



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Relación entre la Vascularidad del Tejido y la Viscoelasticidad Mediante Modelos Fraccionales

Presentado por:
Inmaculada Pulido Calmaestra

Curso académico 2024-2025



Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal validar experimentalmente un procedimiento de inversión que permite separar las propiedades viscoelásticas intrínsecas del tejido de los efectos de dispersión causados por su microestructura vascular mediante ultrasonidos. La atenuación de ondas de cizalla en tejidos biológicos presenta discrepancias significativas con los modelos puramente viscoelásticos, sugiriendo que la dispersión múltiple sobre estructuras microvasculares contribuye sustancialmente a la atenuación observada.

Se implementó el modelo teórico de O'Doherty-Anstey adaptado para medios viscoelásticos, que permite relacionar la dispersión de longitud de onda $|\lambda| \propto \omega^\kappa$ con los parámetros: γ (orden fraccional del material de fondo tipo spring-pot), κ (pendiente de dispersión) y H (índice de Hurst que caracteriza la complejidad fractal de la microestructura). El procedimiento de inversión en dos etapas permite estimar γ a partir del ángulo de fase normalizado $Y \approx \gamma$, y posteriormente calcular H mediante la relación $\kappa = -1 + \gamma/2 + 2H - \gamma H$.

Para la validación experimental, se diseñaron y fabricaron fantasmas tisulares con inclusiones fractales tridimensionales impresas en 3D, de geometría y dimensión fractal conocidas, que simulan la arquitectura vascular real de los tejidos. El estudio empleó dos configuraciones experimentales de elastografía: excitación por fuerza de radiación acústica (ARFI) y vibración mecánica externa, operando en el rango de frecuencias de 100 a 500 Hz.

Los resultados en fantasmas homogéneos de control mostraron errores inferiores al 1% respecto a la teoría del spring-pot clásico, confirmando la validez del método. En los fantasmas con inclusiones fractales, los valores estimados del índice de Hurst oscilaron entre $H \in [0.16, 0.50]$, consistentes con el régimen antipersistente requerido por la teoría para describir estructuras rugosas. La metodología demostró una dependencia crítica del tamaño de las estructuras fractales, obteniéndose mejor reproducibilidad ($CV < 3\%$) en estructuras grandes que en pequeñas ($CV > 10\%$).

Estos resultados respaldan la utilidad de κ y H como biomarcadores cuantitativos de la microestructura tisular, estableciendo las bases para el desarrollo de técnicas no invasivas de caracterización vascular con potencial aplicación clínica en el diagnóstico y seguimiento de patologías asociadas a alteraciones de la arquitectura microvascular.