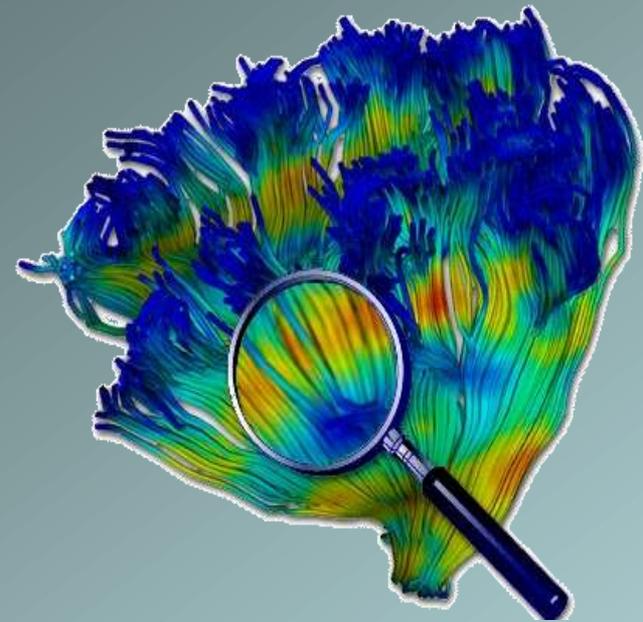




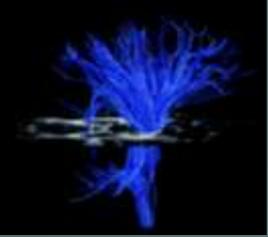
TRACTOGRAFIA POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

- Processamento de Sinal e Imagem -



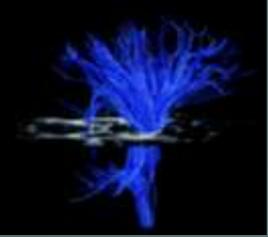
Ana Filipa Dourado
Vítor Silva

- 6 Junho 2008 -



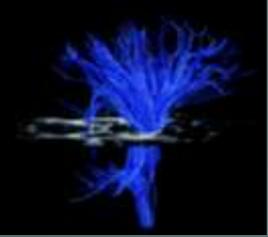
Outline / Sumário:

- Introdução ao Tema;
- Breve abordagem anátomo-fisiológica cerebral;
- Princípios de formação de imagem por RM;
- Conceito de Difusão;
- Tensor de Difusão por RM;
- Técnicas de Processamento de imagem para visualização do tensor difusão e Tractografia;
- Aplicações;
- Conclusão.



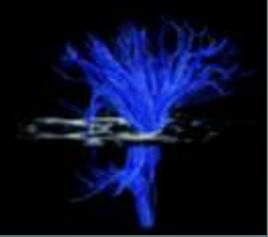
Introdução:

- O estudo das vias nervosas presentes na substância branca são essenciais para o diagnóstico e o entendimento de patologias como por exemplo: distúrbios da linguagem, da aprendizagem e da fala;
- Recentemente surgiu uma técnica de imagem de estudo destas vias (primeiro estudo por Basser, 1994), não invasiva, que tem motivado neurologistas, neurocirurgiões e neurocientistas para um maior entendimento do funcionamento cerebral. Trata-se da imagem por tensão difusional ou DTI;
- Esta aplicação também tem sido usada recentemente na avaliação das fibras do miocárdio.

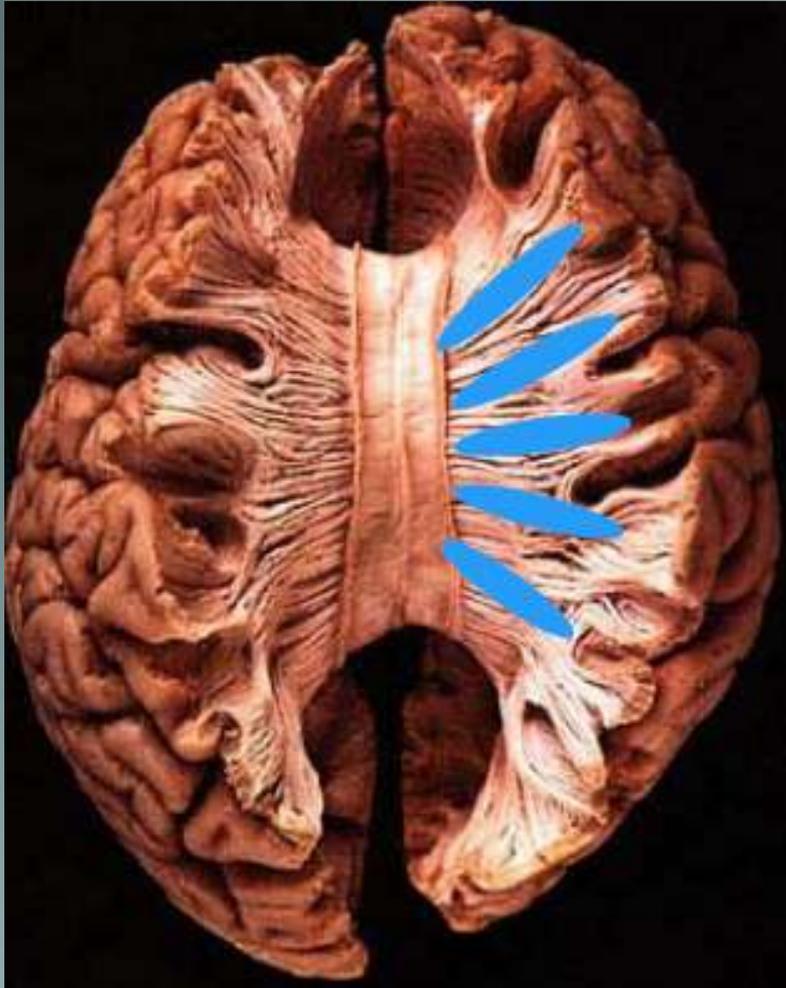


Introdução ao Tema:

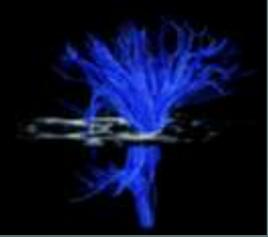
- A técnica de tractografia por ressonância magnética avalia as fibras nervosas através dos traços da difusão da água representada por um tensor, com a união de pontos e formando a imagem de uma via nervosa;
- A técnica de tractografia por RM não demonstra fibra a fibra mas sim um conjunto delas, indicando possíveis trajectos nervosas pela substância branca.



Anatomia Cerebral:

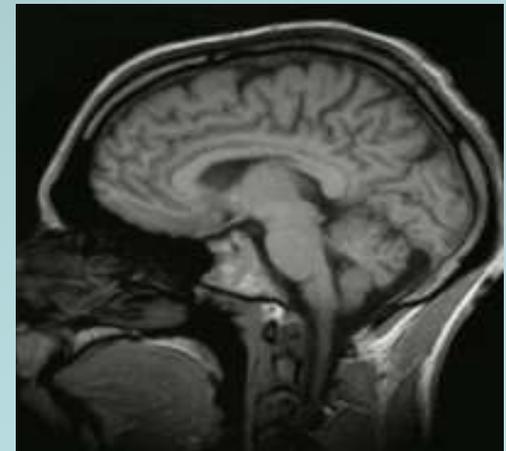


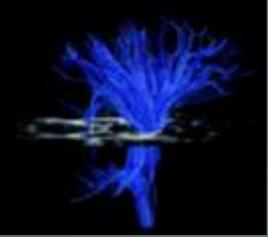
Imagens retiradas de Virtual Hospital (www.vh.org)



Cérebro Humano:

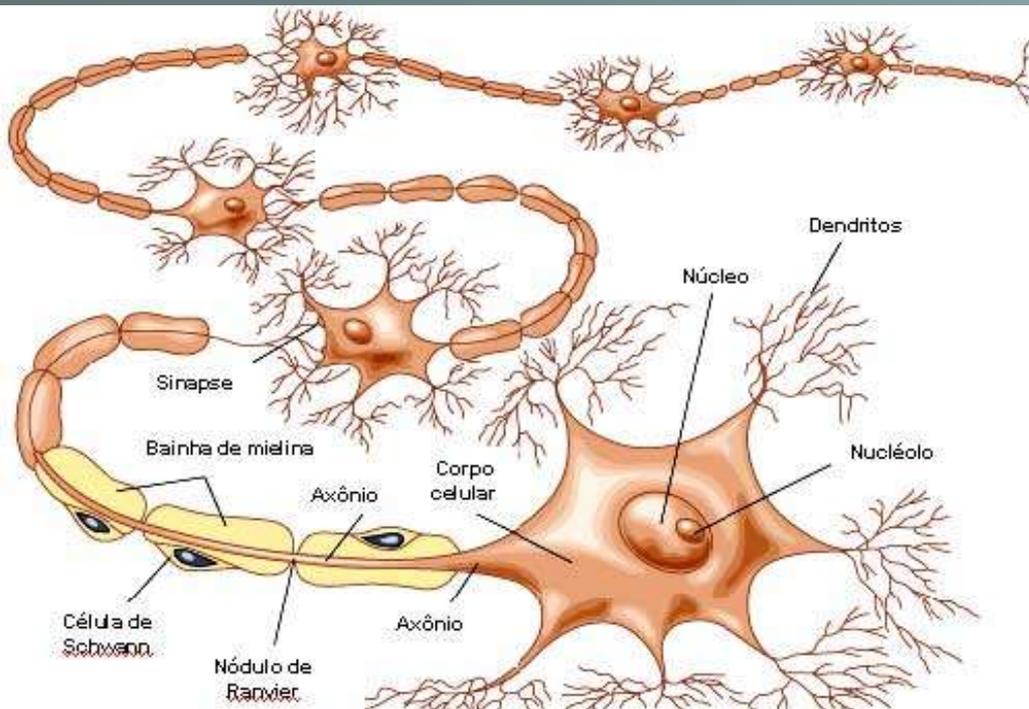
- Cérebro humano é imóvel e representa 2% do peso corporal;
- Tem 2 hemisférios (corpo caloso a dividi-los);
- Composto por milhões de neurónios;
- Distinção de substância cinzenta (córtex cerebral - neurónios) de substância branca (esta composta pelas fibras dos axónios);
- Dividido em lobos cerebrais.





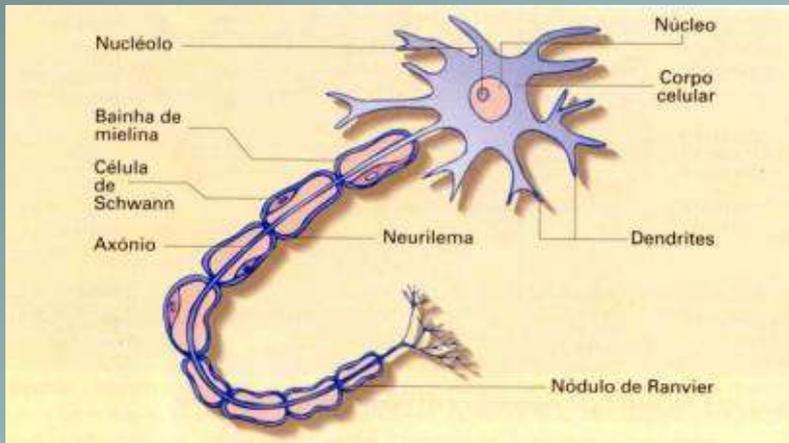
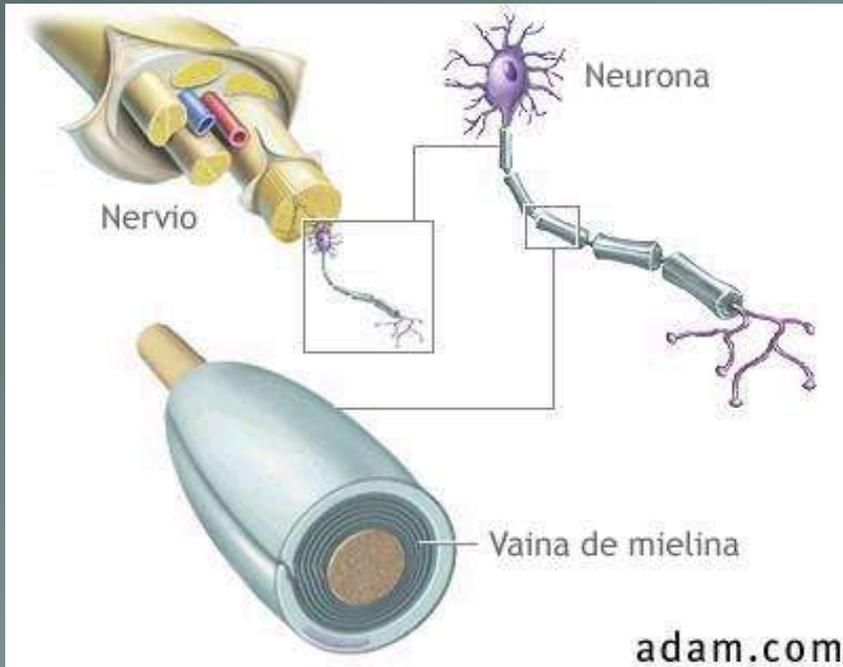
Neurônio:

- Corpo celular (um único núcleo);
- Dendrites (numerosos, curtos, ramificados, não têm bainha de mielina);
- Axônio (extensão citoplasmática alongada); possui **mielina.**





Camada de Mielina:



- Hipótese preferida para explicar a anisotropia da difusão em tecidos cerebrais.

- Tem permeabilidade limitada, restringindo a difusão perpendicular à direcção das fibras;

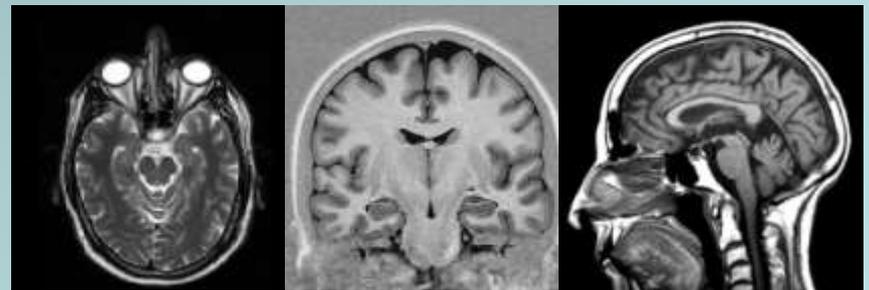
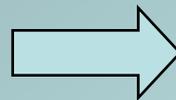
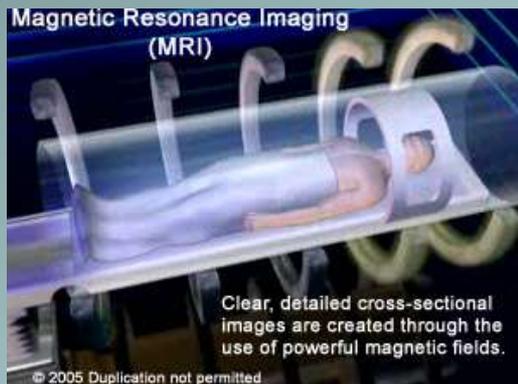
- Aumentou o interesse em estudos relacionados a doenças (desmielinização) e maturação da substância branca;

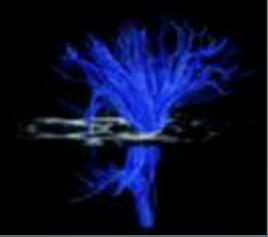
- Como consequência, fibras não-mielinizadas devem ser mais isotrópicas;



Princípios Físicos da RM:

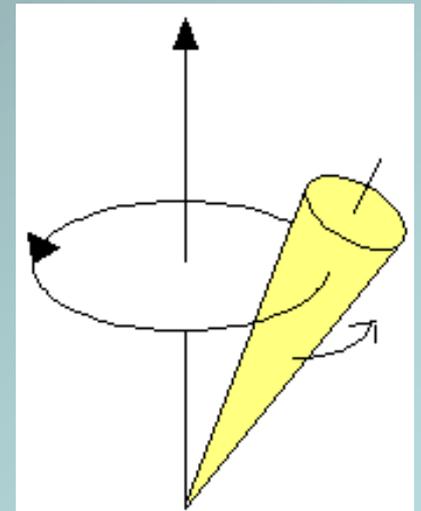
- Método de imagem que consiste em gerar imagens seccionais do corpo humano;
- Tem como base a interacção de um elevado campo magnético com pulsos de radiofrequência e com os núcleos dos átomos que constituem o corpo humano.



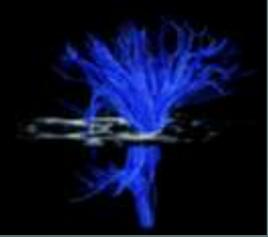


Princípios Físicos da RM:

- Os núcleos em IRM, devem possuir um momento angular , ou spin diferente de zero;
- Na presença de um campo magnético, o núcleo em causa descreverá um movimento de acordo com este - precessão;
- O núcleo de hidrogénio é a base da IRM, não só pela sua elevada abundância no corpo humano , mas também porque tem elevada sensibilidade magnética.

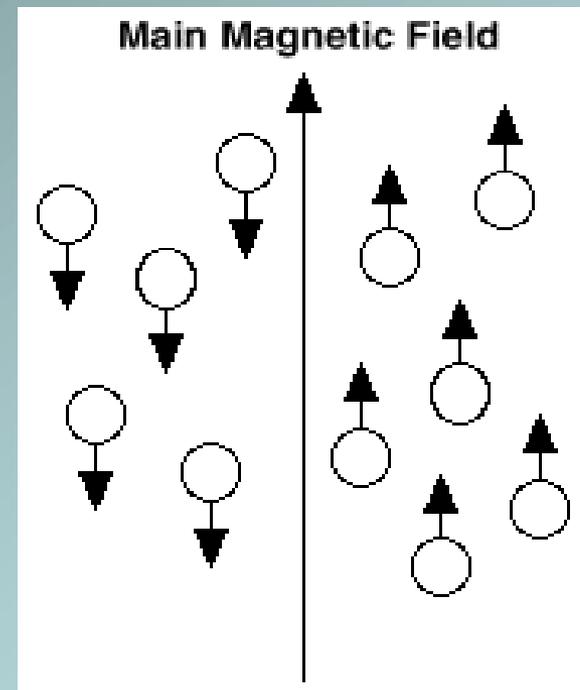


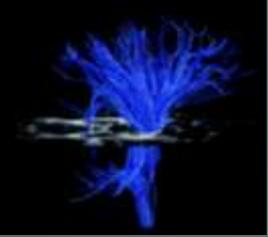
<http://static.hsw.com.br/gif/mri-top.gif>



Princípios Físicos da RM:

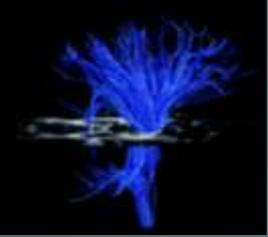
- Após a colocação do paciente num campo magnético externo, potente e uniforme, os prótons de hidrogénio tendem para se orientar:
 - Paralelamente ao campo (estado de equilíbrio);
 - Anti-paralelamente ao campo (estado de excitação).





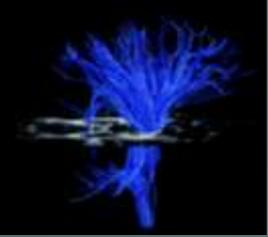
Formação da Imagem:

- O sinal de ressonância magnética, captado pelas antenas, vai ser localizado e codificado através dos gradientes, no espaço K (representação dos dados brutos);
- Posteriormente, o sinal é reconstruído através da transformada de Fourier em imagem.



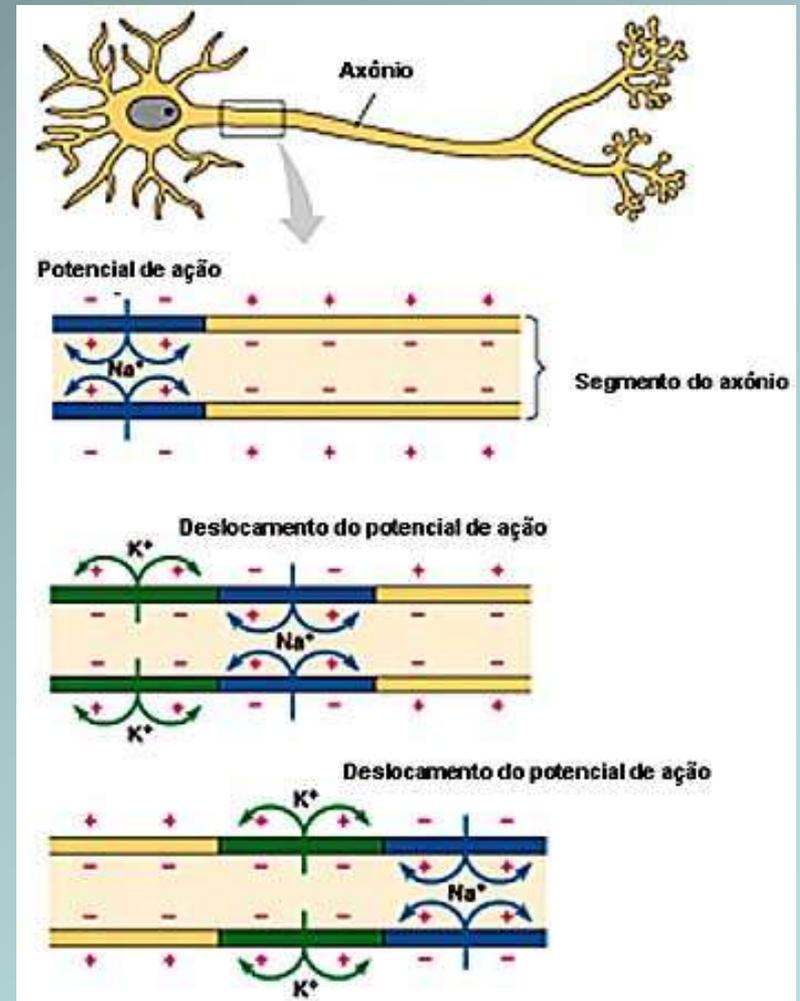
Difusão:

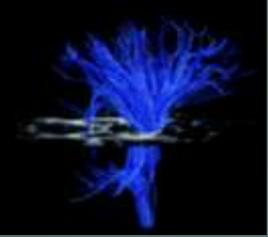
- Fenómeno de transporte ocasionado por movimentação molecular;
- Esta movimentação é causada pela energia cinética das moléculas;
- É influenciada por vários factores: temperatura, peso molecular, meio, presença de barreiras;
- A sua restrição é capaz de fornecer informações estruturais sobre o meio.



Difusão:

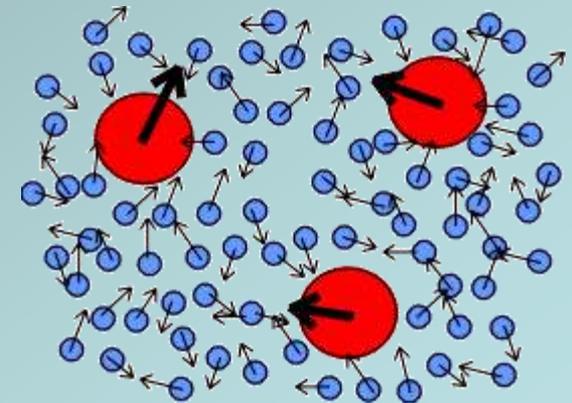
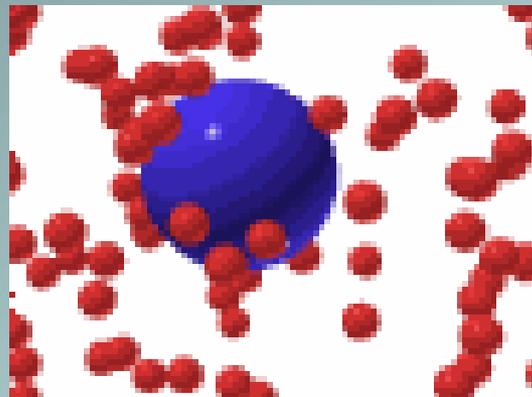
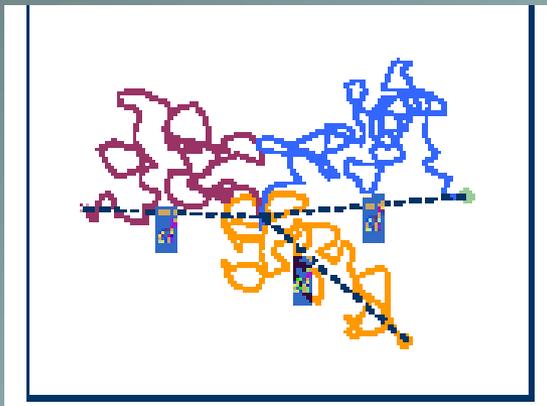
- Responsável pelo transporte passivo entre as membranas celulares.

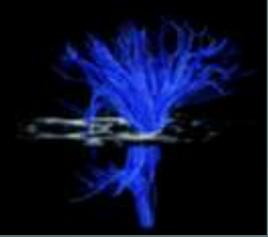




Movimento / Difusão Browniana:

- A agitação molecular aleatória, irregular e contínua é ocasionada por colisões entre as moléculas;
- Este movimento microscópico dá origem ao fenómeno macroscópico da difusão.





Movimento / Difusão Browniana:

- Difusão molecular tem como base os movimentos brownianos das moléculas (energia térmica do sistema).

$$R = \sqrt{6Dt}$$

ONDE:

D = coeficiente de difusão;

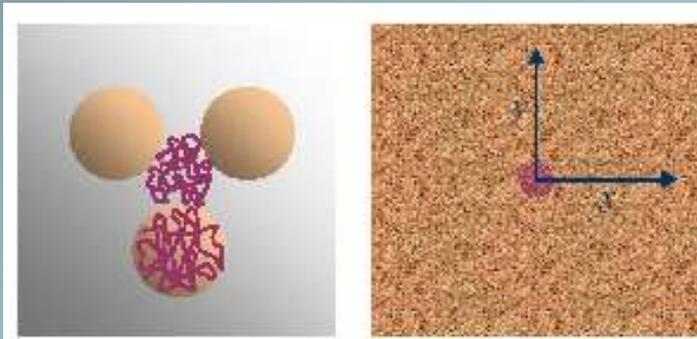
t = tempo permitido para a difusão.



Tipos de Difusão:

• ISOTRÓPICA

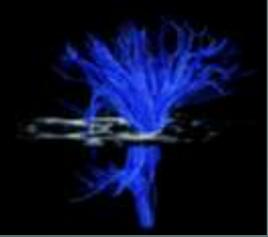
- ✓ Estrutura e propriedades da difusão são as mesmas em todas as direcções;
- ✓ Probabilidade de difusão é a mesma em todas as orientações;
- ✓ Exemplos: copo de água, substância cinzenta cerebral.



• ANISOTRÓPICA

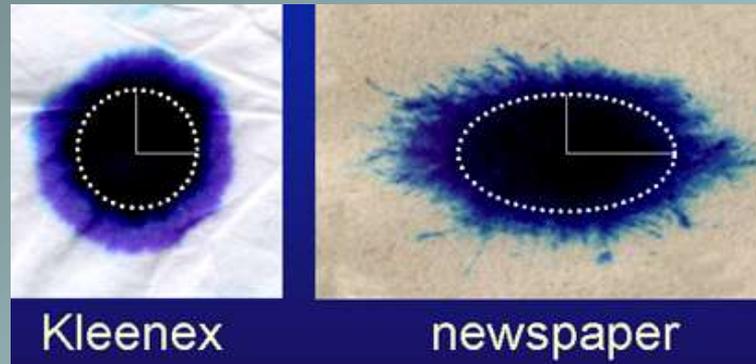
- ✓ Na presença de barreiras, as propriedades da difusão são dependentes da direcção em que são medidas;
- ✓ Exemplos: cristais, **fibras nervosas**.





Anisotropia da Difusão nos Tecidos Biológicos:

- Movimento da água nos tecidos;
- Mais rápida numa direcções que outras;



- Anisotropia: taxa da difusão depende da direcção. Esta pode indicar tractos (fibras) nervosas.





Coeficiente / Anisotropia da Difusão nos Tecidos Biológicos Cerebrais:

	Diffusion coefficient
Tissue	$\cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$
CSF	2.94 ± 0.05
Gray matter	0.76 ± 0.03
White matter:	
Corpus callosum	0.22 ± 0.22
Axial fibers	1.07 ± 0.06
Transverse fibers	0.64 ± 0.05

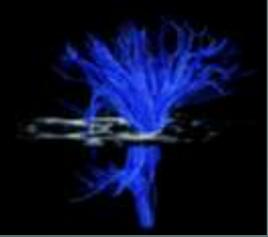
✓ Valor do coeficiente de difusão depende directamente na direcção relativa das fibras e campo magnético usado, conhecida como difusão anisotrópica;

✓ Difusão da água é isotrópica na substância cinzenta;

✓ Pelo contrário, na substância branca é extremamente anisotrópica, dependendo da orientação das fibras nervosas e na direcção de gradiente aplicada em cada localização espacial da imagem;

✓ Parece que os coeficientes de difusão diminuem significativamente quando as fibras de mielina são perpendiculares à direcção do gradiente usado para medir as movimentações moleculares.

in



Imagem

Tensorial da Difusão:

- Difusão local é representada por uma distribuição Gaussiana em 3D;
- Tensor é um modelo matemático da anisotropia direccional da difusão;
- Determinado em cada voxel, resolvendo um sistema de equações;
- DTI mede o Coeficiente Aparente de Difusão em, pelo menos, 6 direcções diferentes e calcula o tensor de difusão.

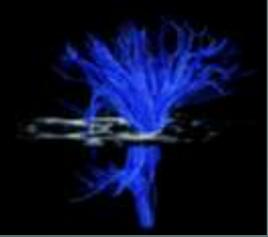


Imagem Tensorial da Difusão

(DTI):

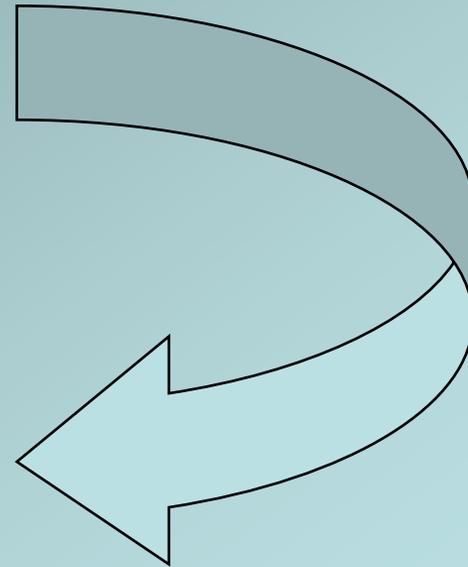
- Representado por uma matriz simétrica 3x3

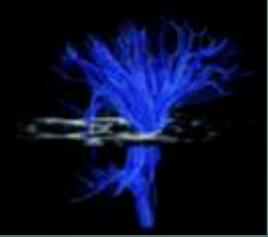
$$\bar{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

Através do tensor, pode-se calcular:

- Direcção da melhor difusão;
- Grau de anisotropia;
- Constante / Coeficiente de Difusão em qualquer direcção.

Este tensor difusão é definido para cada voxel numa base 3D.

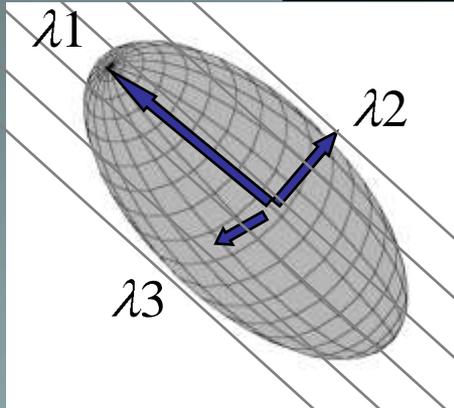




Tensores de Difusão e Anisotropia:

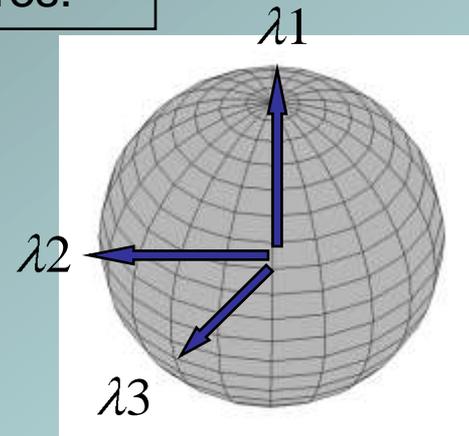
DTI permite quantificar a difusão da água no tecido cerebral.

A difusão em voxel é descrito por 3 vectores perpendiculares.



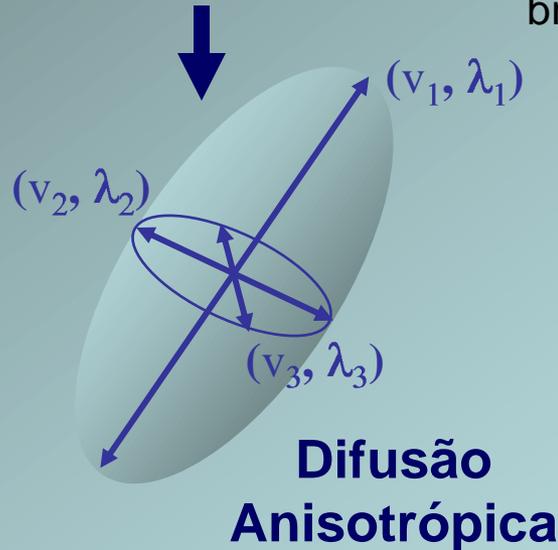
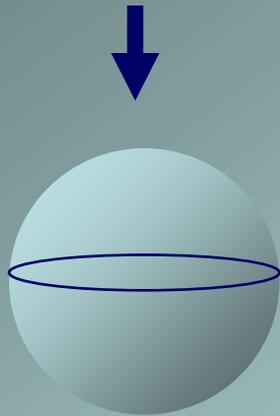
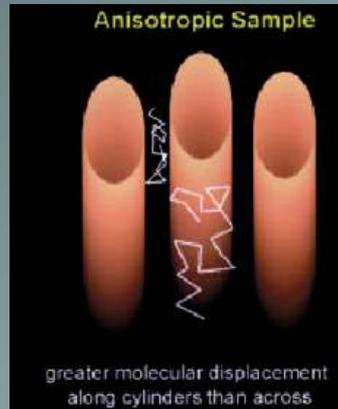
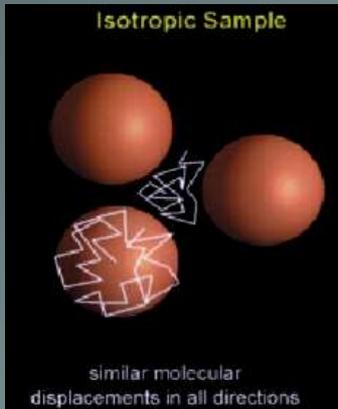
Difusão Anisotrópica

Ocorre quando o movimento da água está restrito a uma direcção primária (fibras mielinizadas)



Difusão Isotrópica ocorre quando não há restrição no movimento da água (ventrículos, LCR).

Tensor Difusão das Moléculas de Água:



- Difusão Isotrópica vs. Anisotrópica

- Difusão mais rápida ao longo das fibras mais perpendiculares ao campo magnético;
- Anisotropia usada para “traçar” as fibras, estimando a integridade da substância branca cerebral.

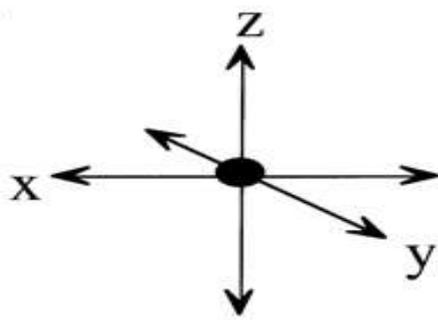
- Modelo Tensor

v_i : Principais direcções de difusão
“Eigenvector”

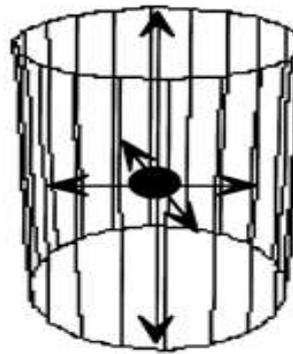
λ_i : difusividades associadas
“Eigenvalue”



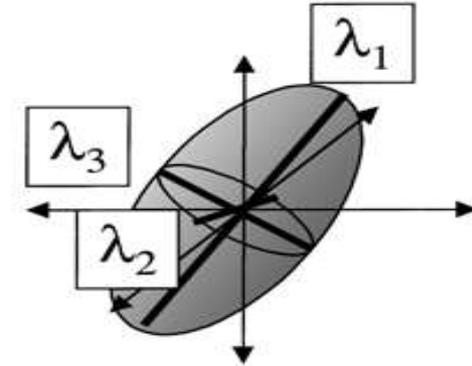
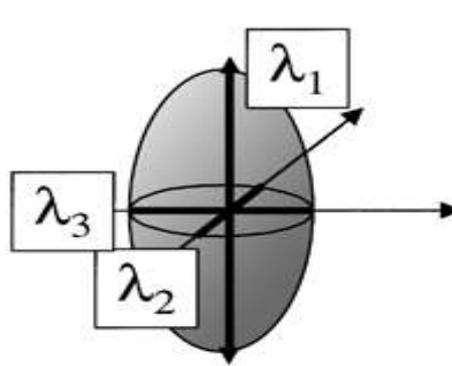
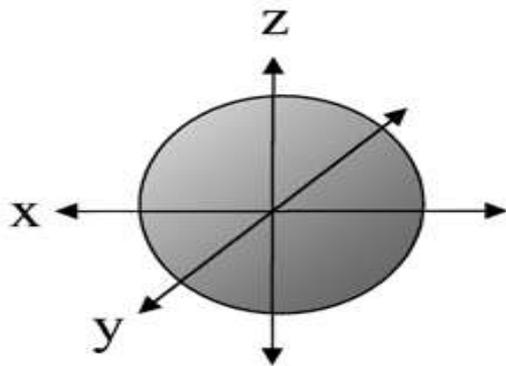
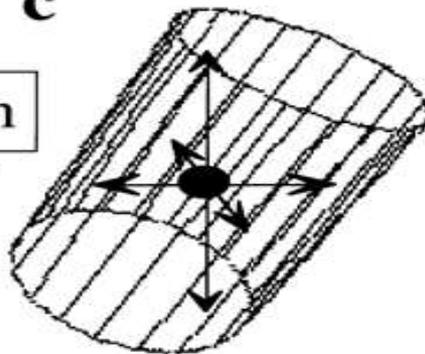
a



b



Rotation



$$\begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}$$

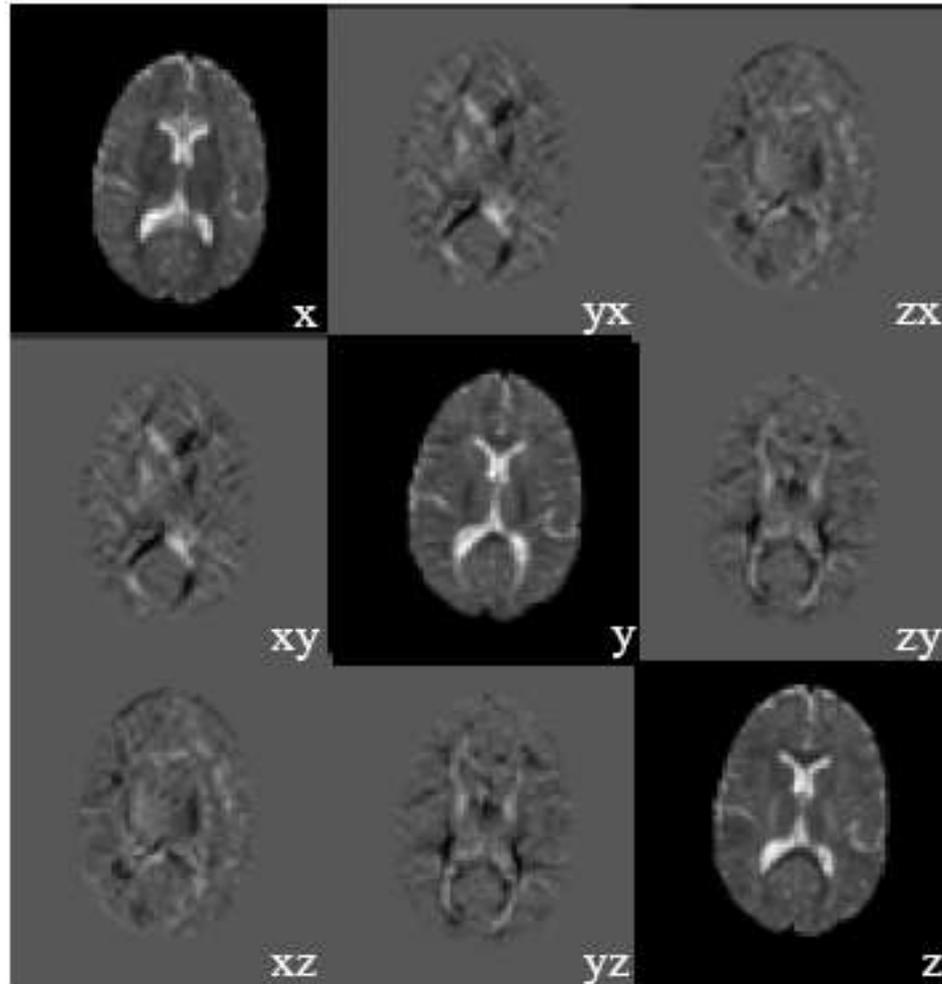
$$\begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

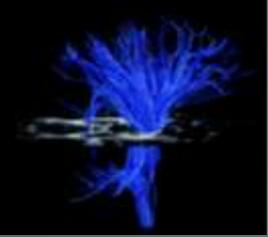
• DIAGONALIZAÇÃO DO TENSOR DIFUSÃO

Fornece 3 vectores de difusão (*eigenvector*) com 3 valores correspondentes (*eigenvalue*)

Transformar essas equações em imagens:

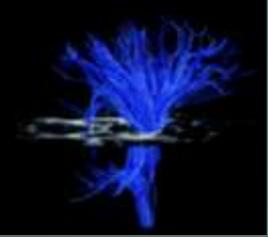
$D =$





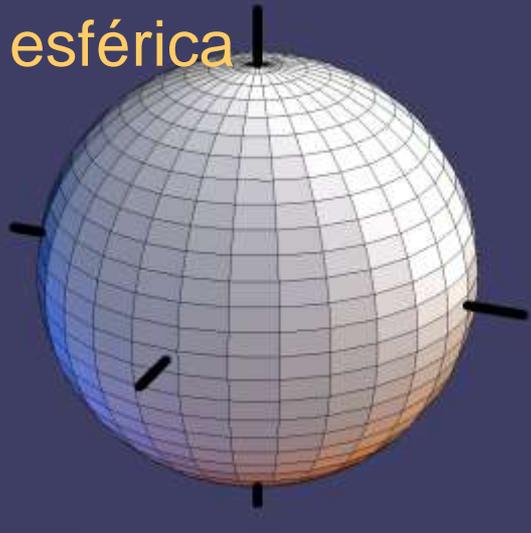
Tensor Difusão:

- Um tensor é composto por 3 vectores;
 - *Pensar num vector como uma seta num espaço 3D, que aponta numa direcção e tem um comprimento.*
- O primeiro vector é o mais longo (aponta no eixo principal);
- Os segundo e terceiro são ortogonais ao primeiro.

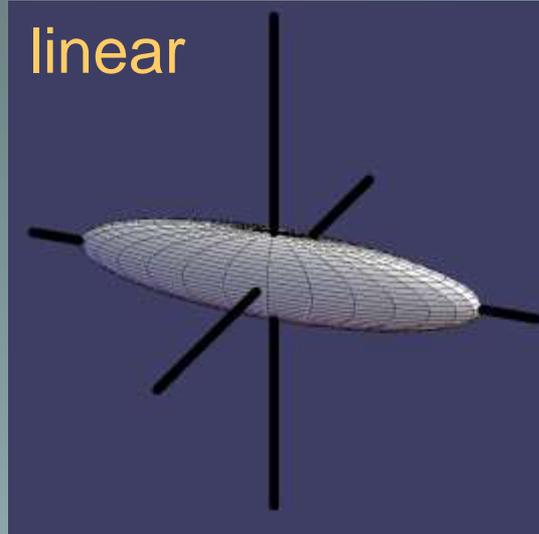


Tensor Difusão 3D:

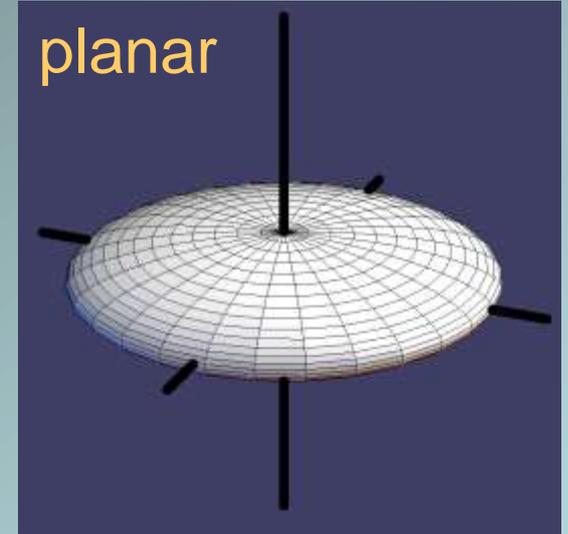
esférica



linear



planar



ELIPSÓIDES: representação Gaussiana em 3D; melhor modelo para representar o tensor difusão.

É a imagem de uma esfera unitária sob uma matriz de tensor de difusão.

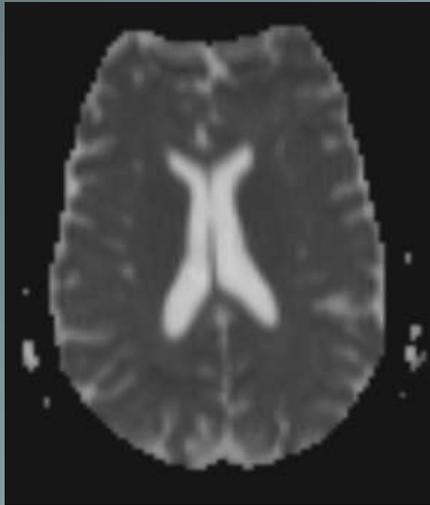
Em DTI, a anisotropia é representada por uma elipsóide, com um formato e orientação.



Propriedades / Índices Escalares:

- Média de Difusividade (MD):

Tamanho do Tensor



Subst. Branca

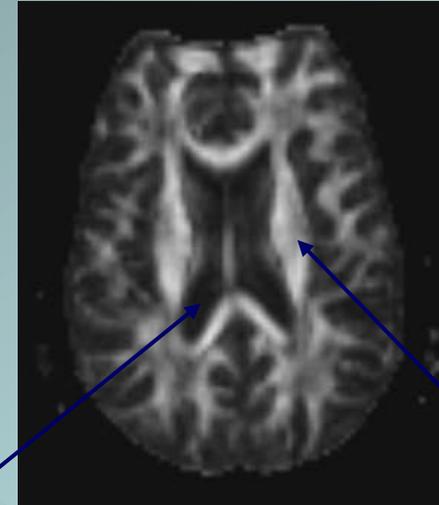
LCR

Baixa

Elevada

- Anisotropia Fraccional (FA):

Forma do Tensor

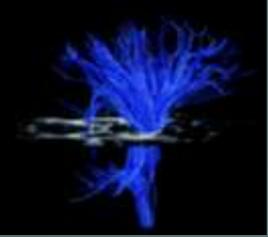


Isotrópica

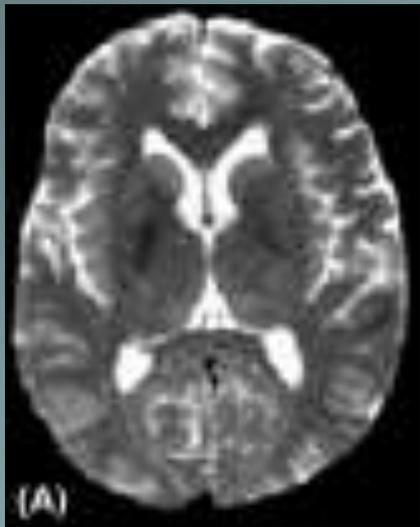
Difusão Direccional

0

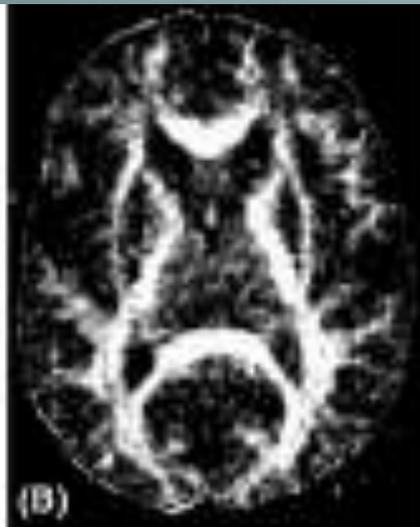
1



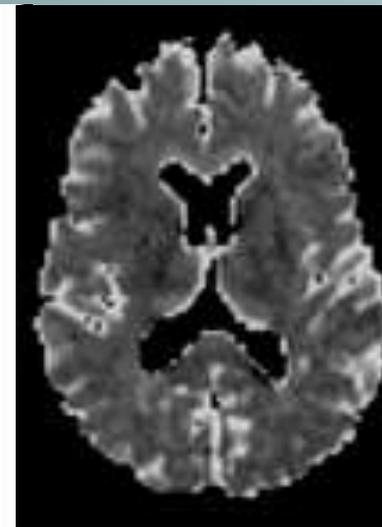
Mapas / Índices Escalares DTI:



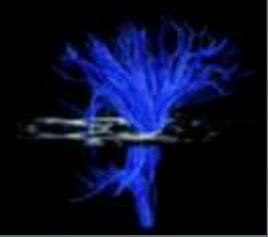
Ponderação T2



Mapa FA



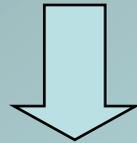
Mapa Trace
(difusividade)



Propriedades / Índices Escalares:

- MD: magnitude de difusão num voxel;
- FA: extensão na qual a difusão está restringida (avalia a integridade das fibras).

Substância Branca Lesionada

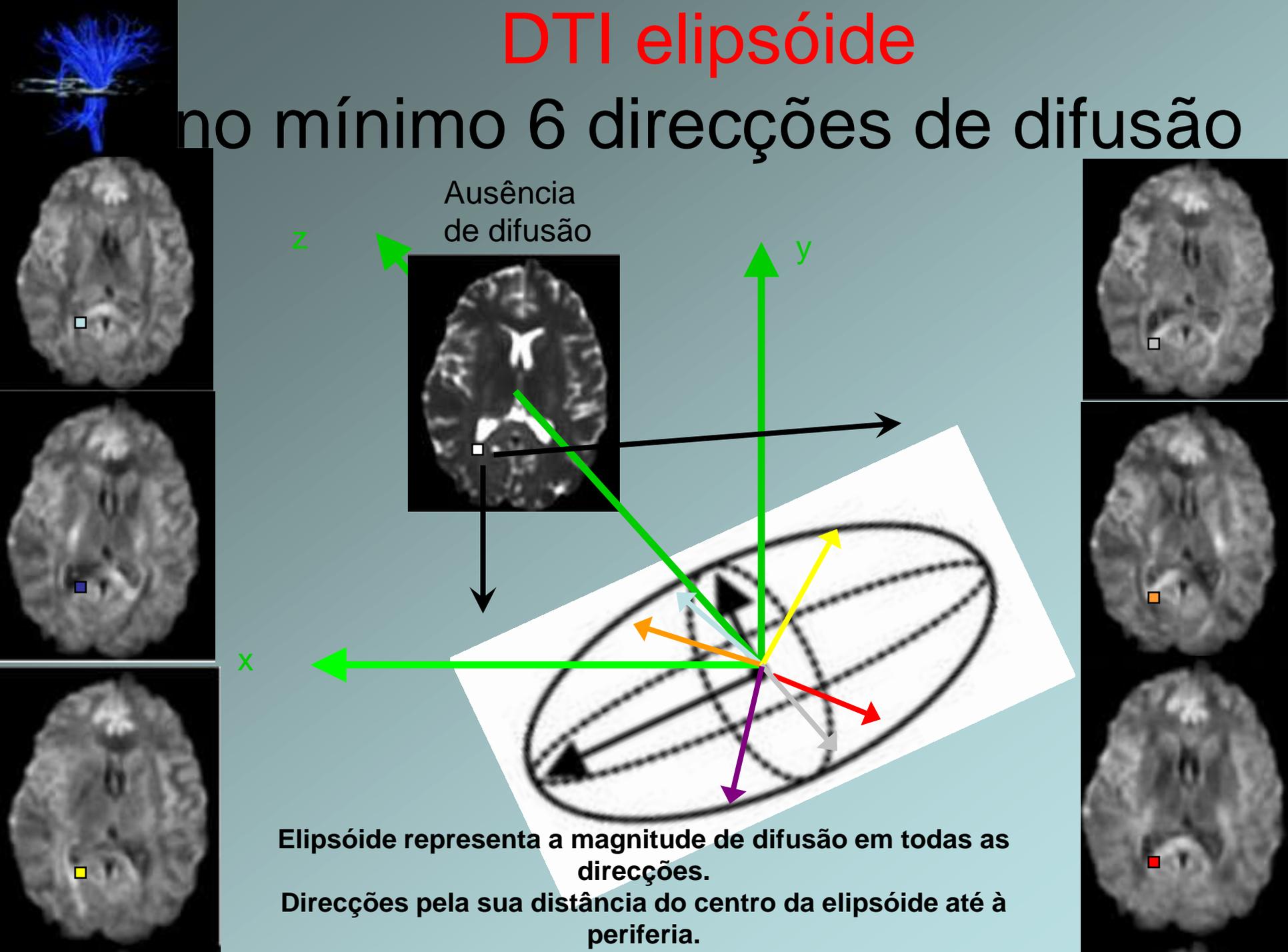


Aumento da difusão (MD)

Diminuição da Anisotropia (FA)

DTI elipsóide

no mínimo 6 direcções de difusão



Ausência
de difusão

z

y

x

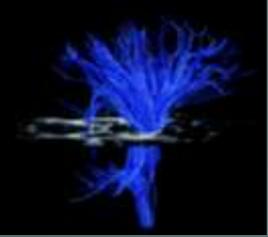
Elipsóide representa a magnitude de difusão em todas as direcções.

Direcções pela sua distância do centro da elipsóide até à periferia.



Tensor Difusão:

- Os aparelhos de RM produzem, para um exame de DTI, uma imagem de referência e um conjunto de no mínimo 6 imagens correspondentes a diferentes direcções de difusão;
- Estas imagens não determinam directamente o tensor de difusão; os elementos da matriz do tensor de difusão precisam de ser calculados a partir das imagens adquiridas. Dos tensores de difusão podem-se construir alguns tipos de mapas, que são úteis para a interpretação dos exames.

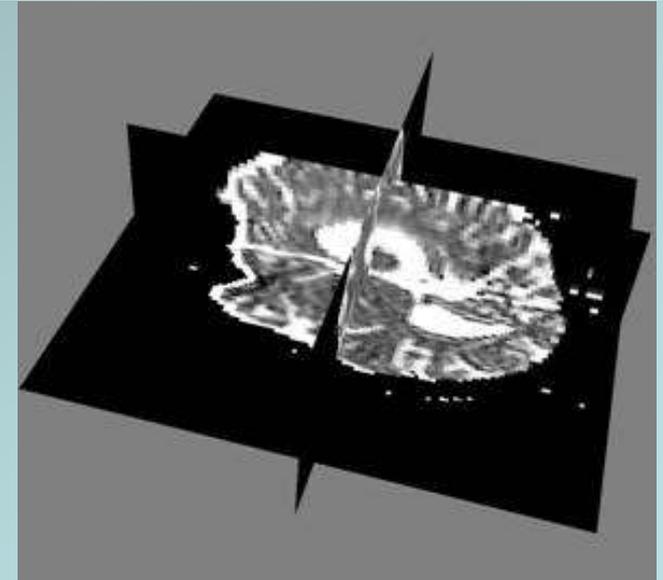
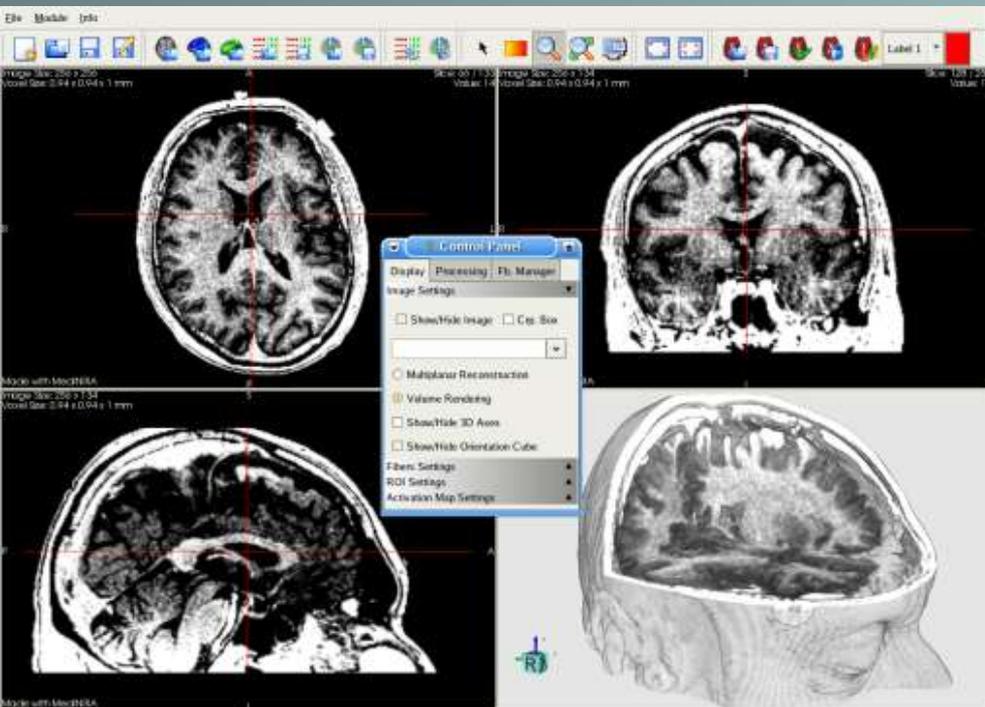
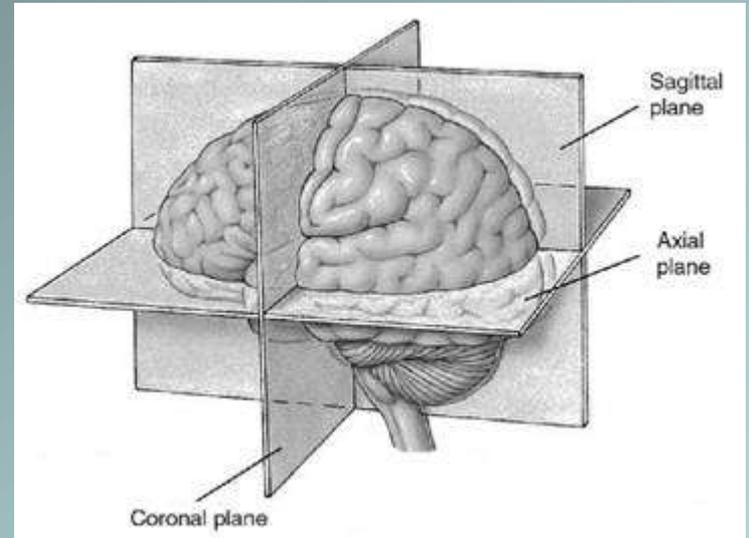


Ferramenta

Aplicacional do DTI:

Referência Anatômica:

Visualização 2D e 3D (permitir reconstrução de imagens)





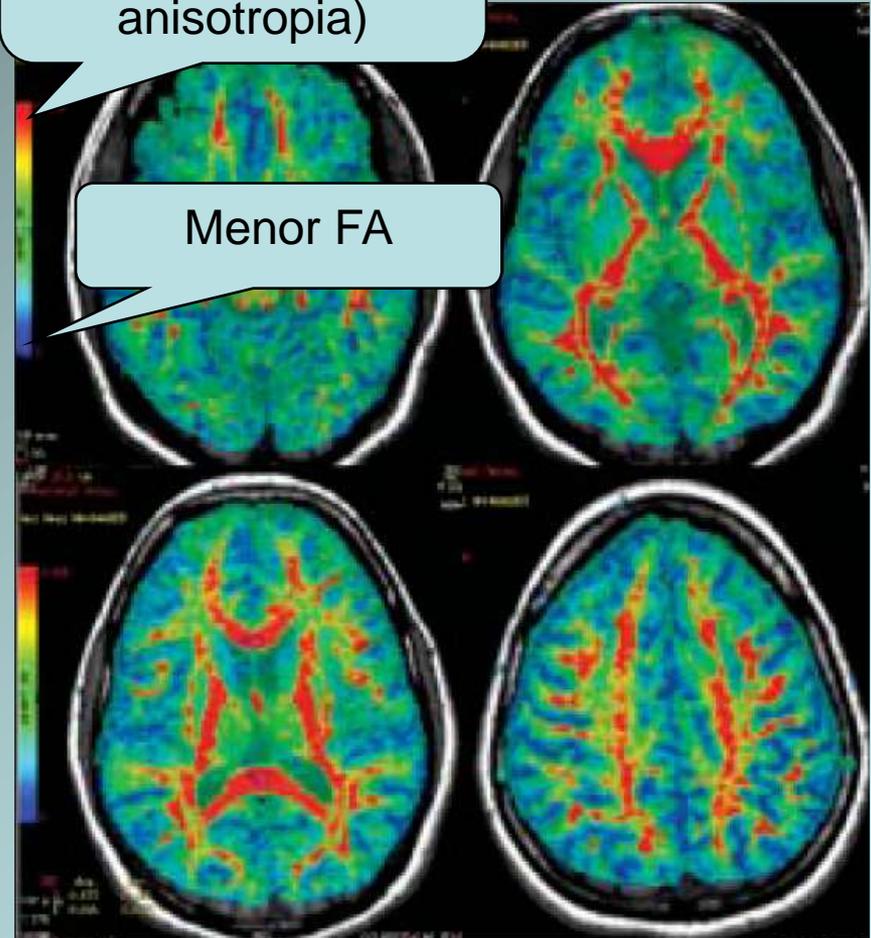
Ferramenta Aplicacional do DTI em Cortes 2D:

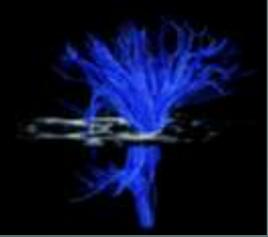
- um só corte;
- difícil para perceber estruturas como cérebro (volume 3D).

- **Colorcoding**
(Codificação de Cores):
relacionada com os índices de anisotropia (valores escalares):
tabelas LUT (*look up table*)

Maior FA
(índice de
anisotropia)

Menor FA

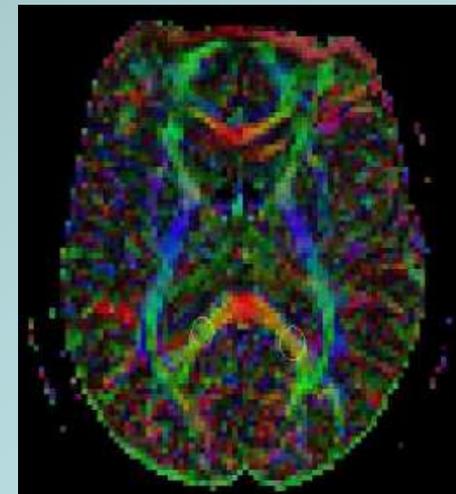
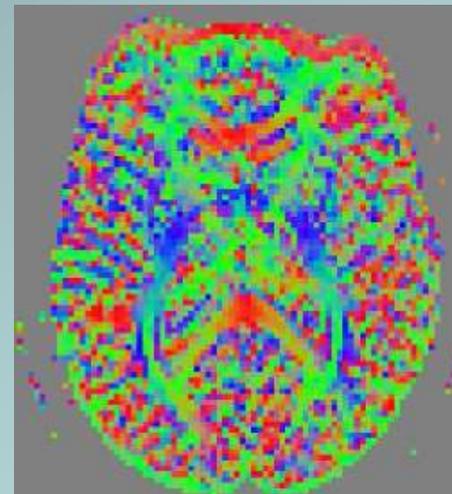
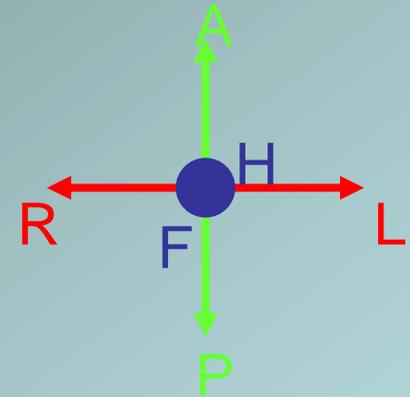
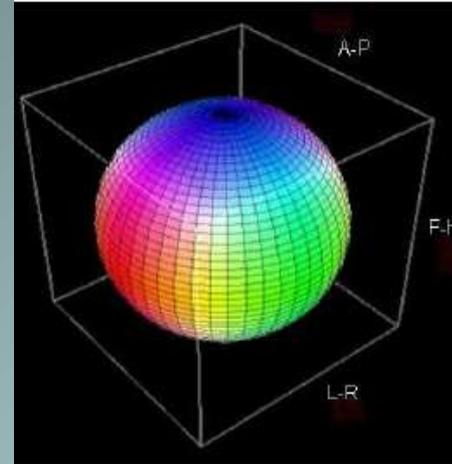




Ferramenta Aplicacional do DTI – Métodos 2D:

- Colorcoding direcção principal da difusão: mais usado na prática clínica; codificação de acordo com a direcção do vector principal de difusão e FA;

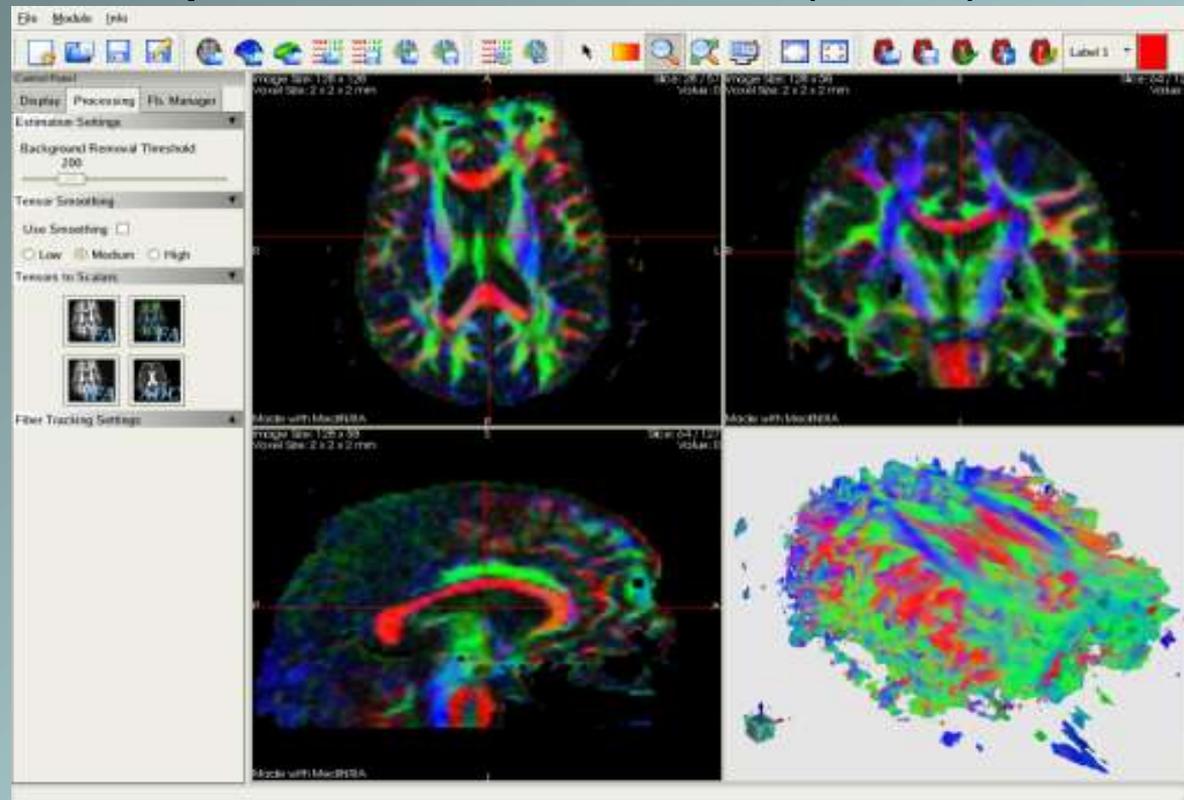
Valores absolutos x, y, z usados com cores vermelho, verde e azul, respectivamente (modelo RGB).

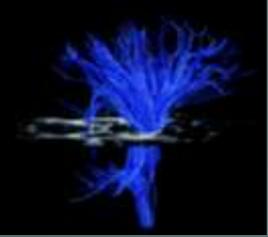




Ferramenta Aplicacional do DTI – Análise Quantitativa do DTI:

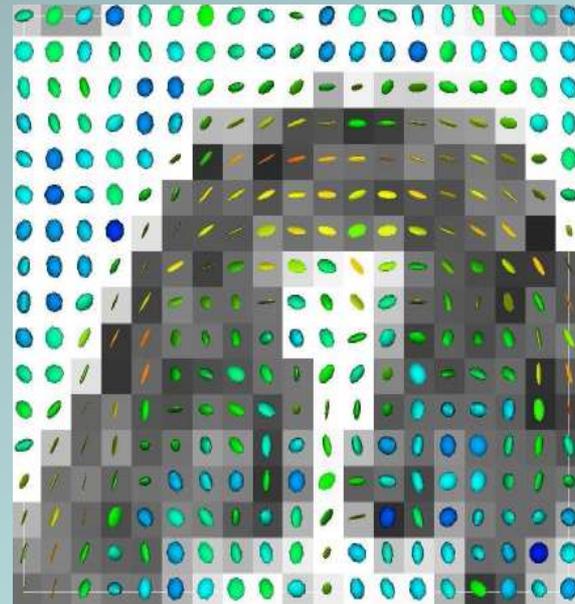
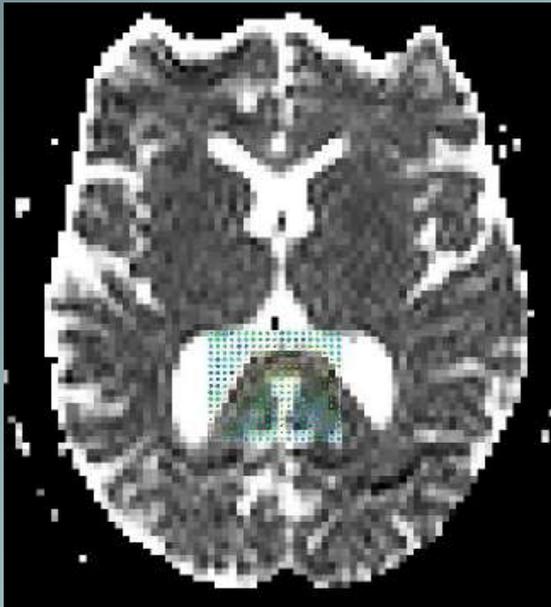
- Permitir visualizar mapas escalares de Anisotropia Fraccional (FA) e Média de Difusividade (MD) e Coeficiente Aparente de Difusão (ADC).

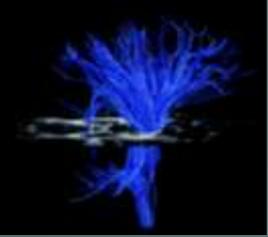




Ferramenta Aplicacional do DTI – *Glyphing*:

- Os *glyphs* são ícones que representam a informação local do tensor de difusão.
- 2D *glyphs*: podemos ter a impressão que as regiões estão unidas (mas estas conexões só podem ser visíveis em 3D)

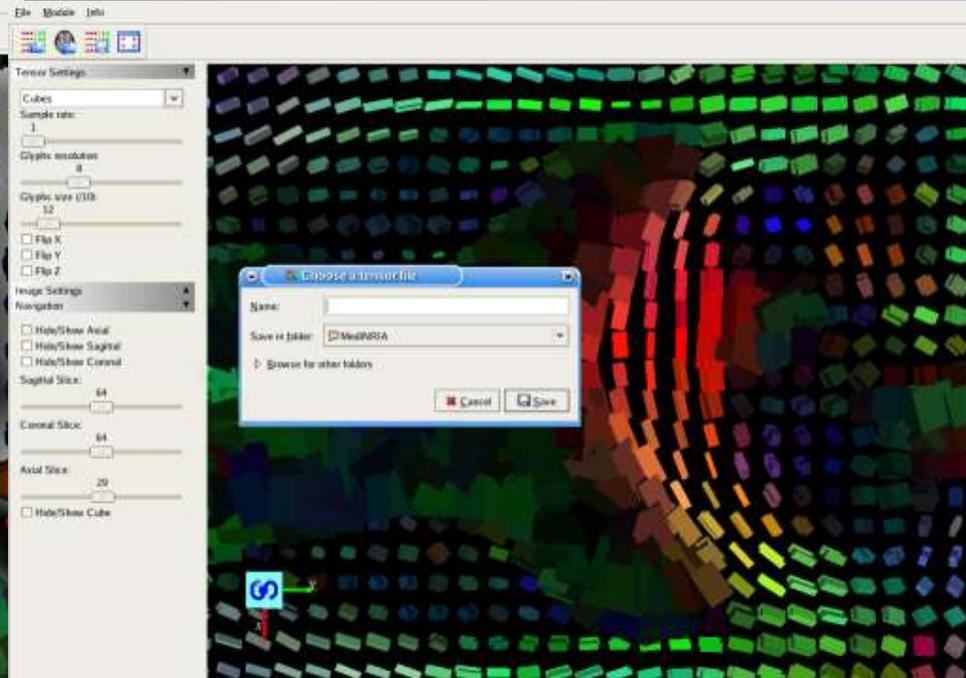
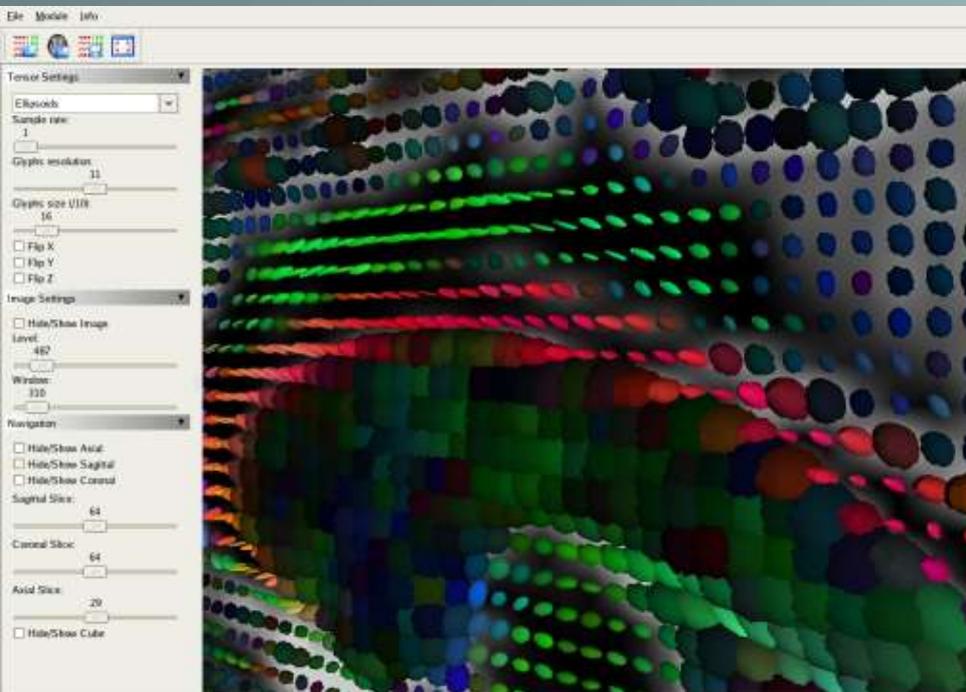
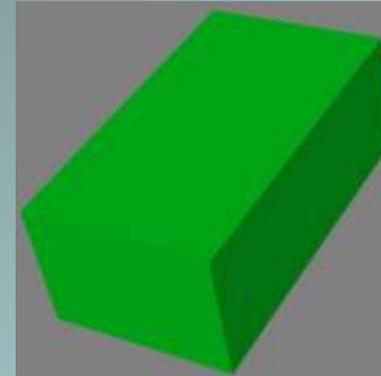
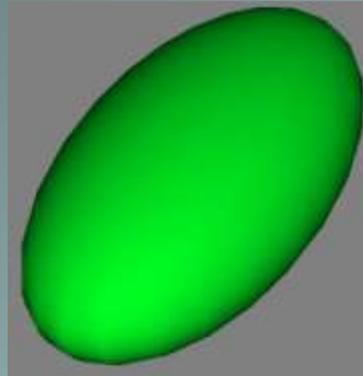




Ferramenta Aplicacional do DTI – *Glyphing*:

Dois tipos de *glyphs*:

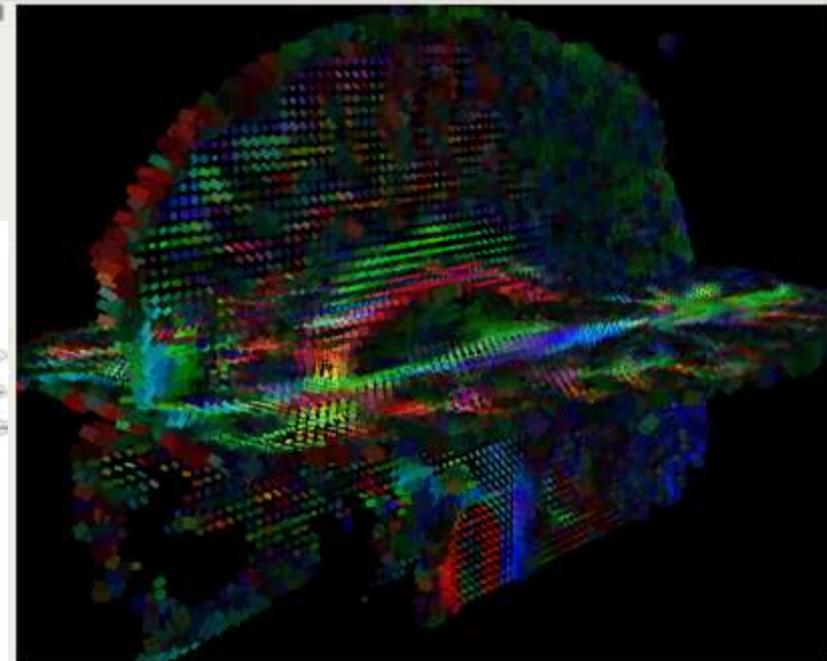
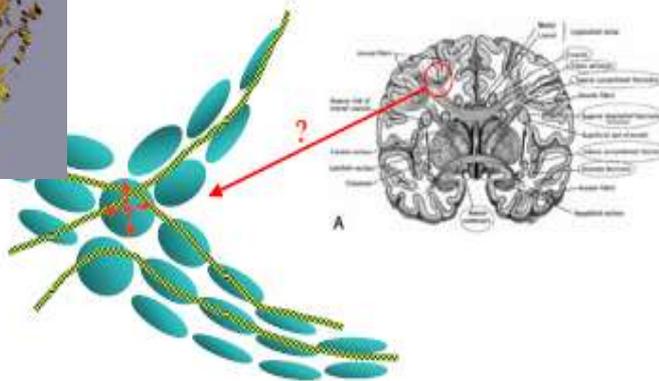
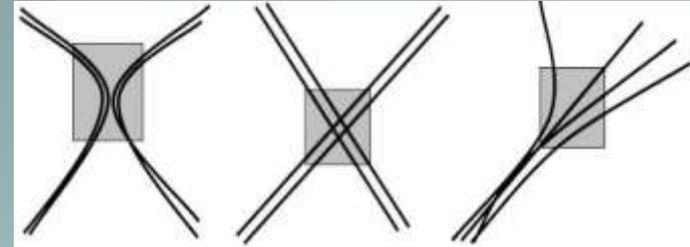
- Elipsóides;
- Cubóides.

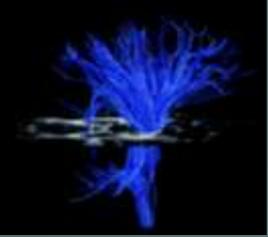




Ferramenta Aplicacional do DTI – Métodos 3D - *Glyphing* :

- PROBLEMA: orientação das fibras não é tão linear, podendo haver pontos de bloqueio quando aplicados em 3D;
- Pode-se não avaliar todas as fibras ao aplicar um único *glyph*.



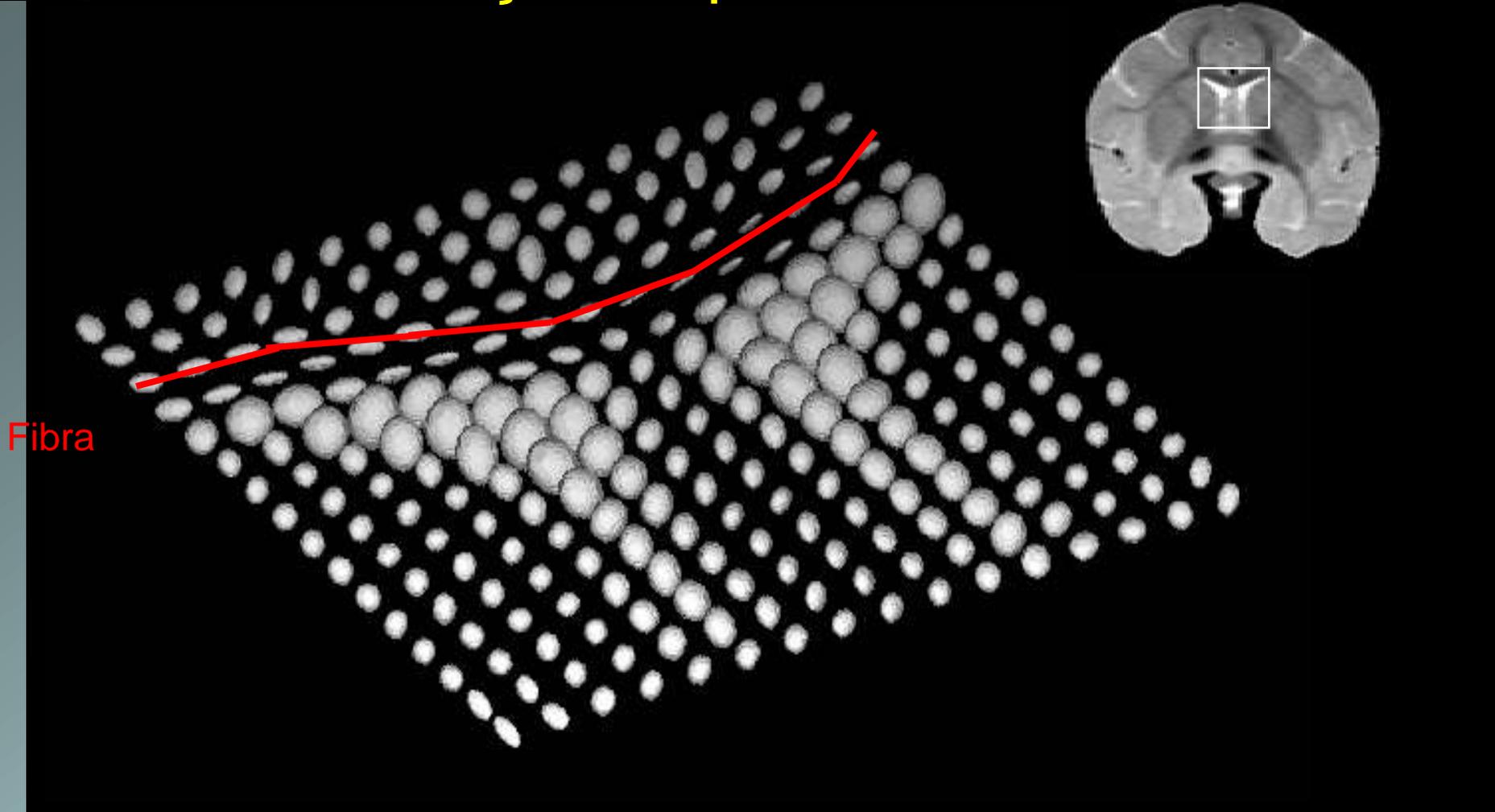


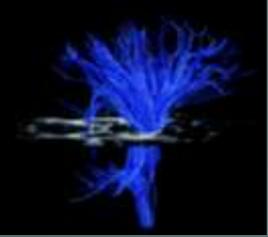
Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* ou *Streamlines - Tractografia*:

- *Fiber tracking* simplifica o campo tensorial a um campo vectorial de acordo com a direcção do vector principal;
- Este campo vectorial é tornado contínuo pela técnica de interpolação;
- Traçado é tangente ao campo vectorial e a trajectória delineada é a “fibra ou via nervosa”.

Imagem da Elipsóide

Informação disponível através do DTI



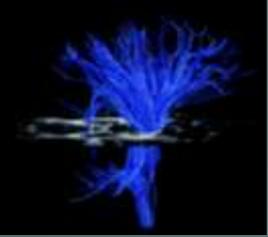


Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* - Tractografia:

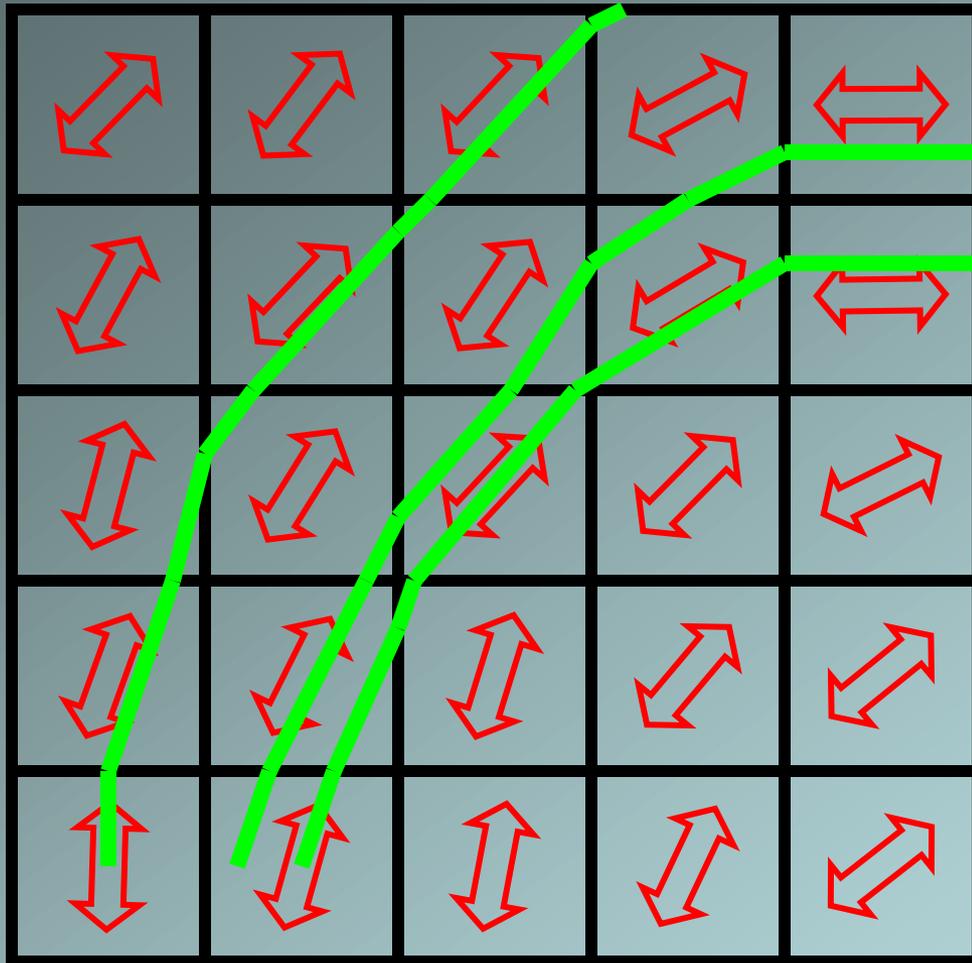
O traçado (tracking) pode ser resolvido pela seguinte integral:

$$\vec{x}(t) = \int_t \vec{e}_1(t) dt$$

Para resolver essa integral, utiliza-se a integração de segunda ordem de Rugen Kutta.



Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* :



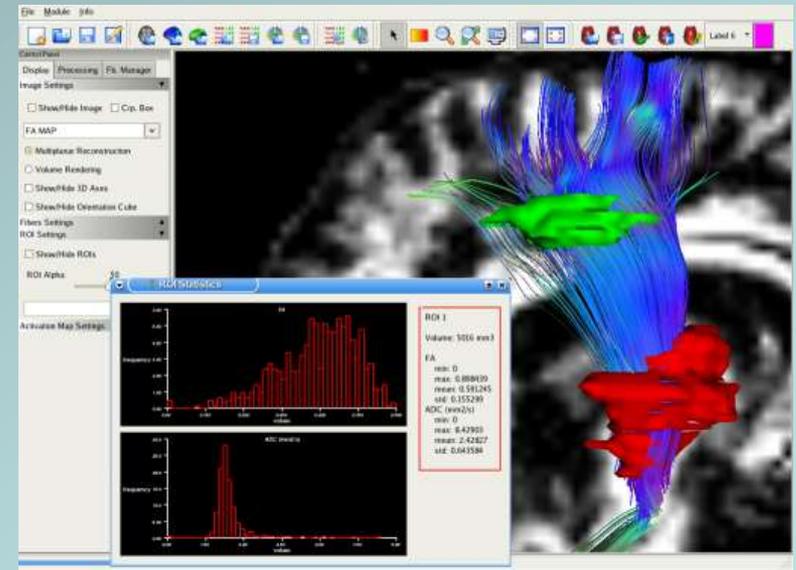
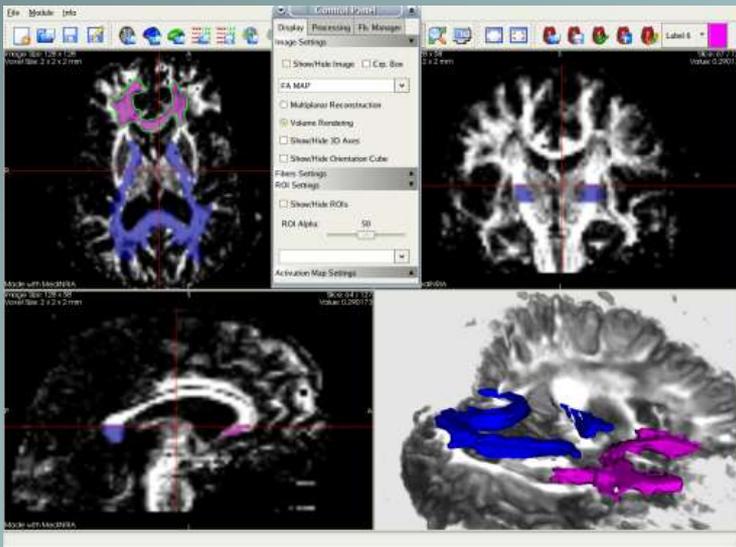
 Direcção da
difusão principal

Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking, Seed Points (ROI):*

Definição manual do ROI, onde as fibras começam;

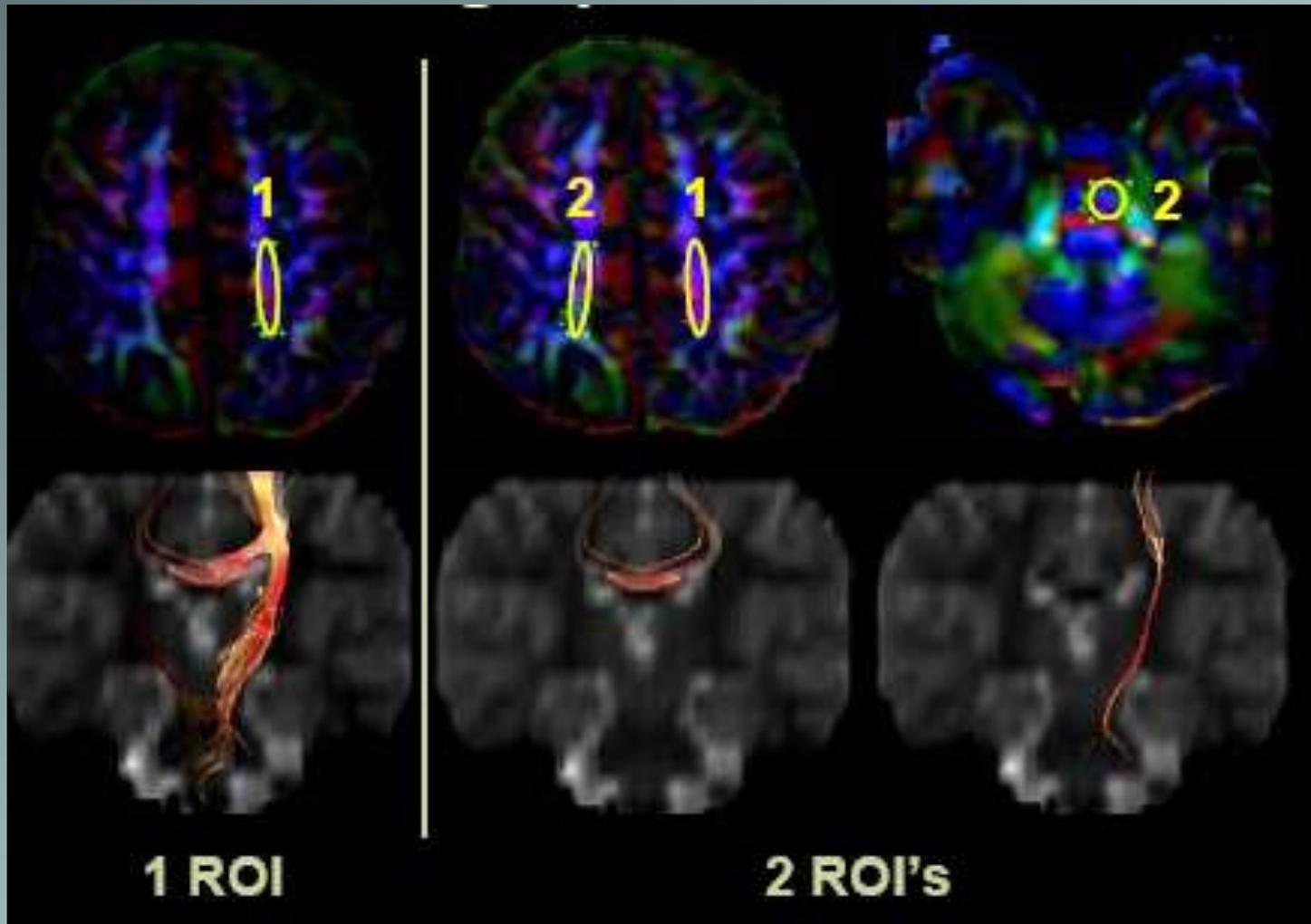
Começo do traçado em todos os vóxeis, conectando-se estes entre si aos vizinhos;

Irão unicamente entrar fibras dos ROI's seleccionados previamente;

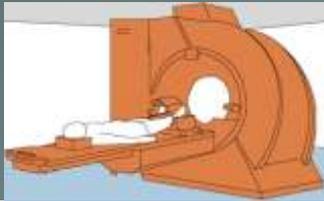
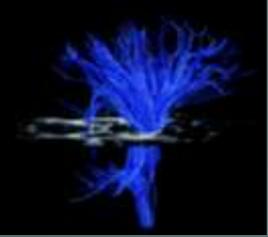




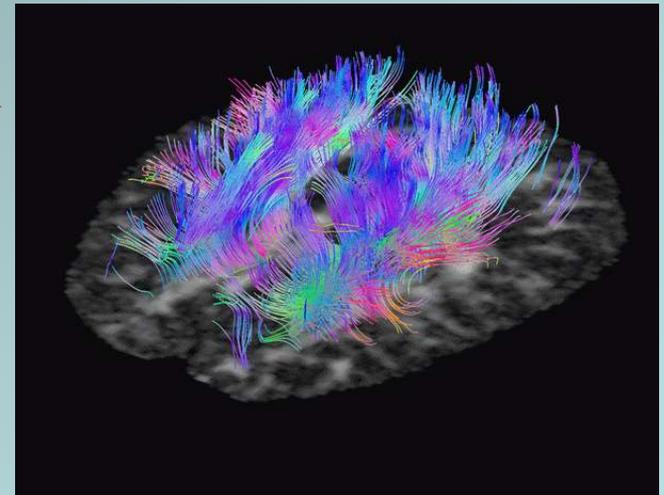
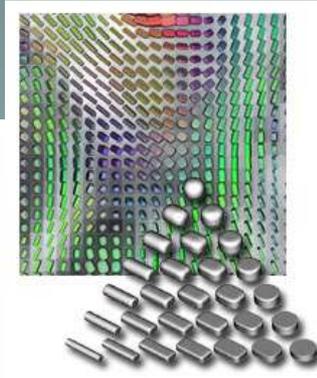
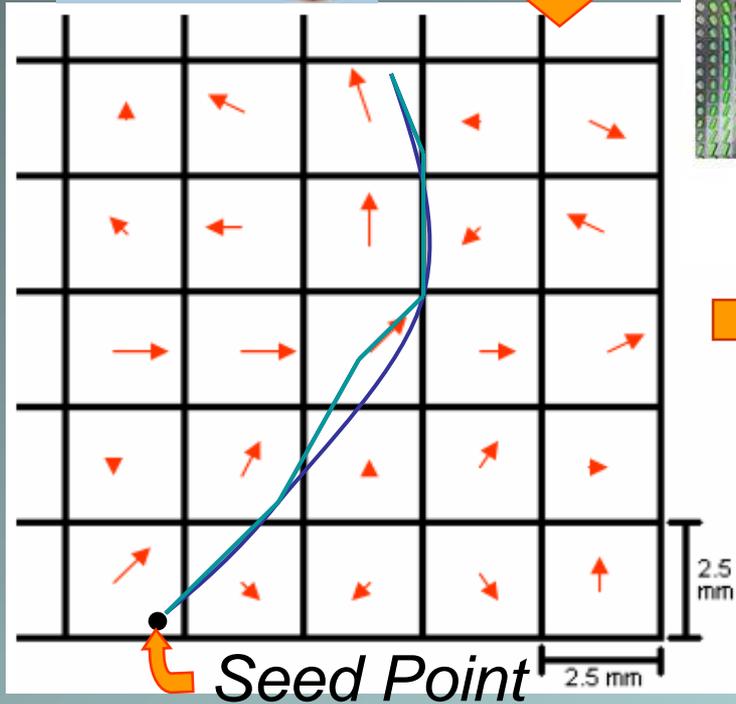
Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking, Seed Points (ROI):*



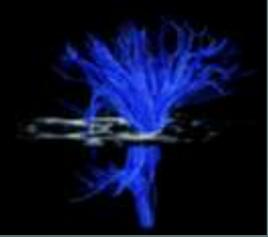
Fiber Tracking – Tractografia:



DT-MRI



ROI



Ferramenta Aplicacional do DTI – *Fiber Tracking* – Tractografia:

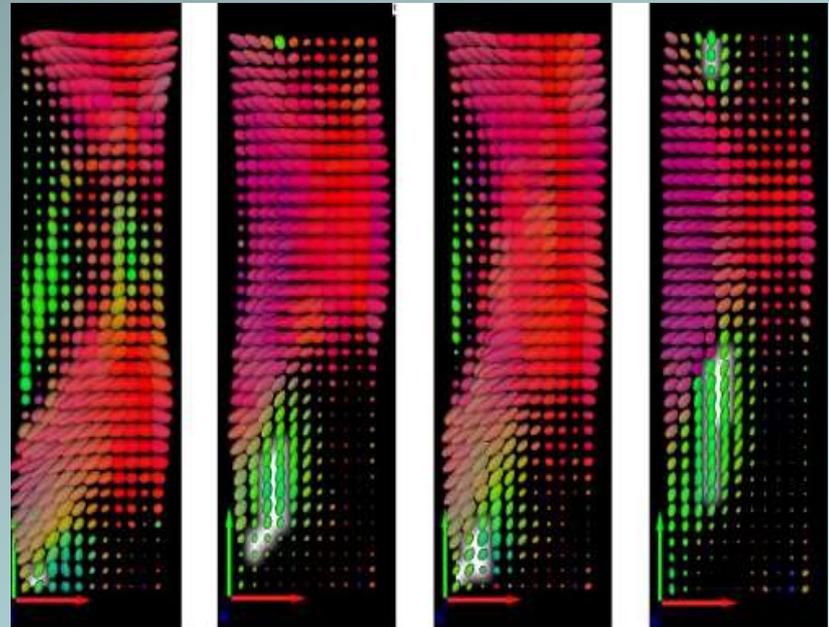
CRITÉRIOS DE PARAGEM:

Quando a anisotropia é muito baixa



a definição do vector principal da difusão não é definido com clareza (pode-se recorrer à técnica de *tresholding* do FA, por exemplo, “retirando” os valores mais baixos).

Outro critério pode ser a angulação das diferentes fibras Tench *et al.* definem 10° por 1mm no máximo, pois poderá provocar ruído de imagem e volume parcial.

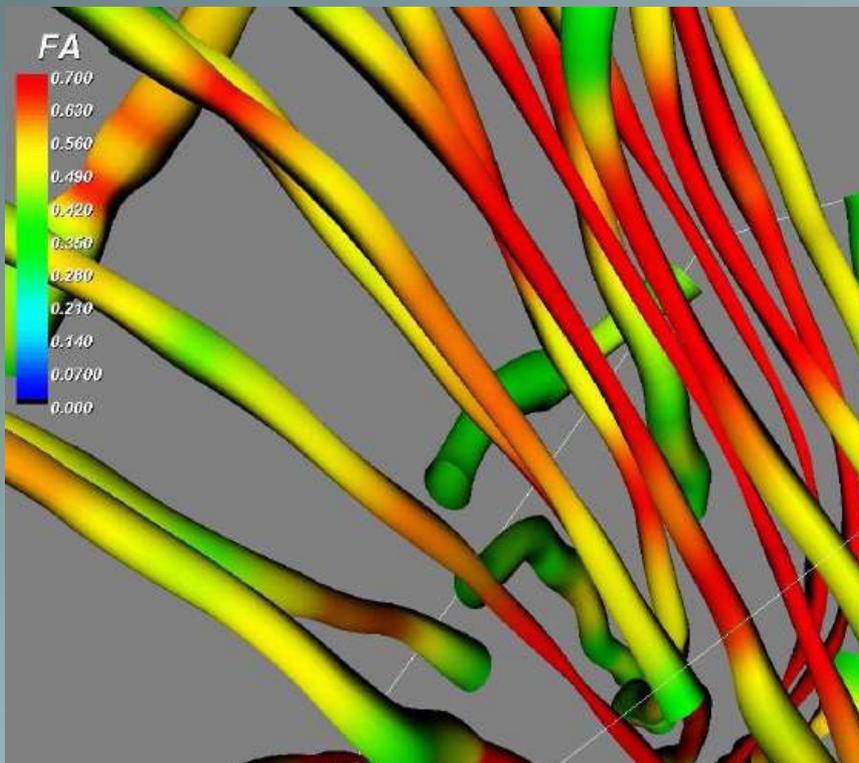


VOLUME PARCIAL



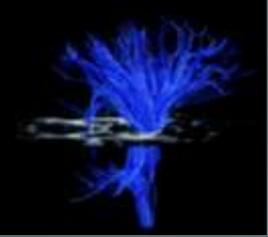
Ferramenta Aplicacional do DTI – *HyperStreamlines* *Tractografia:*

- Extensão do traçado das fibras: também demonstram a direcção dos outros dois vectores e não só o principal.



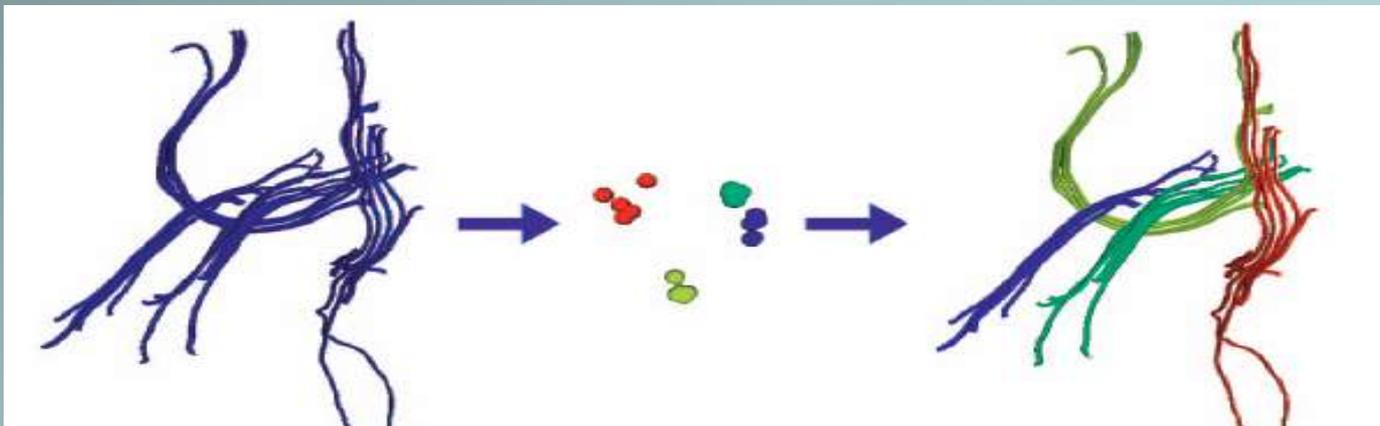
Codificação de cores segundo FA

Áreas com baixo FA (anisotropia) são mais grossas, enquanto as que têm elevado FA são mais finas.

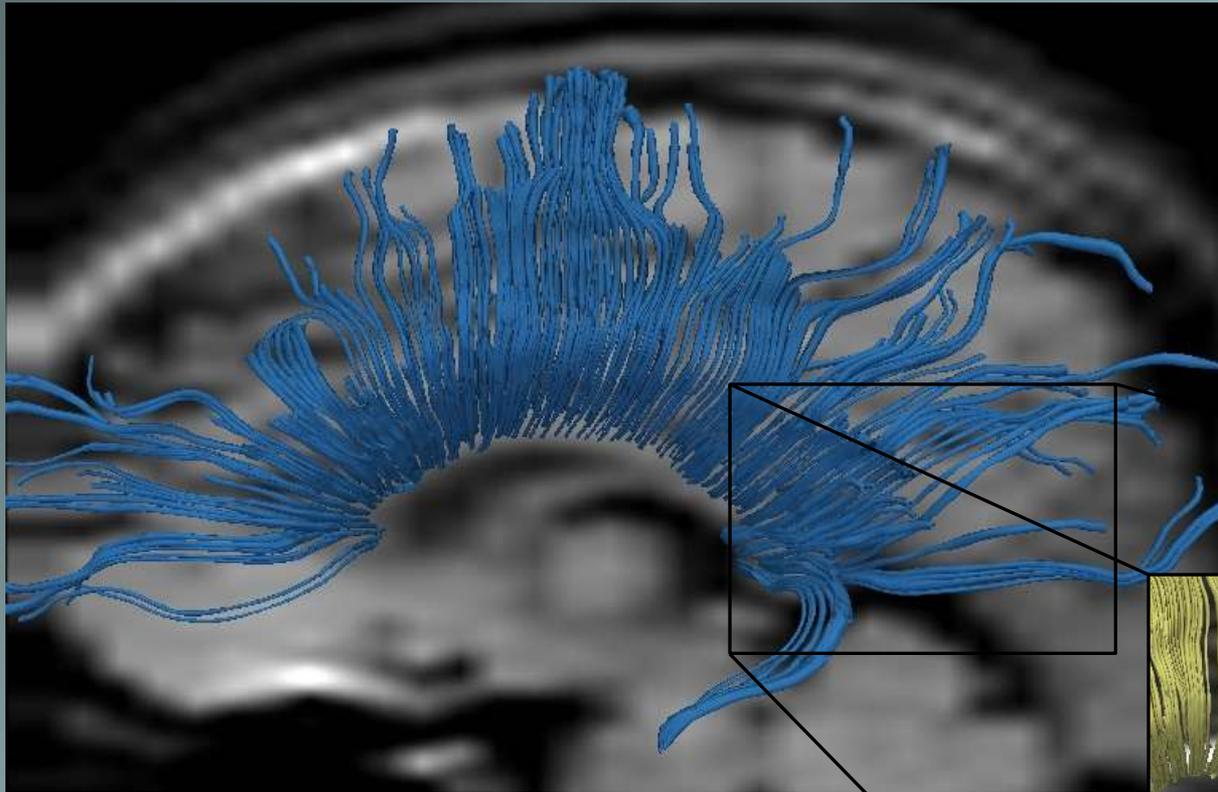


Clustering das Fibras:

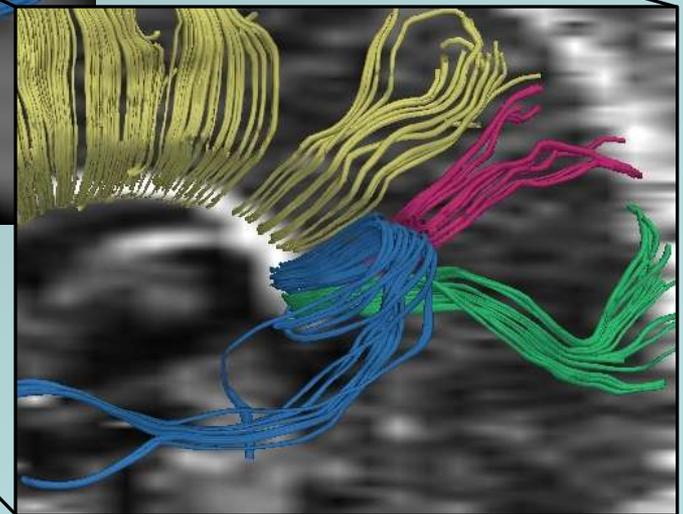
- Técnica de processamento de imagem usado nesta modalidade de imagem, que permite separar determinadas fibras umas das outras, agrupando-as de acordo com a sua similaridade;
- Esta é baseada na forma e posição das fibras;
- Para calcular a similaridade das vias nervosas a distância média entre os vizinhos mais próximos, em termos da direcção de difusão dos vectores e índices escalares, como a FA (“encaixe espectral”).

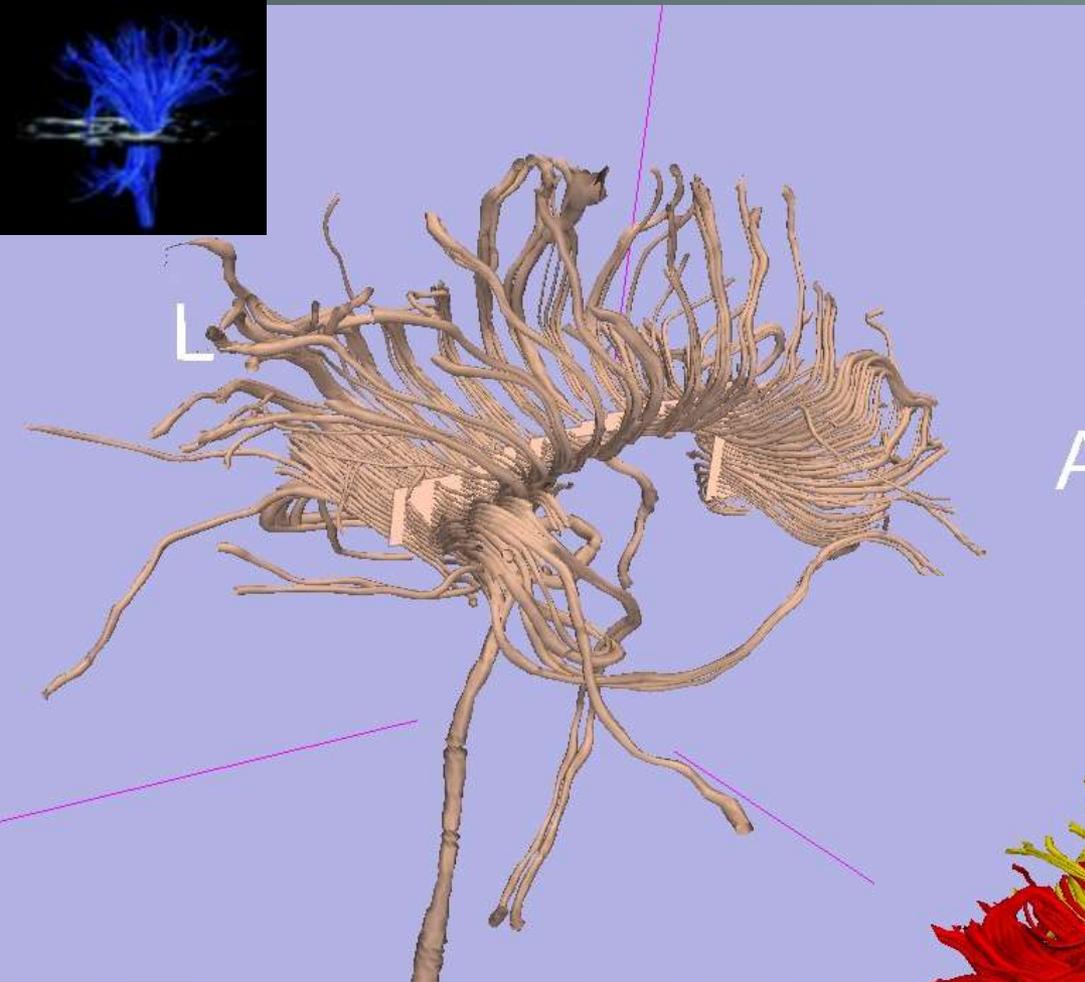


Clustering das Fibras:



Ferramentas automáticas (aplicação) separam as fibras com base na sua forma e projecção.

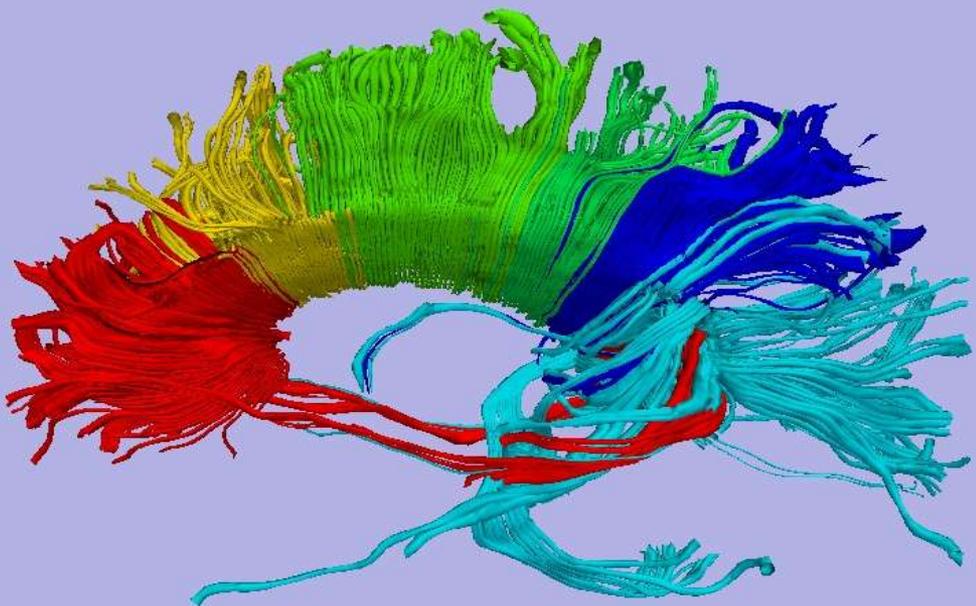


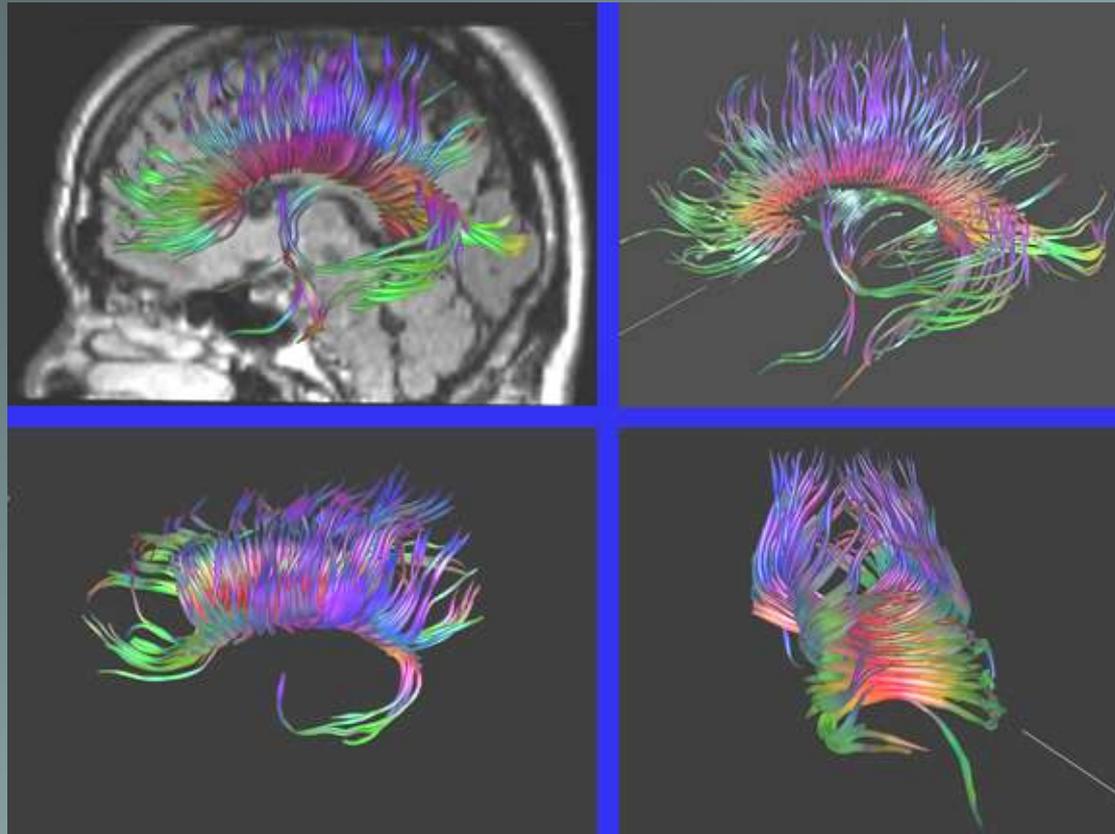
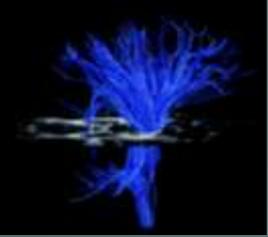


Tractografia
das Fibras
Fiber Tracking



Clustering das
Fibras
Fiber Clustering





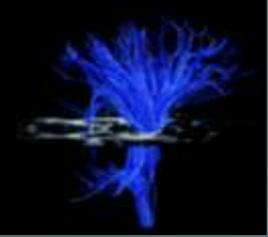
Paciente normal

As fibras nervosas são representados por faixas de cores, codificado para indicar a direcção da difusão anisotrópica em feixes nervosos:

Vermelho = esquerda para a direita.

Azul = cima para baixo.

Verde = anterior para posterior.

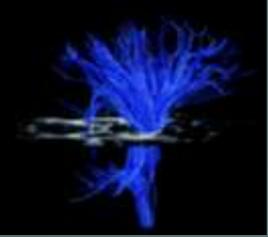


DTI *Volume Rendering*:

Sub-área da
computação gráfica.

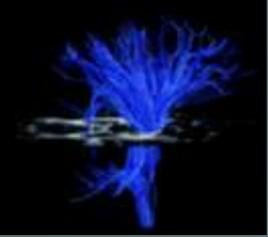
Gera imagens a partir
de dados
volumétricos.

Efectuado através do
mapa FA: torna
possível a análise de
dados, para mostrar
informações do
interior dos volumes e
não apenas das
superfícies.



Aplicações:

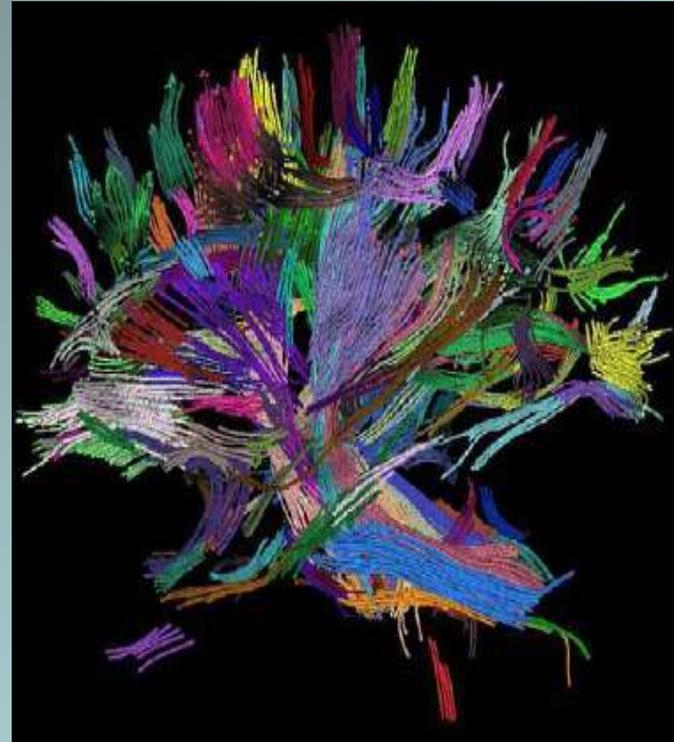
- Diâmetro e visualização das fibras nervosas cerebrais e sua densidade;
- Estado da mielinização na neurogênese (recém-nascidos);
- Grau de (des)mielinização ao longo da idade e em casos de doença;
- Estudos pré e pós operatórios cerebrais;
- Esclerose Múltipla;
- Desordens psiquiátricas: Esquizofrenia;
- Estudo do miocárdio (músculo cardíaco).



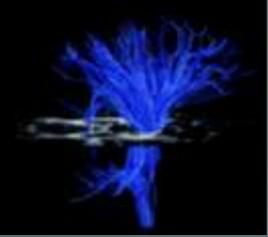
Aplicações:



Vista superior das
fibras nervosas
cerebrais

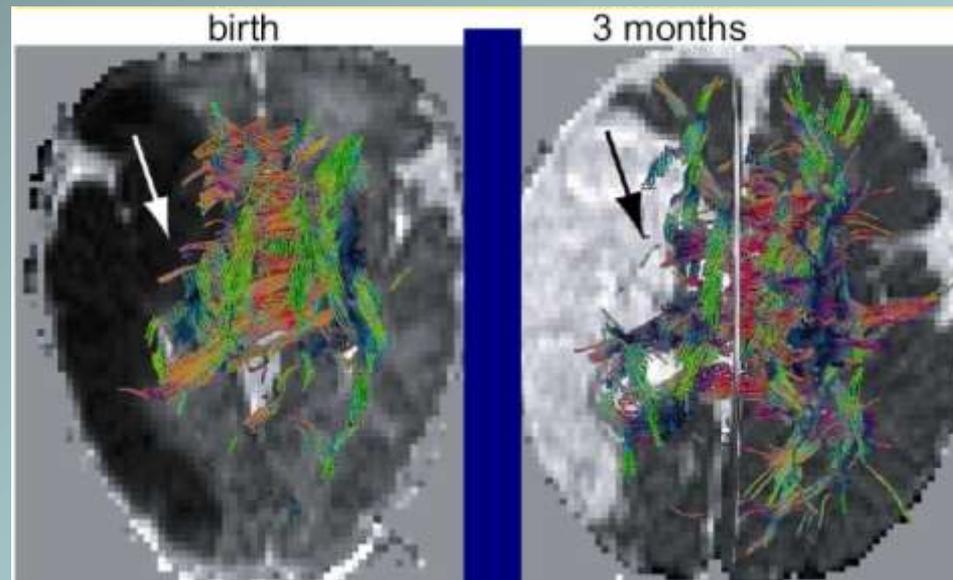


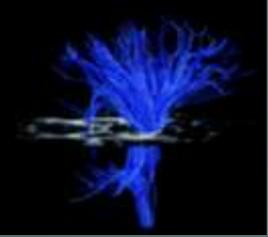
Vista lateral das fibras
nervosas cerebrais



Aplicações:

- Recém-nascidos:
 - O aumento da anisotropia verifica-se na substância cinzenta cerebral;
 - A anisotropia diminui progressivamente durante os primeiros meses de vida.



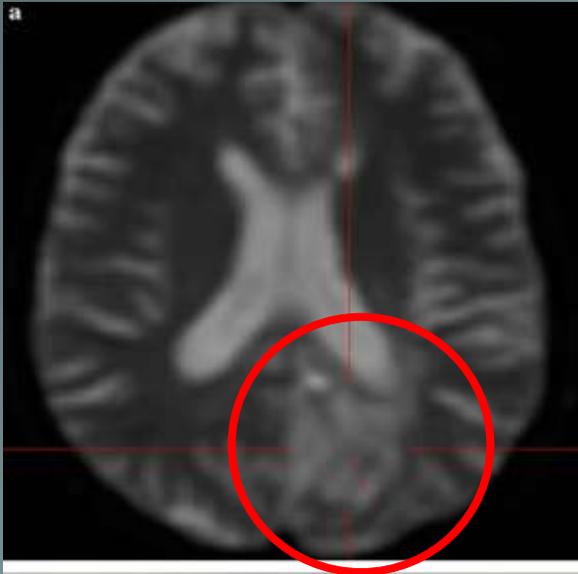


Aplicações – Tumor Cerebral:

Oligodendroglioma occipital ,
homem com 49 anos.

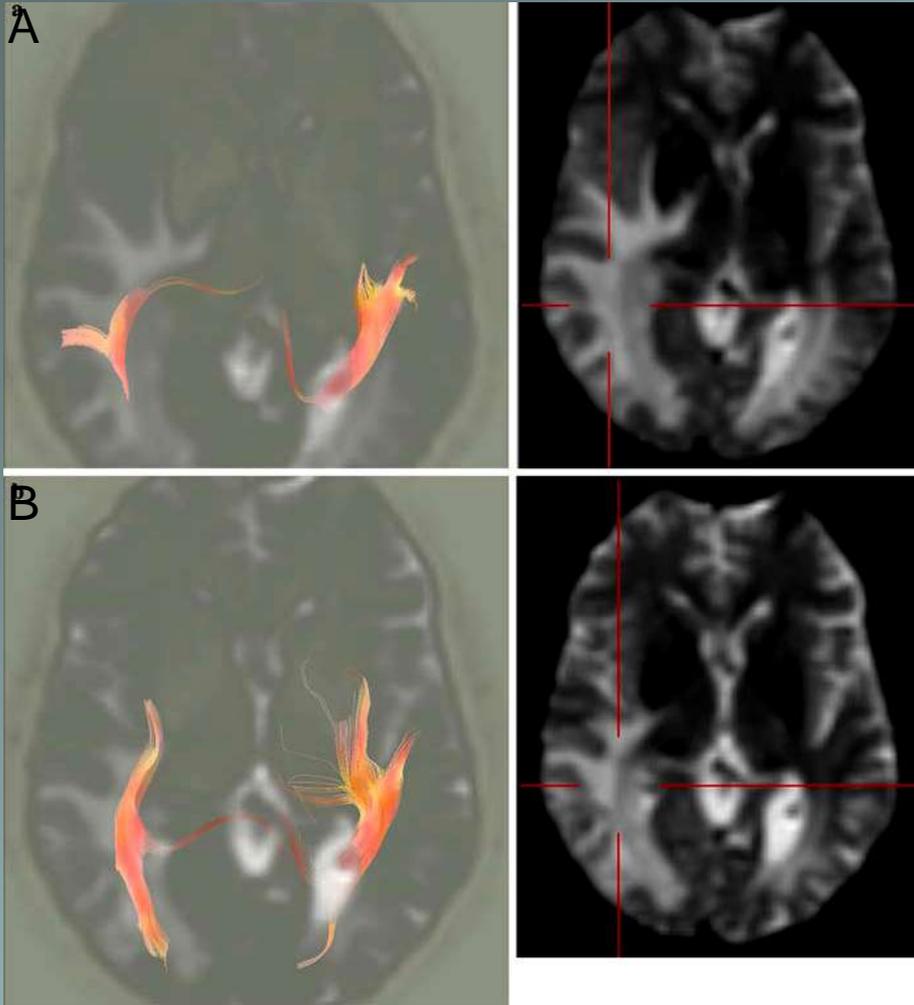
- Imagem superior: hipersinal acentuado no lobo occipital esquerdo correspondente ao oligodendroglioma, com o edema envolvente.

- Imagem Inferior: falta de difusão anisotrópica e reconstrução do tracto das fibras.

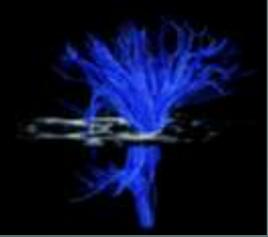




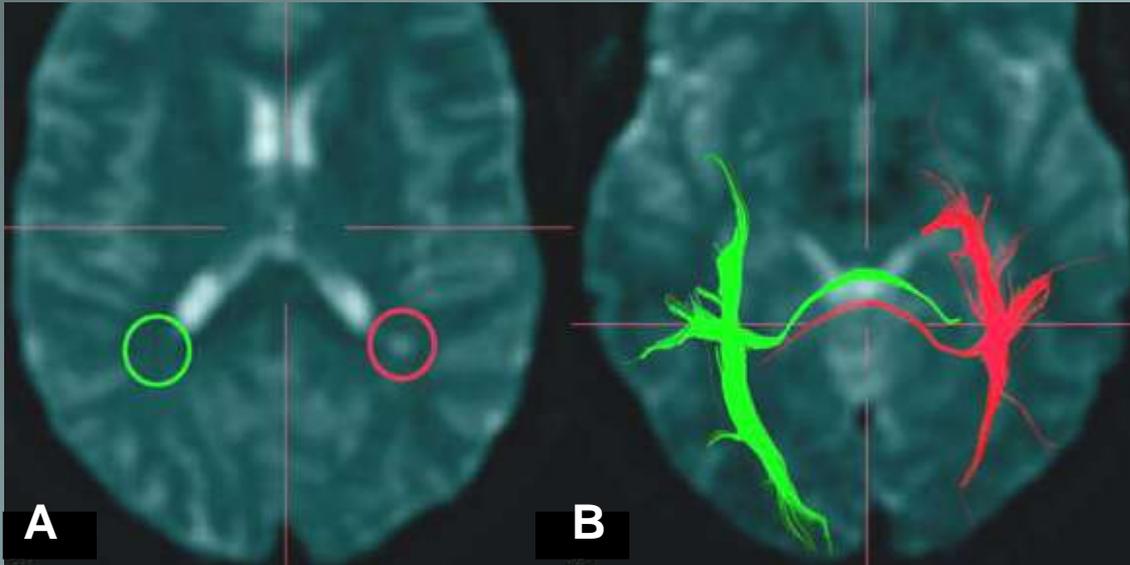
Aplicações – Metástases Cerebrais:



Recuperação da direcção do tracto das fibras nervosas num homem de 53 anos com metástases occipitais bilaterais antes (a) e após tratamento com quimioterapia (b).



Aplicações – Esclerose Múltipla:

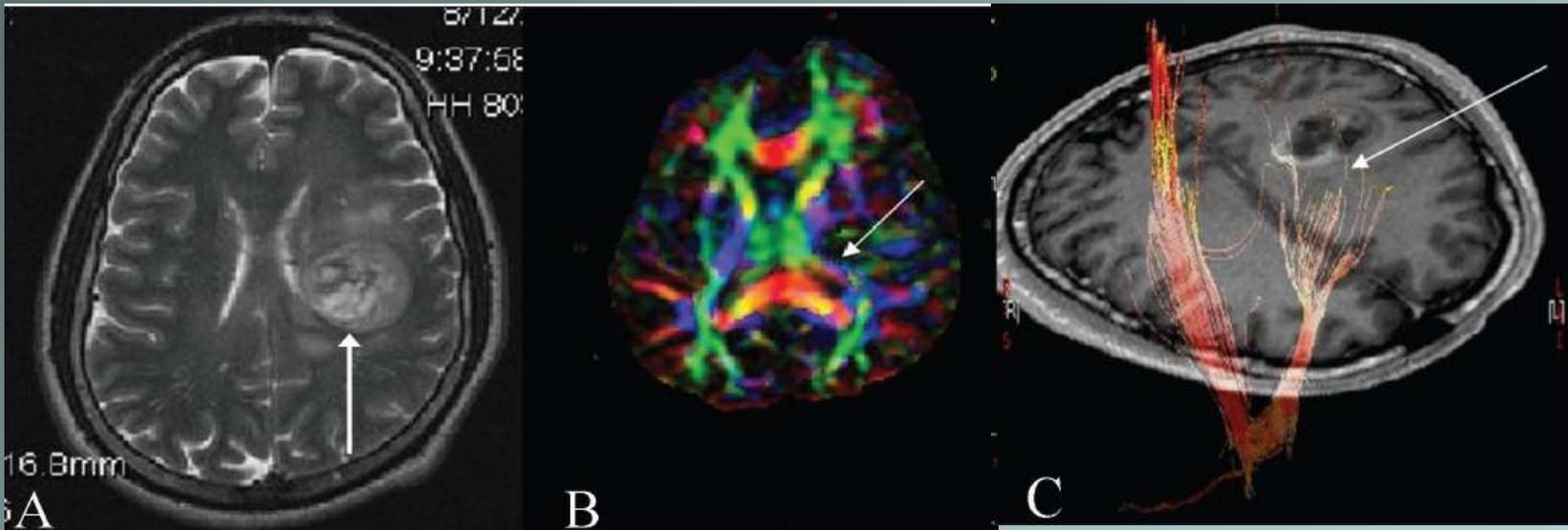


A - Círculos correspondem a regiões de interesse onde tem início a reconstrução do tracto da fibra nervosa.

B - Sobreposição da reconstrução do tracto das fibras.

Nota: redução da reconstrução do tracto da fibra da substância branca lesada, em especial para conexões visuais occipitais, em comparação com o hemisfério contralateral.

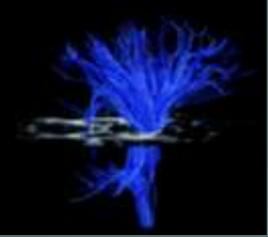
Aplicações – Tumor Cerebral:



Paciente com défices neurológicos do lado direito

- A) Imagem anatómica cerebral – visualização de massa tumoral;
- B) Mapa de cores da anisotropia direccional – distorção e coloração alterada (relativamente ao lado contralateral) na região tumoral;
- C) Tractografia 3D sobreposta a uma sequência de imagens 3D – demonstra um *cut-off* das fibras cortico-espinais esquerdas

Ruptura completa do tracto das fibras nervosas (feixe corticoespinal esquerdo), muito bem demonstrado pela Tractografia.



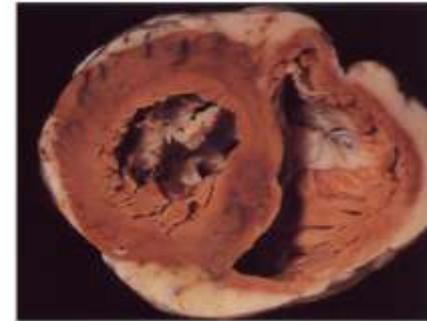
Aplicações - Miocárdio:

CORAÇÃO (Miocárdio):

- Em áreas isquêmicas:
 - As paredes do músculo ficam mais finas;
 - Aumento da anisotropia;
 - Orientação das fibras aleatórias.

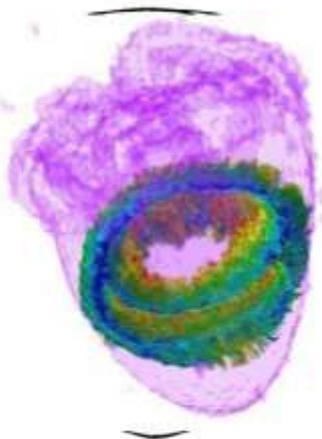


Sagittal section through the heart

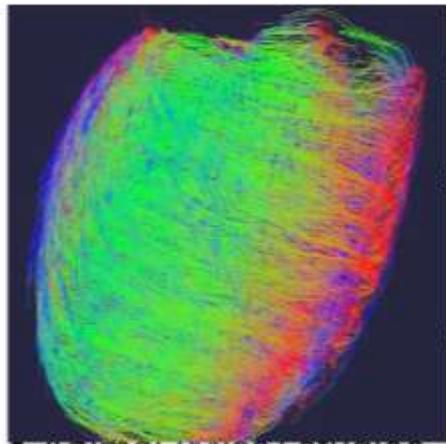


Short-axis section through the heart

[Anderson, 1980]

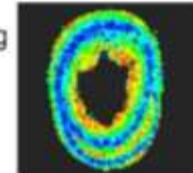


Model of Left Ventricle, depicting helix angle [Bovendeerd, 1992]

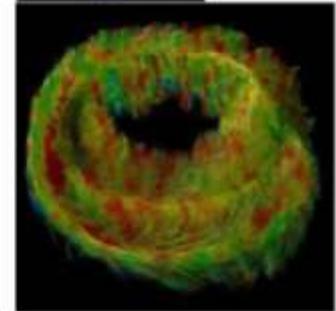
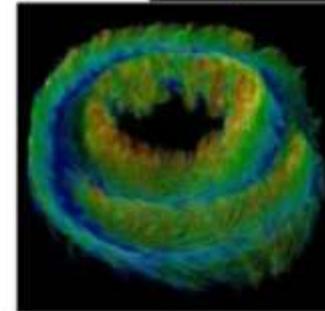
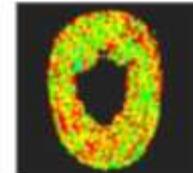


Animal (Mice) studies

Hue color mapping
Helix Angle



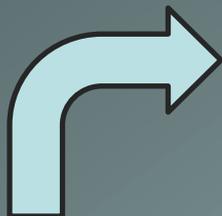
Hue color mapping
Fractional Anisotropy



Illuminated lines + Shadows



Amostras



Técnicos
Matemáticos

Aquisição de dados

Imagens de difusão
Imagem do tensor de difusão

Aplicações

Anatomia da substância branca

Estrutura Muscular

Aplicações Clínicas

Biólogos
Médicos
Neurocientistas



Dados

Computação e visualização

Cientistas computacionais
Matemáticos

Índices
escalares

Tracking
Clustering

Glyphs

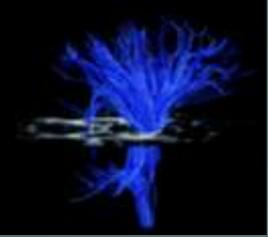


Números



Conclusões:

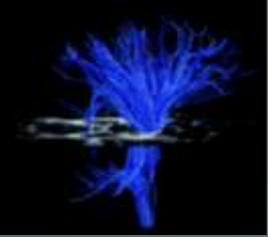
- DTI possibilita a visualização detalhada da substância branca cerebral e fibras musculares do miocárdio (mais recentemente);
- Detecção precoce de patologias para delinear um tratamento mais eficaz (eficácia na prática clínica);
- Permite a demonstração de uma variedade de perturbações cerebrais, como a esclerose múltipla e doenças degenerativas;



Conclusões:

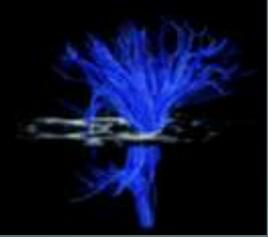
- Melhorias nas técnicas de imagem e seu processamento possibilitam novas formas de analisar imagens de RM, como por exemplo RM funcional;

Human Brain
fMRI DTI



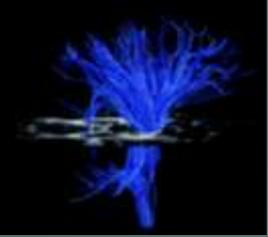
Conclusões:

- Maior sensibilidade e especificidade que a imagem de RM convencional para visualização da integridade das fibras nervosas;
- Contribuição para o planeamento de cirurgias em neuro-oncologia e epilepsia;
- Poderá vir a ser uma ferramenta útil na investigação da relação entre estruturas e funções cerebrais;
- Ainda é uma técnica em crescimento e desenvolvimento, tendo de ultrapassar certas limitações, tanto na aquisição como no processamento das imagens, como por exemplo, na angulação das fibras nervosas (para um melhor processamento) e em regiões com baixa anisotropia.



Um Vídeo...





Referências Bibliográficas:

- Awate S., Zhang H., A Fuzzy, Nonparametric Segmentation Framework for DTI and MRI Analysis: With Applications to DTI-Tract Extraction, IEEE Transactions Actions on Medical Imaging, Vol.26, No.11, November 2007.
- Basser P., Pajevic S., In Vivo Fiber Tractography Using DT-MRI Data, Magnetic Resonance in Medicine, 44:625-632, 2000;
- Berenschot G., Visualization of Diffusion Tensor Imaging, Eindhoven, 2003;
- Bihan D., Mangin JF, Diffusion Tensor Imaging: Concepts and Applications, Journal of Magnetic Resonance Imaging, 13:536-546, 2001;
- Conturo T., Lori N., Tracking Neuronal fibers pathways in the living human brain, Neurobiology, Applied Physical Sciences, Vol.96, 10422-10427, 1999;
- Field A., Diffusion and Diffusion Tensor Imaging, RSNA Multisection Course VN31, 2007;
- Jellison B., Field A., Diffusion Tensor Imaging of Cerebral White Matter: A Pictorial Review of Physics, Fiber Tract Anatomy, and Tumor Imaging Patterns, American Journal of Neuroradiology, 25:356-369, March 2004.
- O'Donnell LJ, Kubicki M, A Method for Clustering White Matter Fiber Tracks, AJNR 27, May 2006;
- Pierpaoli C., Basser P., Toward a quantitative assessment of diffusion anisotropy, Magnetic Resonance in Medicine, 36:893-906, 1996;
- Vilanova A, Zhang S, Kindlmann G, Laidlaw D, An Introduction to Visualization of Diffusion Tensor Imaging and Its Applications, Eindhoven.
- Westin CF, Maier SE, Image Processing for Diffusion Tensor Magnetic Resonance Imaging, Proceedings of Second Int. Conf. on Medical Image Computing and Computer-assisted Interventions, 441-452, 1999;
- Wiegell M., Larsson H, Fiber Crossing in Human Brain Depicted with Diffusion Tensor Imaging, Radiology, 217:897-903, 2000;