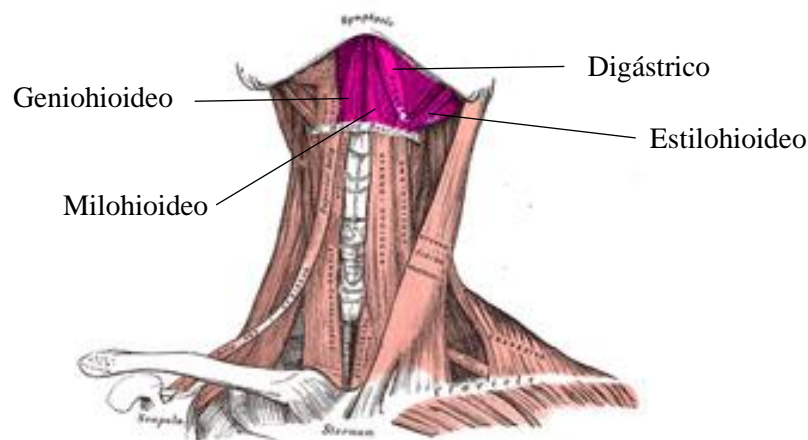


Figura 3. Vista anterior del cuello. Anatomía de los músculos suprahioides implicada en la deglución.

Los músculos infrahioides, comúnmente llamados músculos de la correa, funcionan de forma opuesta a los músculos suprahioides y actúan para deprimir el hueso hioides durante la deglución. Estos músculos incluyen los músculos omohioides, esternohioides, esternotiroideos y tirohioideo[1], [4]. En la Figura 4 se muestra la anatomía de esta musculatura.

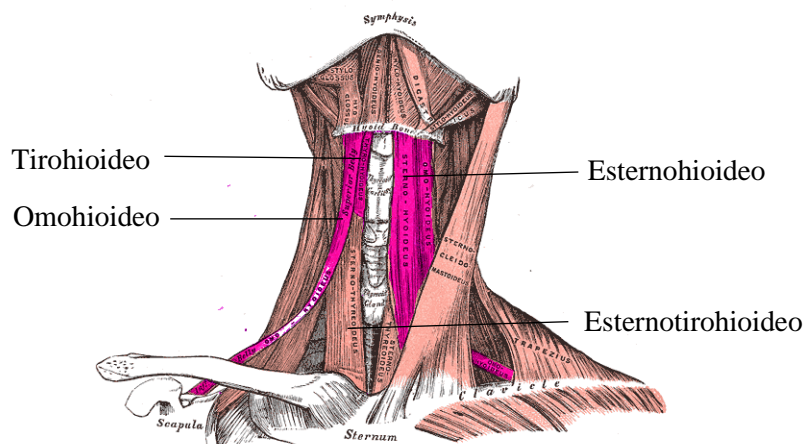


Figura 4. Vista anterior del cuello. Anatomía de los músculos infrahioides implicada en la deglución.

1.1.2. Actividad electromecánica de la musculatura implicada en la deglución

La deglución humana se caracteriza por tener tres fases: fase oral, fase faríngea y fase esofágica. Tal y como se ha mencionado en *1.1.1. Anatomía de la musculatura implicada en la deglución* la primera de estas fases es voluntaria y las otras dos son reflejas.

La fase oral, a su vez, se divide en una fase preparatoria y fase de iniciación. La fase oral comienza con la entrada en la boca del bolo desde el exterior al mundo interno, seguro y homogéneo a nivel digestivo. La primera función de la fase preparatoria es probar el alimento para verificar que no es dañino [4].

La fase de iniciación se define como el transporte voluntario del bolo alimenticio hacia la zona desencadenante de la fase faríngea. Esta fase voluntaria es la última defensa contra la absorción de alimentos peligrosos, en ocasiones es complicada la deglución de los comprimidos o cápsulas debido a que la corteza cerebral debe definir el contenido bucal como alimento. El tiempo de la fase de iniciación es menor a un segundo [4], siendo la respuesta tónica entre 400-500 ms [5], [6]. En esta fase se llevan a cabo varios movimientos coordinados entre el maxilar y la mandíbula, los labios, la lengua, las mejillas y el paladar blando. Se incluye en esta fase la salivación, masticación, sellado labial y el transporte oral.

Durante la fase de iniciación, existe un cierre labial, se bloquea la mandíbula, aparece una interrupción breve de la masticación y la punta de la lengua presiona el bolo sobre el paladar duro para conseguir desplazarlo hacia atrás. Tras esto, se inicia la elevación del hueso hioides por contracción de los músculos suprahioides, este hecho es coincidente con la fase faríngea. Estas acciones durante la fase de iniciación ocasionadas por el grupo muscular permiten al bolo de la cavidad bucal deslizarse hacia la faringe [4]. La fase de iniciación tiene una duración de un segundo o segundo y medio en condiciones normales y finaliza cuando se dispara el reflejo deglutorio.

La fase faríngea se considera la más complicada de la deglución porque aparece simultáneamente la función aerodigestiva. Esta etapa es el momento en el que el bolo está en el final de la fase de iniciación y comienza su entrada a la faringe, es decir, tras el reflejo deglutorio. La duración de la fase es menor de un segundo, siendo importante la compenetración de los músculos implicados. Estos músculos son los músculos faríngeos y suprahioides los cuales desencadenan los esfuerzos mecánicos en la fase faríngea, trabajando unidos para obtener una correcta ejecución y minimizar el riesgo [4]. Esta fase consta de diferentes etapas.

La primera etapa de la fase faríngea es el cierre velofaríngeo. En esta etapa el paladar se eleva para prevenir la entrada del alimento en la nariz. Previa a la segunda etapa, los músculos suprahioides se contraen y elevan la laringe. El hueso hioides se eleva 15-20 mm y la epiglotis dirige el bolo alimenticio hacia los senos piriformes. La siguiente etapa, el cierre laríngeo, se protegen las vías respiratorias mediante el descenso de la epiglotis. Tras esta, se eleva y desplaza la laringe para proteger la tráquea. Su duración depende del volumen del bolo. En la cuarta etapa se produce el peristaltismo faríngeo, una contracción muscular iniciado en la nasofaringe (faringe superior) y finalizado en la hipofaringe (faringe inferior). Esta onda peristáltica es provocada por los músculos infrahioides que se contraen de arriba hacia abajo en la laringe y ayudan a descender el hueso hioides ayudando a que el bolo descienda. Finalmente, la fase faríngea finaliza con la relajación del esfínter esofágico superior para permitir que el bolo alimenticio circule hacia el esófago.

La fase esofágica comienza cuando el bolo alimenticio llega desde el esófago y termina cuando llega al estómago. Esta fase es refleja y automática, además, se acciona gracias a los distintos nervios enervados en el esófago y en los diferentes órganos [4].

Finalmente, es importante la localización del bolo para establecer la fase en la que se encuentra el proceso de deglución. En la Figura 5 se muestra la localización general del bolo en cada una de estas fases.

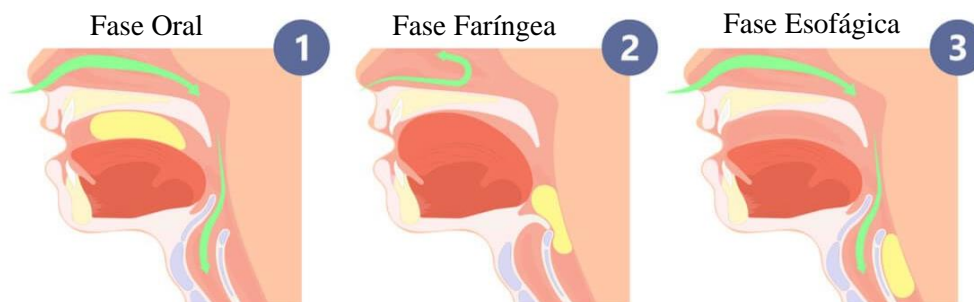


Figura 5. Localización del bolo en cada una de las fases de la deglución. Modificado de [7].



1.2. Disfagia

1.2.1. Descripción general de la disfagia

La disfagia es la dificultad o sensación de dificultad para deglutir alimentos. Estas dificultades suelen generarse como consecuencias de algunas patologías. Este síntoma expresa la incapacidad para hacer avanzar el bolo alimenticio desde la boca al esófago. Algunos pacientes también la expresan como la sensación de que el bolo queda retenido en el esófago [8].

La disfagia es un trastorno con una prevalencia elevada. Este trastorno afecta al 22% de las personas mayores de 50 años mundialmente, equivalente a 250 millones de personas [9]. En España padecen disfagia más de dos millones de personas y el 90% de la población que lo sufre no están correctamente tratados ni diagnosticados. Por otro lado, la detección de este trastorno puede variar según el método de estudio que sea utilizado, el fenotipo del paciente y el ámbito en el que se presente la disfagia [10].

Como se detallará posteriormente, la disfagia se divide en disfagia orofaríngea y disfagia esofágica. La población mayor de 65 años constituye el principal grupo afectado por la disfagia orofaríngea, además este trastorno produce complicaciones que pueden ser graves y desencadenar un gran impacto en la salud, la funcionalidad, el estado nutricional, la morbimortalidad y la calidad de vida. Existen complicaciones de dicho trastorno que se deben destacar debido a sus síntomas como la desnutrición, la deshidratación y la aspiración del alimento hacia la tráquea y los pulmones [10].

Por otro lado, los costes de la disfagia, en especial la disfagia orofaríngea, son elevados debido al alto número de infecciones respiratorias que supone. Esto se produce por las estancias hospitalarias prolongadas, complicaciones asociadas, gasto en antibióticos y otras intervenciones tanto médicas como nutricionales. Este impacto socioeconómico podría ser evitable mediante un diagnóstico y tratamiento correctos [10], [11]. Un estudio danés calculó el coste en pacientes geriátricos con disfagia y sin disfagia, los resultados mostraron que a nivel anual el coste de los pacientes con el trastorno eran 3677€ más elevados que los pacientes sin el trastorno y que además, a nivel municipal, este coste ascendía a 6192€ [12]. Finalmente, en EEUU el gasto sanitario debido a la disfagia se ve incrementado en 1000 millones de dólares anuales en concepto de un mayor número de visitas a urgencias, más complicaciones respiratorias y sistémicas, ingresos reiterados al hospital y estancias prolongadas [13].

1.2.2. Clasificación de la disfagia y síntomas

Existen dos tipos de disfagia característicos que se distinguen según el mecanismo fisiológico afectado. El primer tipo que se encuentra es la disfagia orofaríngea. Este tipo se determina cuando existe una alteración en la transferencia del bolo desde la boca al esófago. El segundo tipo, la disfagia esofágica, se caracteriza por la perturbación del tránsito por el esófago hasta el estómago [8].

La disfagia orofaríngea se debe mayoritariamente a trastornos neuromusculares que afectan a la hipofaringe y al esófago superior. En este tipo de disfagia el paciente siente que no es capaz de iniciar la deglución y tiene que repetir este proceso varias veces hasta conseguir deglutir. En los casos graves, el paciente no es capaz de deglutir saliva y aparece una retención de saliva abundante en la boca [8].

La disfagia esofágica se caracteriza por la aparición de trastornos en la motilidad o de lesiones mecánicas obstructivas. Los pacientes dicen que no se transporta correctamente el bolo alimenticio a través del esófago [8]. En la Tabla 1 se citan los síntomas característicos de cada tipo de disfagia.

Tabla 1. Síntomas de la disfagia orofaríngea y esofágica.

Disfagia orofaríngea	Disfagia esofágica
<ul style="list-style-type: none"> - Inicio insidioso o subagudo - A líquidos - Pérdida de peso lenta - Con antecedentes neurológicos - Con síntomas de miopatía o neuropatía - Tos al deglutir - Reflujo nasal - Dificultades para iniciar la deglución 	<ul style="list-style-type: none"> - Progresión rápida - A sólidos - Rápida pérdida de peso - Sin otros síntomas neurológicos - Sensación de atasco en la región retroesternal - Dolor retroesternal - Regurgitación tádía

1.2.3. Patologías relacionadas con la disfagia

Las patologías que causan los diferentes tipos de disfagia son distintas [2]. Las patologías que causan la disfagia orofaríngea se pueden dividir en procesos neurológicos, musculares, locales obstructivos y trastornos funcionales. Las patologías que causan la disfagia orofaríngea según su proceso se muestran en la Tabla 2 [8].

Tabla 2. Patologías que causan disfagia orofaríngea.

Procesos neurológicos	Procesos musculares	Procesos locales obstructivos	Trastornos funcionales
<ul style="list-style-type: none"> - Accidentes cerebrovasculares - Esclerosis múltiple - Esclerosis lateral amiotrófica - Enfermedad de Parkinson - Corea de Huntington - Tumores del sistema nervioso - Otras 	<ul style="list-style-type: none"> - Miastenia grave - Polimiositis - Dermatomiositis - Conectivopatías - Otras 	<ul style="list-style-type: none"> - Fibrosis postirradiación - Tumores - Procesos inflamatorios - Otras 	<ul style="list-style-type: none"> - Alteraciones motoras del esfínter esofágico superior - Incoordinación motora faringoesofágica - Hipomotilidad faríngea

Las patologías que causan disfagia esofágica se pueden distinguir en procesos orgánicos, trastornos funcionales primarios y trastornos funcionales secundarios. Estas patologías divididas en categorías se muestran en la Tabla 3 [8].

Tabla 3. Patologías que causan disfagia esofágica.

Procesos orgánicos	Trastornos funcionales primarios	Trastornos funcionales secundarios
- Tumores benignos y malignos del esófago	- Acalasia	- Esclerodermia
- Estenosis esofágicas	- Espasmo difuso esofágico	- Lupus eritematoso
- Membranas esofágicas	- Esfínter esofágico inferior hipertensivo	- Neuropatía diabética, alcohólica
- Divertículos esofágicos	- Otras	- Distrofia muscular progresiva
- Cuerpos extraños		- Otras
- Otras		

1.2.4. Diagnóstico y tratamiento de la disfagia

El diagnóstico de la disfagia es muy variable según la atención sanitaria recibida (primaria, especializada o centro sociosanitario) y los medios disponibles en el centro sanitario. En la práctica clínica se observa un periodo de tiempo elevado entre los primeros síntomas de la disfagia y su diagnóstico, llegando a detectarse cuando se han presentado complicaciones como la desnutrición [14].

Para la detección de la disfagia orofaríngea funcional se deben evaluar tanto la eficacia de la deglución como la seguridad de la deglución. Para ello, se utilizan varias pruebas que ayudan a los sanitarios a diagnosticar si existe riesgo de disfagia o no. A continuación, se desarrollan algunos de los test utilizados.

- Test clínico: el test clínico es fácil, reproducible y no consume mucho tiempo. Se puede realizar en cualquier estadio del trastorno y no conlleva ningún riesgo para el paciente. El test consta de varias preguntas y con sus resultados se obtiene si el paciente presenta problemas para deglutir [15].
- Test del agua: Es el test utilizado por el personal de enfermería y consiste en la administración de 10 mL de agua al paciente y observar si existe babeo, el número de degluciones, si aparece tos o si hay disfonía. Esta prueba se repite cuatro veces y se finaliza con la administración de 50 mL en un vaso [16].

- Test volumen-viscosidad: El método de exploración clínica volumen-viscosidad (MECV-V) utiliza bolos de tres viscosidades y volúmenes diferentes con los cuales se detecta de forma segura para el paciente si existe un trastorno deglutorio o no. Además, este método orienta a los sanitarios a saber cuáles son la viscosidad y volumen más seguros para el paciente a la hora de realizar un tratamiento nutricional [16]. Se representa el MECV-V en la Figura 6.

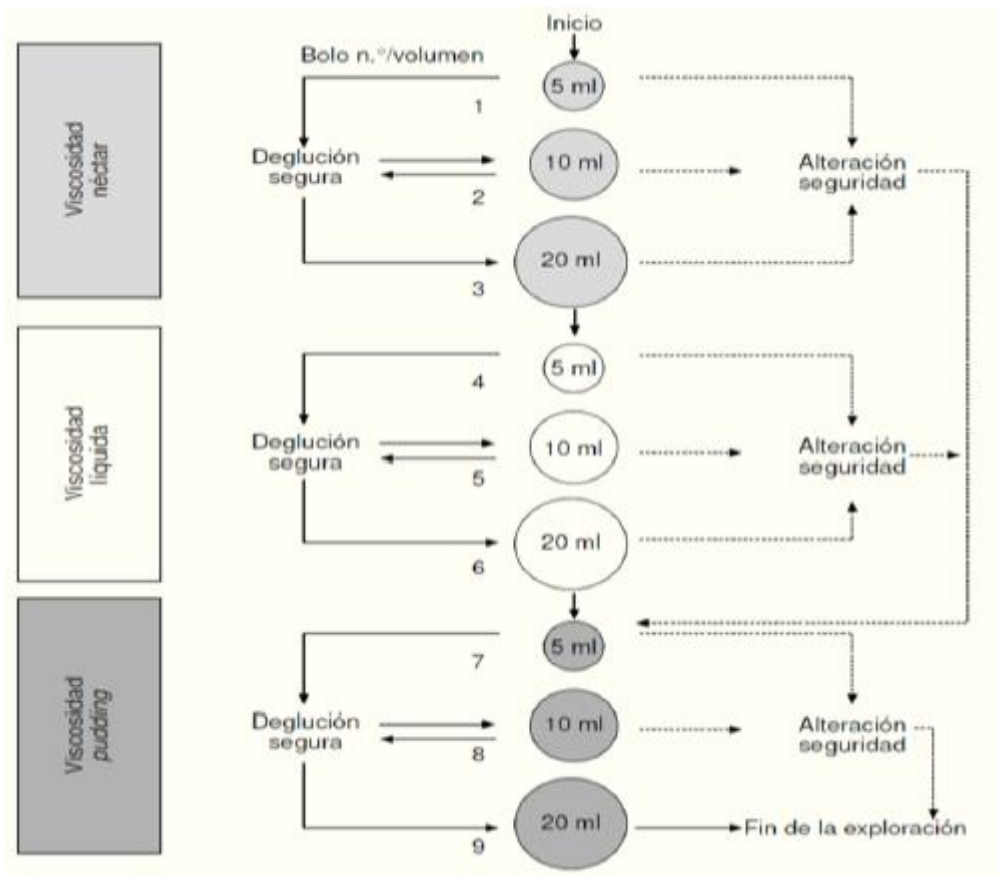


Figura 6. Representación del método de exploración clínica volumen-viscosidad (MECV-V).

- Videofluoroscopia (VFS): esta técnica graba en vídeo varias degluciones de bolos de diferentes volúmenes y consistencias. Actualmente es una técnica referente para el estudio de la disfagia orofaríngea.
- Manometría faringoesofágica: esta técnica evalúa los mecanismos de apertura del esfínter esofágico superior mediante una sonda. De esta manera se visualiza la contracción de la musculatura hioidea.
- Fibrolaringoscopia: esta técnica valora de manera directa la capacidad de deglución del paciente. Se utiliza un fibroscopio flexible conectado a una fuente de luz y a una cámara de vídeo para grabar la deglución.



El tratamiento de la disfagia depende de si esta es determinada como orofaríngea o esofágica y el proceso que la origina. La mayoría de los tratamientos se basan en mantener el estado nutricional y de hidratación del paciente. Los tratamientos o estrategias generales recomendadas para pacientes con disfagia se basan en la modificación de la consistencia y textura de los alimentos o las bebidas, tomar alimentos y líquidos en cantidades pequeñas para deglutirlos más fácilmente, adaptar dietas que aseguren las necesidades del paciente, adaptar los utensilios o cubertería para facilitar la ingesta, realizar ejercicios de la musculatura en los labios, lengua y mejillas para preparar la boca, utilizar técnicas que ayuden a estimular la musculatura y nervios de la boca y cambios de postura en el momento de la comida para facilitar la deglución. Por otro lado, también se pueden recomendar según la gravedad de la disfagia inyecciones de toxina botulínica, electroestimulación o cirugía [17].

En el caso de las disfgias del tipo funcional o neuromuscular, las posibilidades terapéuticas son limitadas, excepto por la acalasia esofágica, uno de los trastornos más frecuentes, donde se recurre a la dilatación endoscópica neumática forzada de la unión esófago-gástrica o también a la cardiomiectomía quirúrgica mediante la técnica Heller, donde se obtienen resultados satisfactorios [8].

En el caso de la disfagia orgánica se realiza un tratamiento terapéutico endoscópico y quirúrgico. Además, la dilatación esofágica bajo control endoscópico obtiene buenos resultados en la estenosis péptica, sin embargo, los anillos y membranas esofágicas pueden ser destruidas mediante la vía endoscópica. Por otro lado, las estenosis malignas por carcinoma de esófago deben tratarse quirúrgicamente. A pesar de esto, en muchas ocasiones se debe recurrir a medidas paliativas como la radioterapia, las prótesis esofágicas o la gastrostomía cuando no se alcanza el objetivo de eliminar completamente el carcinoma [8].

Se observa que en pocas ocasiones se puede eliminar o remediar la disfagia correctamente. En muchas ocasiones solo se pueden atenuar los efectos que produce el trastorno y para ello es imprescindible un diagnóstico rápido, eficaz, eficiente y correcto para un posterior tratamiento adecuado al nivel y tipo de disfagia del paciente.

1.3. Electromiografía de superficie (sEMG)

1.3.1. Consideraciones generales de la sEMG

La electromiografía (EMG) es el registro de la actividad eléctrica (cambios de potencial eléctrico) producidos por los músculos en la superficie de la piel o con electrodos de aguja (insertados a través de la piel) [18], [19]. La sEMG (electromiografía de superficie) se caracteriza por ser una tecnología no invasiva, fácil de implementar y de bajo costo. Además, la sEMG puede monitorear la activación de un grupo de unidades motoras, lo que le brinda de mayor alcance y permite una visión general sobre la función muscular [20].

Para la medición de la electromiografía de superficie se utilizan electrodos de superficie que se colocan en contacto con la piel del paciente. Los electrodos se tratan como una fuente de tensión con una impedancia muy alta para diseñar de manera efectiva el circuito de entrada del amplificador bioeléctrico [22]. Los tipos de electrodos que se encuentran son tanto electrodos húmedos como secos. Los electrodos húmedos utilizados habitualmente requieren un gel electrolítico conductor o una esponja entre el electrodo y la piel, algunos pueden obtener señales de sEMG de alta calidad. Los electrodos húmedos suelen requerir la preparación de la piel, como el afeitado y la abrasión de la piel, lo que puede reducir la impedancia piel-electrodo y los artefactos de movimiento [23]. Además, los electrodos húmedos pueden no ser óptimos para su uso a largo plazo ya que el gel conductor puede secarse, causar irritación e incomodidad, además de que puede causar alergia e inflamación de la piel al sujeto [24]. Por otro lado, los electrodos secos modernos no requieren gel conductor ni preparación de la piel, y obtener una calidad de señal comparable a la de los electrodos húmedos [25].

Los electrodos polarizables (por ejemplo, los electrodos de oro, platino e iridio) se caracterizan por un comportamiento capacitivo porque solo pasa la corriente de desplazamiento entre la piel y el electrodo, mientras que los electrodos no polarizables (por ejemplo, los electrodos de Ag/AgCl galvanizados y sinterizados) se comportan como resistencias, ya que permiten un flujo libre de carga a través de la interfaz electrodo-piel [26]. Ningún electrodo es perfectamente no polarizable o polarizable, pero se aproxima a estas características. Los electrodos polarizables no se recomiendan para las mediciones de sEMG debido a su alta sensibilidad a los artefactos de movimiento, sin embargo, los electrodos no polarizables de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) que se utilizan habitualmente son muy estables [26].

Desde otra perspectiva, si consideramos que el valor de la impedancia de entrada del amplificador es finito, entonces podemos reducir el valor de la impedancia de la interfaz piel-electrodo mediante el tratamiento de la piel, como la limpieza con alcohol o el uso de gel conductor, de lo contrario tendremos una atenuación en la señal de EMG [27], [28]. Además, para obtener una señal adecuada debemos tener en cuenta la ubicación de los electrodos en la piel, las dimensiones de los mismos y la distancia entre ellos. A la hora de interpretar la señal, debemos tener en cuenta que podemos encontrarnos con fallos debidos a usos inadecuados relacionados con la configuración del dispositivo. Además, por supuesto, de problemas relacionados con el procesamiento de los datos [29].

Por otro lado, al medir la señal, se pueden encontrar diferentes componentes no deseadas, como ruido, artefactos de movimiento, potencial de contacto de los electrodos, las interferencias de la red o electrocardiográficas entre otras. Algunos algoritmos y herramientas de análisis de señal de EMG asumen que dichas señales son de alta calidad, lo que puede conducir a resultados o interpretaciones erróneas si esta suposición fuera incorrecta. También se reconoce que la ‘contaminación’ de las señales de EMG es un problema inevitable, y la señal cruda no puede utilizarse directamente, siendo necesario el preprocesamiento de los datos para reducir las componentes no deseadas [18], [21].

1.3.2. Casos de uso de sEMG en deglución

El estudio de la electromiografía de superficie se realiza en músculos cercanos a la piel para obtener una correcta medición de la actividad eléctrica. Este es el caso de algunos de los músculos dedicados a las actividades deglutorias. Los músculos que pueden ser estudiados debido a su cercanía con la piel son los orbiculares a la boca, los músculos maseteros, los músculos suprahioideos y los infrahioideos. Para la correcta colocación de los electrodos en puntos específicos de la cabeza se utilizan los procesos estandarizados [30].

Los parámetros temporales más utilizados para la caracterización de la señal deglutoria son la duración del trago (medido en segundos), la amplitud de la actividad eléctrica (en microvoltios) y el número de tragos entre otros [30]. En el caso de la actividad eléctrica, existen estudios publicados sobre sujetos sanos que muestran una gama amplia de amplitudes eléctricas normales para los estudios de sEMG. Estas variaciones no se deben únicamente a causas biológicas sino también a factores técnicos como la impedancia piel-electrodo, la profundidad del músculo desde la superficie de la piel, la ubicación de los electrodos en relación con las estructuras anatómicas, la variación del tamaño del músculo entre sujetos y la temperatura. A pesar de esto, la amplitud del sEMG es un aspecto importante en relación entre la fuerza muscular y la actividad eléctrica asociada. Algunos autores defienden que las amplitudes tienen relación directa con la debilidad muscular en las lesiones neurogénicas [30], [31].

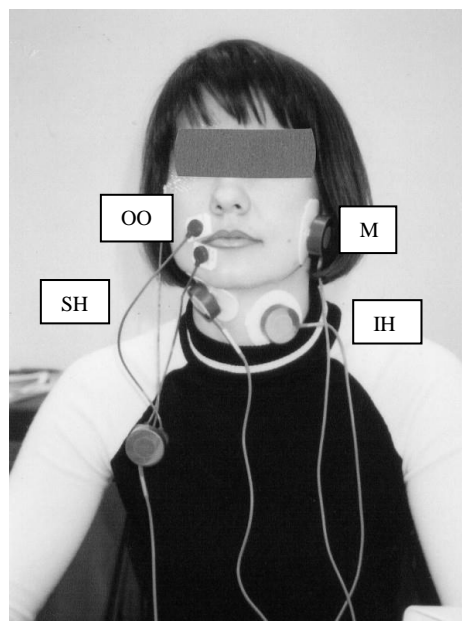


Figura 7. Ubicaciones de los electrodos de electromiograma para probar los músculos orbiculares (OO), maseteros (M), suprahioideos (SH) e infrahioideos (IH). Imagen obtenida en [30].



La sEMG es utilizada para la medición de las señales eléctricas de la deglución, pero también en el diagnóstico e investigación sobre la disfagia. Se utiliza en comparaciones de sujetos con enfermedades que han desarrollado la disfagia [32], desórdenes deglutorios tras embolias [33], [34] y estudios en la población geriátrica [35] entre otros. También se encuentran varios estudios comparativos entre sujetos sanos y patológicos en diversos ámbitos. En el primer estudio se analiza la deglución fragmentaria en diferentes tamaños de bolo, concluyendo que los sujetos sanos no tenían deglución fragmentaria con menos de 20 mL de agua, aceptando este volumen como el límite inferior para la deglución fragmentaria. Por otro lado, los pacientes con disfagia obtuvieron límites de deglución fragmentaria significativamente inferiores en comparación con los sujetos sanos [6]. Otro estudio centrado en niños utilizaba este método al ser no invasivo y como cribado previo a la selección de niños disfágicos [36]. Un estudio que analizaba sujetos sanos, pacientes con miastenia gravis (debilidad y fatiga rápida de músculos bajo control voluntario) con disfagia y sin disfagia observó que el tiempo necesario para que la laringe permaneciera en su posición superior durante la deglución y que además, la variabilidad de la deglución en las sucesivas degluciones aumentaban significativamente en comparación con sujetos sanos y con los pacientes con miastenia gravis sin disfagia. En dicho estudio, se concluye que los músculos suprahioides e infrahioides están implicados de manera subclínica en la miastenia gravis, y que debido a los mecanismos de compensación, el paciente puede no ser disfágico [37].

Finalmente, los estudios relacionados con la coordinación entre los pares musculares son escasos y se establece un campo muy amplio de investigación sobre la coordinación de la disfagia y la deglución.

1.3.3. Estado del arte de la causalidad de Granger en sEMG

La causalidad de Granger (GC) es un principio estadístico de causalidad que es aplicado a los datos de las series temporales, donde la causa se anticipa al efecto y ayuda a predecirlo. Como se detallará en *Materiales y Métodos*, en el punto *Causalidad de Granger*, es una técnica basada en modelos para estudiar la conectividad efectiva entre distintos sistemas o subsistemas biológicos. Las aplicaciones más utilizadas en la causalidad de Granger son las relacionadas con la neurociencia. Algunas de las aplicaciones en neurociencia de superficie son la electroencefalografía (EEG) de superficie y la magnetoencefalografía (MEG). Los datos utilizados para estas señales son adecuados para el análisis mediante GC ya que se obtiene alta resolución temporal, rápido muestreo y su naturaleza estocástica [38]. Otras aplicaciones en neurociencia es en resonancia magnética funcional (fMRI) [39].

Uno de los artículos revisa las medidas multivariantes de dependencia basadas en el principio de causalidad de Granger, sus aplicaciones y su rendimiento con respecto a la robustez al ruido, a la conducción de volumen y la conducción común. Se aborda la aplicación de las medidas de GC a las series temporales de EEG, señales intracraneales y fMRI. Las medidas basadas en la GC definidas en el dominio frecuencial permiten determinar la sincronización entre poblaciones neuronales y la propagación dirigida de su actividad eléctrica [40]. Otro artículo describe la combinación del análisis de causalidad multivariante de Granger, el temporal de las series temporales de fMRI y conceptos de teoría de grafos para investigar las redes cerebrales causales y su dinámica [41]. Por otro lado, los estudios relacionados con la posibilidad de utilizar la GC en sEMG son escasos.

A pesar de la existencia de varios estudios en este campo, sigue siendo un tema noble debido a que la utilización de la GC para la búsqueda de correlación y conexiones está aumentando en los últimos años al ser una teoría inicialmente desarrollada para la econometría.



De manera adicional, el estudio de la deglución sigue en proceso al no conocerse muchas de las interacciones y su funcionamiento. Además, los trastornos que provocan dificultades en la deglución como la disfagia, no han sido estudiados en profundidad y se desconocen muchos aspectos sobre ellos.

En este proyecto se busca aunar y arrojar luz sobre ambos temas, la causalidad de Granger en la sEMG y en la deglución y la disfagia, comenzando a evaluar el funcionamiento de los músculos que participan en este proceso y su interpretación mediante la GC.



2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La deglución es uno de los procesos más complejos del ser humano. Esta complejidad proviene de la coordinación tanto muscular y estructural como neuronal de varios sistemas. Además, este proceso es delicado debido a que comparte estructura con las vías respiratorias, pudiendo causar ahogamiento en caso de una mala coordinación de dichas estructuras.

La disfagia es la dificultad o imposibilidad de llevar a cabo el proceso de deglución. Las causas de la disfagia son muy diversas, sin embargo, el número de personas que sufren dicho trastorno en España es de más de dos millones de personas. A pesar de la gran cantidad de población afectada por la disfagia, el diagnóstico y el tratamiento no suele ser el correcto, provocando así un avance más rápido del trastorno y un impacto socioeconómico más elevado.

Las técnicas de detección de la disfagia no están estandarizadas, pero el uso de la electromiografía de superficie (sEMG) es un método no invasivo, de bajo coste y objetivable para el estudio de ésta. Los músculos que pueden ser medidos mediante esta técnica son los orbiculares a la boca, maseteros, suprahioides e infrahioides. Además, este método precisa del análisis y caracterización de las señales al tratarse de un método indirecto.

Hoy en día, existen muchos estudios enfocados en la sEMG para caracterizar los trastornos musculares asociados a la disfagia con el objetivo de mejorar su comprensión y diagnóstico. Para ello, se utilizan grupos de sujetos sanos, pacientes con patología sin disfagia y pacientes con patología con disfagia, estudiando el comportamiento muscular en los diferentes grupos. Sin embargo, son escasos los estudios que analizan las conexiones entre los músculos asociados a la disfagia y básicamente se centran en el estudio de las secuencias de activación y desactivación entre músculos.

El objetivo general del presente trabajo es estudiar las conexiones y el grado de acoplamiento de los diferentes pares de músculos deglutorios en sujetos sanos y con disfagia mediante la causalidad de Granger. Como objetivos específicos se definen:

- Identificar, a partir de GC, los pares de músculos deglutorios con mayor conectividad
- Analizar las diferencias ‘directas’ en la conectividad de pares musculares entre los sujetos sanos y patológicos.
- Analizar la influencia del tipo de bolo (saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL) sobre el grado de acoplamiento entre músculos deglutorios.
- Estudiar la direccionalidad del acoplamiento entre cada par de músculos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de los resultados del presente trabajo se ha seguido un proceso que se muestra a modo de esquema en la Figura 8 como esquema del procedimiento seguido. Primero se utiliza la Base de Datos con las señales de diferentes sujetos sanos y patológicos y para distintos bolos. A continuación, se realiza el cálculo de la causalidad de Granger para ventanas móviles de 0.5s y 1s, además de analizar los resultados específicos de la actividad basal y la muscular. Tras esto, se realiza una selección de ventana y de los pares de músculos para estudiar. Después se visualizan los valores obtenidos mediante un diagrama de caja y bigotes que sirve de apoyo al análisis estadístico. Se explica de manera más detallada los diferentes pasos en las siguientes subsecciones.

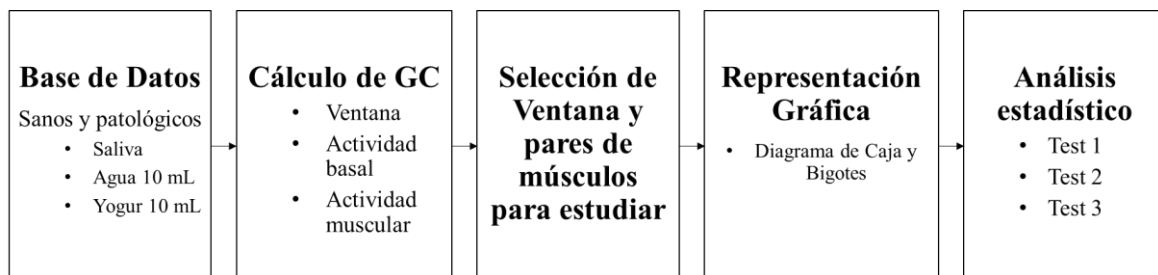


Figura 8. Esquema del procedimiento seguido durante el proyecto.

3.1. Composición de la base de datos

La base de datos utilizada en el presente Trabajo Final de Máster fue obtenida en un proyecto de investigación, *Diagnóstico y seguimiento de pacientes con disfagia neuromuscular y neurogénica mediante la integración de señales no invasivas y variables clínicas*, liderado por el Instituto Tecnológico Metropolitano (Medellín, Colombia), puesta a disposición del Centro de Investigación e Innovación en Bioingeniería (CI2B-UPV) para trabajos colaborativos conjuntos.

La base de datos se compone de registros de sEMG en 30 sujetos sanos y en 31 sujetos con disfagia. La adquisición electromiográfica constaba de señales registradas en actividades deglutorias de tres bolos distintos: saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL. Estos bolos han sido seleccionados ya que han sido utilizados en varios estudios relacionados con la disfagia [6], [42]. La Figura 9 muestra un esquema de los registros disponibles en la base de datos.

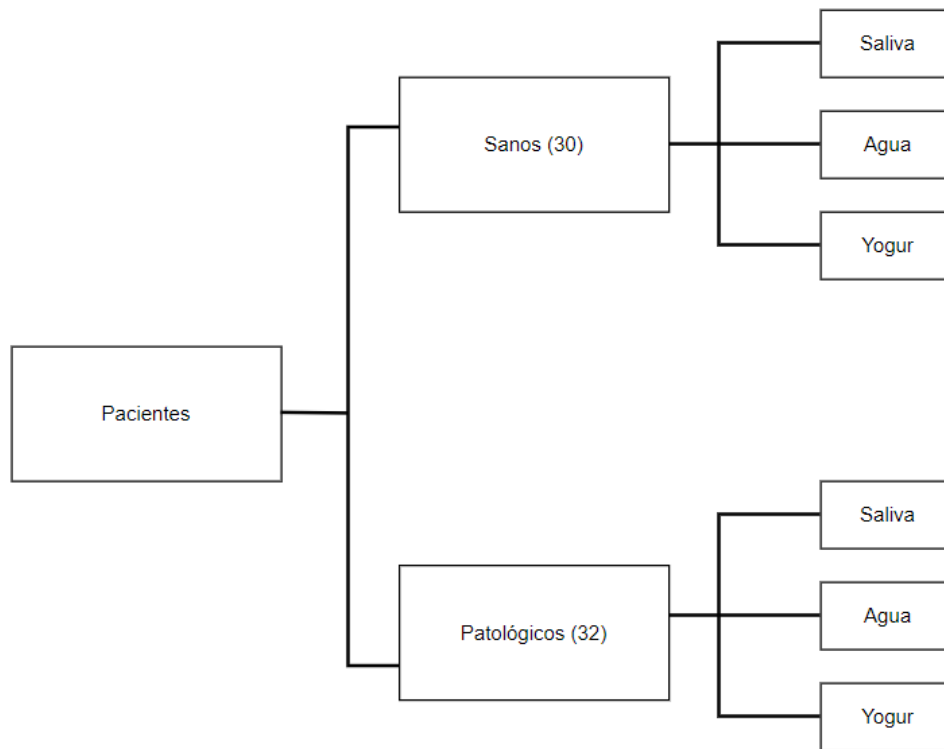


Figura 9. Esquema de la disposición de los datos en la base de datos utilizada.

Las señales de sEMG fueron captadas mediante 6 electrodos en los lados izquierdo y derecho de tres grupos musculares: masetero, suprahioideo e infrahioideo; teniendo, por tanto, seis señales adquiridas: masetero derecho (RM), masetero izquierdo (LM), suprahioideo derecho (RSH), suprahioideo izquierdo (LSH), infrahioideo derecho (RIH) e infrahioideo izquierdo (LIH). Estos tres grupos están involucrados en las fases oral y faríngea de la deglución [43]. Los electrodos de superficie utilizados eran los pares convencionales de Ag/AgCl utilizados para medir la actividad mioeléctrica. Dichos electrodos tenían un diámetro de 15 mm de área de gel y una distancia entre electrodos de 25 mm. Antes de la disposición de los electrodos se realizó una abrasión local y limpieza de la piel con alcohol isopropílico para mejorar la impedancia entre la piel y el electrodo [44]. En la Figura 10 se muestra un primer esquema de la colocación de los electrodos en los músculos y una ilustración de los electrodos colocados en un sujeto obtenida en [45].

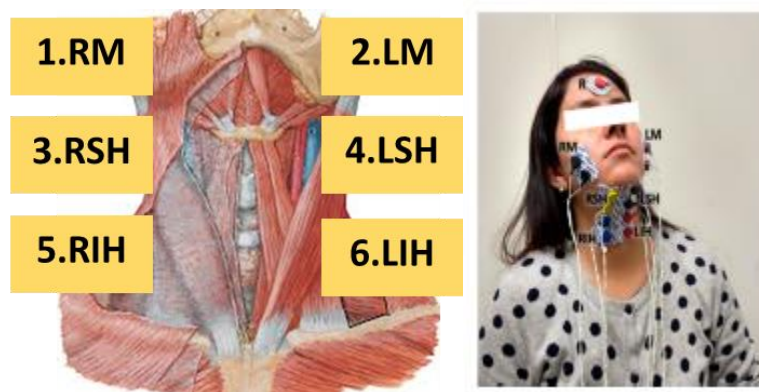


Figura 10. Izquierda: esquema de la colocación de los electrodos en los sujetos. Derecha: colocación de electrodos en un sujeto. Imagen obtenida en [45].

Las señales fueron adquiridas mediante el electromiógrafo Noraxon Ultium™ EMG (Noraxon USA), con una ganancia de 1000 y un filtro analógico paso banda de 10-500 Hz y otro de ranura a 50 Hz. Las señales fueron adquiridas a una frecuencia de muestreo de 2000 Hz y 24-bit de resolución.

Se puede observar un ejemplo de señales adquiridas en la Figura 11. Además, en dicha figura se remarca en amarillo dónde se produce la acción deglutoria, caracterizada por el aumento de la amplitud en los canales de la señal.

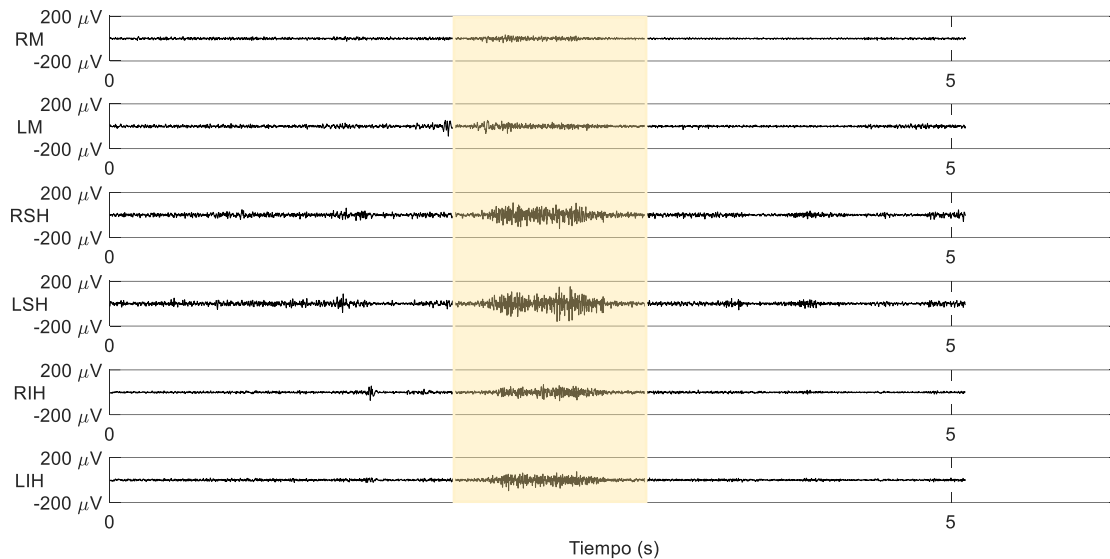


Figura 11. Ejemplo de visualización de las señales de actividad eléctrica de los músculos medidos en un sujeto y bolo específicos. Remarcado en amarillo se encuentra el reflejo deglutorio, el trago del bolo, caracterizado por un aumento del voltaje en la señal.

3.2. Causalidad de Granger

3.2.1. Descripción general de la causalidad de Granger

El origen de la causalidad de Wiener-Granger, o causalidad de Granger (GC), se remonta a 1956, cuando fue definida teóricamente por Norbert Wiener en [46]. Más tarde, Granger puso en práctica esta teoría para modelos lineales autorregresivos de procesos estocásticos, desarrollando dicha causalidad para la teoría econométrica [47]. Hoy en día, el cálculo de la GC es ampliamente utilizado en diferentes ámbitos, especialmente en neurociencia y neuroimagen [48]–[51].

La GC es un principio estadístico de causalidad que es aplicado a los datos de las series temporales, donde la causa se anticipa al efecto y ayuda a predecirlo. Se puede definir tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, y permite condicionar las influencias causales comunes [39].

La definición de la GC es que una variable X es causalidad de Granger de una variable Y si el pasado de X contiene información que ayuda a predecir el futuro de Y por encima de la información que ya está en el pasado de Y . Se debe destacar que la GC puede medir tanto la conectividad funcional dirigida como la efectiva. El tipo de conectividad determinada para analizar se debe tener en cuenta para proporcionar una correcta interpretación de las respuestas observadas [39], [52], [53].

Finalmente, los valores obtenidos de la GC se deben interpretar como test de significancia, es decir, si existe causalidad o no en la conexión analizada a raíz del resto de resultados obtenidos en el mismo estudio. Su magnitud no tiene sentido al compararse con otros estudios o procesos de GC [39].

3.2.2. Modelo autorregresivo

Uno de los modelos más utilizados para la GC son los vectores autorregresivos (VAR) o modelos autorregresivos (MAR). Estos modelos se caracterizan por tener en cuenta la dependencia causal del pasado en el presente en las series de datos temporales [39], [54]. Para modelar como VAR se utiliza la teoría [57] donde se indica que una clase general de procesos multivariantes estacionarios de covarianza pueden modelarse como VAR, incluyendo muchos procesos no lineales aunque con un orden del VAR teóricamente infinito. En la práctica, se selecciona un orden del modelo finito lo suficientemente elevado como para capturar la variación de la predictibilidad pero no demasiado como para sobreajustar la variación en los datos [39]. El modelo del vector autorregresivo para un orden p toma la siguiente forma

$$U_t = \sum_{k=1}^p A_k \cdot U_{t-k} + \varepsilon_t \quad (1)$$

En la ecuación 1, p es el modelo del orden, A_k son los coeficientes de regresión y ε_t son los residuos.

3.2.3. Orden del modelo

El primer paso realizado es la estimación de un modelo para realizar un análisis paramétrico. Este paso es esencial ya que si el ajuste se ha realizado correctamente se podrá tener confianza en los resultados del análisis [54].

Para encontrar el orden óptimo del modelo se debe realizar un balance entre obtener un ajuste incrementando el orden, es decir, extendiendo el número de muestreos pasados incluidos, pero a su vez, manteniendo el orden más bajo posible para evitar los artefactos que aparecen en la estimación cuando se utiliza un orden excesivamente elevado. Existen dos criterios que destacan por la frecuencia con la que son empleados: AIC (criterio de información de Akaike) y BIC (criterio de información bayesiano) [54].

El criterio de AIC [55] se expresa como:

$$AIC(p) = n \log(\det(V)) + 2pk^2 \quad (2)$$

Por otro lado, el criterio de BIC [56] se expresa como:

$$BIC(p) = n \log(\det(V)) + \ln(T) pk^2 \quad (3)$$

En las ecuaciones 2 y 3 n es el número de puntos de datos temporales, k se corresponde al número de canales y finalmente, V es la matriz de varianza del ruido del modelo utilizado. A la hora de escoger el orden óptimo, la elección más común es el orden donde se alcanza el primer mínimo.

3.2.4. Causalidad de Granger (no condicionada) en el dominio temporal

La causalidad de Granger no condicionada se interpreta como la GC desde Y a X cuando el pasado de Y ayuda a predecir X más que el propio pasado de X . Sin embargo, una de las desventajas de este tipo de causalidad es que en el caso de que existieran tres elementos, X , Y y Z , y se encontraran causalidades de Y a X podrían ser causalidades erróneas causadas por Z . Si no hay una influencia causal directa de Y a X , pero sí hay una causalidad directa de Z a Y que afecta indirectamente a X . Se representan estas relaciones y el funcionamiento de la causalidad directa e indirecta en la Figura 12.

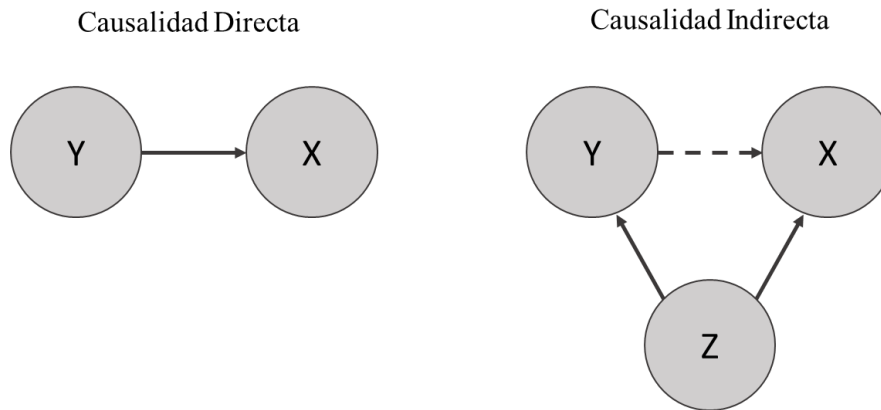


Figura 12. Izda: Representación de la GC directa. Dcha: Representación de GC indirecta. La línea continua representa la causalidad directa; la línea discontinua representa la causalidad indirecta.

Para cuantificar cuánto ayuda el pasado de la variable Y a predecir el valor actual de X , respecto a cuánto lo hace el propio pasado de X , se compara la regresión completa donde se cuenta con la dependencia Y con la regresión reducida, donde esta dependencia no aparece [39]. La regresión completa del componente X se muestra en la Fórmula 4 como:

$$X_t = \sum_{k=1}^p A_{xx,k} \cdot X_{t-k} + \sum_{k=1}^p A_{xy,k} \cdot Y_{t-k} + \varepsilon_{x,t} \quad (4)$$

Por otro lado, la regresión reducida en la cual se omite el pasado de la dependencia Y se muestra en la Fórmula 5 como:

$$X_t = \sum_{k=1}^p A'_{xx,k} \cdot X_{t-k} + \varepsilon'_{x,t} \quad (5)$$

Una vez se han obtenido los resultados tanto de la regresión completa como de la reducida, se calculan las matrices de covarianza de los residuos del modelo VAR de cada una de las regresiones. Este cálculo se muestra en las Fórmulas 6 y 7.

$$\Sigma_{xx} = cov(\varepsilon_{x,t}) \quad (6)$$

$$\Sigma'_{xx} = cov(\varepsilon'_{x,t}) \quad (7)$$

Tras obtener las matrices de covarianza se calcula la GC desde Y hacia X como el cociente de probabilidades logarítmicas mostrado en la Fórmula 8.

$$\mathcal{F}_{Y \rightarrow X} \equiv \ln \frac{|\Sigma'_{xx}|}{|\Sigma_{xx}|} \quad (8)$$

3.2.5. Causalidad de Granger condicionada en el dominio temporal

Las causalidades erróneas que se pueden producir en la GC no condicionada pueden ser eliminadas condicionando la causalidad. Para ello, se debe definir la GC condicionada como que Y tiene GC sobre X si el grado en el que el pasado de Y ayuda a predecir X por encima del grado en el que el propio pasado de X y Z predice X .

Se debe tener en cuenta que las variables fuente (X), objetivo (Y) y condicionantes (Z) pueden ser multivariantes, es decir, pueden representar ellas mismas un grupo de variables. En este momento se utiliza la causalidad de Granger “multivariante”. Así, se sabe que la GC es capaz de obtener resultados de interacciones de grupo y relacionarse de manera más compleja de lo que el análisis bivariante tradicional soporta [39], [58], [59].

En el caso de la GC condicionada se añade la dependencia Z a las regresiones correspondientes, de esta manera se prueba que existe causalidad desde Y hasta X condicionada en Z . El resultado obtenido se interpreta como el grado con el que el pasado de Y ayuda a predecir X por encima del grado en el que X se predice por su propio pasado y por el pasado de Z . Por tanto, las regresiones completa y reducida se muestran en las Fórmulas 9 y 10 [39].

$$X_t = \sum_{k=1}^p A_{xx,k} \cdot X_{t-k} + \sum_{k=1}^p A_{xy,k} \cdot Y_{t-k} + \sum_{k=1}^p A_{xz,k} \cdot Z_{t-k} + \varepsilon_{x,t} \quad (9)$$

$$X_t = \sum_{k=1}^p A'_{xx,k} \cdot X_{t-k} + \sum_{k=1}^p A'_{xz,k} \cdot Z_{t-k} + \varepsilon'_{x,t} \quad (10)$$

Finalmente, la GC condicionada de Y a X se muestra en la Fórmula 11:

$$\mathcal{F}_{Y \rightarrow X|Z} \equiv \ln \frac{|\Sigma'_{xx}|}{|\Sigma_{xx}|} \quad (11)$$

3.2.6. Requisitos para el cálculo de la causalidad de Granger

El análisis offline realizado para el cálculo de la GC y el posterior análisis estadístico se realizó mediante programas personalizados mediante la herramienta MATLAB® y la *toolbox* llamada *MVGC Multivariate Granger Causality MATLAB®* diseñada para facilitar el análisis de la GC con datos de series temporales multivariantes y de varios ensayos [39].

Existen unos requisitos necesarios de la señal para su utilización en el software MVGC. El primer requisito es contar con un proceso estocástico (aleatorio). Otra recomendación es utilizar una señal estacionaria, sin embargo, no está totalmente limitado. En algunas circunstancias se puede utilizar datos en ventana para relajar el requisito de estacionariedad [39].

Por un lado, de manera empírica, el filtrado de las series de datos temporales puede comprometer a la inferencia estadística debido a que puede aumentar el orden del modelo VAR tras el filtrado. Por otro lado, algunos filtros pueden ser útiles en los casos en los que los datos no son estacionarios para empezar y que la GC calculada falle o proporcione resultados erróneos. En estos casos, el filtrado es una herramienta válida para mejorar la estacionariedad [39].

3.2.7. Cálculo de la causalidad de Granger en MVGC

La GC se calcula siguiendo un algoritmo personalizado y basado en una de las demostraciones proporcionadas por el software MVGC. El esquema de dicho algoritmo se presenta a continuación en la Figura 13.

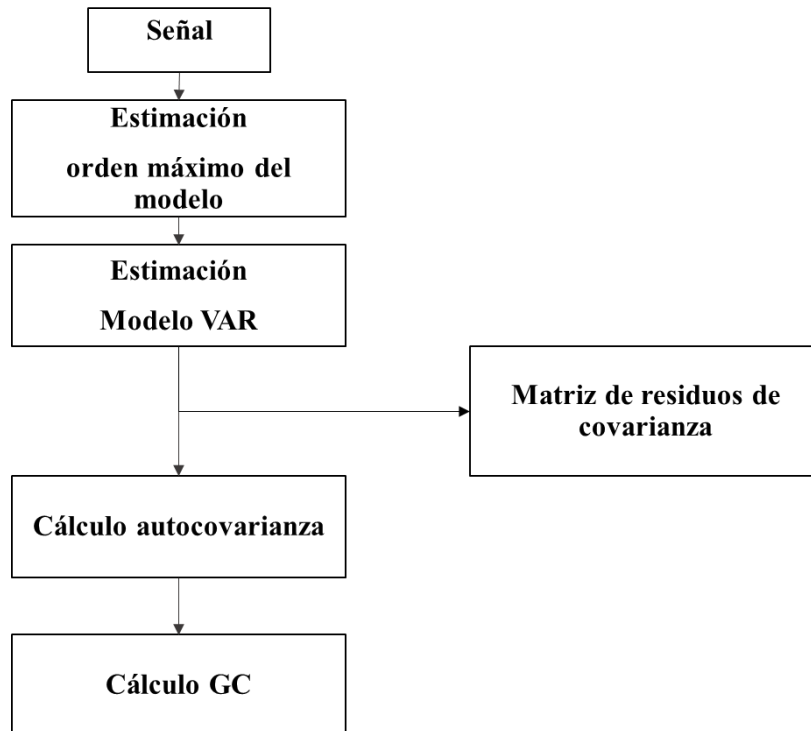


Figura 13. Esquema del algoritmo para el cálculo de la causalidad de Granger.

Para cumplir el requisito de señal estacionaria, antes del cálculo de la GC se divide el registro de la señal en ventanas. Se han considerado dos tamaños de ventana: de 1s con solapamiento de 0.5s y de 0.5s sin solapamiento. Este tamaño de ventana se ha escogido porque la duración del trago o del reflejo deglutorio es de aproximadamente 400-500 ms [5], [6]. Se visualiza un esquema de las ventanas que se van a realizar en la Figura 14.

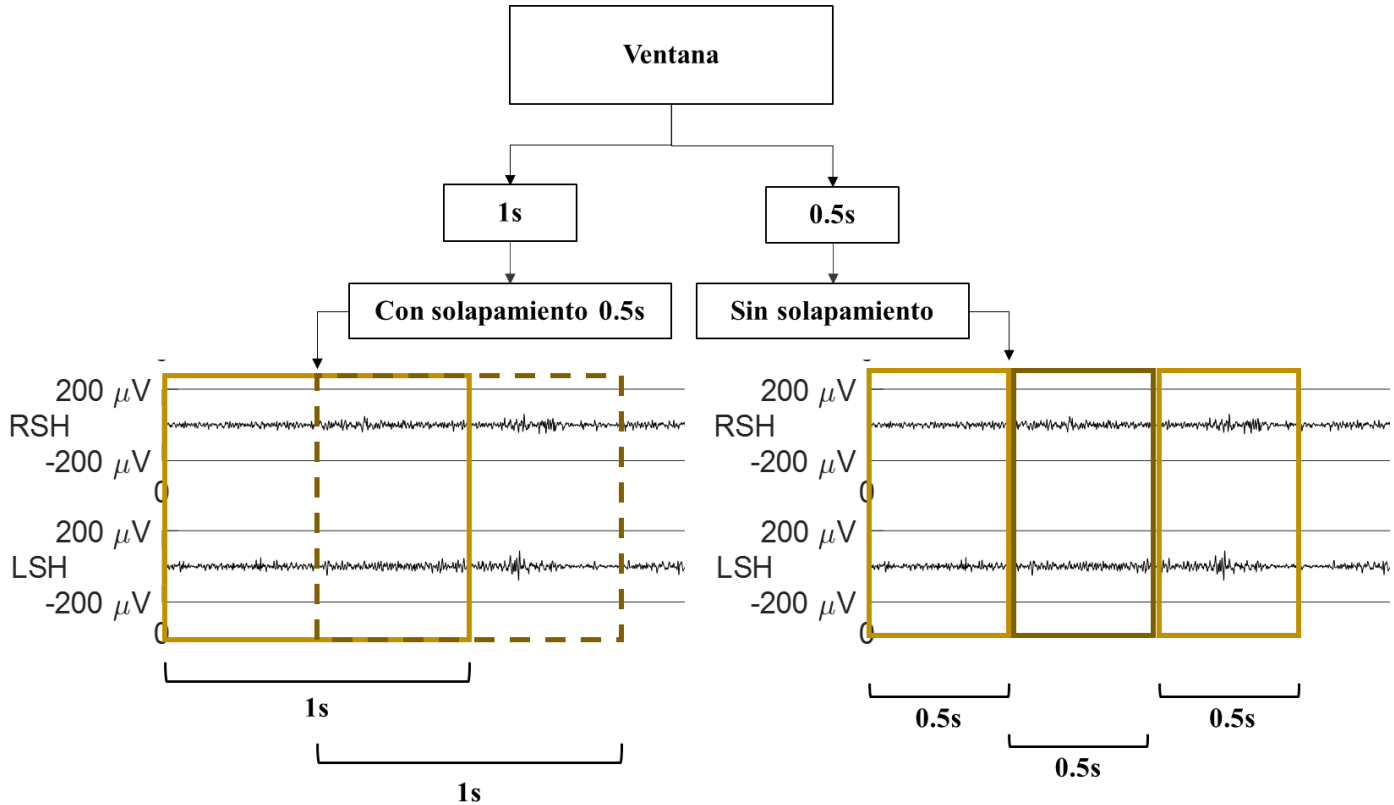


Figura 14. Esquema de las ventanas móviles de señal utilizadas en el proyecto.

3.2.8. Parámetros establecidos para el cálculo de la causalidad de Granger

A la hora de computar la GC se establecen algunos parámetros para obtener un análisis correcto. Se establece el modo de regresión para la estimación del modelo VAR, se puede escoger entre dos métodos: OLS (*Ordinary Least Squares*) [60] y LWR (*Locally Weighted Regression*) que es una extensión multivariante de la recursión de Durbin [61]. Por otro lado, estos métodos también se pueden elegir para el modo de regresión de los criterios de información.

También se puede seleccionar el criterio para la determinación del orden óptimo del modelo que se quiera usar, es decir, AIC o BIC: Para su cálculo se puede establecer el valor máximo del orden que se quiera utilizar en el barrido realizado en la búsqueda del orden óptimo. El valor máximo establecido en el cómputo de la GC por ventanas ha sido 100.

Por último, se establece la frecuencia de muestreo en 2000 Hz para el cálculo de la GC ya que es la frecuencia utilizada para la adquisición de las señales, comentada en 3.1. *Composición de la base de datos*.



3.3. Análisis de los resultados de la causalidad de Granger

Cada registro de la señal comprende unos primeros instantes de reposo seguidos de la actividad deglutoria. Como se indicó previamente, la GC se obtiene para ventanas móviles a lo largo de dicho registro, obteniendo por tanto una serie de valores para cada par de músculos analizados. Se hipotetiza que cuanto más coordinación sea necesaria entre los músculos a la hora de realizar un trabajo conjunto, más elevado será el valor de GC. Mientras que se supone que en estado basal o reposo, los músculos no requieren de tanta coordinación/acoplamiento entre sus actividades por no tener un objetivo común. Así en las ventanas de análisis en las que se da el propio acto de la deglución, en el que se requiere ese trabajo coordinado entre músculos cabe esperar que se obtengan los mayores valores de GC.

En la Figura 15 y la Figura 16 se muestran 3s de señal sEMG de los músculos suprahioides derecha e izquierda del sujeto sano C633 con bolo agua 10 mL y el valor de causalidad Granger en ventana móvil de 0.5s y 1s respectivamente. Como cabe esperar, durante el proceso de deglución, la señal EMG aumenta su amplitud y frecuencia respecto de la actividad basal. Independientemente de la dirección del flujo de información, el valor de causalidad de Granger durante el proceso deglutorio es mayor que la actividad basal cuando el tamaño de ventana es de 0.5s. Esto se debe a que durante la deglución, se sincronizan los músculos suprahioides derecho e izquierdo para realizar la tarea, por lo que aumenta la predictabilidad de la señal sEMG de un músculo teniendo en cuenta la información del otro músculo. En cambio en basal (reposo), los posibles disparos de las unidades motoras de los distintos músculos son más bien aleatorios, por lo que el músculo derecho apenas contiene información para predecir el músculo izquierdo y viceversa. Consecuentemente el valor de causalidad de Granger es relativamente baja. Para ventana de 1s, el valor máximo de causalidad de Granger no necesariamente se obtiene en la ventana centrada en la deglución, sino en la inmediata siguiente que contiene el final del acto deglutorio y retorno a actividad basal. No obstante, la causalidad de Granger durante la deglución es tan solo ligeramente inferior del valor máximo. Con ello, se deduce que el valor máximo de la causalidad de Granger se produce típicamente durante la deglución, aunque probablemente el tamaño de ventana más adecuado es de 0.5s. Con el fin de no tener que identificar manualmente o desarrollar algoritmos para la detección automática del inicio y final de la contracción muscular, la GC entre cada par de músculos de cada sesión de registro quedará representada por el valor máximo de los obtenidos en las distintas ventanas de dicha sesión.

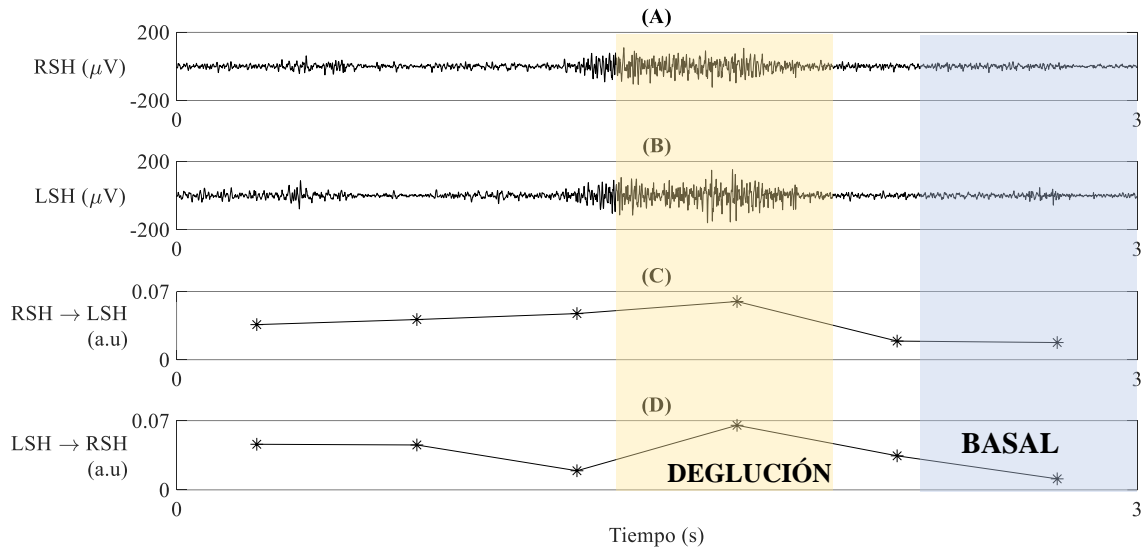


Figura 15. 3s de señal EMG de los músculos suprahioides derecha e izquierda del sujeto C633 sano y el valor de causalidad Granger en ventana móvil de 0.5s. Se remarca los tramos de señal asociado a la deglución de agua 10 mL y un ejemplo de la actividad basal en amarillo y en azul respectivamente. (A) EMG del músculo suprahiideo derecho. (B) EMG del músculo suprahiideo izquierdo. (C) Causalidad Granger del suprahiideo derecho a izquierdo. (D) Causalidad Granger del suprahiideo izquierdo a derecho.

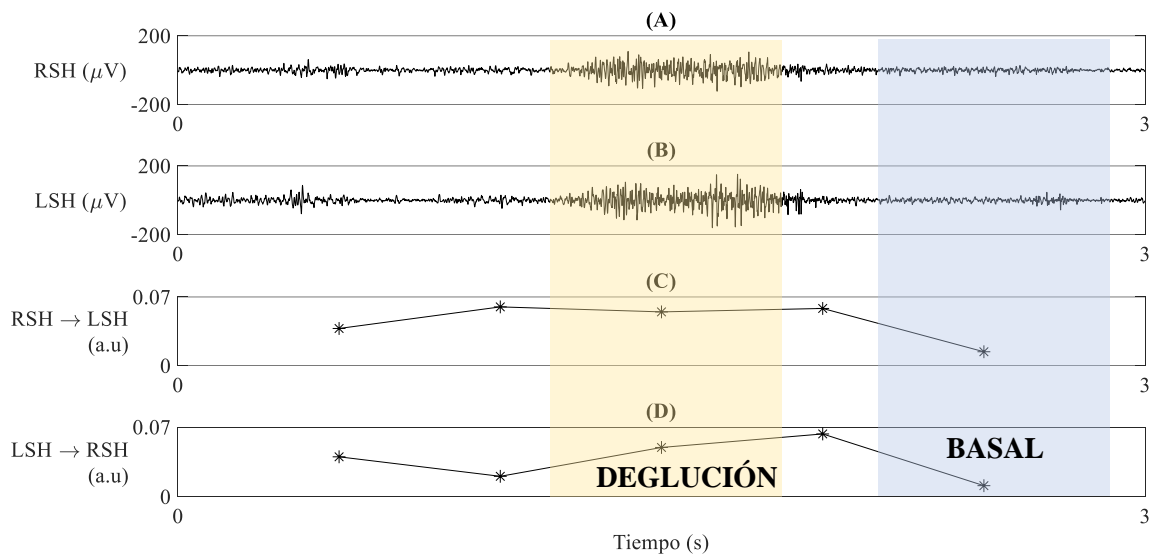


Figura 16. 3s de señal EMG de los músculos suprahioides derecha e izquierda del sujeto C633 y el valor de causalidad Granger en ventana móvil de 1s. Se remarca los tramos de señal asociado a la deglución de agua de 10 mL y un ejemplo de la actividad basal en amarillo y en azul respectivamente. (A) EMG del músculo suprahiideo derecho. (B) EMG del músculo suprahiideo izquierdo. (C) Causalidad Granger del suprahiideo derecho a izquierdo. (D) Causalidad Granger del suprahiideo izquierdo a derecho.



Así, la información de GC queda resumida con un único valor por registro para cada par de músculos. Se parte de 6 músculos (RM, LM, RSH, LSH, RIH, LIH) que da lugar a 15 posibles pares por 2 direcciones ($X \rightarrow Y$, $Y \rightarrow X$). Se realizará una selección de los pares de músculos con conexiones más significativas y habituales que se estudiarán en mayor detalle en los resultados del proyecto. Para realizar esta selección se emplea el siguiente algoritmo que se divide en seis pasos y se ejecuta para cada tipo de bolo.

Para cada sujeto y cada par de músculos:

1. Cálculo de la GC mediante la ventana móvil.
2. Obtención del valor máximo en las distintas ventanas.

Para cada sujeto:

3. Determinación del valor máximo de GC de todos los pares de músculos.
4. Cálculo de un umbral establecido correspondiente al 25% del valor.
5. Se considera que un par de músculos tiene causalidad significativa (1) si su GC supera dicho umbral, y no significativa (0) si no lo supera.

Para cada par de músculos:

6. Evaluación del número (porcentaje) de sujetos que superan el umbral establecido.
7. Selección de las conexiones musculares que superan el 80% del cálculo anterior.

Para facilitar la comprensión del algoritmo, se realiza un esquema explicativo de los puntos anteriores que se muestra en la Figura 17.

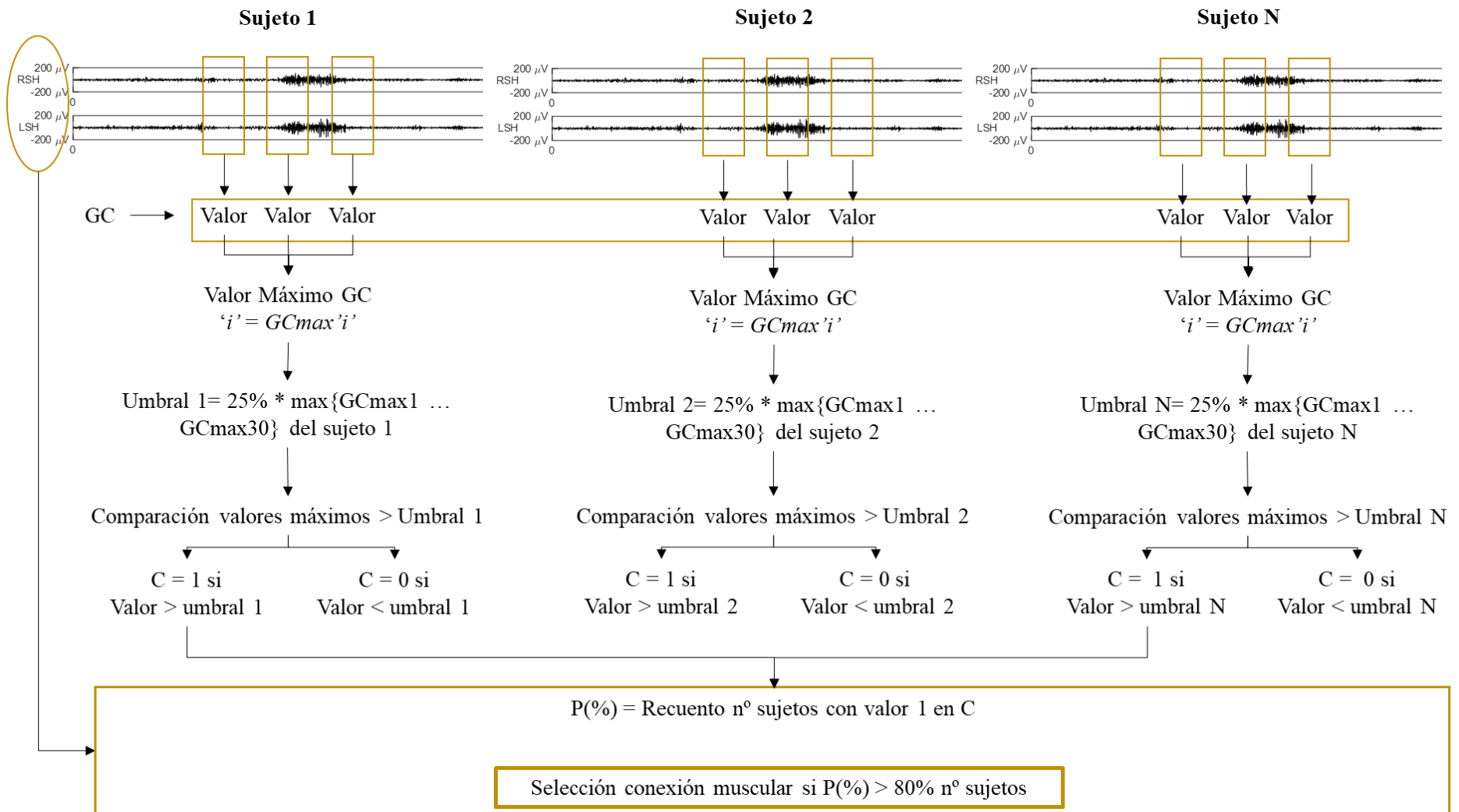


Figura 17. Esquema explicativo del algoritmo para destacar los pares de músculos con mayores GC.



Se calculará el promedio de los resultados obtenidos, los cuales se remarcarán en diferentes colores según el tipo de conexión, mostrando en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en azul las conexiones verticales contralaterales. Además, se calculará el promedio de cada tipo de conexión en dicho resultado.

Una vez realizado el algoritmo anterior, se representan los resultados obtenidos de GC de los pares de músculos que resultaron más relevantes para el estudio mediante Diagramas de Caja y Bigotes.

3.4. Análisis estadístico de los datos

Una vez se tienen los valores de GC de los pares de músculos en los que se desea centrar el análisis se desea estudiar ciertos aspectos de forma específica. Los efectos analizados en el presente proyecto son la relación sano contra patológico, el efecto entre bolos (saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL) y el efecto de la direccionalidad en las conexiones. Para dicho estudio se aplicarán los test estadísticos que se describen a continuación.

Test 1: Comparativa de sanos vs patológicos. El test estadístico utilizado es Wilcoxon Rank Sum. La prueba de suma de rango de Wilcoxon es un test no paramétrico para dos poblaciones con muestras independientes. Las muestras de cada población son no pareadas [62].

Test 2: Comparativo de los tres bolos: saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL. Para ello se emplea el test de Friedman. Esta prueba no paramétrica es para muestras pareadas [63], [64] en más de 2 grupos.

Test 3: Direccionalidad de las conexiones. El test utilizado es Wilcoxon Signed-Rank. Esta prueba de hipótesis estadística no paramétrica se utiliza para comparar dos muestras relacionadas y pareadas para evaluar si sus rangos medios poblacionales son diferentes [65].



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Selección de ventana móvil

En este apartado se pretende determinar el tamaño de ventana de análisis óptimo e identificar las conexiones relevantes implicadas en el proceso deglutorio.

De la Tabla 4 a la Tabla 6 se muestra el porcentaje de sujetos sanos que han superado el 25% de la causalidad de Granger máxima de cada sujeto para el bolo saliva, agua y yogur respectivamente, siendo el tamaño de ventana de análisis de 0.5s. De la Tabla 7 a la Tabla 9 se puede encontrar la misma información obtenida con el tamaño de ventana móvil de 1s. La Tabla 10 y la Tabla 11 muestran el porcentaje promedio de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 0.5s y 1s respectivamente.

Independientemente del tamaño de ventana de análisis, en sujetos sanos, se produce un alto grado de sincronismo entre los músculos izquierdo y derecho (conexión horizontal) tanto en suprahioideos ($RSH \leftrightarrow LSH$) como infrahioideos ($RIH \leftrightarrow LIH$). El porcentaje de sujetos que superan el umbral preestablecido son mayor que 97% en suprahioideos y 87% en infrahioideos. En cambio, la conexión horizontal del músculo masetero ($RM \leftrightarrow LM$) es moderada pero relativamente más débil que la del músculo suprahioideo ($RSH \leftrightarrow LSH$) e infrahioideo ($RIH \leftrightarrow LIH$), siendo el porcentaje de sanos que superan el umbral entre 70% y 80%. Independientemente del músculo (masetero, suprahioideo o infrahioideo), las conexiones horizontales son bidireccionales, es decir, no presentan grandes diferencias entre $RM \rightarrow LM$ y $LM \rightarrow RM$, y lo mismo para los otros músculos. Si bien es cierto que se suelen activar el músculo masetero derecho e izquierdo para la masticación, los movimientos de los mismos son voluntarios. Además, es factible realizar movimientos asimétricos de los músculos maseteros. En cambio, tanto los músculos suprahioideos como infrahioideos son músculos involuntarios, solo se controla el paso del bolo de la fase oral a la fase faríngea. En general, los movimientos de estos músculos son simétricos.

Asimismo, se han encontrado conexiones importantes entre pares de músculos verticales ipsilaterales: suprahioideo-infrahioideo ($RSH \leftrightarrow RIH$ y $LSH \leftrightarrow LIH$), con un porcentaje de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido que oscila entre 81% y 95%. Este fenómeno se produce tanto en el músculo izquierdo como derecho. Esto probablemente es debido a que ambos músculos son involuntarios, y hay un tiempo de tránsito corto con poca variabilidad entre sujetos. Es decir, la activación del músculo suprahioideo necesariamente implica la activación del infrahioideo con cierto retraso temporal. Consecuentemente la información de un músculo podría mejorar la predictabilidad de la señal registrada en el otro músculo. Sin embargo, la activación del músculo masetero no necesariamente tiene una asociación temporal con la deglución (activación de los músculos suprahioideos e infrahioideos), ya que uno puede retener voluntariamente el bolo en la fase oral generando una mayor variabilidad entre los resultados. Por lo que la conexión vertical ipsilateral entre masetero \leftrightarrow suprahioideo, y masetero \leftrightarrow infrahioideo es moderada, cuyos porcentajes de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido fluctúan entre 61% y 84%.

En cambio, las conexiones verticales contralaterales en términos generales son débiles, por ejemplo $RM \rightarrow LSH$, $RM \rightarrow LIH$, $RSH \rightarrow LM$, $RSH \rightarrow LIH$, $RIH \rightarrow LM$, $RSH \rightarrow LSH$, y viceversa. Esto se refleja en porcentajes bajos de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido.

Tabla 4. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

SALIVA - TRAMO 0.5 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	72.22%	66.67%	61.11%	72.22%	66.67%
	LM	55.56%	-	77.78%	94.44%	61.11%	83.33%
	RSH	83.33%	72.22%	-	100.00%	88.89%	66.67%
	LSH	72.22%	66.67%	100.00%	-	77.78%	94.44%
	RIH	66.67%	61.11%	100.00%	72.22%	-	94.44%
	LIH	55.56%	66.67%	77.78%	88.89%	100.00%	-

Tabla 5. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

AGUA - TRAMO 0.5 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	73.33%	93.33%	80.00%	86.67%	60.00%
	LM	86.67%	-	73.33%	100.00%	60.00%	93.33%
	RSH	80.00%	60.00%	-	100.00%	93.33%	86.67%
	LSH	80.00%	86.67%	100.00%	-	73.33%	86.67%
	RIH	80.00%	66.67%	100.00%	80.00%	-	100.00%
	LIH	53.33%	86.67%	86.67%	100.00%	100.00%	-

Tabla 6. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

YOGUR - TRAMO 0.5 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	87.50%	93.75%	56.25%	93.75%	68.75%
	LM	75.00%	-	68.75%	87.50%	56.25%	93.75%
	RSH	87.50%	68.75%	-	100.00%	81.25%	62.50%
	LSH	50.00%	75.00%	100.00%	-	56.25%	93.75%
	RIH	87.50%	75.00%	87.50%	68.75%	-	100.00%
	LIH	62.50%	93.75%	81.25%	93.75%	93.75%	-

Tabla 7. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

SALIVA - TRAMO 1 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	83.33%	66.67%	44.44%	50.00%	38.89%
	LM	61.11%	-	55.56%	66.67%	33.33%	61.11%
	RSH	77.78%	50.00%	-	100.00%	83.33%	50.00%
	LSH	33.33%	61.11%	100.00%	-	50.00%	83.33%
	RIH	61.11%	33.33%	83.33%	50.00%	-	83.33%
	LIH	50.00%	66.67%	50.00%	77.78%	88.89%	-

Tabla 8. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

AGUA - TRAMO 1 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	73.33%	93.33%	53.33%	80.00%	46.67%
	LM	66.67%	-	53.33%	86.67%	46.67%	93.33%
	RSH	73.33%	53.33%	-	100.00%	86.67%	73.33%
	LSH	53.33%	73.33%	93.33%	-	46.67%	86.67%
	RIH	60.00%	46.67%	93.33%	53.33%	-	93.33%
	LIH	46.67%	66.67%	60.00%	80.00%	93.33%	-

Tabla 9. Porcentaje de pacientes sanos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

YOGUR - TRAMO 1 s - SANOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM	-	81.25%	87.50%	50.00%	81.25%	56.25%
	LM	87.50%	-	56.25%	87.50%	43.75%	75.00%
	RSH	62.50%	62.50%	-	100.00%	75.00%	56.25%
	LSH	25.00%	68.75%	100.00%	-	50.00%	75.00%
	RIH	62.50%	50.00%	93.75%	56.25%	-	87.50%
	LIH	37.50%	75.00%	68.75%	93.75%	81.25%	-

Tabla 10. Porcentaje promedio de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).

PROMEDIO SANO 0.5s								
		De						
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH	
Para	RM		77.68%	84.58%	65.79%	84.21%	65.14%	
	LM	72.41%		73.29%	93.98%	59.12%	90.14%	
	RSH	83.61%	66.99%		100.00%	87.82%	71.95%	
	LSH	67.41%	76.11%	100.00%		69.12%	91.62%	
	RIH	78.06%	67.59%	95.83%	73.66%		98.15%	
	LIH	57.13%	82.36%	81.90%	94.21%	97.92%		
Horizontal							91.03%	
Vertical ipsilateral							86.88%	
Vertical contralateral							68.26%	

Tabla 11. Porcentaje promedio de sujetos sanos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).

PROMEDIO SANO 1s								
		De						
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH	
Para	RM		79.30%	82.50%	49.26%	70.42%	47.27%	
	LM	71.76%		55.05%	80.28%	41.25%	76.48%	
	RSH	71.20%	55.28%		100.00%	81.67%	59.86%	
	LSH	37.22%	67.73%	97.78%		48.89%	81.67%	
	RIH	61.20%	43.33%	90.14%	53.19%		88.05%	
	LIH	44.72%	69.45%	59.58%	83.84%	87.82%		
Horizontal							87.45%	
Vertical ipsilateral							76.38%	
Vertical contralateral							49.58%	



De la Tabla 12 a la Tabla 14 se muestra el porcentaje de sujetos patológicos que han superado el 25% de la causalidad de Granger máxima de cada sujeto para los bolos saliva, agua 10 mL y yogur 10 mL respectivamente, siendo el tamaño de ventana de análisis de 0.5s. De la Tabla 15 a la Tabla 17 se puede encontrar la misma información obtenida con el tamaño de ventana móvil de 1s. La Tabla 18 y la Tabla 19 muestran el porcentaje promedio de sujetos patológicos que superan el umbral preestablecido de los distintos bolos para el tamaño de ventana de 0.5s y 1s respectivamente.

En sujetos patológicos al igual que en sujetos sanos, independientemente del tamaño de ventana de análisis, se produce un alto grado de sincronismo entre los músculos izquierdo y derecho (conexión horizontal) tanto en suprahioideos ($RSH \leftrightarrow LSH$) como infrahioideos ($RIH \leftrightarrow LIH$). El porcentaje de sujetos que superan el umbral preestablecido es mayor del 90% en los músculos suprahioideos y 92% en los infrahioideos. Por el contrario, la conexión horizontal del músculo masetero ($RM \leftrightarrow LM$) es más débil que la del músculo suprahioideo ($RSH \leftrightarrow LSH$) e infrahioideo ($RIH \leftrightarrow LIH$), con el porcentaje de patológicos que superan el umbral varía entre el 73% y el 80%. Al igual que en los sujetos sanos, las conexiones horizontales en los sujetos patológicos son bidireccionales indistintamente del músculo (masetero, suprahioideo o infrahioideo).

De igual modo, se han encontrado conexiones importantes entre pares de músculos verticales ipsilaterales: suprahioideo-infrahioideo ($RSH \leftrightarrow RIH$ y $LSH \leftrightarrow LIH$), con un porcentaje de sujetos patológicos que superan el umbral preestablecido que varía entre el 82% y el 96% en ventanas de 0.5s y 1s conjuntamente. Este fenómeno se produce tanto en el músculo izquierdo como derecho. En la conexión vertical ipsilateral entre masetero \leftrightarrow suprahioideo, y masetero \leftrightarrow infrahioideo existe una conexión moderada, cuyos porcentajes de sujetos patológicos los cuales superan el umbral preestablecido oscilan entre 62% y 78%. Al comparar el promedio de las conexiones verticales ipsilaterales que superan el umbral establecido de los sujetos sanos y patológicos, se observa un porcentaje menor en los sujetos patológicos. El porcentaje promedio de las conexiones verticales ipsilaterales para 0.5s en sujetos sanos es 86% y en sujetos patológicos 78%. En las conexiones de ventana de 1s en sujetos sanos es 76% y en sujetos patológicos es de 75%.

Por otro lado, las conexiones verticales contralaterales son débiles, al igual que en los sujetos sanos. Estas conexiones son $RM \rightarrow LSH$, $RM \rightarrow LIH$, $RSH \rightarrow LM$, $RSH \rightarrow LIH$, $RIH \rightarrow LM$, $RSH \rightarrow LSH$, y viceversa. Esto se refleja en bajos porcentajes de sujetos patológicos que superan el umbral preestablecido, oscilando dichos porcentajes entre el 46% y el 77%.

Tabla 12. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo salivar y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

SALIVA - TRAMO 0.5 s - PATOLÓGICOS							
		De					
		1	2	3	4	5	6
Para	1		75.00%	80.00%	70.00%	80.00%	40.00%
	2	75.00%		70.00%	70.00%	60.00%	65.00%
	3	80.00%	65.00%		90.00%	95.00%	50.00%
	4	60.00%	75.00%	85.00%		65.00%	85.00%
	5	70.00%	70.00%	90.00%	70.00%		90.00%
	6	60.00%	65.00%	90.00%	90.00%	90.00%	

Tabla 13. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

AGUA - TRAMO 0.5 s - PATOLÓGICOS							
		De					
		1	2	3	4	5	6
Para	1		81.25%	75.00%	62.50%	75.00%	50.00%
	2	87.50%		62.50%	68.75%	75.00%	75.00%
	3	75.00%	68.75%		100.00%	100.00%	56.25%
	4	75.00%	81.25%	100.00%		56.25%	81.25%
	5	56.25%	68.75%	93.75%	81.25%		93.75%
	6	56.25%	75.00%	68.75%	100.00%	100.00%	

Tabla 14. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

YOGUR - TRAMO 0.5 s - PATOLÓGICOS							
		De					
		1	2	3	4	5	6
Para	1		81.25%	81.25%	37.50%	68.75%	68.75%
	2	68.75%		56.25%	68.75%	75.00%	75.00%
	3	50.00%	56.25%		100.00%	93.75%	68.75%
	4	50.00%	68.75%	87.50%		68.75%	87.50%
	5	62.50%	56.25%	93.75%	75.00%		100.00%
	6	50.00%	81.25%	75.00%	93.75%	100.00%	

Tabla 15. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo saliva y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

SALIVA - TRAMO 1s - PATOLÓGICOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		80.00%	75.00%	75.00%	65.00%	45.00%
	LM	65.00%		60.00%	80.00%	55.00%	60.00%
	RSH	70.00%	60.00%		100.00%	95.00%	65.00%
	LSH	55.00%	80.00%	95.00%		55.00%	80.0%
	RIH	75.00%	60.00%	95.00%	75.00%		90.0%
	LIH	35.00%	70.00%	50.00%	95.00%	100.00%	

Tabla 16. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo agua y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

AGUA - TRAMO 1s - PATOLÓGICOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		68.75%	75.00%	50.00%	68.75%	50.00%
	LM	81.25%		62.50%	75.00%	62.50%	68.75%
	RSH	62.50%	62.50%		87.50%	93.75%	62.50%
	LSH	56.25%	56.25%	100.00%		43.75%	81.25%
	RIH	56.25%	56.25%	93.75%	68.75%		93.75%
	LIH	50.00%	68.75%	56.25%	93.75%	100.00%	

Tabla 17. Porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para el bolo yogur y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

YOGUR - TRAMO 1s - PATOLÓGICOS							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		75.00%	75.00%	43.75%	75.00%	43.75%
	LM	75.00%		56.25%	62.50%	56.25%	56.25%
	RSH	62.50%	43.75%		93.75%	81.25%	75.00%
	LSH	31.25%	62.50%	93.75%		68.75%	87.50%
	RIH	68.75%	50.00%	87.50%	75.00%		93.75%
	LIH	56.25%	75.00%	81.25%	93.75%	100.00%	

Tabla 18. Promedio en porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 0.5s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).

PROMEDIO PATOLÓGICOS 0.5s							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		79.17%	78.75%	56.67%	74.58%	52.92%
	LM	77.08%		62.92%	69.17%	70.00%	71.67%
	RSH	68.33%	63.33%		96.67%	96.25%	58.33%
	LSH	61.67%	75.00%	90.83%		63.33%	84.58%
	RIH	62.92%	65.00%	92.50%	75.42%		94.58%
	LIH	55.42%	73.75%	77.92%	94.58%	96.67%	
Horizontal							89.17%
Vertical ipsilateral							78.51%
Vertical contralateral							63.58%

Tabla 19. Promedio en porcentaje de pacientes patológicos que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 1s. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Bajo la tabla se muestra el promedio de cada tipo de conexión (horizontal, vertical ipsilateral y vertical contralateral).

PROMEDIO PATOLÓGICOS 1s							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		74.58%	75.00%	56.25%	69.58%	46.25%
	LM	73.75%		59.58%	72.50%	57.92%	61.67%
	RSH	65.00%	55.42%		93.75%	90.00%	67.50%
	LSH	47.50%	66.25%	96.25%		55.83%	82.92%
	RIH	66.67%	55.42%	92.08%	72.92%		92.50%
	LIH	47.08%	71.25%	62.50%	94.17%	100.00%	
Horizontales							88.47%
Vertical ipsilateral							75.59%
vertical contralateral							57.01%



La Tabla 20 y la Tabla 21 muestran las diferencias de porcentaje entre los promedios de los sujetos sanos y patológicos que han superado el umbral establecido de los distintos bolos para las ventanas de 0.5s y 1s respectivamente. En dichas tablas se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. Independientemente del tamaño de ventana, las conexiones horizontales de los músculos maseteros ($RM \leftrightarrow LM$) de los patológicos son ligeramente mayores a las de los sujetos sanos. Sin embargo, las conexiones de los sujetos sanos son mayores que las de los sujetos patológicos en los músculos suprahioideos ($RSH \leftrightarrow LSH$) e infrahioideos ($RIH \leftrightarrow LIH$).

Para el tamaño de ventana de 0.5s, el porcentaje promedio de sujetos patológicos es menor que los sujetos sanos para las conexiones verticales ipsilaterales y contralaterales. Esta disminución se puede dar debido a una pérdida de coordinación entre los músculos acarreada por la patología, afectando a las conexiones entre los pares musculares suprahioideos e infrahioideos tanto de manera ipsilateral como contralateral. Las mayores diferencias entre sujetos sanos y patológicos se producen en las conexiones verticales ipsilaterales en el lado derecho de $RM \rightarrow RSH$ y $RM \rightarrow RIH$ del 15% y en el lado izquierdo de $LSH \rightarrow LM$ y $LIH \rightarrow LM$ del 24% y 18% respectivamente.

No obstante, las conexiones verticales ipsilaterales no presentan una tendencia clara entre los sujetos sanos y patológicos para el tamaño de ventana de 1s. Las mayores diferencias entre sujetos sanos y patológicos se producen en las conexiones verticales contralaterales para el tamaño de ventana de 1s. En este caso, se observa que aumenta el valor de los porcentajes en los sujetos patológicos en un 19% para la conexión $LSH \rightarrow RIH$ y en un 16% para la conexión $RIH \rightarrow LM$. Este aumento no tiene una explicación fisiológica con la prueba realizada. Con todo ello, se deduce que el tamaño de ventana de análisis adecuado es de 0.5s, tiempo similar al del reflejo deglutorio (400-500 ms) [5], [6].

Tabla 20. Diferencia en porcentaje entre sanos y patológicos de los promedios que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 0.5s. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

DIFERENCIA SANO vs PATOLÓGICOS 0.5s							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		1.48%	5.83%	9.12%	9.63%	12.22%
	LM	4.67%		10.37%	24.81%	10.88%	18.47%
	RSH	15.28%	3.66%		3.33%	8.43%	13.61%
	LSH	5.74%	1.11%	9.17%		5.79%	7.04%
	RIH	15.14%	2.59%	3.33%	1.76%		3.56%
	LIH	1.71%	8.61%	3.98%	0.37%	1.25%	

Tabla 21. Diferencia en porcentaje entre sanos y patológicos de los promedios que han superado el umbral establecido para los distintos bolos y la ventana móvil 1s. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde de las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para).

DIFERENCIA SANO vs PATOLÓGICOS 1s							
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		4.72%	7.50%	6.99%	0.83%	1.02%
	LM	1.99%		4.54%	7.78%	16.67%	14.81%
	RSH	6.20%	0.14%		6.25%	8.33%	7.64%
	LSH	10.28%	1.48%	1.53%		6.94%	1.25%
	RIH	5.46%	12.08%	1.95%	19.72%		4.45%
	LIH	2.36%	1.80%	2.92%	10.32%	12.18%	

4.2. Evaluación de las conexiones de pares musculares

Tal como se puede deducir de los resultados del apartado anterior, las conexiones horizontales y las verticales ipsilaterales presentan un mayor grado de coordinación y/o sincronización durante el proceso de deglución. Las conexiones verticales contralaterales son más débiles tanto en sujetos sanos como patológicos. Por ese motivo, en este apartado el análisis se centra en las conexiones horizontales y las verticales ipsilaterales. Respecto a las conexiones verticales ipsilaterales, nos centramos en los músculos adyacentes debido a la activación secuencial de los mismos. Específicamente, se pretende determinar aquellas conexiones que presenten diferencias significativas entre los sujetos sanos y patológicos. Asimismo, se determinará si la conexión es bidireccional o presenta alguna lateralización importante y se analizará si existen diferencias significativas entre distintos bolos. Las conexiones que se analizan en el presente punto se visualizan en la Figura 18.

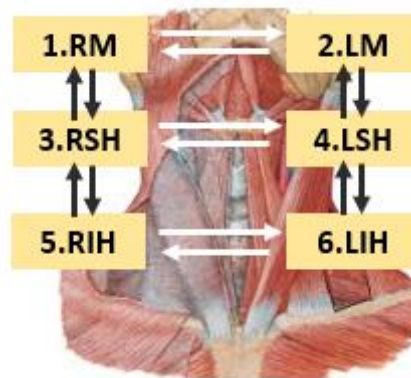


Figura 18. Conexiones de los pares musculares que se van a analizar.

4.2.1. Conexiones horizontales

La Figura 19 muestra la gráfica de cajas y bigotes de la causalidad de Granger condicional de la conexión horizontal masetero de los sujetos sanos y patológicos para los distintos bolos. En general, el valor mediana de los patológicos es ligeramente mayor que en los sujetos sanos, pero no ha habido diferencia significativa entre ambos grupos. Los músculos maseteros son voluntarios capaces de retener el bolo y decidir el momento de la deglución sin realizar mayor actividad eléctrica. El bolo desciende cuando es deglutido, por esta razón tiene sentido fisiológico que las conexiones horizontales en los músculos maseteros no se ve alterado por disfagia.

En la conexión horizontal de los músculos maseteros no se observan tendencias en el efecto del bolo ni en sujetos sanos ni en sujetos patológicos. Además, tampoco existen diferencias significativas entre los tres bolos.

Finalmente, en cuanto a direccionalidad, se aprecia que el valor mediana en saliva tanto para sujetos sanos como para sujetos patológicos en la dirección LM→RM es mayor que en RM→LM. Del mismo modo, tampoco se han encontrado diferencias significativas entre ellos.

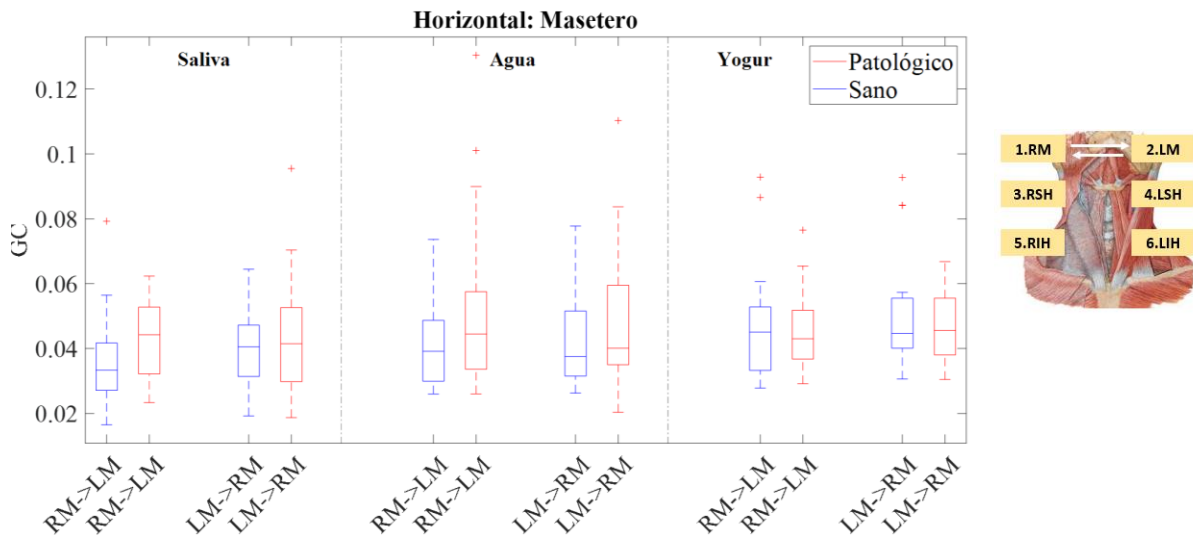


Figura 19. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos maseteros. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

En la Figura 20 se muestra la gráfica de cajas y bigotes de la causalidad de Granger condicional de la conexión horizontal de los músculos suprahioides de los sujetos sanos y patológicos para los distintos bolos. En general, en las conexiones horizontales suprahioides aparece un valor mediana mayor en los sujetos sanos en comparación con los sujetos patológicos, sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas.

En el efecto del bolo se visualiza un valor menor en agua, indistintamente de la dirección, en comparación con los valores mediana de los bolos saliva y yogur. En cambio, no existen diferencias significativas en el efecto del bolo.

Se aprecian tendencias en la Figura 20 en la direccionalidad de la conexión horizontal de los músculos suprahioides. Se observa un mayor valor mediana en sujetos sanos en los bolos agua y yogur para las conexiones LSH→RSH. En sujetos patológicos se encuentra un mayor valor mediana en los bolos saliva y agua en la dirección RSH→LSH. Sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas.

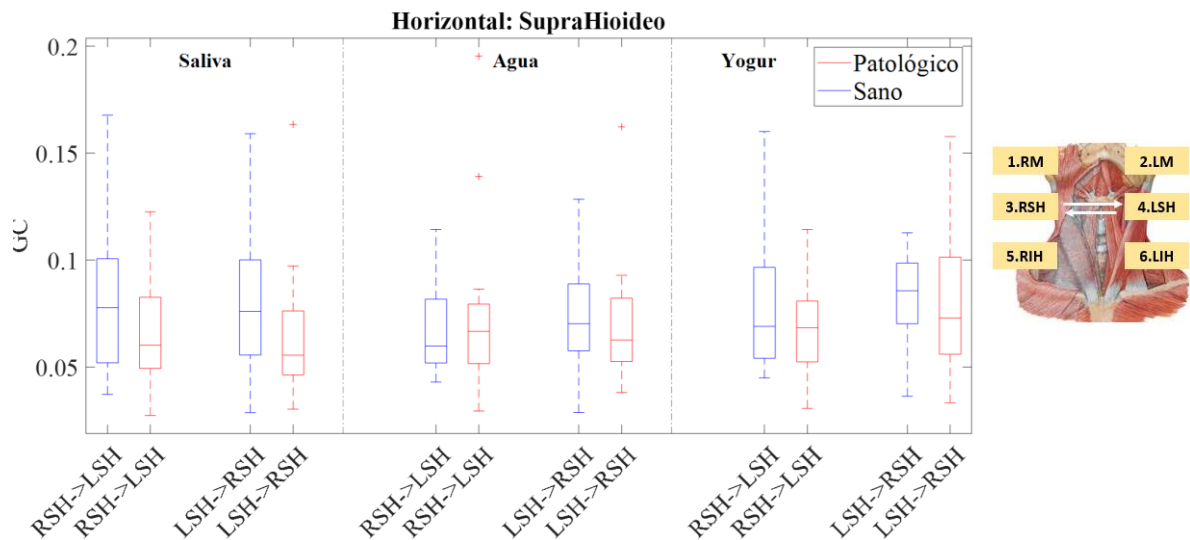


Figura 20. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos suprahioides. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

En la Figura 21 se muestra la gráfica de cajas y bigotes de la causalidad de Granger condicional de la conexión horizontal de los músculos infrahioideos de los sujetos sanos y patológicos para los distintos bolos. La conexión horizontal de músculos infrahioideos muestra, en general, un valor mediana mayor en sujetos patológicos, sin embargo, solo existe diferencia estadísticamente significativa en el bolo saliva en la dirección RIH→LIH ($p_{sd}=0.025$).

Indistintamente de la dirección, las tendencias asociadas al efecto del bolo muestran un valor mediana mayor en sujetos sanos en los bolos agua y yogur en comparación con el valor del bolo saliva. El valor mediana en sujetos patológicos del bolo agua en la dirección RIH→LIH es mayor al resto de bolos. Se observa una tendencia ascendente en los bolos saliva, agua y yogur respectivamente en sujetos patológicos en la dirección LIH→RIH. A pesar de esto, solo se observa diferencias significativas en la tendencia ascendente de los bolos en sujetos patológicos en la dirección LIH→RIH ($p_{pi}=0.009$).

Se muestra un valor mediana mayor en la dirección RIH→LIH frente a la dirección LIH→RIH en bolo saliva para sujetos patológicos. El valor mediana en la misma dirección para el bolo agua en sujetos sanos también parece mayor. En el bolo yogur el valor mediana de la dirección LIH→RIH de los sujetos patológicos es ligeramente mayor. En cambio, se observan diferencias significativas en los sujetos patológicos en el bolo saliva para la dirección RIH→LIH frente a la dirección LIH→RIH.

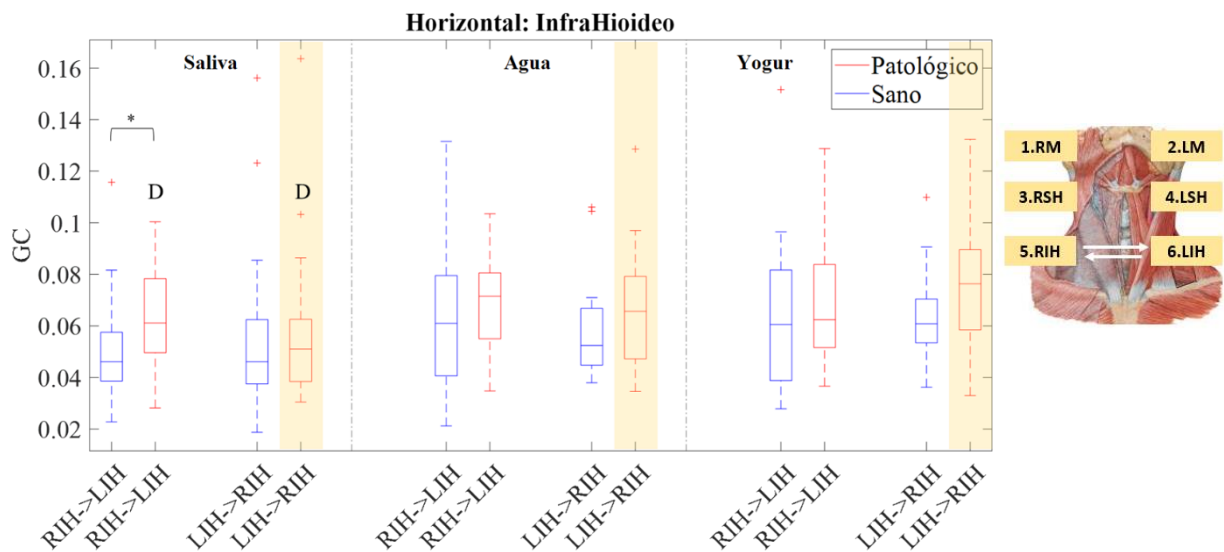


Figura 21. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión horizontal de los músculos infrahioideos. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

4.2.2. *Conexión vertical ipsilateral masetero-suprahioideo*

La Figura 22 y la Figura 23 muestran la gráfica de cajas y bigotes de la causalidad de Granger condicional de la conexión vertical izquierda y derecha respectivamente de los músculos masetero-suprahioideo de los sujetos sanos y patológicos para los distintos bolos. En general, el valor mediana de los patológicos es ligeramente mayor que en los sujetos sanos en algunos casos, pero no ha habido diferencia significativa entre ambos grupos.

En la conexión vertical ipsilateral izquierda entre la musculatura masetero-suprahioideo se observan valores mayores en el bolo yogur en sujetos patológicos en la conexión LM→LSH, además, este valor es estadísticamente significativo ($p_{Pd}=0.006$).

En general, en cuanto a direccionalidad, la dirección LSH→LM presenta valores más elevados que la dirección LM→LSH. A pesar de esto, no existen valores estadísticamente significativos en los resultados.

En el caso del lado derecho del sujeto, entre sujetos sanos y patológicos se aprecian valores mediana mayores en patológicos para el bolo agua en la dirección RSH→RM y para el bolo yogur en la dirección RM→RSH. Sin embargo, no se encuentran diferencias significativas en las conexiones vertical ipsilateral derecha entre masetero-suprahioideo.

De manera general, el efecto del bolo muestra una tendencia ascendente desde saliva hasta yogur pero no existen diferencias significativas en la conexión vertical ipsilateral derecha entre masetero-suprahioideo.

Finalmente, se visualiza un mayor valor mediana en la dirección RSH→RM en sujetos patológicos en el bolo agua. En cambio, no hay diferencias significativas en los valores resultantes.

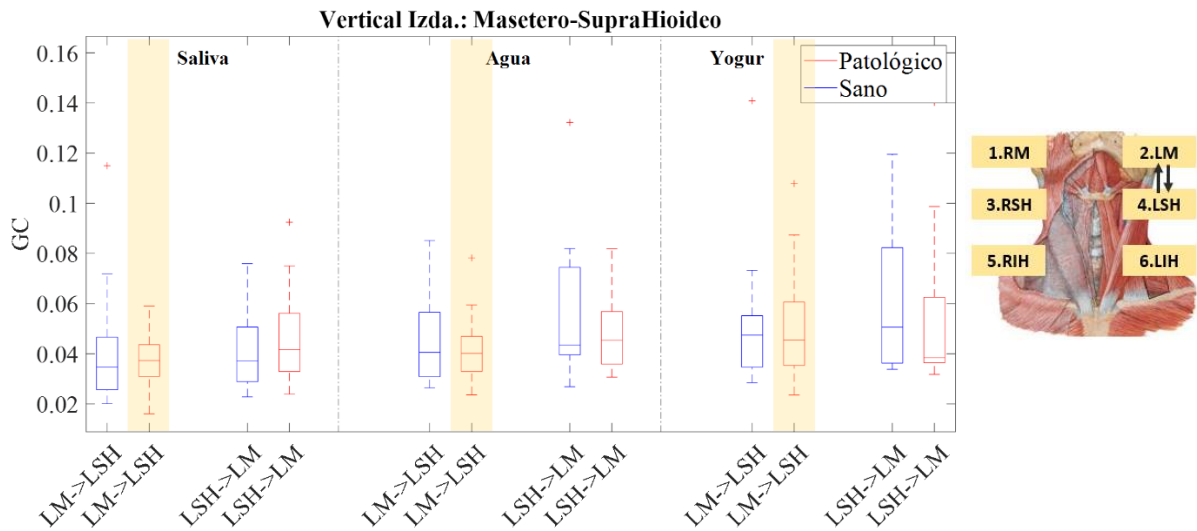


Figura 22. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical izquierda entre los músculos masetero-suprahioides. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

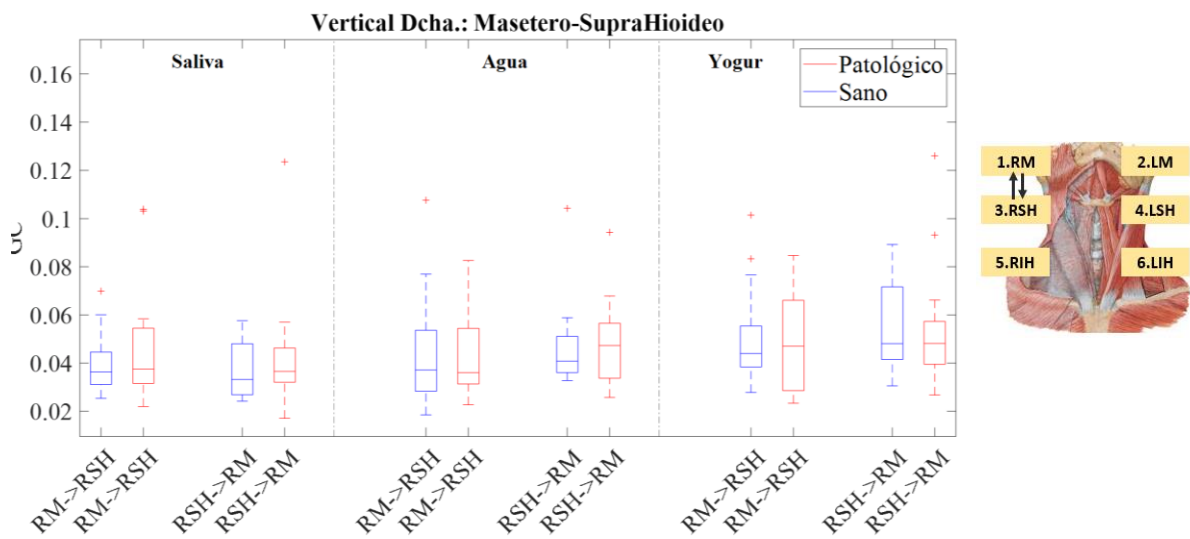


Figura 23. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical derecha entre los músculos masetero-suprahioides. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

4.2.3. *Conexión vertical ipsilateral suprahioideo-infrahioideo*

La Figura 22 y la Figura 23 muestran la gráfica de cajas y bigotes de la causalidad de Granger condicional de la conexión vertical ipsilateral izquierda y derecha respectivamente de los músculos suprahioideo-infrahioideo de los sujetos sanos y patológicos para los distintos bolos. En general, el valor mediana de los patológicos parece ligeramente mayor que en los sujetos sanos. La conexión LSH→LIH de los sujetos patológicos es significativamente mayor que los sujetos sanos para el bolo saliva ($p_{sd}=0.048$).

El efecto del bolo que se visualiza muestra una tendencia ascendente (saliva, agua, yogur) en la dirección conexión LSH→LIH de los sujetos sanos, mientras que en los sujetos patológicos la misma conexión tiene una tendencia descendente. Esto muestra que en sujetos sanos la mayor consistencia y viscosidad del bolo se detecta en el área somatosensorial generando una respuesta que requiere una mayor coordinación entre los músculos suprahioideo-infrahioideo, mientras que en los sujetos patológicos se deteriora la capacidad de modular la fuerza. La conexión suprahioideo-infrahioideo en sujetos patológicos no trabaja adecuadamente afectando a la coordinación entre los músculos de manera ipsilateral. En la conexión vertical ipsilateral izquierda entre la musculatura suprahioideo-infrahioideo aparecen diferencias significativas en el efecto del bolo saliva en los sujetos patológicos en la dirección LSH→LIH ($p_{Pd}=0.038$). Esta diferencia supone que existe una alteración en la conexión LSH→LIH, encargada del descenso del bolo y por tanto, explica la sensación de dolor o de atragantamiento al deglutir de los pacientes con disfagia.

En el efecto de la direccionalidad se observan mayores valores mediana, en general, en la dirección LSH→LIH frente a la dirección LIH→LSH. La conexión predominante es desde el músculo superior (LSH) hacia el inferior (LIH) ya que es la causante del descenso del bolo alimenticio y realizando un efecto onda en la faringe, sin embargo, la conexión LIH→LSH es menor ya que se debe a la retroalimentación para detener el impulso. Las conexiones estadísticamente significativas que se encuentran debido al efecto de la direccionalidad es en el bolo agua ($p_{Sa}=0.041$) y yogur ($p_{Sy}=0.030$) para sujetos sanos; y para sujetos patológicos se observa significancia en el bolo saliva ($p_{Ps}=0.015$).

La conexión vertical ipsilateral derecha de los músculos suprahioideo-infrahioideo muestra un valor mediana mayor en sujetos sanos para la conexión RSH→RIH en el bolo yogur. También se observa un valor mediana ligeramente mayor en los sujetos patológicos para todos los bolos (saliva, agua y yogur) en la dirección RIH→RSH. La conexión estadísticamente significativa en la comparativa entre sujetos sanos y patológicos es para el bolo saliva ($p_{Si}=0.039$) y yogur ($p_{yi}=0.004$) con un valor mayor en sujetos patológicos en la conexión RIH→RSH.

El efecto del bolo en la dirección RSH→RIH en sujetos sanos muestra una tendencia ascendente, sin embargo, los resultados para el efecto del bolo en las conexiones verticales ipsilaterales derecha no son estadísticamente significativos.

La direccionalidad que muestra tendencias para el bolo yogur en sujetos sanos con mayor valor es la dirección RSH→RIH frente a la conexión RIH→RSH. Además, dicha conexión tiene diferencias significativas ($p_{Sy}=0.004$). La direccionalidad desde el músculo superior (RSH) al inferior (RIH) se debe al efecto onda que realiza el músculo para conseguir la deglución del bolo alimenticio.

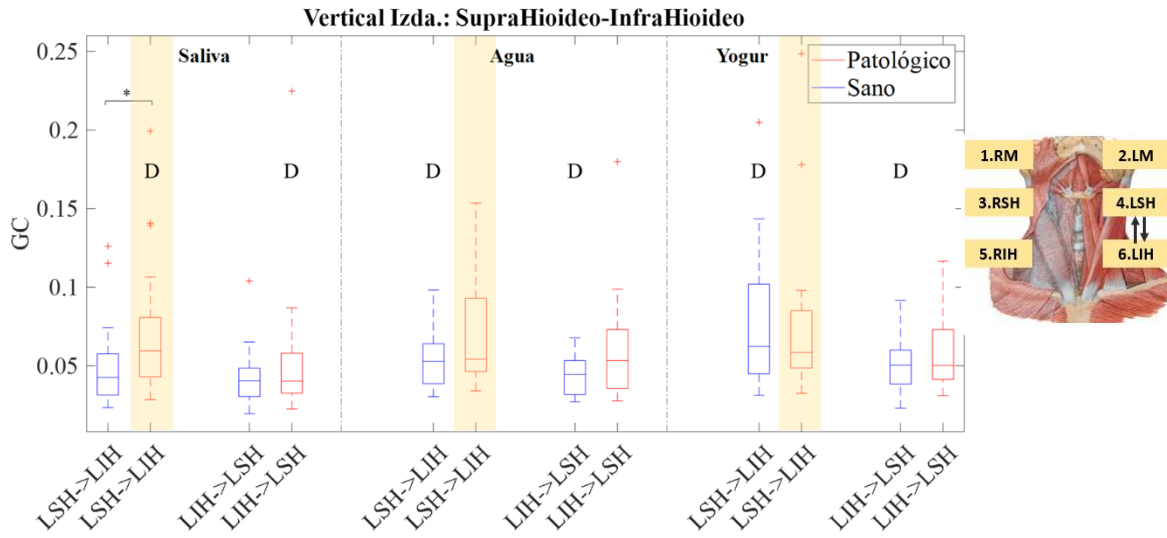


Figura 24. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical izquierda entre los músculos suprahioideo-infrahioideo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.

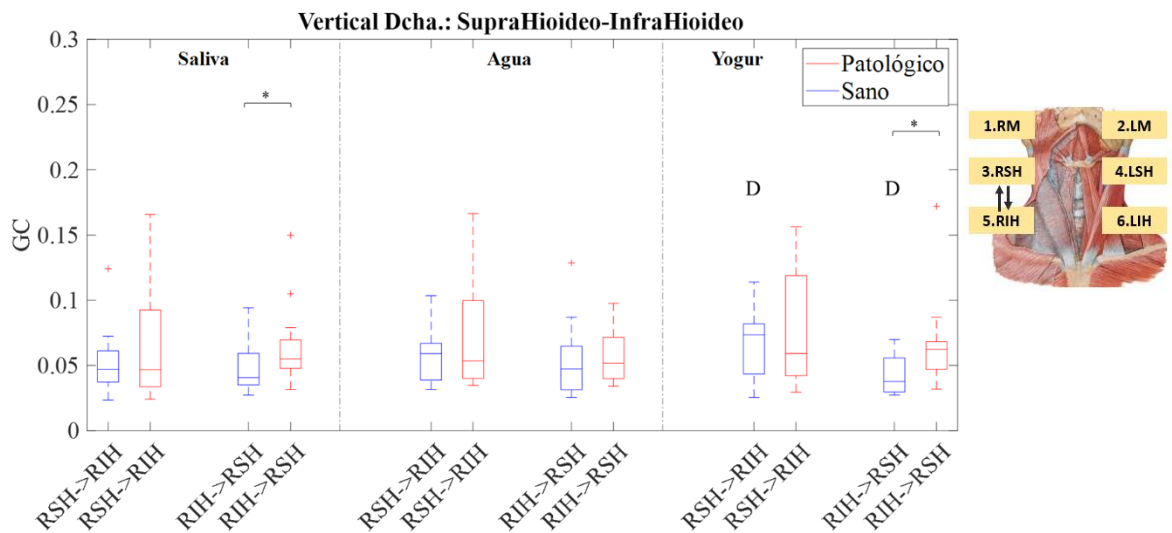


Figura 25. Diagrama de Caja y Bigotes para la conexión vertical derecha entre los músculos suprahioideo-infrahioideo. “*” significa diferencia significativa entre los sujetos sanos y patológicos, sombreado en amarillo significa diferencia significativa en el efecto del bolo y “D” significa diferencia significativa en la direccionalidad del par de músculos.



Desde la Tabla 22 a la Tabla 24 se muestran los p-valores de la diferencia estadística entre sujetos sanos y patológicos para todas las conexiones musculares para los bolos saliva, agua y yogur respectivamente. En la Figura 26 se representan las conexiones estadísticamente significativas obtenidas en el análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para todas las conexiones musculares para los bolos saliva, agua y yogur. En todas las tablas se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas en la conexión horizontal RIH→LIH para el bolo de saliva, las conexiones verticales ipsilaterales RIH→RSH y LSH→LIH para los bolos de saliva y yogur. Específicamente se ha visto que se requiere un mayor grado de coordinación entre los músculos horizontales infrahioideos para los sujetos patológicos, lo cual podría ser un mecanismo compensatorio de la pérdida significativa de la coordinación de las conexiones verticales ipsilaterales. Si bien es cierto que las conexiones verticales contralaterales suelen ser débiles tanto en sujeto sanos y como en patológicos, también se han obtenido diferencias significativas en las conexiones verticales contralaterales RIH→LM para los bolos de agua y yogur, y RIH↔LSH para el bolo de yogur. Este fenómeno podría explicarse por el hecho de que el aumento del grado de coordinación de los músculos infrahioideos podría generar la retroalimentación del músculo infrahioideo a los otros músculos verticales ipsilaterales y también contralaterales indicando el fin de la fase faríngea. Esa retroalimentación hacia músculos contralaterales probablemente sea más débil que los músculos ipsilaterales en los sujetos sanos, generando una mayor diferencia entre sanos y patológicos. Hay que destacar que se han encontrado más diferencias significativas entre los sujetos sanos y patológicos en el bolo yogur, lo cual podría ser debido a que la consistencia del yogur es más elevada que la de la saliva y el agua, consecuentemente requiere una mayor coordinación de los músculos involuntarios para conseguir deglutirlo.

La Tabla 25 y la Tabla 26 muestran los p-valores del análisis estadístico del efecto de bolo de todas las conexiones para los sujetos sanos y patológicos respectivamente. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La Figura 27 muestra una representación gráfica de las conexiones estadísticamente significativas obtenidas en el análisis estadístico del efecto del bolo. Estos resultados sugieren que no existen diferencias significativas a nivel de coordinación entre músculos entre bolos para los sujetos sanos. En cambio, se ha encontrado un efecto de bolo en la conexión horizontal en el músculo infrahioideo LIH→RIH, las conexiones verticales ipsilaterales LM→LSH y LSH→LIH, y también la conexión vertical contralateral RIH→LM. Si bien es cierto que no hay gran variación de consistencia entre los distintos bolos ensayados, es suficiente para determinar la diferencia en la capacidad de los sujetos sanos y patológicos para adaptarse la coordinación de los distintos músculos en función de la consistencia. Asimismo, se ha observado una cierta lateralización de las conexiones verticales ipsilaterales en cuanto al efecto de bolo en los sujetos patológicos, concretamente en las conexiones del lado izquierdo. Por tanto, la lateralización podría ser un indicador en la dificultad de deglutir. En este respecto, es ampliamente aceptado que la corteza cerebral participa en la regulación de la deglución de forma bilateral en los sujetos sanos. Sin embargo, la mayoría de los sujetos, al ser diestros, tienen un mayor control sobre los músculos voluntarios del lado derecho, por lo que tendrían una mayor capacidad de modular la respuesta en función de la consistencia del bolo.



La Tabla 27 muestra los p-valores del análisis de direccionalidad de todas las conexiones para cada bolo tanto en los sujetos sanos como los patológicos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La Figura 28 muestra los resultados del análisis estadístico de la direccionalidad de todas las conexiones musculares para cada bolo en sujetos sanos y en sujetos patológicos. En sujetos sanos, se han encontrado diferencias significativas en la conexión $RSH \leftrightarrow RIH$ para el bolo yogur y en la conexión $LSH \leftrightarrow LIH$ en los bolos agua y yogur. En el caso de los sujetos patológicos, únicamente se encuentran diferencias significativas en las conexiones $LSH \leftrightarrow LIH$ y $RIH \leftrightarrow LIH$ para el bolo saliva. La conexión suprahioideo \leftrightarrow infrahioideo es asimétrica tanto en el lado izquierdo como el derecho en el bolo de yogur. Asimismo, la conexión $LSH \rightarrow LIH$ es significativamente mayor que $LIH \rightarrow LSH$ (en los bolos de agua y yogur en sujetos sanos y bolo de saliva en los sujetos patológicos), lo cual está relacionado con el hecho de que estos músculos realizan efecto onda para deglutir el alimento desde arriba hacia abajo en la faringe. La pérdida de asimetría en las conexiones suprahioideo \leftrightarrow infrahioideo en bolos de mayor consistencia, así como la aparición de asimetría de la conexión $RIH \leftrightarrow LIH$ podrían ser un indicador de disfagia.

Tabla 22. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo saliva. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos.

		p-valores TEST 1 - SALIVA					
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		0.509	0.391	0.305	0.768	0.643
	LM	0.084		0.790	0.376	0.319	0.922
	RSH	0.811	0.148		0.106	0.039 (+)	0.966
	LSH	0.684	0.790	0.133		0.643	0.768
	RIH	0.922	0.201	0.704	0.603		0.704
	LIH	0.623	0.456	0.191	0.048 (+)	0.025 (+)	

Tabla 23. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo agua 10 mL. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos.

		p-valores TEST 1 - AGUA					
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		0.514	0.707	0.737	0.859	0.079
	LM	0.228		0.737	0.353	0.004 (+)	0.890
	RSH	0.767	0.395		0.540	0.353	0.138
	LSH	0.767	0.859	0.890		0.093	0.149
	RIH	0.737	0.086	0.594	0.333		0.395
	LIH	0.465	0.333	0.594	0.374	0.418	

Tabla 24. Resultados en p-valores del análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos para el bolo yogur 10 mL. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita. En los casos con diferencia significativa (+) si los sujetos patológicos tienen un valor mayor a los sanos y (-) si los sujetos sanos tienen un valor mayor que los patológicos.

		p-valores TEST 1 - YOGUR					
		De					
		RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH
Para	RM		0.865	0.510	0.895	0.777	0.806
	LM	0.895		0.836	0.418	0.030 (+)	0.462
	RSH	0.665	0.585		0.462	0.006 (+)	0.510
	LSH	0.283	0.955	0.376		0.004 (+)	0.486
	RIH	0.181	0.665	0.418	0.017 (+)		0.109
	LIH	0.865	0.057	0.925	0.985	0.440	

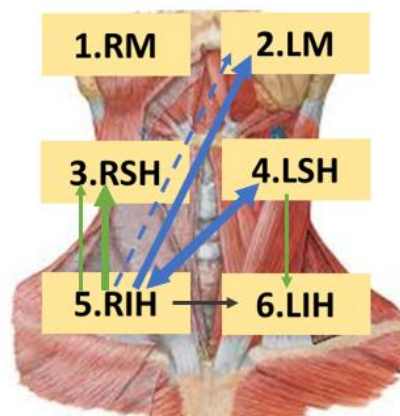


Figura 26. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. El bolo saliva se muestra con línea continua, el bolo agua con línea discontinua y el bolo yogur con línea continua de mayor grosor.

Tabla 25. Resultados en p-valores del análisis estadístico del efecto del bolo para sujetos sanos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita.

		p-valores TEST 2 - SANOS					
		De					
Para	RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH	
	RM		0.459	0.062	0.459	0.641	0.459
	LM	0.459		0.717	0.062	0.895	0.717
	RSH	0.717	0.236		0.459	0.641	0.236
	LSH	0.236	0.459	0.641		0.895	1.000
	RIH	0.121	0.717	0.097	1.000		0.062
	LIH	0.717	0.236	0.236	0.236	0.121	

Tabla 26. Resultados en p-valores del análisis estadístico del efecto del bolo para sujetos patológicos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. La dirección de interpretación de las conexiones es desde la conexión vertical (de) hacia la horizontal (para). Diferencia significativa en negrita.

		p-valores TEST 2 - PATOLÓGICOS					
		De					
Para	RM	LM	RSH	LSH	RIH	LIH	
	RM		0.761	0.060	1.000	0.178	0.060
	LM	0.307		0.913	0.441	0.020	0.529
	RSH	1.000	0.336		0.086	0.336	0.148
	LSH	0.307	0.006	0.529		0.178	0.307
	RIH	0.761	1.000	0.078	0.234		0.009
	LIH	0.695	0.086	0.307	0.038	0.761	

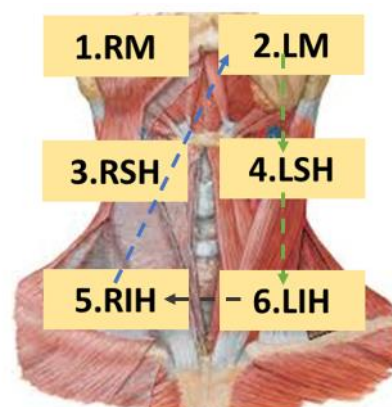


Figura 27. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. Los sujetos sanos se muestran con línea continua y los sujetos patológicos con línea discontinua.

Tabla 27. Resultados en p-valores del análisis estadístico de la direccionalidad de las conexiones musculares por pares musculares para sujetos sanos y patológicos. Se muestra en color gris las conexiones horizontales, en color verde las conexiones verticales ipsilaterales y en color azul las conexiones verticales contralaterales. Diferencia significativa en negrita.

Saliva	Sanos			Par	Patológico		
	Agua	Yogur			Saliva	Agua	Yogur
0.421	0.679	0.278	RM-LM	0.852	0.796	0.959	
0.747	0.679	0.234	RM-RSH	0.654	0.234	0.408	
0.159	1.000	0.196	RM-LSH	0.709	0.569	0.535	
0.936	0.489	0.959	RM-RIH	0.709	0.196	0.196	
0.355	0.639	0.717	RM-LIH	0.433	0.278	0.121	
0.778	0.489	0.408	LM-RSH	0.391	0.408	0.255	
0.421	0.135	0.301	LM-LSH	0.067	0.255	0.756	
0.778	0.359	0.501	LM-RIH	0.478	0.109	0.098	
0.159	0.277	0.179	LM-LIH	0.313	0.088	0.877	
0.494	0.454	0.679	RSH-LSH	0.601	0.717	0.148	
0.968	0.524	0.004	RSH-RIH	0.970	0.134	0.109	
0.936	0.762	0.535	RSH-LIH	0.117	0.352	0.408	
0.573	0.277	0.255	LSH-RIH	0.067	0.438	0.109	
0.421	0.041	0.030	LSH-LIH	0.015	0.408	0.088	
0.629	0.978	0.408	RIH-LIH	0.048	0.877	0.535	



Figura 28. Representación gráfica de las conexiones con diferencias significativas respectivas al análisis estadístico entre sujetos sanos y patológicos. Las conexiones horizontales se representan en gris, las conexiones verticales ipsilaterales se representan en verde y las conexiones verticales contralaterales se representan en azul. El bolo saliva se muestra con línea continua, el bolo agua con línea discontinua y el bolo yogur con línea continua de mayor grosor. La ilustración de la izquierda pertenece a los sujetos sanos y la de la derecha a los sujetos patológicos.



4.3. Líneas futuras de trabajo

A pesar de que los resultados encontrados en el presente trabajo podrían utilizarse para la detección precoz de la disfagia, el presente trabajo no está exento de limitaciones. Primero, la base de datos utilizada en este trabajo tiene un tamaño muestral muy limitado, por lo que la potencia estadística es limitada. En este respecto, se ha de ampliar la base de datos para corroborar los resultados obtenidos con el proyecto actual. Además, los distintos bolos ensayados en el presente trabajo no tienen gran diferencia en cuanto a la consistencia. Se podría extender el estudio del efecto del bolo añadiendo bolos de diferentes volúmenes (más grandes y más pequeños) y diferentes consistencias en los sujetos sanos y patológicos. En este trabajo, la gran mayoría de sujetos patológicos involucrados en el estudio presentaba el problema de disfagia de origen neurológico. Se podría ampliar la base de datos incluyendo pacientes con disfagia de distintas etiologías. Con ello, se podría analizar las conectividades musculares diferenciando por etiología de enfermedad. Todo ello, con el fin de identificar nuevos biomarcadores basados en conectividades musculares para la detección precoz de la disfagia y una mejor evaluación de su progresión.

Durante el proyecto se ha utilizado el valor máximo de la causalidad de Granger para determinar la conectividad muscular durante la deglución. Se ha observado en alguna ocasión activaciones musculares no correspondientes a la secuencia esperada. Por esta razón, de manera analógica y en el desarrollo del diseño del experimento y su implementación, se podría introducir un marcador en el registro de sEMG que avisara del momento de la deglución y se quedara señalizado en la propia señal para analizar tanto la fase voluntaria como la involuntaria. Este marcador sería de gran ayuda en el análisis de la deglución.

Finalmente, en vez del uso de la causalidad de Granger condicional, se podría utilizar otras medidas para valorar la interacción muscular como la causalidad de Granger parcial ya que puede revelar interacciones subyacentes entre los elementos en presencia de entradas exógenas que la GC condicional. Otras medidas a utilizar podrían ser la entropía de transferencia, la cual también mide la conectividad efectiva y está basada en la teoría de la información o medidas de sincronización y puede utilizar en sistemas dinámicos no-lineales.



5. CONCLUSIONES

Se ha analizado la interacción muscular de 3 músculos principales involucrados en el proceso deglutorio mediante la causalidad de Granger condicional: masetero, suprahióideo e infrahióideo. Se ha encontrado un alto grado de sincronización entre las conexiones horizontales tanto en sanos como en patológicos. A diferencia de las débiles conexiones verticales contralaterales, se ha determinado que las conexiones verticales ipsilaterales son moderadas y probablemente corresponden al principal mecanismo que se ve alterado en los sujetos patológicos.

En comparación con los sujetos sanos, se requiere un mayor grado de coordinación entre los músculos horizontales infrahióideos para los sujetos patológicos, lo cual podría ser un mecanismo compensatorio de la pérdida significativa de la coordinación de las conexiones verticales ipsilaterales.

Respecto al análisis del efecto del bolo, los sujetos sanos tienen una mayor capacidad para adaptarse la coordinación de los distintos músculos en función de la consistencia del bolo. La pérdida o falta de habilidad para regular la coordinación muscular en función de la consistencia del bolo también podría ser un indicador de la disfagia. Asimismo, se ha observado diferencias significativas las conexiones verticales ipsilaterales izquierdas en los distintos bolos en los sujetos patológicos, lo cual no se observó en los sujetos sanos. Por tanto, la lateralización de las conexiones verticales ipsilaterales también podría ser síntomas de disfagia.

Asimismo, la pérdida de asimetría en las conexiones suprahióideo↔infrahióideo en bolos de mayor consistencia, así como la aparición de asimetría de la conexión RIH↔LIH podrían ser un indicador de disfagia.

Estos resultados allanan un nuevo camino para identificar nuevos biomarcadores basados en la conexión muscular para la detección precoz de la disfagia y una mejor evaluación de su progresión y/o una mejor evaluación del efecto las terapias rehabilitadoras.

6. REFERENCIAS

- [1] J. C. Malone y A. N. R, *Anatomy, Head and Neck, Swallowing*. StatPearls Publishing, 2020. Accedido: ago. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554405/>
- [2] K. Matsuo y J. B. Palmer, «Anatomy and physiology of feeding and swallowing: normal and abnormal», *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, vol. 19, n.º 4, pp. 691-707, vii, nov. 2008, doi: 10.1016/j.pmr.2008.06.001.
- [3] C. Tecglen, «Disfagia y espasticidad». <https://www.convives.net/2018/05/disfagia-y-espasticidad/> (accedido ago. 15, 2021).
- [4] F. Marmouset, K. Hammoudi, C. Bobillier, y S. Morinière, «Fisiología de la deglución normal», *EMC - Otorrinolaringol.*, vol. 44, n.º 3, pp. 1-12, ago. 2015, doi: 10.1016/S1632-3475(15)72752-9.
- [5] C. Ertekin *et al.*, «An electrophysiological investigation of deglutition in man», *Muscle Nerve*, vol. 18, n.º 10, pp. 1177-1186, oct. 1995, doi: 10.1002/mus.880181014.
- [6] C. Ertekin, I. Aydoğdu, y N. Yüceyar, «Piecemeal deglutition and dysphagia limit in normal subjects and in patients with swallowing disorders.», *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 61, n.º 5, pp. 491-496, nov. 1996, doi: 10.1136/jnnp.61.5.491.
- [7] Tiiz, «Deglución y salud dental, ¿sabes tragar bien?», *Clínica dental Tiiz*, mar. 12, 2021. <https://tiiz.es/deglucion-y-salud-dental-sabes-tragar-bien/> (accedido ago. 17, 2021).
- [8] J. J. Sebastián Domingo, «Disfagia. Problemas de deglución», *Farm. Prof.*, vol. 15, n.º 5, pp. 84-87, may 2001.
- [9] «Ensayos clínicos sobre Dysphagia: Tragar ejercicio desde casa - Registro de ensayos clínicos - ICH GCP». <https://ichgcp.net/es/clinical-trials-registry/NCT04698499> (accedido ago. 31, 2021).
- [10] A. J. C. Jentoft *et al.*, «Situación de la disfagia orofaríngea en España. Desde el cribado al abordaje nutricional», p. 40.
- [11] O. Ekberg, S. Hamdy, V. Woisard, A. Wuttge-Hannig, y P. Ortega, «Social and psychological burden of dysphagia: its impact on diagnosis and treatment», *Dysphagia*, vol. 17, n.º 2, pp. 139-146, 2002, doi: 10.1007/s00455-001-0113-5.
- [12] S. Westmark, D. Melgaard, L. O. Rethmeier, y L. H. Ehlers, «The cost of dysphagia in geriatric patients», *Clin. Outcomes Res. CEOR*, vol. 10, pp. 321-326, 2018, doi: 10.2147/CEOR.S165713.
- [13] D. A. Patel *et al.*, «Economic and survival burden of dysphagia among inpatients in the United States», *Dis. Esophagus Off. J. Int. Soc. Dis. Esophagus*, vol. 31, n.º 1, pp. 1-7, ene. 2018, doi: 10.1093/dote/dox131.
- [14] Fundación Europea para la Mejora de las Condiciones de Vida y de Trabajo (Dublin), *Segunda encuesta europea sobre las condiciones de trabajo = Second European survey on working conditions*. Dublin: Fundación Europea para la Mejora de las Condiciones de Vida y de Trabajo, 1997.
- [15] «Disfagia orofaríngea. Algoritmo y técnicas diagnósticas. | RAPD Online | SAPD». <https://www.sapd.es/revista/2017/40/3/03> (accedido sep. 09, 2021).
- [16] «[guia_de_diagnostico_tratamiento_nutricional_y_rehabilitador_de_la_disfagia_orofarin gea.pdf](#)». Accedido: sep. 09, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.nestlehealthscience.es/sites/default/files/2020-04/guia_de_diagnostico_tratamiento_nutricional_y_rehabilitador_de_la_disfagia_orofaring ea.pdf
- [17] «ABORDAJE GENERAL DE LA DISFAGIA | Nestlé Health Science». <https://www.nestlehealthscience.es/condiciones-medicas/envejecimiento/disfagia/vivir-con-disfagia/tratamiento-nutricional/tratamiento-de-la-disfagia> (accedido sep. 15, 2021).
- [18] A. Phinyomark, E. Campbell, y E. Scheme, «Surface Electromyography (EMG) Signal Processing, Classification, and Practical Considerations», en *Biomedical Signal Processing*,



- G. Naik, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 3-29. doi: 10.1007/978-981-13-9097-5_1.
- [19] «Electromyography - MeSH - NCBI», 2020. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/?term=%22electromyography%22%5BMeSH%20Terms%5D%20OR%20surface%20electromyography%5BText%20Word%5D&cmd=DetailsSearch> (accedido mar. 18, 2020).
- [20] S. L. Pullman, D. S. Goodin, A. I. Marquinez, S. Tabbal, y M. Rubin, «Clinical utility of surface EMG: report of the therapeutics and technology assessment subcommittee of the American Academy of Neurology», *Neurology*, vol. 55, n.º 2, pp. 171-177, jul. 2000, doi: 10.1212/wnl.55.2.171.
- [21] I. B. Martínez, J. N. Irujo, y J. R. Falces, «MODELADO DEL RECLUTAMIENTO DE LAS UNIDADES MOTORAS».
- [22] Edwin Correa, «Tipos de electrodos», 22:15:27 UTC. Accedido: ago. 31, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/skiltt/tipos-de-electrodos>
- [23] Hakw. Tam y J. G. Webster, «Minimizing Electrode Motion Artifact by Skin Abrasion», *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-24, n.º 2, pp. 134-139, mar. 1977, doi: 10.1109/TBME.1977.326117.
- [24] A. Searle y L. Kirkup, «A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes», *Physiol. Meas.*, vol. 21, n.º 2, pp. 271-283, may 2000, doi: 10.1088/0967-3334/21/2/307.
- [25] P. Laferriere, A. D. C. Chan, y E. D. Lemaire, «Surface electromyographic signals using a dry electrode», en *2010 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications*, Ottawa, ON, Canada, abr. 2010, pp. 77-80. doi: 10.1109/MEMEA.2010.5480213.
- [26] J. G. Webster y J. W. Clark, Eds., *Medical instrumentation: application and design*, 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
- [27] W. S. Marras, «Industrial electromyography (EMG)», *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 6, n.º 1, pp. 89-93, jul. 1990, doi: 10.1016/0169-8141(90)90054-6.
- [28] E. A. Clancy, E. L. Morin, y R. Merletti, «Sampling, noise-reduction and amplitude estimation issues in surface electromyography», *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-16, feb. 2002, doi: 10.1016/S1050-6411(01)00033-5.
- [29] M. Reinvee, «Applicability Of Low-Cost Electromyographs In Ergonomic Assessment.», Doctor of Philosophy in Engineering Sciences, Estonian University of Life Sciences, 2020.
- [30] M. Vaiman, «Standardization of surface electromyography utilized to evaluate patients with dysphagia», *Head Face Med.*, vol. 3, p. 26, jun. 2007, doi: 10.1186/1746-160X-3-26.
- [31] A. J. Wilbourn, «Nerve conduction studies: Types, components, abnormalities, and value in localization», *Neurol. Clin.*, vol. 20, n.º 2, pp. 305-338, may 2002, doi: 10.1016/S0733-8619(01)00003-2.
- [32] G. Harsha Raj, V. U. Aithal, y V. Guddattu, «Comparison of Pharyngoesophageal Segment Biomechanics Between Persons with Total Laryngectomy With and Without Dysphagia Using sEMG: A Multicentric Swallow Study», *Dysphagia*, vol. 35, n.º 5, pp. 843-852, oct. 2020, doi: 10.1007/s00455-020-10090-6.
- [33] «Clinical observation on acupoint massage plus Vitalstim electrical stimulation for deglutition disorder after stroke | SpringerLink». <https://link.springer.com/article/10.1007/s11726-020-1212-x> (accedido ago. 31, 2021).
- [34] P. Laura y G. Rachel, «A Systematic Review: Surface Electromyography Versus Electrical Stimulation in Post-Stroke Dysphagia Treatment», doi: 10.17615/PHFF-3D14.
- [35] A. Yüksel, C. A. Kulan, y F. Akçiçek, «The investigation of asymptomatic swallowing disorder through surface electromyography in the geriatric population», *Aging Clin. Exp. Res.*, vol. 32, n.º 8, pp. 1567-1576, ago. 2020, doi: 10.1007/s40520-019-01349-6.
- [36] T. Ozdemir Kiran, Y. Secil, S. Tarlacı, y C. Ertekin, «An EMG screening method (dysphagia limit) for evaluation of neurogenic dysphagia in childhood above 5 years old», *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.*, vol. 71, n.º 3, pp. 403-407, mar. 2007, doi: 10.1016/j.ijporl.2006.11.006.



- [37] C. Ertekin, N. Yüceyar, y I. Aydoğdu, «Clinical and electrophysiological evaluation of dysphagia in myasthenia gravis», *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 65, n.º 6, pp. 848-856, dic. 1998, doi: 10.1136/jnnp.65.6.848.
- [38] A. K. Seth, A. B. Barrett, y L. Barnett, «Granger Causality Analysis in Neuroscience and Neuroimaging», *J. Neurosci.*, vol. 35, n.º 8, pp. 3293-3297, feb. 2015, doi: 10.1523/JNEUROSCI.4399-14.2015.
- [39] L. Barnett y A. K. Seth, «The MVGC multivariate Granger causality toolbox: A new approach to Granger-causal inference», *J. Neurosci. Methods*, vol. 223, pp. 50-68, feb. 2014, doi: 10.1016/j.jneumeth.2013.10.018.
- [40] M. Kaminski, A. Brzezicka, J. Kaminski, y K. J. Blinowska, «Measures of Coupling between Neural Populations Based on Granger Causality Principle», *Front. Comput. Neurosci.*, vol. 10, p. 114, 2016, doi: 10.3389/fncom.2016.00114.
- [41] G. Deshpande, S. LaConte, G. A. James, S. Peltier, y X. Hu, «Multivariate Granger causality analysis of fMRI data», *Hum. Brain Mapp.*, vol. 30, n.º 4, pp. 1361-1373, abr. 2009, doi: 10.1002/hbm.20606.
- [42] C. Bozorgi, C. Holleufer, y K. Wendin, «Saliva Secretion and Swallowing—The Impact of Different Types of Food and Drink on Subsequent Intake», *Nutrients*, vol. 12, n.º 1, p. 256, ene. 2020, doi: 10.3390/nu12010256.
- [43] C. Ertekin y I. Aydogdu, «Neurophysiology of swallowing», *Clin. Neurophysiol.*, vol. 114, n.º 12, pp. 2226-2244, dic. 2003, doi: 10.1016/S1388-2457(03)00237-2.
- [44] «Welcome to SENIAM». <http://www.seniam.org/> (accedido ago. 09, 2021).
- [45] J. Garcia-Casado, G. Prats-Boluda, Y. Ye-Lin, S. Restrepo-Agudelo, E. Perez-Giraldo, y A. Orozco-Duque, «Evaluation of Swallowing Related Muscle Activity by Means of Concentric Ring Electrodes», *Sensors*, vol. 20, n.º 18, Art. n.º 18, ene. 2020, doi: 10.3390/s20185267.
- [46] N. Wiener, «Nonlinear Prediction and Dynamics», *Proc. Third Berkeley Symp. Math. Stat. Probab. Vol. 3 Contrib. Astron. Phys.*, pp. 247-252, ene. 1956.
- [47] C. W. J. Granger, «Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods», *Econometrica*, vol. 37, n.º 3, p. 424, ago. 1969, doi: 10.2307/1912791.
- [48] P. A. Valdes-Sosa, A. Roebroeck, J. Daunizeau, y K. Friston, «Effective connectivity: Influence, causality and biophysical modeling», *NeuroImage*, vol. 58, n.º 2, pp. 339-361, sep. 2011, doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.03.058.
- [49] W. Hesse, E. Möller, M. Arnold, y B. Schack, «The use of time-variant EEG Granger causality for inspecting directed interdependencies of neural assemblies», *J. Neurosci. Methods*, vol. 124, n.º 1, pp. 27-44, mar. 2003, doi: 10.1016/S0165-0270(02)00366-7.
- [50] K. J. Blinowska, R. Kuś, y M. Kamiński, «Granger causality and information flow in multivariate processes», *Phys. Rev. E*, vol. 70, n.º 5, p. 050902, nov. 2004, doi: 10.1103/PhysRevE.70.050902.
- [51] D. Marinazzo, W. Liao, H. Chen, y S. Stramaglia, «Nonlinear connectivity by Granger causality», *NeuroImage*, vol. 58, n.º 2, pp. 330-338, sep. 2011, doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.01.099.
- [52] A. Seth, «Granger causality», *Scholarpedia*, vol. 2, n.º 7, p. 1667, 2007, doi: 10.4249/scholarpedia.1667.
- [53] «Granger Causality Test - an overview | ScienceDirect Topics». <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/granger-causality-test> (accedido ago. 11, 2021).
- [54] M. D. L. D. De La Iglesia Vayá, «Técnicas de conectividad cerebral y transferencia de información aplicado al estudio de la esquizofrenia», Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2011. doi: 10.4995/Thesis/10251/10987.
- [55] H. Akaike, «A new look at the statistical model identification», *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 19, n.º 6, pp. 716-723, dic. 1974, doi: 10.1109/TAC.1974.1100705.
- [56] G. Schwarz, «Estimating the Dimension of a Model», *Ann. Stat.*, vol. 6, n.º 2, pp. 461-464, mar. 1978, doi: 10.1214/aos/1176344136.
- [57] T. W. Anderson, *The statistical analysis of time series*. New York: Wiley, 1971.



- [58] C. Ladroue, S. Guo, K. Kendrick, y J. Feng, «Beyond Element-Wise Interactions: Identifying Complex Interactions in Biological Processes», *PloS One*, vol. 4, p. e6899, sep. 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0006899.
- [59] A. B. Barrett, L. Barnett, y A. K. Seth, «Multivariate Granger causality and generalized variance», *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.*, vol. 81, n.º 4 Pt 1, p. 041907, abr. 2010, doi: 10.1103/PhysRevE.81.041907.
- [60] J. D. Hamilton, *Time series analysis*. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1994.
- [61] J. Durbin, «The Fitting of Time-Series Models», *Rev. Inst. Int. Stat. Rev. Int. Stat. Inst.*, vol. 28, n.º 3, p. 233, 1960, doi: 10.2307/1401322.
- [62] «Prueba de suma de rango Wilcoxon - MATLAB ranksum - MathWorks España». <https://es.mathworks.com/help/stats/ranksum.html#description> (accedido sep. 02, 2021).
- [63] «Nonparametric Statistical Methods, 3rd Edition | Wiley», *Wiley.com*. <https://www.wiley.com/en-ad/Nonparametric+Statistical+Methods%2C+3rd+Edition-p-9780470387375> (accedido sep. 02, 2021).
- [64] R. V. Hogg y J. Ledolter, *Engineering statistics*. New York; London: Macmillan ; Collier Macmillan, 1987.
- [65] «Wilcoxon Signed Ranks Test - an overview | ScienceDirect Topics». <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/wilcoxon-signed-ranks-test> (accedido sep. 02, 2021).



DOCUMENTO II:

PRESUPUESTO



1. INTRODUCCIÓN AL PRESUPUESTO

El documento que se presenta a continuación es el presupuesto. En él, se expone detalladamente el desglose de sus distintas categorías, desde la división de mano de obra y maquinaria empleada total, pasando por el cuadro de precios unitarios, donde se especifica el precio de cada unidad de obra. Más adelante, se detallará el cuadro de precios descompuesto por capítulos, donde se pueden observar los capítulos que forman el presupuesto, así como las unidades y subunidades de obra que poseen, además de todos los recursos que se emplean en cada apartado. Finalmente, se expone el presupuesto de ejecución de material, que consiste en sumar el coste de todos los capítulos, el presupuesto por contrata, en el que se parte del presupuesto de ejecución de material y se le suman los gastos generales y el IVA. Asimismo, no se ha añadido porcentaje de beneficio industrial ya que, al ser un proyecto de investigación, aún no está listo para salir al mercado y todavía no está en esa fase.

También se puede observar en el presupuesto que se ha añadido el coste que tiene tanto la realización de la memoria como la búsqueda bibliográfica, ya que sin ese trabajo previo hubiese resultado imposible obtener los resultados expuestos anteriormente en el documento de memoria. Además, también se ha contabilizado el tiempo empleado en la corrección del mismo, ya que las revisiones de expertos son necesarias para presentar un proyecto de investigación.

A continuación, se presentan las partes del presupuesto con su correspondiente explicación.



2. CUADRO DE PRECIOS DE MANO DE OBRA.

El cuadro de precios de mano de obra ha sido calculado siguiendo el siguiente código. En la primera columna se numera a cada persona que ha trabajado en el proyecto, con el código MO (mano de obra), seguido del número que los ordena. La tercera columna desarrolla el puesto de la persona, seguido por el precio por hora que tiene cada uno en función de su rango. En la columna de horas se contabilizan las horas que cada una de las personas han dedicado al proyecto. Finalmente, en la última columna se multiplica el precio por hora de cada persona por el número de horas que han dedicado para obtener el precio final de cada uno de ellos. En el total de mano de obra se suma el total de cada uno de los componentes de la mano de obra.

Tabla 28. Cuadro de precios MANO DE OBRA.

Núm.	Código	Denominación de la mano de obra	Precio/hora (€/h)	Tiempo (h)	Ud.	Total (€)
1	MO.01	Ingeniera Biomédica	12.50	584.00	h	7300.00
2	MO.02	Dr. Ing. Electrónica (revisión)	20.50	57.00	h	1168.50
3	MO.03	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora (revisión)	20.50	57.00	h	1168.50
4	MO.04	Dra. Ing. Electrónica Asesora (revisión)	20.50	57.00	h	1168.50
				Coste total:		10805.50

3. CUADRO DE PRECIOS DE MAQUINARIA.

El cuadro de precios de la maquinaria incluye el ordenador y los *softwares* empleados para la realización del proyecto. La forma de presentar la tabla, igual que en el apartado anterior, consiste en numerar los recursos, asignar un código a cada uno de ellos y desarrollar su nombre completo. En cuanto al precio, a diferencia del precio por hora que se les asigna a las personas, en la maquinaria se inserta el precio de amortización del producto. Este precio se calcula en función de la siguiente fórmula:

$$Amortización = \frac{Coste (\text{€})}{tiempo de garantía (2 \cdot 1792(h))} \cdot tiempo de uso(h) \quad (12)$$

Esta fórmula se ha razonado de la siguiente manera. Para calcular la amortización de un producto, se necesita conocer el coste que tuvo inicialmente dicho producto en su compra. Ese coste se debe dividir por el tiempo de garantía que tiene el producto, que normalmente son 2 años, y para pasarlo a horas se multiplica por 1792 horas laborales que trabajan al año los ingenieros biomédicos según el convenio que entró en vigor el pasado 1 de enero de 2021. Ese dato obtenido es el precio por hora de producto, que posteriormente se multiplicará por el tiempo de uso para obtener el precio total de ese producto en función de la amortización.

De este modo se calcula la amortización del ordenador. Su precio inicial fue de 750€. Si este precio se divide por los dos años de garantía y las 1792 horas que trabaja un ingeniero biomédico al año, el resultado es de 0.21€/h, que es el dato que aparece en la cuarta columna.

Se hace una pequeña modificación de esta fórmula con los *softwares*, ya que éstos no tienen garantía y se contratan las licencias mensualmente. Así pues, se divide el coste del *software* entre las horas que tiene un año. Ese resultado es el que aparece en la columna de precios, que posteriormente es multiplicado por el tiempo de uso, reflejado en la siguiente columna llamada cantidad, que da como resultado el coste total del producto.

$$Amortización = \frac{Coste (\text{€})}{horas que tiene un mes (720(h))} \cdot tiempo de uso(h) \quad (13)$$

Así pues, la licencia de Matlab para estudiantes cuesta 69€/mes. Si ese precio se divide por 720 horas que tiene un mes, el resultado final es de 0.095€/h, que se redondea a 0.1€/h. Lo mismo ocurre con la licencia de Microsoft Office, que cuesta 28€/mes. Si se divide ese precio entre 720h/mes se obtiene un resultado de 0.0388€/h, que se redondea a 0.04€/h.

Tabla 29. Cuadro de precios MAQUINARIA.

Núm.	Código	Denominación de la maquinaria	Precio/hora (€/h)	Tiempo (h)	Ud.	Total (€)
1	MAQ.01	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	0.21	574.00	h	120.54
2	MAQ.03	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	0.10	148.00	h	14.80
3	MAQ.02	Licencia Microsoft Office 365 Educación	0.04	247.00	h	9.88
				Coste total:		145.22

4. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

En el siguiente apartado se muestra la descomposición de cada capítulo con su correspondiente unidad y subunidad de obra. En ella se puede conocer el nombre de cada unidad y subunidad de obra y el precio correspondiente a cada una de ellas.

Tabla 30. Cuadro de precios unitarios.

Nº Actividad	Código.	Descripción de las unidades de obra	Precio (€)
1	1.1	Musculatura implicada en la deglución QUINIENTOS REINTA EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS	530.78
	1.1.1	Anatomía de la musculatura implicada en la deglución DOSCIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS	265.39
	1.1.2	Actividad electromecánica de la musculatura implicada en la deglución DOSCIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS	265.39
	1.2	Disfagia CUATROCIENTOS TREINTA Y SIETE EUROS CON OCHO CÉNTIMOS	437.08
	1.2.1	Descripción general de la disfagia CIENTO TREINTA Y NUEVE EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS	139.39
	1.2.2	Clasificación de la disfagia y síntomas NOVENTA Y NUEVE EUROS CON VEINTITRÉS CÉNTIMOS	99.23
	1.2.3	Patologías relacionadas con la disfagia NOVENTA Y NUEVE EUROS CON VEINTITRÉS CÉNTIMOS	99.23
	1.2.4	Diagnóstico y tratamiento de la disfagia NOVENTA Y NUEVE EUROS CON VEINTITRÉS CÉNTIMOS	99.23
	1.3	Electromiografía de superficie (sEMG) QUINIENTOS SETENTA EUROS CON NOVENTA Y CUATRO CÉNTIMOS	570.94
	1.3.1	Consideraciones generales de la sEMG	265.39

		DOSCIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
	1.3.2	Casos de uso de sEMG en deglución TRESCIENTOS CINCO EUROS CON CINCUENTA Y CINCO CÉNTIMOS	305.55
	1.3.3	Estado del Arte de la causalidad de Granger en sEMG SEISCIENTOS SESENTA Y TRES EUROS CON TRENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	663.39
2	2.1	Justificación y objetivos CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON SEIS CÉNTIMOS	59.06
3	3.1	Composición de la base de datos MIL DOSCIENTOS OCHENTA Y NUEVE EUROS CON OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS	1289.82
	3.2	Causalidad de Granger DOS MIL NOVECIENTOS SETENTA Y DOS EUROS CON NOVENTA CÉNTIMOS	2972.90
	3.2.1	Descripción general de la causalidad de Granger DOSCIENTOS NOVENTA EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS	290.85
	3.2.2	Modelo Autorregresivo CIENTO NOVENTA Y DOS EUROS CON SETENTA Y TRES CÉNTIMOS	192.73
	3.2.3	Orden del modelo CUATROCIENTOS TREINTA Y UN EUROS CON DIECISIETE CÉNTIMOS	431.17
	3.2.4	Causalidad de Granger (no condicionada) en el dominio temporal CUATROCIENTOS NOVENTA Y SIETE EUROS CON OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS	497.86
	3.2.5	Causalidad de Granger condicionada en el dominio temporal DOSCIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS	265.05
	3.2.6	Requisitos para el cálculo de la causalidad de Granger	165.87

		CIENTO SESENTA Y CINCO EUROS CON OCHENTA Y SIETE CÉNTIMOS	
	3.2.7	Cálculo de la causalidad de Granger en MVGC QUINIENTOS NOVENTA Y OCHO EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS	598.68
	3.2.8	Parámetros establecidos para el cálculo de la causalidad de Granger QUINIENTOS TREINTA EUROS CON SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	530.69
	3.3	Análisis de los resultados de la causalidad de Granger DOS MIL DOSCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS CON NOVENTA Y UN CÉNTIMOS	2242.91
	3.4	Análisis estadístico de los datos MIL CIENTO OCHENTA Y SIETE EUROS CON SESENTA Y SEIS CÉNTIMOS	1187.66
Nº Actividad	Código.	Descripción de las unidades de obra	Precio (€)
	4.1	Selección de ventana móvil MIL QUINIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS	1556.84
	4.2	Evaluación de las conexiones de pares musculares TRES MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y DOS EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS	3652.68
	4.2.1	Conexiones horizontales MIL CUARENTA Y SIETE EUROS CON NOVENTA Y CINCO CÉNTIMOS	1047.95
	4.2.2	Conexión vertical ipsilateral masetero-suprahioideo MIL CIENTO CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS	1159.88
	4.2.3	Conexión vertical ipsilateral suprahioideo-infracioideo	1444.85



		MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y CUATRO EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS	
	4.3	Líneas futuras de trabajo CUATROCIENTOS SESENTA Y UN EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS	461.27
5	5.1	Conclusiones CIENTO DIECIOCHO EUROS CON CUATRO CÉNTIMOS	118.04

5. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

La siguiente tabla refleja el cuadro de precios descompuestos. En ella se puede observar la descomposición por capítulos con cada una de las unidades de obra que se engloban dentro de cada capítulo. En cada unidad de obra se encuentran reflejadas tanto la mano de obra como la maquinaria necesaria para la realización de cada apartado. Además, también se observan las subunidades de obra en las que se divide cada unidad dentro de su capítulo correspondiente.

Asimismo, destacar que se le ha añadido al final de cada unidad y subunidad de obra un 5% de gastos indirectos. Ese porcentaje se aplica al final sobre el precio total y se suma para obtener el coste final de cada apartado.

Tabla 31. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 1 del presente proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 1. Introducción					
1.1	Ud.	Musculatura implicada en la deglución			
1.1.1	Ud.	Anatomía de la musculatura implicada en la deglución			
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	15	12.50	187.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1.5	20.50	30.75
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	15	0.21	3.15
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	252.75	12.64
			Coste total (€)		265.39
1.1.2	Ud.	Actividad electromecánica de la musculatura implicada en la deglución	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	15	12.50	187.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1	20.50	20.50



MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	15	0.21	3.15
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	252.75	12.64
			Coste total (€)		265.39
1.2	Ud.	Disfagia	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
1.2.1	Ud.	Descripción general de la disfagia	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	8	12.50	100.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	8	0.21	1.68
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	8	0.04	0.32
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	132.75	6.64
			Coste total (€)		139.39
1.2.2	Ud.	Clasificación de la disfagia y síntomas	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	5	12.50	62.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25

MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	5	0.21	1.05
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	5	0.04	0.20
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	94.50	4.73
			Coste total (€)		99.23
1.2.3	Ud.	Patologías relacionadas con la disfagia	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	5	12.50	62.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	5	0.21	1.05
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	5	0.04	0.20
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	94.50	4.73
			Coste total (€)		99.23
1.2.4	Ud.	Diagnóstico y tratamiento de la disfagia	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	5	12.50	62.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	5	0.21	1.05



MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	5	0.04	0.20
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	94.50	4.73
			Coste total (€)		99.23
1.3	Ud.	Electromiografía de superficie (sEMG)	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
1.3.1	Ud.	Consideraciones generales de la sEMG	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	15	12.50	187.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1	20.50	20.50
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	15	0.21	3.15
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	252.75	12.64
			Coste total (€)		265.39
1.3.2	Ud.	Casos de uso de sEMG en deglución	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	18	12.50	255.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1	20.50	20.50
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	18	0.21	3.78
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	18	0.04	0.72

%AUX.01	%	Costes indirectos	5	291.00	14.55
			Coste total (€)		305.55
1.3.3	Ud.	Estado del Arte de la causalidad de Granger en sEMG	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	40	12.50	500.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	2	20.50	41.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	2	20.50	41.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	2	20.50	41.00
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	40	0.21	8.40
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	10	0.04	0.40
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	631.80	31.59
			Coste total (€)		663.39

Tabla 32. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 2 del presente proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 2. Justificación y objetivos					
2.1	Ud.	Justificación y objetivos			
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	2	12.50	25.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	2	0.21	0.42



MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	2	0.04	0.08
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	56.25	2.81
			Coste total (€)		59.06

Tabla 33. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 3 del presente proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 3. Materiales y métodos					
3.1	Ud.	Composición de la base de datos			
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	65	12.50	812.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	6.5	20.50	133.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	6.5	20.50	133.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	6.5	20.50	133.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	65	0.21	13.65
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	25	0.04	1.00
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	15	0.1	1.50
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	1228.40	61.42
			Coste total (€)		1289.82
3.2	Ud.	Causalidad de Granger	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
3.2.1	Ud.	Descripción general de la causalidad de Granger	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	20	12.50	250.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	20	0.21	4.20
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	5	0.04	0.20



%AUX.01	%	Costes indirectos	5	285.15	5.70
			Coste total (€)		290.85
3.2.2	Ud.	Modelo autorregresivo	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	12	12.50	150.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	12	0.21	2.52
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	7	0.04	0.28
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	183.55	9.18
			Coste total (€)		192.73
3.2.3	Ud.	Orden del modelo	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	25	12.50	312.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1.5	20.50	30.75
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1.5	20.50	30.75
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1.5	20.50	30.75
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	25	0.21	5.25
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	16	0.04	0.64
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	410.64	20.53
			Coste total (€)		431.17



3.2.4 Ud. Causalidad de Granger (no condicionada) en el dominio temporal			Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	30	12.50	375.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1.5	20.50	30.75
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1.5	20.50	30.75
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1.5	20.50	30.75
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	30	0.21	6.30
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	474.15	23.71
			Coste total (€)		497.86
3.2.5 Ud. Causalidad de Granger condicionada en el dominio temporal			Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	15	12.50	187.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1	20.50	20.50
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	15	0.21	3.15
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	7	0.04	0.28
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	252.43	12.62
			Coste total (€)		265.05
3.2.6 Ud. Requisitos para el cálculo de la causalidad de Granger			Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	10	12.50	125.00



MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	0.5	20.50	10.25
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	0.5	20.50	10.25
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	10	0.21	2.10
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	3	0.04	0.12
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	157.97	7.90
			Coste total (€)		165.87
3.2.7	Ud.	Cálculo de la causalidad de Granger en MVGC	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	35	12.50	437.50
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	2	20.50	41.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	2	20.50	41.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	2	20.50	41.00
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	35	0.21	7.35
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	8	0.04	0.32
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	20	0.10	2.00
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	570.17	28.51
			Coste total (€)		598.68
3.2.8	Ud.	Parámetros establecidos para el cálculo de la causalidad de Granger	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	30	12.50	375.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	2	20.50	41.00



MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	2	20.50	41.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	2	20.50	41.00
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	30	0.21	6.30
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	8	0.04	0.32
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	8	0.10	0.80
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	505.42	25.27
			Coste total (€)		530.69
3.3	Ud.	Análisis de los resultados de la causalidad de Granger	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	100	12.50	1250.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	14	20.50	287.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	14	20.50	287.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	14	20.50	287.00
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	90	0.21	18.90
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	30	0.04	1.20
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	50	0.10	5
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	2136.10	106.81
			Coste total (€)		2242.91
3.4	Ud.	Análisis estadístico de los datos	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	50	12.50	625.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	8	20.50	164.00



MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	8	20.50	164.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	8	20.50	164.00
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	50	0.21	10.50
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	30	0.10	3.00
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	1131.10	56.56
			Coste total (€)		1187.66

Tabla 34. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 4 del presente proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 4. Resultados y discusión					
4.1	Ud.	Selección de ventana móvil	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	60	12.50	750.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	10	20.50	205.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	20	20.50	410.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	5	20.50	102.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	60	0.21	12.60
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	40	0.04	1.60
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	10	0.10	1.00
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	1482.70	74.14
			Coste total (€)		1556.84
4.2	Ud.	Evaluación de las conexiones de pares musculares	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
4.2.1	Ud.	Conexiones horizontales	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	50	12.50	625.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	8	20.50	164.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	8	20.50	164.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1.5	20.50	30.75
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	50	0.21	10.50
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	20	0.04	0.8



MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	30	0.10	3
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	998.05	49.90
			Coste total (€)		1047.95
4.2.2	Ud.	Conexión vertical ipsilateral masetero-suprahioideo	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	60	12.50	750.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	8	20.50	164.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	8	20.50	164.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	0.5	20.50	10.25
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	60	0.21	12.60
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	20	0.04	0.80
MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	30	0.10	3
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	1104.65	55.23
			Coste total (€)		1159.88
4.2.3	Ud.	Conexión vertical ipsilateral suprahioideo-infrahioideo	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	70	12.50	875.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	10	20.50	205.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	10	20.50	205.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	3.5	20.50	71.75
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	70	0.21	14.70
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	40	0.04	1.60

MAQ.03	h	Licencia Matlab R2021a (paquete Student)	30	0.10	3
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	1376.05	68.80
			Coste total (€)		1444.85
4.4	Ud.	Líneas futuras de trabajo	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	20	12.50	250.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	4	20.50	82.00
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	4	20.50	82.00
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50
MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	20	0.21	4.20
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	15	0.04	0.60
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	439.30	21.97
			Coste total (€)		461.27

Tabla 35. Cuadro de precios descompuestos del capítulo 5 del presente proyecto.

Código	Ud.	Descripción	Rto.	Precio (€)	Importe (€)
CAPÍTULO 5. Conclusiones					
5.1	Ud.	Conclusiones			
MO.01	h	Ingeniera Biomédica	4	12.50	50.00
MO.02	h	Dr. Ing. Electrónica	1	20.50	20.50
MO.03	h	Dra. Ing. Electrónica Co-tutora	1	20.50	20.50
MO.04	h	Dra. Ing. Electrónica Asesora	1	20.50	20.50



MAQ.01	h	Ordenador HP Pavilion Notebook PC 15-au005ns	4	0.21	0.84
MAQ.02	h	Licencia Microsoft Office 365 Educación	2	0.04	0.08
%AUX.01	%	Costes indirectos	5	112.42	5.62
			Coste total (€)		118.04

6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL Y POR CONTRATA

Finalmente, se presenta el presupuesto de ejecución de material y el presupuesto por contrata. El presupuesto de ejecución de material consiste en sumar el importe de cada uno de los capítulos que forman el presupuesto. Una vez calculado el presupuesto de ejecución de material, se calcula el presupuesto por contrata añadiéndole al cálculo un 16% de gastos generales y el correspondiente 21% del IVA. Una vez realizados estos cálculos, se obtiene el presupuesto final necesario para llevar a cabo el proyecto expuesto en el documento de Memoria.

Tabla 36. Presupuesto genérico del presente proyecto (I).

	Importe (€)
Capítulo 1. Introducción	2202.19
Capítulo 2. Justificación y objetivos	59.06
Capítulo 3. Materiales y métodos	7693.29
Capítulo 4. Resultados y discusión	5670.79
Capítulo 5. Conclusiones	118.04
Presupuesto de ejecución material	15743.37

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresa cantidad de QUINCE MIL SETECIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS.



Tabla 37. Presupuesto genérico del presente proyecto (II).

16% de gastos generales	2518.94
0% de beneficio industrial	0.00
Suma	18262.31
21% IVA	3835.08
Presupuesto de ejecución por contrata	22097.39

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata a la expresada cantidad de VEINTIDOS MIL NOVENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS.