

Resonancia magnética: bases físicas y aplicaciones clínicas del tensor de difusión y la tractografía

Segundo Enrique Cabrera Hipólito¹

RESUMEN

El tensor de difusión es una técnica de resonancia magnética que permite la evaluación de la conectividad de la sustancia blanca. Con esta técnica se determinan parámetros como la anisotropía y la difusividad, las cuales están alteradas en diversas patologías que afectan principalmente la sustancia blanca del cerebro. Las enfermedades desmielinizantes, los tumores cerebrales, la enfermedad de Alzheimer y el trauma cráneo-encefálico son algunas de las patologías que han sido evaluadas con esta técnica, determinándose alteraciones en los parámetros previamente mencionados, esto permite hacer diagnósticos diferenciales más precisos y una mejor comprensión de la fisiopatología de estas enfermedades, y el uso de un software especializado nos permite delinear el trayecto de los tractos cerebrales (tractografía), lo que puede ser de utilidad para el tratamiento neuroquirúrgico.

Palabras clave: Resonancia magnética. Tensor de difusión. Tractografía

Magnetic resonance: physical basis and clinical applications of diffusion tensor and tractography

ABSTRACT

Diffusion tensor is a MR technique which allows the assessment of white matter connectivity. Through this technique parameters such as anisotropy and diffusivity are determined, which are altered in several pathologies affecting the brain white matter mainly. Demyelinating diseases, brain tumors, Alzheimer's disease and head trauma are some of the pathologies which have been assessed with this technique, determining changes in the aforementioned parameters. This allows making more accurate differential diagnosis and a better understanding of the pathophysiology of these diseases; and the use of specialized software allows us to draft the path of cerebral tracts (tractography), which can be useful for neurosurgical treatment.

Key words: Diffusion tensor. MRI. Tractography.

1. Médico Radiólogo. Centro de Diagnóstico por Imágenes. Clínica Internacional. Sede San Borja. Lima, Perú.

INTRODUCCIÓN

A inicios de 1990 se empezó a utilizar la técnica de difusión en el diagnóstico de los eventos isquémicos agudos cerebrales. En los años siguientes se ha mejorado sustancialmente la calidad de las imágenes adquiridas y se han planteado nuevas aplicaciones diagnósticas. Actualmente se utiliza para el diagnóstico de infecciones piogénicas cerebrales, tumores cerebrales, trauma cerebral, así como para la distinción entre edema vasogénico y edema citotóxico. Asimismo, el advenimiento de la secuencia del tensor de difusión y la tractografía, han permitido la evaluación de la conectividad de la sustancia blanca del cerebro.

El tensor de difusión es una técnica realizada mediante resonancia magnética, que permite evaluar la integridad de las fibras nerviosas en la sustancia blanca. Sus inicios se remontan a la secuencia de difusión, la cual era ampliamente utilizada para la evaluación de los eventos isquémicos. En esa secuencia se reflejaba el movimiento del agua en el interior de las células nerviosas por medio de una evaluación en un solo plano. Con el advenimiento del tensor de difusión, la evaluación del movimiento del agua es multiplanar, lo que se refleja en un vector, el cual indica la dirección principal del movimiento del agua. Con esta técnica se determinan también diversos parámetros como la anisotropía y la difusividad, los cuales se ven alterados en enfermedades o lesiones que comprometen principalmente la sustancia blanca. Asimismo, con el uso de software especializado es posible delimitar el trayecto de los tractos nerviosos como el corticoespinal, el cuerpo caloso, las fibras trasversas del puente, las radiaciones ópticas, entre otros (tractografía).

En este artículo revisaremos los fundamentos físicos del tensor de difusión y la tractografía, así como sus aplicaciones clínicas.

FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL TENSOR DE DIFUSIÓN Y LA TRACTOGRAFÍA

La difusión es una técnica de resonancia magnética que se basa en el movimiento browniano de las moléculas debido al calor. La difusión se expresa

numéricamente en mm^2/s y refleja el movimiento de una molécula en un área y tiempo de observación determinados. El cerebro está constituido en su mayor parte por agua, por lo que la difusión refleja en esencia el movimiento de las moléculas de agua. El coeficiente de difusión aparente (ADC) se utiliza en la práctica clínica, y evalúa el movimiento de las moléculas de agua in vivo, el que se ve influido por el transporte activo, gradientes de concentración de solutos y cambios en la permeabilidad de la membrana. Una de las representaciones gráficas de la difusión es el mapa de ADC, en éste, las zonas que muestran mayores valores de este parámetro son brillantes, lo que indica «facilitación a la difusión», como es el caso de las gliosis o el edema vasogénico. Por el contrario, las zonas con menor ADC son oscuras, lo que indica «restricción a la difusión», como es el caso de los infartos cerebrales agudos o en los tumores cerebrales con alta celularidad.

Con la aplicación del tensor de difusión, la difusión del agua en el cerebro puede ser isotrópica, es decir de la misma magnitud en todas las direcciones, como es el caso del líquido cefalorraquídeo. Sin embargo en la sustancia blanca cerebral los tractos nerviosos están «empaquetados» y el ADC es mayor en la misma dirección de los tractos (difusividad axial -DA-), y es menor en las direcciones perpendiculares a estos tractos (difusividad radial -DR-), es decir la difusión es anisotrópica. Un modelo matemático de evaluación de la difusión se basa en los vectores de Eigen, los cuales configuran una esfera cuando la difusión es isotrópica y un elipsoide cuando la difusión es anisotrópica, de modo que el vector de mayor magnitud del elipsoide indica la direccionalidad del tracto. Esta direccionalidad es convencionalmente representada de la siguiente manera: color rojo para la dirección derecha-izquierda o viceversa, color azul para la dirección arriba-abajo o viceversa y color verde para la dirección anterior-posterior o viceversa. Uno de los parámetros más utilizados es la anisotropía fraccional (AF), la cual tiene el valor de 0 cuando la difusión es isotrópica y alcanza el máximo de 1 cuando la difusión es lineal y paralela al vector de Eigen primario (el de mayor magnitud). El uso de software especializado de neuroradiología y el

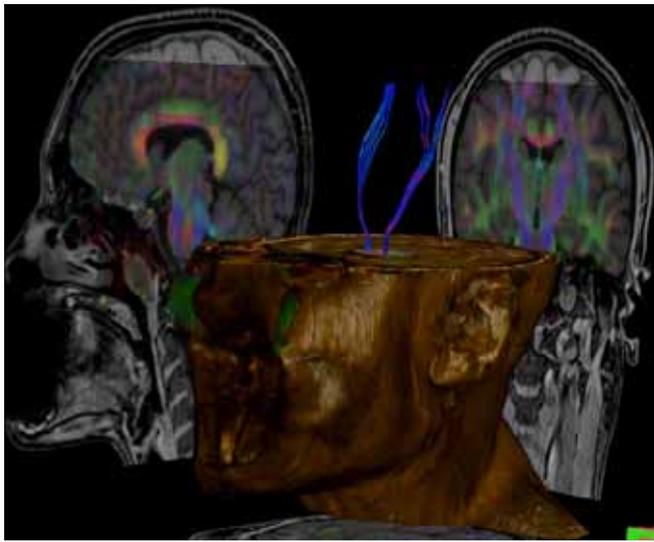


Figura 1. Vista oblicua izquierda de los tractos corticoespiniales.



Figura 2. Vista frontal posterior del cuerpo calloso.

conocimiento anatómico permiten la visualización tridimensional de los diferentes tractos del cerebro: tracto corticoespinal, radiaciones ópticas, fibras transversas del puente, el cuerpo calloso, entre otros (Ver Figuras 1 y 2) ³.

APLICACIONES CLÍNICAS DEL TENSOR DE DIFUSIÓN Y LA TRACTOGRAFÍA

Una de las aplicaciones básicas de la tractografía es la representación de la relación anatómica de los tractos con respecto a un tumor cerebral. Utilizando los valores de AF, la direccionalidad representada por el color, y la localización anatómica, se puede plantear que un tracto está desviado, edematoso, infiltrado o destruido. Cuando un tracto ha modificado su localización anatómica manteniendo una normal direccionalidad y sin cambios en la AF, el tracto sólo está desviado. Cuando mantiene su localización anatómica y su direccionalidad, y sólo se modifica la AF, el tracto está edematoso. Si se modifica la AF y la direccionalidad, el tracto está infiltrado. Cuando no se logra definir el tracto y la AF se aproxima al valor 0, el tracto está destruido (Ver Figura 3) ⁴. Esta misma información anatómica puede ser obtenida con respecto a las malformaciones vasculares y puede ser útil para la planificación neuroquirúrgica.

En los casos de trauma craneoencefálico moderado, que no tienen representación en resonancia magnética convencional, se han reportado variaciones en la AF, la cual se reduce en diversas áreas del cerebro como el cuerpo calloso, cápsula interna y externa, así como en el centro semioval. También se ha identificado disrupción de algunos grupos de fibras nerviosas en esta localización ^{5,6}.

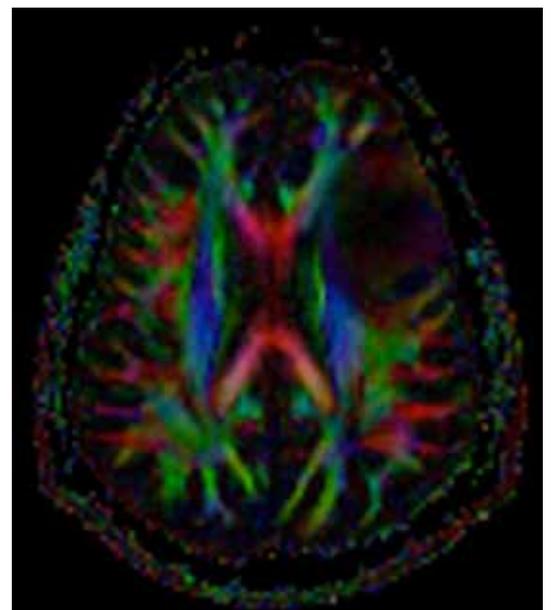


Figura 3. Glioblastoma que condiciona infiltración de fascículos de asociación fronto-occipital y fibras en U en el lóbulo frontal izquierdo.

En cuanto al neurodesarrollo, estudios de seguimiento en niños normales han identificado un incremento de la AF en la rodilla del cuerpo calloso. Asimismo, la tractografía se ha utilizado para la evaluación de fibras aberrantes en anomalías del desarrollo del sistema nervioso central como: Las disgenesias del cuerpo calloso, displasia cortical, heterotopias, parálisis cerebral, entre otras ⁷.

El tensor de difusión ha permitido la evaluación de las enfermedades que comprometen la sustancia blanca encontrándose disminución de la DA del tracto corticoespinal en los casos de esclerosis múltiple y esclerosis lateral amiotrófica. Asimismo, se han identificado disminución de la DA y de la AF así como un incremento en la DR, en los casos de esclerosis múltiple (ver Figura 4) ^{8,9}.

En los pacientes con enfermedad de Alzheimer (EA) se ha identificado disminución de la AF e incremento de la DR en los lóbulos temporal, frontal y parietal, asimismo se ha identificado disminución de la DA en el lóbulo temporal. Estas alteraciones sugieren degeneración axonal en estas zonas ¹⁰. Se ha evaluado también la AF en el fascículo uncinado, un tracto de asociación fronto-temporal, el cual muestra disminución en los pacientes con EA ¹¹.

En el contexto clínico pertinente, los valores de AF y del ADC pueden permitir también la diferenciación de metástasis cerebral, linfoma y glioblastoma ^{12,13}.

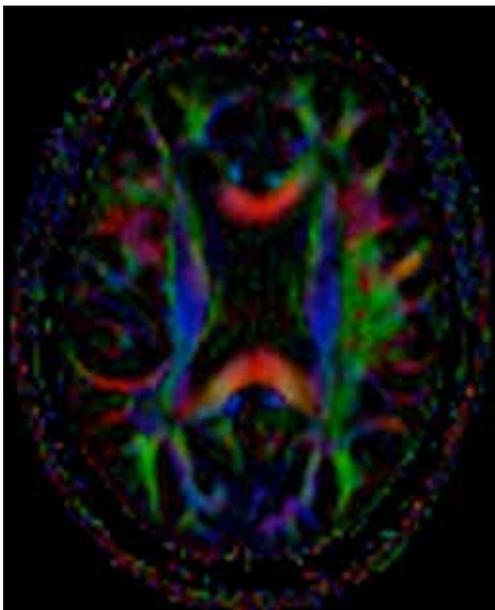


Figura 4. Focos de esclerosis múltiple que comprometen fascículos de asociación en la región adyacente al contorno derecho de la rodilla del cuerpo calloso y la sustancia blanca profunda del lóbulo parietal izquierdo.

CONCLUSIÓN

Las perspectivas de la aplicación del tensor de difusión y la tractografía son amplias, la correlación con los datos clínicos y anatomopatológicos está permitiendo su consolidación como un método diagnóstico neuroradiológico útil, tanto desde el punto de vista anatómico, como funcional.

REFERENCIAS

- Schaefer P, Grant E, Gonzalez G. Diffusion-weighted MR Imaging of the Brain. *Radiology* 2000; 217:331-345.
- Mukherjee P, Berman J, Chung S, et al. Diffusion Tensor MR Imaging and Fiber Tractography: Theoretic Underpinnings. *AJNR* 2008;29:632-641.
- Mukherjee P, Chung S, Berman J, et al. Diffusion Tensor MR Imaging and Fiber Tractography: Technical Considerations. *AJNR* 2008;29:843-852.
- Jellison B, Field A, Medow J, et al. Diffusion Tensor Imaging of Cerebral White Matter: A Pictorial Review of Physics, Fiber Tract Anatomy, and Tumor Imaging Patterns. *AJNR* 2004;25:356-369.
- Rutgers D, Toulgoat F, Cazejust J, et al. White Matter Abnormalities in Mild Traumatic Brain Injury: A Diffusion Tensor Imaging Study. *AJNR* 2008;29:514-519.
- Chu Z, Wilde E, Hunter J, et al. Voxel-Based Analysis of Diffusion Tensor Imaging in Mild Traumatic Brain Injury in Adolescents. *AJNR* 2010;31:340-346.
- Seung-Koo L, Dong K, Jinna K, et al. Diffusion-Tensor MR Imaging and Fiber Tractography: A New Method of Describing Aberrant Fiber Connections in Developmental CNS Anomalies. *RadioGraphics* 2005;25:53-65.
- Lin F, Yu C, Jiang T, et al. Diffusion Tensor Tractography-Based Group Mapping of the Pyramidal Tract in Relapsing-Remitting Multiple Sclerosis Patients. *AJNR* 2007;28:278-282.
- Schimrigk S, Bellenberg B, Schlüter M, et al. Diffusion Tensor Imaging-Based Fractional Anisotropy Quantification in the Corticospinal Tract of Patients with Amyotrophic Lateral Sclerosis Using a Probabilistic Mixture Model. *AJNR* 2007;28:724-730.
- Huang J, Friedland R, Auchus A. Diffusion Tensor Imaging of Normal-Appearing White Matter in Mild Cognitive Impairment and Early Alzheimer Disease: Preliminary Evidence of Axonal Degeneration in the Temporal Lobe. *AJNR* 2007;28:1943-1948.
- Taoka T, Morikawa M, Akashi T, et al. Fractional Anisotropy-Threshold Dependence in Tract-Based Diffusion Tensor Analysis: Evaluation of the Uncinate Fasciculus in Alzheimer Disease. *AJNR* 2009;30:1700-1703.
- Toh C, Castillo M, Wong A, et al. Primary Cerebral Lymphoma and Glioblastoma Multiforme: Differences in Diffusion Characteristics Evaluated with Diffusion Tensor Imaging. *AJNR* 2008;29:471-475.
- Wang W, Steward C, Desmond P. Diffusion Tensor Imaging in Glioblastoma Multiforme and Brain Metastases: The Role of p, q, L, and Fractional Anisotropy. *AJNR* 2009; 30:203.

Correspondencia:

Segundo Enrique Cabrera Hipólito
Clínica Internacional
Av. Garcilaso de la Vega 1420. Lima, Perú.
Tel: (511) 6196161
Fax: (511) 4319677
E-mail: scabrerahipolito@yahoo.com