



RADIOLOGÍA EN IMÁGENES

Imagen de tractografía 3T: anatomía y aplicaciones clínicas

M. Recio Rodríguez*, D. Hernández Aceituno, L.C. Hernández González,
V. Martínez de Vega Fernández y J. Carrascoso

Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital Universitario Quirón, Madrid, España

Recibido el 23 de mayo de 2011; aceptado el 9 de octubre de 2011

Disponible en Internet el 6 de marzo de 2012

PALABRAS CLAVE

Diagnóstico por
imagen;
RMN;
Tensor de difusión

KEYWORDS

Diagnostic imaging;
NMR;
Diffusion tensor
imaging

Resumen La tractografía (TG) es la única técnica no invasiva que permite la disección *in vivo* de las fibras de la sustancia blanca. Esta técnica puede estudiar las fibras de proyección, de asociación y las fibras comisurales, y supone una mejora y un importante complemento a la imagen de la resonancia magnética convencional.

La TG es una herramienta clave para la realización de mapeos subcorticales preoperatorios y existe una buena correlación entre la TG y la técnica de estimulación directa subcortical. La TG puede presentar falsos negativos en aquellas regiones infiltradas por el tumor o con efecto de masa. Además, una TG negativa no excluye la persistencia de fibras funcionales.

La TG es capaz de mostrar alteraciones en otras afecciones (malformaciones congénitas, afección isquémica y enfermedades desmielinizantes).

© 2011 SERAM. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

3 T tractography imaging: anatomy and clinical applications

Abstract Tractography (TG) is the only non-invasive technique that enables the fibres of the white substance to be dissected. This technique can study the projection, association, and commissural fibres, and is an improvement and an important complement to conventional MR imaging.

TG is an important tool for preoperative sub-cortical mapping, and there is a good correlation between TG and the direct sub-cortical stimulation technique. TG can have false positives in regions infiltrated by the tumour or with a mass effect. Furthermore, a negative TG does not exclude functional fibre persistence.

TG is capable of demonstrating changes in other pathologies (congenital malformations, ischaemic disease and demyelinating diseases).

© 2011 SERAM. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: machamama@telefonica.net (M. Recio Rodríguez).

Introducción

La difusión es la propiedad física que describe el movimiento aleatorio de las moléculas en solución con concentración uniforme en respuesta a la energía térmica. Este fenómeno, conocido como movimiento browniano, fue descrito por Robert Brown en 1827 en las partículas de polen en suspensión que mostraban un continuo movimiento caótico¹. Asimismo, la difusión depende de otros factores como el peso molecular, las interrelaciones moleculares, la viscosidad o la temperatura².

Cuando las moléculas de agua difunden igual en todas las direcciones (como en el líquido cefalorraquídeo intraventricular) hablamos de difusión isotrópica. Debe recordarse que

en la sustancia blanca cerebral existen barreras a la difusión como la mielina, la densidad y el diámetro de los axones, y la integridad de la membrana axonal, que hacen que la difusión difiera en las distintas direcciones (difusión anisotrópica), dominando en la dirección paralela a la fibras³.

En este artículo se revisa la anatomía de la sustancia blanca mediante las imágenes de mapas paramétricos coloreados (MPC) y de tractografía (TG).

Bases físicas

Para determinar la dirección en la difusión anisotrópica es necesario utilizar el tensor de difusión (TD)⁴ que asume que las moléculas de agua, durante un tiempo limitado, estarán contenidas en un volumen (volumen elipsoide) cuyo eje mayor tiene la orientación de las fibras. El modelo del tensor de difusión es una matriz diagonal y simétrica de 3×3 , que necesita como mínimo 6 direcciones de codificación espacial (la longitud de los tres ejes principales $-\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — que definen tres vectores $-V_1, V_2$ y V_3 — y su orientación). Con más de 6 direcciones mejora la medida del tensor^{5,6}.

El TD muestra la organización de la sustancia blanca mediante MPC que informan de la dirección fibrilar en los tres planos del espacio. Por convenio se representa en color azul la dirección superior-inferior, en rojo la derecha-izquierda y en verde la anterior-posterior (figs. 1–3).

Los tractos de la sustancia blanca pueden reconstruirse mediante la TG, dado que la difusión del agua es mayor en la dirección del haz de fibras. La TG se reconstruye determinando la dirección del movimiento en cada vóxel. El algoritmo de reconstrucción más común está basado en el FACT (*fiber assignment by contiguous tracking*)⁷. Para obtener la reconstrucción es necesario definir una región de interés del tracto a estudiar, generalmente sobre el MPC.

El cruce de fibras intravóxel y el ruido de la adquisición alteran la reconstrucción⁸ o crean fibras ficticias⁹. Los artefactos de susceptibilidad degradan y distorsionan la imagen⁹. La reconstrucción de los tractos está afectada cuando se reduce la anisotropía por tumores gliales de bajo grado, o por el edema vasogénico y la infiltración en los de alto grado¹⁰. El efecto de masa tumoral modifica la orientación de las fibras y secundariamente la TG, siendo necesaria la valoración conjunta con el MPC.

Parámetros técnicos utilizados

Los estudios se realizaron en un equipo de 3T con los siguientes parámetros: TR 6.200 ms, TE 87,6 ms, número de excitaciones 1, matriz: 128×128 , espesor 3 mm, sin separación entre cortes, y ancho de banda 250 Khz. Valor b de 1.000 s/mm^2 , con 82 direcciones para los cortes anatómicos de cadáver (duración: 8 minutos y 25 segundos), y 25 direcciones en los casos patológicos (duración: 2 minutos y 42 segundos).

Revisión del tema

Tradicionalmente las fibras se han clasificado en fibras de asociación, proyección y comisurales.

Fibras de asociación

Interconectan áreas corticales del hemisferio.

- Fascículo fronto-occipital inferior: Conecta los lóbulos frontal y occipital transitando por el margen inferolateral del claustró bajo la ínsula. Posteriormente se une al fascículo longitudinal superior y parte de las radiaciones ópticas (tracto genículo-calcarino), formando la mayor parte del fascículo vertical occipital o *stratum* sagital (fibras que conectan el lóbulo occipital al resto del cerebro). Su estimulación produce una parafasia semántica (alteraciones en el significado de la palabra)¹⁰. También participa en el procesamiento visual¹¹, en la lectura y en la atención^{12,13}.
- Fascículo uncinado: Conecta las circunvoluciones orbitaria y frontal inferior con el lóbulo temporal anterior, adoptando una forma de gancho en la región basal de la cisura de Silvio. En su tercio medio se une al fascículo fronto-occipital inferior continuando con un trayecto inferolateral hacia el polo temporal anterior. Puede tener un papel importante en el léxico, las asociaciones semánticas y la nominación, pero no es esencial para el lenguaje¹⁴ (fig. 4).
- Fascículo fronto-occipital superior (subcalloso, fronto-témporo-occipital o de Forel Onufrowicz: Conecta los lóbulos frontal, temporal y occipital, y se extiende a lo largo del margen dorsal de caudado, separado del fascículo longitudinal superior por la corona radiada y la cápsula interna.
- Fascículo longitudinal superior: Es el mayor fascículo de asociación. Transita por el centro semioval, por encima del putamen, uniendo los lóbulos frontal, parietal, occipital y temporal. Está formado por 4 fascículos (I, II, III y arcuato), de los que el arcuato es el más importante.
- Fascículo arcuato: Es la parte medial del fascículo longitudinal superior que conecta las cortezas frontal lateral y parietotemporal lateral siguiendo las cápsulas externa y extrema. En el hemisferio dominante izquierdo su estimulación produce una parafasia fonémica, que corresponde a una afasia de conducción (desorden de la forma fonológica de la palabra)¹⁴. En el hemisferio derecho puede tener un papel en el procesamiento de la información

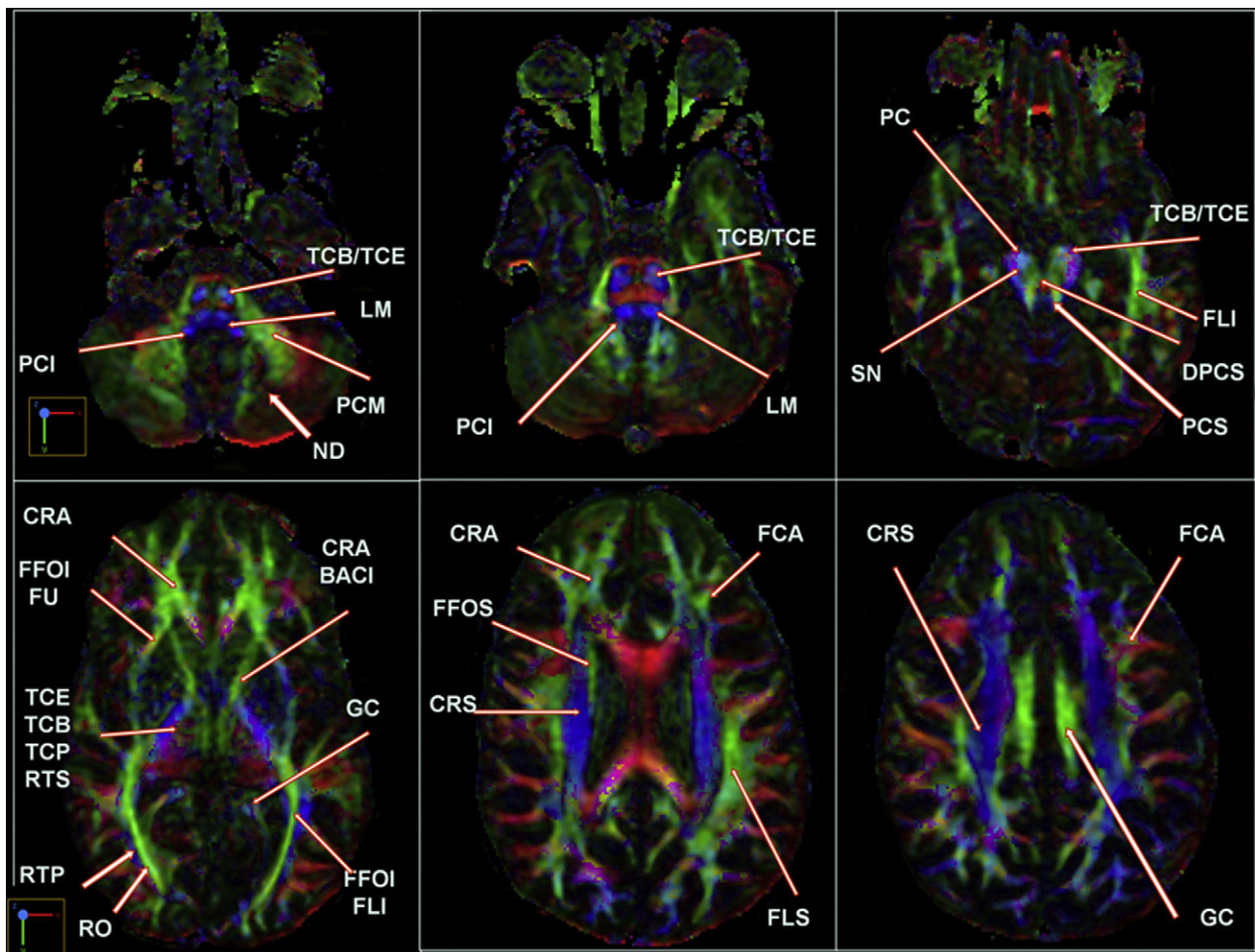


Figura 1 Mapa paramétrico coloreado axial. BACI: brazo anterior de la cápsula interna; BPCI: brazo posterior de la cápsula interna; CRA: corona radiada anterior; CRS: corona radiada superior; FA: fascículo arcuato; FCA: fibras corticales arcuatas; FFOI: fascículo fronto-occipital inferior; FFOS: fascículo fronto-occipital superior; FLI: fascículo longitudinal inferior; FLS: fascículo longitudinal superior; FU: fascículo uncinado; GC: giro cingular; LM: lemnisco medial; ND: núcleo dentado; PC: pedúnculo cerebral; PCI: pedúnculo cerebeloso inferior; PCM: pedúnculo cerebeloso medio; PCS: pedúnculo cerebeloso superior; RO: radiaciones ópticas; RTP: radiación talámica posterior; RTS: radiación talámica superior; SN: sustancia negra; TCB: tracto córtico-bulbar; TCE: tracto córtico-espinal; TCP: tracto córtico-pontino.

visual-espacial¹⁵ y en los aspectos semánticos y prosódicos del lenguaje¹⁴ (fig. 5).

- Fascículo longitudinal inferior: Conecta el lóbulo temporal con el occipital, transitando paralelamente a la pared lateral de las astas temporales. Se une al fascículo fronto-occipital inferior, al margen inferior del fascículo longitudinal superior y a las radiaciones ópticas, para contribuir en gran parte al *stratum* vertical. Es probable que tenga un papel importante en el reconocimiento de objetos visuales y en la lectura¹⁶, pero no es indispensable. Su función puede compensarse tras la resección¹⁷ (fig. 6).
- Cíngulo: Empieza en el área paraolfatoria, bajo el *rostrum* del cuerpo calloso, y se extiende por la circunvolución del cíngulo, rodeando el cuerpo calloso, por las circunvoluciones parahipocámpicas y el uncus. Forma parte del sistema límbico. Conecta áreas de los lóbulos frontal, parietal y temporal.

Fibras de proyección

Interconectan áreas corticales con los núcleos basales, el tálamo, el tronco cerebral, el cerebelo y la médula.

- Tractos córtico-espinales, córtico-bulbares y córtico-pontinos: Son las mayores fibras eferentes de proyección que conectan la corteza motora con el tronco cerebral y la médula espinal. Las fibras convergen en la corona radiada y continúan por el brazo posterior de cápsula interna, el pedúnculo cerebral mesencefálico, hasta terminar los tractos córtico-bulbares y córtico-pontinos en los núcleos motores craneales, y el tracto córtico-espinal en las motoneuronas inferiores medulares tras la decusación bulbar¹⁸ (fig. 7).
- Coronas radiadas: No es un tracto *per se*, sino el conjunto de fibras ascendentes y descendentes que desde la cápsula

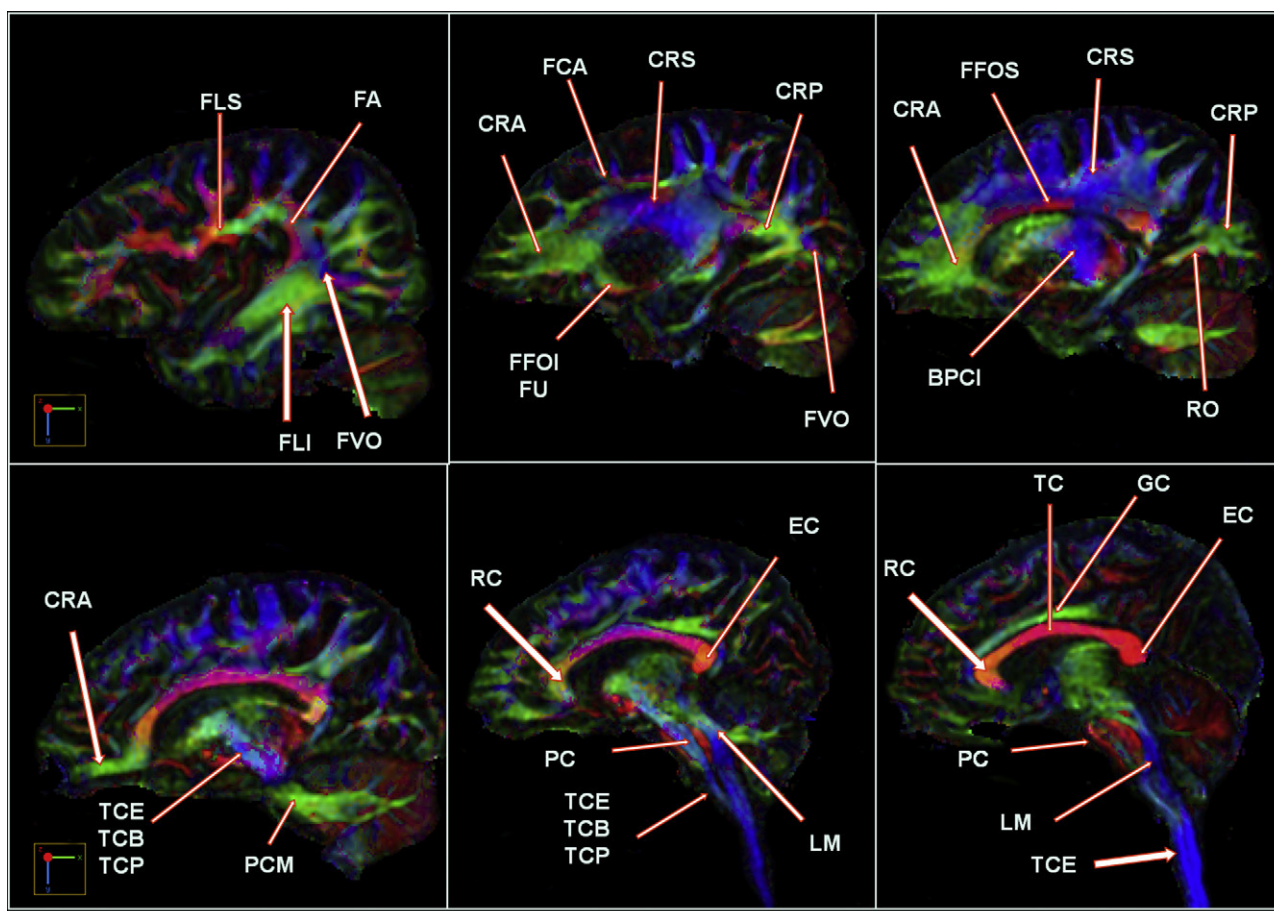


Figura 2 Mapa paramétrico coloreado sagital. BPCI; brazo posterior de la cápsula interna; CRA: corona radiada anterior; CRS: corona radiada superior; CRP: corona radiada posterior; EC: esplenio del cuerpo calloso; FA: fascículo arcuato; FCA: fibras corticales arcuatas; FFOI: fascículo fronto-occipital inferior; FFOS: fascículo fronto-occipital superior; FLI: fascículo longitudinal inferior; FLS: fascículo longitudinal superior; FU: fascículo uncinado; FVO: fascículo vertical occipital; GC: giro cingular; LM: lemnisco medial; PC: pedúnculo cerebral; PCM: pedúnculo cerebeloso medio; RC: rodilla del cuerpo calloso; RO: radiaciones ópticas; TC: tronco del cuerpo calloso; TCB: tracto córtico-bulbar; TCE: tracto córtico-espinal.

interna conectan con la corteza. Están situadas laterales al cuerpo calloso.

- Cápsulas internas: Se divide en brazo anterior, rodilla, brazo posterior, porción sublenticular y retrolenticular. El brazo anterior contiene a las radiaciones talámicas anteriores (asociadas al núcleo dorsomedial) y las fibras fronto-pontinas, que llevan un trayecto antero-posterior. El brazo posterior a los tractos córtico-nucleares (córtico-pontino y córtico-bulbar), córtico-espinales y la radiación talámica superior (asociada al núcleo ventrolateral), con trayecto cráneo-caudal. En la porción sublenticular encontramos las radiaciones ópticas y acústicas, y las fibras córtico-ectales y ténporo-pontinas. La porción retrolenticular a la radiación talámica posterior (asociada al núcleo pulvinar) y fibras parieto-occipito pontinas¹⁹.
- Radiaciones ópticas: Se originan de los núcleos geniculados laterales y se dividen en dos tractos, uno ventral (asa de Meyer) y otro posterior (radiaciones ópticas dorsales). Las fibras de las radiaciones ópticas

dorsales llevan información del campo visual contralateral inferior de ambos ojos. Estas fibras se dirigen al lóbulo occipital y terminan en el margen superior de la cisura calcarina. Las fibras del asa de Meyer pasan por debajo de las radiaciones ópticas dorsales y se dirigen lateralmente hacia el lóbulo temporal, forma un asa alrededor del asta temporal, y termina en el margen inferior de la cisura calcarina. Lleva información del campo visual contralateral superior de ambos ojos²⁰. Se une con el fascículo fronto-occipital inferior, el fascículo longitudinal inferior y las fibras inferiores del fascículo longitudinal superior para formar al *stratum* vertical.

- Lemniscos mediales: Estos tractos son la continuación de las neuronas de segundo orden de los cordones posteriores después de la decusación de las fibras arqueadas. Las neuronas de tercer orden están en los núcleos ventrolaterales dorsales del tálamo y terminan en la corteza parietal por la radiación talámica superior (sensibilidad propioceptiva consciente y tacto epicrítico) (fig. 8).

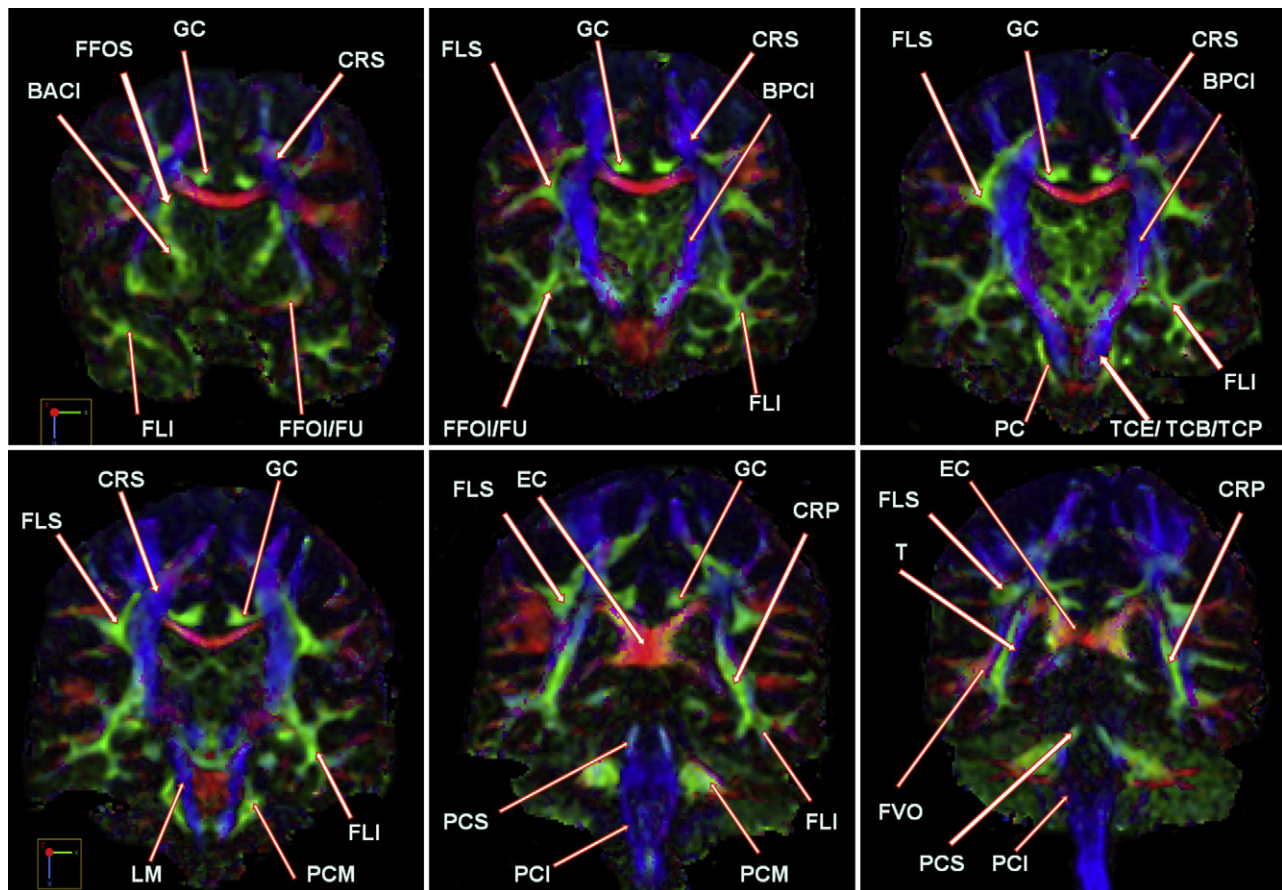


Figura 3 Mapa paramétrico coloreado coronal. BACI: brazo anterior de la cápsula interna; BPCI: brazo posterior de la cápsula interna; CRS: corona radiada superior; CRP: corona radiada posterior; EC: esplenio del cuerpo calloso; FFOI: fascículo fronto-occipital inferior; FFOS: fascículo fronto-occipital superior; FLI: fascículo longitudinal inferior; FLS: fascículo longitudinal superior; FU: fascículo uncinado; FVO fascículo vertical occipital; GC: giro cingular; LM: lemnisco medial; PC: pedúnculo cerebral; PCI: pedúnculo cerebeloso inferior; PCM: pedúnculo cerebeloso medio; PCS: pedúnculo cerebeloso superior; RO: radiaciones ópticas; RTP: radiación talámica posterior; RTS: radiación talámica superior; SN: sustancia negra; T: *tapetum* TCB: tracto córtico-bulbar; TCE: tracto córtico-espinal; TCP tracto córtico-pontino.

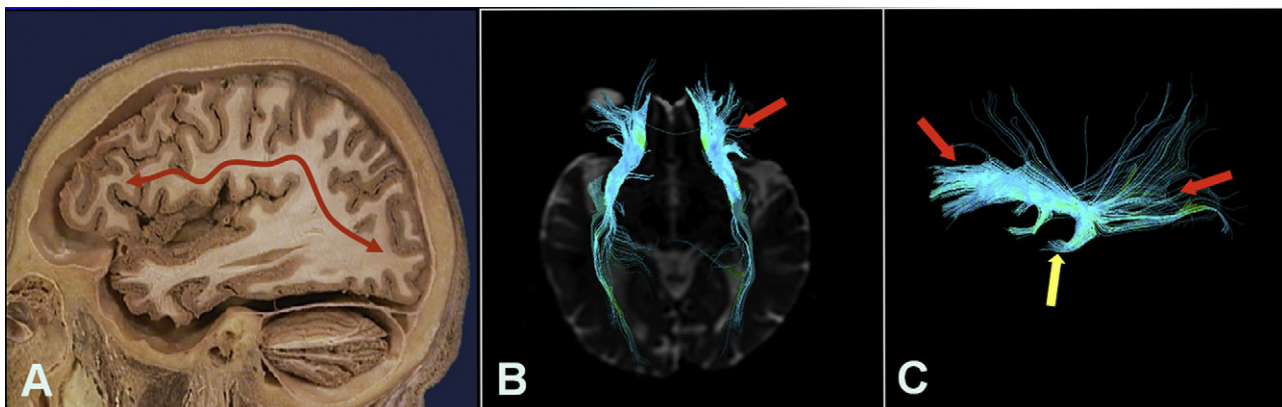


Figura 4 A) Corte anatómico de cadáver parasagital. FFOI. B) TG sobre plano axial y visión cráneo-caudal. FFOI (flecha roja). C) TG visión lateral. FFOI (flechas rojas), FU (flecha amarilla). FU: fascículo uncinado; FFOI: fascículo fronto-occipital inferior; TG: tractografía.

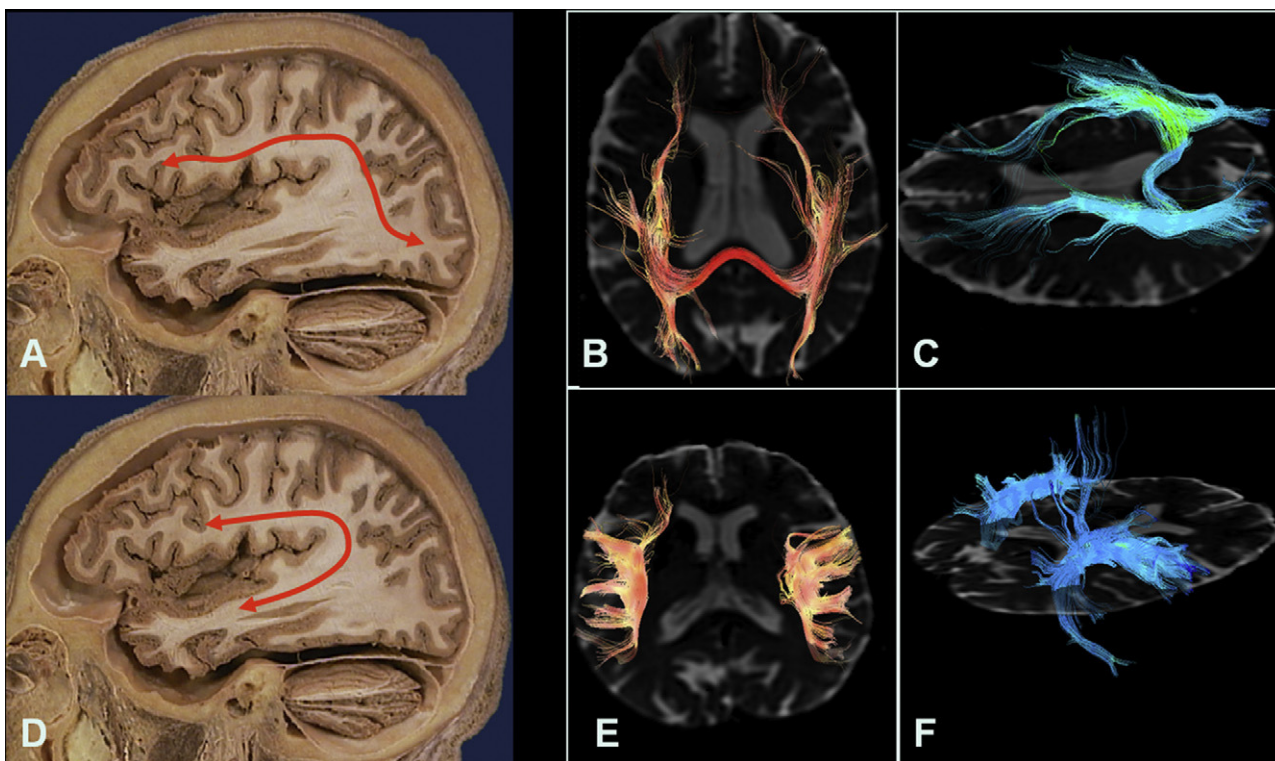


Figura 5 A) Corte anatómico sagital de cadáver. FFOS. B) TG sobre plano axial y visión CC. FFOS. C) TG sobre plano axial y visión lateral. FFOS. D) Corte anatómico sagital de cadáver. FA. E) TG sobre plano axial y visión CC. FA. F) TG sobre plano axial y visión lateral. FA. CC: cráneo-caudal; FA: fascículo arcuato; FFOS: fascículo fronto-occipital superior; TG: Tractografía.

- Fascículos espinocerebelosos inferiores o de Flechsig: Se extiende desde la columna de Clarke (D1-L4) al cerebelo, pasando por los pedúnculos cerebelosos inferiores (sensibilidad propioceptiva inconsciente).
- Fascículos espinocerebelosos superiores o de Gowers: Se extiende desde las neuronas de segundo orden (L1-L5) por los pedúnculos cerebelosos superiores al cerebelo (sensibilidad propioceptiva inconsciente).
- Tractos pontocerebelosos: Conectan las fibras transversas de la protuberancia al cerebelo a través de los pedúnculos cerebelosos medios (fig. 9).

Fibras comisurales

- Cuerpo calloso: Es la comisura más grande, constituida por fibras transversales que unen áreas simétricas de los lóbulos parietales, regiones frontales posteriores y superiores temporales. La rodilla une los lóbulos frontales por el *forceps minor*, y el esplenio los lóbulos occipitales por el *forceps major*. El *tapetum* está constituido por las fibras inferolaterales que rodean el margen lateral de las astas occipitales hacia el lóbulo temporal²¹ (fig. 10).

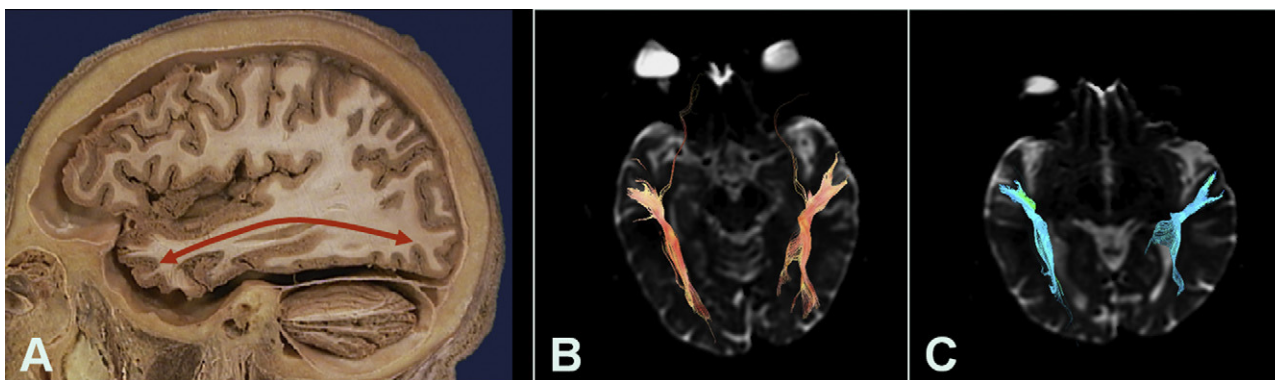


Figura 6 A) Corte anatómico sagital de cadáver. FLI. B y C) Tractografía sobre plano axial y visión cráneo-caudal. FLI. FLI: fascículo longitudinal inferior.

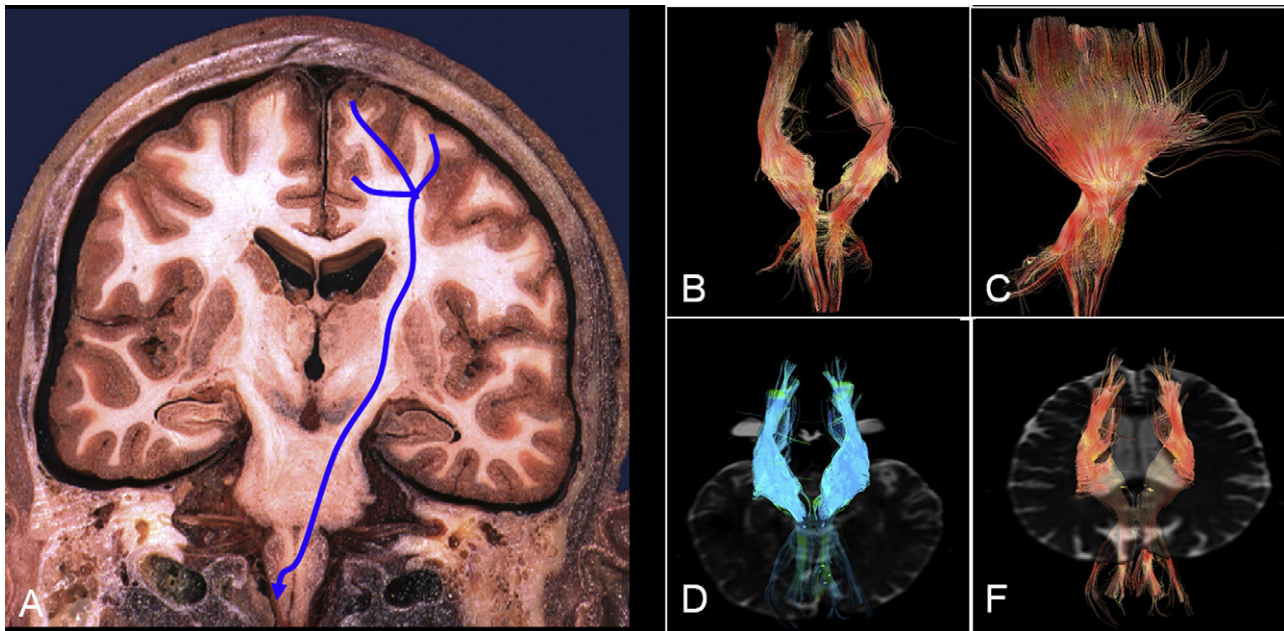


Figura 7 A) Corte anatómico coronal de cadáver. TCE. B) TG visión anterior. TCE. C) TG visión lateral. TCE. D) TG sobre plano axial y visión cráneo-caudal a la altura de los pedúnculos cerebrales. TCE. E) TG sobre plano axial y visión CC a la altura de las coronas radiadas. TCE: tracto córtico-espinal; TG: tractografía.

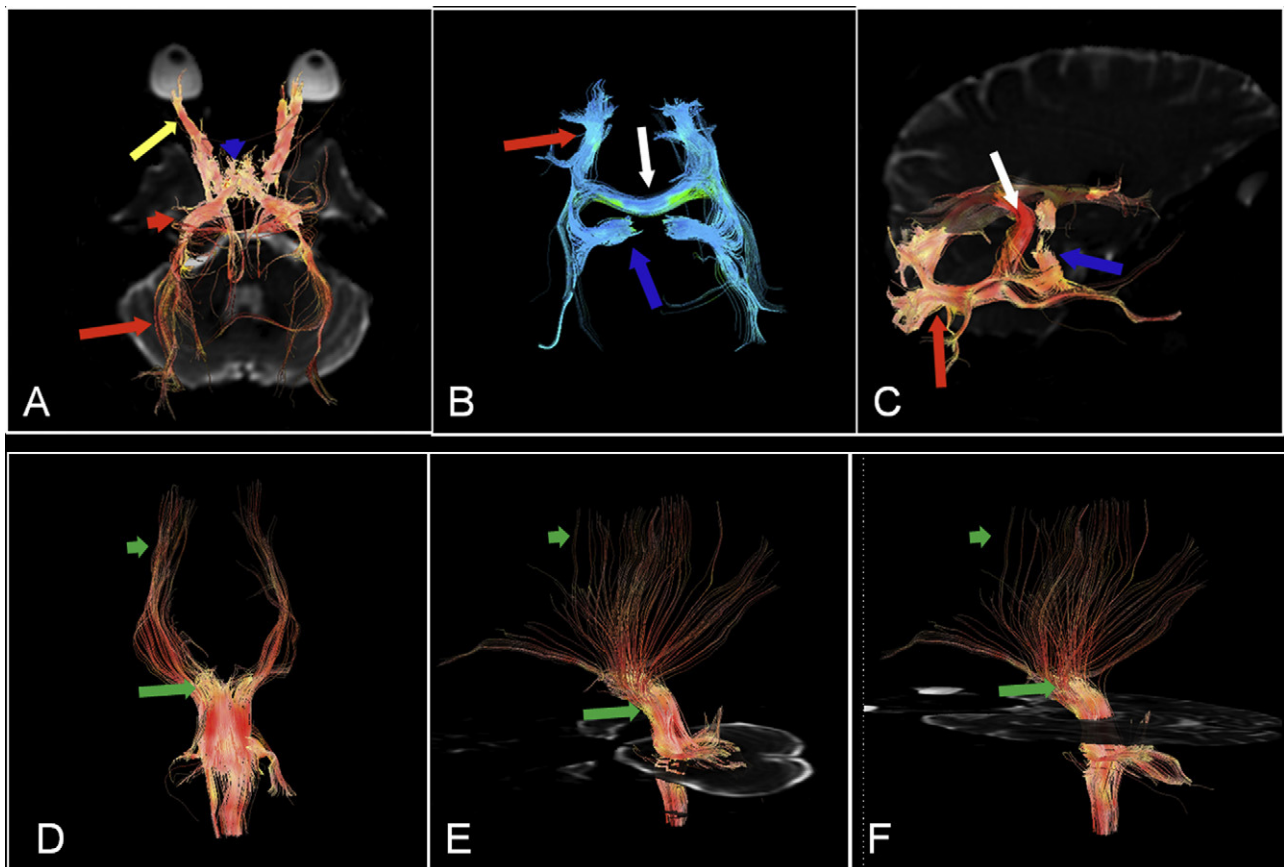


Figura 8 A) Tractografía sobre plano axial y visión CC de la vía óptica. Nervio óptico (flecha amarilla), quiasma (cabeza de flecha azul), cintillas ópticas (flecha roja corta) y radiaciones ópticas dorsales (flecha roja larga). B) TG, visión CC de las RO. C) TG, visión lateral de las RO. RO dorsales (flecha roja), asa de Meyer (flecha azul) y esplenio (flecha blanca). D) TG, visión anterior del LM y RTS. E) TG sobre plano axial y visión lateral del LM y RTS a la altura de los pedúnculos cerebelosos medios. F) TG sobre plano axial y visión lateral del LM y RTS a la altura de los pedúnculos cerebrales. LM (flecha verde larga) y RTS (de flecha verde corta). CC: cráneo-caudal; LM: lemnisco medial; RO: radiaciones ópticas; RTS: radiación talámica superior.

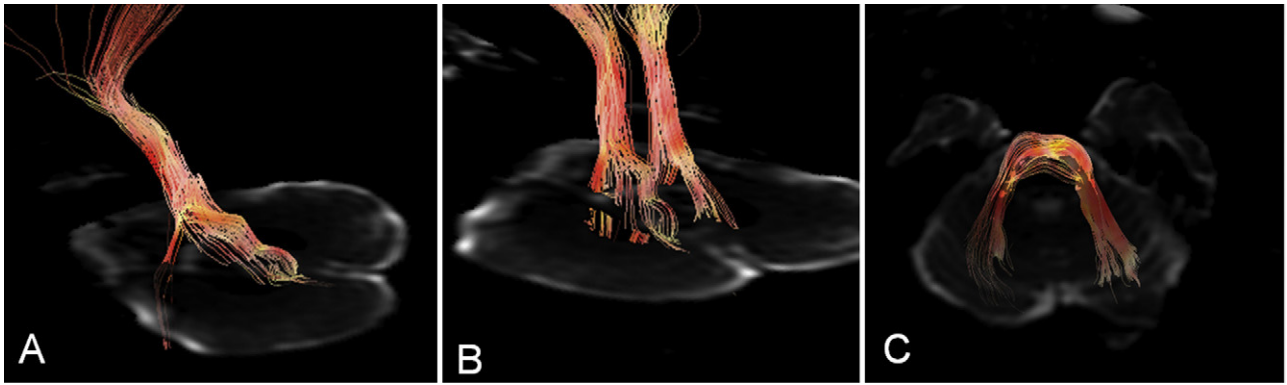


Figura 9 A) TG sobre plano axial y visión lateral del fascículo cerebeloso inferior. B) TG sobre plano axial y visión lateral oblicua del fascículo cerebeloso superior. C) TG sobre plano axial y visión cráneo-caudal de los tractos pontocerebelosos en los PCM.

- Comisura anterior: Las fibras trasversales cruzan por la lamina *terminalis* y conectan los bulbos y los núcleos olfatorios con las circunvoluciones temporales medias.
- Comisura posterior: Es un haz de fibras nerviosas que atraviesa la línea media inmediatamente por encima del orificio del acueducto cerebral hacia el tercer ventrículo. Las fibras de los núcleos pretectales que intervienen en el reflejo pupilar de la luz cruzan esta comisura en su camino hacia la porción parasimpática de los núcleos del nervio motor ocular común.
- Comisura gris intertalámica o masa intermedia: Conecta ambos tálamos en el tercer ventrículo.
- Psalterium o lira de David: Fibras transversales interhemisféricas del fórnix que conectan el sistema límbico, sobre todo los hipocampos (fig. 11).

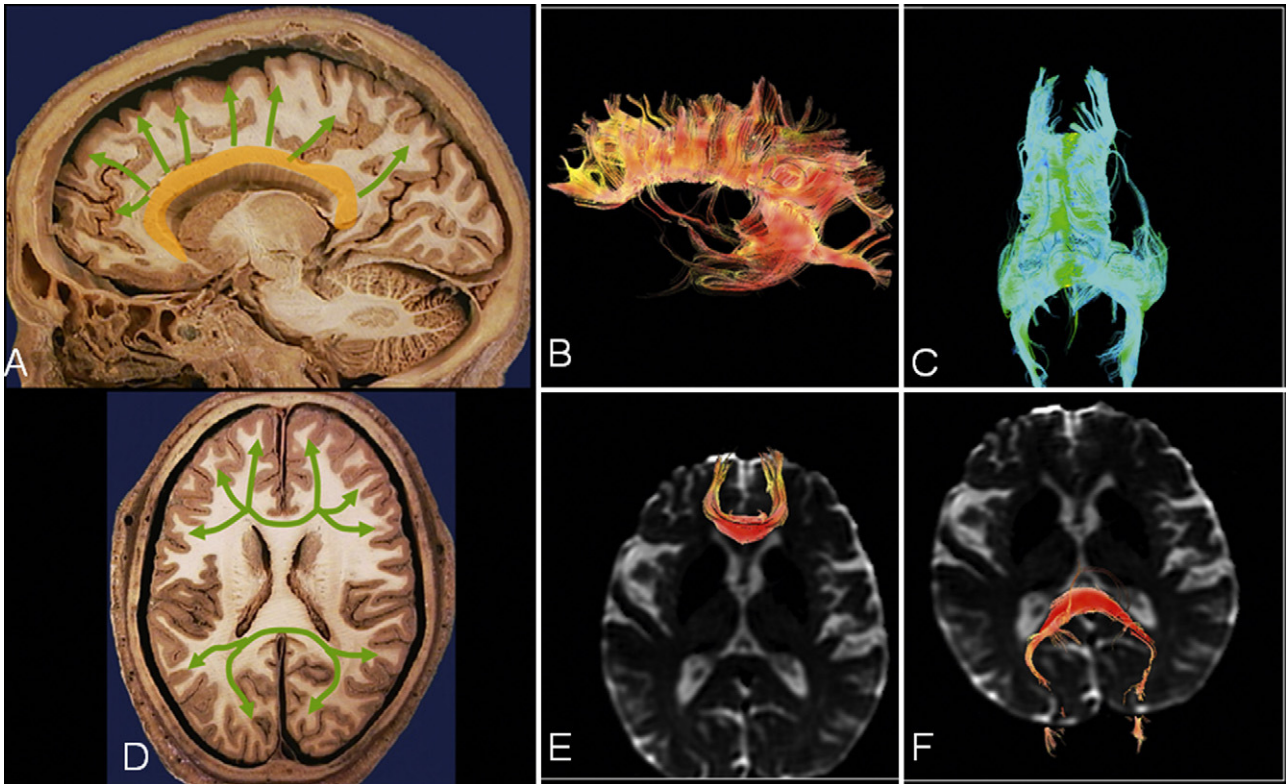


Figura 10 A) Corte anatómico sagital de cadáver. Cuerpo calloso. B) TG visión lateral del cuerpo calloso. C) TG sobre visión CC del cuerpo calloso. D) Corte anatómico axial de cadáver. *Forceps minor* (anterior) y *forceps major* (posterior). E) TG sobre plano axial, visión CC. *Forceps minor*. F) TG sobre plano axial, visión CC. *Forceps major*. CC: cráneo-caudal; TG: tractografía.

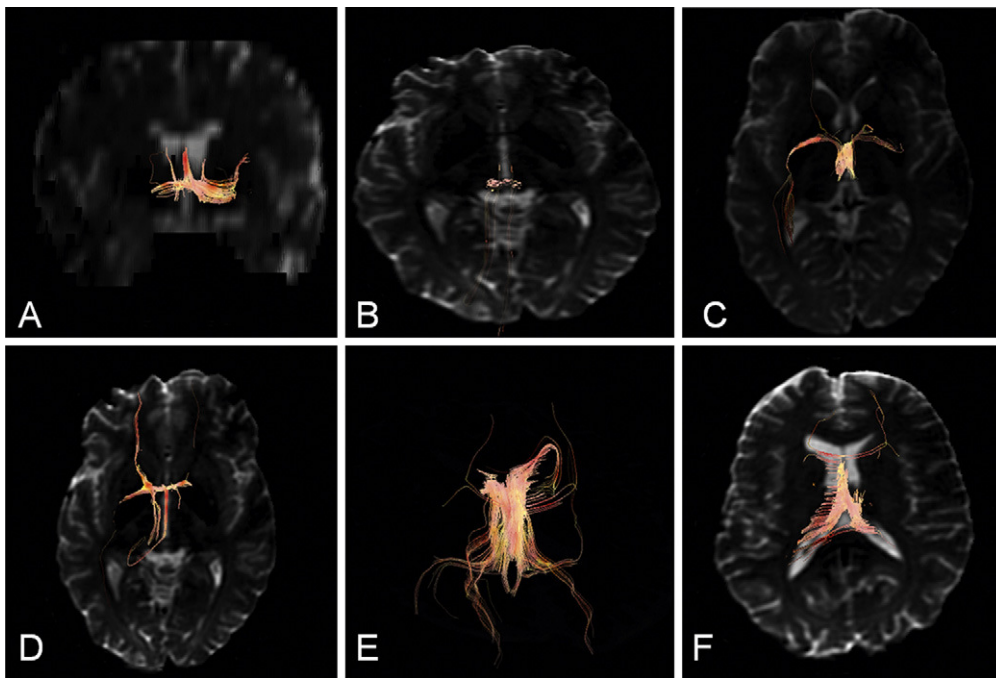


Figura 11 A) TG sobre plano coronal y visión anterior. Comisura anterior. B) TG sobre plano axial y visión CC de la comisura posterior. C) TG sobre plano axial y visión CC de la comisura gris intertalámica. D) TG sobre plano axial y visión CC. Comisura anterior. E) TG, visión CC del *psalterium* o lira de David. F) TG sobre plano axial y visión CC *psalterium* o lira de David. CC: craneo-caudal; TG: tractografía.

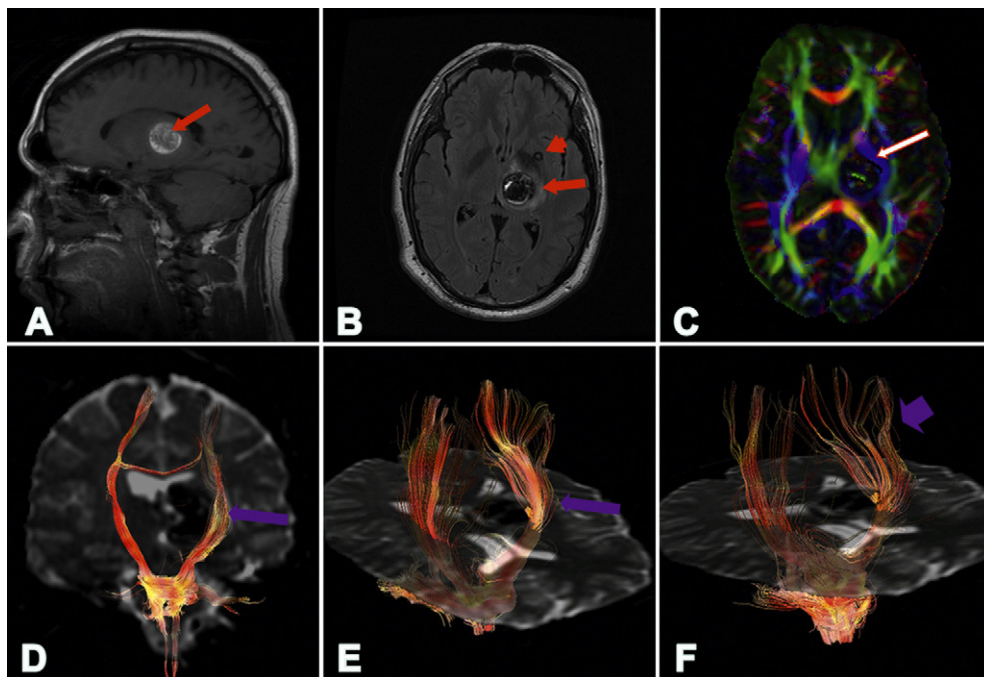


Figura 12 A) Resonancia Magnética. Secuencia sagital SE T1. Hematoma subagudo en un cavernoma talámico izquierdo (flecha roja). B) Resonancia Magnética. Secuencia axial FLAIR. Hematoma subagudo en el mismo cavernoma talámico izquierdo (flecha roja larga) con edema en la cápsula interna. Hay otro pequeño cavernoma que no ha sangrado en el núcleo lenticular izquierdo (flecha roja corta). C) Mapa paramétrico coloreado axial. Desplazamiento anterior y lateral de las fibras en la cápsula interna izquierda por el efecto de masa del hematoma (flecha blanca). D) TG sobre plano coronal y visión anterior, y E) Plano axial y visión lateral oblicua. Desplazamiento anterior y lateral del tracto córtico-espinal por el hematoma (flechas moradas). F) TG sobre plano axial y visión lateral oblicua. Lemnisco medial y radiación talámica superior. Desplazamiento anterior y lateral de las fibras sensitivas (flecha azul). TG: tractografía.

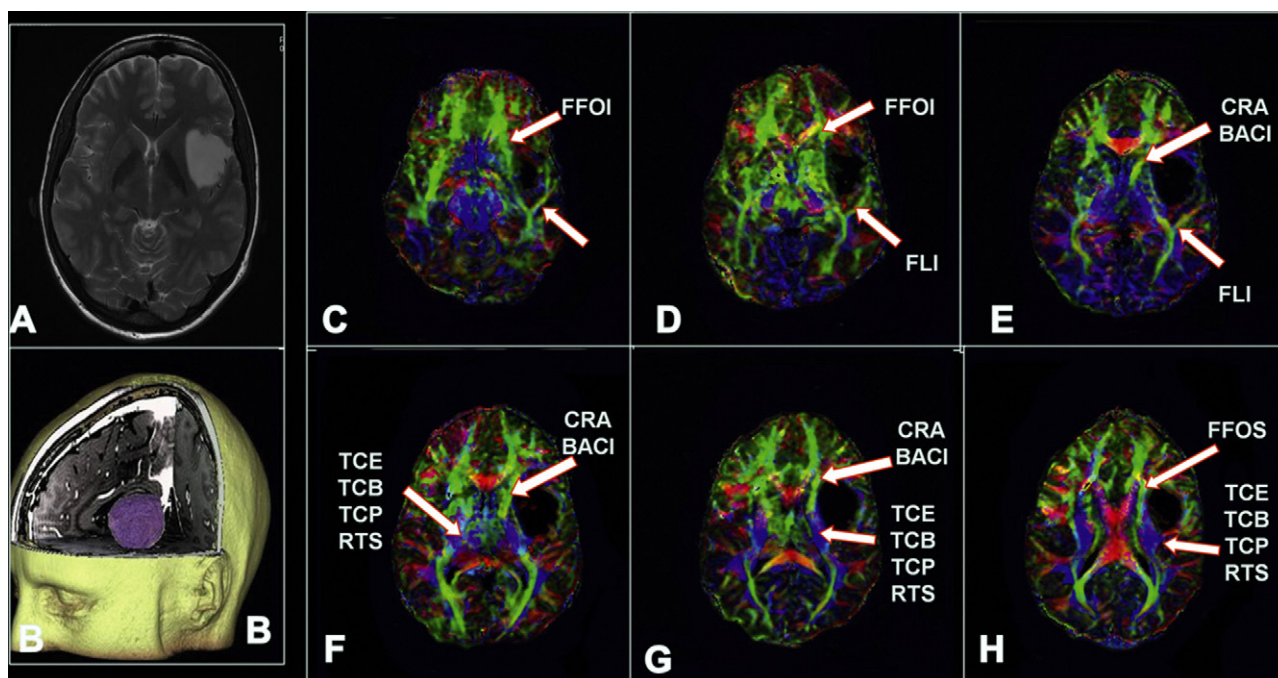


Figura 13 Oligodendroglioma grado II. A. Resonancia Magnética. Secuencia axial FRSE T2. B. Resonancia magnética. Secuencia 3D SPGR, *volume rendering* corte antero-superior. Tumor insular izquierdo. C, D, E, F y H mapas paramétricos coloreados axiales. El tumor desplaza en dirección medial las fibras del fascículo fronto-occipital inferior, corona radiada anterior, y contacta con el fascículo longitudinal inferior.

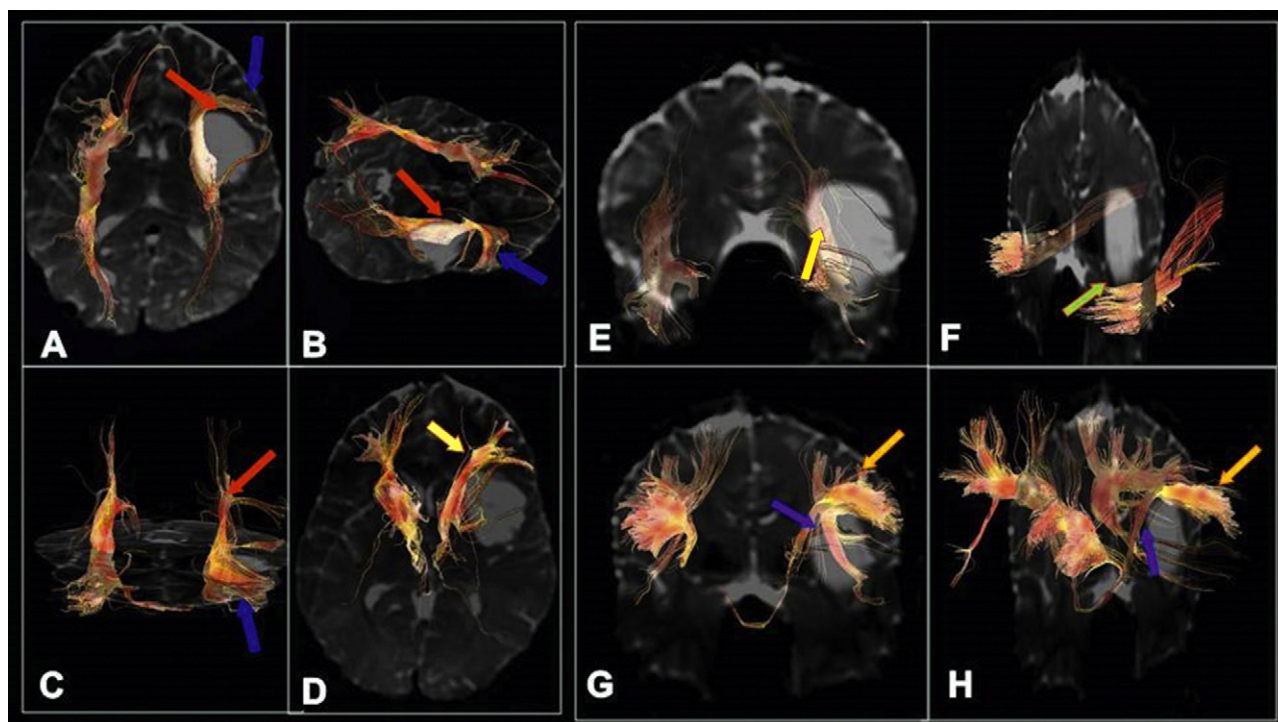


Figura 14 Oligodendroglioma grado II. A) TG axial sobre plano axial con visión CC. B) TG sobre plano axial y visión lateral oblicua, y C) TG sobre plano axial y visión anterior. Fascículo uncinado (flechas azules). Desplazamiento medial del fascículo fronto-occipital izquierdo (flechas rojas). D) TG axial sobre plano axial y visión CC. Coronas radiadas anteriores. Desplazamiento medial de la corona radiada izquierda (flecha amarilla). E) TR sobre plano coronal y visión anterior, y F) TR sobre plano coronal y visión lateral oblicua. FLI. El tumor está en íntimo contacto con el FLI izquierdo (flecha amarilla), sin afectarlo. G) TG sobre plano coronal y visión anterior, y F) TG sobre plano sagital y visión anterior oblicua. Fascículo longitudinal superior (flechas amarillas) y Fascículo arcuado (flechas moradas) que no presentan alteraciones. CC: cráneo-caudal; FLI: fascículo longitudinal inferior; TG: tractografía.

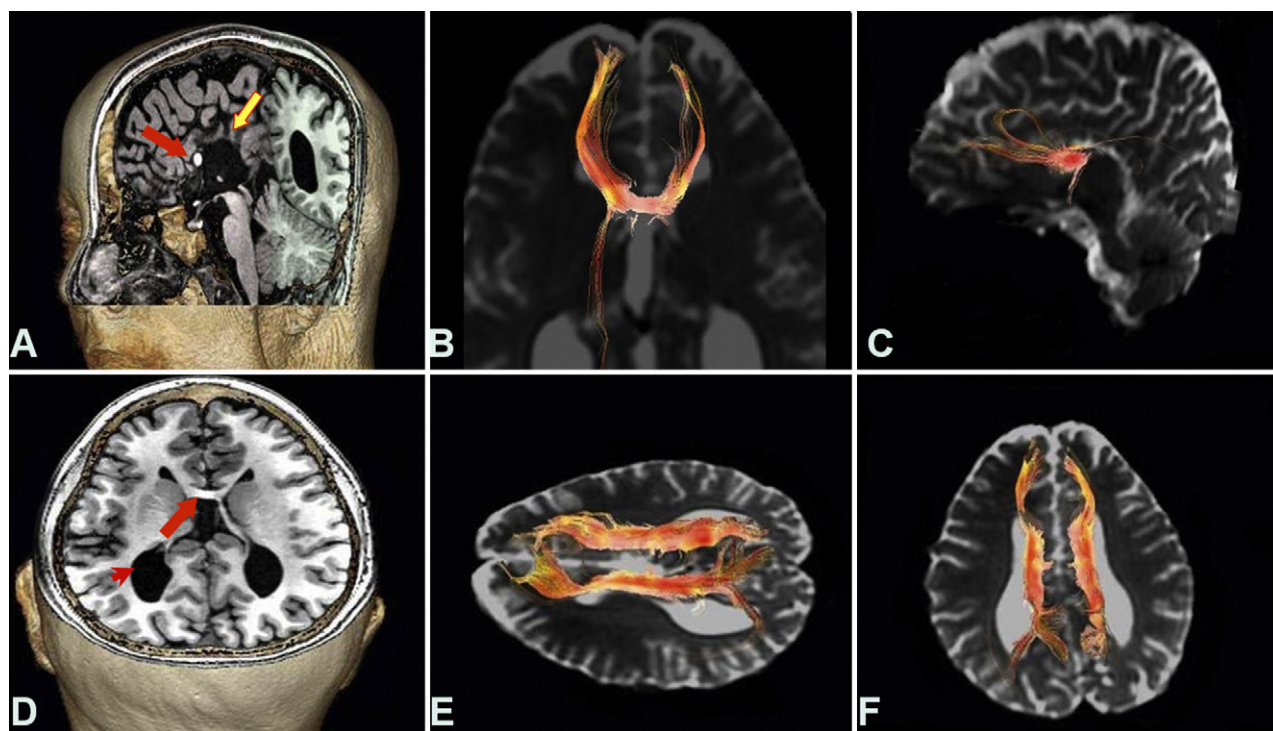


Figura 15 Agnesia del cuerpo calloso. A) Resonancia magnética. Secuencia 3D SPGR, reconstrucción VR con corte antero-superior. Se identifica la rodilla del cuerpo calloso (flecha roja) y agnesia del resto del calloso. Se observan circunvoluciones radiales que alcanzan el techo del tercer ventrículo (flecha amarilla). B) TG sobre plano axial y visión CC, y C) TG sobre plano axial y visión lateral y oblicua. El fórceps menor (*forceps minor*) comunica ambos lóbulos frontales por la rodilla del cuerpo calloso. D) Resonancia magnética. Secuencia 3D SPGR, reconstrucción VR, corte superior. Se identifica la rodilla del cuerpo calloso (flecha roja larga), agnesia del resto del calloso y colpocefalia (flecha roja corta). E) TG sobre plano axial y visión lateral, y F) TG sobre plano axial y visión CC. Los haces de Probst improntan sobre el margen pósterio-medial de los cuerpos ventriculares, sin conexión interhemisférica. CC: cráneo-caudal; TG: Tractografía; VR: volume rendering.

Debe recordarse que la TG es la única técnica no invasiva que permite la «dissección» *in vivo* de las fibras de proyección, de asociación y comisurales. Las principales vías desde el punto de vista funcional son las vías motoras (tracto córtico-espinal), el lenguaje (sobre todo fascículo arcuato y fascículo fronto-occipital inferior) y la vía visual (radiaciones ópticas dorsales y asa de Meyer).

Aplicaciones

Debe recordarse que la TG es una herramienta poderosa en el estudio preoperatorio que permite obtener un mapa subcortical de áreas funcionales. Sin embargo, el mapeo cortical y la técnica de estimulación directa eléctrica subcortical (*subcortical direct electrical stimulations* [DESS]) son el estándar para definir los límites funcionales de reseccabilidad²². La combinación de TG y DESS reduce la duración de la cirugía, la fatiga del paciente y las crisis intraoperatorias²³. Debe recordarse que la TG del haz córtico-espinal constituye la única indicación clínica en la que existe una amplia experiencia y se ha validado con excelente correlación con la DESS en el 92-95% de los casos²⁴ (fig. 12).

En las lobectomías temporales, la TG de las radiaciones ópticas puede mostrar la variabilidad del asa de Meyer previa a la cirugía y ayudar a predecir déficits visuales

postquirúrgicos^{25,26}. Debe recordarse que la TG del lenguaje (FA, FFOI, FLI y FU) presenta una buena correlación con la DESS que sugiere que es una técnica fiable. Pero esta técnica no es óptima en el estudio del lenguaje, ya que una TG negativa no excluye la existencia de fibras funcionales, especialmente cuando son infiltradas por el tumor¹⁰ (figs. 13 y 14).

Por último, la TG ofrece información sobre la afectación de los haces por diferentes afecciones: malformaciones congénitas²⁷ (fig. 15), afección hipóxico-isquémica²⁸, enfermedades desmielizantes²⁹ o neurodegenerativas³⁰.

Conclusión

La TG es la única técnica no invasiva que permite la «dissección» *in vivo* de los tractos de la sustancia blanca y aporta una información clave en el estudio anatómico. Su mayor aplicación clínica es la obtención de mapas preoperatorios, sobre todo del haz córtico-espinal, debiéndose analizar siempre junto con el MPC.

Autoría

1. Responsable de la integridad del estudio: MRR, DHA, LCGH, JCA y VMVF.

2. Concepción del estudio: MRR, DHA, LCGH, JCA y VMVF.
3. Diseño del estudio: MRR, DHA, LCGH, JCA y VMVF.
4. Obtención de los datos: MRR, DHA, LCGH y JCA.
5. Análisis e interpretación de los datos: MRR, DHA, LCGH y JCA.
6. Tratamiento estadístico: no procede.
7. Búsqueda bibliográfica: MRR, DHA y JCA.
8. Redacción del trabajo: MRR, DHA, LCGH, JCA y VMVF.
9. Revisión crítica del manuscrito con aportaciones intelectualmente relevantes: MRR, LCGH y VMVF.
10. Aprobación de la versión final: MRR, DHA, LCGH, JCA y VMVF.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, Grenier P, Cabanis E, Laval-Jeantet M, et al. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders. *Radiology*. 1986;161:401-7.
2. Yang E, Nucifora PG, Melhem ER. Diffusion MR imaging: basic principles. *Neuroimaging Clin N Am*. 2011;21:1-25.
3. Beaulieu C. The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system - a technical review. *NMR Biomed*. 2002;15:435-55.
4. Jones DK, Horsfield MA, Simmons A. Optimal strategies for measuring diffusion in anisotropic systems by magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med*. 1999;42:515-25.
5. Hasan KM, Parker DL, Alexander AL. Comparison of gradient encoding schemes for diffusion-tensor MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2001;13:769-80.
6. Jones DK. The effect of gradient sampling schemes on measures derived from diffusion tensor MRI: a Monte Carlo study. *Magn Reson Med*. 2004;51:807-15.
7. Mori S, Crain BJ, Chacko VP, van Zijl PC. Three-dimensional tracking of axonal projections in the brain by magnetic resonance imaging. *Ann Neurol*. 1999;45:265-9.
8. Catani M, Howard RJ, Pajevic S, Jones DK. Virtual in vivo interactive dissection of white matter fasciculi in the human brain. *Neuroimage*. 2002;17:77-94.
9. Le Bihan D, Poupon C, Amadon A, Lethimonnier F. Artifacts and pitfalls in diffusion MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2006;24:478-88.
10. Leclercq D, Duffau H, Delmaire C, Capelle L, Gatignol P, Ducros M, et al. Comparison of diffusion tensor imaging tractography of language tracts and intraoperative subcortical stimulations. *J Neurosurg*. 2010;112:503-11.
11. Doricchi F, Thiebaut de Schotten M, Tomaiuolo F, Bartolomeo P. White matter (dis)connections and gray matter (dys)functions in visual neglect: gaining insights into the brain networks of spatial awareness. *Cortex*. 2008;44:983-95.
12. Fox CJ, Iaria G, Barton JJ. Disconnection in prosopagnosia and face processing. *Cortex*. 2008;44:996-1009.
13. Rudrauf D, Mehta S, Grabowski TJ. Disconnection's renaissance takes shape: formal incorporation in group-level lesion studies. *Cortex*. 2008;44:1084-96.
14. Catani M, Mesulam M. The arcuate fasciculus and the disconnection theme in language and aphasia: history and current state. *Cortex*. 2008;44:953-6.
15. Thiebaut de Schotten M, Kinkingnéhun S, Delmaire C, Lehericy S, Duffau H, Thivard L, et al. Visualization of disconnection syndromes in humans. *Cortex*. 2008;44:1097-103.
16. Epelbaum S, Pinel P, Gaillard R, Delmaire C, Perrin M, Dupont S, et al. Pure alexia as a disconnection syndrome: new diffusion imaging evidence for an old concept. *Cortex*. 2008;44:962-74.
17. Shinoura N, Suzuki Y, Tsukada M, Yoshida M, Yamada R, Tabei Y, et al. Deficits in the left inferior longitudinal fasciculus results in impairments in object naming. *Neurocase*. 2010;16:135-9.
18. Newton JM, Ward NS, Parker GJ, Deichmann R, Alexander DC, Friston KJ, et al. Non-invasive mapping of corticofugal fibres from multiple motor areas-relevance to stroke recovery. *Brain*. 2006;129:1844-58.
19. Jellison BJ, Field AS, Medow J, Lazar M, Salamat MS, Alexander AL. Diffusion tensor imaging of cerebral white matter: a pictorial review of physics, fiber tract anatomy, and tumor imaging patterns. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2004;25:356-69.
20. Choi C, Rubino PA, Fernandez-Miranda JC, Abe H, Rhoton Jr AL. Meyer's loop and the optic radiations in the transsylvian approach to the mediobasal temporal lobe. *Neurosurgery*. 2006;59:228-36.
21. Wiegell MR, Larsson HBW, Wedeen VJ. Fiber crossing in human brain depicted with diffusion tensor MR imaging. *Radiology*. 2000;217:897-903.
22. Duffau H. New concepts in surgery of WHO grade II gliomas: functional brain mapping, connectionism and plasticity-a review. *J Neurooncol*. 2006;79:77-115.
23. Bello L, Gambini A, Castellano A, Carrabba G, Acerbi F, Fava E, et al. Motor and language DTI Fiber Tracking combined with intraoperative subcortical mapping for surgical removal of gliomas. *Neuroimage*. 2008;39:369-82.
24. Coenen VA, Krings T, Axer H, Weidemann J, Kränzlein H, Hans FJ, et al. Intraoperative three-dimensional visualization of the pyramidal tract in a neuronavigation system (PTV) reliably predicts true position of principal motor pathways. *Surg Neurol*. 2003;60:381-90.
25. Chen X, Weigel D, Ganslandt O, Buchfelder M, Nimsky C. Prediction of visual field deficits by diffusion tensor imaging in temporal lobe epilepsy surgery. *Neuroimage*. 2009;45:286-97.
26. Yogarajah M, Focke NK, Bonelli S, Cercignani M, Acheson J, Parker GJ, et al. Defining Meyer's loop-temporal lobe resections, visual field deficits and diffusion tensor tractography. *Brain*. 2009;132:656-68.
27. Eriksson SH, Rugg-Gunn FJ, Symms MR, Barker GJ, Duncan JS. Diffusion tensor imaging in patients with epilepsy and malformations of cortical development. *Brain*. 2001;124:617-26.
28. Lee JS, Han MK, Kim SH, Kwon OK, Kim JH. Fiber tracking by diffusion tensor imaging in corticospinal tract stroke: topographical correlation with clinical symptoms. *Neuroimage*. 2005;26:771-6.
29. Filippi M, Cercignani M, Inglese M, Horsfield MA, Comi G. Diffusion tensor magnetic resonance imaging in multiple sclerosis. *Neurology*. 2001;56:304-11.
30. Bozzali M, Falini A, Franceschi M, Cercignani M, Zuffi M, Scotti G, et al. White matter damage in Alzheimer's disease assessed in vivo using diffusion tensor magnetic resonance imaging. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002;72:742-6.