

Jornadas de Automática

Estudio preliminar: caracterización por ultrasonido de criogeles de PVA

Juan Sebastián Montenegro-Bravo^{a,*}, Alberto Rodríguez-Martínez^a, Juan David Romero-Ante^a, Miguel Ángel de la Casa-Lillo^a, José María Sabater-Navarro^a

^aUnidad de Investigación en Robótica Médica, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad, s/n, 03202, Elche, España.

To cite this article: Montenegro-Bravo, J.S, Rodríguez-Martínez, A, Romero-Ante, J.D, de la Casa-Lillo, MÁ, Sabater-Navarro, J.M. 2026. Preliminary study: ultrasound characterization of PVA cryogels. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13723>

Resumen

Los materiales miméticos de tejido son herramientas fundamentales para la calibración, validación y entrenamiento en técnicas de ultrasonido, al permitir reproducir condiciones experimentales controladas y comparables con tejidos biológicos. En este trabajo se fabricaron criogeles de alcohol polivinílico (PVA) con distintas concentraciones de propilenglicol, incorporado como aditivo mediante sustitución parcial del agua desmineralizada, con el objetivo de ajustar su respuesta acústica. Las muestras se obtuvieron por gelificación física mediante ciclos de congelación-descongelación y fueron caracterizadas en inmersión, a 36,5 °C, mediante transductores de ultrasonido. A partir del análisis de los tiempos de vuelo se determinó la velocidad longitudinal del sonido en cada formulación. Los resultados mostraron velocidades medias comprendidas entre 1578,5 y 1615,7 $m \cdot s^{-1}$ tras el quinto ciclo, valores compatibles con los reportados para diversos tejidos blandos. Estos hallazgos constituyen resultados preliminares para la selección de formulaciones y orientan el desarrollo de nuevas composiciones de PVA-propilenglicol con propiedades acústicas ajustables para aplicaciones biomédicas basadas en ultrasonido.

Palabras clave: PVA, propilenglicol, criogel, phantom, ultrasonido, velocidad del sonido, tejidos blandos.

Preliminary study: ultrasound characterization of PVA cryogels

Abstract

Tissue-mimicking materials are fundamental tools for calibration, validation, and training in ultrasound techniques, as they allow controlled experimental conditions comparable to biological tissues to be reproduced. In this work, polyvinyl alcohol (PVA) cryogels were fabricated with different concentrations of propylene glycol, incorporated as an additive through partial substitution of demineralized water, with the aim of adjusting their acoustic response. The samples were obtained by physical gelation through freeze-thaw cycles and were characterized in immersion, at 36.5 °C, using ultrasound transducers. From the analysis of time-of-flight measurements, the longitudinal speed of sound was determined for each formulation. The results showed mean velocities ranging from 1578.5 to 1615.7 $m \cdot s^{-1}$ after the fifth cycle, values compatible with those reported for various soft tissues. These findings constitute preliminary results for the selection of formulations and guide the development of new PVA-propylene glycol compositions with tunable acoustic properties for ultrasound-based biomedical applications.

Keywords: PVA, propylene glycol, cryogel, phantom, ultrasound, speed of sound, soft tissues.

1. Introducción

Las técnicas de imagen por ultrasonido emplean ondas acústicas de alta frecuencia para estudiar de forma no invasiva la estructura y, en algunos casos, las propiedades mecánicas de

los tejidos biológicos. Se utilizan ampliamente en diagnóstico clínico, elastografía y procedimientos guiados por imagen Kim et al. (2024). Para el desarrollo y validación de estas técnicas, los phantoms biomédicos constituyen modelos re-

*Autor para correspondencia: jmontenegro@umh.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

producibles y controlados, con geometrías, composiciones y propiedades acústicas definidas. Estos materiales permiten reducir la variabilidad experimental asociada al uso de tejidos reales o muestras *ex vivo*, las cuales presentan limitaciones como degradación, variabilidad anatómica, restricciones éticas y dificultades de conservación y manipulación.

Los materiales miméticos de tejido buscan reproducir, de forma simplificada, propiedades relevantes de los tejidos biológicos, como la velocidad del sonido, la impedancia acústica, la atenuación, la retrodispersión y la elasticidad (Culjat et al., 2010; Elvira et al., 2019). Por ello, se emplean en la calibración de equipos, validación de métodos de medida, evaluación de algoritmos y entrenamiento clínico. Además, existe un interés creciente en desarrollar materiales que simulen tanto la respuesta acústica como la mecánica del tejido, con potencial uso en elastografía, entrenamiento quirúrgico y cirugía teleoperada Gerald et al. (2023).

Entre los materiales más utilizados para la fabricación de phantoms destaca el alcohol polivinílico (PVA), un polímero sintético, hidrofílico, biocompatible y de baja toxicidad, ampliamente empleado en aplicaciones biomédicas (Liang et al., 2024; Zhong et al., 2024). Tras procesos de congelación-descongelación, los hidrogeles de PVA desarrollan enlaces físicos que generan criogeles estables, con elevada retención de agua y propiedades ajustables mediante cambios en la formulación y en los ciclos de procesamiento (Malone et al., 2020; Villa et al., 2020; Jawli et al., 2024; Sharma et al., 2023).

La caracterización acústica de estos materiales es fundamental para evaluar su potencial como materiales miméticos. La velocidad del sonido depende de parámetros como la densidad, el contenido de agua, la composición molecular y la temperatura. En Mast (2000) se recopilaron valores de velocidad del sonido en tejidos blandos humanos medidos a 37°C, reportando un intervalo aproximado entre 1450 y 1615 m·s⁻¹. Por tanto, la comparación basada únicamente en c_L debe interpretarse como una aproximación general al intervalo acústico de los tejidos blandos. La asignación a tejidos específicos requiere una caracterización más completa, incluyendo densidad, impedancia acústica, atenuación y propiedades mecánicas.

Aunque los criogeles de PVA preparados en agua pueden presentar propiedades acústicas cercanas a las de algunos tejidos blandos, no siempre reproducen adecuadamente la respuesta de un tejido determinado. Para ampliar el rango de propiedades alcanzables, se han incorporado aditivos capaces de modificar la fase líquida o la estructura interna del hidrogel. Entre ellos, el propilenglicol ha mostrado interés como modificador de la velocidad de propagación ultrasónica mediante la sustitución parcial del agua en la formulación. Otros compuestos, como celulosa, óxido de aluminio, grafito o partículas de alúmina, se han empleado principalmente para ajustar la atenuación, la absorción y la retrodispersión acústica (Elvira et al., 2019; Malone et al., 2020).

En este trabajo se estudia el efecto del propilenglicol sobre la velocidad de propagación ultrasónica en criogeles de PVA. Para ello, se fabricaron muestras con diferentes concentraciones de PVA y propilenglicol, y se caracterizaron mediante transductores de ultrasonido. El objetivo es identificar formulaciones con propiedades acústicas próximas al intervalo reportado para tejidos blandos humanos y establecer una base

experimental para el desarrollo de materiales miméticos con comportamiento acústico y mecánico ajustable, potencialmente útiles en ultrasonido, elastografía y simulación biomédica.

2. Materiales y métodos

Esta sección describe el enfoque experimental seguido para fabricar y caracterizar criogeles de alcohol polivinílico, PVA (MW 133000, 99 %, hydrolyzed) modificados con propilenglicol (MW 76.09 g·mol⁻¹) para el estudio de la velocidad de propagación ultrasónica. En primer lugar, se detallan los materiales empleados y el diseño de las formulaciones. Posteriormente, se presenta el procedimiento de preparación de las soluciones, el proceso de moldeo y gelificación física mediante ciclos de congelación-descongelación. Finalmente, se describe el montaje experimental utilizado con transductores de ultrasonido, así como el protocolo de adquisición, procesamiento de los datos.

2.1. Preparación de las soluciones de PVA

Se prepararon formulaciones con tres concentraciones de PVA (10, 12,5 y 15 % p/p, porcentaje en masa respecto a la masa total de la formulación) y cuatro concentraciones de propilenglicol (0, 5, 10 y 15 % p/p), incluyéndose la condición sin propilenglicol como control de referencia. En cada caso, el propilenglicol se incorporó mediante sustitución parcial del agua desmineralizada, manteniendo constante la masa total de la formulación. De este modo, se obtuvo una matriz experimental de doce grupos (3 × 4), diseñada para evaluar el efecto conjunto de la concentración del polímero y del aditivo sobre la velocidad del sonido.

Para la preparación de cada formulación, se pesaron las cantidades correspondientes de agua desionizada, propilenglicol y PVA. En primer lugar, el agua y el propilenglicol se mezclaron hasta obtener una fase líquida homogénea. A continuación, el PVA se incorporó de forma gradual bajo agitación continua, con el fin de evitar la formación de aglomerados y favorecer la dispersión uniforme del polímero.

La disolución se preparó calentando la mezcla hasta aproximadamente 90 °C durante 30 min bajo agitación constante, siguiendo un procedimiento adaptado de protocolos reportados para la fabricación de criogeles de PVA utilizados como materiales miméticos en imagen médica (Surry et al., 2004). Durante el calentamiento, en el minuto 25, el recipiente fue retirado temporalmente para determinar la posible pérdida de masa asociada a la evaporación. En caso de detectarse una disminución de masa, esta fue compensada mediante la adición de agua desionizada previamente calentada a aproximadamente 80 °C, evitando cambios bruscos de temperatura que pudieran alterar las condiciones de la disolución.

Una vez compensada la pérdida de masa, se reanudaron el calentamiento y la agitación durante los 5 min restantes, con el propósito de preservar la homogeneidad de la mezcla. Finalizado este periodo, se desactivó la fuente de calor y se mantuvo la agitación durante el enfriamiento hasta alcanzar una temperatura inferior a 60 °C, reduciendo así el riesgo de deformaciones térmicas en los moldes de PLA durante el vertido. Finalmente, la mezcla se depositó en moldes de caras planas y se dejó estabilizar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a ciclos de

congelación-descongelación para inducir el entrecruzamiento físico del PVA y obtener criogeles estables con propiedades ajustables (Durham et al., 2022; Mencarelli et al., 2024).

2.2. Moldeo y gelificación física

Una vez preparada la disolución, la mezcla se vertió en cinco moldes de PLA, numerados para identificar las piezas, con caras planas separadas 3,2 mm. La elección de una geometría plana responde a la necesidad de favorecer una propagación ultrasónica más estable y facilitar la estimación del tiempo de vuelo durante la caracterización. En mediciones basadas en transmisión y pulso-eco, las superficies curvas o no paralelas pueden generar reflexiones múltiples, desviaciones del haz y picos adicionales en la señal de correlación, dificultando la identificación del primer arribo de la onda. En (Busqué Nadal, 2023) se mostró que los recipientes redondos de vidrio producían correlaciones con varios picos debido a reflexiones en las paredes, por lo que se seleccionaron geometrías rectangulares de caras planas para mejorar la repetibilidad de las mediciones ultrasónicas. Además, las caras planas facilitan una incidencia más uniforme del haz ultrasónico sobre la muestra, reduciendo posibles errores asociados a la orientación durante el ensayo.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a gelificación física mediante ciclos de congelación-descongelación. Cada ciclo consistió en 20 h de congelación a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 h de descongelación a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 3 h adicionales a temperatura ambiente. Este tratamiento térmico favorece la formación de dominios cristalinos de PVA que actúan como puntos de entrecruzamiento físico, permitiendo obtener criogeles estables. La repetición de los ciclos contribuye al desarrollo progresivo de la red polimérica, modificando la estructura interna del criogel y, por tanto, sus propiedades físicas y acústicas.

2.3. Caracterización ultrasónica

La caracterización ultrasónica se realizó con el objetivo de determinar la velocidad de propagación longitudinal en las muestras de PVA-propilenglicol. Para ello, se empleó un montaje en inmersión, utilizando agua desionizada como medio de acoplamiento acústico. Las muestras se colocaron entre dos transductores enfrentados: un transductor enfocado de 5 MHz, modelo V309 de Olympus, empleado como transmisor y receptor en modo pulso-eco, y un transductor no enfocado de 5 MHz, modelo V311 de Panametrics-NDT, utilizado como receptor en transmisión. En esta configuración, el transductor transmisor emite un pulso ultrasónico hacia la muestra, una parte de la energía se refleja en sus interfaces anterior y posterior, mientras que otra parte atraviesa el material y es registrada por el transductor receptor, como se esquematiza en la Figura 1. Esta configuración permite registrar señales de transmisión y reflexión en condiciones controladas, lo que resulta adecuado para la caracterización no destructiva de materiales mediante ultrasonido (He and Zheng, 2001; Rodríguez-Martínez et al., 2018). La combinación de los modos transmisión y pulso-eco permite obtener información complementaria sobre el tiempo de propagación a través del material y sobre las reflexiones generadas en sus superficies. De este modo, se dispone de las señales necesarias para estimar tanto el espesor efectivo de cada muestra como su velocidad longitudinal del sonido.

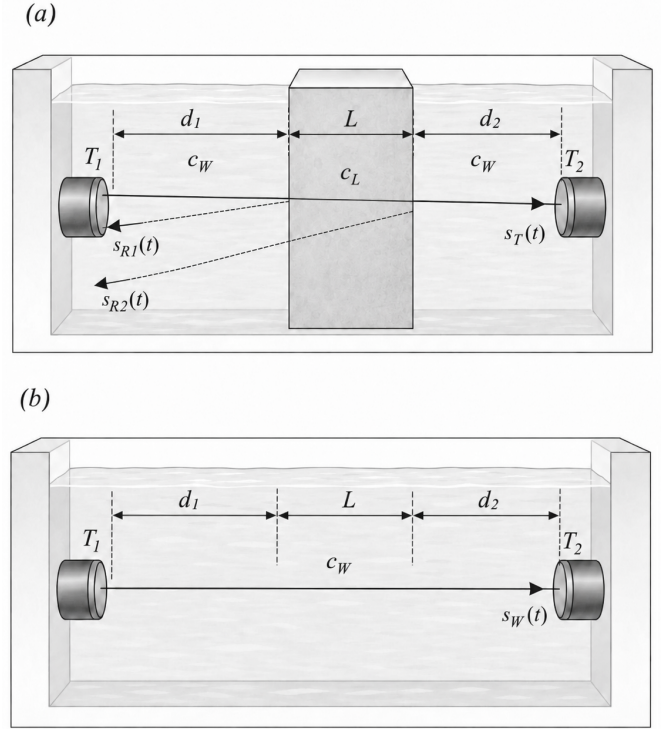


Figura 1: Ejemplos de A-scans y esquema del montaje ultrasónico en inmersión empleado para la caracterización de las muestras. (a) Configuración con muestra: el transductor T_1 emite el pulso hacia el material de espesor L . La señal genera los ecos $s_{R1}(t)$ y $s_{R2}(t)$ en las interfaces de la muestra, mientras que la señal transmitida $s_T(t)$ es recibida por T_2 . Las distancias d_1 y d_2 corresponden a las trayectorias recorridas en agua. (b) Configuración de referencia sin muestra, utilizada para registrar la señal $s_W(t)$ durante la propagación en agua. c_W y c_L representan la velocidad del sonido en agua y en la muestra, respectivamente. Esquema basado en (Rodríguez-Martínez et al., 2018).

La velocidad del sonido se calculó a partir del tiempo de vuelo (Time-of-Flight, ToF), definido como el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en propagarse entre dos puntos del sistema de medición. Durante el ensayo se adquirieron señales de referencia y señales con muestra. En primer lugar, se registró una señal de referencia en agua, denominada (Water-Path, WP), obtenida sin colocar la muestra entre los transductores. Esta señal permite conocer el tiempo de propagación del pulso únicamente a través del medio de acoplamiento. Posteriormente, se colocó la muestra entre el transductor transmisor y el transductor receptor, registrando una señal de transmisión directa, o (Through-Transmission, TT), correspondiente al pulso que atraviesa el agua y la muestra. Adicionalmente, se adquirió una señal en modo (pulso-eco, PE), en la cual el transductor transmisor también actúa como receptor, permitiendo identificar los ecos reflejados en la cara anterior y posterior de la muestra.

Dado que las muestras se miden directamente en agua, sin contenedor, y presentan caras planas aproximadamente paralelas, el espesor L y la velocidad longitudinal del sonido c_L pueden calcularse a partir de los tiempos de vuelo (ToF) de las señales ultrasónicas mediante las expresiones (1) y (2) (Rodríguez-Martínez et al., 2018):

$$L = \frac{c_W}{2} [2(t_w - t_T) + t_{R2} - t_{R1}] \quad (1)$$

$$c_L = c_W \left[\frac{2(t_w - t_T)}{t_{R2} - t_{R1}} + 1 \right] \quad (2)$$

Donde c_w es la velocidad del sonido en el agua, t_w es el tiempo de vuelo de la señal de referencia en agua, t_T es el tiempo de vuelo de la señal transmitida con la muestra colocada entre los transductores, y t_{R1} y t_{R2} corresponden a los tiempos de llegada de los ecos reflejados en la primera y segunda cara de la muestra, respectivamente. De esta manera, la señal (WP) establece una referencia temporal del sistema, la señal (TT) cuantifica el cambio de tiempo producido por la presencia del material y la señal (PE) permite estimar la separación temporal entre las reflexiones generadas en ambas caras de la muestra. La combinación de estas tres señales permite obtener la velocidad acústica sin asumir previamente el espesor real de cada muestra, aspecto relevante debido a posibles pequeñas variaciones asociadas al proceso de moldeo.

2.4. Procesamiento de señales

Las señales ultrasónicas fueron adquiridas mediante un sistema de adquisición SE-AQ01-00, con una frecuencia de muestreo de 100 MHz, junto con un módulo front-end SE-TX05-02 para la excitación y acondicionamiento de los pulsos. Los A-scans, correspondientes a las señales ultrasónicas temporales registradas, se procesaron para estimar los (ToF) necesarios para calcular el espesor y la velocidad longitudinal del sonido de las muestras. Los retardos temporales se estimaron mediante correlación cruzada con una señal de referencia, método más robusto que la detección directa de máximos ante ruido o ligeras variaciones en la forma de onda. La posición del máximo de correlación se refinó mediante interpolación submuestra para mejorar la resolución temporal (Svilainis, 2019; Lu et al., 2016; Liu et al., 2025). En el modo pulso-eco se aplicó deconvolución iterativa para identificar los ecos reflejados en las caras anterior y posterior de la muestra, facilitando la separación de ecos próximos y una estimación más estable de los parámetros acústicos Rodríguez et al. (2014).

2.5. Procedimiento experimental



Figura 2: Montaje experimental empleado para la caracterización ultrasónica de las muestras de PVA-propilenglicol.

El procedimiento experimental inicia con el acondicionamiento térmico del baño de inmersión. Para ello, el agua contenida en la vasija se calentó hasta alcanzar la temperatura de consigna, correspondiente a la temperatura corporal (36,5 °C). El control térmico se realizó mediante un sistema gobernado por Arduino UNO con control proporcional-integral (PI), mientras que un agitador magnético mantuvo el

agua en movimiento continuo para favorecer una distribución homogénea de la temperatura en todo el volumen del baño. De forma paralela, las muestras se mantuvieron durante al menos 10 min en un recipiente independiente atemperado a la misma temperatura de consigna, con el fin de favorecer su equilibrio térmico antes del ensayo. Una vez acondicionada, cada muestra se fijó sobre el soporte y se introdujo en la vasija. La Figura 2 muestra el montaje experimental completo empleado para la caracterización acústica de las muestras. A continuación, se ajustaron manualmente la rotación y el desplazamiento del soporte hasta orientar la cara de la muestra respecto al haz emitido por el transductor enfocado y maximizar la incidencia acústica sobre la superficie analizada. Finalmente, se adquirieron las señales de referencia en agua, transmisión directa y pulso-eco necesarias para el cálculo del espesor y de la velocidad longitudinal del sonido en cada muestra.

La velocidad del sonido en el agua, c_w , se calcula para cada adquisición a partir de la temperatura real del baño en el momento de la medida, promediando las temperaturas registradas por las sondas de temperatura; la conversión temperatura $\rightarrow$ velocidad del sonido se realiza siguiendo el modelo de Abdessamad et al. (2005).

3. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos durante la caracterización ultrasónica de los criogel de PVA-propilenglicol, con el fin de analizar la influencia de la composición y de los ciclos de congelación-descongelación sobre la velocidad longitudinal del sonido, c_L . Dado el carácter preliminar del estudio, no se realizaron pruebas estadísticas formales; por ello, los resultados se presentan de forma descriptiva como media $\pm$ desviación estándar. En primer lugar, se presentan los valores medios obtenidos para las distintas formulaciones. Posteriormente, se analiza la distribución de las mediciones individuales para valorar la dispersión experimental y la repetibilidad de los resultados. Finalmente, se discuten las tendencias observadas en los ciclos evaluados y su relación con el desarrollo de materiales miméticos de tejidos blandos.

La Figura 3 muestra los diagramas de cajas y bigotes correspondientes a las mediciones individuales de c_L para las mismas formulaciones. Esta representación permite valorar la dispersión experimental dentro de cada grupo. En la mayoría de las condiciones, las mediciones presentaron una distribución relativamente compacta, lo que indica una respuesta acústica reproducible entre réplicas. Sin embargo, algunas formulaciones con 10 % de PVA y mayores concentraciones de propilenglicol, especialmente 10 y 15 %, exhibieron una dispersión más amplia, lo que sugiere una mayor variabilidad en estas composiciones.

La Figura 4 presenta el mapa de calor de la velocidad longitudinal media del sonido, c_L , obtenida tras el quinto ciclo de congelación-descongelación. Los valores medios se encontraron aproximadamente entre 1578,5 y 1615,7 $m \cdot s^{-1}$, lo que evidencia la influencia de la composición del criogel sobre su respuesta acústica. En este ciclo, las formulaciones con 12,5 y 15 % de PVA mostraron valores más agrupados, en general cercanos a 1600-1611 $m \cdot s^{-1}$. En cambio, las mezclas con 10 % de PVA presentaron una mayor variación en función del contenido de propilenglicol.

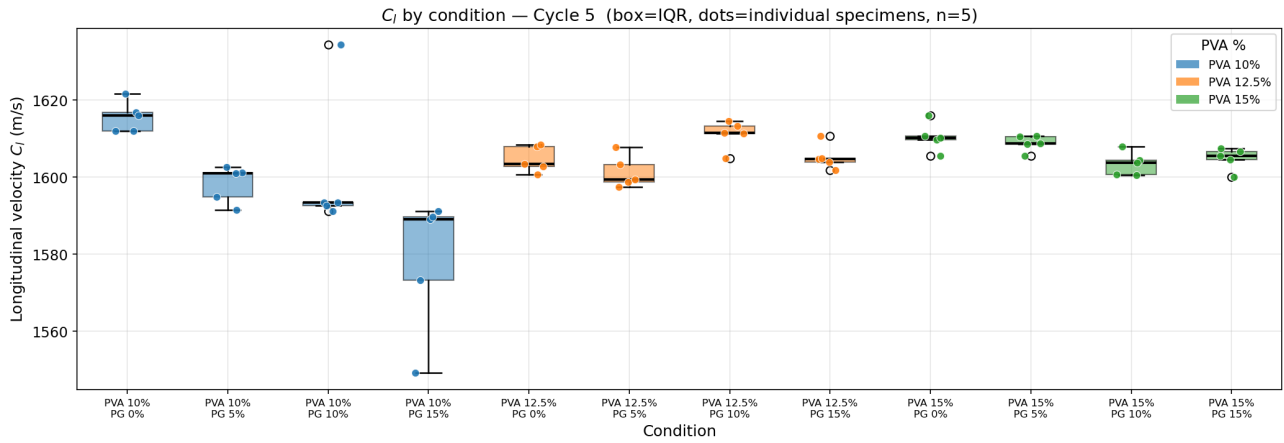


Figura 3: Distribución de la velocidad longitudinal del sonido, c_L , para las distintas formulaciones de PVA-propilenglicol tras el quinto ciclo de congelación-descongelación. El diagrama de cajas y bigotes representan el rango intercuartílico y los puntos las mediciones individuales ($n = 5$).

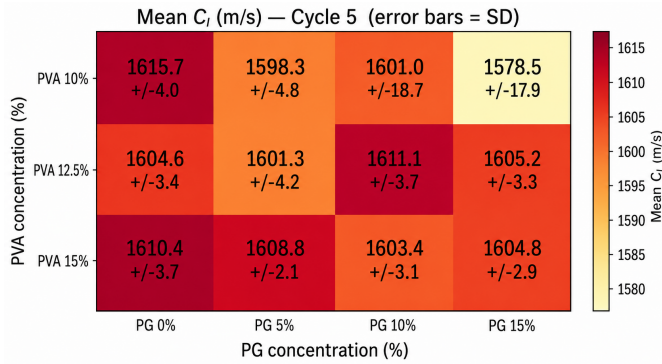


Figura 4: Mapa de calor de la velocidad longitudinal media del sonido, c_L , para las distintas formulaciones de PVA-propilenglicol tras el quinto ciclo de congelación-descongelación. Los valores se presentan como media $\pm$ desviación estándar.

Considerando los ciclos evaluados, la velocidad longitudinal del sonido parece estar influida tanto por la formulación como por el historial de congelación-descongelación. No obstante, dado que en esta sección se muestran principalmente los resultados del quinto ciclo, la comparación entre ciclos debe interpretarse como una tendencia preliminar. En dicho ciclo, las velocidades se concentraron en intervalos próximos a los reportados para tejidos blandos. Aunque el efecto del propilenglicol no fue estrictamente monótono en todas las combinaciones, los resultados sugieren que la modificación de la composición permite ajustar la respuesta acústica de los criogeles y seleccionar formulaciones con potencial como materiales miméticos de tejido.

4. Discusión

Los valores de velocidad longitudinal obtenidos para los criogeles de PVA-propilenglicol se sitúan dentro del intervalo reportado para tejidos blandos humanos a temperatura corporal. En particular, Mast (2000) recopiló velocidades acústicas medidas a 37 °C o en condiciones fisiológicas, con valores aproximados entre 1450 y 1615 $m \cdot s^{-1}$. En este estudio, las formulaciones evaluadas tras el quinto ciclo presentaron velocidades medias entre 1578,5 y 1615,7 $m \cdot s^{-1}$, por lo que se

ubican en la parte media-alta de dicho rango. Por tanto, las formulaciones estudiadas pueden considerarse compatibles, de forma general, con el rango acústico de los tejidos blandos. Sin embargo, no se asignan equivalencias con tejidos específicos, ya que dicha comparación requiere una caracterización más completa que incluya densidad, impedancia acústica, atenuación y propiedades mecánicas.

Es importante señalar que las condiciones experimentales de este trabajo difieren de las empleadas por Elvira et al. (2019), referencia central en la caracterización de criogeles de PVA con propilenglicol. Aquellos autores reportaron un incremento monótono de la velocidad del sonido con la concentración de propilenglicol, aproximadamente $+5,5 m \cdot s^{-1}$ por cada 1 %, en criogeles de PVA al 10 % caracterizados a 25 °C y tras un único ciclo de congelación-descongelación. Además, su estudio de estabilidad frente al ciclado se limitó a una sola composición fija, 10 % PVA + 10 % PG con distintos contenidos de alúmina, observando variaciones inferiores a 1,5 $m \cdot s^{-1}$ a lo largo de cinco ciclos. El presente trabajo amplía este marco al explorar una matriz completa PVA $\times$ PG tras cinco ciclos y a 36,5 °C, un régimen no caracterizado previamente. En estas condiciones, la tendencia con el propilenglicol no resulta estrictamente monótona en todas las concentraciones de PVA, lo que sugiere que el efecto del aditivo sobre c_L podría depender del estado de entrecruzamiento físico alcanzado por la matriz. Esta hipótesis, junto con la influencia de la temperatura sobre el sistema PVA-PG, abre líneas de trabajo futuro que requerirán caracterización comparativa a 25 °C y barridos sistemáticos del número de ciclos.

Estos resultados son coherentes con estudios recientes que muestran que las propiedades acústicas y viscoelásticas de los phantoms de PVA dependen de la formulación, de los ciclos de congelación-descongelación y de la temperatura de caracterización (Sharma et al., 2023; Braunstein et al., 2022). Además, los resultados indican que el propilenglicol puede actuar como una vía de ajuste de la respuesta acústica del criogel. En las formulaciones con 10 % de PVA se observó una disminución de la velocidad longitudinal al incrementar el contenido de aditivo, lo que sugiere que nuevas composiciones con proporciones mayores o intermedias de propilenglicol podrían explorarse para obtener valores más bajos (Arteaga-Marrero et al.,

2023; Villa et al., 2020).

No obstante, esta comparación debe interpretarse como una primera aproximación, ya que la similitud acústica de un material mimético no depende únicamente de la velocidad del sonido. En tejidos blandos, la velocidad acústica presenta una fuerte correlación con la densidad, mientras que la atenuación no muestra una relación directa con el resto de parámetros (Mast, 2000). Por ello, será necesario complementar esta caracterización con mediciones de densidad, impedancia acústica, atenuación y propiedades mecánicas. En conjunto, estos resultados constituyen una base preliminar para avanzar hacia phantoms con comportamiento acústico y mecánico ajustable, útiles en ultrasonido diagnóstico, elastografía y futuras aplicaciones de simulación quirúrgica y robótica médica.

5. Conclusiones

En este trabajo se fabricaron y caracterizaron criogeles de PVA-propilenglicol como materiales miméticos de tejido para aplicaciones biomédicas basadas en ultrasonido. La caracterización realizada a temperatura corporal mostró que distintas formulaciones alcanzan velocidades longitudinales del sonido compatibles con las reportadas para varios tejidos blandos humanos. Los resultados indican que la composición del criogel, en particular la proporción de PVA y propilenglicol, permite modificar su respuesta acústica, constituyendo una base preliminar para el diseño de nuevas mezclas con propiedades ajustables. Como trabajo futuro, se plantea ampliar la caracterización mediante mediciones de densidad, impedancia acústica, atenuación y propiedades mecánicas, con el fin de evaluar con mayor precisión su idoneidad como phantoms para ultrasonido, elastografía y simulación biomédica.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Gobierno español a través del proyecto PID2022-138206OB-C32 y por la Conselleria d'innovació, Universitat, Ciència i Societat Digital de la Generalitat Valenciana a través del proyecto CIPROM/2022/16.

Referencias

Abdessamad, M., Iqdour, R., Ankrim, M., Zeroual, A., Benhayoun, M., Quoth, K., 01 2005. New model for speed of sound with temperature in pure water. *AMSE Review (Association for the Advancement of Modeling and Simulation Techniques in Enterprises)* 74, 12.10–12.13.

Arteaga-Marrero, N., Villa, E., González-Fernández, J., Martín, Y., Ruiz-Alzola, J., Llanos-González, A. B., 2023. Low-cost pseudo-anthropomorphic pva-c and cellulose lung phantom for ultrasound-guided interventions. *Gels* 9 (2), 74.
DOI: 10.3390/gels9020074

Braunstein, L., Brüningk, S. C., Rivens, I., Civalé, J., Ter Haar, G., 2022. Characterization of acoustic, cavitation, and thermal properties of poly (vinyl alcohol) hydrogels for use as therapeutic ultrasound tissue mimics. *Ultrasound in Medicine & Biology* 48 (6), 1095–1109.

Busqué Nadal, A., 2023. Ultrasonic characterization of graphite-doped resins. Trabajo fin de máster, Universidad Miguel Hernández de Elche, Elche, España.

Culjat, M. O., Goldenberg, D., Tewari, P., Singh, R. S., 2010. A review of tissue substitutes for ultrasound imaging. *Ultrasound in medicine & biology* 36 (6), 861–873.

Durham, P. G., Kuntz, H. L., Lal, A., Donnelly, E., 2022. Polyvinyl alcohol cryogels for acoustic characterization of tissue-mimicking materials. *Ultrasound in Medicine & Biology* 48 (6), 1196–1207.
DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.01.013

Elvira, L., Duran, C., Higuti, R. T., Tiago, M. M., Ibanez, A., Parrilla, M., Valverde, E., Jiménez, J., Bassat, Q., 2019. Development and characterization of medical phantoms for ultrasound imaging based on customizable and mouldable polyvinyl alcohol cryogel-based materials and 3-d printing: Application to high-frequency cranial ultrasonography in infants. *Ultrasound in Medicine & Biology* 45 (8), 2226–2241.

Gerald, A., et al., 2023. Soft optical sensor and haptic feedback system for robotic palpation. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

He, P., Zheng, J., 2001. Acoustic dispersion and attenuation measurement using both transmitted and reflected pulses. *Ultrasonics* 39 (1), 27–32.
DOI: 10.1016/S0041-624X(00)00037-8

Jawli, A., Aldehani, W., Nabi, G., Huang, Z., 2024. Tissue-mimicking material fabrication and properties for multiparametric ultrasound phantoms: a systematic review. *Bioengineering* 11 (6), 620.

Kim, M. G., et al., 2024. Recent advancements in high-frequency ultrasound: From imaging to stimulation. *Sensors* 24 (19), 6471.
DOI: 10.3390/s24196471

Liang, X., et al., 2024. Polyvinyl alcohol (pva)-based hydrogels: Recent progress in biomedical applications. *Polymers* 16 (19), 2755.
DOI: 10.3390/polym16192755

Liu, W., Li, D., Xie, W., 2025. A novel time-of-flight difference determination method for ultrasonic thickness measurement with ultrasonic echo onset point detection. *Applied Acoustics* 233, 110605.
DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.110605

Lu, Z., Yang, C., Qin, D., Luo, Y., Momayez, M., 2016. Estimating ultrasonic time-of-flight through echo signal envelope and modified gauss newton method. *Measurement* 94, 355–363.
DOI: 10.1016/j.measurement.2016.08.013

Malone, A. J., Courneane, S., Naydenova, I. G., Fagan, A. J., Browne, J. E., 2020. Polyvinyl alcohol cryogel based vessel mimicking material for modelling the progression of atherosclerosis. *Physica Medica* 69, 1–8.

Mast, T. D., 2000. Empirical relationships between acoustic parameters in human soft tissues. *Acoustics Research Letters Online* 1 (2), 37–42.

Mencarelli, M., Puggelli, L., Virga, A., Furferi, R., Volpe, Y., 2024. Acoustic velocity and stability of tissue-mimicking echogenic materials for ultrasound training phantoms. *Journal of Materials Science* 59, 7232–7248.
DOI: 10.1007/s10853-024-09610-8

Rodríguez, A., Svilainis, L., Dumbrava, V., Chaziachmetovas, A., Salazar, A., 2014. Automatic simultaneous measurement of phase velocity and thickness in composite plates using iterative deconvolution. *Ndt & E International* 66, 117–127.

Rodríguez-Martínez, A., de la Casa-Lillo, M. Á., Svilainis, L., Gomez Álvarez-Arenas, T. E., 2018. Characterization of nanoparticles doped composites using ultrasound. *Ultrasonics* 83, 68–79.
DOI: 10.1016/j.ultras.2017.06.017

Sharma, A., Marapureddy, S. G., Paul, A., Bisht, S. R., Kakkar, M., Thareja, P., Mercado-Shekhar, K. P., 2023. Characterizing viscoelastic polyvinyl alcohol phantoms for ultrasound elastography. *Ultrasound in Medicine & Biology* 49 (2), 497–511.

Surry, K., Austin, H., Fenster, A., Peters, T., 2004. Poly (vinyl alcohol) cryogel phantoms for use in ultrasound and mr imaging. *Physics in Medicine & Biology* 49 (24), 5529–5546.

Svilainis, L., 2019. Review on time delay estimate subsample interpolation in frequency domain. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 66 (11), 1691–1698.
DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2926275

Villa, E., Arteaga-Marrero, N., González-Fernández, J., Ruiz-Alzola, J., 2020. Bimodal microwave and ultrasound phantoms for non-invasive clinical imaging. *Scientific reports* 10 (1), 20401.

Zhong, Y., et al., 2024. Construction methods and biomedical applications of pva-based hydrogels. *Frontiers in Chemistry* 12, 1376799.
DOI: 10.3389/fchem.2024.1376799