

APLICACIÓN DEL TENSOR DE DIFUSIÓN EN LA VISUALIZACIÓN DE LAS FIBRAS DEL CORAZÓN *IN VIVO*

Jaime Torres Juárez^a, Pilar Dies Suarez^b, Silvia Hidalgo Tobón^{a,b},

^aUniversidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa
cbi2182800784@izt.uam.mx , shid@xanum.uam.mx

^bHospital Infantil de México – Federico Gómez
pd_suarez@himfg.com.mx

RESUMEN

Las enfermedades cardiovasculares representan la principal causa de muerte en México, según las estadísticas del INEGI. Esta realidad resalta la importancia de estudiar a fondo el corazón y sus patologías asociadas. En este contexto, la Resonancia Magnética (RM) emerge como una técnica no invasiva y no ionizante que brinda una visión detallada de este órgano vital. Además, el uso de la técnica del tensor de difusión permite investigar la microestructura del corazón, dando información valiosa sobre la organización de las fibras musculares y su relación con diversas enfermedades cardiovasculares. La combinación de la Resonancia Magnética y el Tensor de Difusión (DTI) se posiciona como una herramienta poderosa en el estudio de esta estructura vital, y permite nuevas perspectivas para el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades cardíacas.

Palabras Clave: Tensor de Difusión, Tractografía, Anisotropía Fraccional

ABSTRACT

Cardiovascular diseases represent the leading cause of death in Mexico, according to INEGI statistics. This reality highlights the importance of studying the heart and its associated pathologies in depth. In this context, Magnetic Resonance Imaging (MRI) emerges as a non-invasive and non-ionizing technique that provides a detailed view of this vital organ. In addition, the use of the diffusion tensor technique allows investigating the microstructure of the heart, providing valuable information on the organization of muscle fibers and their relationship with various cardiovascular diseases. The combination of MRI and diffusion tensor imaging is positioned as a powerful tool in the study of this vital structure, opening new perspectives for the diagnosis, treatment and prevention of cardiac diseases.

Key Words: Diffusion Tensor, Tractography, Fractional Anisotropy

1. INTRODUCCIÓN

La Resonancia Magnética Cardíaca (RMC) y la aplicación del Tensor de Difusión (DTI) han surgido como herramientas prometedoras para el estudio de la microestructura del corazón y su relación con las enfermedades cardiovasculares, las cuales representan la principal causa de muerte en México^[1]. Aunque obtener imágenes de RMC presenta desafíos debido a la

preparación del paciente y la sincronización de los pulsos con el movimiento, se ha logrado obtener imágenes de alta calidad. El postprocesamiento de estas imágenes mediante la técnica de DTI y la generación de las tractografías han demostrado ser útiles para visualizar la dirección y organización de las fibras musculares. Aunque se han obtenido tractografías de pacientes in vivo, aún queda mucho por investigar. En el futuro, se espera establecer biomarcadores sensibles y específicos para detectar miocarditis y principios de infarto, para mejorar así el diagnóstico, tratamiento y pronóstico de los pacientes.

2. TEORÍA

Las imágenes de resonancia magnética (RM) se generan mediante la interacción del intenso campo magnético con los núcleos de los átomos de hidrógeno presentes en el tejido. Esta interacción produce señales detectables que se utilizan para generar imágenes detalladas del cuerpo humano^[2]. La técnica del tensor de difusión (DTI) se basa en principios físicos relacionados con la teoría del movimiento browniano desarrollada por Robert Brown y la teoría de difusión propuesta por Albert Einstein.

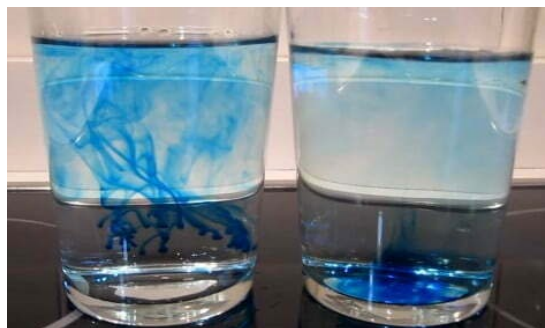


Figura1. Movimiento Browniano: Ejemplo de la difusión de las moléculas de la tinta azul en un recipiente con agua Rodney. (2021, 7 mayo). MOVIMIENTO BROWNIANO. Leyes del Universo. <https://leyesdeluniverso.es/movimiento-browniano>

La teoría del movimiento browniano describe el movimiento aleatorio de partículas suspendidas en un fluido (Fig. 1), como resultado de los choques continuos con las moléculas del fluido circundante. Este fenómeno fue estudiado por Brown en el siglo XIX y sienta las bases para comprender la difusión molecular en sistemas biológicos^[6]. Por otro lado, la teoría de difusión de Einstein proporciona una descripción matemática del proceso de difusión, lo que estableció una relación entre la difusión y las características físicas del medio en el que ocurre.

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt \quad (1)$$

Dónde $\langle x^2 \rangle$ denota el desplazamiento cuadrático medio^[7] (ya que hay una probabilidad igual de que una molécula pueda moverse en la dirección $+x$ o $-x$ y obtener un valor promedio igual a cero), D es la constante de difusión de la partícula y t es el intervalo de tiempo durante el cual se observó el desplazamiento (Fig. 2).

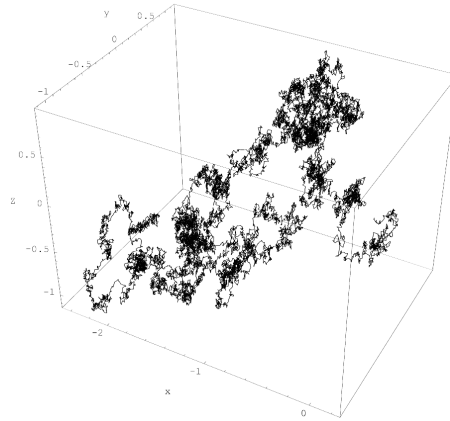


Figura 2. Simulación de una partícula que se difunde en una región confinada
 Woolard, E. W., Einstein, A., R. F., & Cowper, A. D. (1928). Investigations on the theory of the Brownian Movement. American Mathematical Monthly, 35(6), 318. <https://doi.org/10.2307/2298685>

En el contexto del tensor de difusión, se consideran dos clases de difusión: la difusión isotrópica y la difusión anisotrópica^[3]. La difusión isotrópica se refiere a un movimiento aleatorio y libre de las moléculas en un fluido, sin restricciones ni preferencias direccionales. En este caso, las moléculas tienen total libertad de movimiento en todas las direcciones. Por otro lado, la difusión anisotrópica implica una restricción en el movimiento de las moléculas, lo que resulta en una difusión más prominente en ciertas direcciones en comparación con otras (Fig. 3). Esto se debe a las características estructurales o la presencia de barreras físicas en el medio.

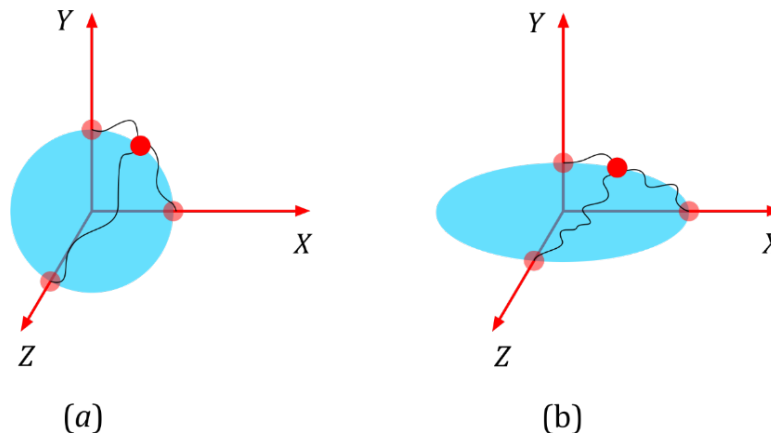
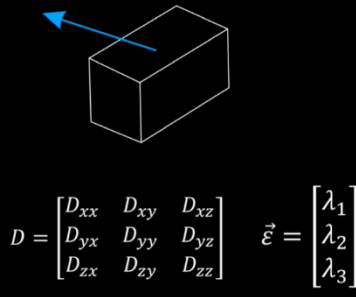


Figura 3. Esquema de la difusión Isotrópica y Anisotrópica: (a) Molécula de agua que se difunde “isotrópicamente”, (b) molécula de agua que se difunde “anisotrópicamente”

La aplicación del tensor de difusión en la resonancia magnética permite investigar la difusión del agua en los tejidos biológicos, lo que proporciona información valiosa sobre la microestructura de los tejidos y la presencia de restricciones o cambios en la difusión molecular. La detección de difusión anisotrópica en la resonancia magnética del tensor de difusión puede indicar la presencia de barreras, como las membranas celulares o las fibras musculares, y se utiliza para visualizar y analizar la organización de las fibras en una variedad de tejidos, incluido el corazón^[4].

PARTE EXPERIMENTAL

En este estudio, se llevó a cabo la adquisición de imágenes de resonancia magnética de tres pacientes. Para garantizar una buena calidad de imágenes, se colocó a cada paciente en la mesa de exploración y se procedió a sincronizar los pulsos de radiofrecuencia con los latidos cardíacos^[5]. Durante este proceso, se mantuvieron condiciones de respiración libre. Una vez que se obtuvieron las imágenes, se realizó el proceso de reconstrucción de la tractografía y se utilizó una región de interés (ROI) seleccionada en cada imagen. Mediante la obtención de la matriz de difusión (Fig. 4) y el cálculo del eigenvector correspondiente^[8], se pudo determinar la dirección de las moléculas en esa región específica del corazón. Este enfoque permitió analizar la organización de las fibras y la microestructura cardíaca en cada paciente.



$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \quad \vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}$$

Figura 4. El eigenvector proporciona la información de las moléculas de agua en una determinada dirección

La generación de la tractografía se llevó a cabo con la repetición este proceso en toda la imagen adquirida, lo que resultó en una representación visual completa de las direcciones de las moléculas en el tejido cardíaco. Esta información es valiosa para comprender la estructura y la conectividad de las fibras musculares, así como para identificar posibles anomalías. Además, para una mejor visualización y comprensión de los resultados, se asignaron colores específicos en la representación de la tractografía (Fig. 5). En este caso, se utilizó una gama de colores donde el rojo indicaba una difusión restringida, lo que sugiere la presencia de barreras o estructuras que limitan el movimiento molecular en el tejido cardíaco. Por otro lado, el color verde se asignó para representar una difusión sin restricciones, lo que indica una mayor libertad de movimiento en esa región específica del corazón.

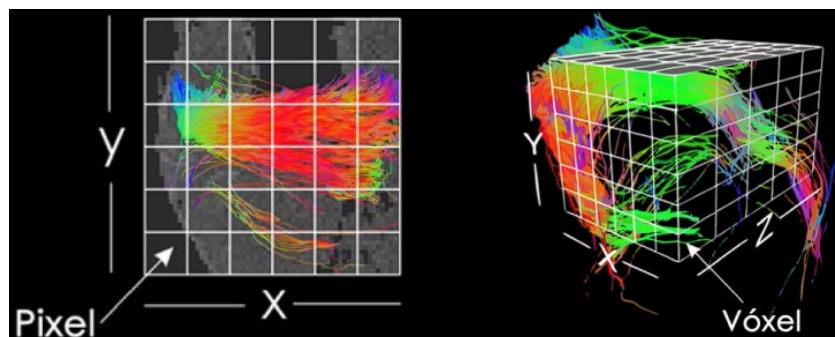


Figura 5. Representación de la construcción de la tractografía

Mediante la combinación de la adquisición de imágenes de resonancia magnética cardíaca, la sincronización de los pulsos de radiofrecuencia con los latidos cardíacos y la aplicación de

la técnica de tractografía, se logró analizar la microestructura y la organización de las fibras del corazón. Estos hallazgos contribuyen a un mejor entendimiento de la anatomía y el funcionamiento del corazón, así como a la identificación de posibles anomalías relacionadas con diversas patologías cardiovasculares.

En la siguiente tabla (Tabla. 1) se muestran los parámetros para la adquisición de las imágenes de RM:

Tabla. 1: Parámetros de adquisición para las imágenes de Resonancia Magnética

Manufacture:	SIEMENS Skyra 3T
Sequence:	EPI
MR Acquisition Type:	2D
Sequence Variant:	SK) segmented k-space; SP) spoiled; OSP) oversampling phase
b:	350 s/mm ²
No. of Directions:	6
Slice Thickness:	5 mm
Repetition Time:	1000 ms
Echo Time:	64 ms
Echo Train Length:	59
Bandwidth:	1490 Hz
Flip Angle:	90°
Voxel size:	1.7 x 1.7 x 5.6 mm ³
FOV:	273 x 273

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación, se muestran las imágenes de los tres pacientes incluidos en el estudio, las imágenes muestran un corte axial:

Imagen del paciente 1: Se observa una representación clara de los ventrículos (Fig. 6). La imagen proporciona información sobre la forma y el tamaño del corazón, así como la posición relativa de las estructuras cardíacas principales:

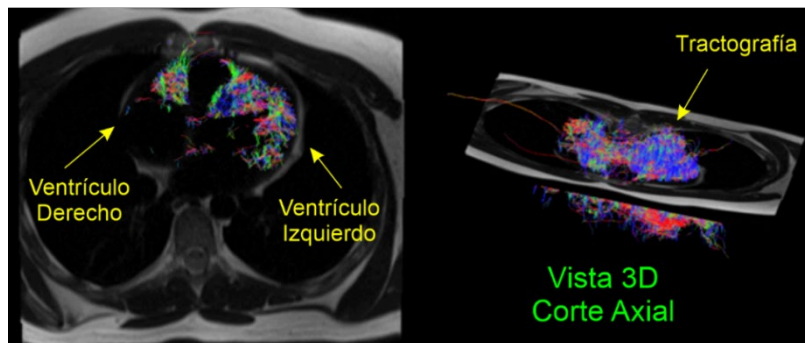


Figura 6. (A la izquierda) Imagen de RMC del paciente 1, (A la derecha) imagen de la tractografía del corazón, en corte axial

Imagen del paciente 2: La resonancia magnética ha permitido obtener una imagen nítida y detallada del corazón de este paciente, lo que facilitó información precisa sobre su forma, tamaño y posición relativa de las estructuras cardíacas principales (Fig. 7). Esta imagen

contribuye al análisis exhaustivo de la anatomía cardíaca y sienta las bases para la evaluación de posibles alteraciones y enfermedades cardiovasculares.

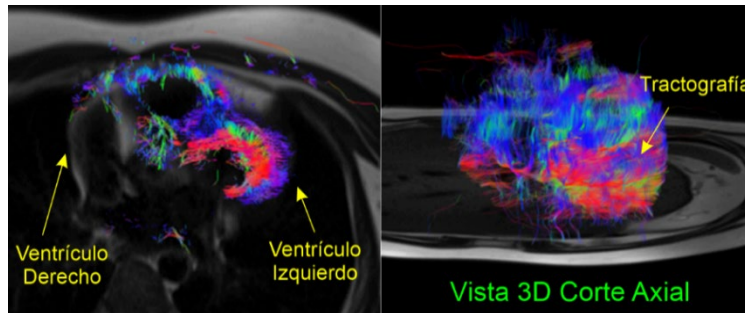


Figura 7. (A la izquierda) Imagen de RMC del paciente 2, (A la derecha) imagen de la tractografía del corazón

Imagen del paciente 3: En esta imagen, se destacan las fibras musculares del corazón. La técnica del tensor de difusión ha permitido obtener información acerca de la microestructura de los tejidos cardíacos, lo que reveló la orientación y dirección de las fibras (Fig. 8). Esto es de gran importancia para comprender la organización y el funcionamiento del músculo cardíaco, así como para identificar posibles alteraciones en la estructura de las fibras.

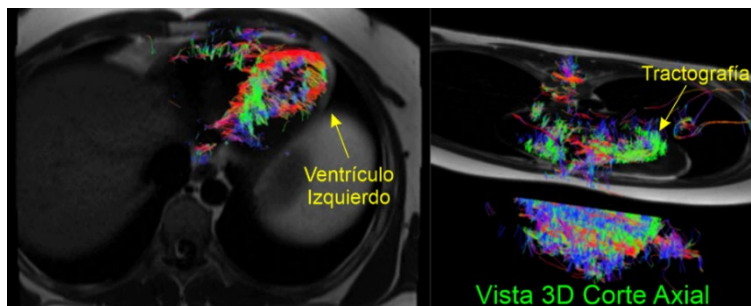


Figura 8. (A la izquierda) Imagen de RMC del paciente 2, (A la derecha) imagen de la tractografía del corazón

A continuación (Fig. 9) se muestra la comparación del miocardio anterior, con uno que tiene una cardiopatía diagnosticada:

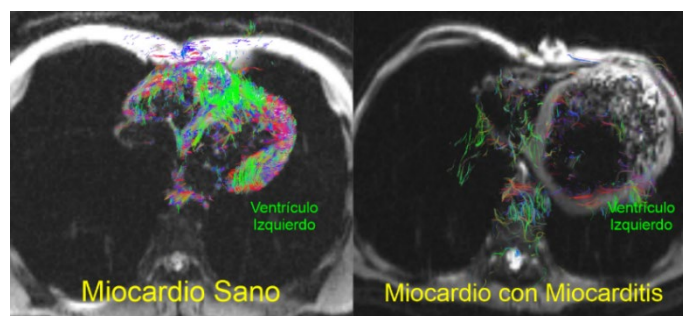


Figura 9. (A la izquierda) Imagen de RMC de un miocardio sano, (A la derecha) imagen de la tractografía de un miocardio con cardiopatía

En la figura anterior (Fig. 9) Se puede observar la diferencia en la densidad de tractos entre un corazón sano y uno con cardiopatía diagnosticada.

En conclusión, el proceso de obtención de imágenes mediante resonancia magnética cardíaca (RMC) presenta cierta complejidad, lo cual se refleja en la escasez de información reportada en la literatura científica. No obstante, en este estudio se logró superar los desafíos técnicos y obtener satisfactoriamente la tractografía de pacientes in vivo, lo cual constituye un avance significativo en el estudio de la microestructura del miocardio.

La obtención de la tractografía cardíaca a través de la RMC es el primer paso en el análisis de la microestructura del miocardio. El objetivo principal de este estudio es establecer un biomarcador que permita el diagnóstico preciso de miocarditis. Este biomarcador se basará en los patrones identificados en la tractografía, los cuales indicarán posibles anomalías en la estructura y función del miocardio asociadas a la miocarditis. Los resultados obtenidos hasta el momento son alentadores, ya que se ha demostrado la viabilidad de obtener la tractografía de pacientes in vivo. Esto sugiere que la RMC junto con el análisis de la microestructura del miocardio a través de la tractografía puede convertirse en una herramienta útil en el diagnóstico y seguimiento de la miocarditis.

Sin embargo, se requiere de un trabajo continuo y más extenso para validar los resultados obtenidos hasta ahora. Es necesario realizar estudios adicionales con una muestra más amplia de pacientes y comparar los hallazgos con los resultados clínicos y otras pruebas diagnósticas. Esto permitirá una mejor comprensión de la utilidad y precisión del biomarcador propuesto y su aplicabilidad en la práctica clínica.

REFERENCIAS

- [1]. S. Acosta. INEGI. Características de las defunciones registradas en México durante 2017 (N.o 435/16). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021, octubre)
- [2]. Brown, M. A., & Semelka, R. C. MRI Basic Principles and Applications (4.a ed.). Wiley-Blackwell. (2010)
- [3]. Bernstein, M. A., King, K. F., & Zhou, X. J. Handbook of MRI Pulse Sequences (English Edition) (1.a ed.). Academic Press. (2004)
- [4]. Tyler J Spear, Tori A Stromp, Steve W Leung, Moriel H Vandsburger. Influence of longitudinal position on the evolution of steady-state signal in cardiac cine balanced steady-state free precession imaging. *Acta Radiologica Open* 611, 205846011772918. (2017)
- [5]. Iaizzo, P. A. Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices (3rd ed. ed.). Springer. (2015)
- [6]. Russel, W. B. Brownian Motion of Small Particles Suspended in Liquids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13(1), 425-455. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.13.010181.002233>. (2000)
- [7]. Raluca Mocanu, G. Mean square displacement and instantaneous diffusion coefficient of charged particles in stochastic motion. *Statistical dynamics*, 1-21. <https://arxiv.org/pdf/1906.10402.pdf> (2008)
- [8]. Weickert, J.. *Anisotropic Diffusion in Image Processing* (1.a ed.). B.G. Teubner Stuttgart. (2003)

- [9]. Md, A. K. M. *Physiology of the Heart* (5th ed.). Wolters Kluwer Law & Business. (2010)
- [10]. Haaga, J. R., & Boll, D. *CT and MRI of the Whole Body, 2-Volume Set* (6th ed. ed.). Elsevier. (2016)