Revista Chilena de Fonoaudiología 24(1), 1-14, 2025
https://revfono.uchile.cl/
ISSN 0719-4692

Artículo Original

Modelo de integración entre variables clínicas y bioseñales de deglución computacional en disfagia orofaríngea neurogénica

Juan Suárez-Escudero [a, b, *], Jorge Sánchez-Múnera [c], José Bareño-Silva [d], Andrés Orozco-Duque [e, f] y Zulma Rueda-Vallejo [g]

[a] *Escuela de Ciencias de la Salud, Facultad de Medicina, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.*
[b] *Facultad de Psicología, Universidad CES, Colombia.*
[c] *Departamento de Neurología, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Colombia.*
[d] *Facultad de Medicina, Universidad CES, Colombia.*
[e] *Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Colombia.*
[f] *Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia.*
[g] *Department of Medical Microbiology and Infectious Diseases, Rady Faculty of Health Sciences, Universidad de Manitoba, Canadá.*

RESUMEN

En la disfagia orofaríngea neurogénica (DON) existen variables clínicas y bioseñales potencialmente identificables durante su evaluación, tamizaje y caracterización diagnóstica. Este estudio desarrolló un modelo para diferenciar personas sanas de pacientes con DON mediante la integración de variables clínicas con características extraídas de señales de electromiografía de superficie (sEMG), acelerometría laríngea (AC) y voz, registradas antes y después de la deglución de distintas consistencias y volúmenes. Se diseñó un estudio de casos y controles que incluyó 80 personas sanas y 86 con diagnóstico de DON. Se recolectaron 158 variables clínicas y 5.080 variables derivadas de señales no invasivas asociadas a la deglución. Tras una reducción de variables, los datos fueron integrados mediante modelos de regresión logística. Se identificaron 88 variables clínicas con diferencias estadísticamente significativas, junto con 36 variables latentes de sEMG, 72 combinadas de sEMG y AC laríngea, y 61 de señales de voz. El modelo final integró cinco variables clínicas y cuatro características de las bioseñales: dos antecedentes, tres hallazgos al examen físico, una característica de sEMG en la región infrahioidea al deglutir agua, una característica de AC laríngea en el eje medio-lateral al deglutir yogur, y dos cambios en subcaracterísticas de la voz observados en articulación continua y en la fonación de la vocal "a". Estas variables explican el 90,6% del fenómeno de ser paciente con DON. La integración de metodologías de deglución computacional con variables clínicas podría mejorar el tamizaje y complementar las pruebas de referencia en disfagia orofaríngea.

Palabras clave:
Deglución; Trastornos de Deglución; Enfermedades del Sistema Nervioso; Enfermedades Neuromusculares; Procesamiento de Señales Asistido por Computador

Integration Model of Clinical Variables and Computational Swallowing Biosignals in Neurogenic Oropharyngeal Dysphagia

ABSTRACT

Clinical variables and biosignals can potentially be identified during the assessment, screening, and diagnostic characterization of neurogenic oropharyngeal dysphagia (NOD). This study aimed to develop an integration model to distinguish healthy individuals from patients with NOD by combining clinical variables with features extracted from surface electromyography (sEMG), laryngeal accelerometry (LA), and voice signals. These signals were recorded before and after swallowing different consistencies and volumes. A case-control study was conducted, including 80 healthy individuals and 86 patients diagnosed with NOD, and 158 clinical variables and 5,080 non-invasive swallowing-related signal features were collected. After dimensionality reduction, the data were integrated using logistic regression models. Statistically significant differences were found in 88 clinical variables, 36 latent variables from sEMG, 72 combined features from sEMG and LA, and 61 from voice signals. The final model included five clinical and four biosignal variables: two background variables, three findings from the physical examination, one sEMG feature from the infrahyoid region during water swallowing, one LA feature in the mediolateral axis during yogurt swallowing, and two voice subfeatures reflecting changes observed during continuous articulation and sustained phonation of the vowel "a." Together, these variables explained 90.6% of the variance in classifying individuals as NOD patients. The integration of computational swallowing methodologies using non-invasive signal processing with clinical variables may enhance screening and supplement gold-standard diagnostic tools in oropharyngeal dysphagia.

Keywords:
Swallowing; Swallowing disorders; Nervous System Diseases; Neuromuscular Diseases; Computer-Assisted Signal Processing

*Autor/a correspondiente: Juan Camilo Suárez Escudero
Email: juanca.suarez@upb.edu.co

Recibido: 04-01-2024
Aceptado: 17-01-2025
Publicado: 21-04-2025

INTRODUCCIÓN

La disfagia es un trastorno de la deglución (Sejdic et al., 2019), que ocurre ante el mal funcionamiento en una o varias fases que integran el mecanismo de tragar (fase anticipatoria preoral, preparatoria oral, transporte oral, faríngea y esofágica). Este trastorno compromete la eficacia y seguridad de la deglución, así como el estado nutricional, ventilatorio y calidad de vida de las personas afectadas (McCarty & Chao, 2021). Desde el punto de vista clínico, la disfagia se clasifica clínicamente en orofaríngea (dificultad para iniciar la deglución) y esofágica (sensación de comida atrapada a lo largo del esófago) (Hurtte et al., 2023), y según su etiología, en causas estructurales, motoras y funcionales (Suárez-Escudero et al., 2022). La causas estructurales son condiciones que estrechan el lumen oral, faríngeo o esofágico; las causas motoras alteran el peristaltismo y relajación de los esfínteres esofágicos, y las causas funcionales agrupa a las entidades que deterioran la fisiología de la deglución, incluyendo el control neurológico y la coordinación neuromuscular (Suárez-Escudero et al., 2022).

Si bien la disfagia puede ser una manifestación de una enfermedad sistémica, la etiología más frecuente es neurológica (Altman et al., 2013). Una de las formas de disfagia más frecuentes es la disfagia orofaríngea neurogénica (DON) (Suárez-Escudero et al., 2022), un trastorno funcional que conlleva habitualmente a complicaciones secundarias de tipo pulmonar y nutricional (Gallegos et al., 2017). En pacientes con enfermedades neurológicas y neurodegenerativas la disfagia orofaríngea está presente entre el 30% al 82% (Terré-Boliart et al., 2004). En cuanto a su severidad, puede variar desde formas leves hasta cuadros severos (Ciucci et al., 2019).

La disfagia es un cuadro heterogéneo y complejo que constituye un síndrome multietiológico con diversos patrones fenotípicos, dependiendo de la enfermedad neurológica de base (Warnecke et al., 2021), especialmente en el caso de la DON. Generalmente, la disfagia se asocia a una serie de síntomas y signos que pueden ser identificados a través de instrumentos y evaluaciones clínicas formales diseñados para el tamizaje o la aproximación diagnóstica, como el Eating Assessment Tool-10 (EAT-10) (Zhang et al., 2023) y la evaluación clínica de la deglución (ECD) (Cook, 2008; O'Horo et al., 2015). Estas herramientas permiten clasificar la disfagia desde el punto de vista clínico (oro faríngea o esofágica) e identificar su posible etiología. Sin embargo, dichas herramientas presentan limitaciones para caracterizar de forma detallada y precisa la presencia o ausencia de tipologías específicas, como es el caso de la DON.

Además de las características clínicas, como los síntomas y signos identificables a través de la historia clínica y el examen físico, los pacientes con DON generan bioseñales que pueden ser registradas y analizadas mediante sensores durante la deglución de diferentes consistencias y volúmenes. Estas bioseñales tienen un gran potencial clínico y pueden ser capturadas utilizando diversas tecnologías. Entre ellas, destaca la electromiografía de superficie (sEMG), que emplea múltiples electrodos aplicados en la región del cuello para evaluar la actividad muscular durante la deglución, tanto en individuos sanos como en pacientes con disfagia. Esta técnica ha sido validada en diversos estudios (Hsu et al., 2013; Koyama et al., 2021; Vaiman et al., 2009). Otra tecnología relevante es la acelerometría laríngea (AC), que permite rastrear el movimiento del hioides y detectar disfagia a través de sensores aplicados externamente (Mao et al., 2019; Zoratto et al., 2010).

Adicionalmente, se ha empleado el análisis de la calidad de la voz para evaluar cambios asociados a la disfagia (Waito et al., 2011). Los sets de pruebas fonéticas (donde también se incluye la evaluación de la diadococinesia en labios, lengua y mandíbula) han mostrado utilidad para predecir disfagia y detectar aspiración en pacientes de unidades de cuidados intensivos (Festic et al., 2016). Bioseñales que permiten explorar tanto las dimensiones electrofisiológicas como las mecánicas de la deglución. Sin embargo, hasta ahora, estas técnicas se han trabajado principalmente de manera aislada, adoptando enfoques unimodales. La integración de estas herramientas bajo enfoques multimodales tiene el potencial de mejorar significativamente la caracterización e identificación de pacientes con disfagia, incluyendo aquellos con DON, al combinar múltiples fuentes de información para ofrecer una evaluación más precisa y completa (Roldan-Vasco, Orozco-Duque, et al., 2023).

Lo anteriormente expuesto pone de manifiesto la necesidad del desarrollo de nuevas propuestas para mejorar los procesos de tamización y caracterización diagnóstica. En los últimos años, se han observado avances en algoritmos de procesamiento de señales e imágenes como métodos para estudiar la deglución y apoyar el proceso diagnóstico. Este enfoque, denominado deglución computacional, se ha consolidado como un subcampo traslacional entre el campo médico, ingeniería y procesamiento de señales/imágenes (Sejdic et al., 2019).

En la actualidad existen estudios que han explorado la combinación de bioseñales en el análisis de la deglución, como la integración de mecanomiografía submentoniana, flujo nasal y acelerometría cervical biaxial (Lee et al., 2009), electromiografía y bioimpedancia (Schultheiss et al., 2014), o video fluoroscopia con auscultación cervical de alta resolución (Donohue et al.,

2021). Otro estudio que utilizando el análisis multimodal de la deglución, mediante la combinación de señales sEMG en regiones supra e infra hioideas más auscultación cervical basada en acelerometría triaxial, mostró que esta combinación mejora el rendimiento de modelos de clasificación automática para detección de disfagia (Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023). Otros estudios han combinado conjuntos de variables clínicas para predecir disfagia aguda luego de radioterapia (De Ruyck et al., 2013) y aspiración en disfagia orofaríngea (Heijnen et al., 2020). Un estudio reciente presentó un modelo basado solo en variables clínicas, accesibles por anamnesis y examen físico de la deglución, que explica en cierta parte la presencia de DON (Escudero et al., 2024).

Es plausible considerar la integración de variables clínicas y características extraídas de diversos grupos de bioseñales permitan explicar, identificar y clasificar pacientes con DON. La combinación de estos datos podría generar modelos que complementen los procesos de tamizaje y diagnóstico llevados a cabo por diferentes profesionales de la salud que trabajan con pacientes con disfagia. Sin embargo, hasta la fecha, no hay investigaciones que integren características de bioseñales obtenidas por procedimientos de deglución computacional con variables clínicas derivadas de pacientes con DON.

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo explicativo, basado en un algoritmo, capaz de diferenciar personas sanas de pacientes con DON mediante la integración de variables clínicas y características extraídas de señales de sEMG, AC laríngea y de la calidad de la voz antes/después de tragar varias consistencias y volúmenes.

MÉTODO

Se llevó a cabo un estudio de casos y controles utilizando datos de la evaluación clínica y de señales no invasivas de la deglución. El grupo control estuvo compuesto por personas sin disfagia, ni comorbilidades neurológicas o neuromusculares. Por su parte, el grupo de casos estuvo conformado por pacientes con DON.

Participantes

La estimación de la muestra se realizó con el software Epidat®, determinando un total de 76 pacientes en el grupo de casos y 76 personas en el grupo control. El cálculo se realizó utilizando una sensibilidad del 80% según lo reportado en la literatura en base a resultados a partir de la evaluación clínica de la deglución (ECD) (Cook, 2008), una potencia del 80% y un nivel de confianza del 95%. Se estimó que el nuevo algoritmo clínico incrementaría en un 15% la sensibilidad (sensibilidad esperada del 95%) al compararla con la ECD sola al mantener la potencia del 80% y un nivel de confianza del 95%.

Los participantes del grupo de casos fueron reclutados en doce consultorios particulares de profesionales en fonoaudiología y deglución, diez instituciones prestadoras de salud (IPS) con servicios en disfagia, cuatro IPS de adultos mayores y tres fundaciones de pacientes ubicadas en el valle de Aburrá y de San Nicolas en Antioquia, Colombia.

Las personas sin disfagia (grupo control) fueron reclutadas en dos centros de socialización y ocio para adultos mayores, dos instituciones universitarias, una junta de acción comunal ubicadas en el valle de Aburrá (Medellín) y entre familiares sanos de los pacientes. En la tabla 1 se detallan los criterios de elegibilidad para los casos y controles.

La evaluación del cumplimiento de los criterios de elegibilidad del grupo de casos fue realizada por una médica neuróloga con experticia clínica en DON, con apoyo de fonoaudióloga con entrenamiento en deglución y disfagia. Por su parte, la evaluación del grupo control fue realizada por un médico especialista en rehabilitación neurológica con entrenamiento en deglución y disfagia. El estudio fue realizado entre el primer semestre de 2019 al primer semestre de 2022.

Entre marzo del 2019 hasta diciembre de 2021 fueron evaluadas 288 personas, 103 (35,7%) sanas y 185 (64,3%) pacientes con disfagia orofaríngea. Muestra final de 166 personas: 80 controles y 86 casos con DON (figura 1) con ECD y aplicación de tres protocolos de bioseñales no invasivas.

El 59,3% (51/86) de los casos fueron hombres y el 53,8% (43/80) de los controles fueron mujeres. La mediana de edad en ambos grupos fue 61 años. En los casos, la etiología de la DON fue principalmente por causas neurológicas centrales (88,4%, 76/86) seguido de causas neuromusculares (11,6%, 10/86).

Tabla 1. Criterios de elegibilidad del estudio para selección de casos y controles.

Criterios de elegibilidad	Controles	Casos
Criterios de inclusión	Edad ≥18, ambos sexos; sin disfagia ni patologías neurológicas centrales, periféricas ni neuromusculares. Puntaje total en el instrumento Eating Assessment Tool <3 puntos. Ausencia de comorbilidades tipo cáncer de cabeza y cuello, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, y de procedimientos quirúrgicos en las 2/3 partes inferiores del rostro o cuello, ni utilización de toxina botulínica.	Edad ≥18, ambos sexos; presencia de disfagia orofaríngea neurogénica de al menos un mes o más de evolución. Diagnóstico de patologías neurológicas centrales o neuromusculares que en su evolución han originado disfagia orofaríngea. Puntaje total del Eating Assessment Tool ≥3 puntos (Giraldo-Cadavid et al., 2016). Síntoma de tos, de comida pegada en la garganta o sensación de atragantamiento en relación con tragar alimentos y/o cambios de la voz al tragar, dificultades para iniciar la deglución o necesidad de múltiples degluciones para tragar alimentos visualizados al examen físico.
Criterios de exclusión	Estar en procedimientos activos por endodoncia; presencia de malformaciones congénitas en cavidad oral, lengua y cuello; diagnóstico de enfermedad de Sjögren y compromiso cognitivo.	Disfagia únicamente esofágica, disfagia mecánica, de propulsión o iatrogénica; piel de región facial y/o cervical irradiada; edema o hematomas a nivel orofacial y cervical que impidan aplicación de sensores; disección quirúrgica reciente (<3 meses) en piel de cuello; hipoxemia grave (saturación de oxígeno ambiente <80%, que no responde a oxigenoterapia); implantes de estimulación cerebral profunda; demencia en fase avanzada que impida comprensión de ordenes sencillas para masticar y tragar; presentar malformaciones estructurales congénitas en cavidad oral, lengua o cuello; diagnóstico de enfermedad de Sjögren y estar en procedimientos activos por endodoncia.

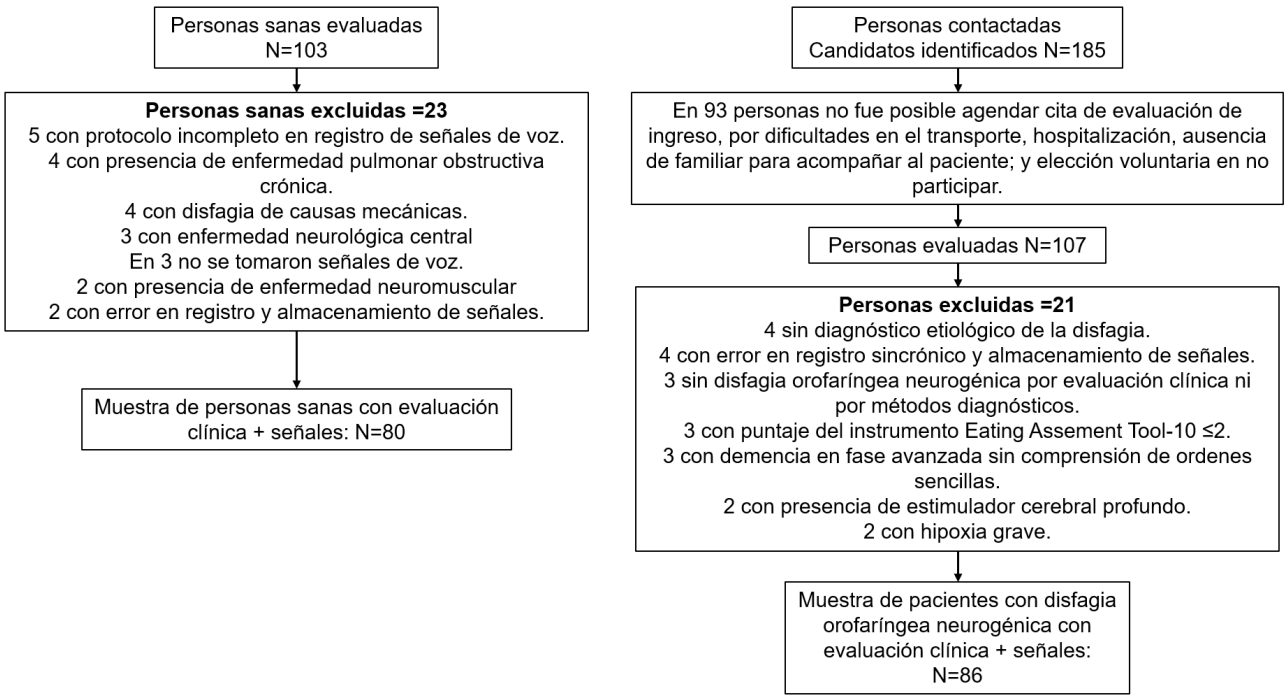

Figura 1. Flujograma del proceso de reclutamiento y selección para casos y controles.

Descripción de los instrumentos y procedimientos

Para garantizar la comparabilidad de los datos, ambos grupos fueron evaluados siguiendo un protocolo uniforme. Se utilizó el Eating Assessment Tool (EAT-10) para determinar la presencia de disfagia. Además, se implementó un protocolo de ECD destinado a recolectar variables clínicas que pudieran integrarse con las características de las señales no invasivas deglutorias en un modelo explicativo de DON. Posteriormente, se realizó el registro de dichas señales, con el objetivo de identificar biomarcadores que permitieran caracterizar, analizar la función deglutoria e incorporarlos al modelo.

Instrumento Eating Assessment Tool (EAT-10): Este instrumento fue utilizado para la selección de la muestra. Se escogió ya que se encuentra validado en Colombia y posee una alta relación entre sensibilidad y especificidad (Giraldo-Cadavid et al., 2016). Para ello, se utilizó como punto de corte del EAT-10 un puntaje de ≥3 puntos.

Protocolo de ECD: Este protocolo incluye una anamnesis centrada en características de la deglución y los síntomas de disfagia. Además, se preguntó por consumo de medicamentos que podían modifican la deglución (e.g neurolépticos, barbitúricos, ansiolíticos, antiinflamatorios no esteroideos, relajantes musculares, anticolinérgicos y antidepresivos tricíclicos). También, se realizó un examen físico de la cavidad oral, sistema respiratorio, de pares craneanos bajos más trigémino y facial, ejecución de praxias orofaciales y auscultación pulmonar. Asimismo, se realizó una evaluación de la anatomía, funcionamiento, sensibilidad y reflejos del aparato deglutorio, enfocándose en la fase oral y faríngea (Ricci Maccarini et al., 2007). Se incluyó toma de talla, peso y saturación de oxígeno. Las variables extraídas de la ECD fueron agrupadas en: (1) características sociodemográficas y antecedentes, (2) características de la deglución, (3) síntomas de disfagia y (3) signos al examen físico.

Registro de señales no invasivas de la deglución: Este registro se realizó posterior a la ECD. Se registraron bioseñales de electromiografía de superficie (sEMG), acelerometría cervical (AC) y voz, seleccionadas por su capacidad para evaluar las dimensiones electrofisiológica, cinemática y fonatoria de la deglución.

Las señales sEMG fueron seleccionadas ya que permiten conocer aspectos de la dimensión electrofisiológica de la deglución, mediante activación neuromuscular de conjuntos musculares que hacen parte de la fase oral y faríngea (zona labial, maseterina, supra e infra hioidea) (Roldan-Vasco, Orozco-Duque, et al., 2023; Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023).

Es relevante mencionar que estas bioseñales ya habían sido validadas previamente por nuestro equipo de investigación (Roldan-Vasco et al., 2018, 2021; Roldan-Vasco, Orozco-Duque, et al., 2023; Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023). El propósito de este procedimiento fue obtener, en ambos grupos, registros de esta medidas tanto antes como después de la deglución.

Para ello se utilizaron tres protocolos de captación y registro no invasivo de bioseñales mientras se realizaban pruebas oromotoras al tragar varias consistencias de alimentos en volúmenes sub terapéuticos. Esta medida se adoptó como precaución, especialmente para los pacientes con DON.

A continuación, se presentan los tres protocolos de registro:

Protocolo 1: Se realizó registro de sEMG en cuatro grupos musculares utilizando electrodos para para captar señales de manera sincrónica. Las regiones evaluadas incluyeron: a) orbicular de los labios; b) maseterina bilateral; c) supra hioidea bilateral y d) infra hioidea bilateral (figura 2a). Para el registro, se utilizó un electromiógrafo Noraxon UltiumTM con electrodos de Plata-Cloruro de Plata (20mm de diámetro, gel incorporado y desechables), con una frecuencia de muestreo de 2 kHz y un filtro pasa banda con frecuencias de corte de 10 a 500 Hz.

Una vez realizado el montaje del Protocolo 1, se procedió a llevar a cabo un test oromotor utilizando volúmenes y consistencias específicas en la siguiente secuencia: 5 ml de yogur, pausa; 10 ml de yogur, pausa; 20 ml de yogur, pausa (yogur espeso a base de leche sin trozos de frutas); 3 gramos de galleta seca y salada, pausa; trago de saliva, pausa (evaluando previamente el riesgo de eventos adversos antes de administrar agua); 5 ml de agua, pausa; 10 ml de agua, pausa; y finalmente 20 ml de agua.

Esta secuencia se basa en el protocolo de Sampaio et al. (2014), con ajustes en los volúmenes (reducidos de 50 ml a 35 ml) como medida de seguridad para los pacientes. Este protocolo ajustado ha sido previamente validado y utilizado por nuestro equipo de investigación en trabajos anteriores (Escudero et al., 2024; Roldan-Vasco, Orozco-Duque, et al., 2023; Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023). Se emplearon diferentes consistencias porque el proceso fisiológico de la deglución varía entre alimentos sólidos (como la galleta) y líquidos (como agua, yogur y saliva) (Matsuo & Palmer, 2008). Durante la deglución de las distintas consistencias y volúmenes, se realizó un registro digital de las señales, ya fuera de sEMG, AC o ambas.

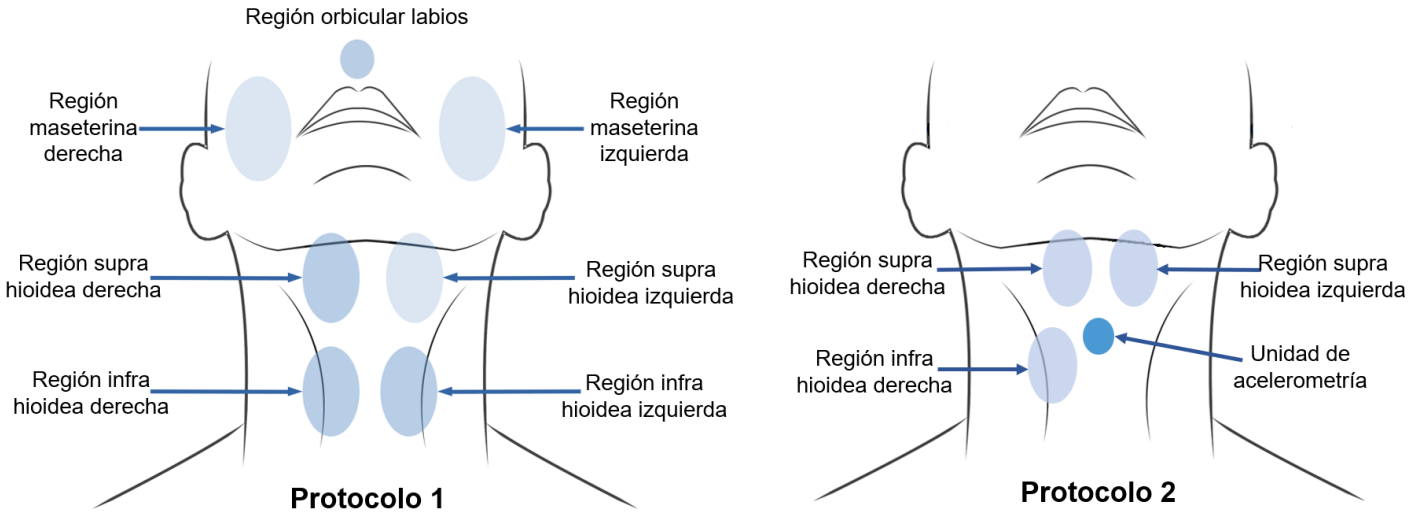

Figura 2. Montaje y ubicación de los electrodos para las señales de los protocolos 1 y 2.
2a (protocolo 1): los electrodos se posicionaron en cuatro regiones musculares: orbicular de los labios; maseterina bilateral; supra hioidea bilateral; e infra hioidea bilateral. 2b (protocolo 2): se emplearon electrodos en la región supra hioidea bilateral y en la infra hioidea derecha siguiendo las mismas referencias anatómicas descritas para el protocolo 1. Adicionalmente, se posicionó una unidad de acelerometría triaxial en la región cervical anterior, sobre la piel que cubre la laringe, utilizando como referencia el espacio entre el cartílago tiroides y cricoides.

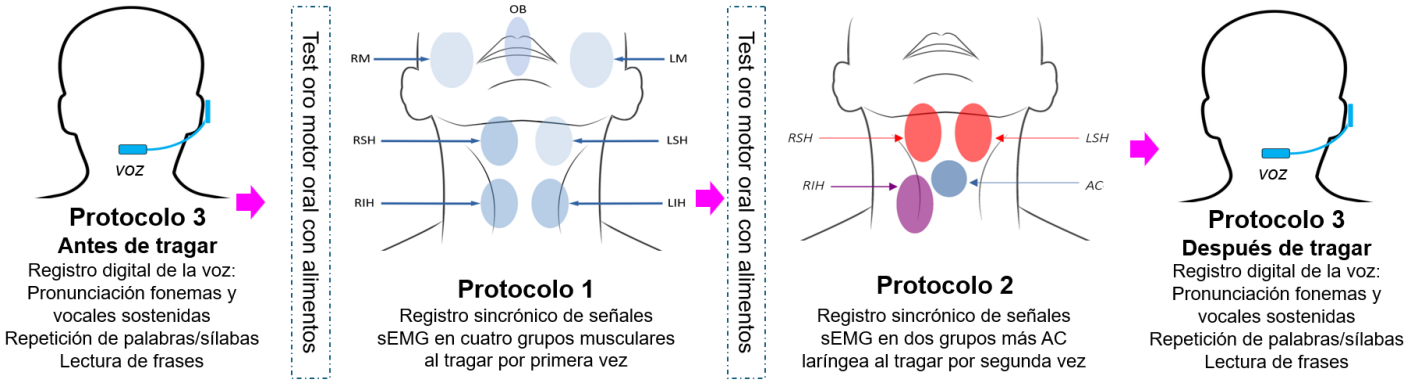

Figura 3. Secuencia de los tres protocolos empleados para registrar las señales.
OB: región orbicular de los labios. RM: región maseterina derecha. LM: región maseterina izquierda. RSH: región supra hioidea derecha. LSH: región supra hioidea izquierda. RIH: región infra hioidea derecha. LIH: región infra hioidea izquierda. AC: unidad de acelerometría laríngea.

Protocolo 2: Se llevó a cabo un registro de sEMG evaluando tres de los cuatro grupos musculares analizados en el Protocolo 1, con el objetivo de detectar activaciones neuromusculares (dimensión electrofisiológica). De manera simultánea, se realizó un registro cinemático mediante acelerometría cervical (AC), con el objetivo de identificar los desplazamientos que ocurren durante la fase faríngea de la deglución (dimensión mecánica) (Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023). Para este protocolo, se ubicaron electrodos en las regiones supra hioidea bilateral e infra hioidea derecha y una unidad de acelerometría en la región cervical anterior, alineada con la laringe (Figura 2b).

La señal de sEMG se adquirió con el mismo equipo del protocolo 1. Por su parte, la señal de AC se registró utilizando un acelerómetro análogo de tres ejes (MMA7362), diseñado para la detección de movimiento de la laringe. Este dispositivo se encontraba conectado a una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6515 DAQ, configurada con una frecuencia de muestreo de 10 KHz y un filtro pasa banda con frecuencias de corte de 0,1 y 3 kHz. Los tres canales de AC capturaron información en las direcciones anterior-posterior (AP), superior-inferior (SI) y medial-lateral (ML).

Luego de realizado el montaje de sensores del protocolo 2, se repitió el test oromotor realizado en protocolo 1.

Protocolo 3: Este protocolo consistió en el registro digital de la voz utilizando un micrófono con diadema Logitech H390 y el software Audacity (Muse Group, 2021) . Este registro se llevó a cabo antes y después del *test* oro motor realizado en los protocolos 1 y 2. Para ello, a cada persona se le pidió pronunciar algunos fonemas, palabras y frases prediseñadas. El registro de voz permite analizar dimensiones relacionadas con el habla (como fonación, articulación prosodia), puesto que la deglución y el habla comparten estructuras anatómicas y redes neurológicas en común (Roldan-Vasco et al., 2021).

En la figura 3 se ilustra la secuencia entre los protocolos y el lugar que ocupo el test oro motor entre el registro de las señales.

Procesamiento de los datos

El análisis de las señales de sEMG y AC comenzó con la eliminación de ruido, utilizando un método previamente desarrollado y reportado por nuestro equipo de investigación (Sebastian et al., 2020). A continuación, se extrajeron las características en los dominios tiempo y frecuencia mediante el método de ventana deslizante, un procedimiento que genera un vector por función y canal de adquisición. Luego, se calculó la media, desviación estándar, asimetría, curtosis y valores mínimos y máximos por vector. Ello con el objetivo de escalar cada característica, obteniendo un dato único por cada canal y característica. El tamaño de la ventana deslizante para AC y sEMG se definió de forma experimental entre 100 ms y 250 ms, con un 50% de tamaño de paso en cada ventana. Los detalles del procesamiento de las señales fueron publicados previamente (Roldan-Vasco, Restrepo-Uribe, et al., 2023).

Para las señales de voz, se realizó un preprocesamiento que incluyó la normalización de los datos mediante el software Sound eXchange (tasa de bits a 13bps, submuestreo 8 kHz, filtrado entre 0,2 kHz y 3,4 kHz). Posteriormente, se extrajeron diferentes características asociadas con las dimensiones del habla. Para ello se utilizó Python y librería Parselmouth. Los detalles de este procesamiento ya están publicados (Flórez-Gómez et al., 2022).

Análisis de los resultados

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de las variables evaluadas en el estudio, verificando la normalidad de las variables cuantitativas mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se calcularon los odds ratio (OR) exploratorios acompañados de intervalos de confianza del 95%. Posteriormente, se realizó un análisis bivariado de variables clínicas y de las señales obtenidas en los tres protocolos.

En el caso de las variables cualitativas, se aplicaron las pruebas Chi cuadrado o test exacto de Fisher. Para las señales cuantitativas, se emplearon pruebas estadísticas específicas según su distribución: U de Mann-Whitney para variables con distribución no normal y T de Student o T de Welch para variables con distribución normal, tras verificar la homogeneidad con el test de Levene (protocolos 1 y 2). Las variables del protocolo 3 se procesaron con test de muestras pareadas mediante test de Wilcoxon (variables con distribución no normal) o test de Student (variables con distribución normal). Se seleccionaron aquellas variables con diferencias estadísticas con valor $p < 0{,}005$ como criterio de reducción.

Las variables significativas se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP) como método de reducción de datos. Para ello, se utilizó el método de rotación varimax. El número de componentes se determinó según Eigenvalue, acompañado de pruebas de esfericidad (Test de Barlett, $p < 0{,}001$) y la adecuación de la muestra se realizó mediante el test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO $\geq 0{,}800$, indicando una adecuación buena o excelente). Se seleccionaron variables latentes con correlaciones $\geq 0{,}8$ dentro de los componentes.

A continuación, se construyeron modelos de regresión logística binaria para clasificar casos (personas con DON) y controles (personas sanas). Los parámetros utilizados en la construcción de los modelos incluyeron: a) Variable dependiente: categoría de caso o control (referencia: sano), b) Covariables: variables latentes derivadas de las señales y variables clínicas cualitativas, c) Colinealidad: evaluada mediante el factor de inflación de varianza (VIF), con valores ideales entre 1 y 3, d) Ajuste del modelo: evaluado mediante el criterio de información de Akaike (AIC), e) Explicación del modelo: medido con el R^2 de Nagelkerke (R^2N); y f) Estimación de OR: acompañados de intervalos de confianza del 95%.

Se desarrollaron tres modelos independientes, uno para cada protocolo (sEMG, AC laríngea y voz), que incluyeron las variables clínicas con diferencias estadísticamente significativas (valor $p < 0{,}005$) y variables latentes reducidas de cada protocolo. Finalmente, se integraron las variables más relevantes en un modelo global diseñado para diferenciar personas sanas de aquellas con DON. El análisis estadístico se realizó usando el programa Jamovi® versión 2.2 (The Jamovi Project, 2022).

Estudio aprobado por el Comité de Ética de Investigación en Salud de la Universidad Pontificia Bolivariana (acta N°7, junio 1

de 2017), el Comité de Ética de Investigación Fundación Hospitalaria San Vicente Paúl (acta N°35-2018, diciembre 21 de 2018) y el Comité de Ética en Investigación de la Clínica Somer (acta N°01-2019, febrero 8 de 2019). Todos los participantes firmaron consentimiento informado.

RESULTADOS

Se obtuvieron cuatro grandes conjuntos de variables para ambos grupos: 158 variables clínicas derivadas de la ECD (agrupadas en 25 características sociodemográficas y antecedentes, 38 características de la deglución y síntomas de disfagia, 48 signos al examen físico, y 47 hallazgos clínicos del test oro motor con consistencias y volúmenes), 2464 variables cuantitativas del protocolo 1 (once características extraídas de las señales de sEMG en cada grupo muscular, y por consistencia y volumen), 1491 variables cuantitativas del protocolo 2 (ocho características extraídas de las señales sEMG y dos de AC) y 1125 variables pareadas del protocolo 3 (cinco características agrupadas en 19 sub características de la voz antes y después de tragar consistencias y volúmenes).

Al comparar casos y controles, entre las 158 variables clínicas evaluadas, 88 variables (55,7%) tuvieron valor p <0,005, y conformaron el conjunto de variables clínicas utilizadas en la construcción de modelos de regresión (material suplementario tabla S1). La figura 4, muestra en forma resumida el proceso de identificación, reducción y distribución de las variables clínicas obtenidas.

Al comparar las variables cuantitativas del protocolo 1 entre casos y controles, se identificó que el 39,2% (966/2464) de estas variables presentaba un valor p <0,05, indicando diferencias significativas entre los grupos. A partir de este resultado, se realizaron 44 modelos de ACP, organizados en bloques de variables según las características extraídas y los datos estadísticos. Este procedimiento permitió reducir las 966 variables significativas a 36 variables latentes, las que son representativas de las dimensiones principales de las señales sEMG. Las variables latentes de las señales sEMG del protocolo 1 y su caracterización se reportan en el material suplementario tabla S2.

Al analizar las variables cuantitativas del protocolo 2, se observó que el 53,9% (804/1491) de estas variables presentaban diferencias significativas entre casos y controles. Para deducir estas variables, se corrieron 39 modelos de ACP, organizados en bloques de variables según las características extraídas, los datos estadísticos y el tipo de sensor (sEMG o AC laríngea). Como resultado, las 804 variables significativas se redujeron a 143 variables latentes. De estas, el 50,3% (72/143) correspondieron a señales de AC, mientras que el 49,7% (71/143) señales de sEMG. Las variables latentes de AC laríngea y sEMG del protocolo 2 y su caracterización se reportan en el material suplementario tablas S3 y S4.

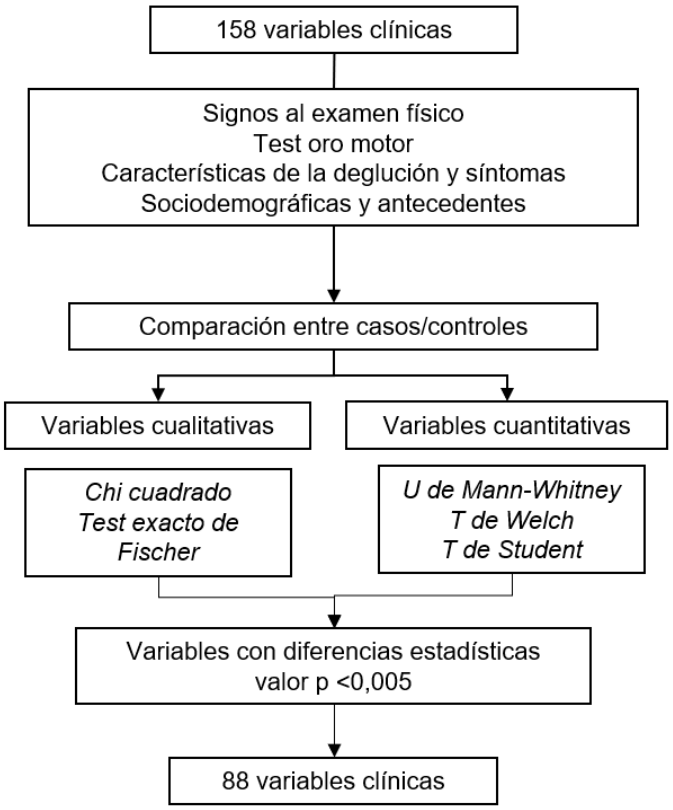

Figura 4. Número de variables clínicas para diferenciar personas con disfagia orofaríngea neurogénica de sanos.

En las variables pareadas del protocolo 3, el 12,1% (136/1125) presentaron diferencias significativas antes y después de tragar en ambos grupos. Para reducir estas variables, se realizaron 17 modelos de ACP, organizados en bloques de variables según las cinco grandes características de la voz (fonación, articulación de habla continua, articulación de vocales sostenidas, diadococinesia y prosodia), junto con sus sub-características respectivas. Este procedimiento permitió reducir las 136 variables pareadas a 61 variables latentes, distribuidas de la siguiente manera: fonación, 39,3% (24/61); articulación de habla continua, 37,7% (23/61) y articulación de vocales sostenidas, 23% (14/61). En el material

suplementario tabla S5 se reporta la caracterización de las variables latentes de la voz del protocolo 3.

La figura 5 ilustra el resumen del proceso de comparación, identificación y reducción del conjunto de variables cuantitativas obtenidas en los tres protocolos de bioseñales no invasivas del estudio.

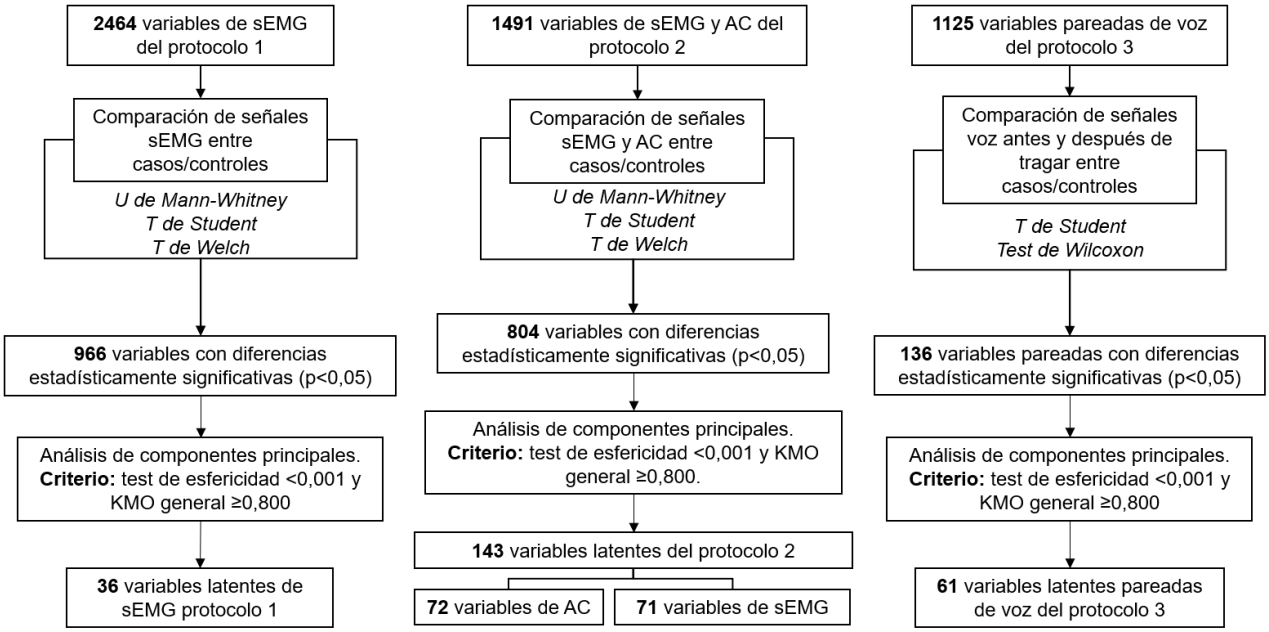

Figura 5. Síntesis de reducción de las variables obtenidas en tres protocolos de señales de electromiografía, acelerometría laríngea y voz entre personas con disfagia orofaríngea neurogénica y sanos.
sEMG: electromiografía de superficie. KMO: test de Kaiser-Meyer-Olkin. AC: acelerometría laríngea.

Las 88 variables clínicas identificadas mediante el proceso de comparación (criterio p <0,005), junto con las 36 variables latentes del protocolo 1, las 143 del protocolo 2 y las 61 del protocolo 3 (identificadas mediante el proceso de reducción por ACP), fueron incluidas en una primera fase de construcción de tres modelos de regresión logística binaria. En esta etapa, se integraron las variables clínicas con las características de las bioseñales de cada protocolo de forma independiente (figura 6).

Posteriormente, se seleccionaron las variables clínicas y de bioseñales de cada protocolo que formaron parte de los tres modelos iniciales, para integrarlas en un modelo final. Este modelo incluyó un total de nueve variables: cinco clínicas (dos relacionadas con antecedentes respiratorios, y tres provenientes del examen físico, incluyendo una variable del test oromotor con consistencia de alimento duro tipo galleta) y cuatro señales (dos de voz o protocolo 3, una de AC o protocolo 2 y una de sEMG del protocolo 1). Este modelo alcanzó un AIC de 51,7 y un R2 de Nagelkerke de 0,906, sin evidencia de colinealidad entre las variables seleccionadas (tabla 2).

El algoritmo final obtenido muestra que, de forma conjunta, las siguientes variables explican en un 90,6% la probabilidad de ser paciente con DON: presencia de comorbilidad respiratoria, antecedente de intubación mayor a una semana, alteración en la praxia orofacial llevar labios juntos a los lados, múltiples degluciones para tragar consistencia tipo galleta, cambios en el IMC, característica de cruces por cero obtenida por sEMG en la región infrahioidea izquierda al tomar 20 ml de agua, característica del detector logarítmico en el eje medio-lateral laríngeo por AC al tomar 10 ml de yogur, característica en la energía de las bandas de Bark en articulación continua de la voz antes de tragar y característica de la primera derivada en la fonación de la vocal A luego de tragar. Este modelo integra variables clínicas con bioseñales no invasivas de la deglución, logrando una alta capacidad explicativa.

Fase inicial de construcción de modelos de regresión logística entre variables clínicas y señales de cada protocolo por separado

Modelo 1: variables clínicas más variables latentes del protocolo 1

Variables clínicas	VIF	p valor
Comorbilidad respiratoria	1,14	0,07
¿intubación mayor a una semana?	1,25	0,02
¿Usted tose antes de tragar?	1,25	0,01
Pérdida de apetito actual	1,68	<0,001
Índice de masa corporal	1,27	0,02
Alteración en llevar labios a los lados	1,4	0,001
Presencia de fasciculaciones linguales	1,6	0,001
Múltiples degluciones por bolo alimenticio galleta	1,48	<0,001
Variables sEMG del protocolo 1	**VIF**	**p valor**
A20_max_ZC_LIH: valor máximo de cruces por cero al tomar 20 ml de agua en el grupo muscular infra hioideo del lado izquierdo.	1,53	0,005
A5_mean_ZC_RIH: media de cruces por cero al tomar 5 ml de agua en el grupo muscular infra hioideo del lado derecho.	1,52	0,02
A10_std_Sample_ent_LSH: desviación estándar de entropía sample al tomar 10 ml de agua en el grupo muscular infra hioideo izquierdo.	1,7	0,002
AIC	79,3	
R^2_N	0,837	

Modelo 2: variables clínicas más variables latentes del protocolo 2

Variables clínicas	VIF	p valor
¿intubación mayor a una semana?	1,31	0,04
¿Usted tose antes de tragar?	1,45	0,03
Pérdida de apetito actual	1,34	0,003
Presencia de fasciculaciones linguales	1,39	0,007
Múltiples degluciones por bolo alimenticio galleta	2,23	<0,001
Variables sEMG del protocolo 1	**VIF**	**p valor**
Y5_std_MYOP_LSH: desviación estándar en la tasa de porcentaje de myopulse al tomar 5 ml de yogur en el grupo muscular supra hioideo del lado izquierdo.	1,7	0,004
S_mean_log_SI: media del detector logarítmico al tragar saliva en el eje superior-inferior del movimiento laríngeo.	1,35	0,005
Y10_std_log_ML: desviación estándar del detector logarítmico al tragar 10 ml de yogur en el eje medio-lateral del movimiento laríngeo.	1,73	0,002
Y20_mean_DASDV_AP: media del valor de diferencia de desviación estándar absoluta al tragar 20 ml de yogur en el eje anterior-posterior del movimiento laríngeo.	1,45	0,02
AIC	74,7	
R^2_N	0,855	

Modelo 3: variables clínicas más variables latentes del protocolo 3

Variables clínicas	VIF	p valor
Comorbilidad respiratoria	1,4	0,02
¿intubación mayor a una semana?	1,48	0,009
Pérdida de apetito actual	1,28	0,02
Índice de masa corporal	1,96	0,003
Alteración en llevar labios a los lados	1,78	<0,001
Presencia de fasciculaciones linguales	1,52	0,031
Múltiples degluciones por bolo alimenticio galleta	1,6	0,003
Tos yogur	1,79	0,007
Variables de voz del protocolo 3	**VIF**	**p valor**
Arti_con_BBE_on3_std_PRE: desviación estándar en las bandas de energía de Bark al realizar articulación del habla continua antes de tragar.	2,41	<0,001
Phonation_DF0_kurt_A_POS: curtosis de la primera derivada de la frecuencia fundamental en la fonación sostenida de la vocal A luego de tragar.	1,41	0,005
AIC	63,7	
R^2_N	0,893	

Fase final: integración en un solo modelo de regresión logística de variables clínicas + variables latentes de los tres protocolos juntos

Figura 6. Síntesis de construcción inicial de tres modelos de regresión logística que incluyeron variables clínicas y de señales no invasivas de la deglución para identificar disfagia orofaríngea neurogénica.
p: p valor. VIF: factor de inflación de la varianza. AIC: información de Akaike. R2N: R2 de Nagelkerke.

Tabla 2. Modelo final de integración entre variables clínicas con señales no invasivas de la deglución para diferenciar sanos de pacientes con disfagia orofaríngea neurogénica.

Predictor	OR (IC 95%)	Valor p	VIF
Comorbilidad respiratoria	479,19 (2,29 –100075,74)	0,024	1,67
Intubación mayor a una semana	3353,64 (8,94 – 1,26 $^{e0+6}$)	0,007	1,89
Alteración en llevar labios a los lados	57,96 (2,87 – 1168,94)	0,008	1,61
Múltiples degluciones al tragar galleta	27,74 (2,74 – 280,10)	0,005	1,37
Índice de masa corporal	0,75 (0,58 – 0,98)	0,038	1,95
p1_A20_max_ZC_LIH: valor máximo de cruces por cero en la región muscular infra hioidea del lado izquierdo al tomar 20 ml de agua en el protocolo 1	1,09 (1,01 – 1,18)	0,020	2,23
p2_Y10_std_log_ML: desviación estándar del detector logarítmico en el eje medio-lateral del movimiento laríngeo al tomar 10 ml de yogur en el protocolo 2.	1,55^{e-14} (1,42 $^{e-25}$ – 0)	0,014	1,67
p3_Arti_con_BBE_on3_std_PRE: desviación estándar en la energía de las bandas de Bark en articulación continua antes de tragar consistencias en el protocolo 3.	0 (2,64^{e0-5} – 0,06)	< ,001	2,06
p3_Phonation_DF0_kurt_A_POS: curtosis de la primera derivada del pitch en la fonación de la vocal A posterior a tragar consistencias en el protocolo 3	0,91 (0,86 – 0,96)	0,003	1,87
Medidas de ajuste del modelo			
Modelo	**AIC**	**R^2_N**	
Variables clínicas más señales	51,7	0,906	

OR: odds ratio. IC 95: intervalos de confianza del 95%. VIF: factor de inflación de la varianza. e: exponente. AIC: criterio de información de Akaike. R2N: R cuadrado de Nagelkerke.

DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue desarrollar un algoritmo capaz de diferenciar a personas sin disfagia de pacientes con DON. Para ello, se construyó un modelo multimodal que integró numerosas variables clínicas y características extraídas de señales de sEMG, acelerometría laríngea y calidad de la voz, tanto antes como después de tragar varias consistencias y volúmenes de alimentos. El resultado fue un modelo original y pionero que, a partir de la integración de cinco variables clínicas más cuatro características de bioseñales obtenidas por sEMG (en cuatro grupos musculares), acelerometría laríngea y cualidades de la voz, permite discriminar personas sin disfagia de personas con DON.

Para la generación del modelo, se utilizó una regresión binaria que integraba variables clínicas y de bioseñales. Para ello, fue necesario realizar un extenso proceso de comparación y reducción de un amplio número de características clínicas y de bioseñales del grupo de casos y de controles. Este procedimiento, novedoso en el análisis multimodal de la deglución, permitió identificar aquellas variables capaces de discriminar a sujetos sin disfagia de pacientes con DON. Las características extraídas y procesadas de las señales de sEMG, AC laríngea y voz fueron cuantitativas, utilizando un método no invasivo durante el proceso de deglución de varias consistencias y volúmenes. Esto convierte este procedimiento en un ejemplo claro de las ventajas del uso de la deglución computacional (Sejdic et al., 2019).

Es importante destacar, que las variables clínicas por si solas, así como varias características de las bioseñales de sEMG, de AC laríngea y de voz antes/después de tragar, de forma individual, mostraron capacidad de clasificar pacientes con DON de personas sanas sin disfagia. Sin embargo, al identificar mediante procesos de reducción, las variables y características de mayor peso, y luego integrarlas mediante modelos de regresión logística binaria (clínicas más bioseñales), se mejora la capacidad conjunta de clasificación y explicación del fenómeno clínico llamado DON. Ello muestra que es posible desarrollar modelos que combinen información clínica y bioseñales utilizando análisis multimodal.

El modelo final muestra que las variables que mejor predicen (en un 90,6%) la presencia de DON son: dos antecedentes obtenidos en la anamnesis, tres hallazgos al examen físico, una característica de la señal sEMG en la región infrahioidea al tomar agua, una característica de la señal de AC laríngea en el eje medio-lateral al tomar yogur, y dos cambios en las sub características de la voz en

articulación continua y en la fonación de la vocal A. Este modelo final no incluyó síntomas de disfagia propiamente tal, sino que se construyó en base a la presencia de comorbilidades, antecedentes y signos al examen físico, y cuantificación objetiva de tres tipos de señales de fácil obtención en el contexto clínico. Por lo tanto, este enfoque permite la implementación fácil y práctica en el quehacer profesional.

Resulta significativo observar que, hasta la fecha, no existen trabajos similares que integren conjuntos de variables clínicas y de bioseñales utilizando regresión binaria en disfagia en general, ni en DON específicamente. En un trabajo previo, Lee y colaboradores (Lee et al., 2009), analizaron, mediante redes neuronales, información de acelerometría cervical, mecano miografía y flujo aéreo nasal, con el objetivo de segmentar el proceso de deglución. Sin embargo, en este estudio no se incluyeron variables clínicas, ni se realizó un proceso de clasificación entre personas con y sin DON. Por su parte, Chien y colaboradores (Hsu et al., 2013) presentaron un sistema para discriminar la severidad de la disfagia en 23 pacientes con miastenia grave, basado en sonidos deglutorios registrados por micrófono y registros de electromiografía. No obstante, este estudio se limitó a la deglución de agua, utilizando electrodos de sEMG solo en mentón y laringe, sin integrar al sistema variables clínicas.

Asimismo, nuestro equipo reportó previamente un modelo clínico explicativo basado en regresión logística binaria, obtenido mediante la combinación de nueve variables clínicas, con la capacidad de predecir en un 78,8% la probabilidad de ser paciente con DON (Escudero et al., 2024). Las variables incluidas en el modelo fueron: presencia de comorbilidad respiratoria, intubación mayor a una semana, tos antes de tragar, pérdida actual del apetito, cambios en el índice de masa corporal (IMC), alteración en la ejecución de la praxia orofacial llevar los labios juntos a los lados, presencia de fasciculaciones linguales, necesidad de múltiples degluciones al tragar consistencia dura y seca, y tos al tomar consistencia espesa. Este modelo comparte con el modelo presentado actualmente cinco variables: antecedentes de comorbilidad respiratoria e intubación mayor a una semana, signo al examen físico de alteración en ejecución de praxia orofacial, cambios en el IMC y múltiples degluciones al tragar consistencia dura y seca. Por lo tanto, al incorporar los bioseñales, se observó que el modelo mejoró su capacidad de explicación en un 11,8%. El presente trabajo demuestra la relevancia de incluir e integrar variables instrumentales no invasivas de rutina con información clínica y proponer nuevos avances en el complejo tema de la disfagia.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta, por primera vez, un modelo capaz de predecir en un 90,6% la presencia de DON, mediante la integración de cinco variables clínicas y cuatro bioseñales. Estos hallazgos demuestran que el uso de deglución computacional (Sejdic et al., 2019), a partir de enfoques no invasivos y cuantitativos en sEMG, AC laríngea y voz, se mejora y complementa al integrar variables clínicas obtenidas habitualmente en la práctica asistencial. A su vez, estos resultados muestran que, en términos prácticos y asistenciales, es plausible contar con modelos, flujogramas o algoritmos que mejoren la clasificación y caracterización de pacientes con DON.

A mediano plazo, se busca desarrollar otros modelos explicativos enfocados en diferenciar personas con disfagia de causas neurogénicas progresivas y no progresivas. Así como evaluar el comportamiento de las señales en el tiempo y su capacidad predictora para determinar mejoría o empeoramiento de la disfagia orofaríngea de causas funcionales.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo derivado de la investigación “Diagnóstico y seguimiento de pacientes con disfagia neuromuscular y neurogénica mediante la integración de señales no invasivas y variables clínicas” financiada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia - Minciencias (Código 121077758144 y número de contrato 825-2017. Años 2017-2021). Agradecemos a todas las personas (pacientes y sanos) que hicieron realidad este estudio.

REFERENCIAS

Altman, K. W., Richards, A., Goldberg, L., Frucht, S., & McCabe, D. J. (2013). Dysphagia in Stroke, Neurodegenerative Disease, and Advanced Dementia. *Otolaryngologic Clinics of North America*, *46*(6), 1137–1149. https://doi.org/10.1016/j.otc.2013.08.005

Ciucci, M., Hoffmeister, J., & Wheeler-Hegland, K. (2019). Management of Dysphagia in Acquired and Progressive Neurologic Conditions. *Seminars in Speech and Language*, *40*, 203–212. https://doi.org/10.1055/s-0039-1688981

Cook, I. J. (2008). Diagnostic evaluation of dysphagia. *Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology*, *5*(7), 393–403. https://doi.org/10.1038/ncpgasthep1153

De Ruyck, K., Duprez, F., Werbrouck, J., Sabbe, N., De Langhe, S., Boterberg, T., Madani, I., Thas, O., De Neve, W., & Thierens, H. (2013). A predictive model for dysphagia following IMRT for head and neck cancer: Introduction of the EMLasso technique. *Radiotherapy and Oncology*, *107*(3), 295–299. https://doi.org/10.1016/j.radonc.2013.03.021

Donohue, C., Khalifa, Y., Mao, S., Perera, S., Sejdić, E., & Coyle, J. L. (2021). Characterizing Swallows From People With Neurodegenerative Diseases Using High-Resolution Cervical Auscultation Signals and Temporal and Spatial Swallow Kinematic Measurements. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *64*(9), 3416–3431. https://doi.org/10.1044/2021_JSLHR-21-00134

Escudero, J. C. S., Franco, S. G., Sánchez, I. F., Ríos, E. G., & Moreno, L. M. (2024). Modelo basado en características clínicas para identificar pacientes con disfagia orofaríngea neurogénica. *Revista Cuidarte*, *15*(3), Article 3. https://doi.org/10.15649/cuidarte.3861

Festic, E., Soto, J. S., Pitre, L. A., Leveton, M., Ramsey, D. M., Freeman, W. D., Heckman, M. G., & Lee, A. S. (2016). Novel Bedside Phonetic Evaluation to Identify Dysphagia and Aspiration Risk. *CHEST*, *149*(3), 649–659. https://doi.org/10.1378/chest.15-0789

Flórez-Gómez, A. F., Orozco-Arroyave, J. R., & Roldán-Vasco, S. (2022). Correlación entre espacios de características acústicas del habla y trastornos clínicos de la voz en pacientes con disfagia. *TecnoLógicas*, *25*(53), Article 53. https://doi.org/10.22430/22565337.2220

Gallegos, C., Brito-de la Fuente, E., Clavé, P., Costa, A., & Assegehegn, G. (2017). Chapter Eight—Nutritional Aspects of Dysphagia Management. En F. Toldrá (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 81, pp. 271–318). Academic Press. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.11.008

Giraldo-Cadavid, L. F., Gutiérrez-Achury, A. M., Ruales-Suárez, K., Rengifo-Varona, M. L., Barros, C., Posada, A., Romero, C., & Galvis, A. M. (2016). Validation of the Spanish Version of the Eating Assessment Tool-10 (EAT-10spa) in Colombia. A Blinded Prospective Cohort Study. *Dysphagia*, *31*(3), 398–406. https://doi.org/10.1007/s00455-016-9690-1

Heijnen, B. J., Böhringer, S., & Speyer, R. (2020). Prediction of aspiration in dysphagia using logistic regression: Oral intake and self-evaluation. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, *277*(1), 197–205. https://doi.org/10.1007/s00405-019-05687-z

Hsu, C.-C., Chen, W.-H., & Chiu, H.-C. (2013). Using swallow sound and surface electromyography to determine the severity of dysphagia in patients with myasthenia gravis. *Biomedical Signal Processing and Control*, *8*(3), 237–243. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2012.10.002

Hurtte, E., Young, J., & Gyawali, C. P. (2023). Dysphagia. *Primary Care: Clinics in Office Practice*, *50*(3), 325–338. https://doi.org/10.1016/j.pop.2023.03.001

Koyama, Y., Ohmori, N., Momose, H., Kondo, E., Yamada, S., & Kurita, H. (2021). Detection of swallowing disorders using a multiple channel surface electromyography sheet: A preliminary study. *Journal of Dental Sciences*, *16*(1), 160–167. https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.06.009

Lee, J., Steele, C. M., & Chau, T. (2009). Swallow segmentation with artificial neural networks and multi-sensor fusion. *Medical Engineering & Physics*, *31*(9), 1049–1055. https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.07.001

Mao, S., Zhang, Z., Khalifa, Y., Donohue, C., Coyle, J. L., & Sejdic, E. (2019). Neck sensor-supported hyoid bone movement tracking during swallowing. *Royal Society Open Science*, *6*(7), 181982. https://doi.org/10.1098/rsos.181982

Matsuo, K., & Palmer, J. B. (2008). Anatomy and Physiology of Feeding and Swallowing: Normal and Abnormal. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, *19*(4), 691–707. https://doi.org/10.1016/j.pmr.2008.06.001

McCarty, E. B., & Chao, T. N. (2021). Dysphagia and Swallowing Disorders. *Medical Clinics of North America*, *105*(5), 939–954. https://doi.org/10.1016/j.mcna.2021.05.013

Muse Group. (2021). *Audacity* (Versión 3.2) [Software]. Muse Group & contributors. https://www.audacityteam.org/download/windows/

O'Horo, J. C., Rogus-Pulia, N., Garcia-Arguello, L., Robbins, J., & Safdar, N. (2015). Bedside diagnosis of dysphagia: A systematic review. *Journal of Hospital Medicine*, *10*(4), 256–265. https://doi.org/10.1002/jhm.2313

Ricci Maccarini, A., Filippini, A., Padovani, D., Limarzi, M., Loffredo, M., & Casolino, D. (2007). Clinical non-instrumental evaluation of dysphagia. *Acta Otorhinolaryngologica Italica*, *27*(6), 299–305. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2640056/

Roldan-Vasco, S., Orozco-Duque, A., & Orozco-Arroyave, J. R. (2023). Swallowing disorders analysis using surface EMG biomarkers and classification models. *Digital Signal Processing*, *133*, 103815. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103815

Roldan-Vasco, S., Orozco-Duque, A., Suarez-Escudero, J. C., & Orozco-Arroyave, J. R. (2021). Machine learning based analysis of speech dimensions in functional oropharyngeal dysphagia. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *208*, 106248. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106248

Roldan-Vasco, S., Restrepo-Agudelo, S., Valencia-Martinez, Y., & Orozco-Duque, A. (2018). Automatic detection of oral and pharyngeal phases in swallowing using classification algorithms and multichannel EMG. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *43*, 193–200. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.10.004

Roldan-Vasco, S., Restrepo-Uribe, J. P., Orozco-Duque, A., Suarez-Escudero, J. C., & Orozco-Arroyave, J. R. (2023). Analysis of electrophysiological and mechanical dimensions of swallowing by non-invasive biosignals. *Biomedical Signal Processing and Control*, *82*, 104533. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104533

Sampaio, M., Argolo, N., Melo, A., & Nóbrega, A. C. (2014). Wet Voice as a Sign of Penetration/Aspiration in Parkinson's Disease: Does Testing Material Matter? *Dysphagia*, *29*(5), 610–615. https://doi.org/10.1007/s00455-014-9552-7

Schultheiss, C., Schauer, T., Nahrstaedt, H., & Seidl, R. O. (2014). Automated Detection and Evaluation of Swallowing Using a Combined EMG/Bioimpedance Measurement System. *The Scientific World Journal*, *2014*(1), 405471. https://doi.org/10.1155/2014/405471

Sebastian, R.-V., Estefania, P.-G., & Andres, O.-D. (2020). Scalogram-energy based segmentation of surface electromyography signals from swallowing related muscles. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *194*, 105480. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105480

Sejdic, E., Malandraki, G. A., & Coyle, J. L. (2019). Computational Deglutition: Using Signal- and Image-Processing Methods to Understand Swallowing and Associated Disorders [Life Sciences]. *IEEE Signal Processing Magazine*, *36*(1), 138–146. IEEE Signal Processing Magazine. https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2875863

Suárez-Escudero, J. C., Porto, K. S. L., Patiño, D. P., Moreno, M. I., & Londoño, C. L. B. (2022). Disfagia orofaríngea neurogénica: Concepto, fisiopatología, clínica y terapéutica. *Archivos de Neurociencias*, *27*(4), Article 4. https://doi.org/10.31157/an.v27i4.347

Terré-Boliart, R., Orient-López, F., Guevara-Espinosa, D., Ramón-Rona, S., Bernabeu-Guitart, M., & Clavé-Civit, P. (2004). [Oropharyngeal dysphagia in patients with multiple sclerosis]. *Revista De Neurologia*, *39*(8), 707–710.

The Jamovi Project. (2022). *Jamovi* (Versión 2.2) [UNIX]. Jamovi. https://www.jamovi.org/

Vaiman, M., Shoval, G., & Gavriel, H. (2009). Malingering dysphagia and odynophagia electromyographic assessment. *American Journal of Otolaryngology*, *30*(5), 318–323. https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2008.07.002

Waito, A., Bailey, G. L., Molfenter, S. M., Zoratto, D. C., & Steele, C. M. (2011). Voice-quality Abnormalities as a Sign of Dysphagia: Validation against Acoustic and Videofluoroscopic Data. *Dysphagia*, *26*(2), 125–134. https://doi.org/10.1007/s00455-010-9282-4

Warnecke, T., Labeit, B., Schroeder, J., Reckels, A., Ahring, S., Lapa, S., Claus, I., Muhle, P., Suntrup-Krueger, S., & Dziewas, R. (2021). Neurogenic Dysphagia. *Neurology*, *96*(6), e876–e889. https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000011350

Zhang, P., Yuan, Y., Lu, D., Li, T., Zhang, H., Wang, H., & Wang, X. (2023). Diagnostic Accuracy of the Eating Assessment Tool-10 (EAT-10) in Screening Dysphagia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Dysphagia*, *38*(1), 145–158. https://doi.org/10.1007/s00455-022-10486-6

Zoratto, D. C. B., Chau, T., & Steele, C. M. (2010). Hyolaryngeal excursion as the physiological source of swallowing accelerometry signals. *Physiological Measurement*, *31*(6), 843. https://doi.org/10.1088/0967-3334/31/6/008