



Teoria do Potencial Aplicada : uma contribuição para a descrição de rochas ígneas em bacias sedimentares

Rio de Janeiro, 2023

Conteúdo da apresentação

- Um pouco sobre mim;
- Uma (breve) contextualização do trabalho;
- Sobre os **dados magnéticos, a anomalia de campo total e a magnetização das fontes**;
- A **Teoria do Potencial** e o conceito de **Camada equivalente**;
- Exemplos: **Simulação numérica** e aplicação a **dados de campo**;
- Considerações finais.

Sobre mim...



○ Informações gerais

André Luis Albuquerque dos Reis

Prof. Adjunto da Faculdade de Geologia da UERJ (2021 - atual)

Coordenador do **Laboratório de Geofísica Exploratória (LAGEX)**

Supervisor do Capítulo Estudantil da **SEG-UERJ**



○ Informações gerais

André Luis Albuquerque dos Reis

Prof. Adjunto da Faculdade de Geologia da UERJ (2021 - atual)

Coordenador do **Laboratório de Geofísica Exploratória (LAGEX)**

Supervisor do Capítulo Estudantil da **SEG-UERJ**



Formação acadêmica

Bacharelado em **Física – UERJ** (2012)

Mestrado em **Geofísica – Observatório Nacional** (2016)

Doutorado em **Geofísica – Observatório Nacional** (2020)



O Informações gerais

André Luis Albuquerque dos Reis

Prof. Adjunto da Faculdade de Geologia da UERJ (2021 - atual)

Coordenador do **Laboratório de Geofísica Exploratória (LAGEX)**

Supervisor do Capítulo Estudantil da **SEG-UERJ**



Formação acadêmica

Bacharelado em **Física – UERJ** (2012)

Mestrado em **Geofísica – Observatório Nacional** (2016)

Doutorado em **Geofísica – Observatório Nacional** (2020)



Pesquisa atual

Na área de Geofísica Aplicada e Terra Sólida
trabalhando com os temas: **Problemas Inversos** e
Métodos Potenciais (dados de gravidade e
magnéticos)

Desenvolvendo trabalhos em **computação**
científica, métodos de **processamento**, **modelagem**
e **inversão de dados potenciais**

Uma (breve) contextualização do trabalho

Utilizar a Geofísica para o entendimento das propriedades física e o mapeamento de estruturas em subsuperfície que permitirá a geração de modelos que servirão de base para, por exemplo, aplicações na exploração de energia geotermal, armazenamento de CO₂ e estimar a geometria de depósitos para exploração mineral.

Entender como este sistema de rochas ígneas funcionou para guiar melhor a construção de modelos geológicos.



O método sísmico é uma técnica geofísica que permite obter como produto final uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

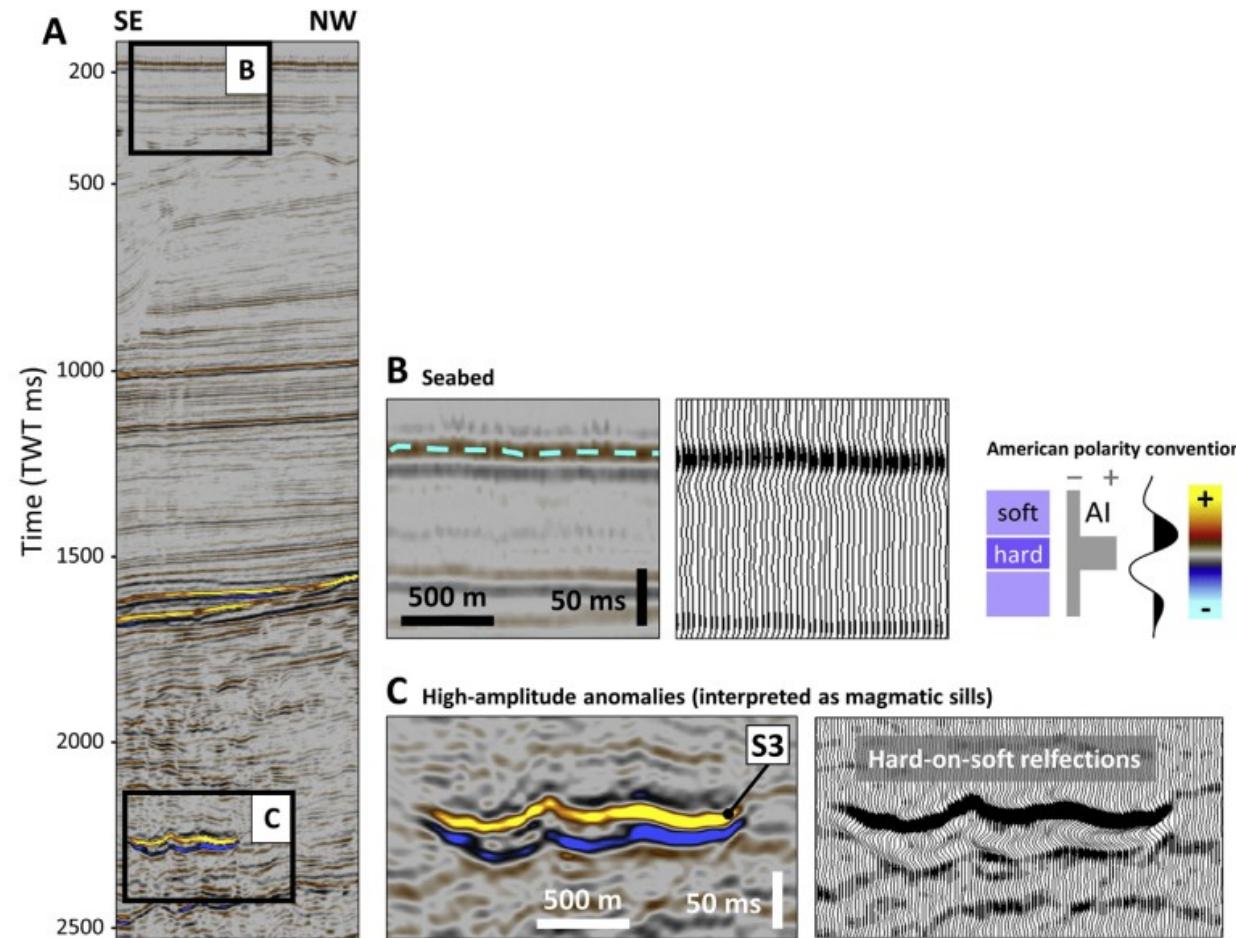


Fig. 3. Part of a seismic section showing the typical response of mapped high-amplitude anomalies, laterally discontinuous, that were interpreted as magmatic sills.

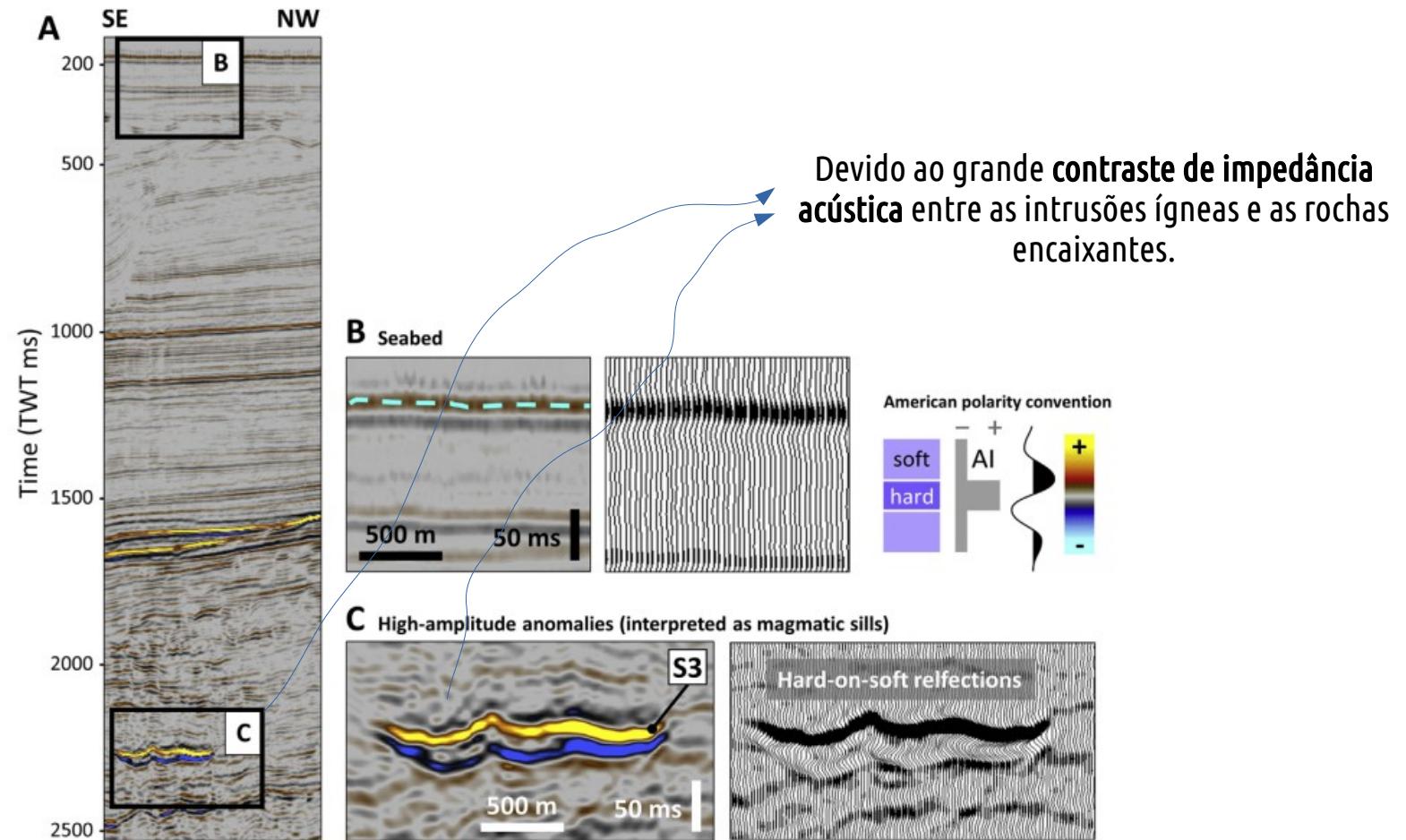
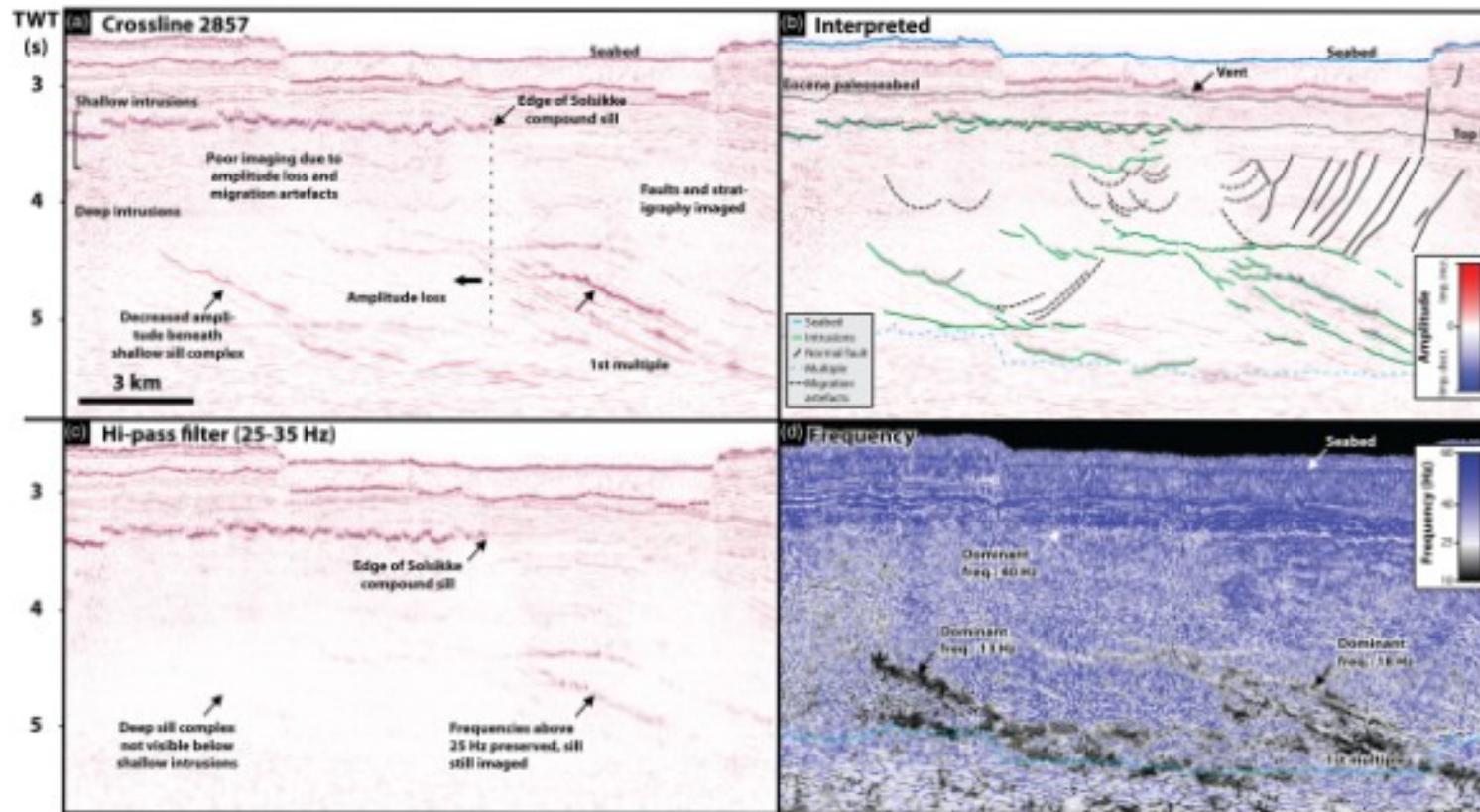


Fig. 3. Part of a seismic section showing the typical response of mapped high-amplitude anomalies, laterally discontinuous, that were interpreted as magmatic sills.

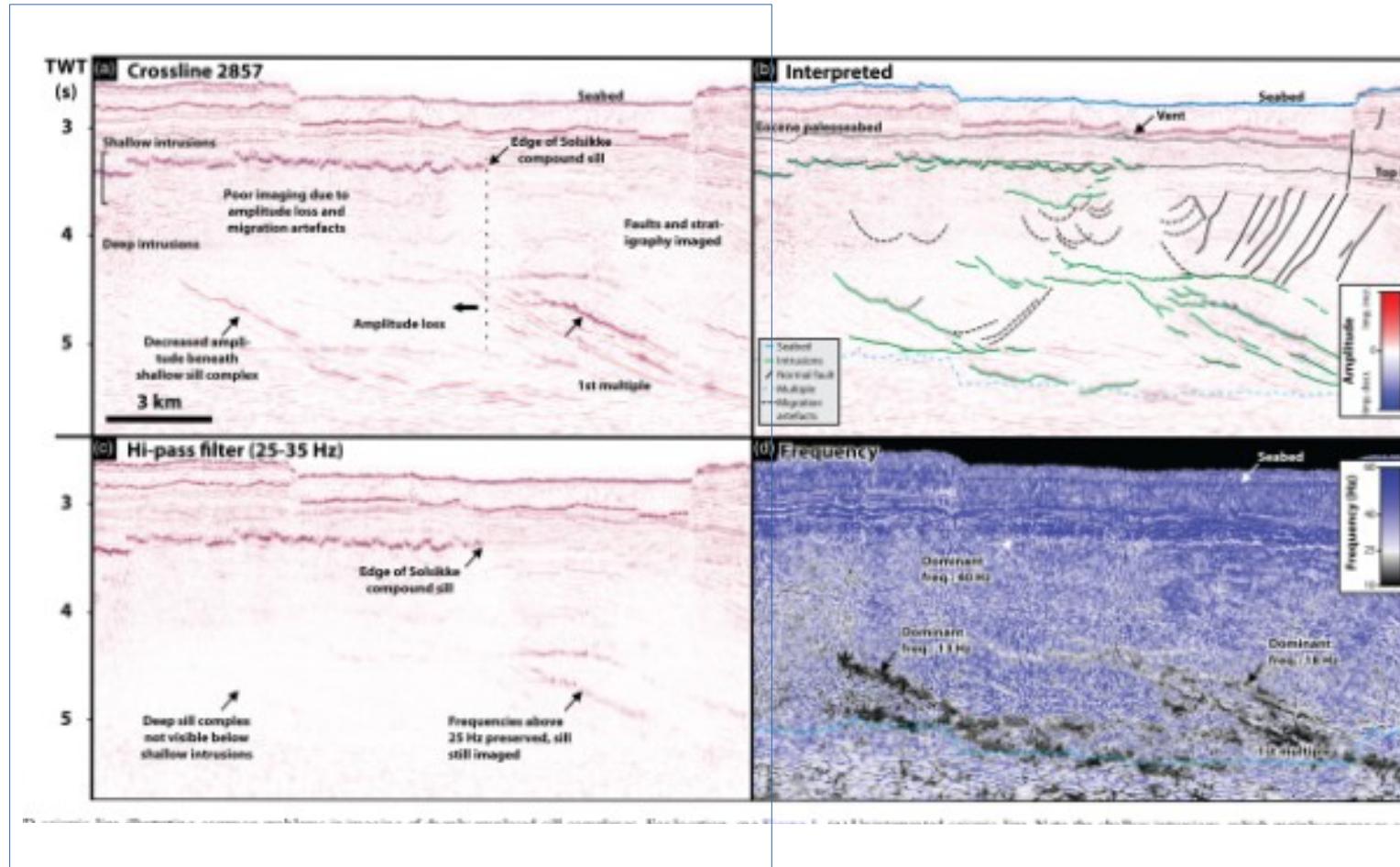
Limitação dos dados sísmicos em descrever ambientes com rochas ígneas, mas que, em tese, podem ser contornadas (ou ao menos atenuadas) por outros métodos geofísicos.

Podemos destacar, pelo menos, **três dessas limitações:**
(i) perda de resolução com a profundidade, **(ii)** efeito de rochas
sobrepostas e **(iii)** estruturas muito verticalizadas.

Identifica o problema de imageamento quando existem diversas intrusões ígneas em uma bacia sedimentar na Dinamarca

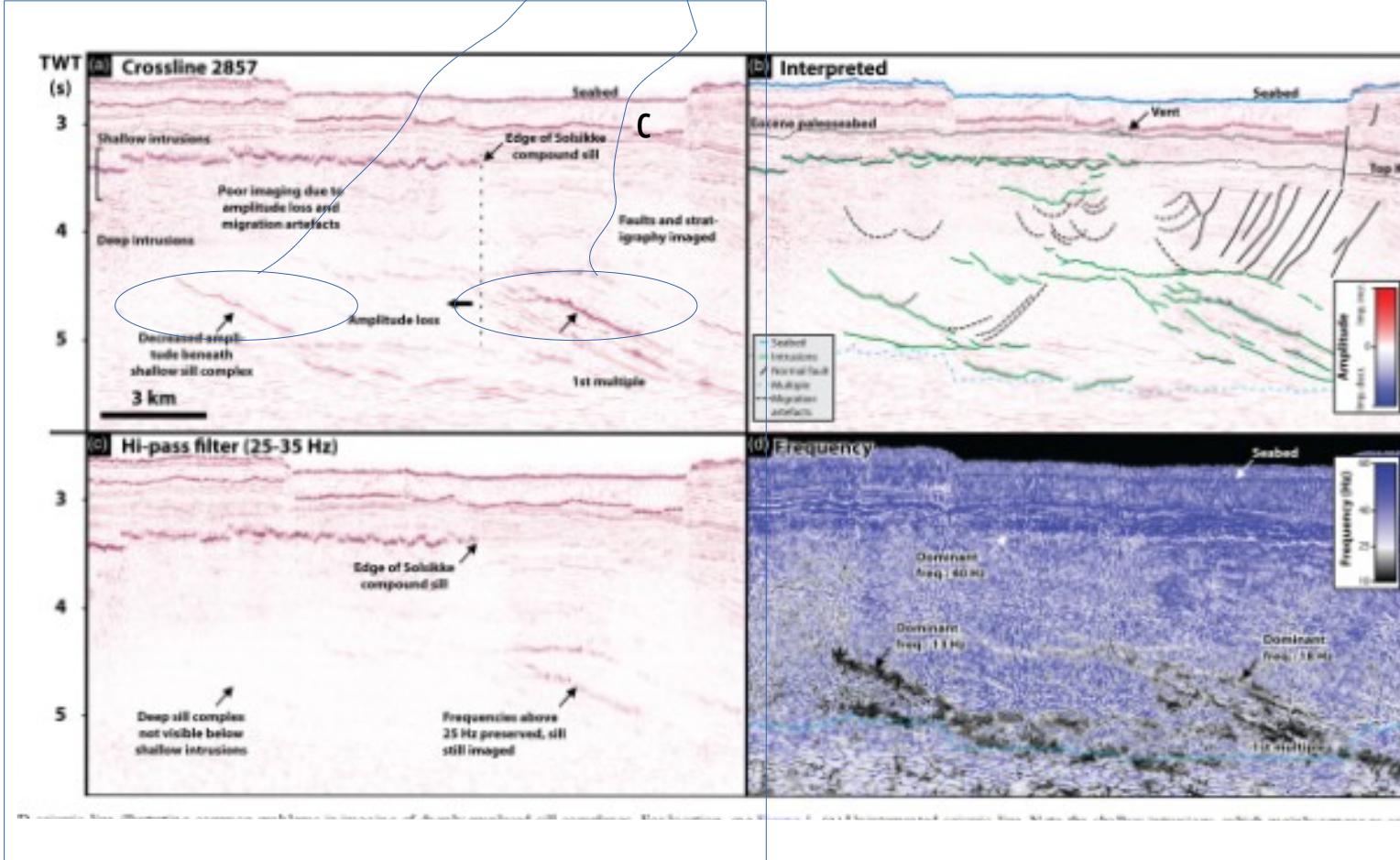


Identifica o problema de imageamento quando existem diversas intrusões ígneas em uma bacia sedimentar na Dinamarca



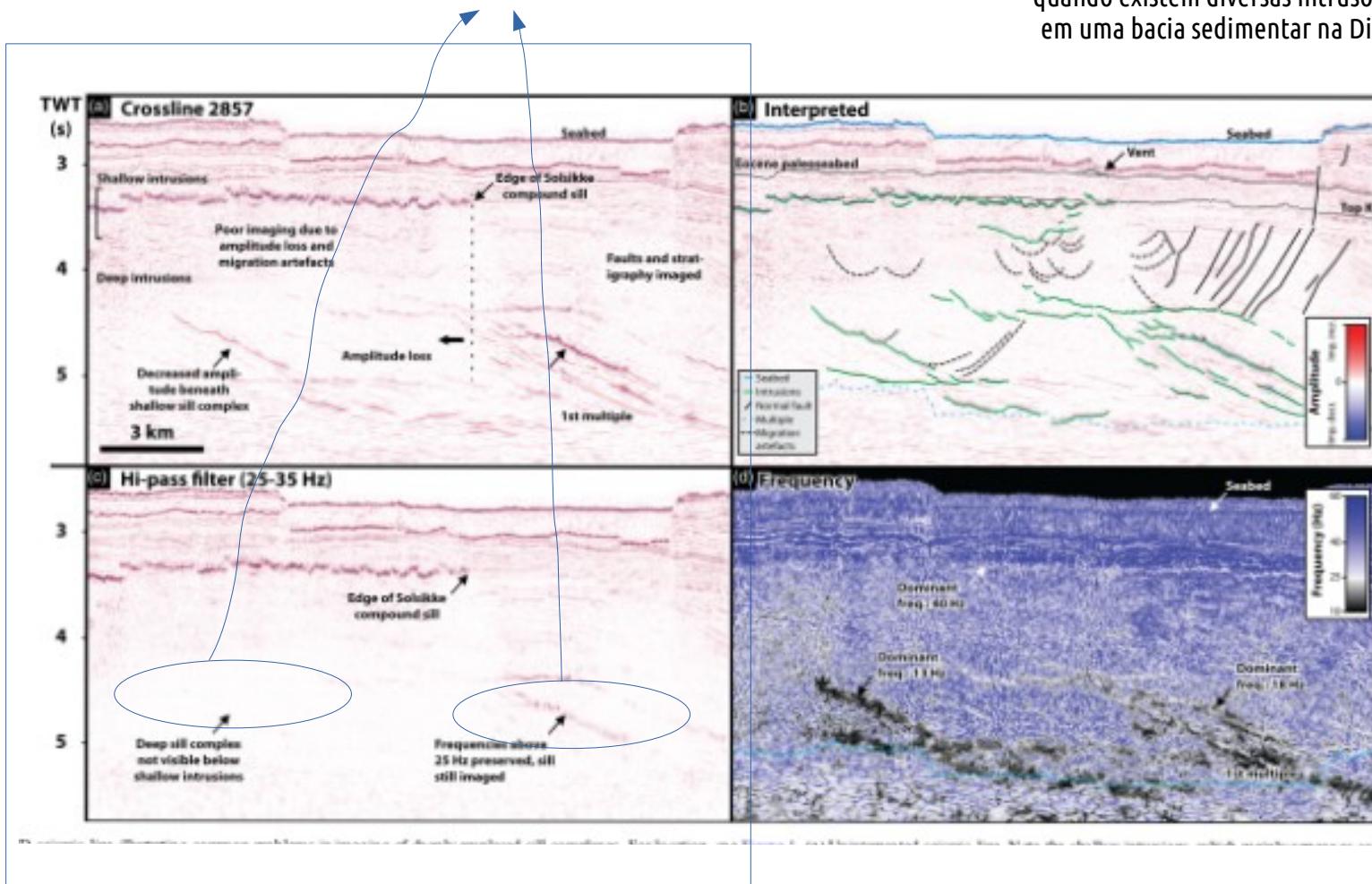
Perda de amplitude com a profundidade e também em reflexões mais rasas

Identifica o problema de imageamento quando existem diversas intrusões ígneas em uma bacia sedimentar na Dinamarca

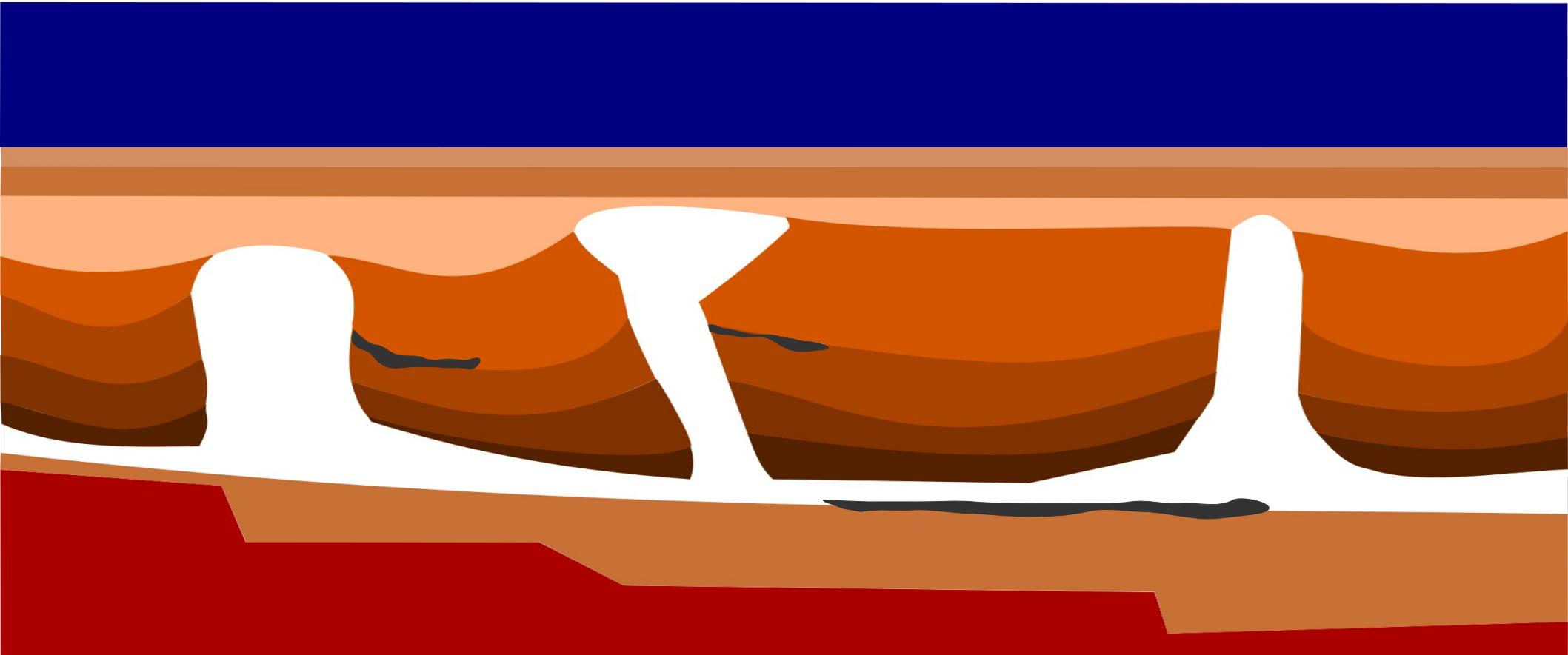


A depender do filtro que se aplica, a perda se torna ainda mais evidente

Identifica o problema de imageamento quando existem diversas intrusões ígneas em uma bacia sedimentar na Dinamarca

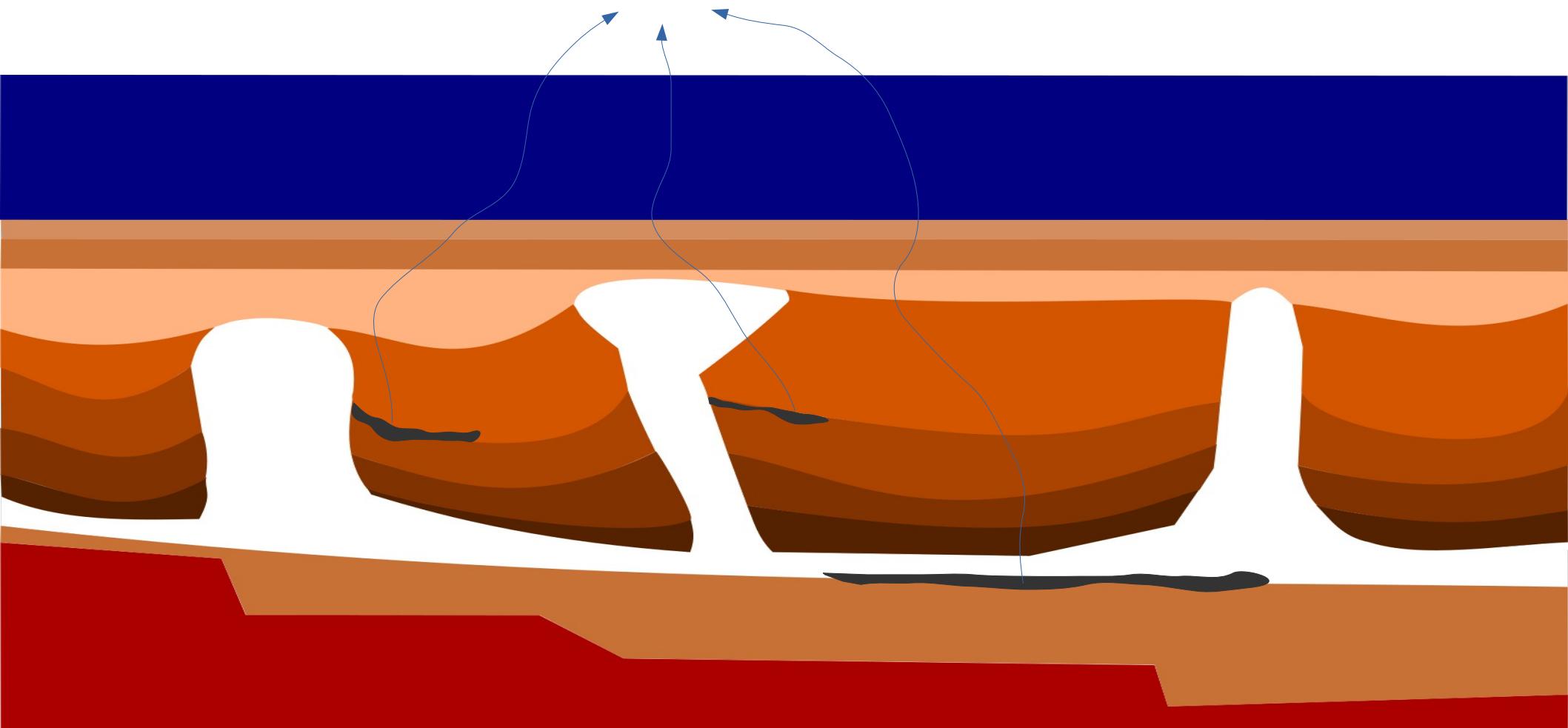


Contextualização



Contextualização

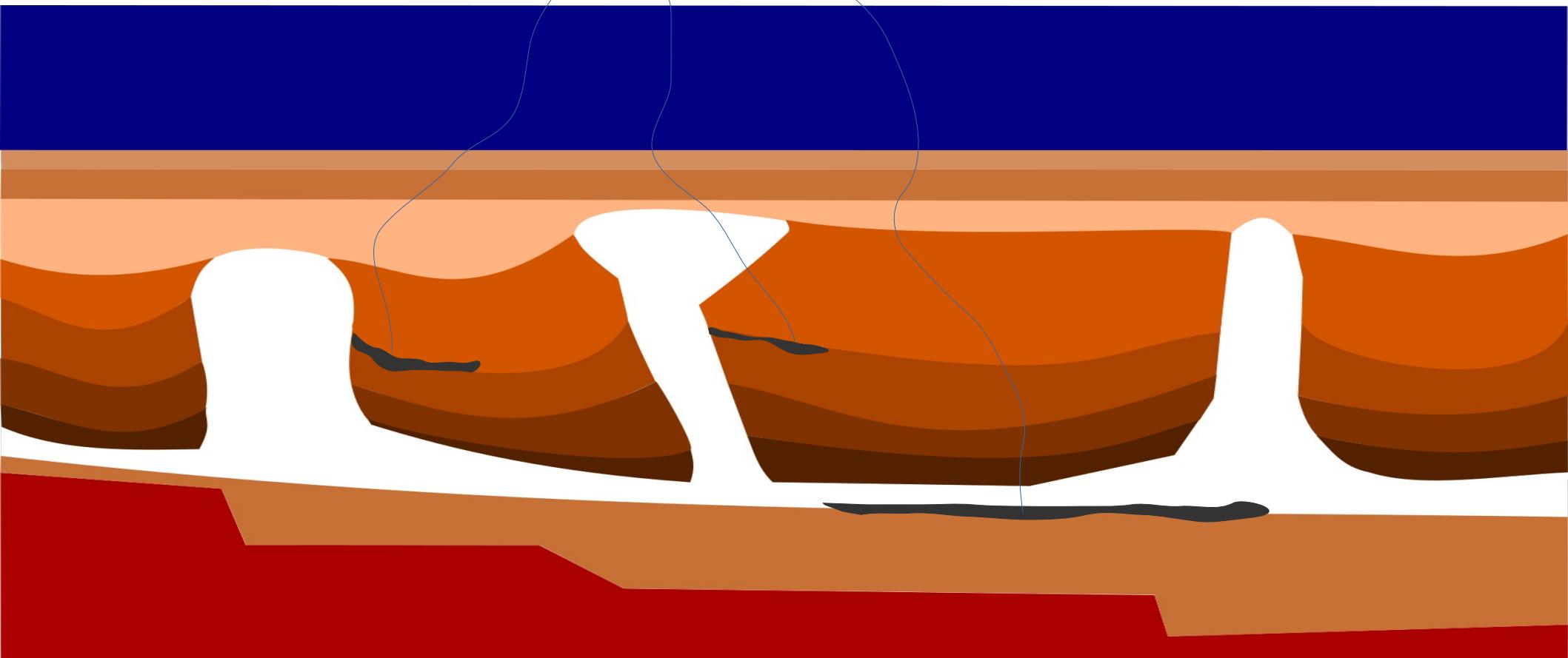
Em regiões mais complexas como, por exemplo, a existência de grandes muralhas de Sal.



Contextualização

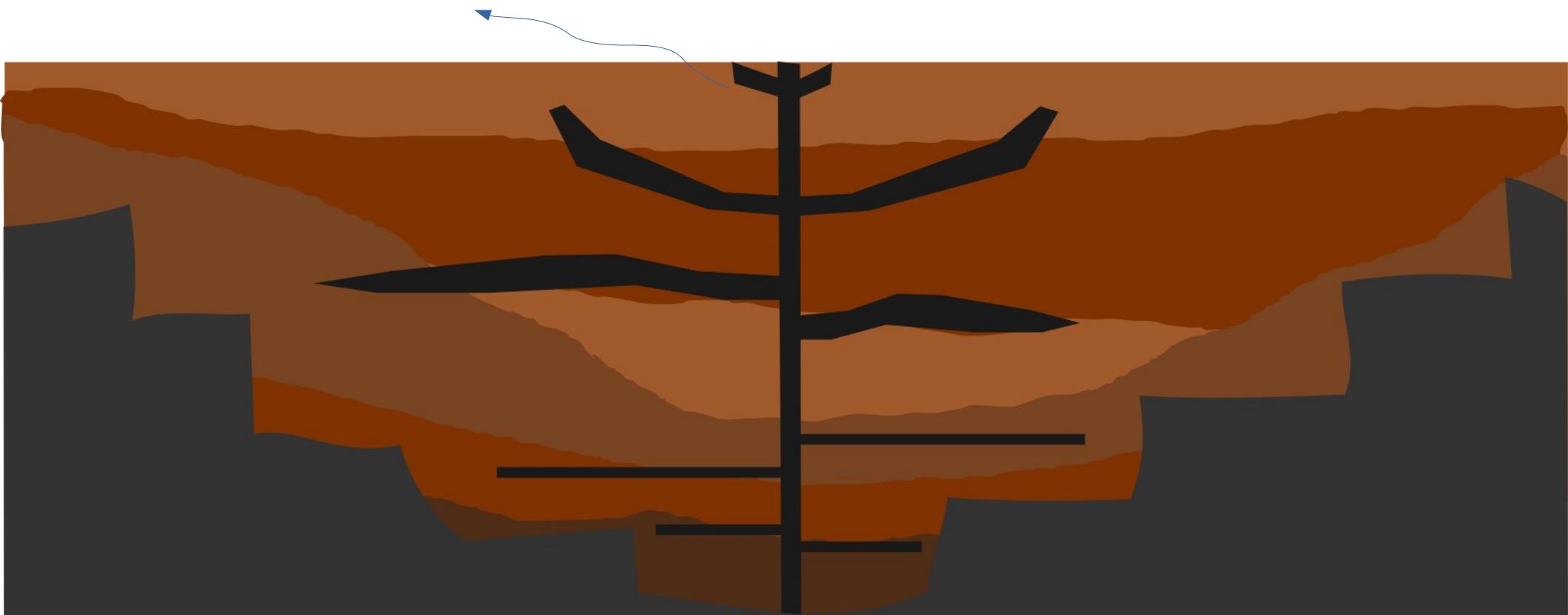
Em regiões mais complexas como, por exemplo, a existência de grandes muralhas de Sal.

Além da perda de resolução com a profundidade, existe o **pouco contraste de impedância acústica**, principalmente, na base do sal.



Qual o **problema geofísico** que temos em mãos no contexto dos dados magnéticos?

Estas rochas ígneas tem, de forma geral, uma
boa resposta magnética!



Contextualização

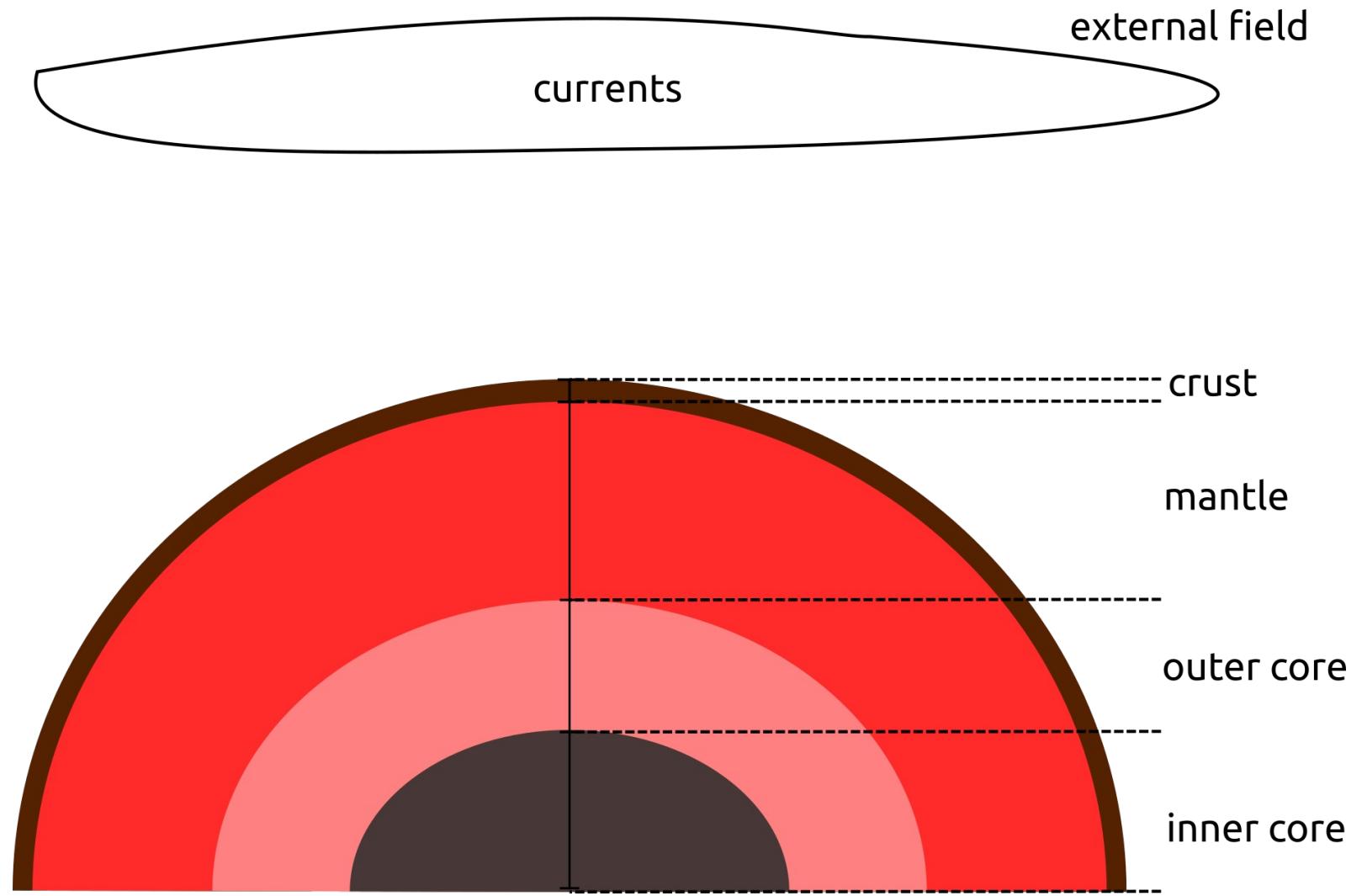
Estas rochas ígneas tem, de forma geral, uma boa resposta magnética!

De estudarmos as propriedades físicas (e.g., distribuição de magnetização) destas estruturas, bem como sua disposição em subsuperfície!

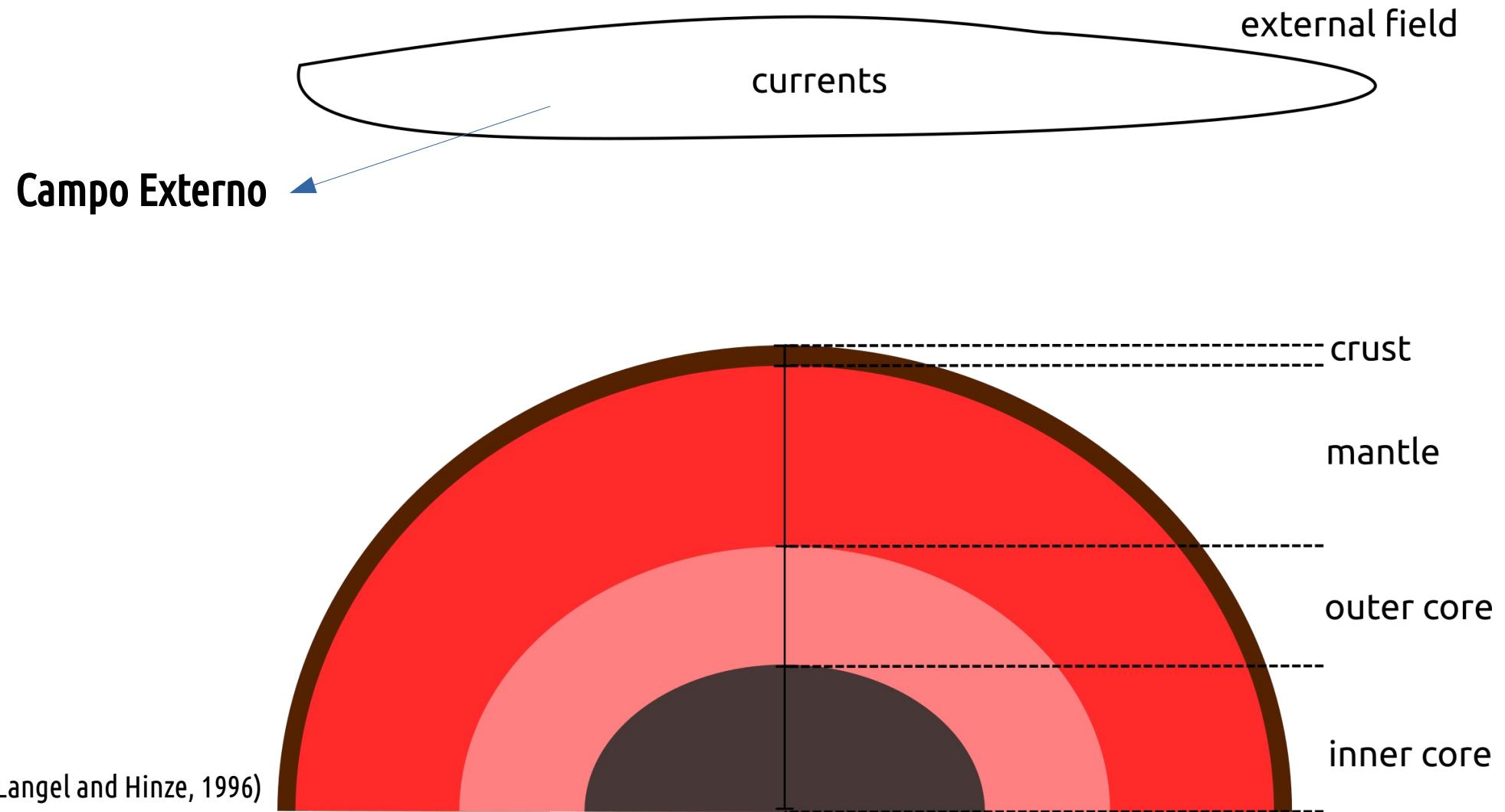


Os dados magnéticos e a Anomalia de campo total

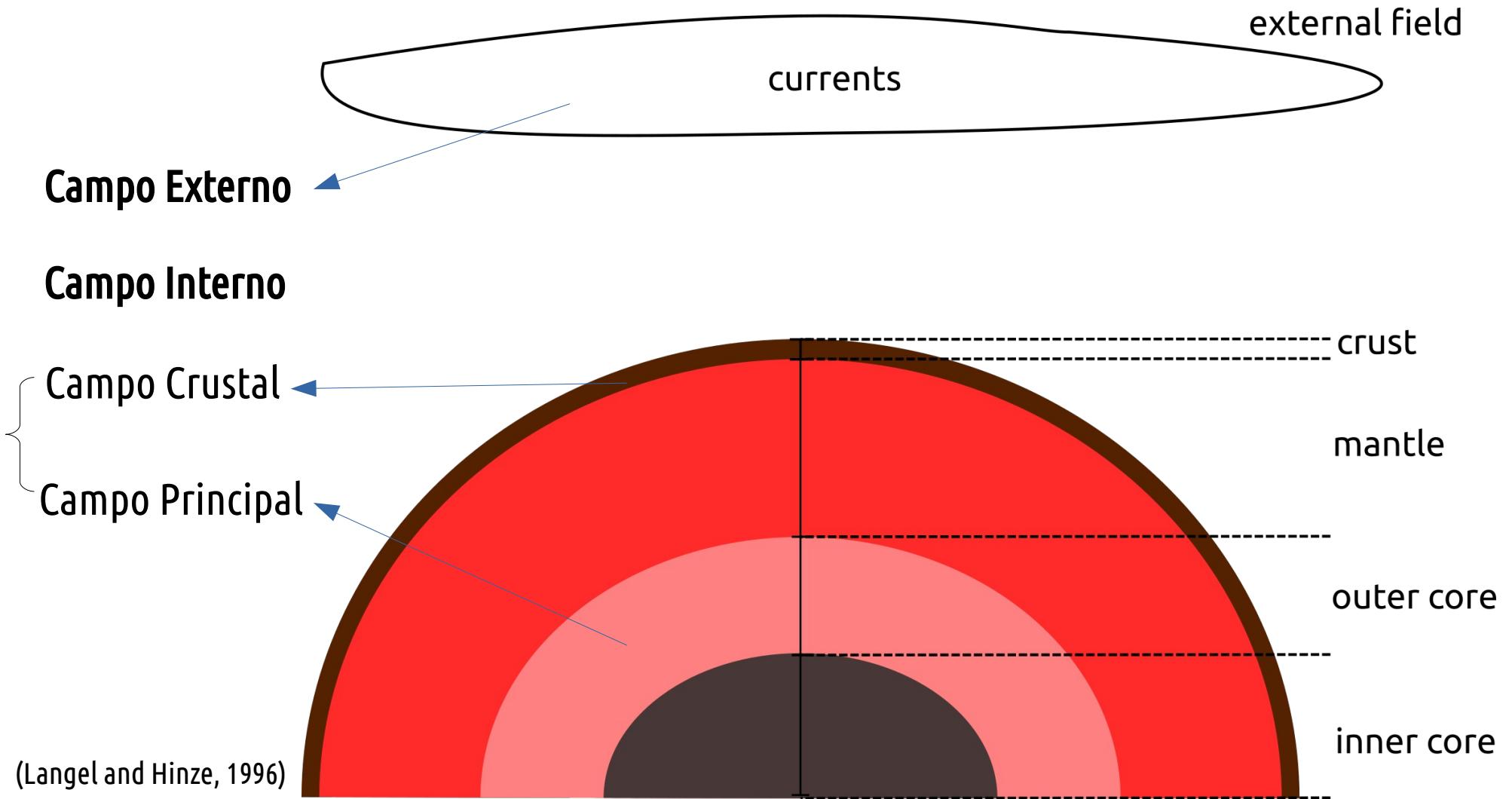
Campo geomagnético



Campo geomagnético



Campo geomagnético



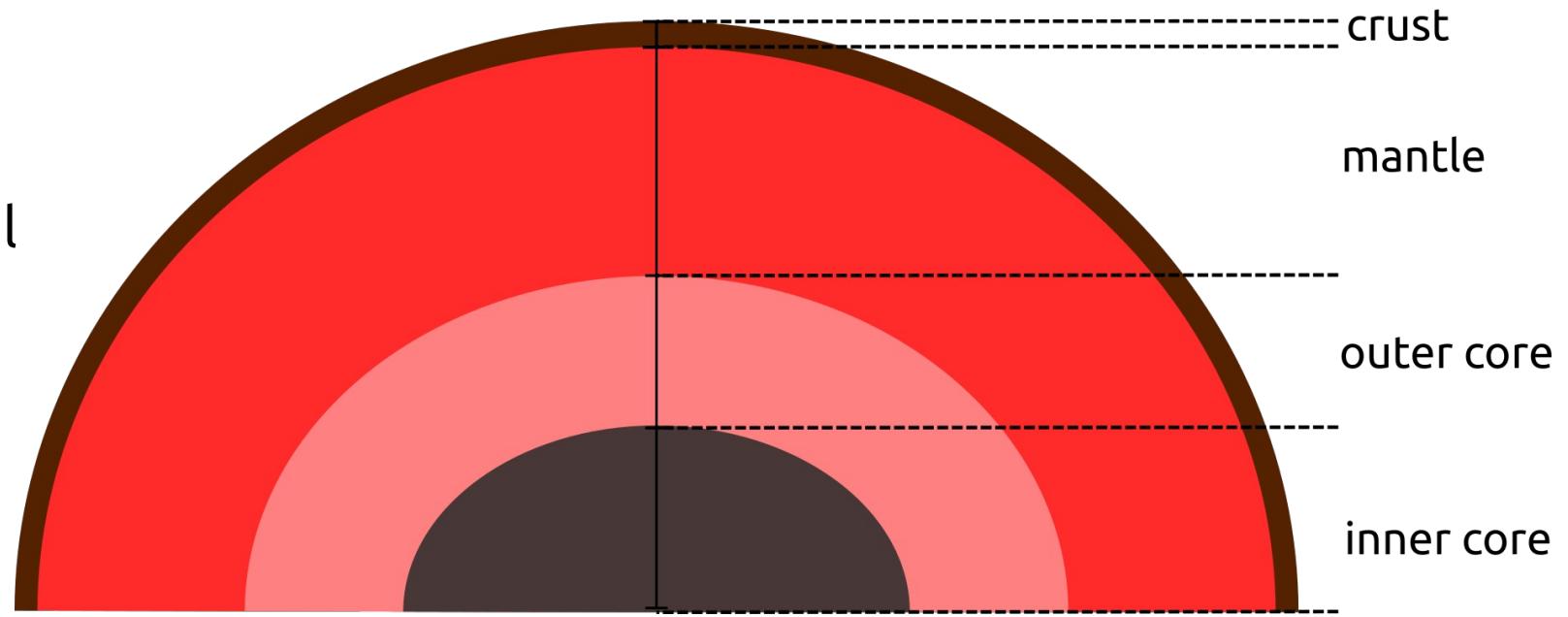
Campo geomagnético



Campo Externo

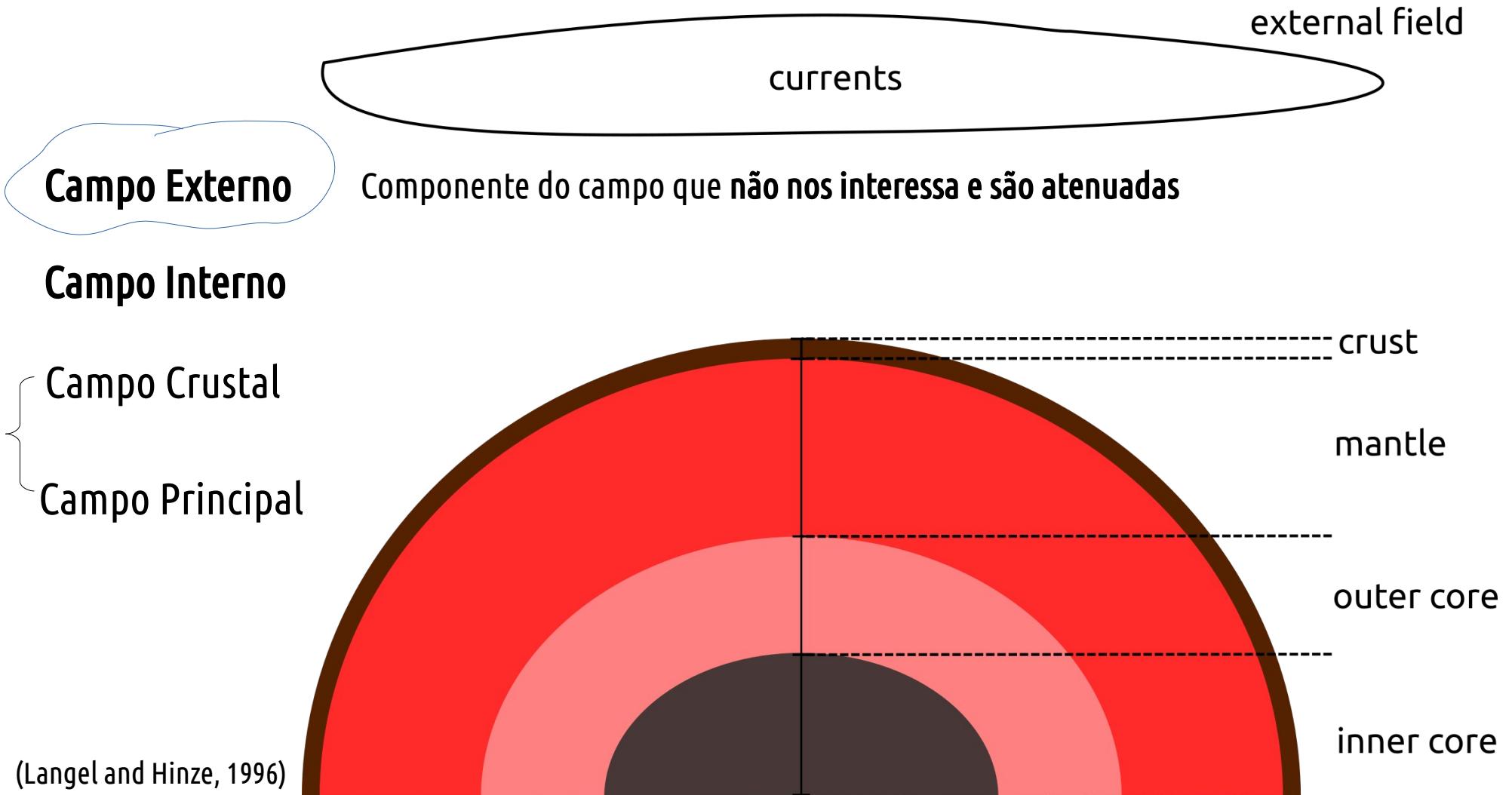
Campo Interno

Campo Crustal
Campo Principal



(Langel and Hinze, 1996)

Campo geomagnético



Campo geomagnético



Campo Externo

Campo Interno

Campo Crustal

Campo Principal

A componentes que nos interessa e que vamos ver
um pouco **mais profundamente** aqui.

crust

mantle

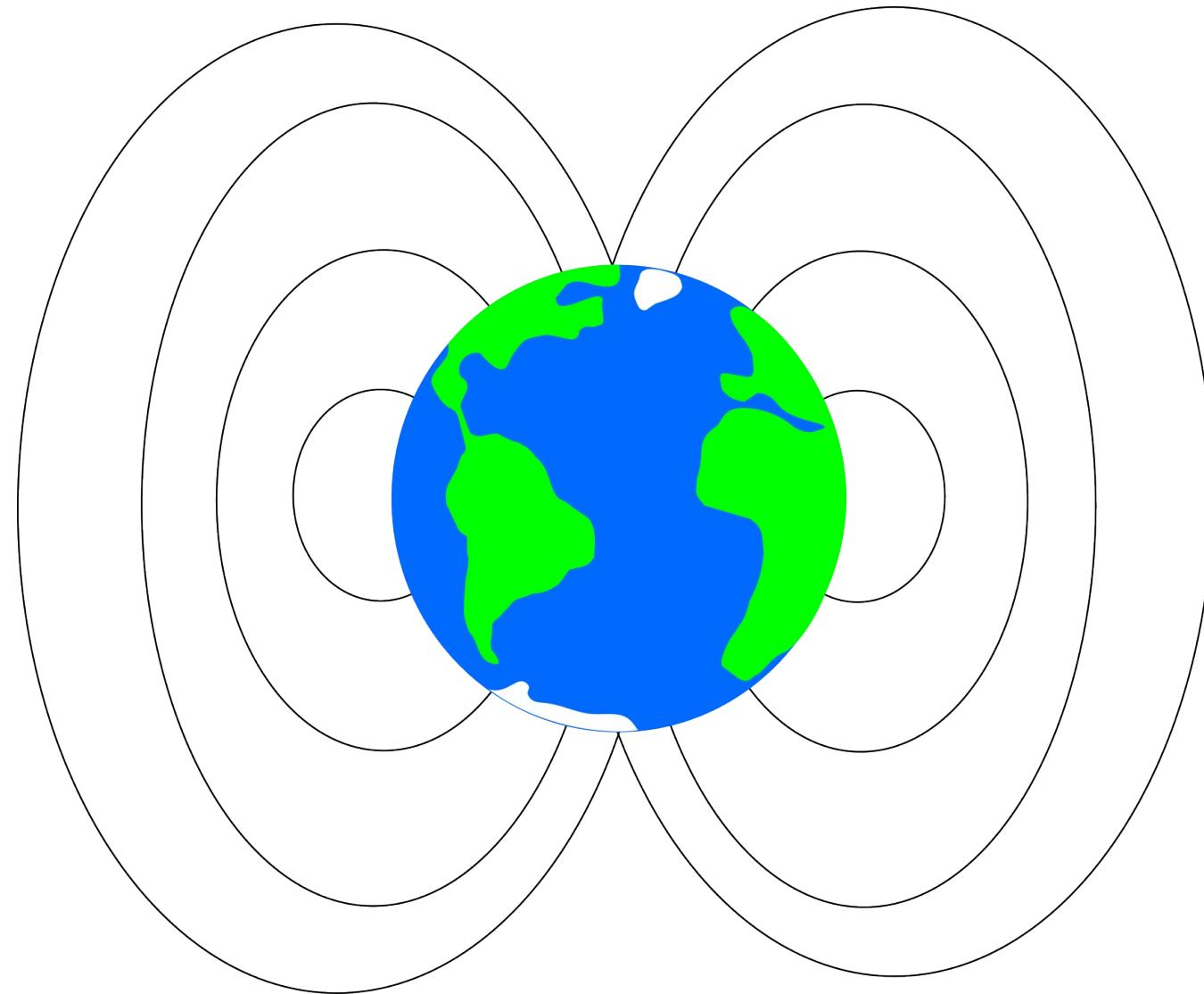
outer core

inner core

Falando primeiro do campo principal...

Campo principal

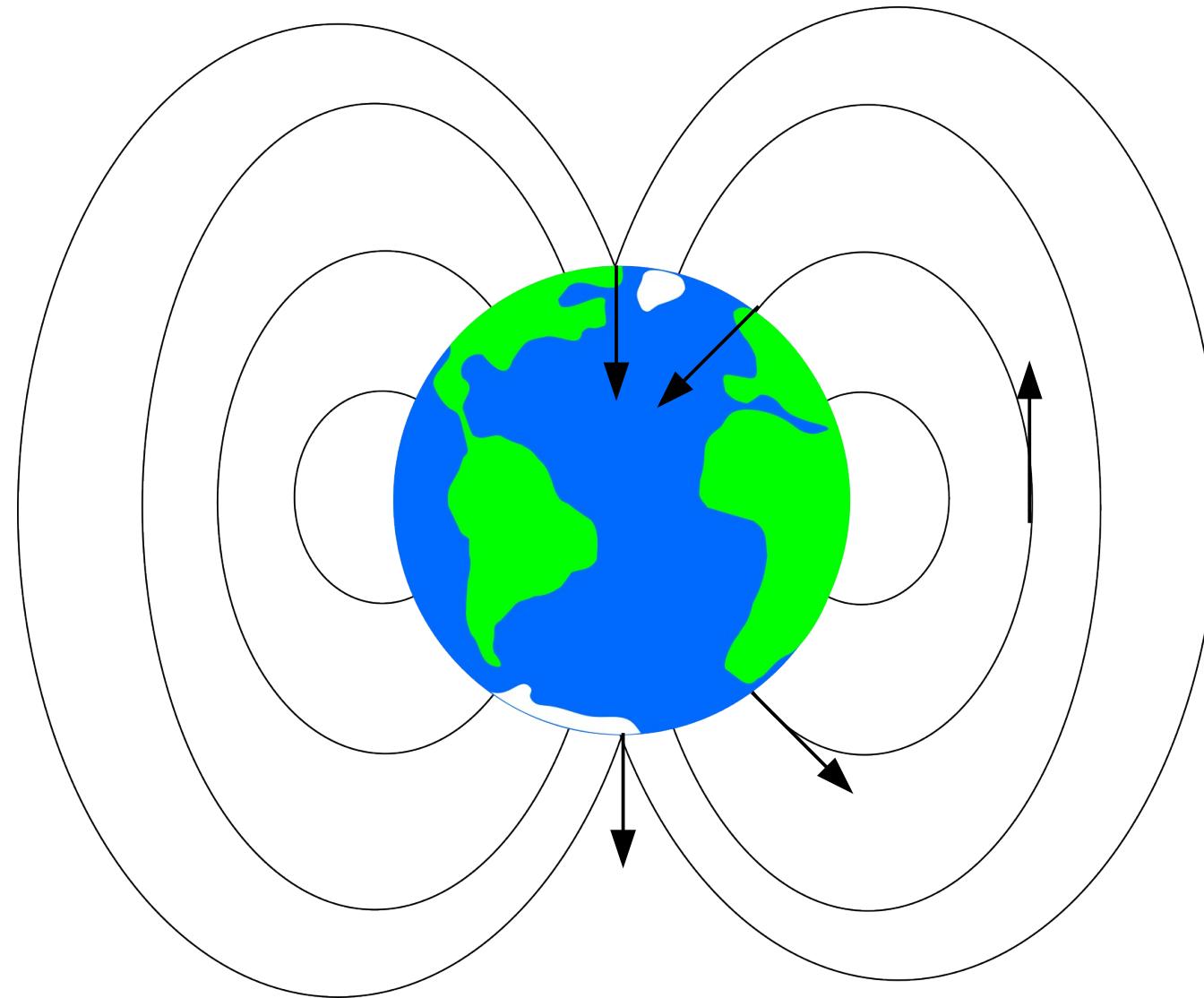
(Langel and Hinze, 1996)



A maior componente é de origem interna (cerca de 90%), mais especificamente, no núcleo externo.

Campo principal

(Langel and Hinze, 1996)

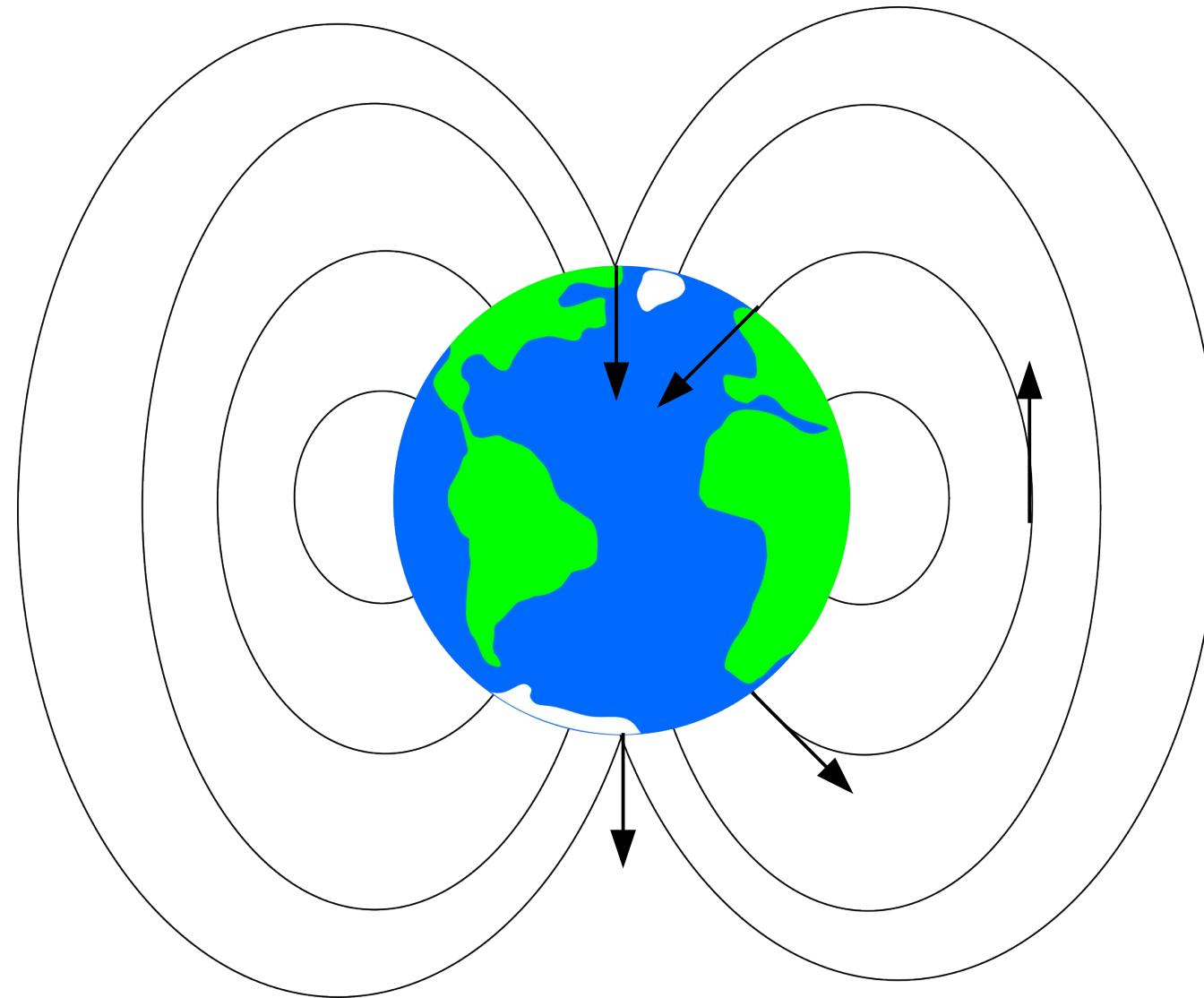


A maior componente é de origem interna (cerca de 90%), mais especificamente, no núcleo externo.

Predominantemente dipolar, que varia em direção e intensidade ao longo do anos.

Campo principal

(Langel and Hinze, 1996)

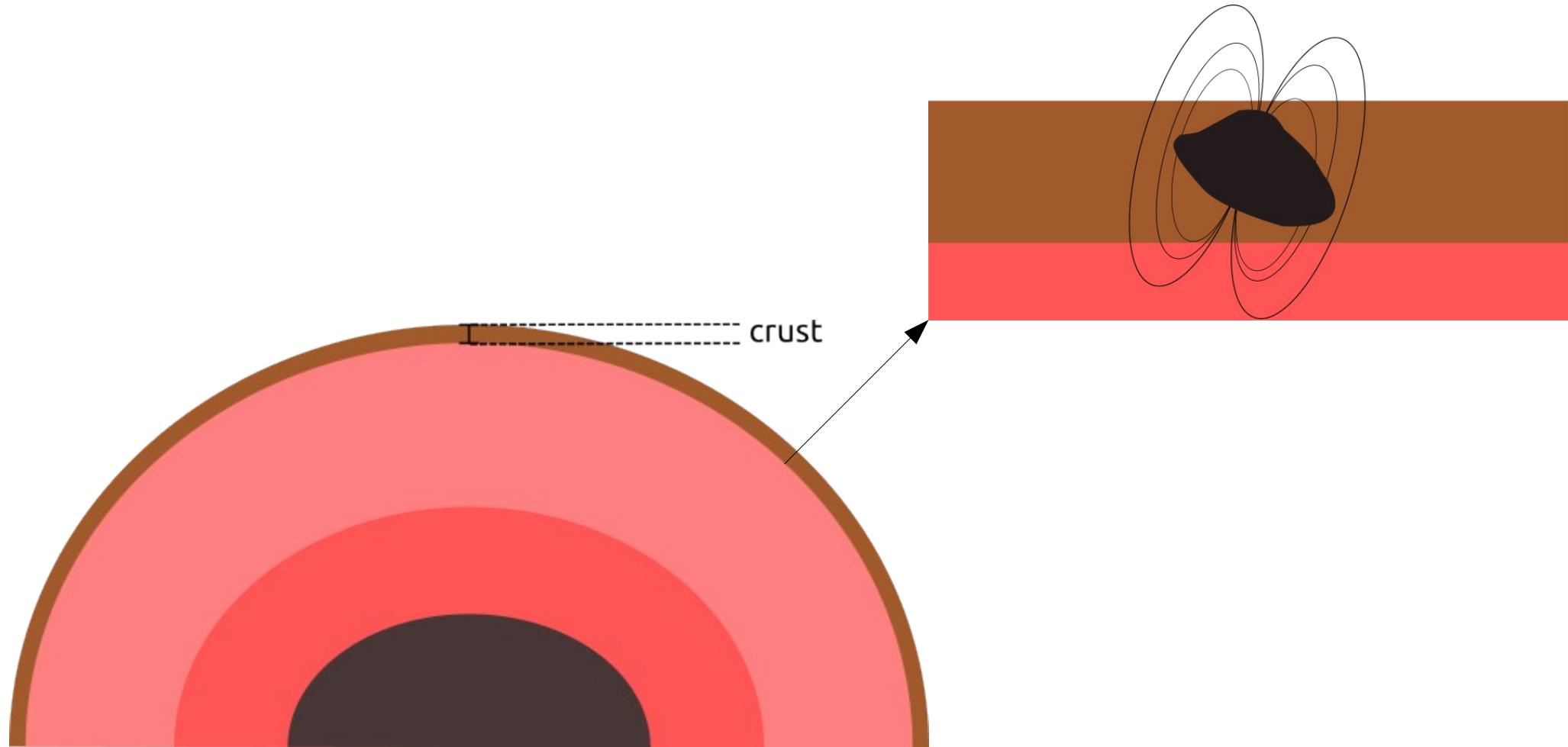


A maior componente é de origem interna (cerca de 90%), mais especificamente, no núcleo externo.

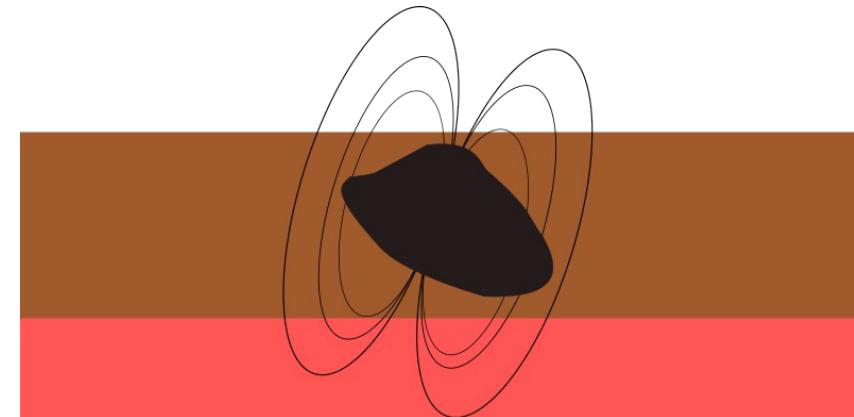
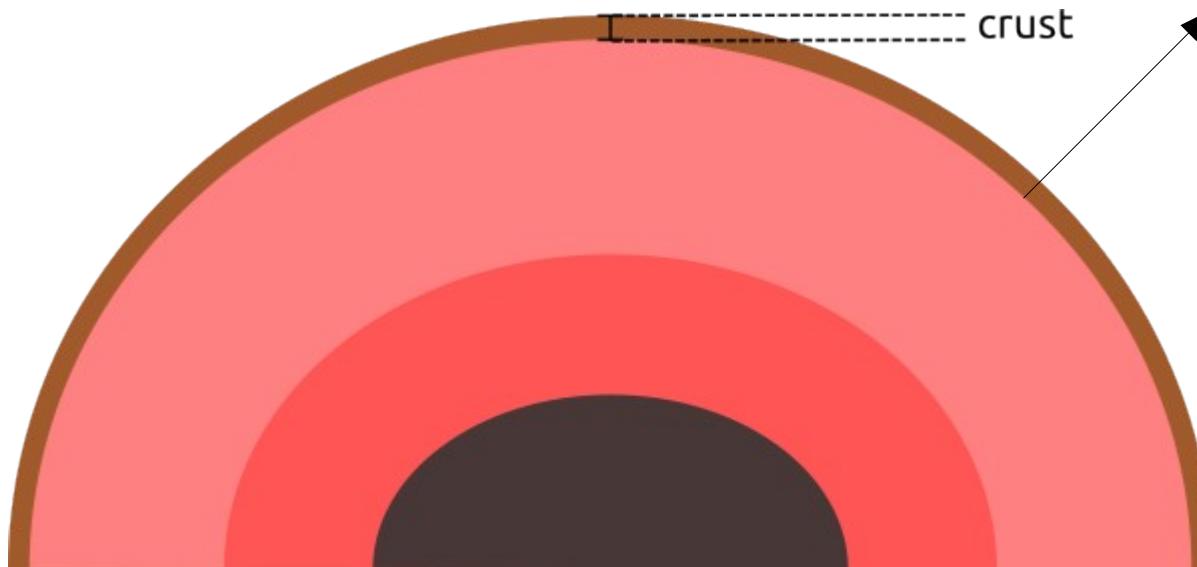
Predominantemente dipolar, que varia em direção e intensidade ao longo do anos.

Pode ser modelado, por exemplo, pelo *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*

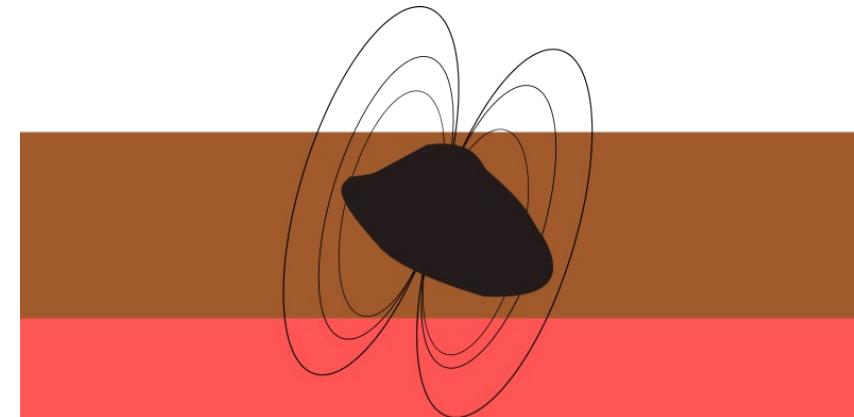
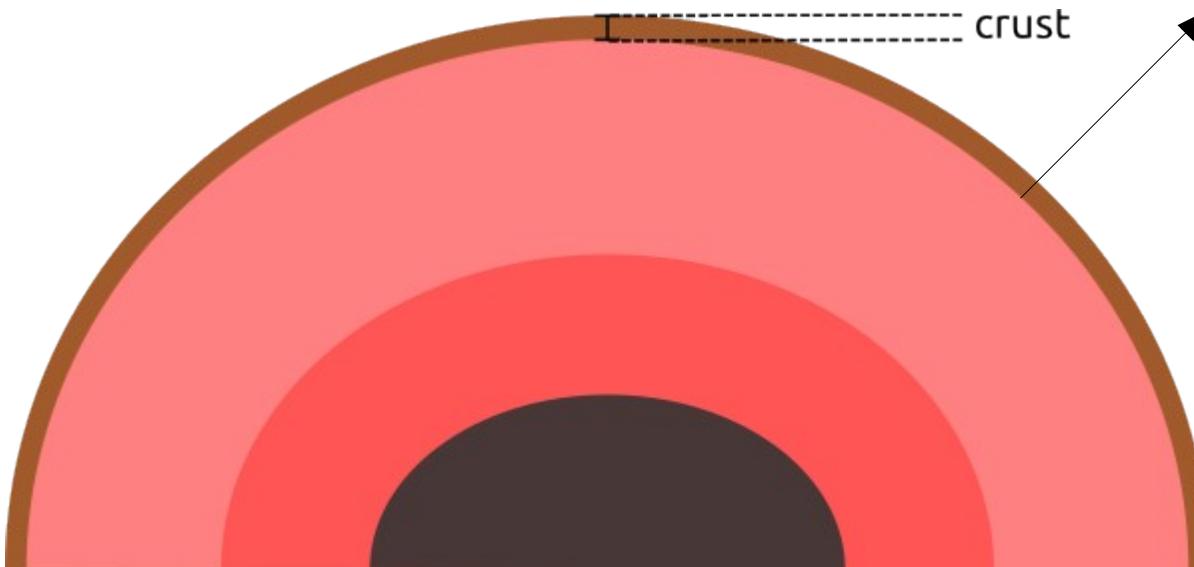
...agora o campo crustal.



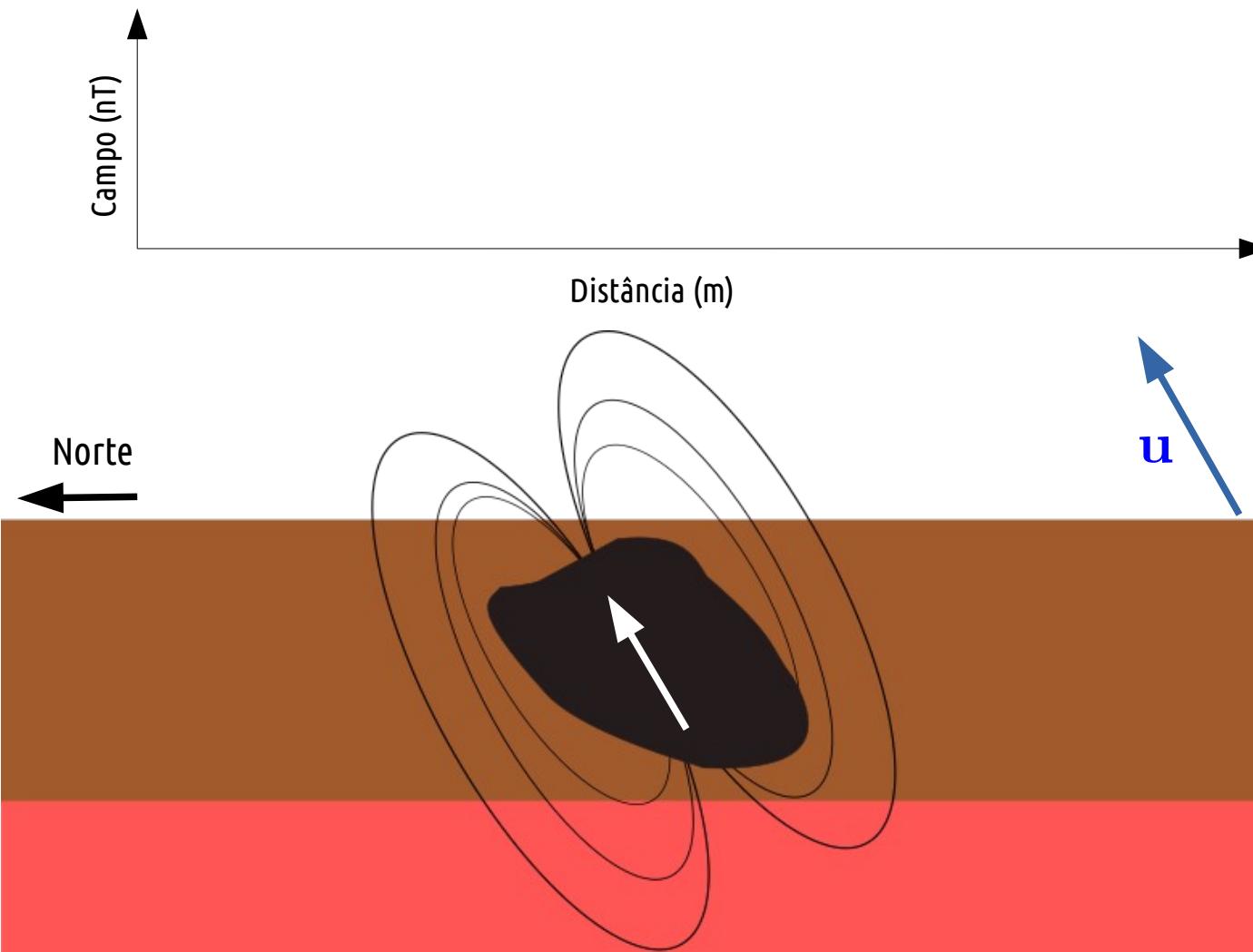
Esta é a componente que é gerada pelas **rochas magnetizadas na crosta terrestre**. Geralmente, são estas formações que estamos interessados na **Geofísica Aplicada**.

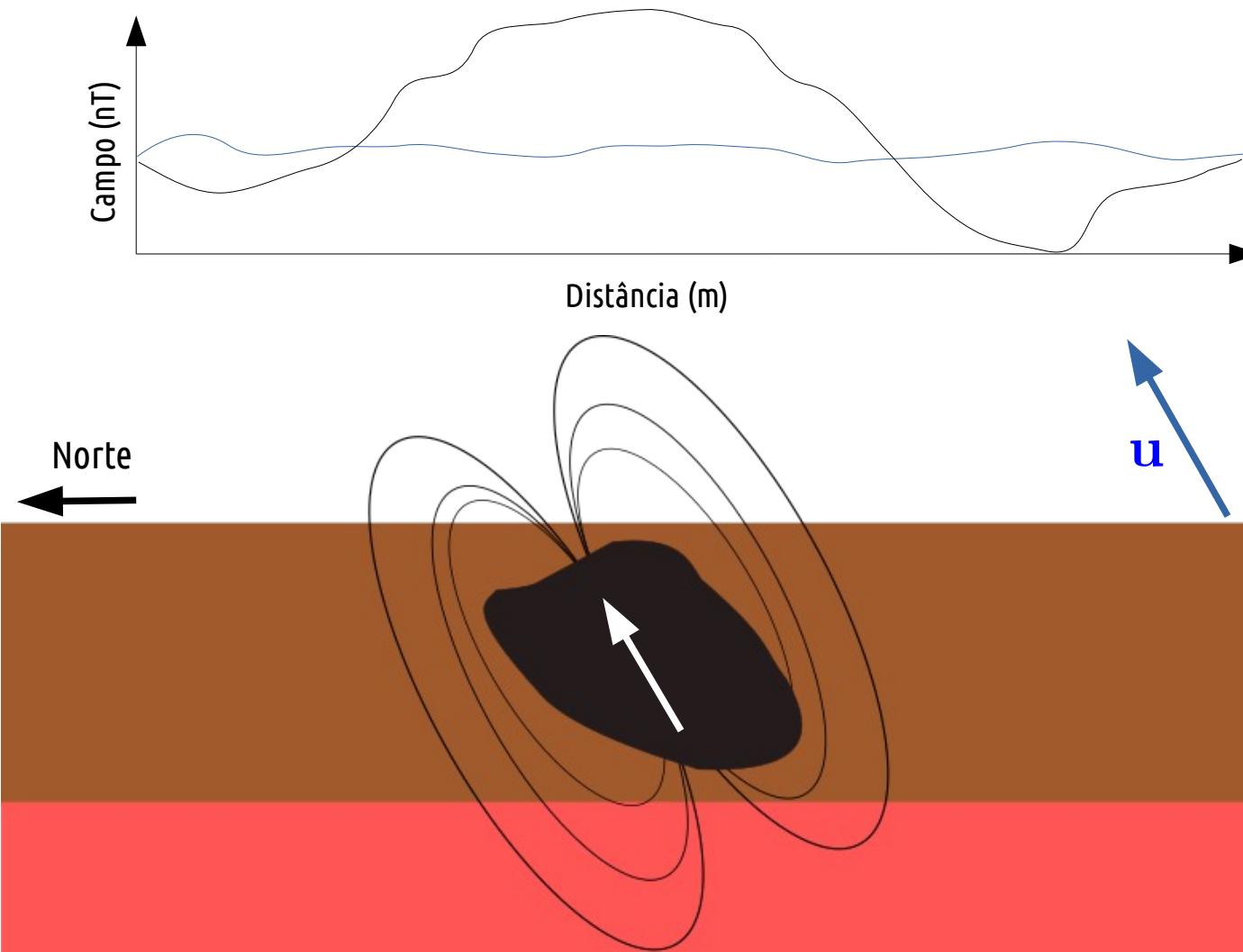


Esta é a componente que é gerada pelas **rochas magnetizadas na crosta terrestre**. Geralmente, são estas formações que estamos interessados na **Geofísica Aplicada**.

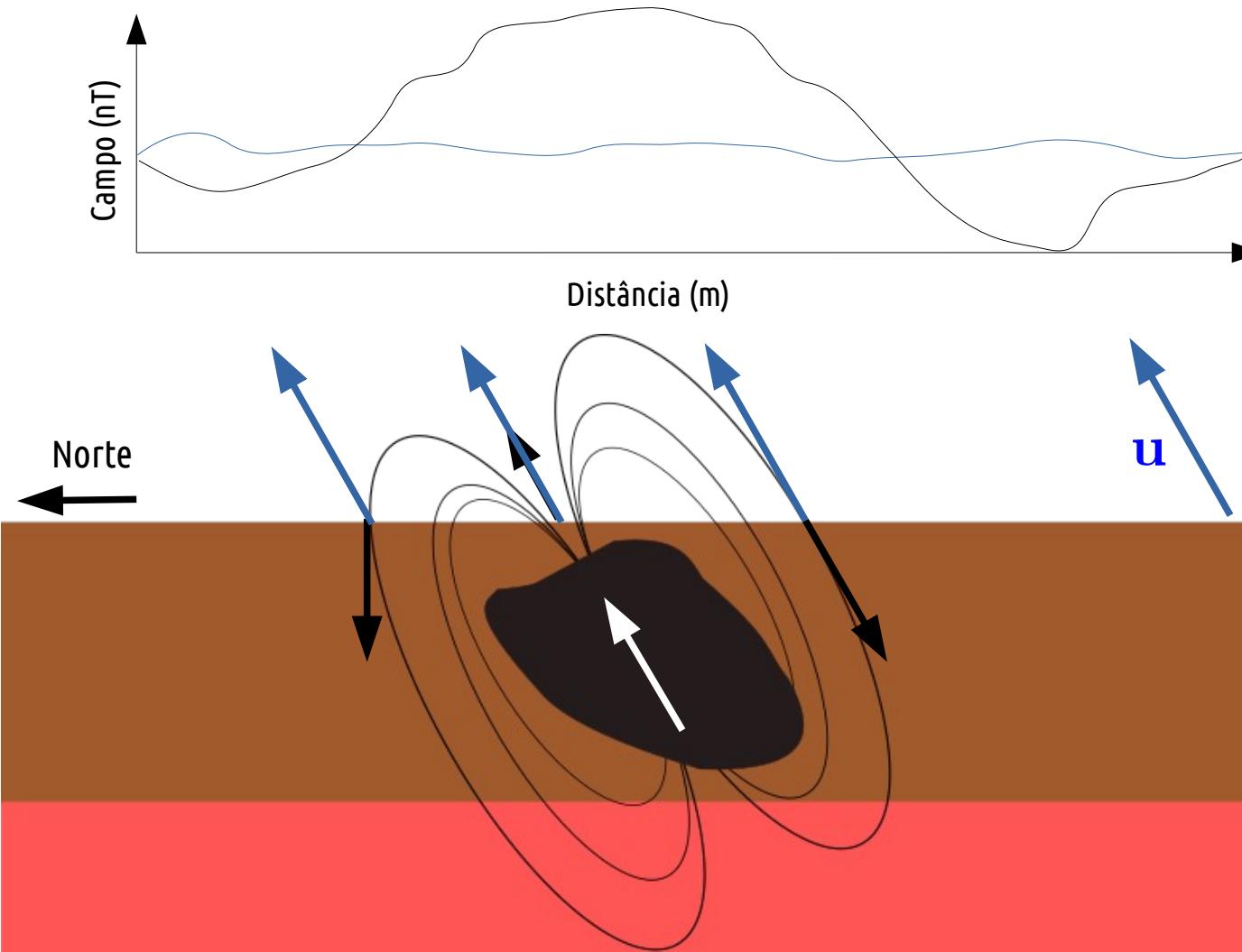


Estes campos são gerados pela presença de **minerais magnéticos** presentes na rochas em subsuperfície.

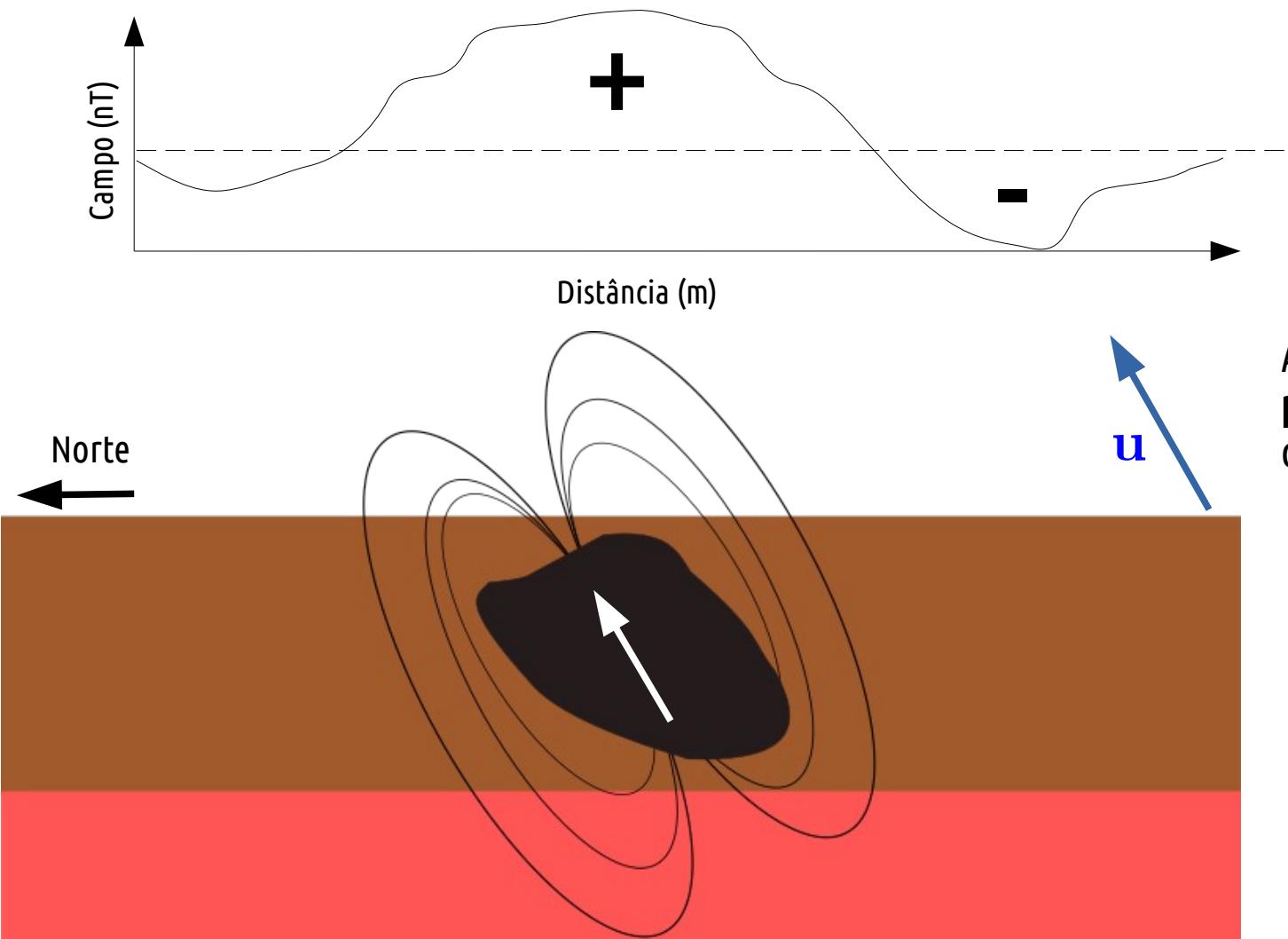




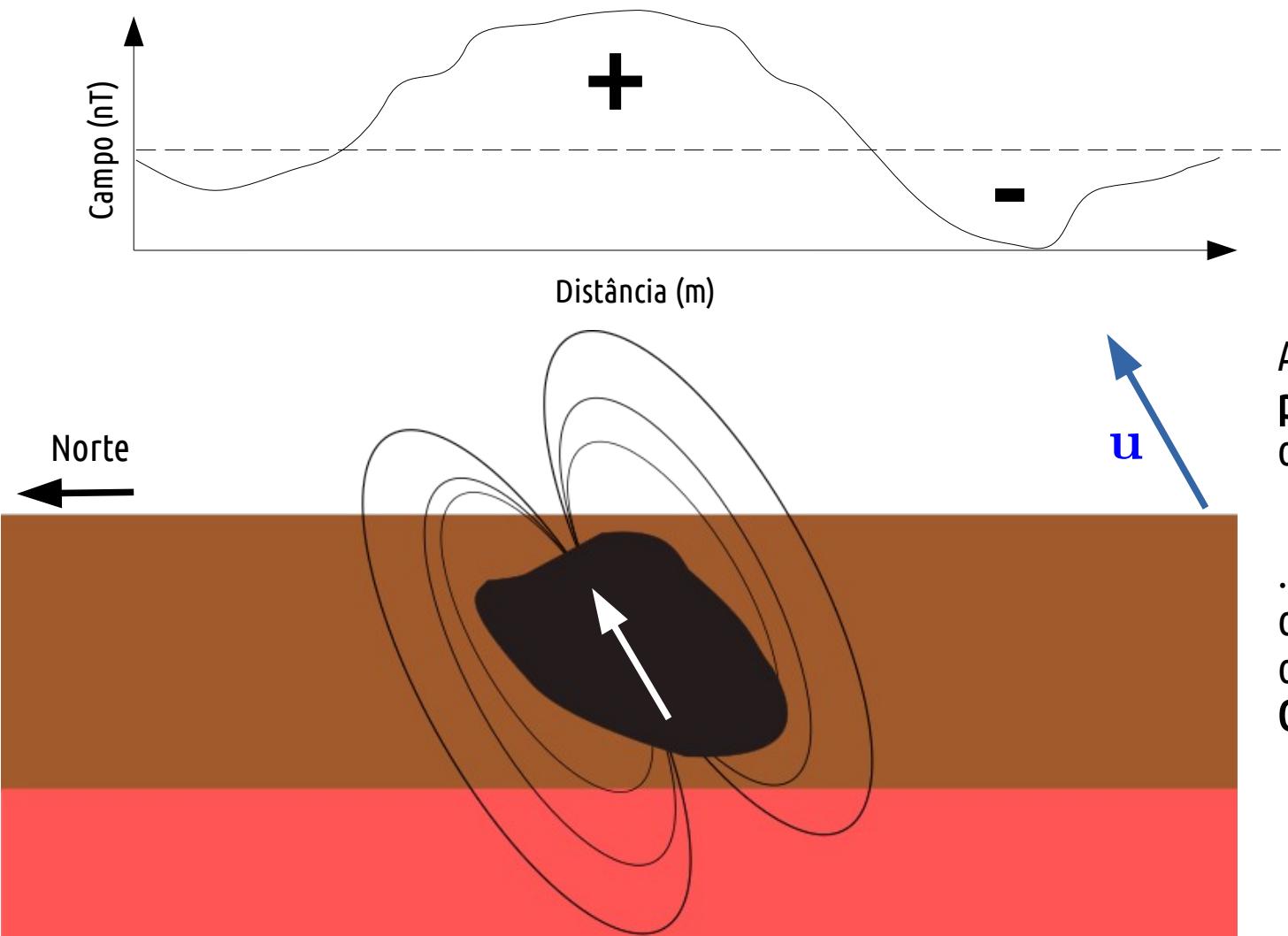
A soma entre a **componente principal** e a **componente crustal** é o que chamamos de **Campo Total**...



A soma entre a **componente principal** e a **componente crustal** é o que chamamos de **Campo Total**...

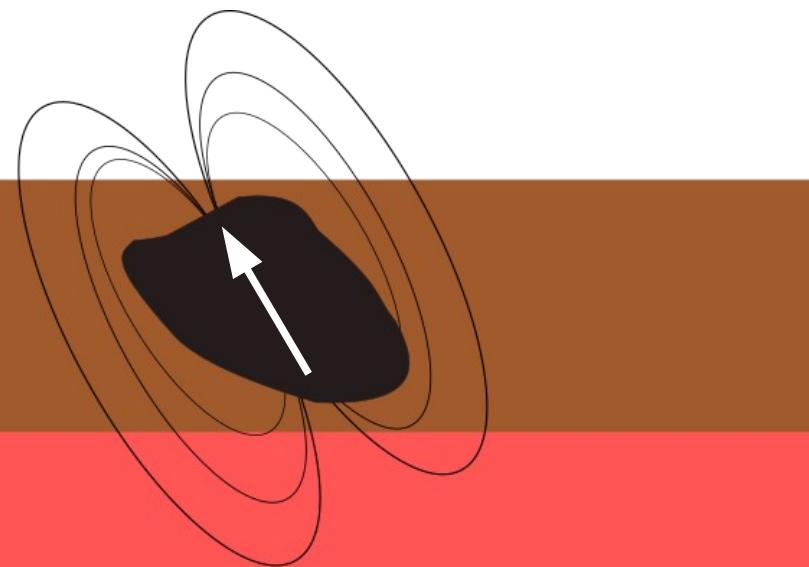


A soma entre a **componente principal** e a **componente crustal** é o que chamamos de **Campo Total**...

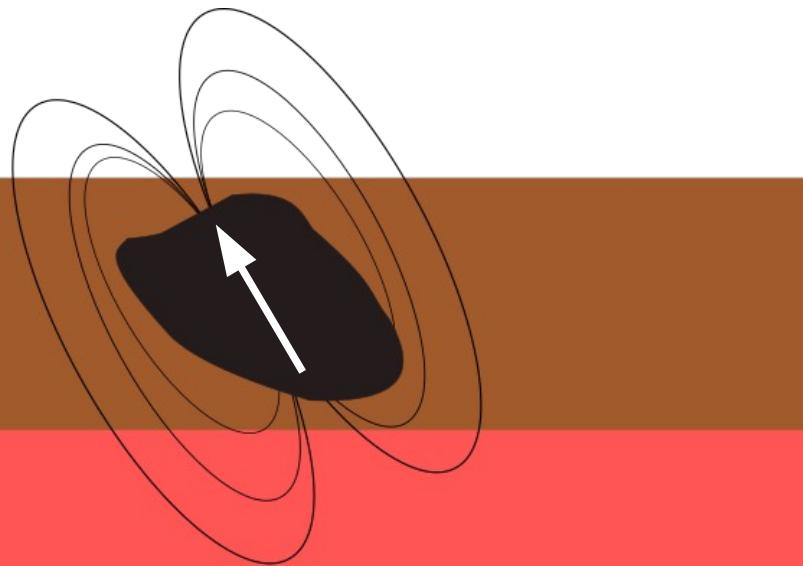


A soma entre a **componente principal** e a **componente crustal** é o que chamamos de **Campo Total**...

...uma vez que retiramos o efeito da componente principal, iremos obter o que chamamos de **Anomalia de Campo Total**



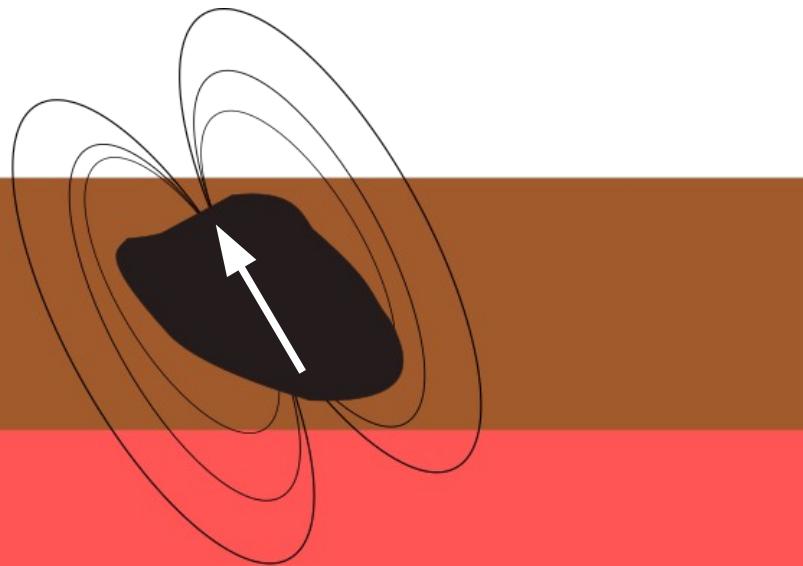
O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.



O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$

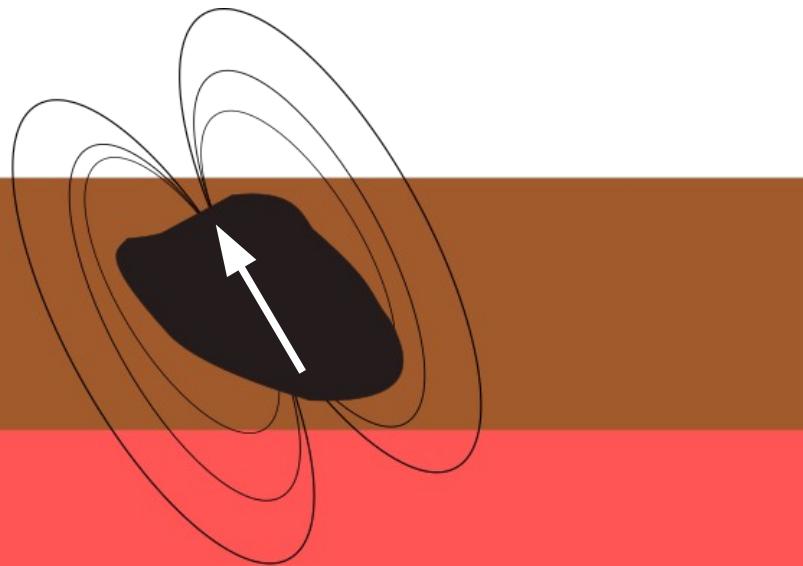


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$

Magnetização Induzida : quando um material é submetido a um campo externo.

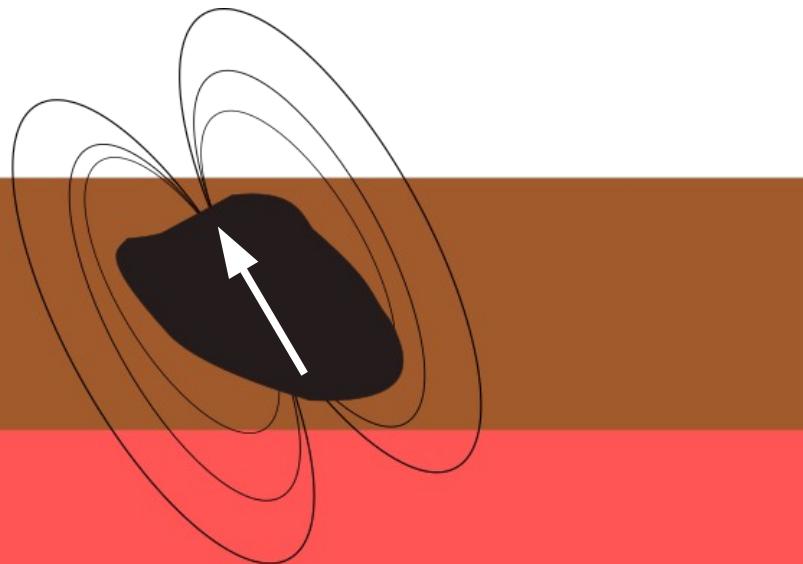


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

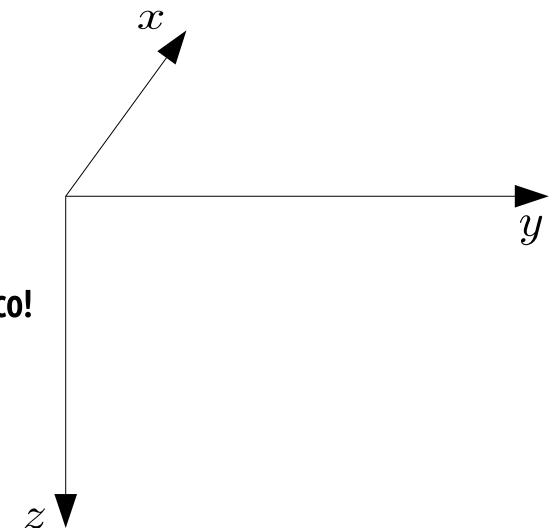
$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$

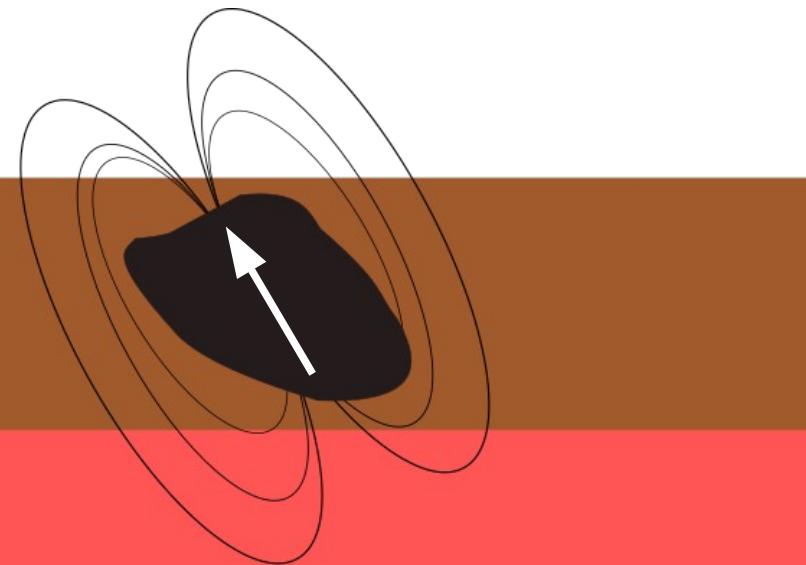
Magnetização Remanente Natural : é a magnetização adquirida na época da formação da rocha.



O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Sistema de Coordenada Topocêntrico!

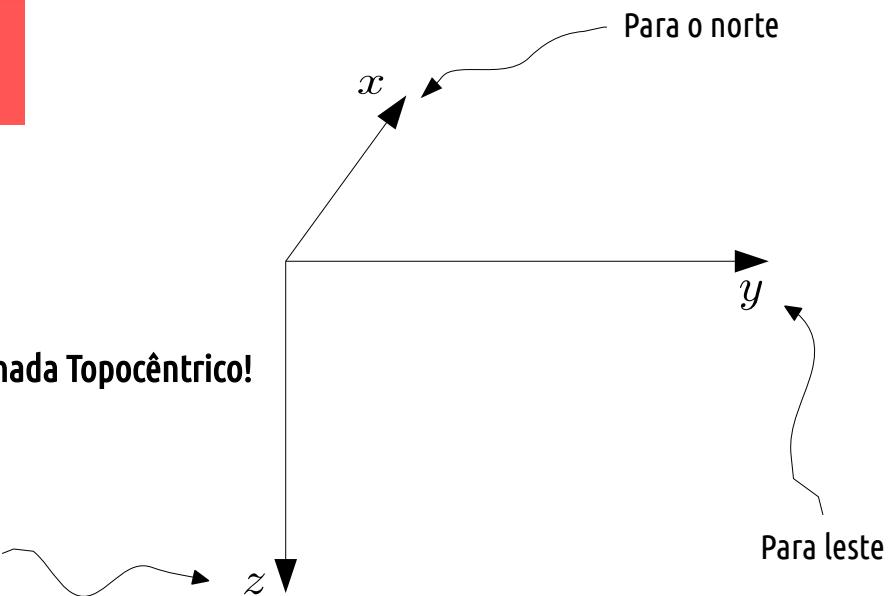


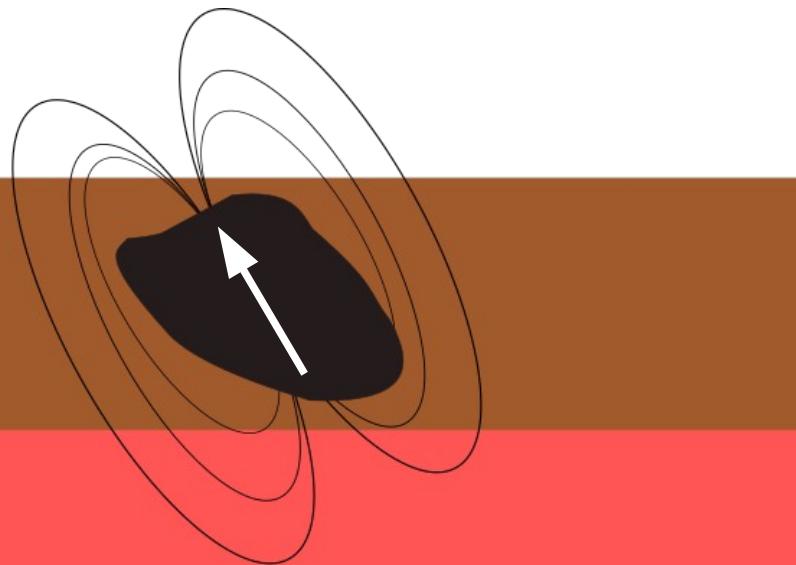


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Sistema de Coordenada Topocêntrico!

Para baixo

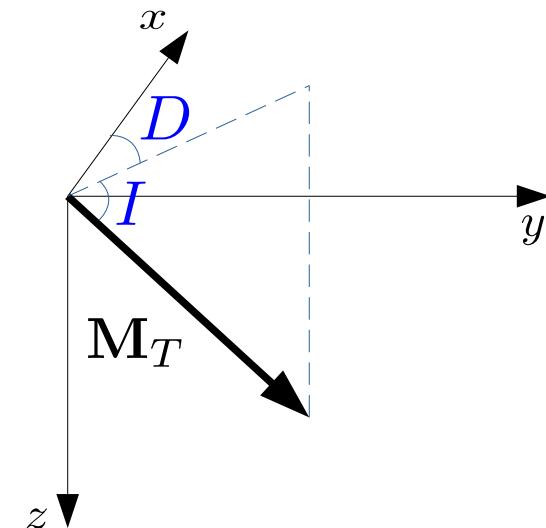


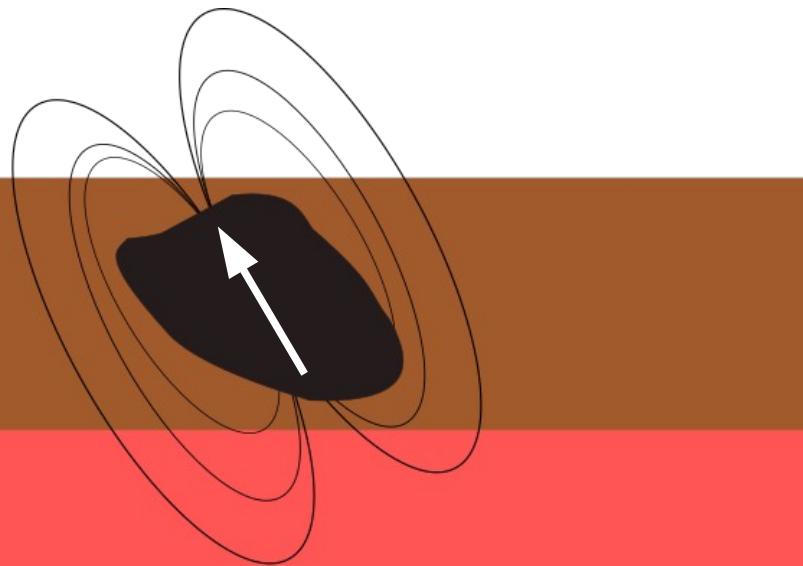


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$

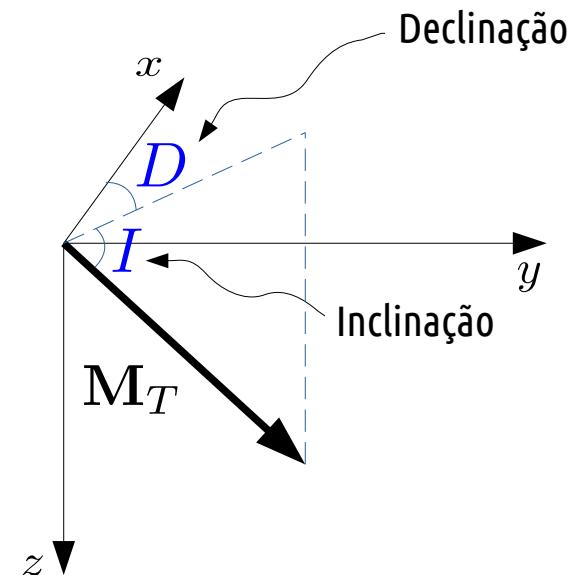


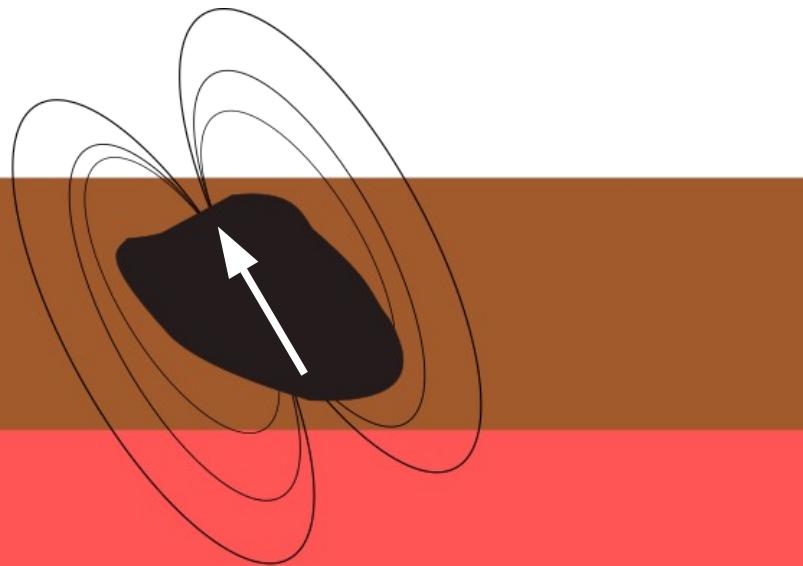


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$



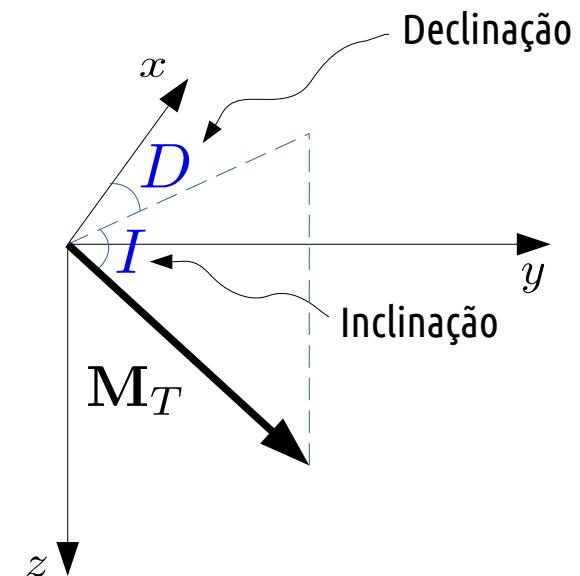


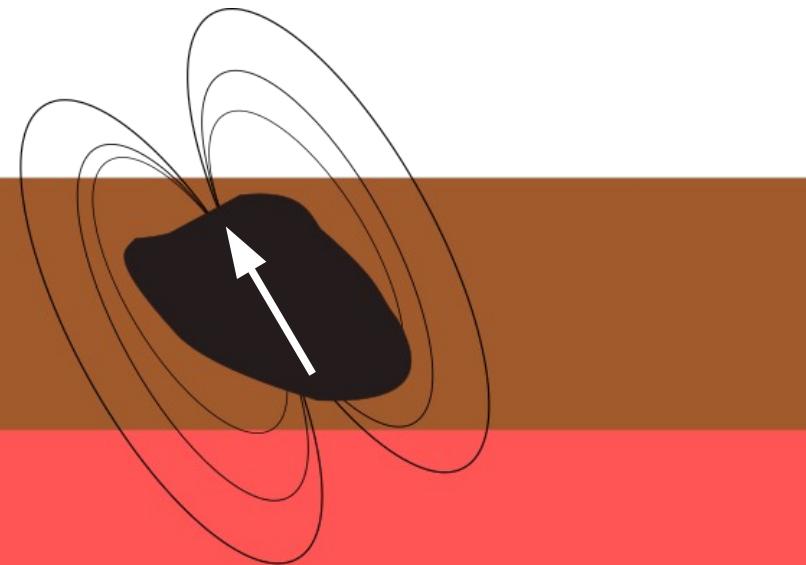
O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

$$\hat{\mathbf{m}} = (I, D)$$

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$





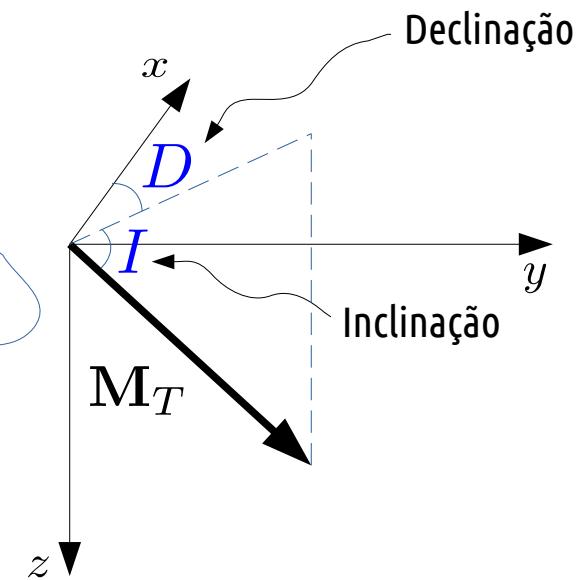
O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

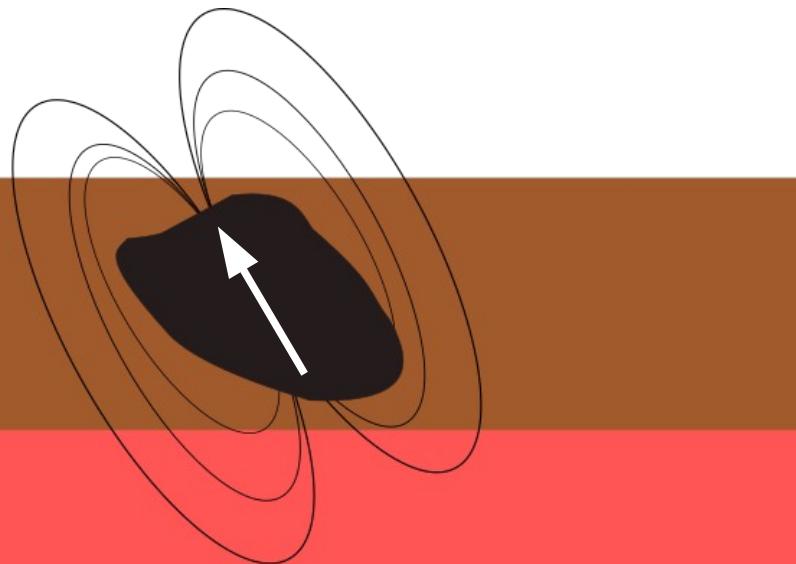
$\hat{\mathbf{m}} = (I, D)$

Em Graus!

Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$



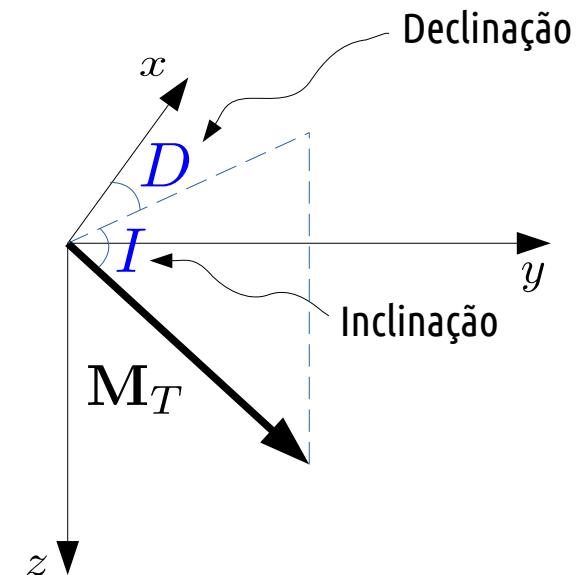


O campo gerado pela fonte magnética dependerá da **distribuição de magnetização** no interior da terra.

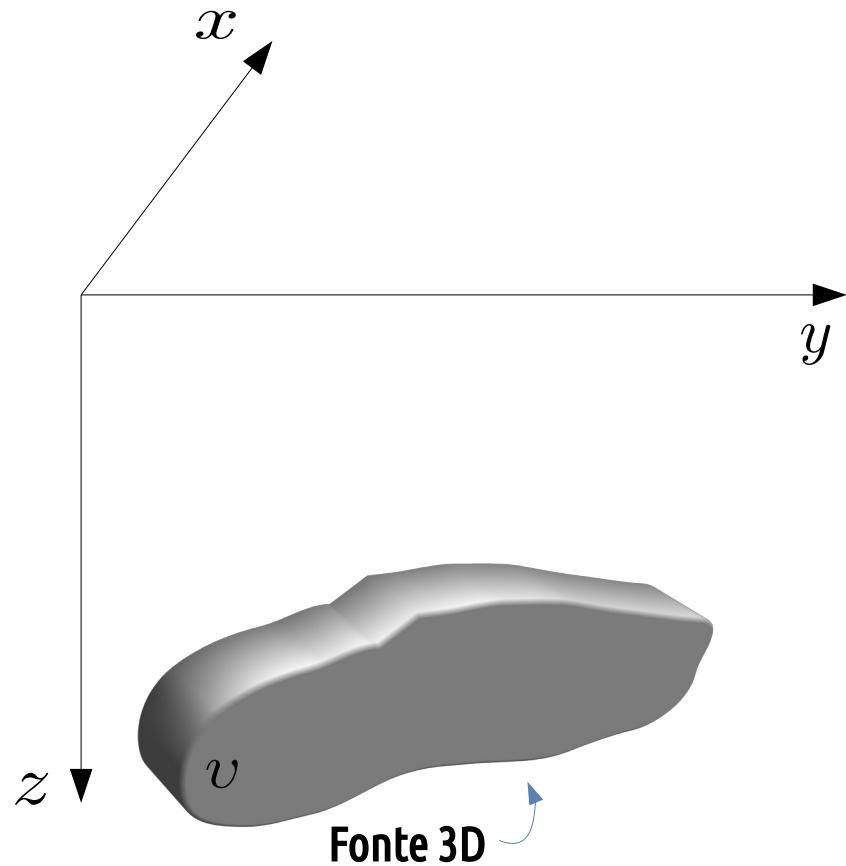
Saber a **magnetização** servirá para **modelagem** e também para o **processamento**!

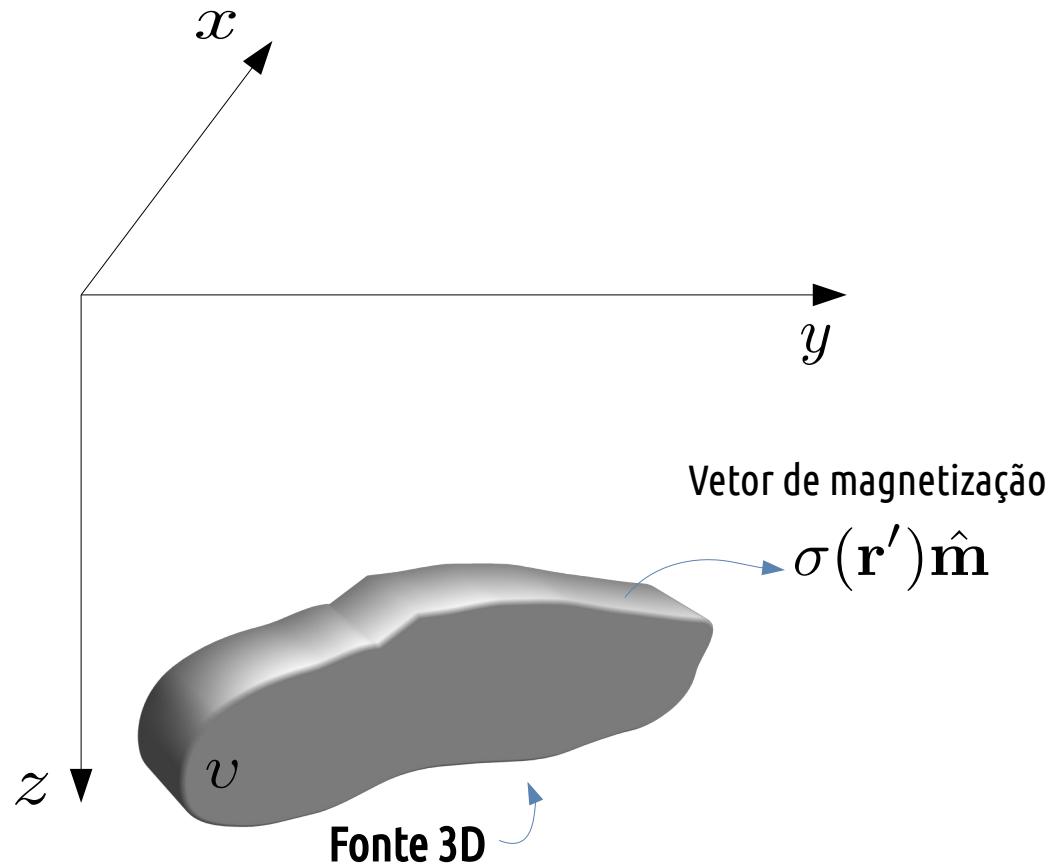
Magnetização Total : a soma entre as componentes induzida e remanente.

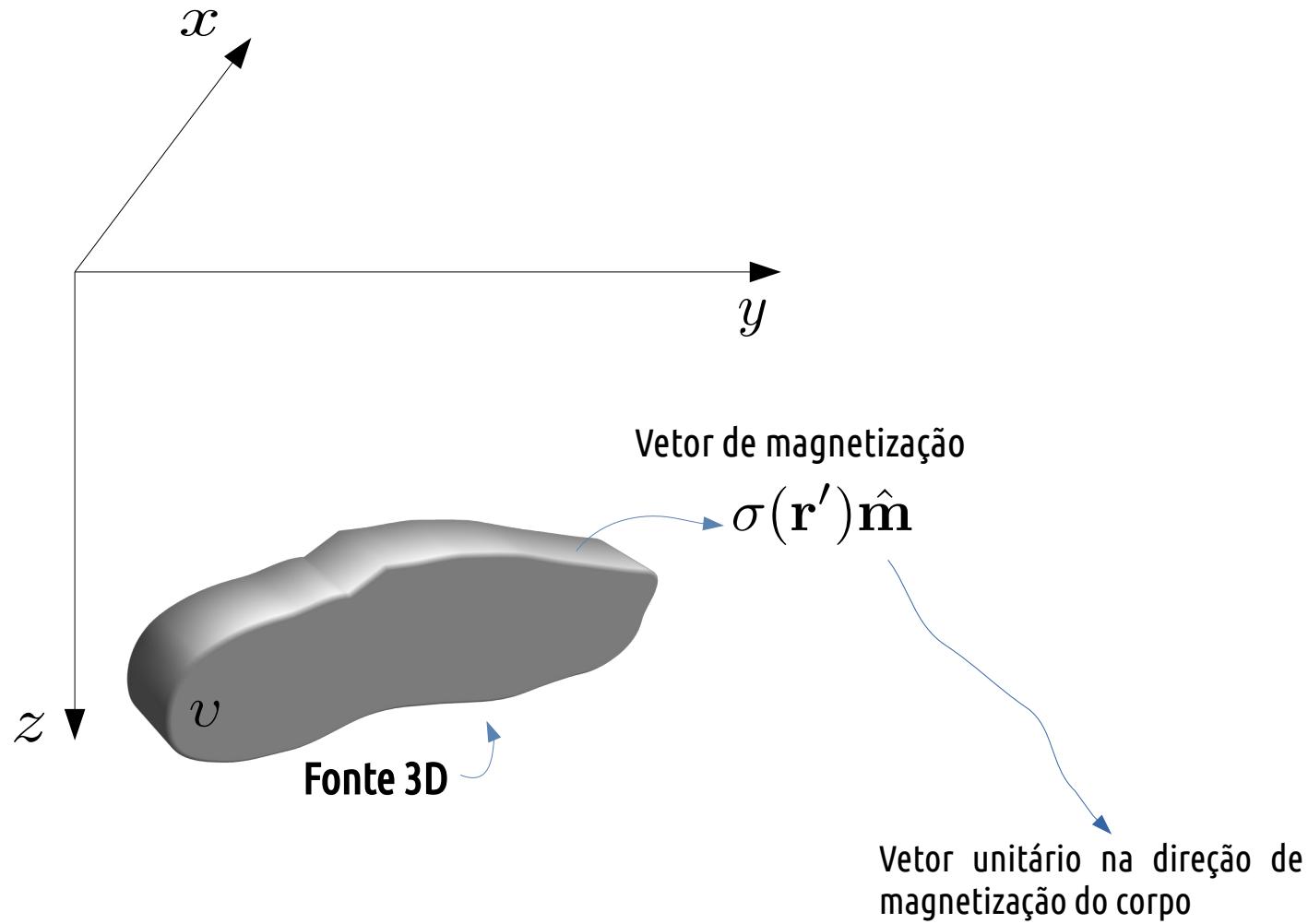
$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_I + \mathbf{M}_R$$

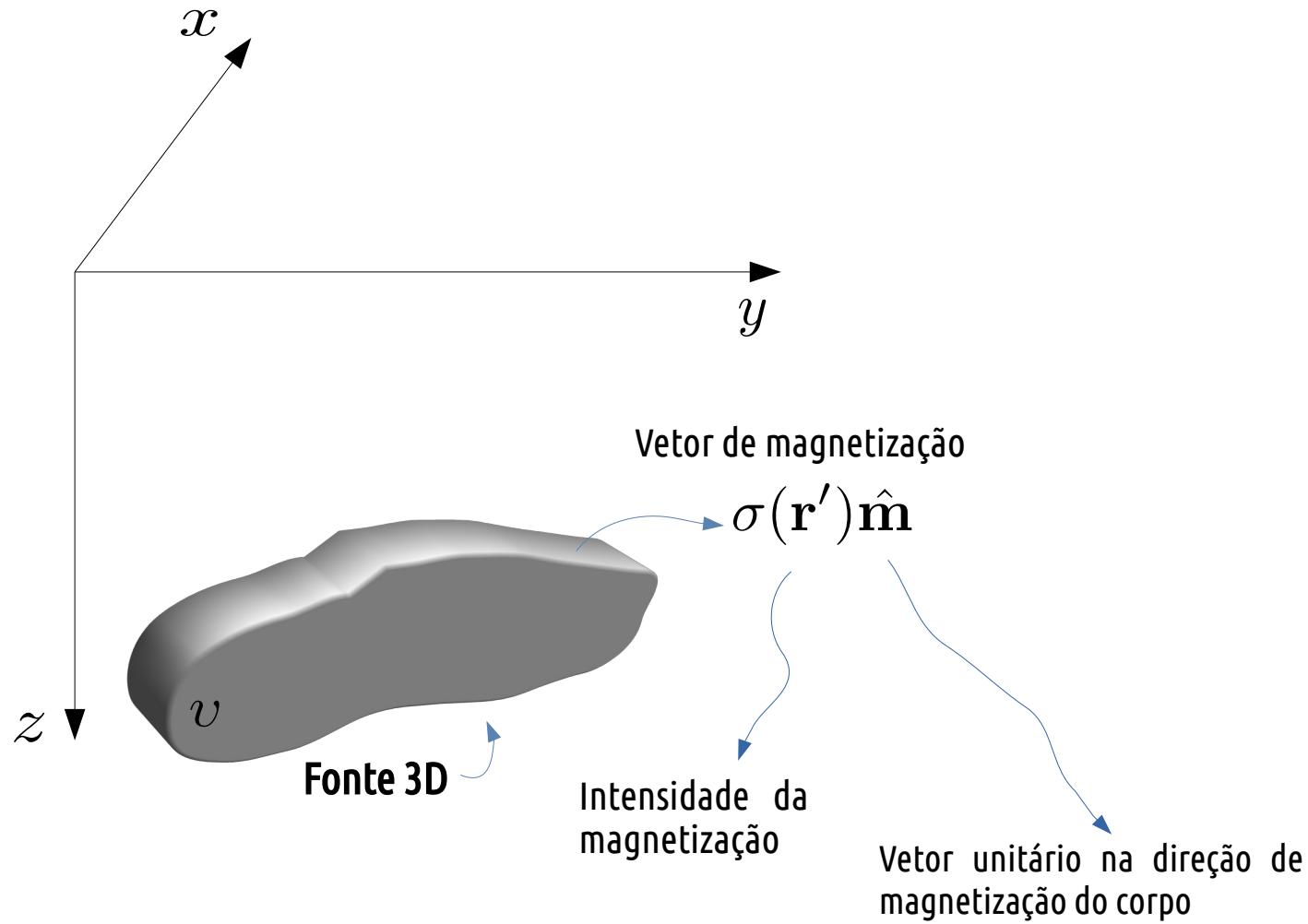


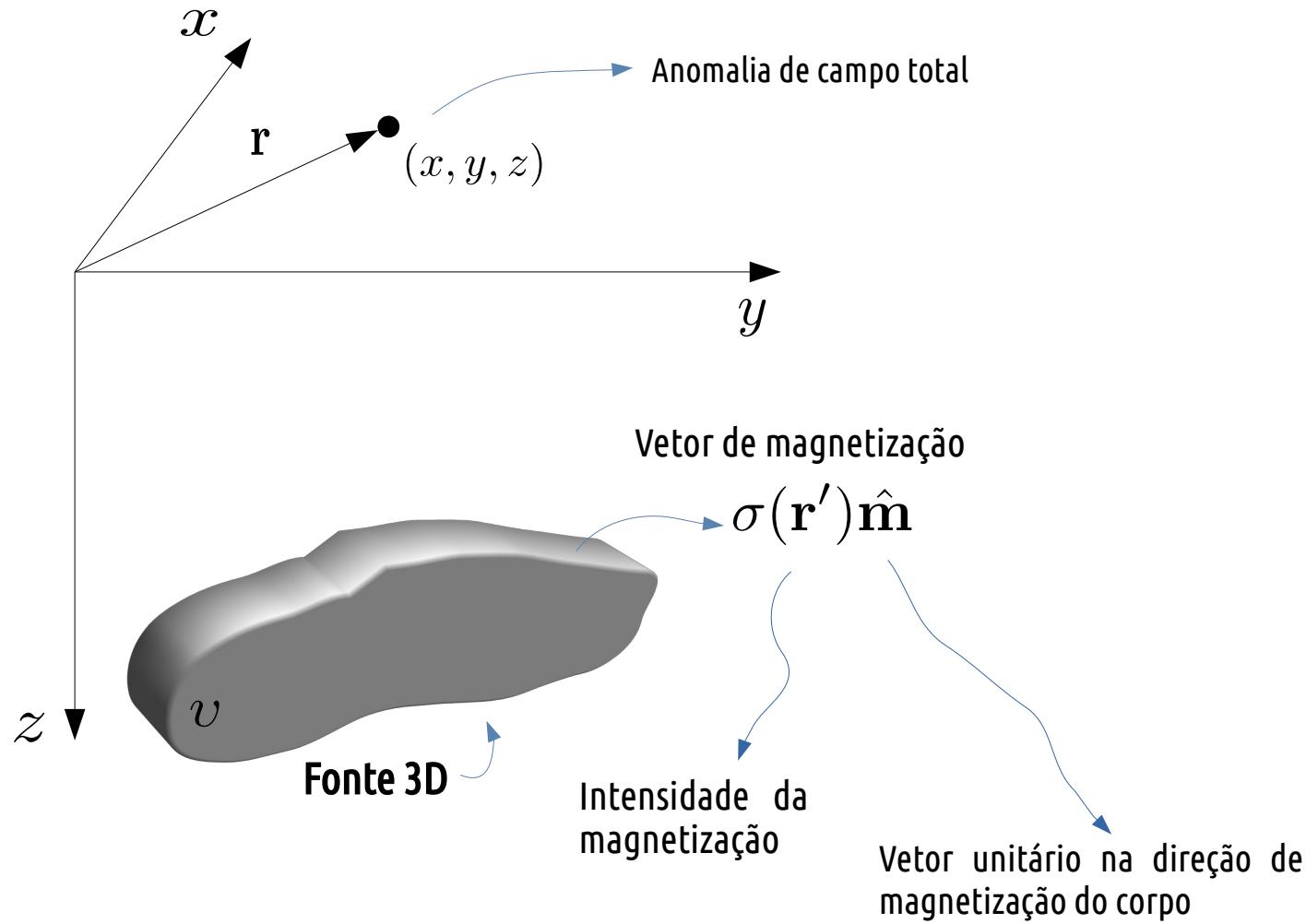
Do ponto de vista físico-matemático, o campo magnético gerado por uma fonte arbitrária...

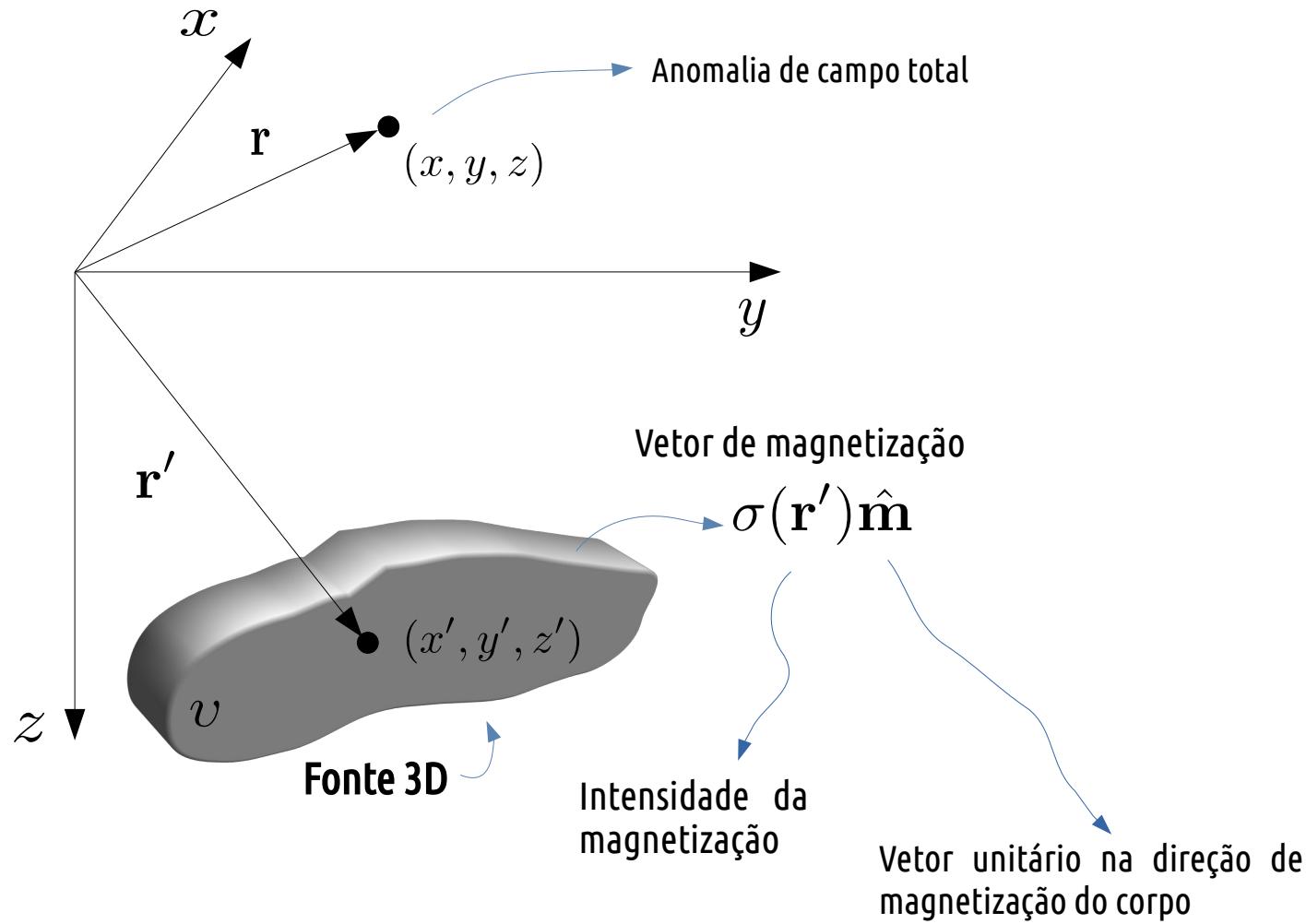


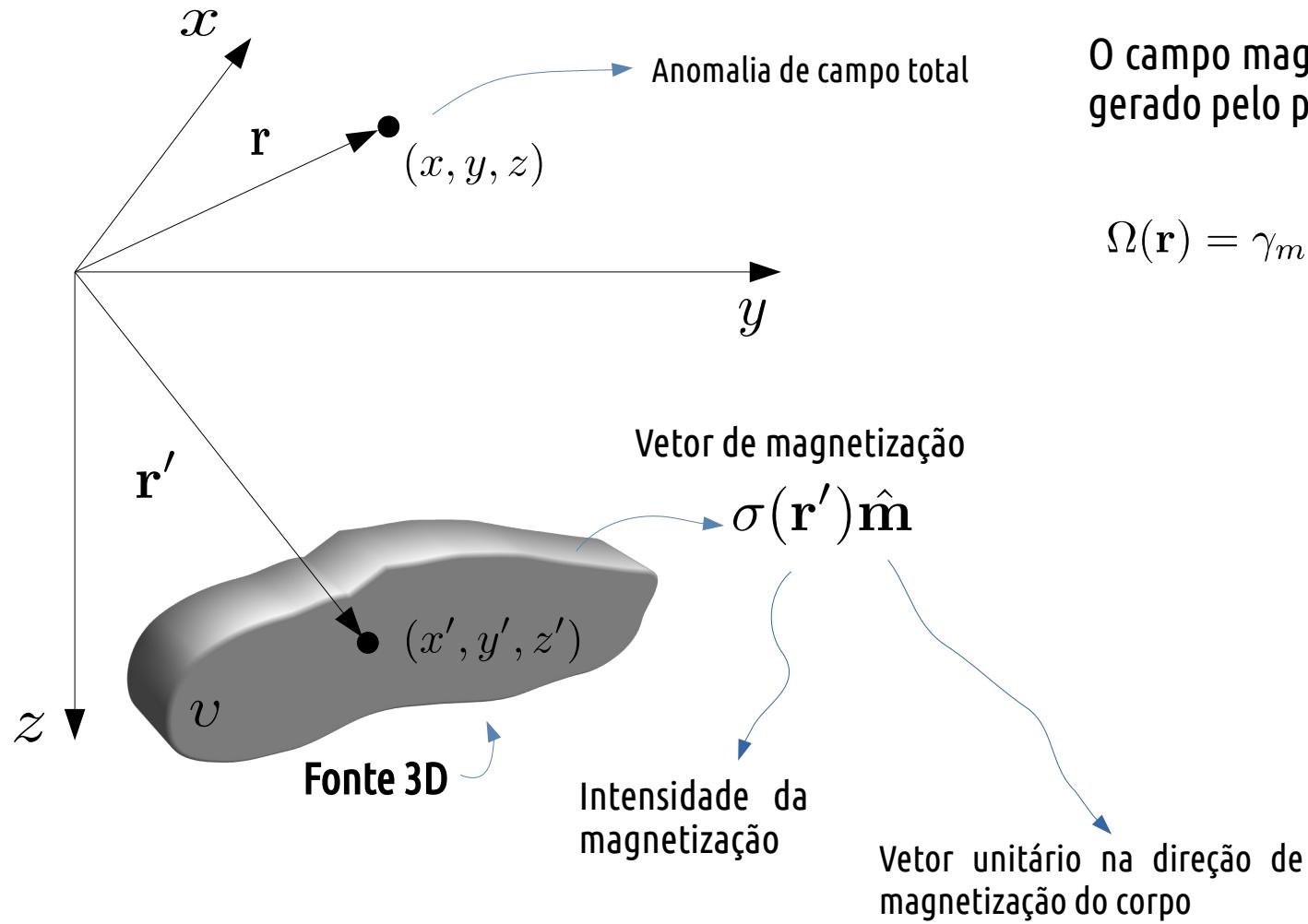






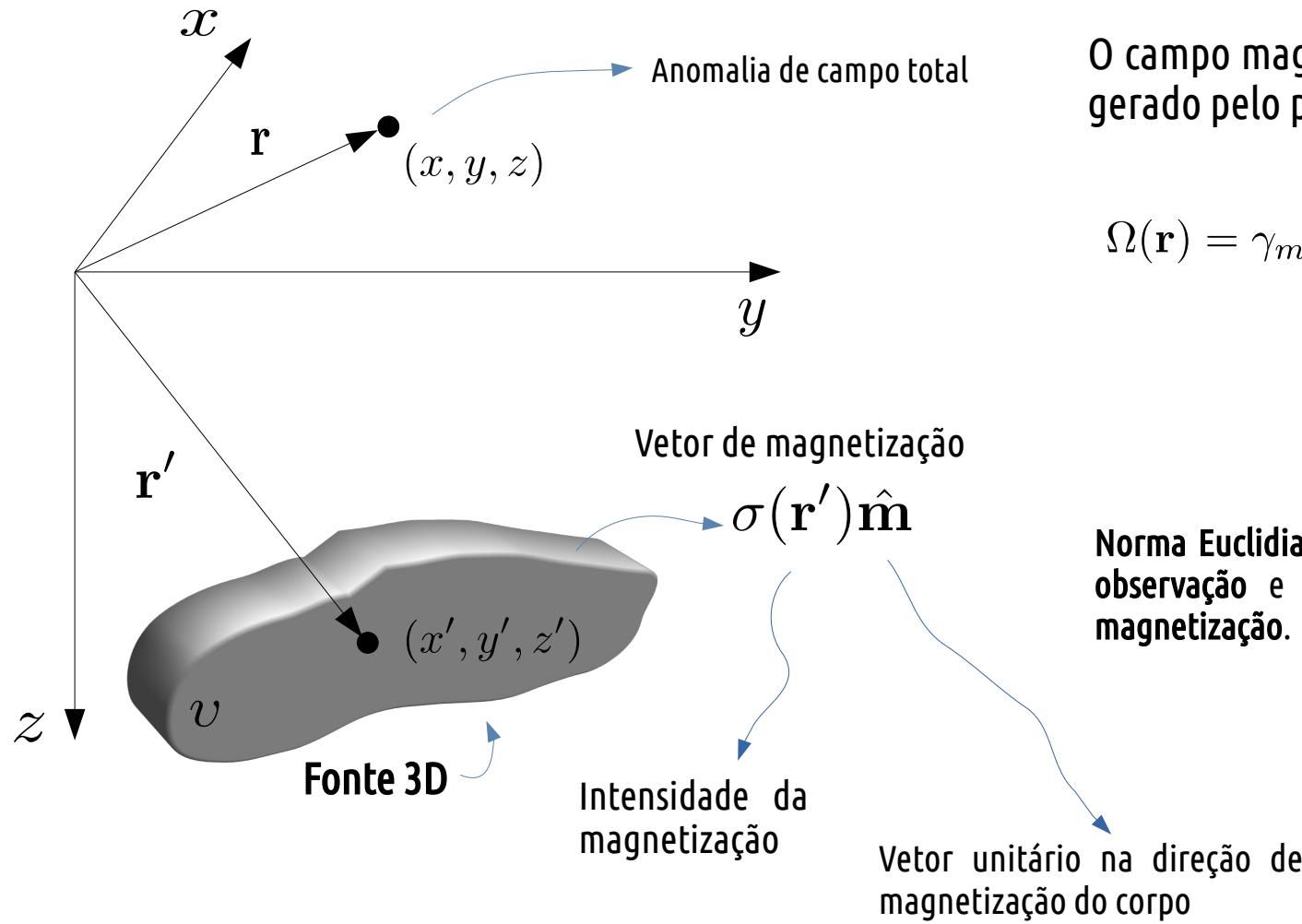






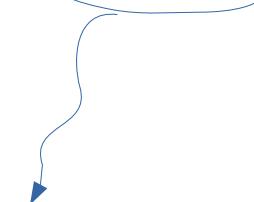
O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} d\mathbf{v}'$$

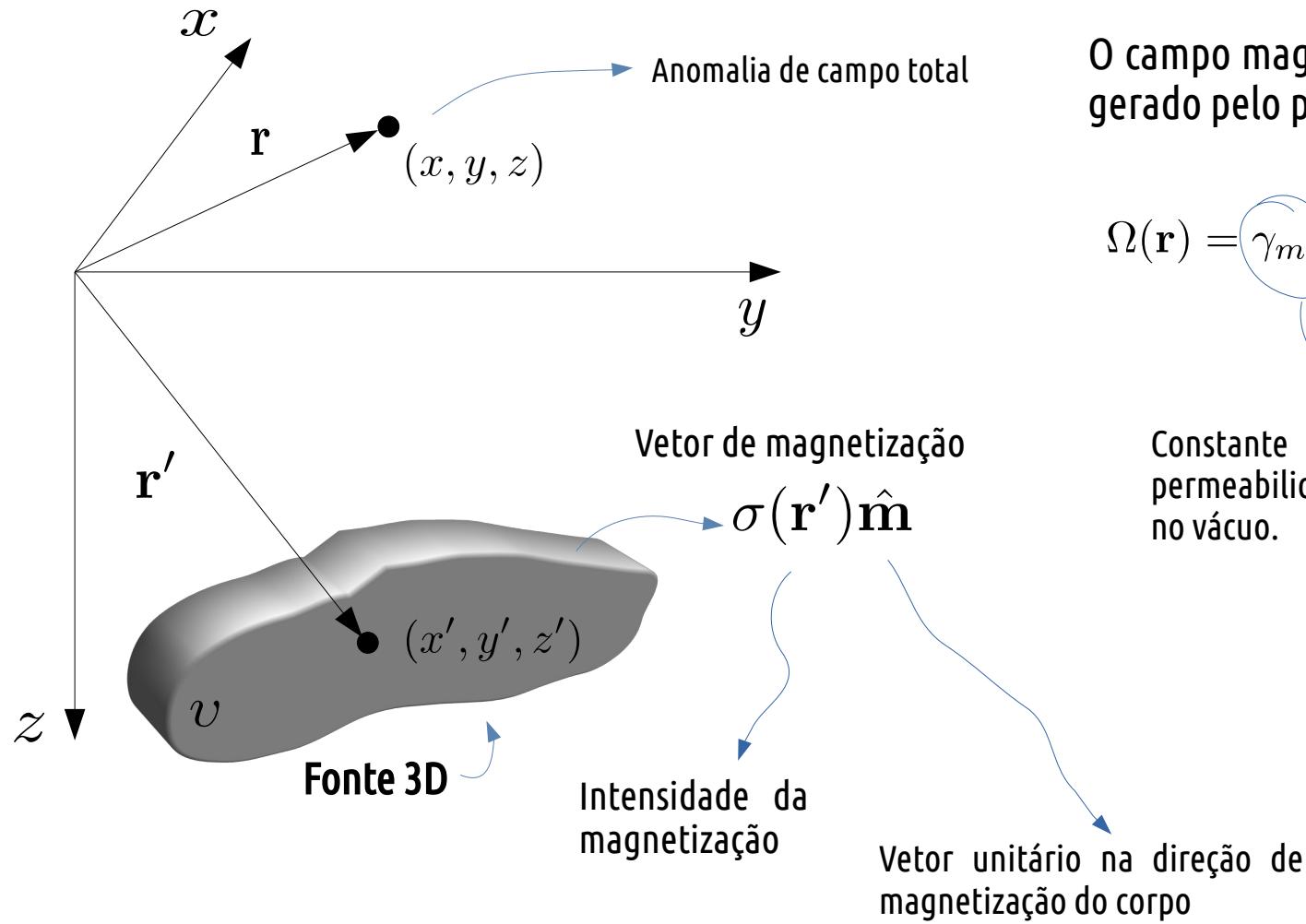


O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} d\mathbf{v}'$$



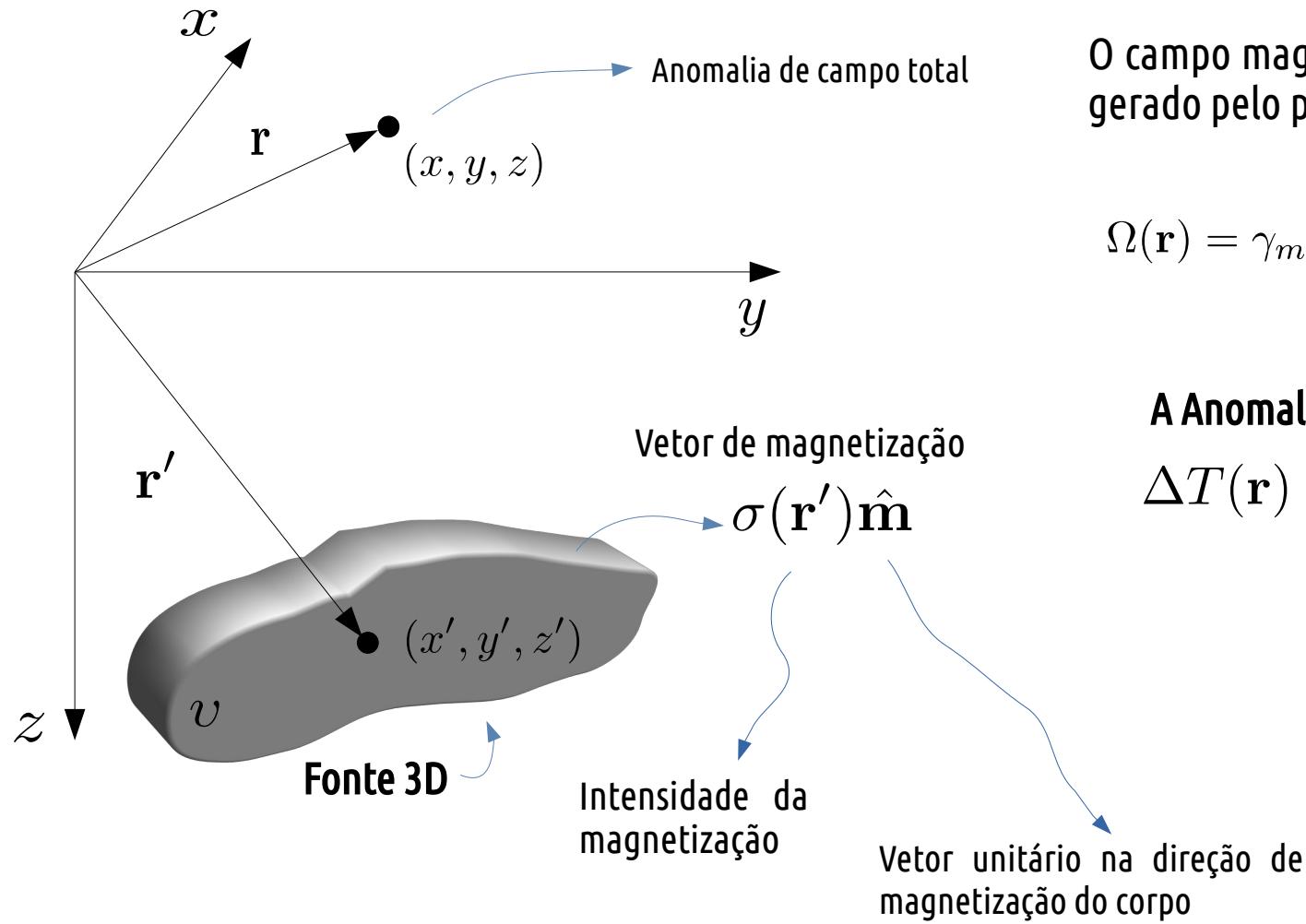
Norma Euclidiana que mede a distância entre um ponto de observação e um ponto no interior da distribuição de magnetização.



O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} dv'$$

Constante proporcional a permeabilidade magnética no vácuo.

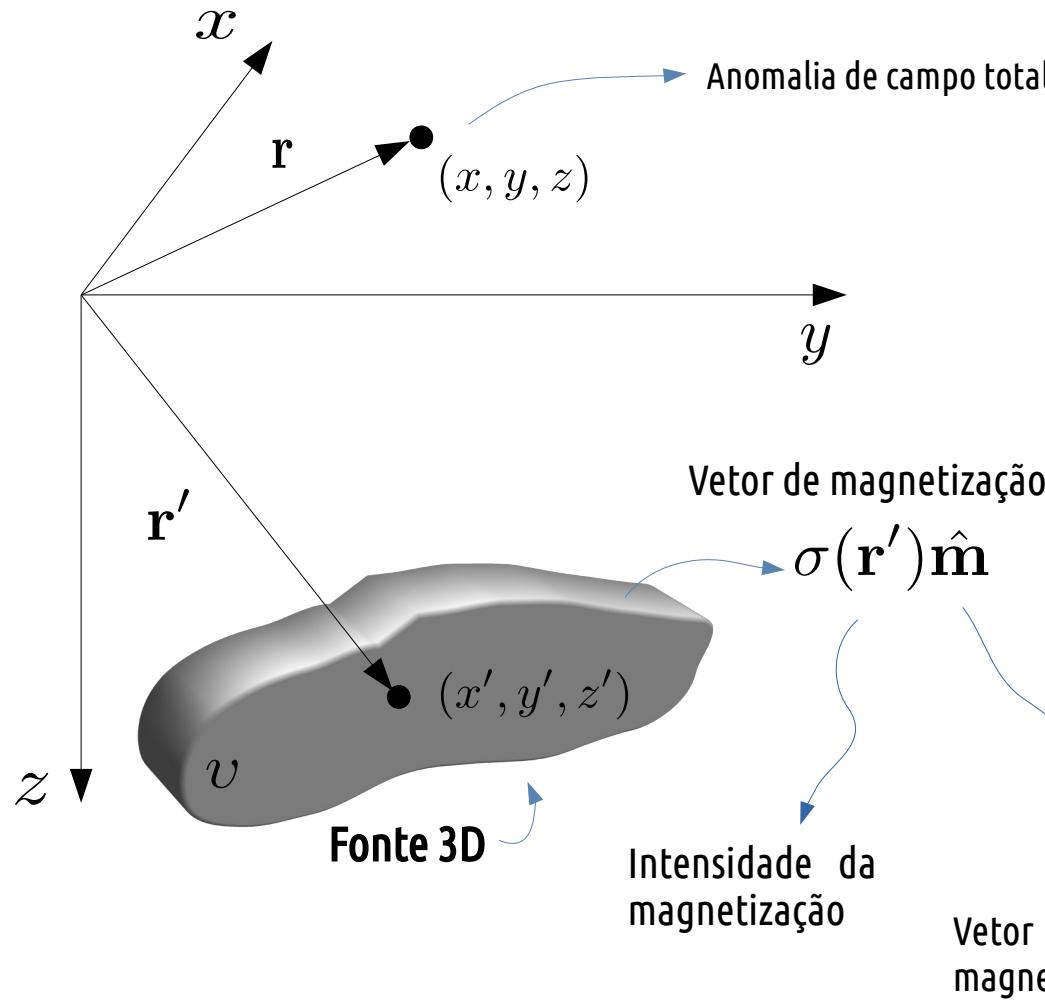


O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} d\mathbf{v}'$$

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{m}}$$



O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

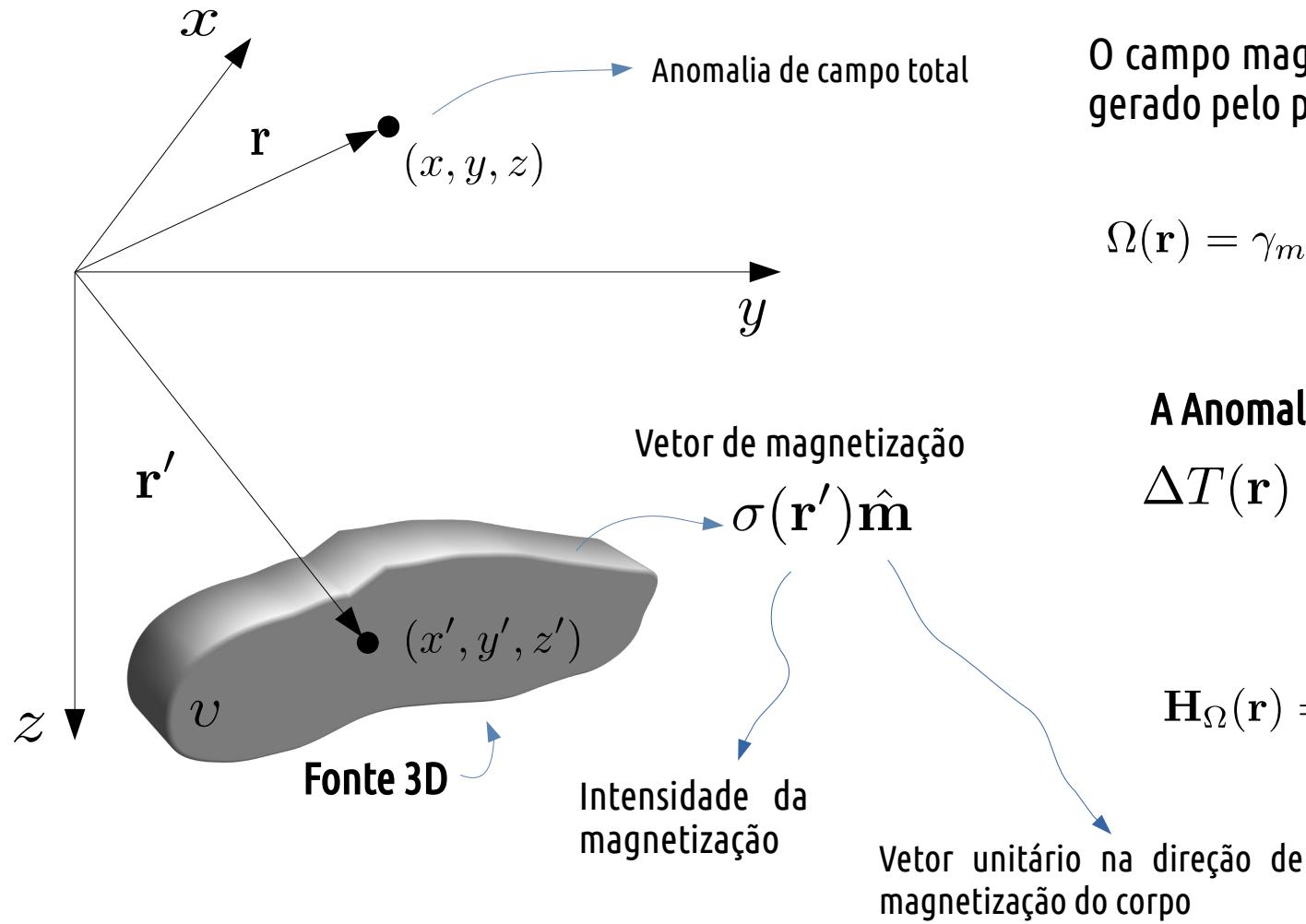
$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} dv'$$

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{m}}$$

Vetor unitário na direção do campo principal

Vetor unitário na direção de magnetização do corpo



O campo magnético desta distribuição é gerado pelo potencial:

$$\Omega(\mathbf{r}) = \gamma_m \iiint_v \sigma(\mathbf{r}') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}' \|} dv'$$

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{m}}$$

$$\mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} \partial_{xx}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{xy}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{xz}\Omega(\mathbf{r}) \\ \partial_{yx}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{yy}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{yz}\Omega(\mathbf{r}) \\ \partial_{zx}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{zy}\Omega(\mathbf{r}) & \partial_{zz}\Omega(\mathbf{r}) \end{bmatrix}$$

Teoria do Potencial e a Camada Equivalente

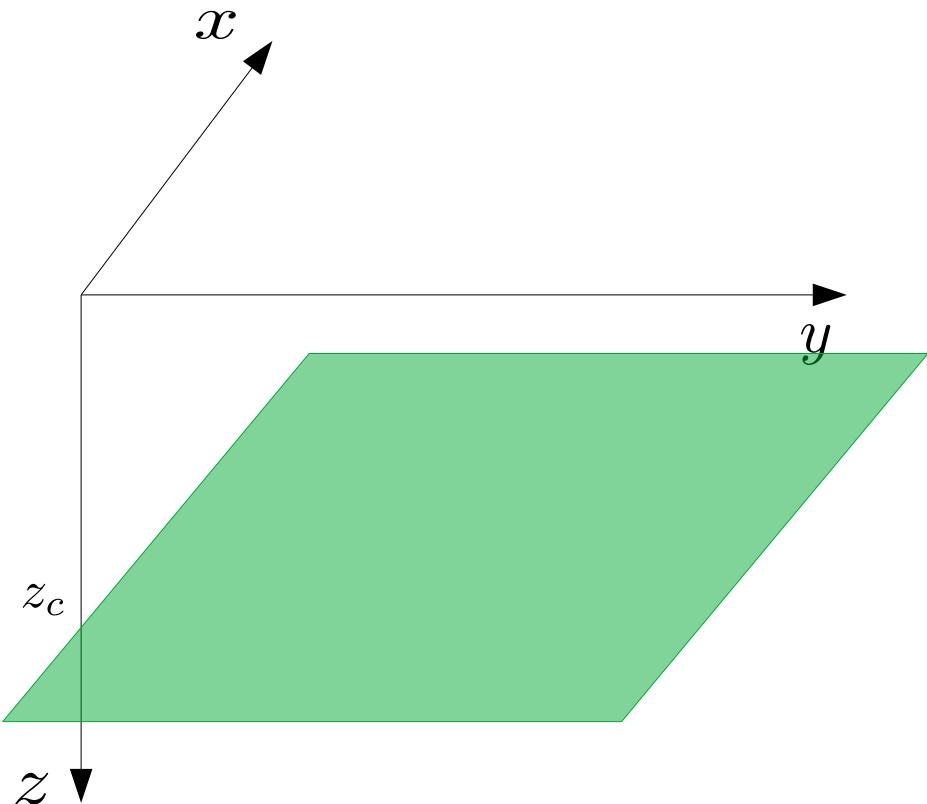
A Teoria do Potencial é o que dá a **base física e matemática** para o estudo de funções harmônicas e as soluções para a chamada Equação de Laplace.

É possível recuperar o efeito gerado de uma distribuição tridimensional de propriedade física por uma distribuição bidimensional, que é chamada de Camada equivalente.

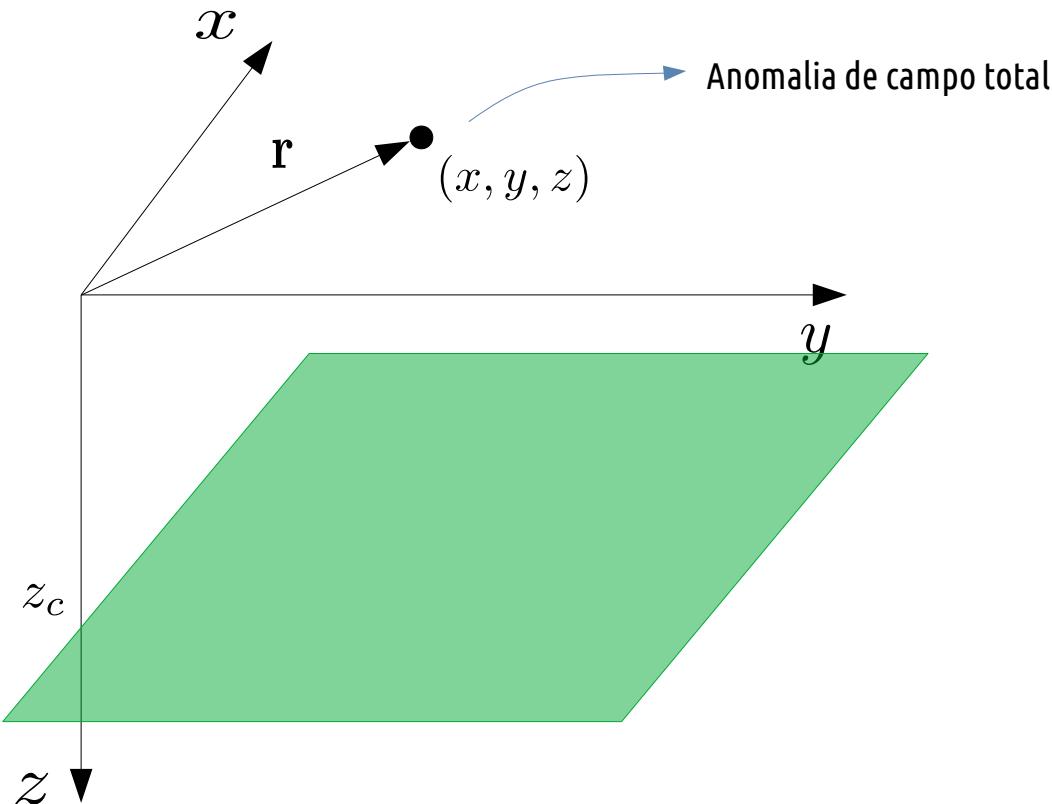
Camada equivalente

(Blakely, 1996)

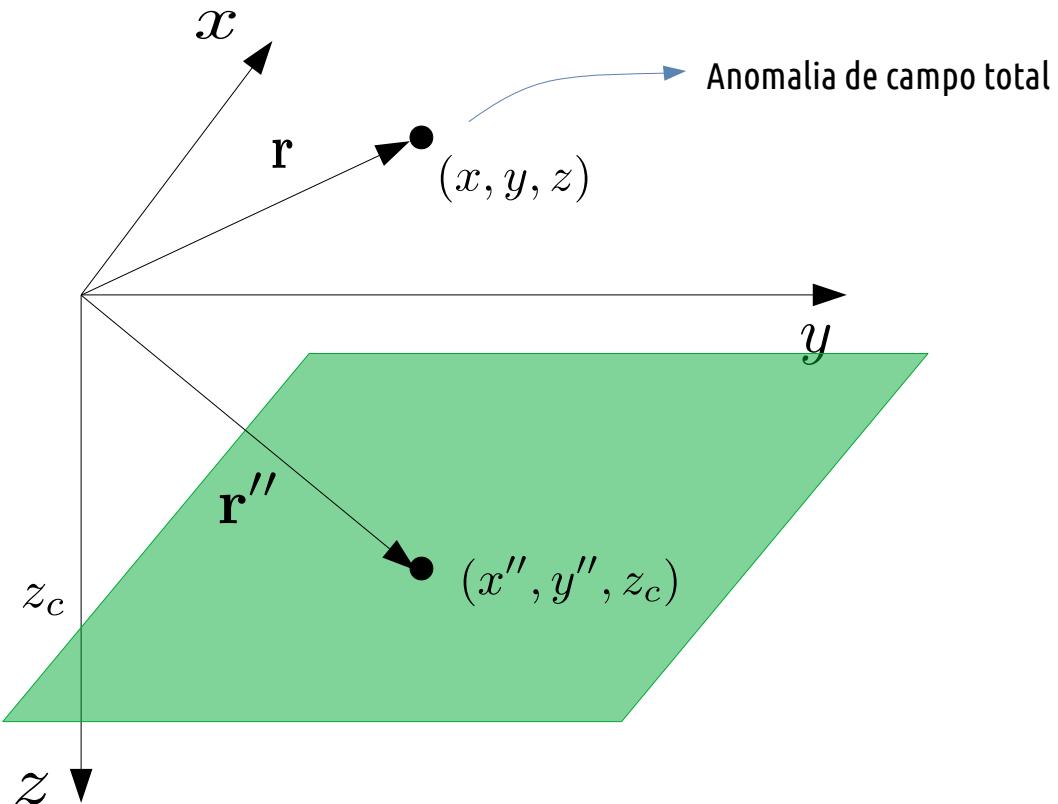
Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional



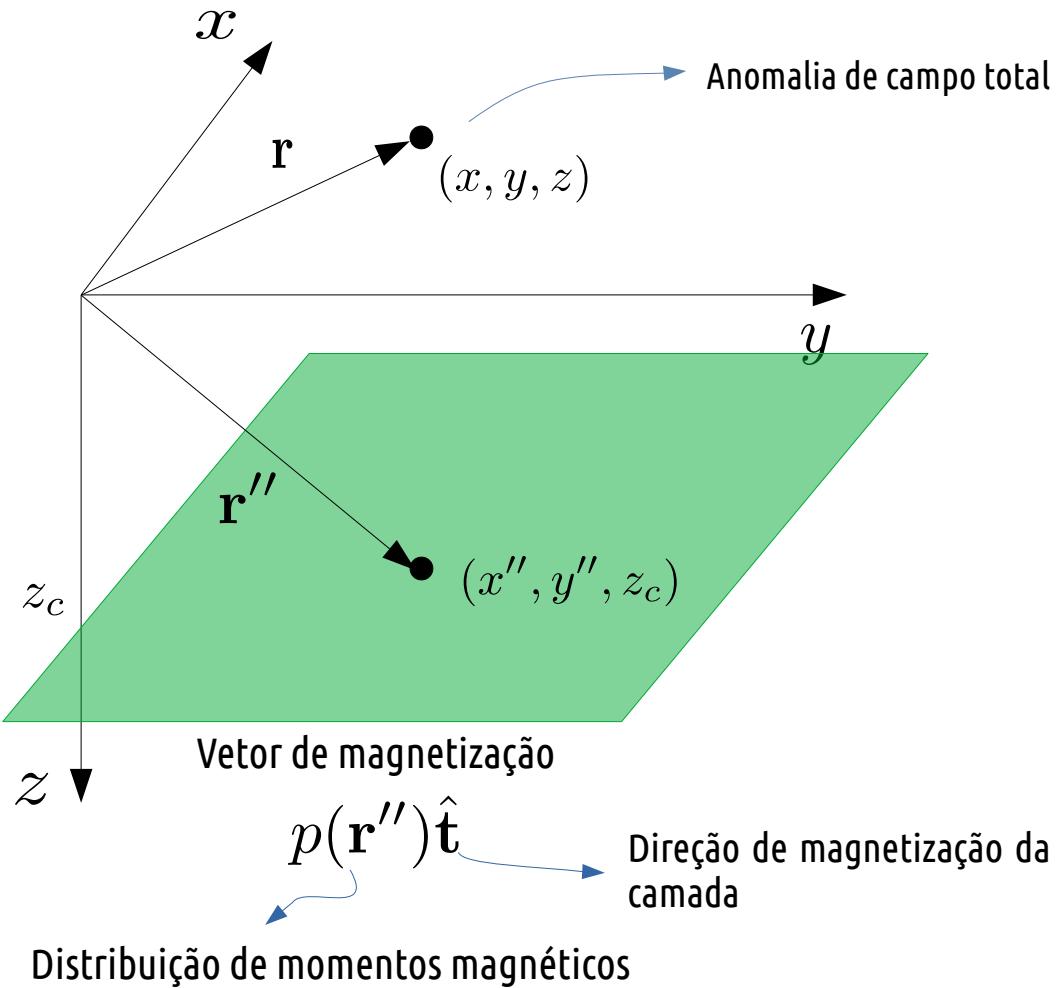
Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional



Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional

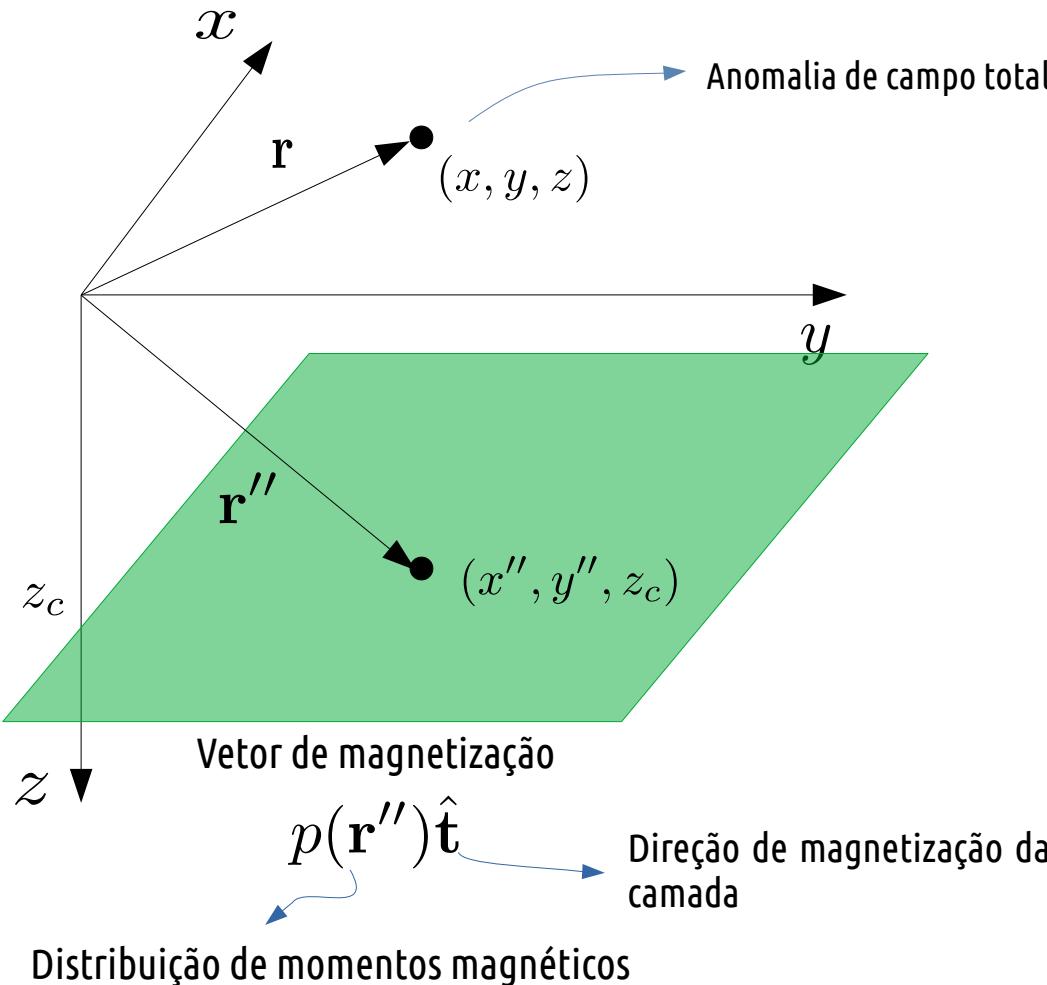


Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional



Camada equivalente

Uma camada fictícia contínua e infinita com propriedade física bidimensional

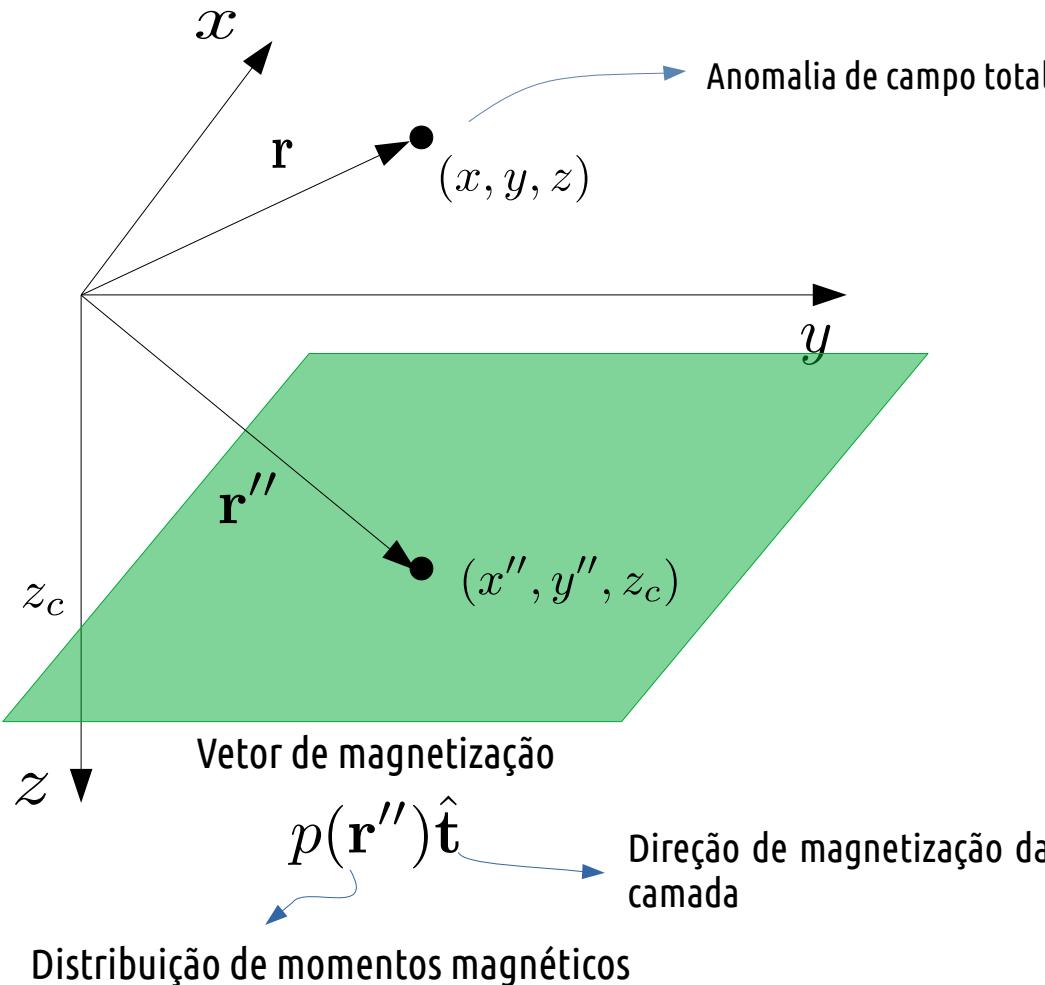


O campo magnético da camada é gerado pelo potencial:

$$\Omega^\dagger(\mathbf{r}) = \gamma_m \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\mathbf{r}'') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}'' \|} dS''$$

Camada equivalente

Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional



O campo magnético da camada é gerado
pelo potencial:

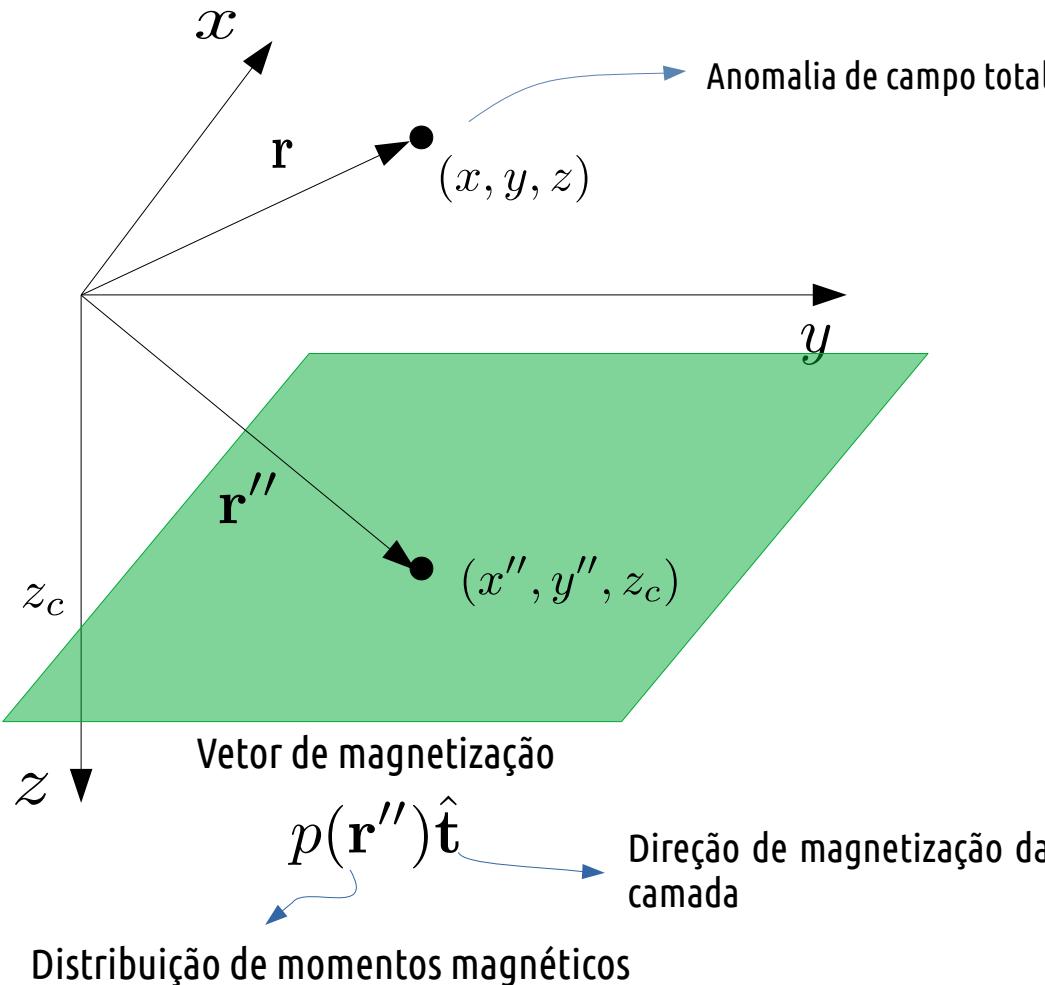
$$\Omega^\dagger(\mathbf{r}) = \gamma_m \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\mathbf{r}'') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}'' \|} dS''$$

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T^\dagger(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{t}}$$

Camada equivalente

Uma camada fictícia contínua e infinita
com propriedade física bidimensional



O campo magnético da camada é gerado
pelo potencial:

$$\Omega^\dagger(\mathbf{r}) = \gamma_m \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\mathbf{r}'') \frac{1}{\| \mathbf{r} - \mathbf{r}'' \|} dS''$$

A Anomalia de Campo Total

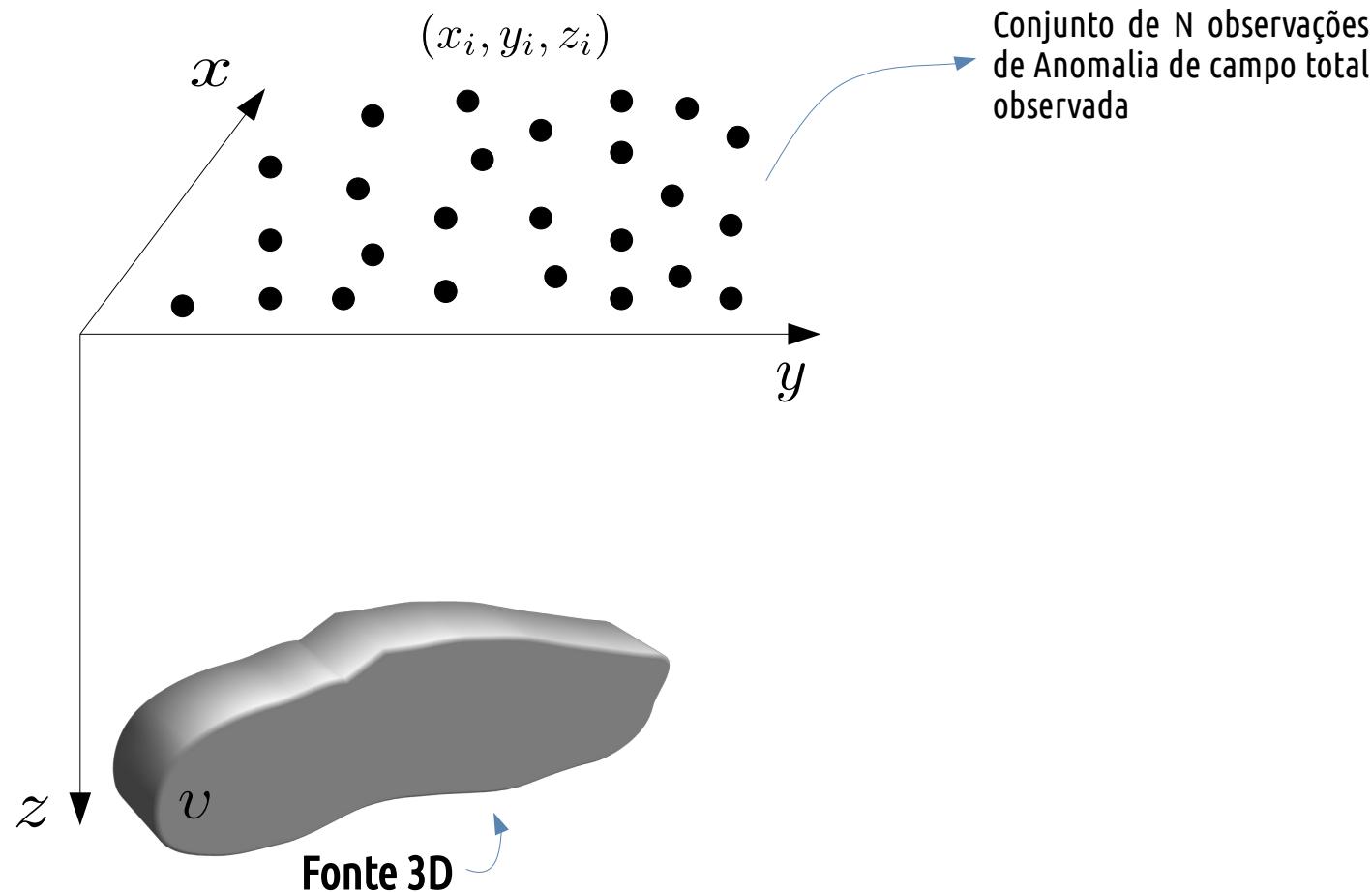
$$\Delta T^\dagger(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{t}}$$

↓

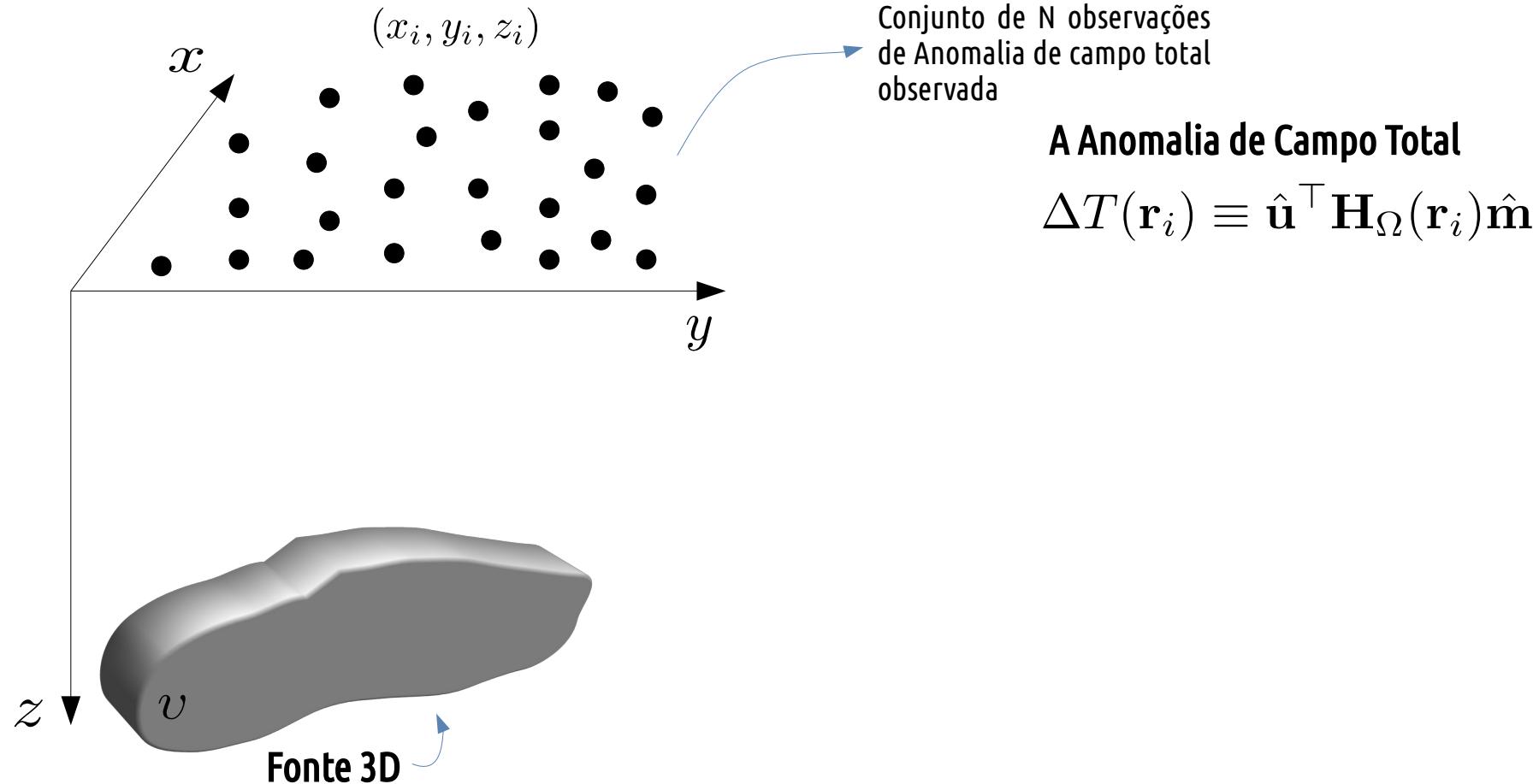
$$\mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} \partial_{xx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{xy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{xz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) \\ \partial_{yx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{yy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{yz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) \\ \partial_{zx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{zy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) & \partial_{zz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}) \end{bmatrix}$$

Como resolver o problema inverso da
Camada Equivalente?

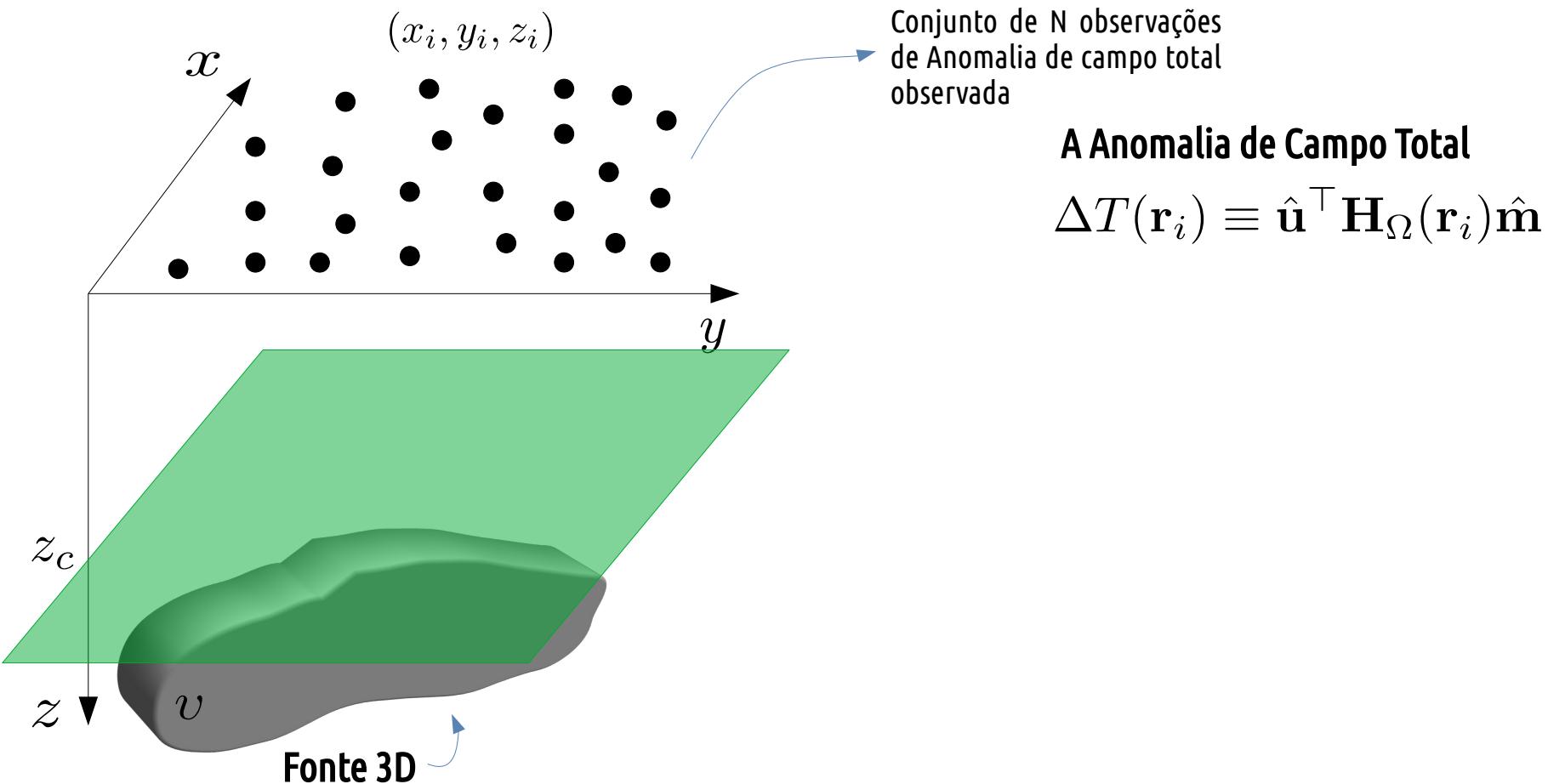
Camada equivalente



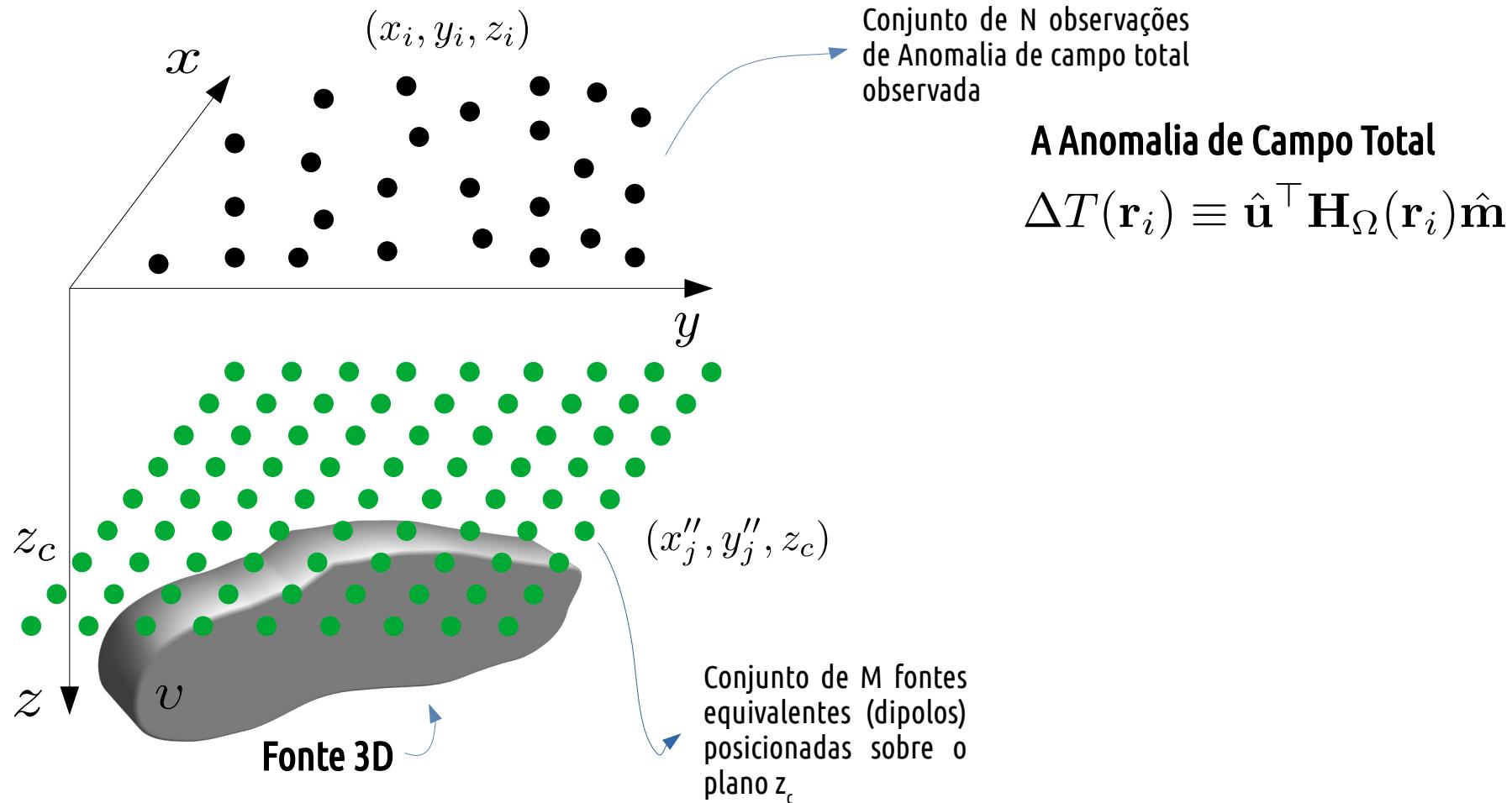
Camada equivalente



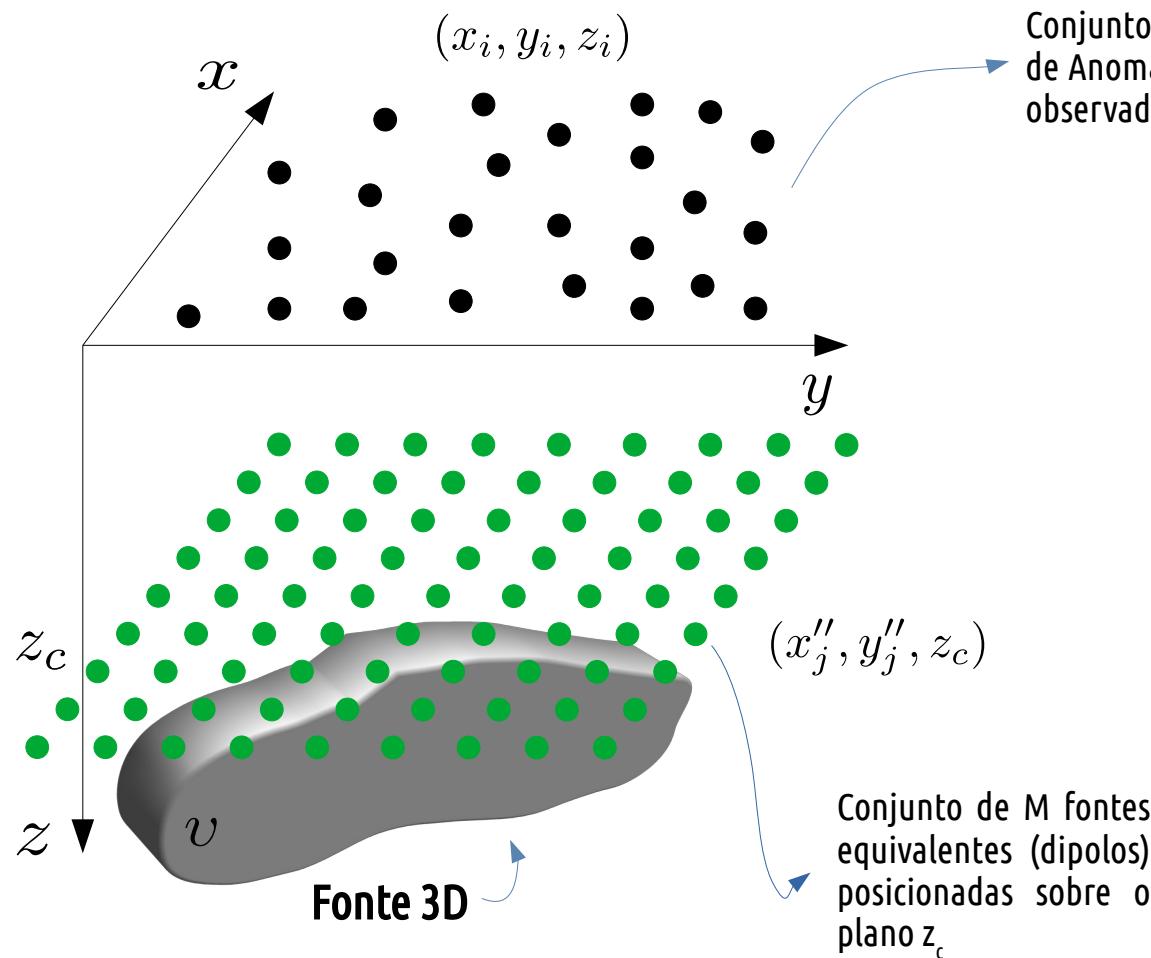
Camada equivalente



Camada equivalente



Camada equivalente



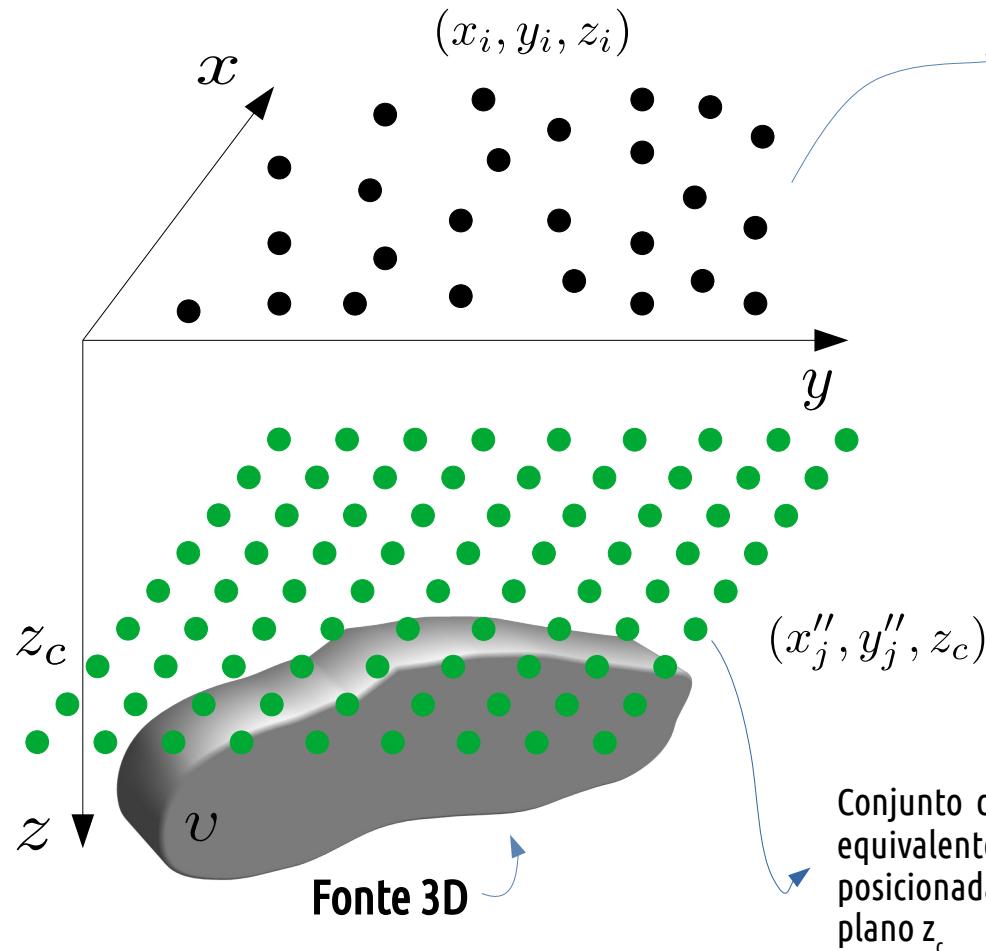
Conjunto de N observações
de Anomalia de campo total
observada

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}_i) \equiv \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}_i) \hat{\mathbf{m}}$$

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

Camada equivalente



Conjunto de N observações de Anomalia de campo total observada

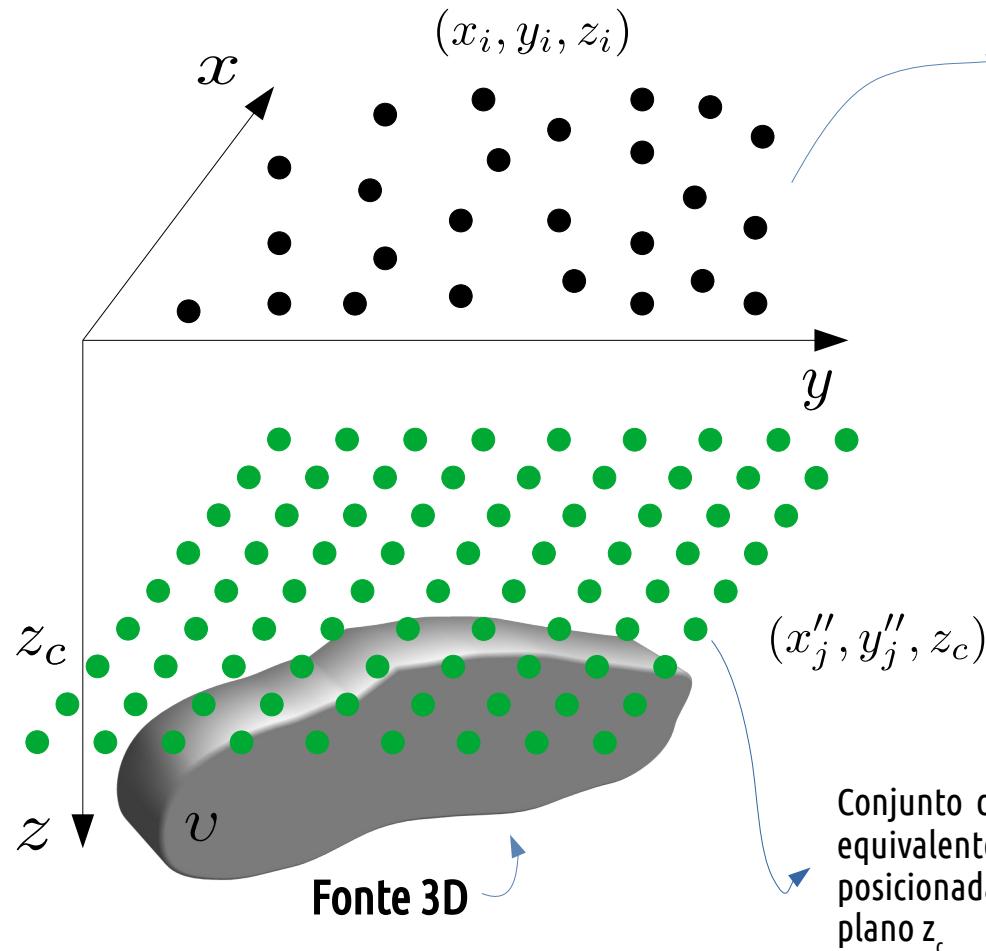
A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}_i) \equiv \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}_i) \hat{\mathbf{m}}$$

A Anomalia de campo total aproximada de um dipolo na posição \mathbf{r}_j em uma posição de observação \mathbf{r}_i .

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

Camada equivalente



Fonte 3D

(Silva, 1986)

Conjunto de N observações
de Anomalia de campo total
observada

A Anomalia de Campo Total

$$\Delta T(\mathbf{r}_i) \equiv \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}_i) \hat{\mathbf{m}}$$

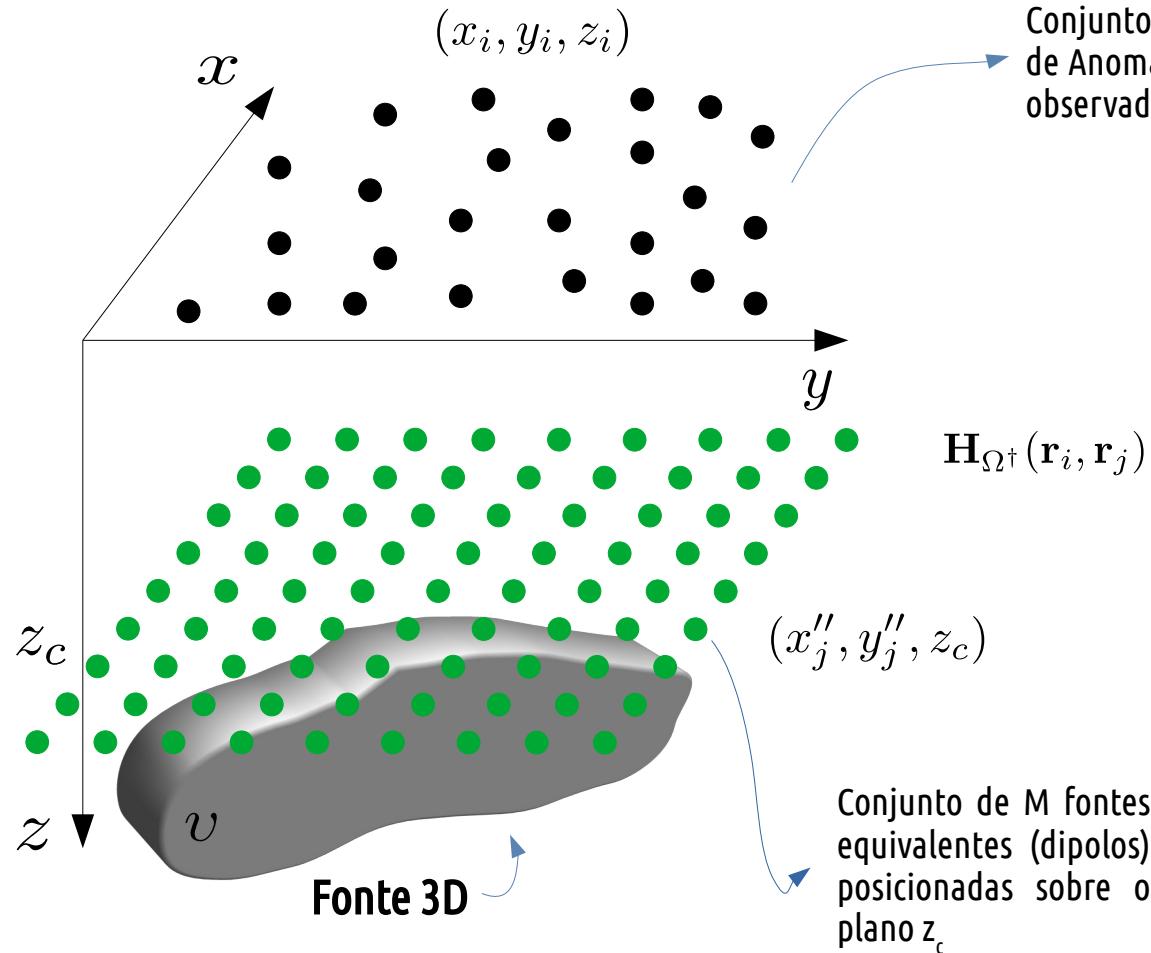
$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

Momento magnético
do j-ésimo dipolo

Direção do campo
principal

Direção das fontes
equivalentes

Camada equivalente



A Anomalia de Campo Total

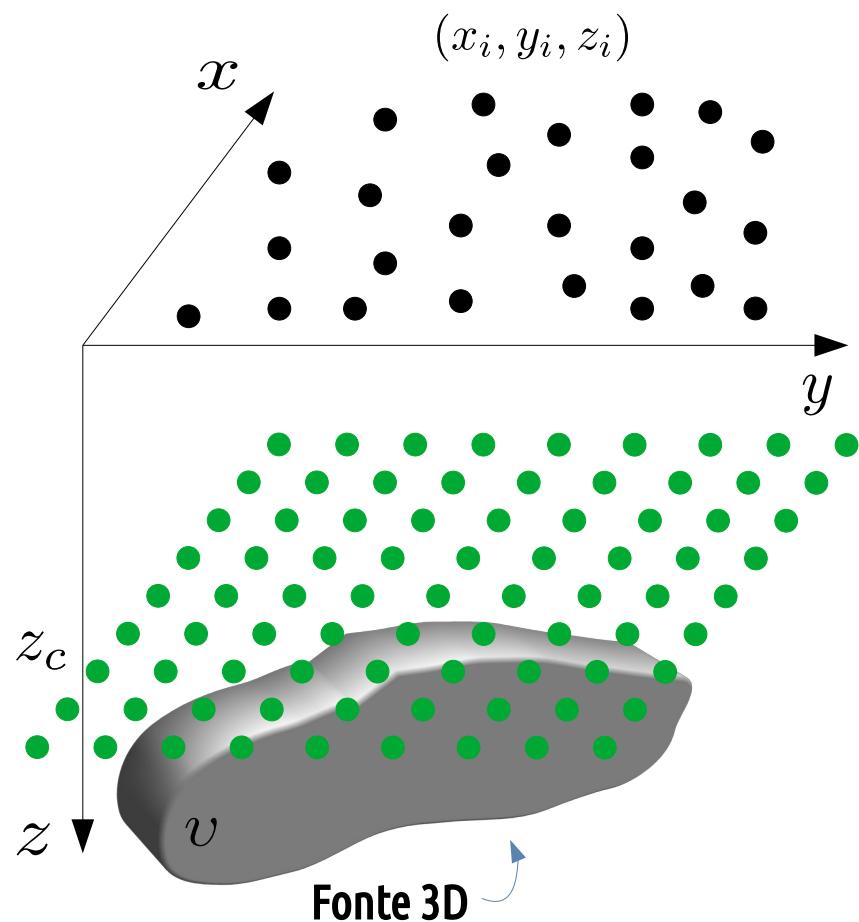
$$\Delta T(\mathbf{r}_i) \equiv \hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_\Omega(\mathbf{r}_i) \hat{\mathbf{m}}$$

$$\mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \begin{bmatrix} \partial_{xx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{xy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{xz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \\ \partial_{yx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{yy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{yz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \\ \partial_{zx}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{zy}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) & \partial_{zz}\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \end{bmatrix}$$

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Omega^\dagger(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j''\|}$$

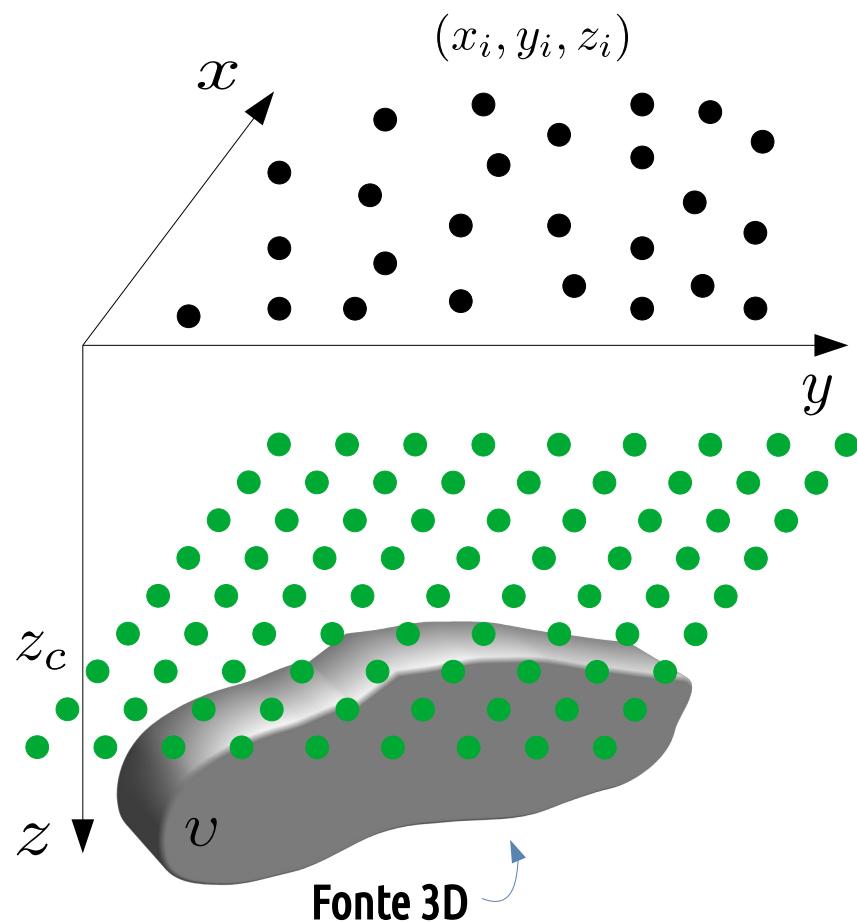
Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

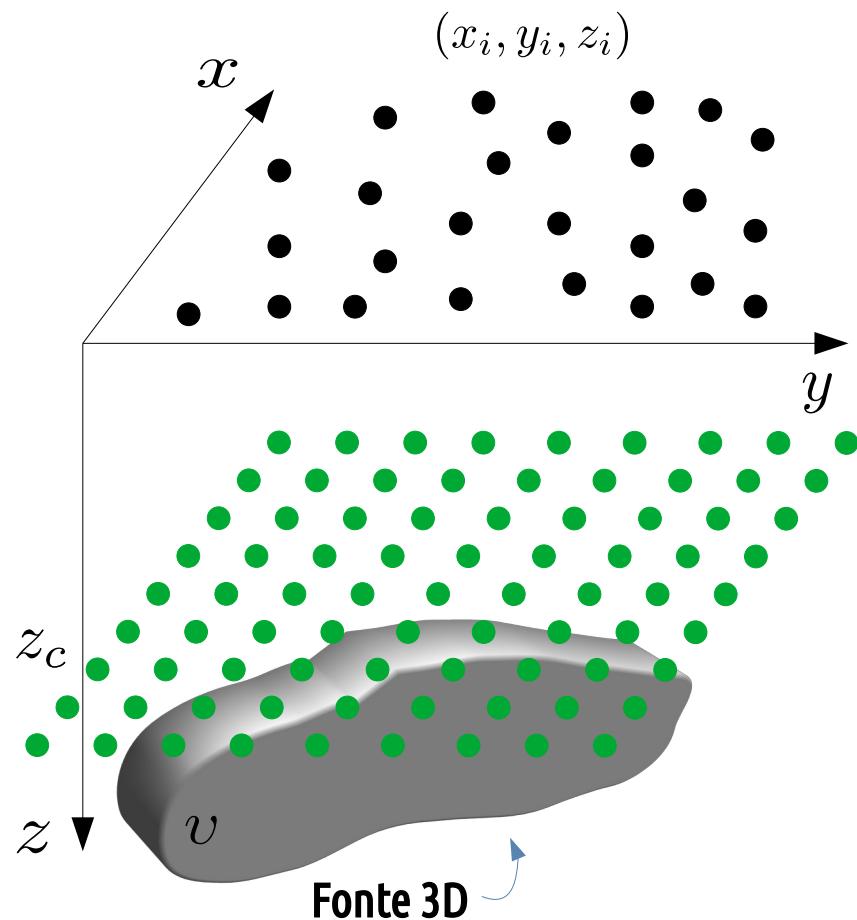
Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$
$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

Camada equivalente



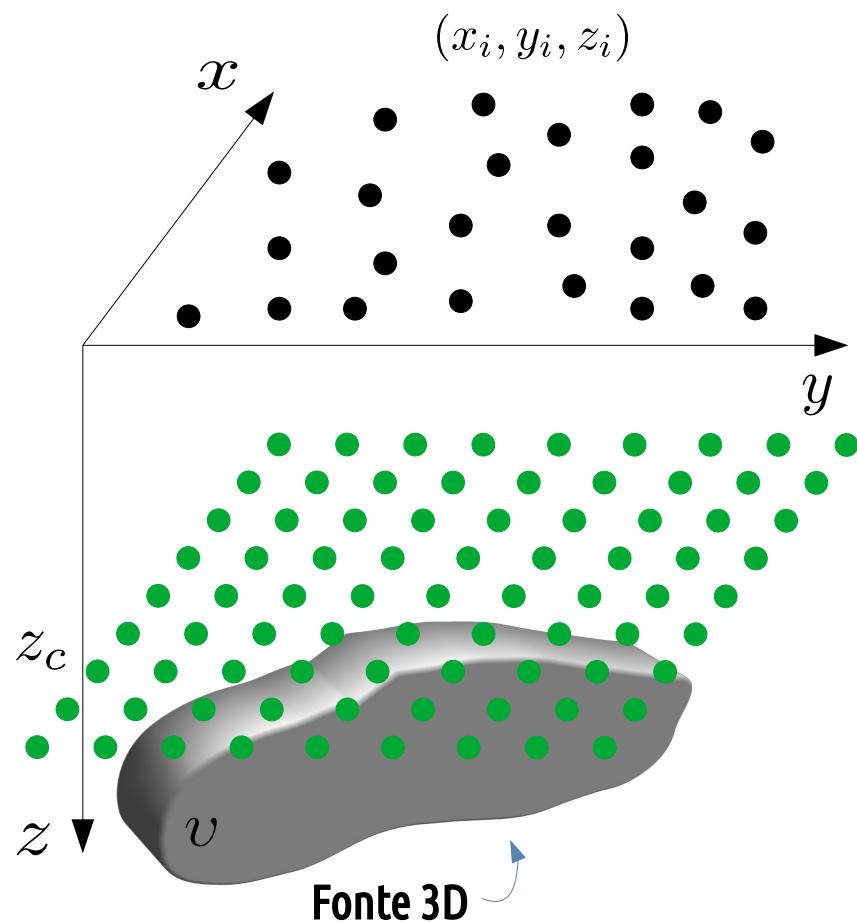
A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

Consiste em resolver um sistema linear para o vetor de parâmetros \mathbf{p} .

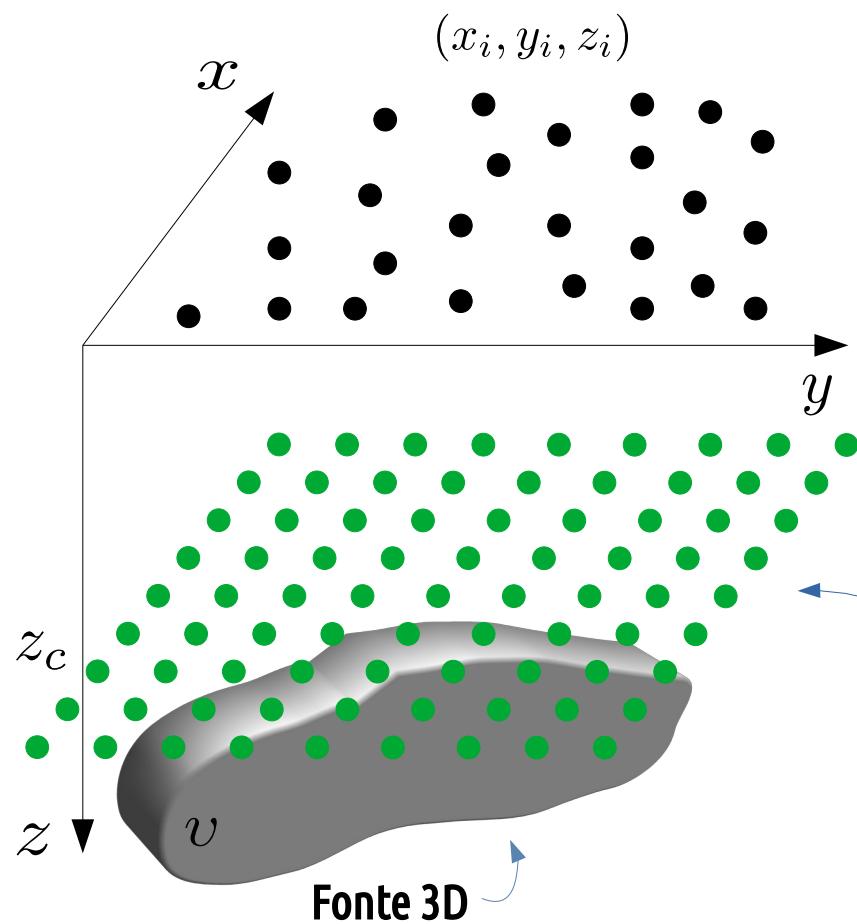
Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$
$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

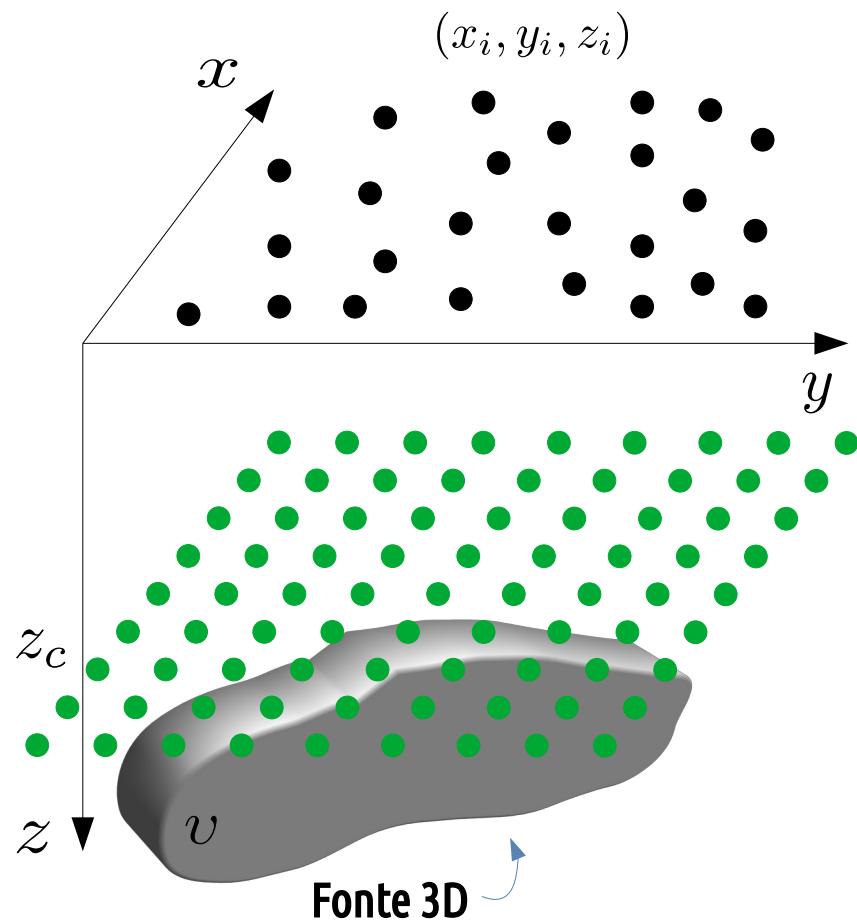
$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}$$

Distribuição
de momentos

Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

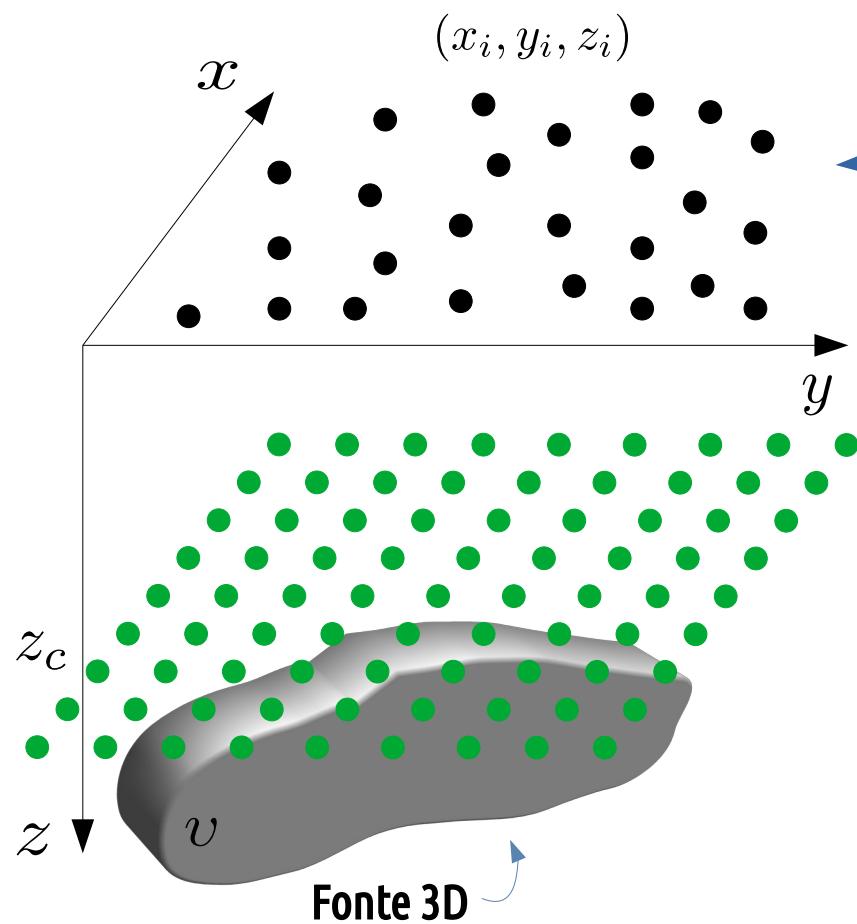
$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

a_{ij}
Dipolo

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}$$

Distribuição
de momentos

Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

$$\Delta \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \vdots \\ \Delta T_N \end{bmatrix}$$

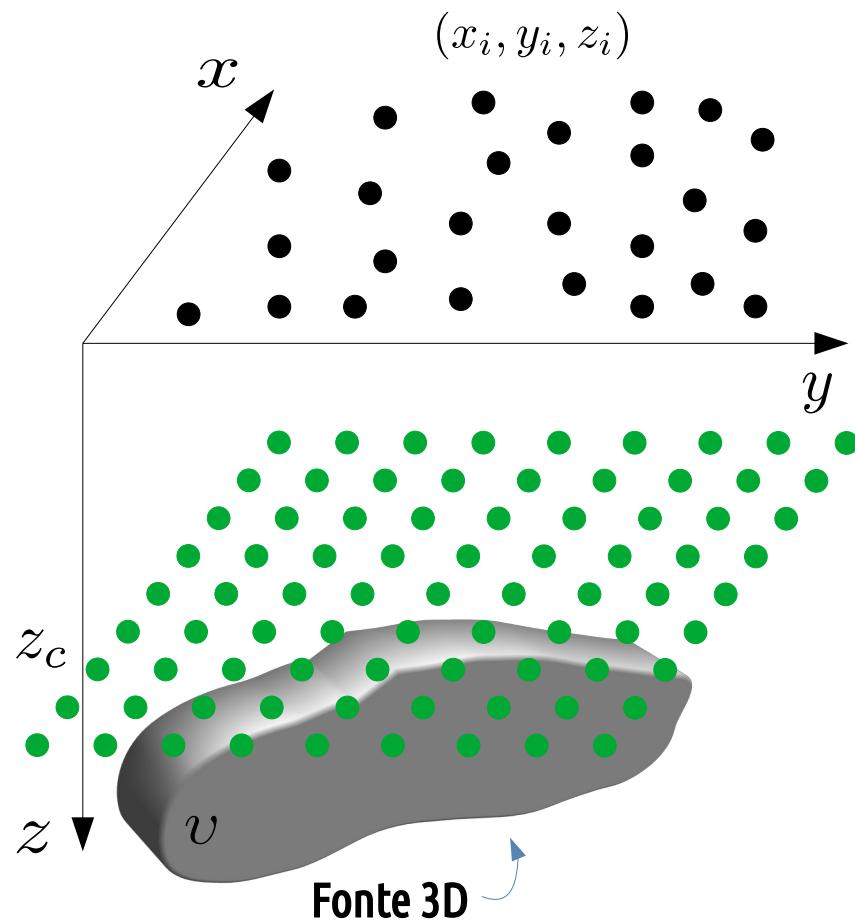
Anomalia de Campo
Total Observada

a_{ij}
Dipolo

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}$$

Distribuição
de momentos

Camada equivalente



A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

$$\Delta \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \vdots \\ \Delta T_N \end{bmatrix}$$

Anomalia de Campo
Total Observada

$$a_{ij}$$

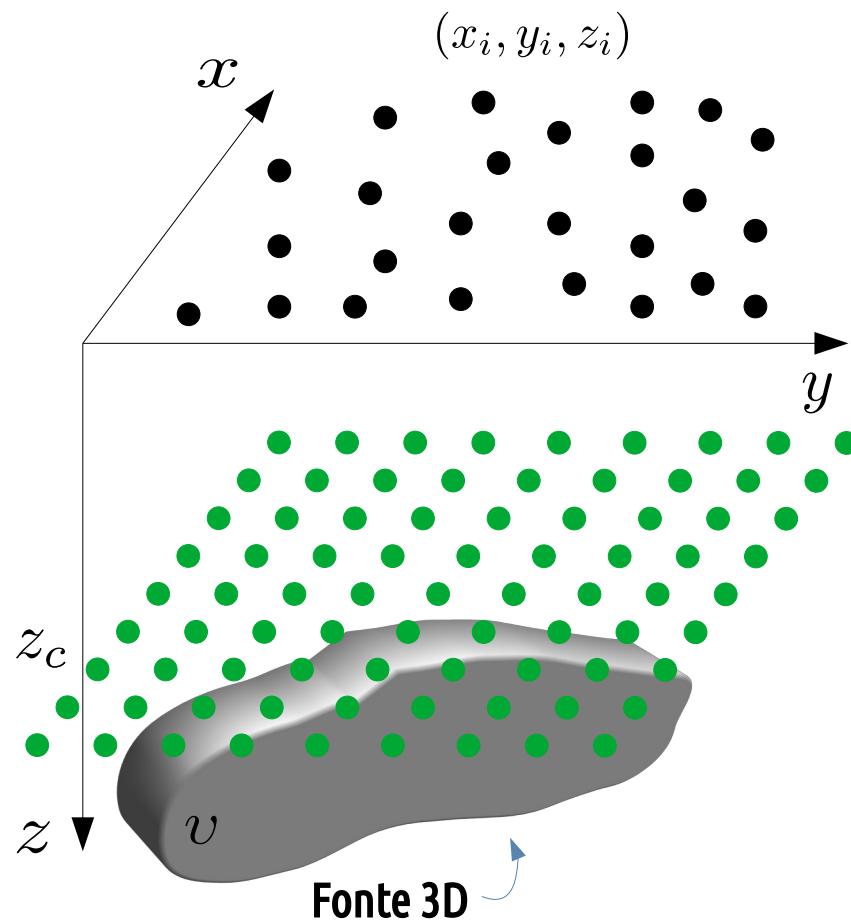
Dipolo

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}$$

Distribuição
de momentos

$$\mathbf{w} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{p}}$$

Camada equivalente



(Silva, 1986)

A Camada equivalente Clássica

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

$$\Delta \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \vdots \\ \Delta T_N \end{bmatrix}$$

Anomalia de Campo
Total Observada

$$a_{ij}$$

Dipolo

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix}$$

Distribuição
de momentos

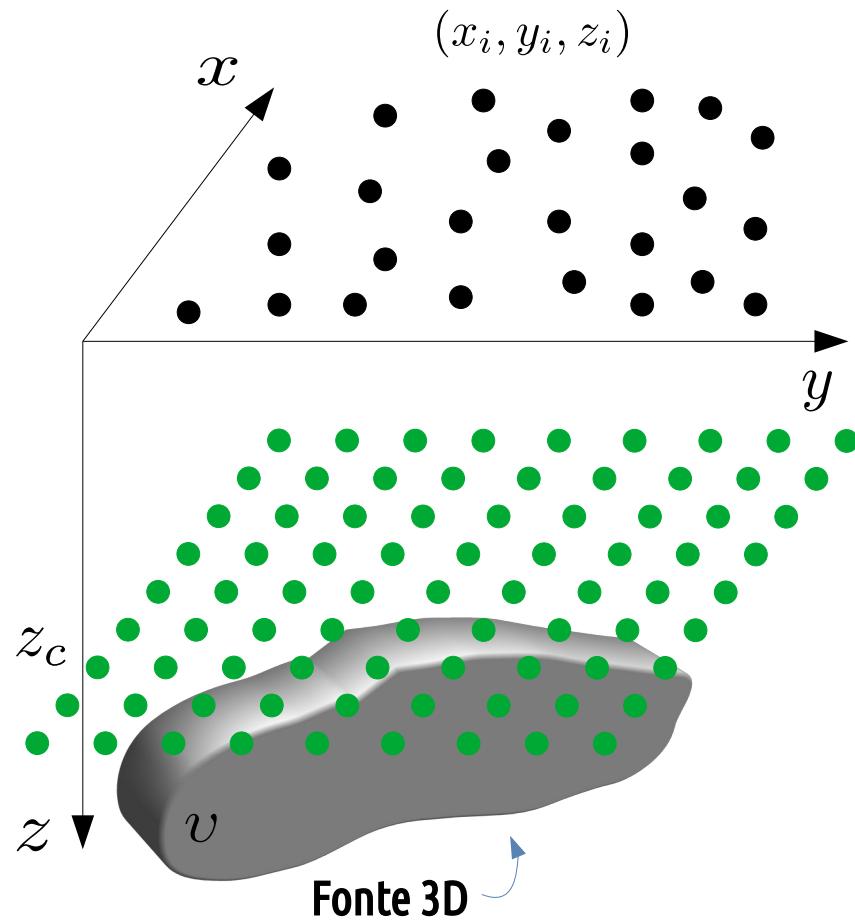
$$\mathbf{w} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{p}}$$

Campo transformado

Matriz de transformação

Distribuição
de momentos
estimada

Camada equivalente



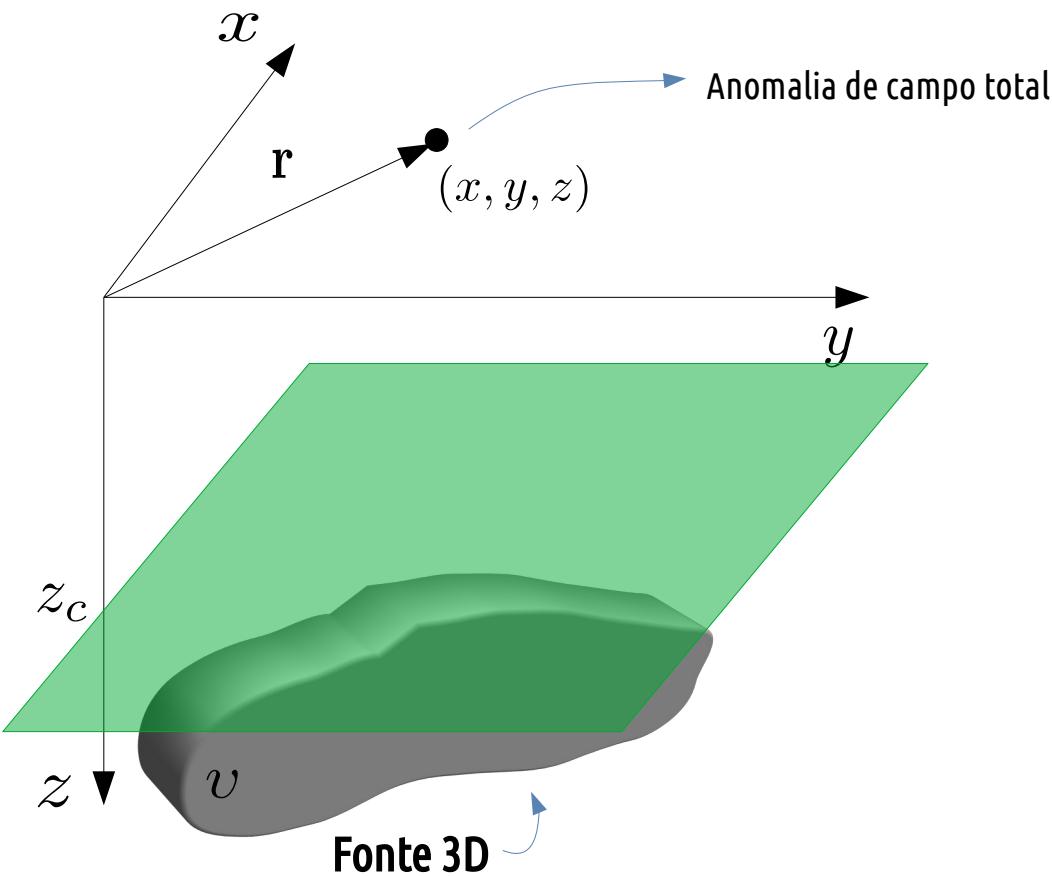
A **Camada equivalente** é comumente utilizada para realizar o **processamento de dados potenciais** tais como Interpolação (e.g., Soler and Uieda, 2021), Redução ao Polo (e.g., Silva, 1986; Oliveira Jr et al, 2013), Cálculo das componentes do Campo (e.g., Li and Li, 2018; Zuo et al, 2020), Continuação para cima/ou para baixo (e.g., Takahashi et al., 2022), dentre outros.

$$\mathbf{w} = \mathbf{T}\tilde{\mathbf{p}}$$

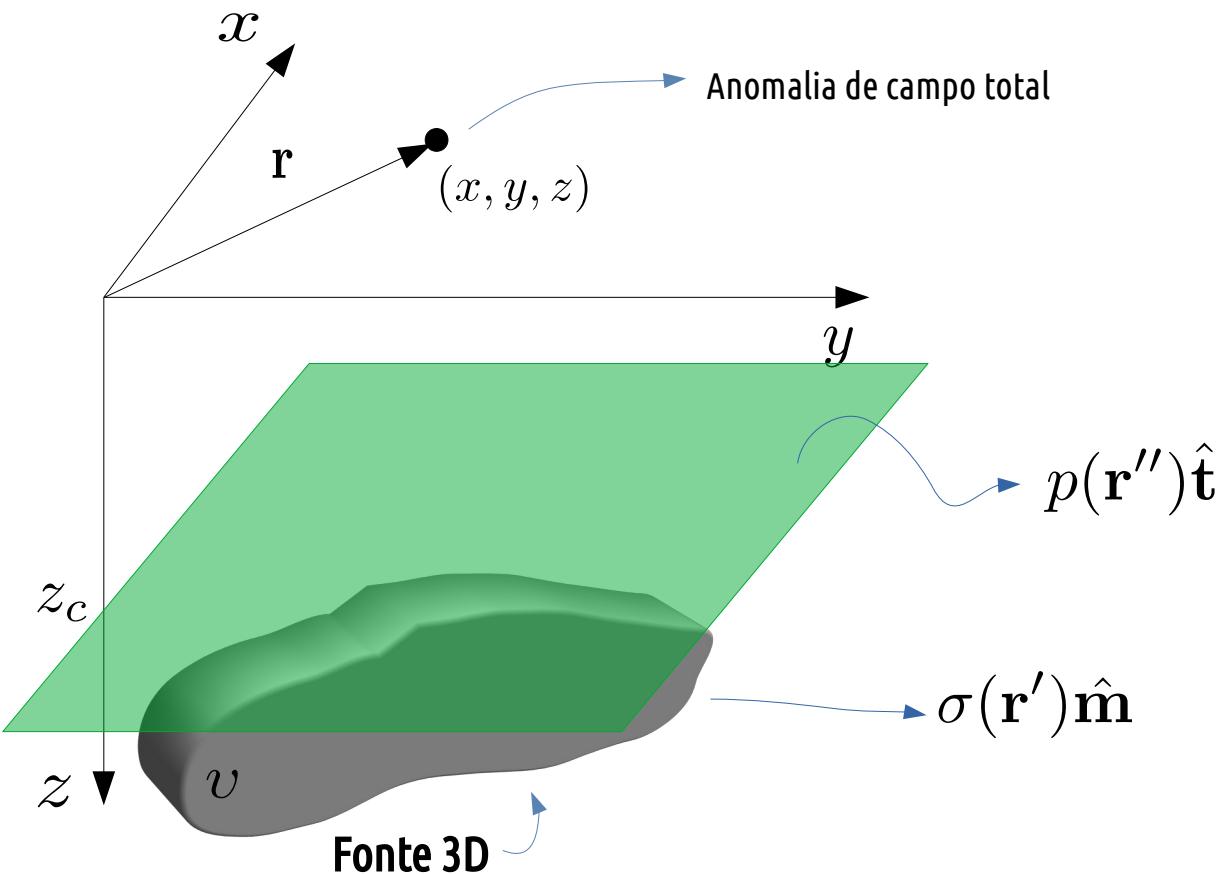
Campo transformado Matriz de transformação Distribuição de momentos estimada

Existe uma **particularidade** sobre a **distribuição de momentos** sobre a camada equivalente...

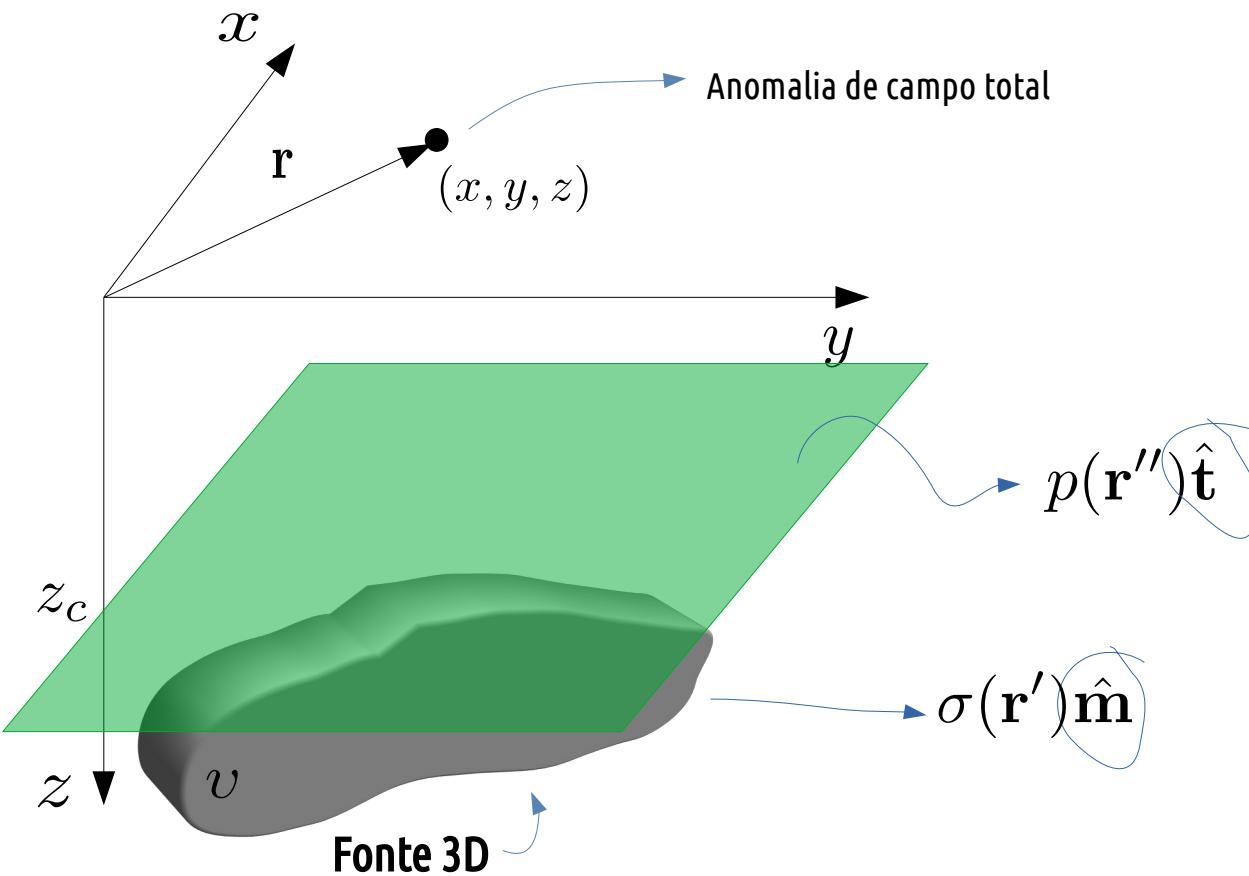
Camada equivalente



Camada equivalente

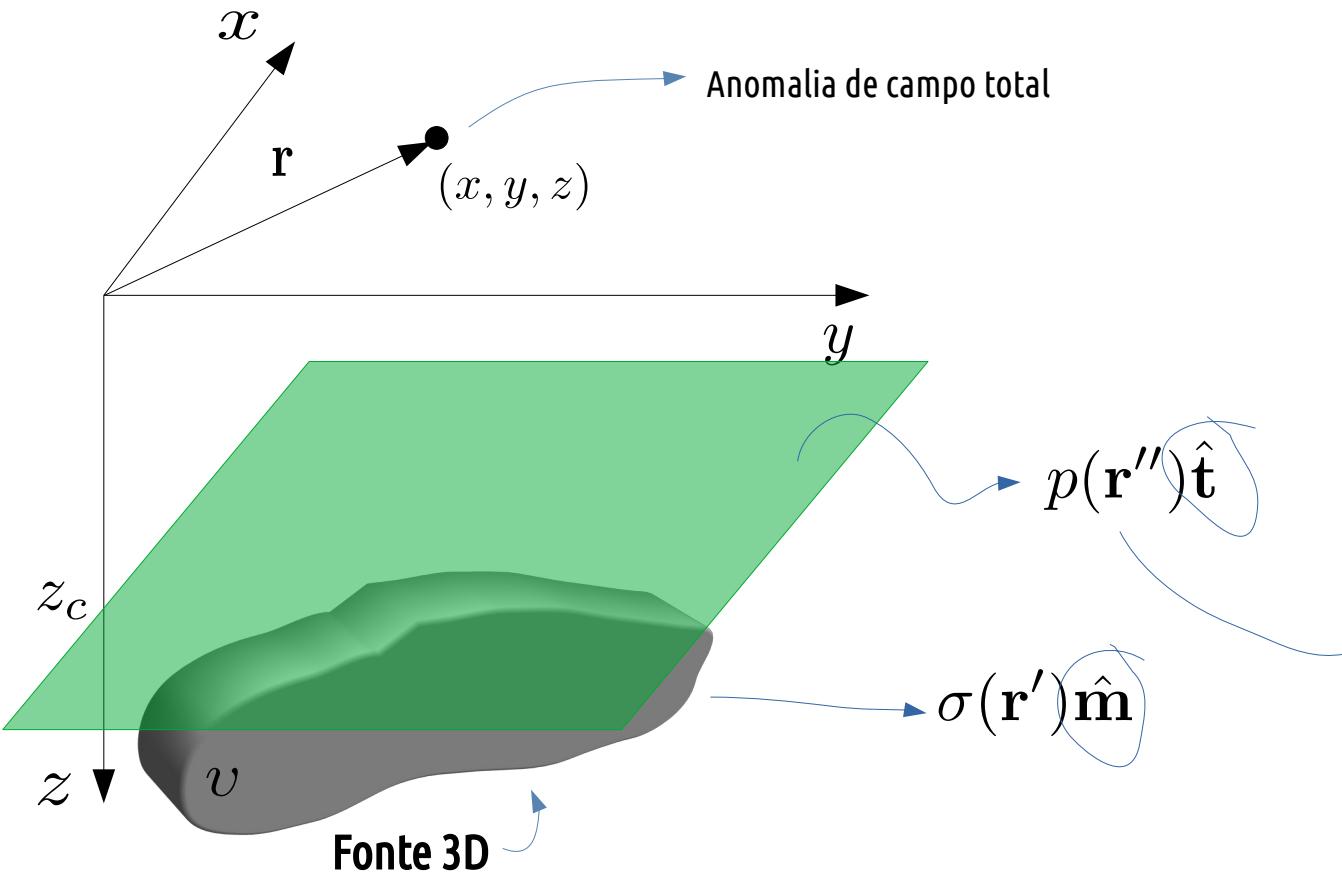


Camada equivalente



Se a direção de magnetização da Camada e do corpo forem iguais...

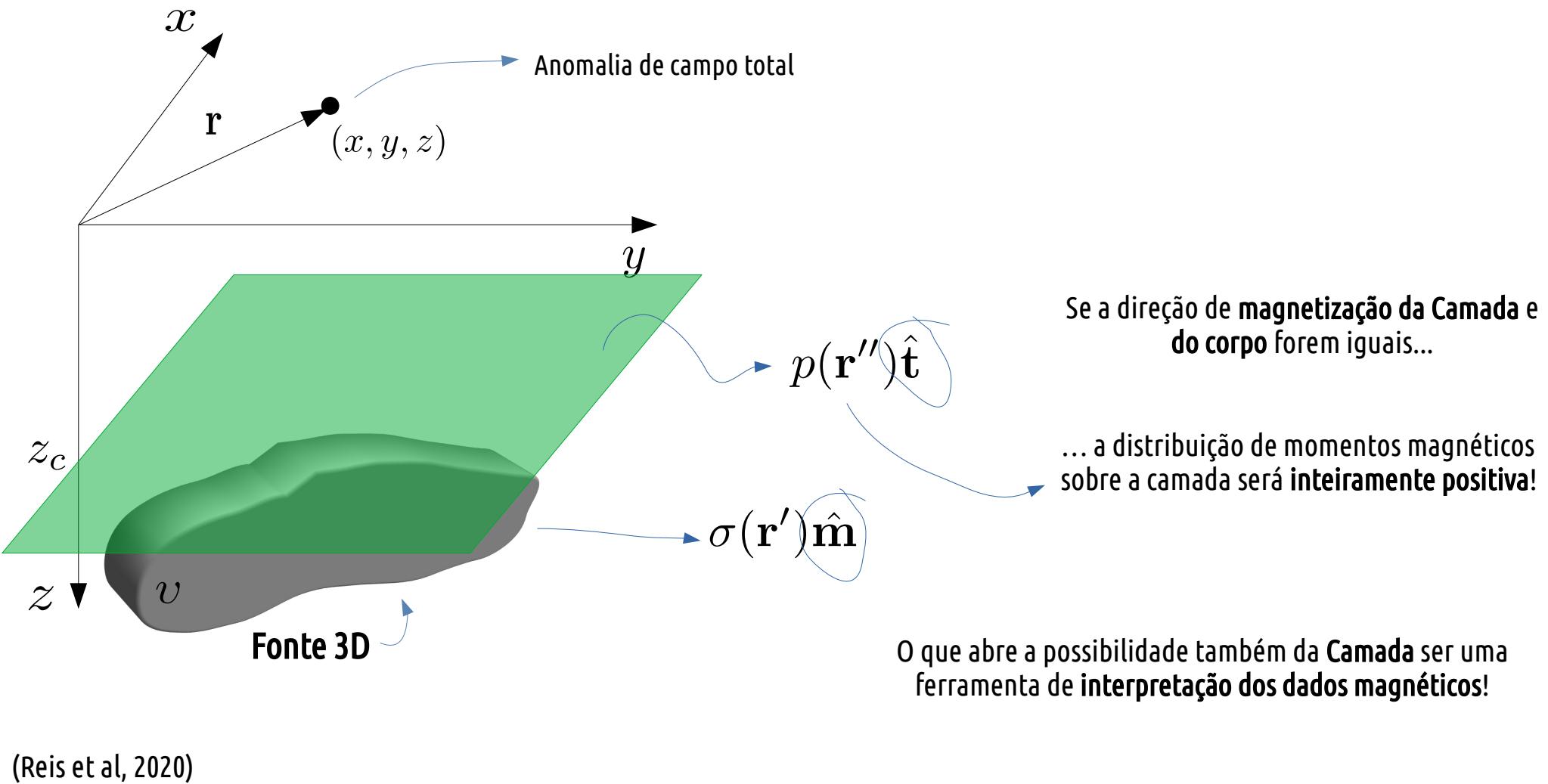
Camada equivalente



Se a direção de **magnetização da Camada e do corpo forem iguais...**

... a distribuição de momentos magnéticos sobre a camada será **inteiramente positiva!**

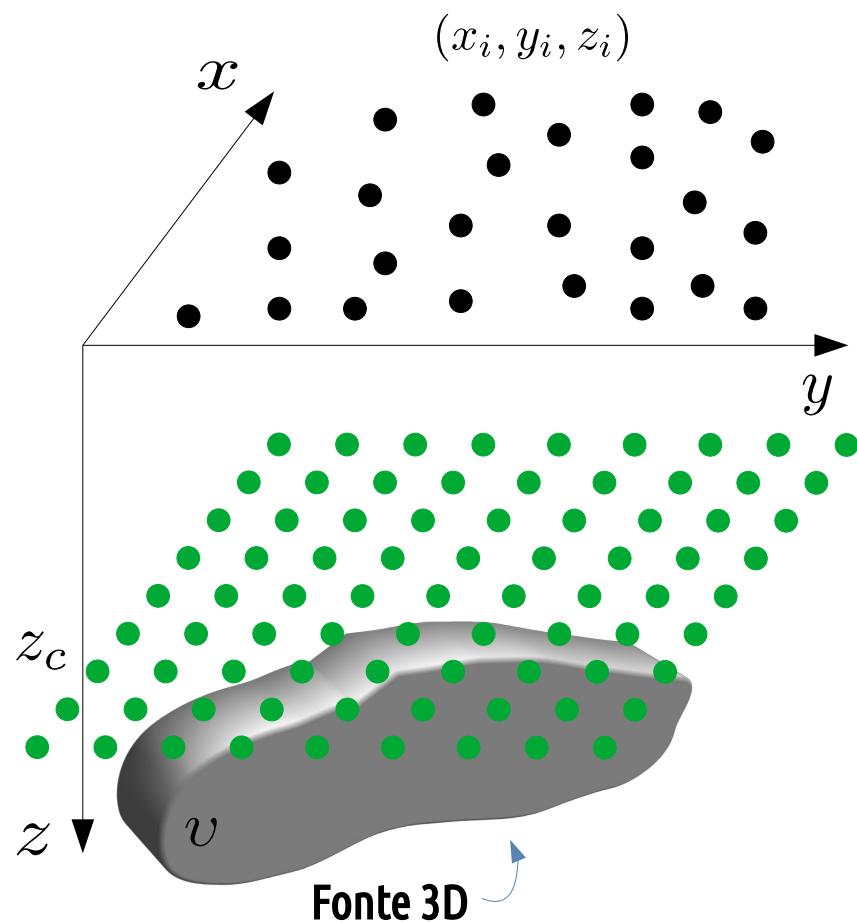
Camada equivalente



Esta propriedade já havia sido investigada por Pedersen (1991) e Li et al (2014), considerando que a direção de magnetização fosse **puramente induzida**, fazendo uma prova no domínio da frequência.

Reis et. al. (2020) generalizaram este resultado para qualquer **direção de magnetização**, seja ela **puramente induzida ou não**, bem como utilizou esta propriedade para estimar a **direção de magnetização de fontes magnéticas** a partir da anomalia de campo total.

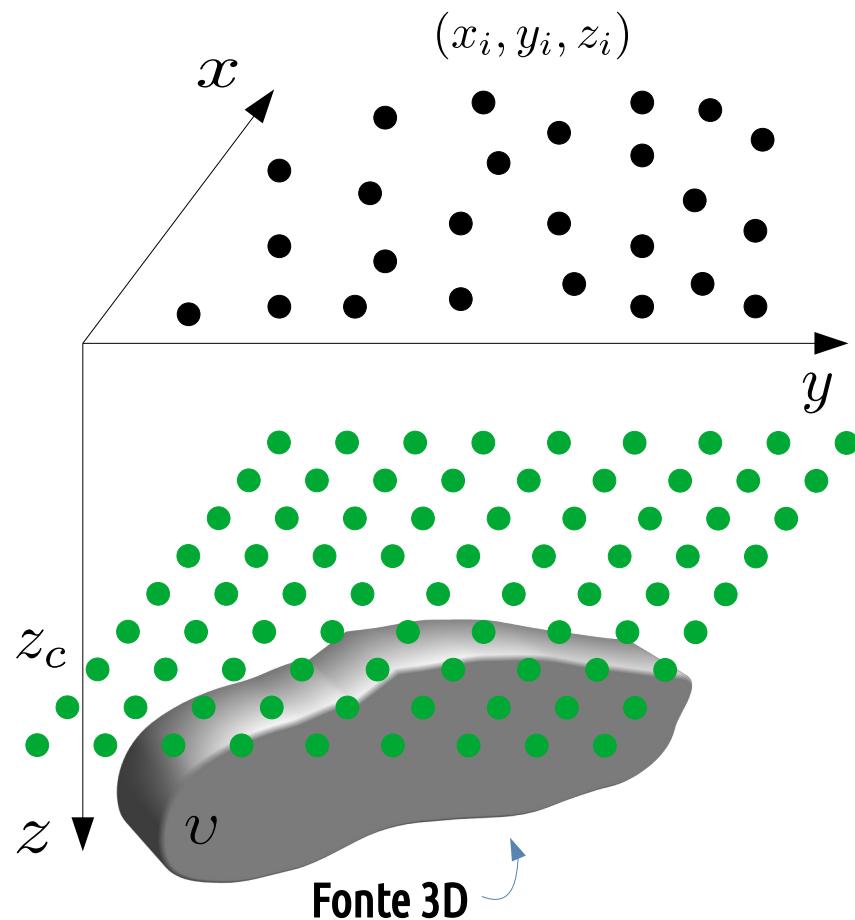
Camada equivalente



A Camada equivalente com vínculo de positividade :

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$
$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

Camada equivalente



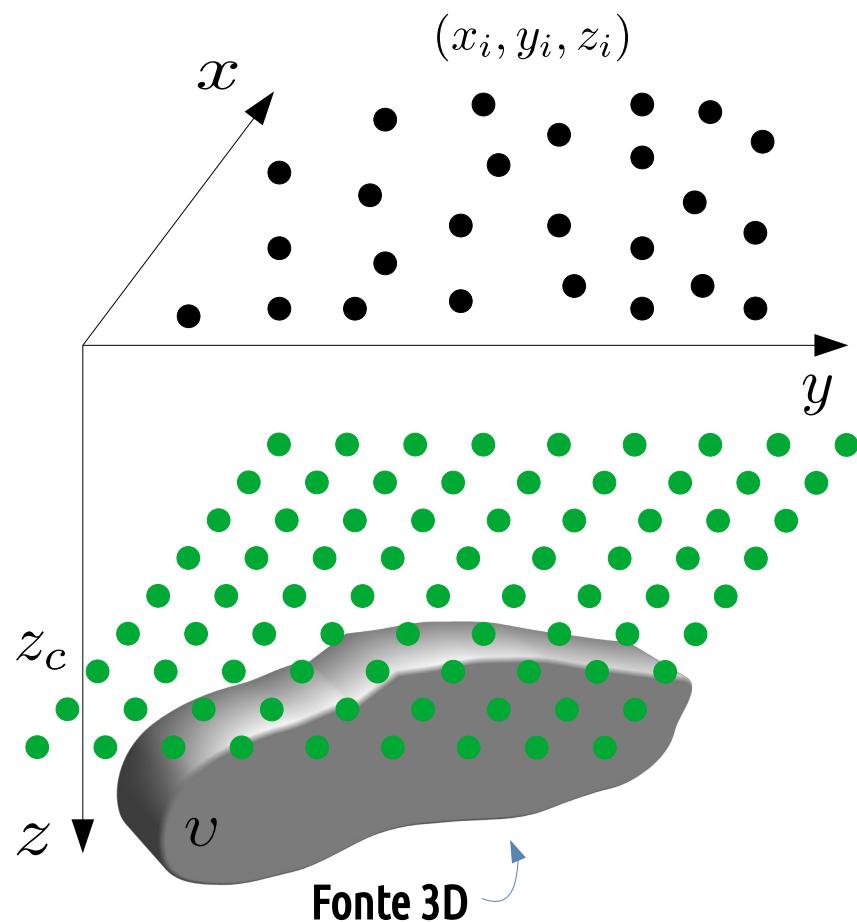
A Camada equivalente com vínculo de positividade :

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{A} \mathbf{p}$$

Consiste em resolver um sistema linear para o vetor de parâmetros \mathbf{p} .

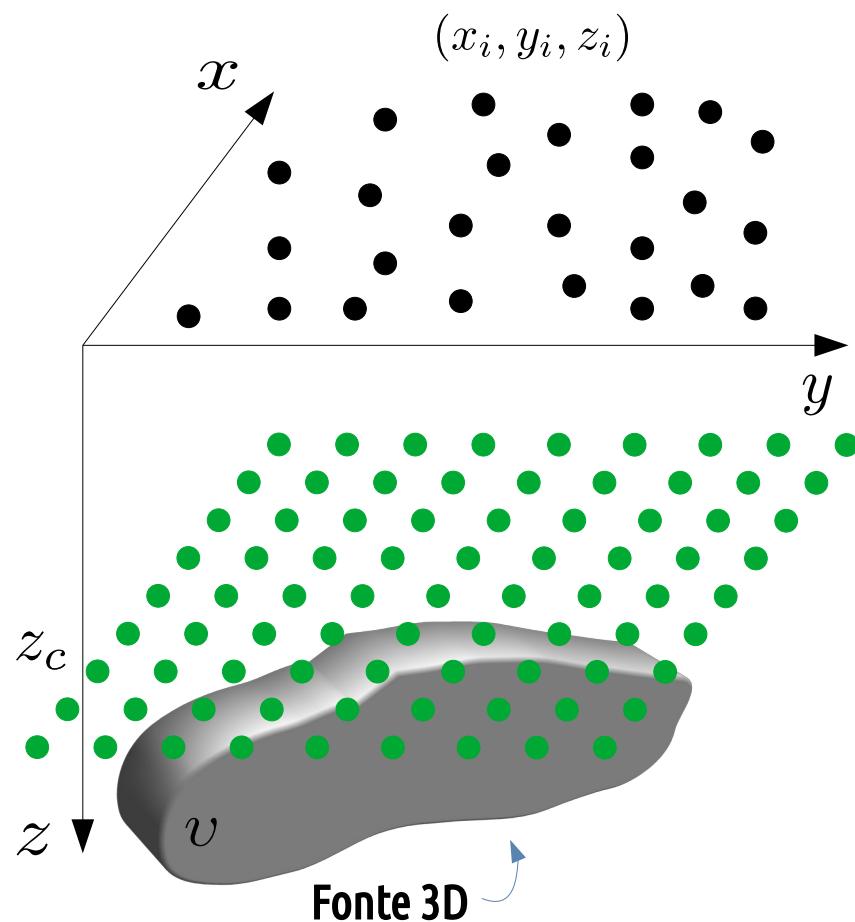
Camada equivalente



A Camada equivalente com vínculo de positividade :

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$
$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{f}(\mathbf{p}, \hat{\mathbf{t}})$$

Camada equivalente



A Camada equivalente com vínculo de positividade :

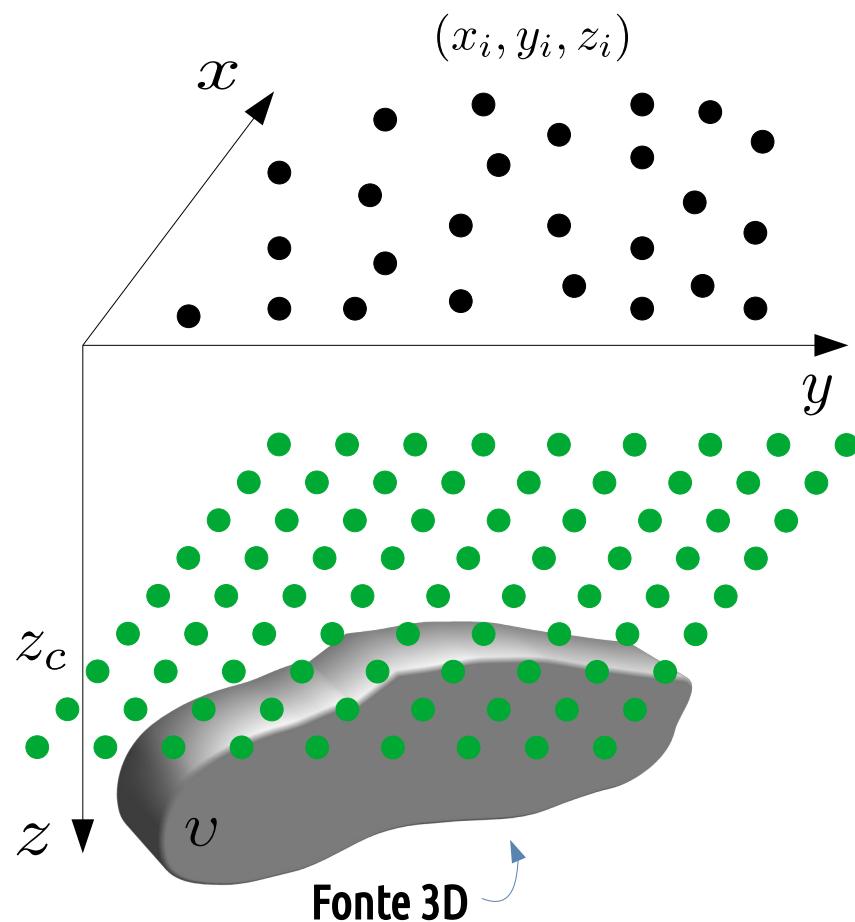
$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{f}(\mathbf{p}, \hat{\mathbf{t}})$$

Distribuição
de momentos

Direção de
magnetização
da Camada

Camada equivalente



A Camada equivalente com vínculo de positividade :

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{f}(\mathbf{p}, \hat{\mathbf{t}})$$

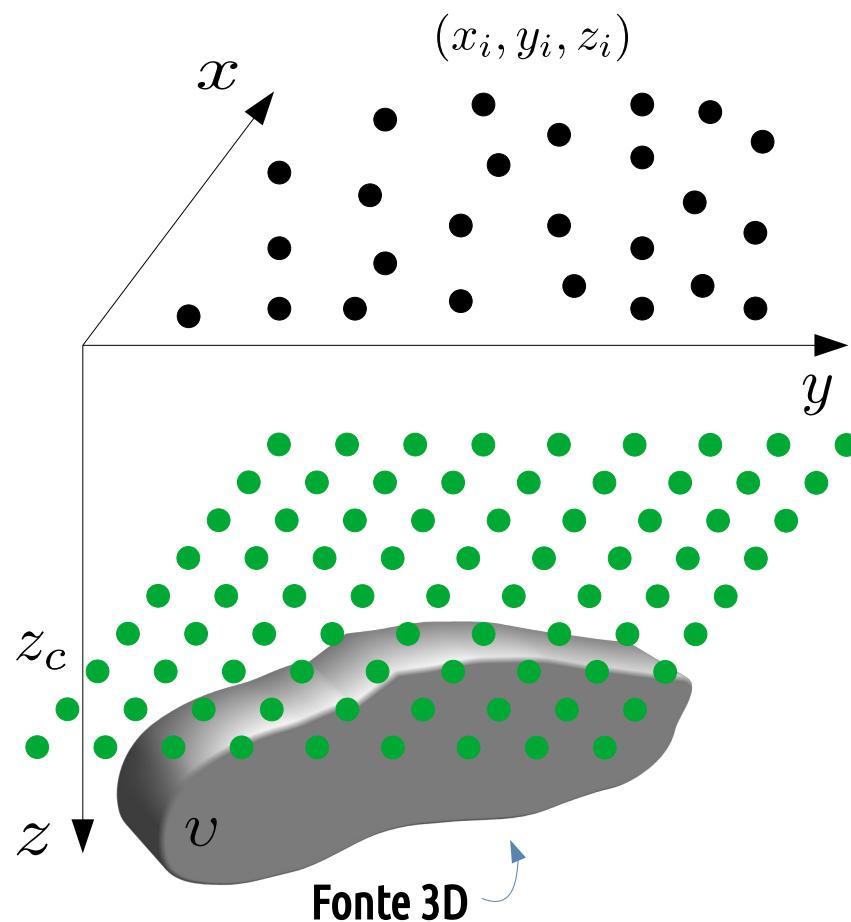
Distribuição
de momentos

1^a etapa

Estimar uma
distribuição de
momentos
positiva

Direção de
magnetização
da Camada

Camada equivalente



A Camada equivalente com vínculo de positividade :

$$\Delta T_i \approx \sum_{j=1}^M p_j [\hat{\mathbf{u}}^\top \mathbf{H}_{\Omega^\dagger}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \hat{\mathbf{t}}]$$

$$\Delta \mathbf{T} \approx \mathbf{f}(\mathbf{p}, \hat{\mathbf{t}})$$

Distribuição de momentos

1^a etapa

Estimar uma distribuição de momentos positiva

Direção de magnetização da Camada

2^a etapa

Direção de magnetização próxima a do corpo verdadeiro!

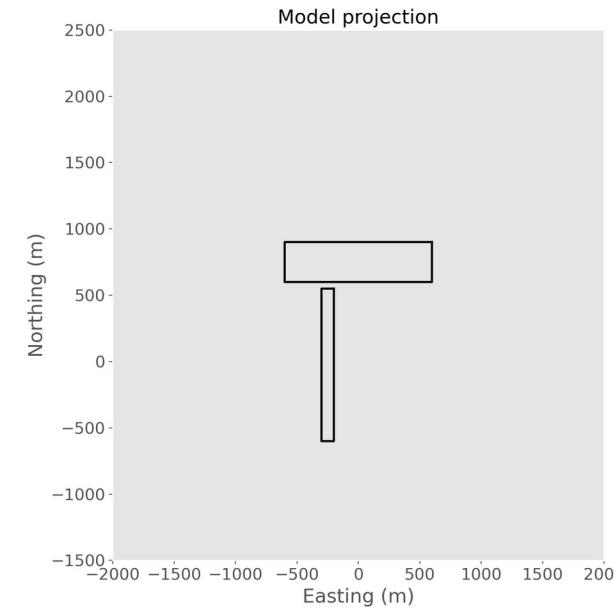
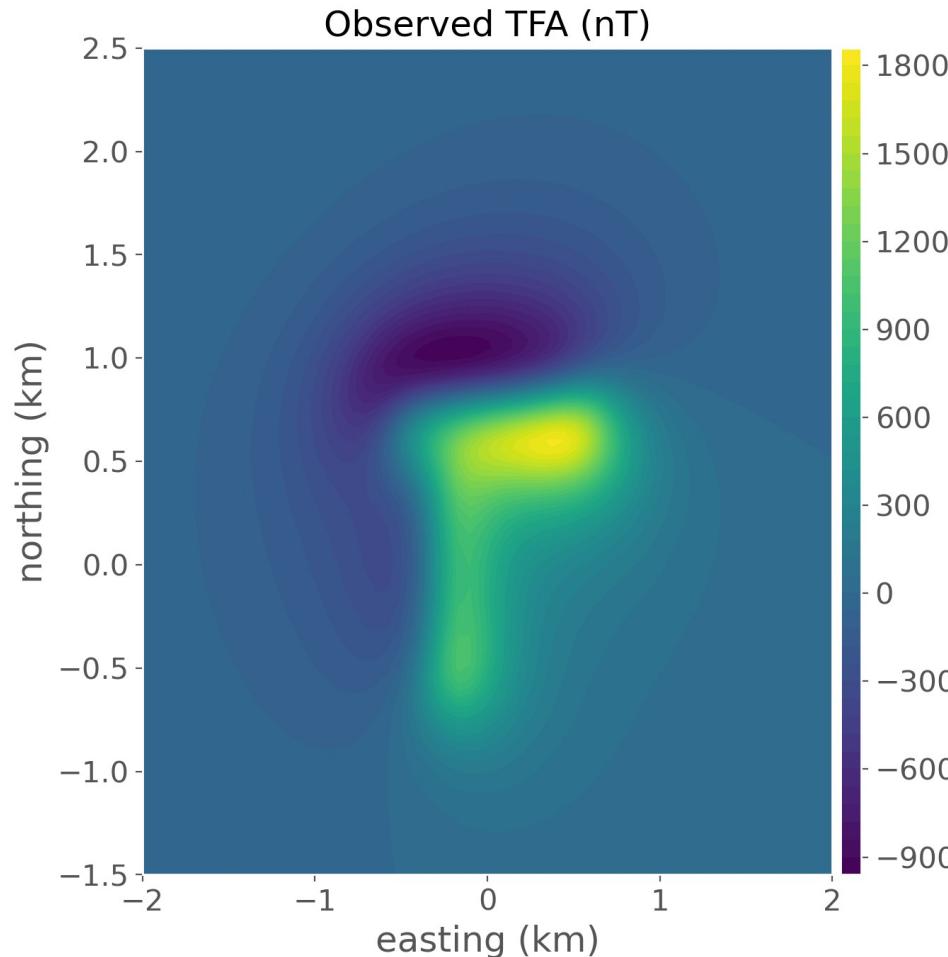
Exemplos da Camada:

- 1 – **Simulação numérica**: a distribuição positiva
- 2 – **Simulação numérica**: Múltiplas fontes com mesma direção de magnetização
- 3 – **Simulação numérica**: Múltiplas fontes com diferente direção de magnetização
- 4 – **Aplicação a dados de aerolevantamento** : Complexo de Montes Claros de Goiás (PAGO)

1. A distribuição positiva

1. Distribuição positiva

Modelagem dos dados



Direção do Campo principal

$$\hat{\mathbf{u}} = (40^\circ, -50^\circ)$$

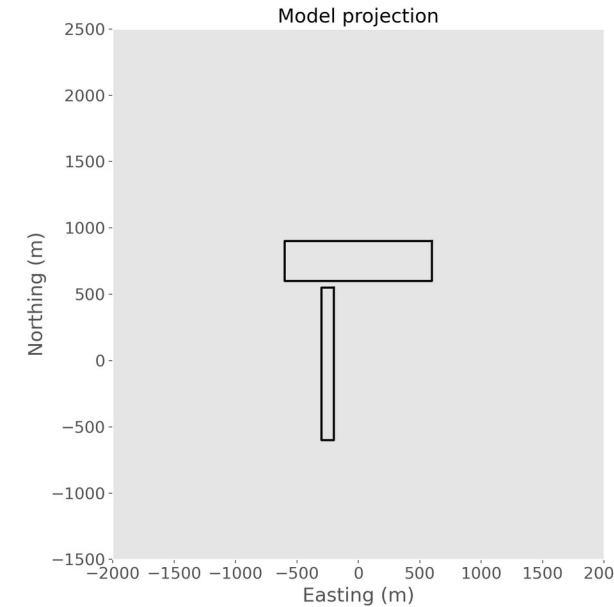
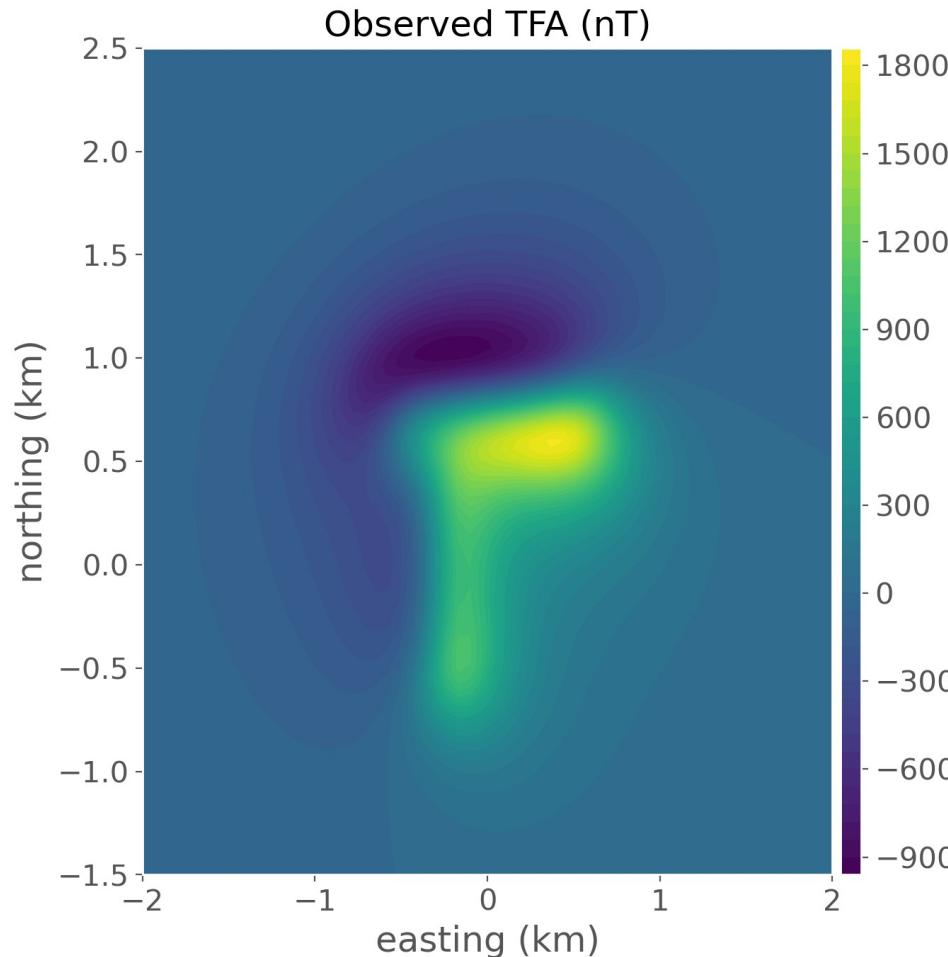
Direção das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (60^\circ, -30^\circ)$$

Dado sem ruído!

1. Distribuição positiva

Modelagem dos dados



Dado sem ruído!

Utilizo a técnica clássica, em que eu imponho uma direção de magnetização a camada, para estimar um conjunto de momentos magnéticos.

Direção do Campo principal
 $\hat{\mathbf{u}} = (40^\circ, -50^\circ)$

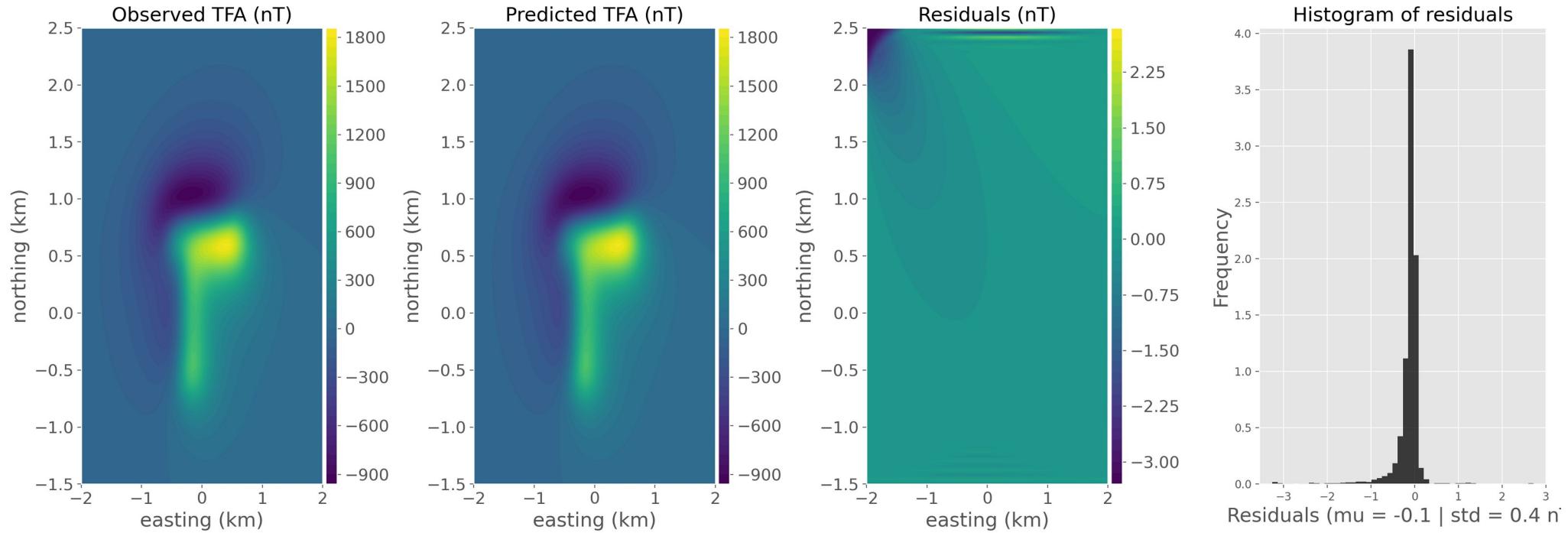
Direção das fontes
 $\hat{\mathbf{m}} = (60^\circ, -30^\circ)$

1. Distribuição positiva

Direção da Camada

$$\hat{\mathbf{t}} = (60^\circ, -30^\circ)$$

Ajuste dos dados

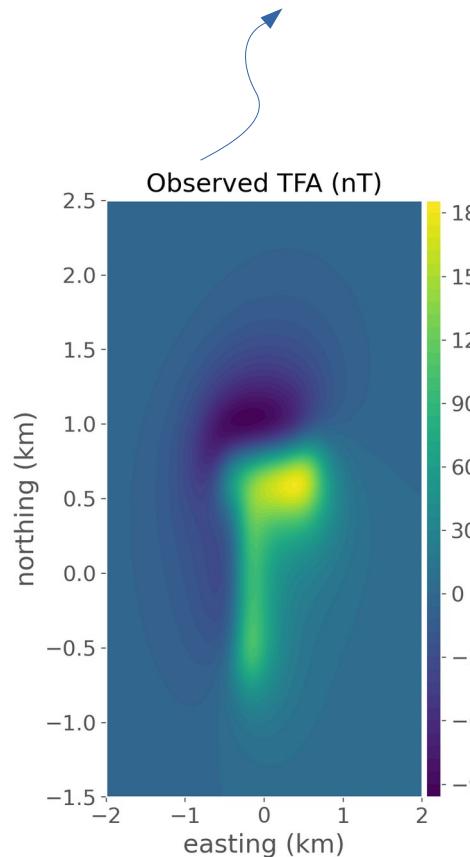


1. Distribuição positiva

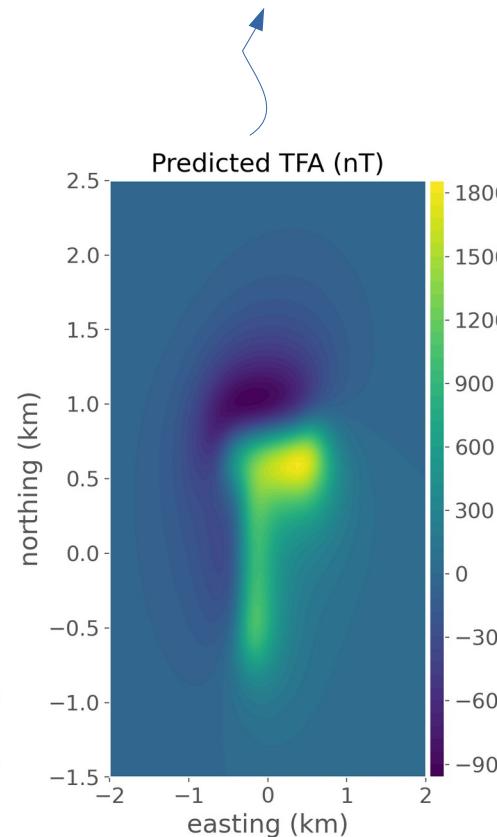
Direção da Camada

$$\hat{\mathbf{t}} = (60^\circ, -30^\circ)$$

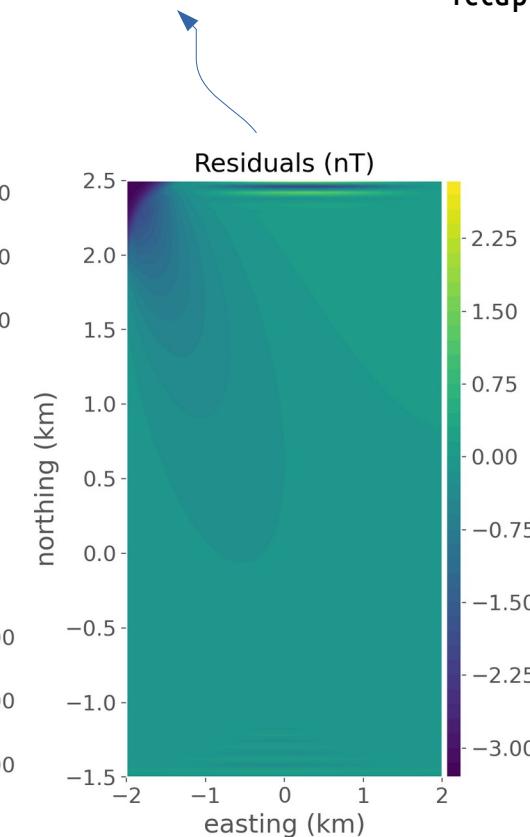
Dado gerado pelo modelo



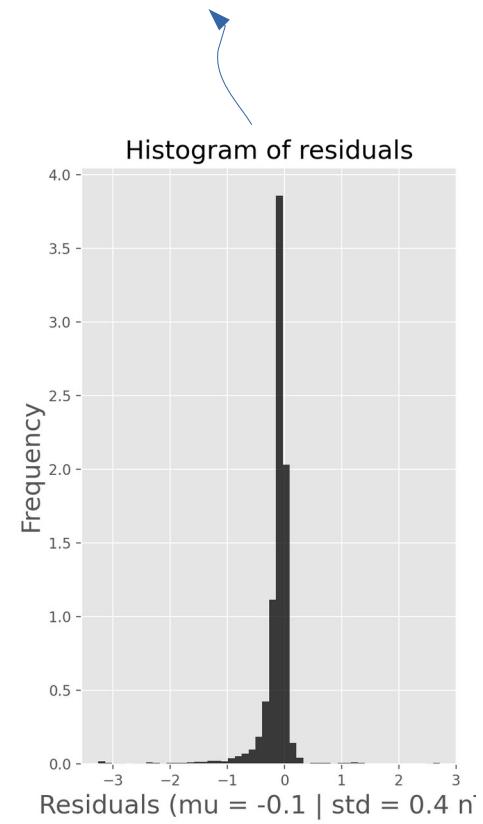
Dado gerado pela Camada Equivalente



Diferença entre os dados do modelo e da Camada



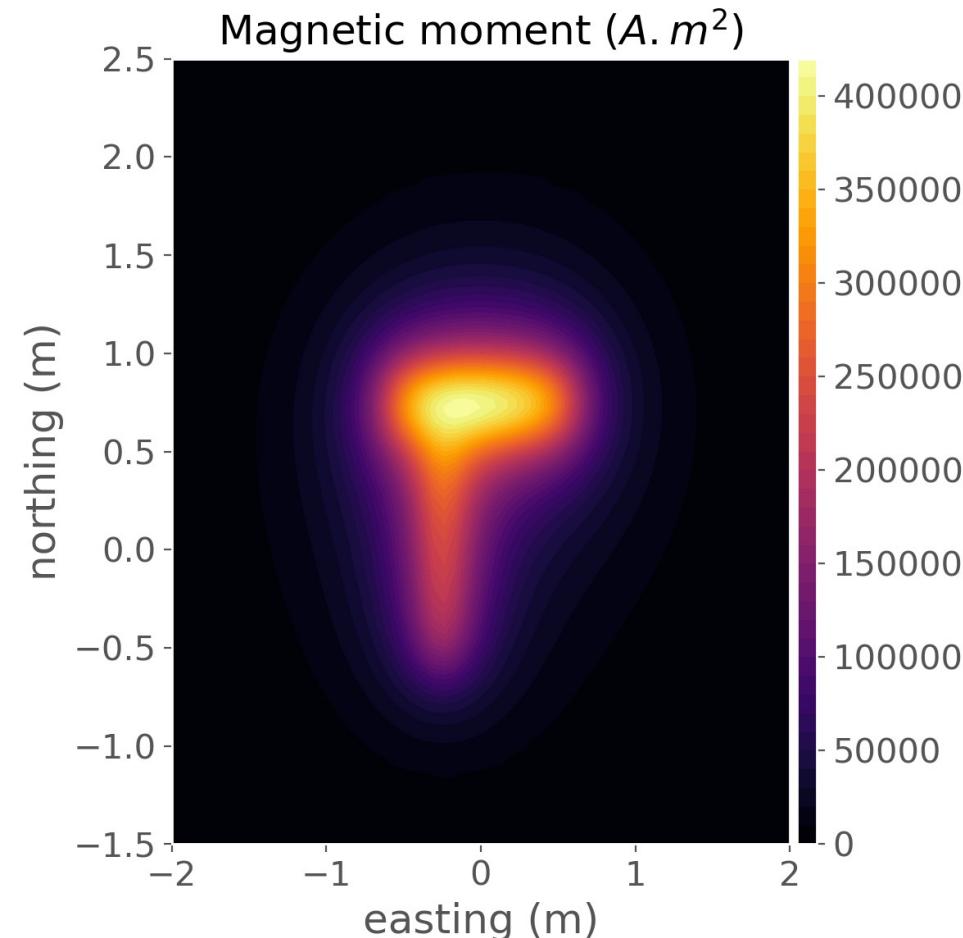
Mostra um bom ajuste do dados, o que quer dizer que a camada foi eficiente em recuperar o campo observado!



Ajuste dos dados

1. Distribuição positiva

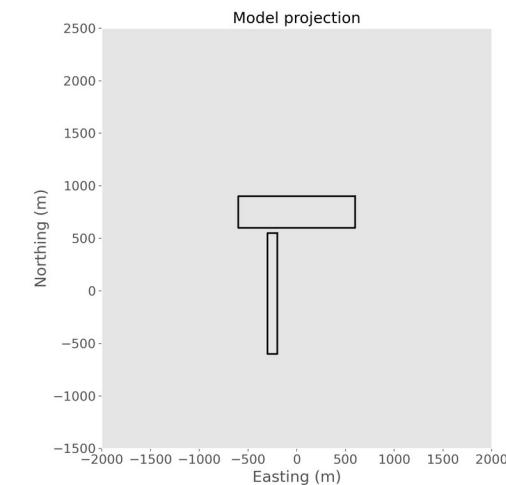
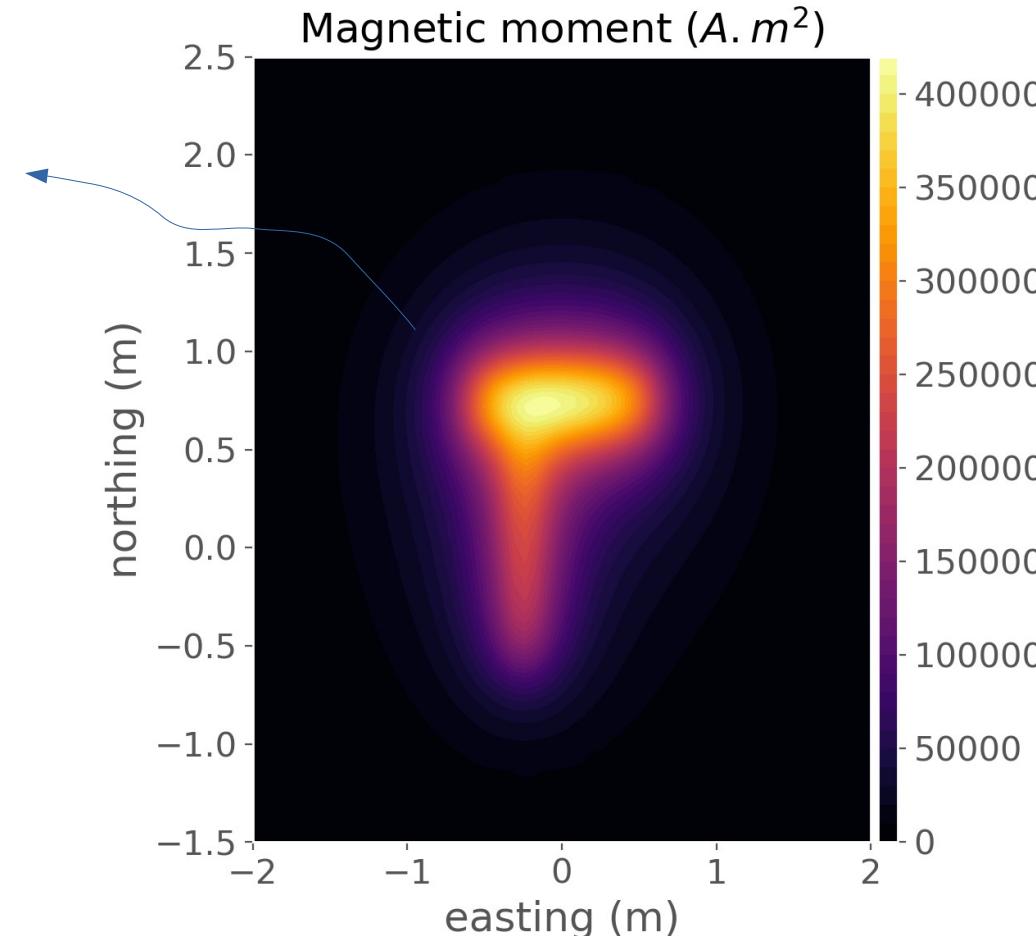
Distribuição de momentos estimada



1. Distribuição positiva

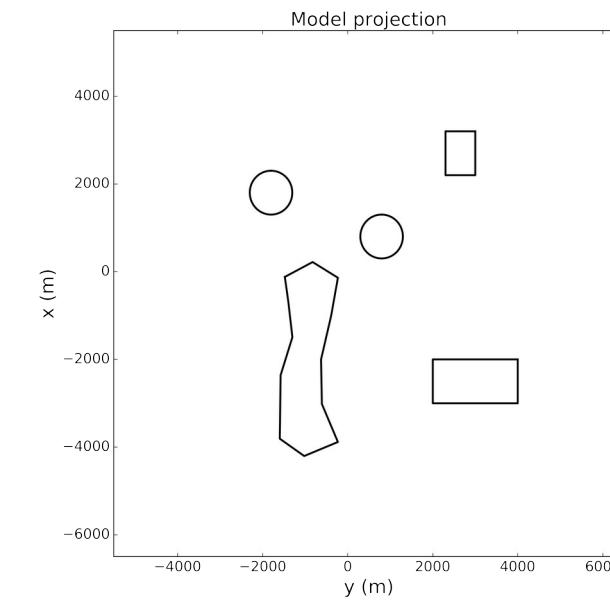
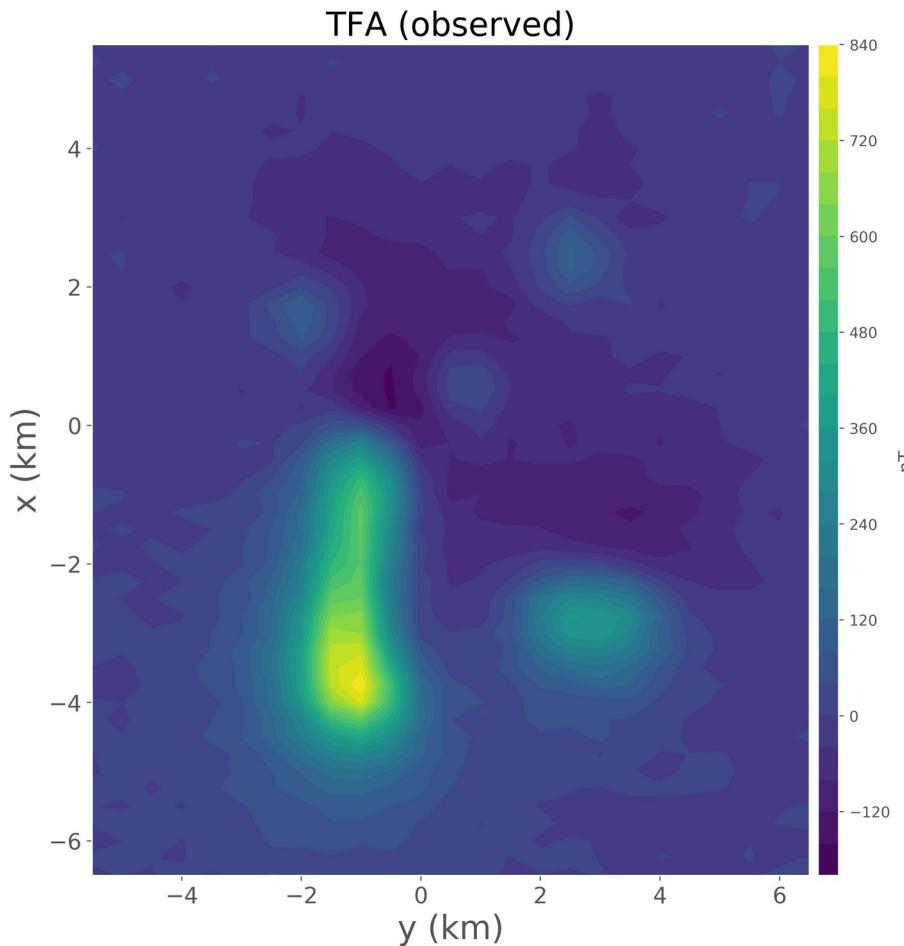
Distribuição de momentos magnéticos acima das fontes, o que pode ser o indicativo da projeção do corpo sobre a camada.

Distribuição de momentos estimada



2. Múltiplas fontes com mesma
direção de magnetização

Modelagem dos dados



Direção do Campo principal

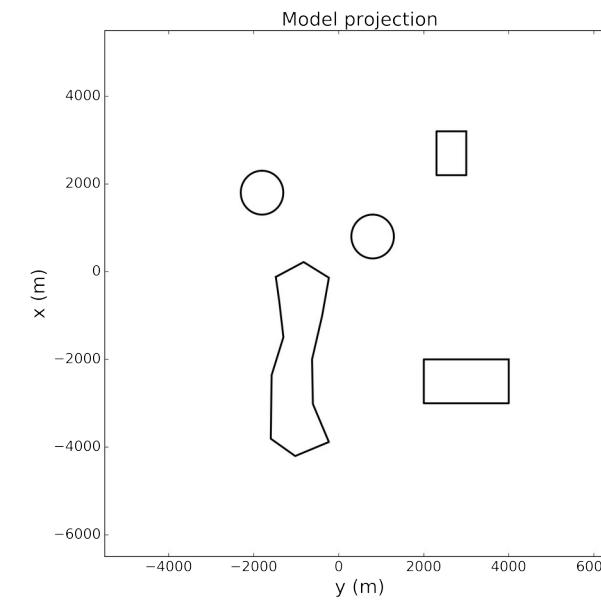
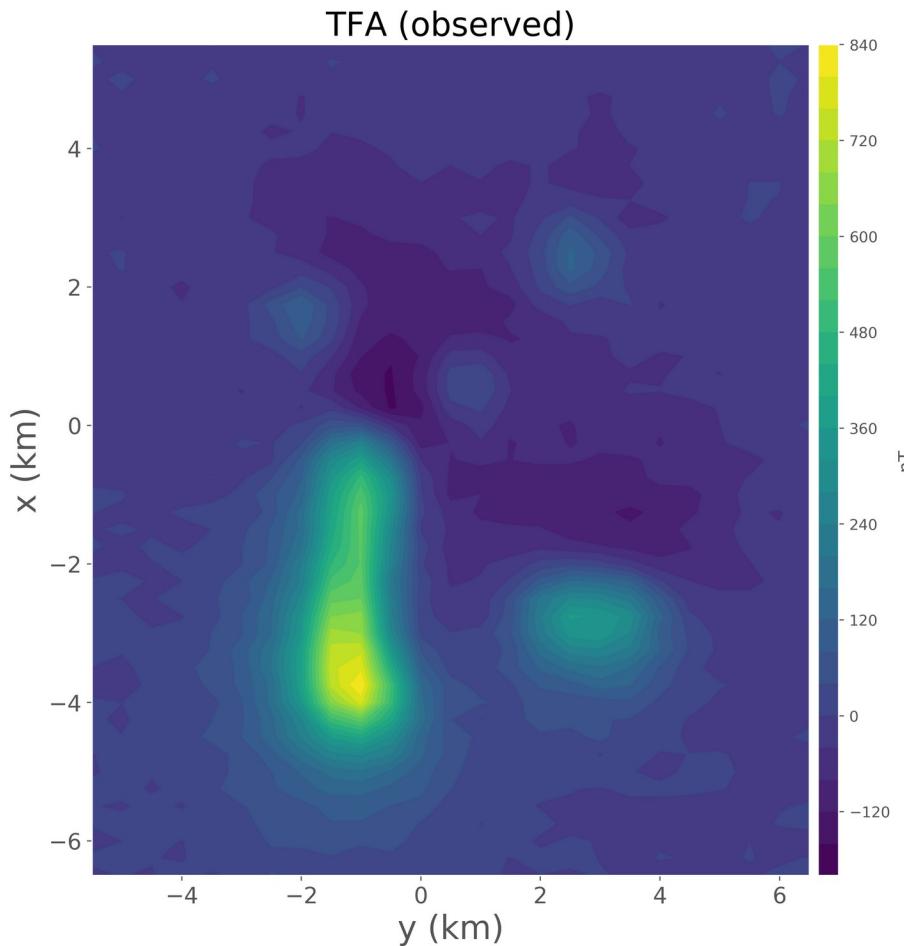
$$\hat{\mathbf{u}} = (-40^\circ, -22^\circ)$$

Direção das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Dado com ruído gaussiano!

Modelagem dos dados



Dado com ruído gaussiano!

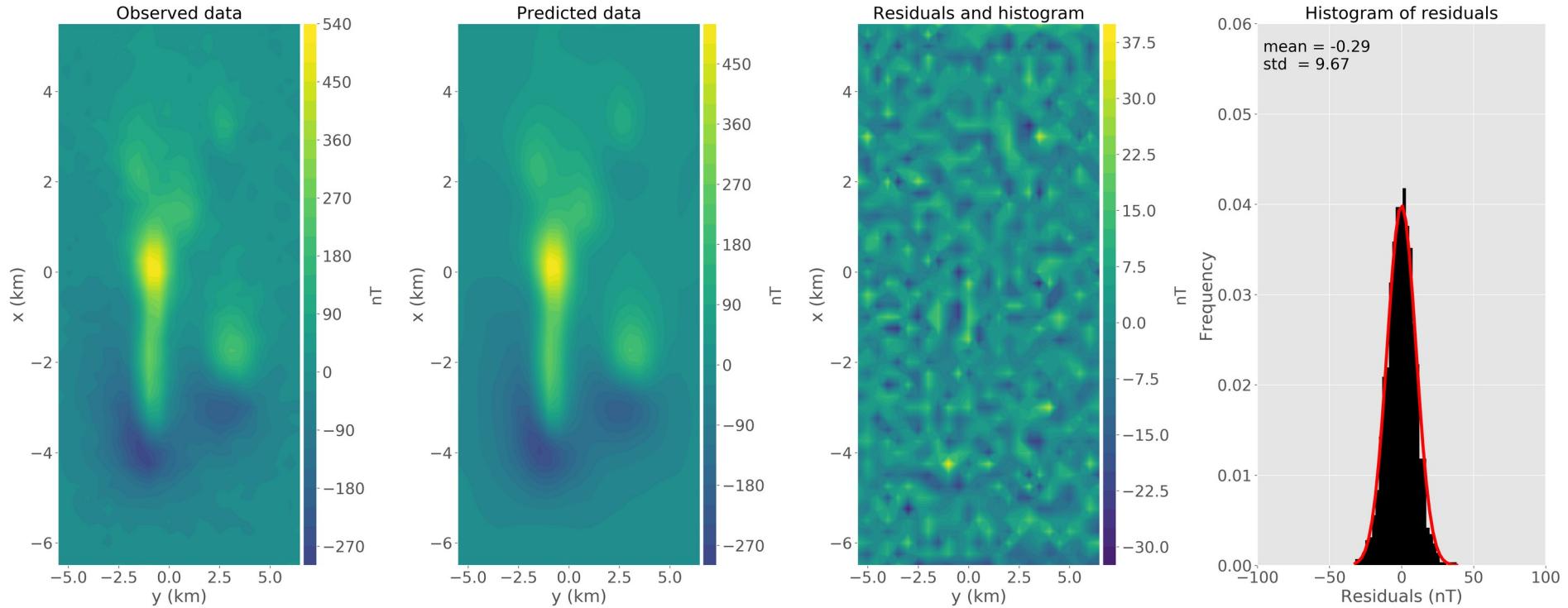
Direção do Campo principal
 $\hat{\mathbf{u}} = (-40^\circ, -22^\circ)$

Direção das fontes
 $\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$

Utilizo a camada com positividade em que estimo simultaneamente a direção de magnetização e a distribuição de momentos magnéticos

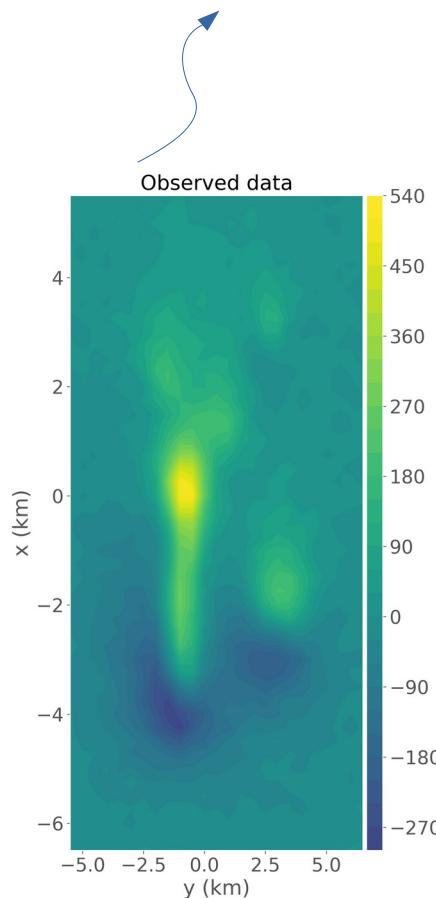
2. Múltiplas fontes

Ajuste dos dados

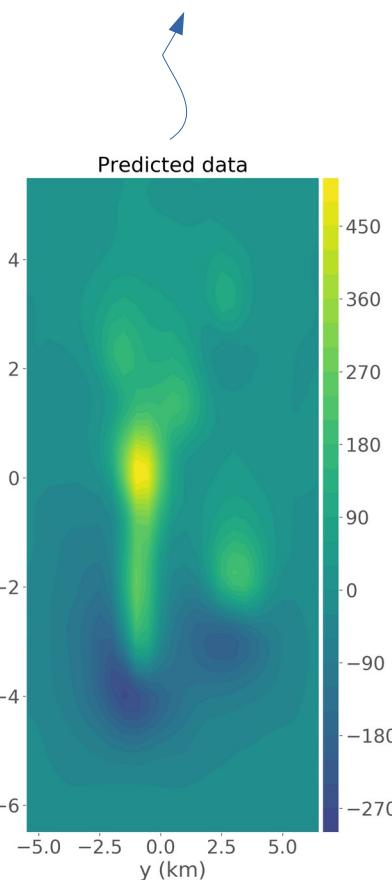


Ajuste dos dados

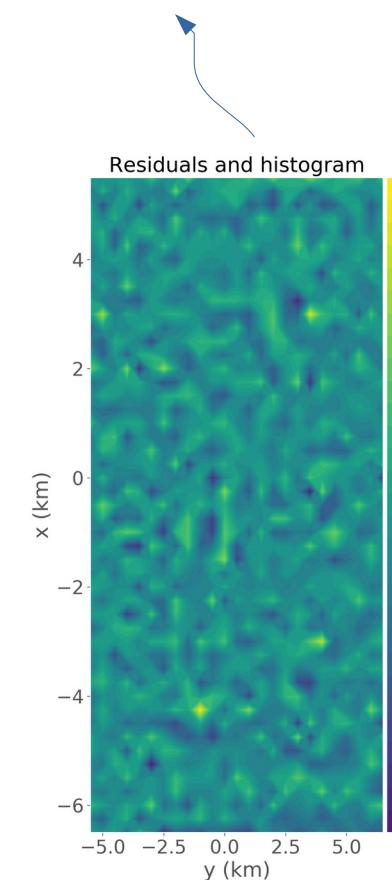
Dado gerado pelo modelo



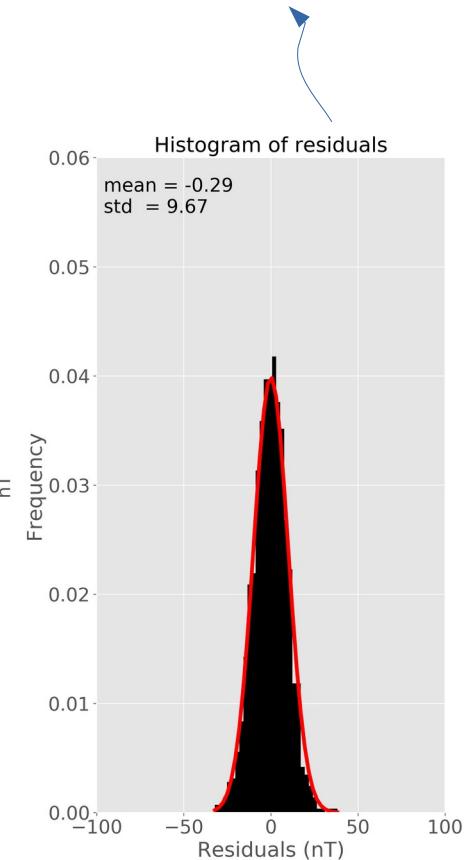
Dado gerado pela Camada Equivalente



Diferença entre os dados do modelo e da Camada



Mostra um bom ajuste do dados, o que quer dizer que a camada foi eficiente em recuperar o campo observado!



2. Múltiplas fontes

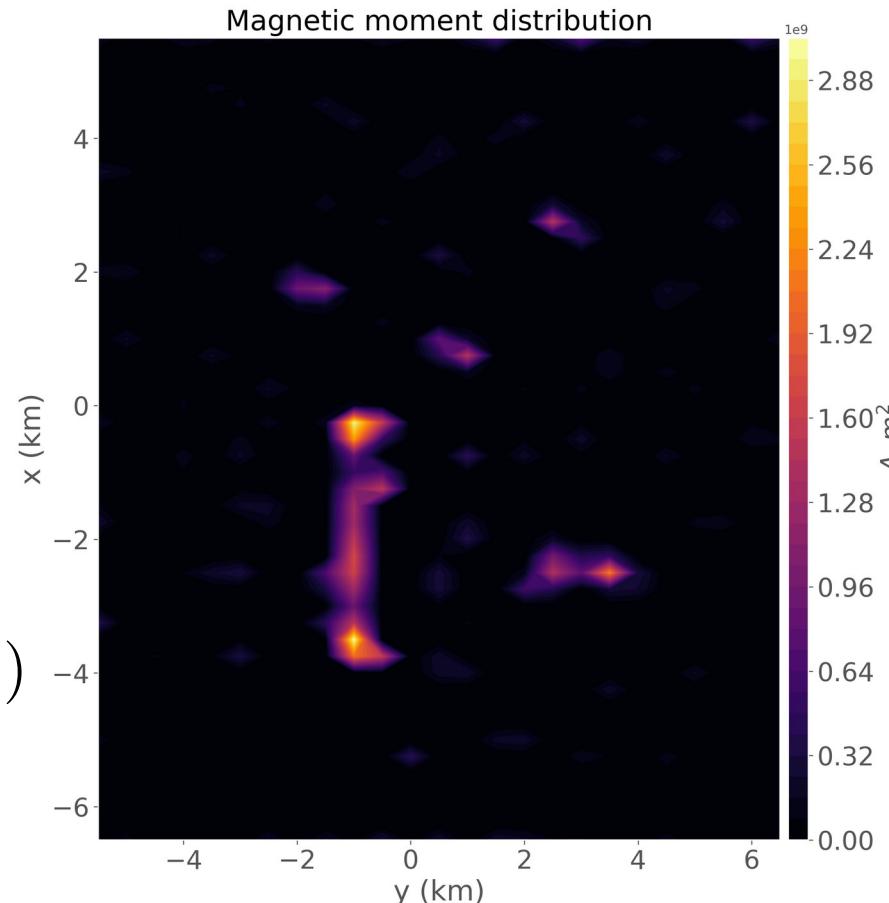
Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada

Direção verdadeira das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-28, 7^\circ, 31, 7^\circ)$$



2. Múltiplas fontes

Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada

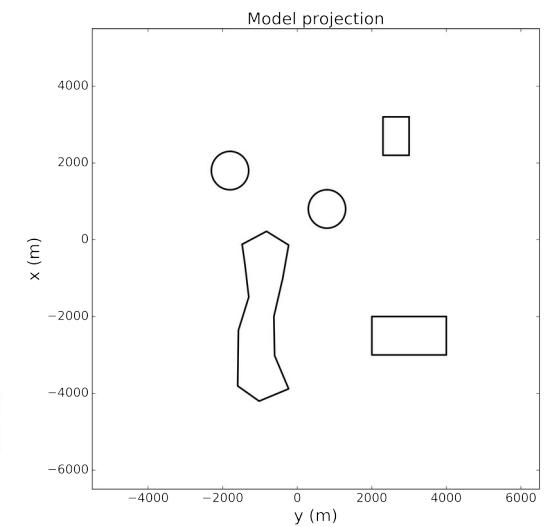
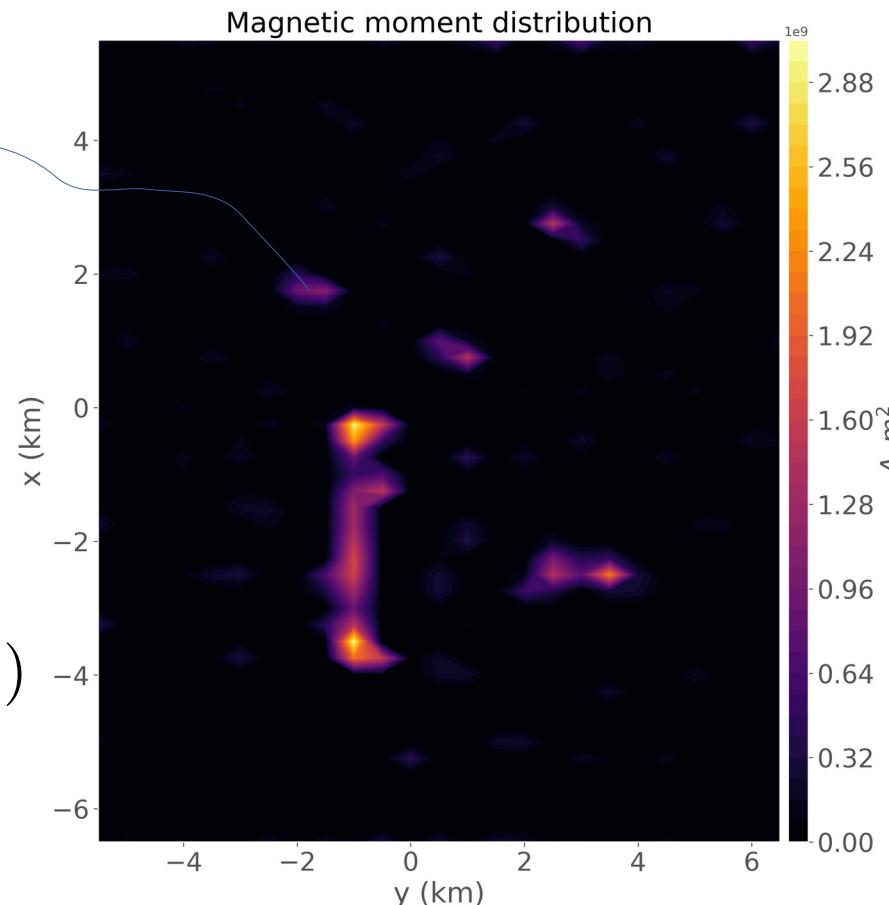
Distribuição de momentos magnéticos acima das fontes, o que pode ser o indicativo da projeção do corpo sobre a camada.

Direção verdadeira das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Direção estimada pela camada

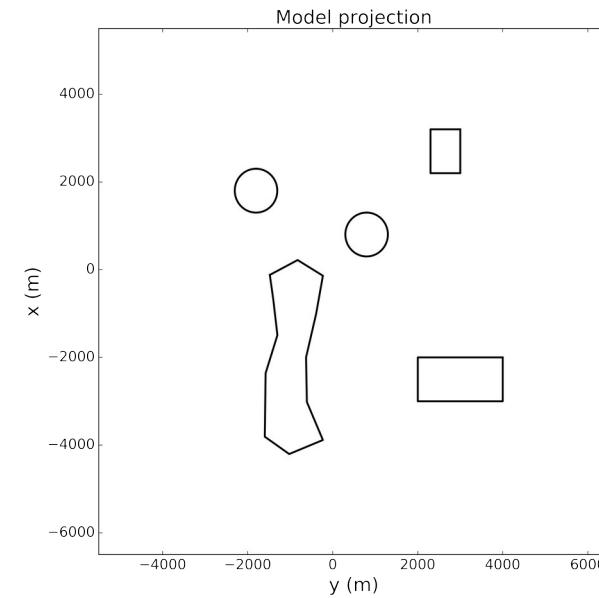
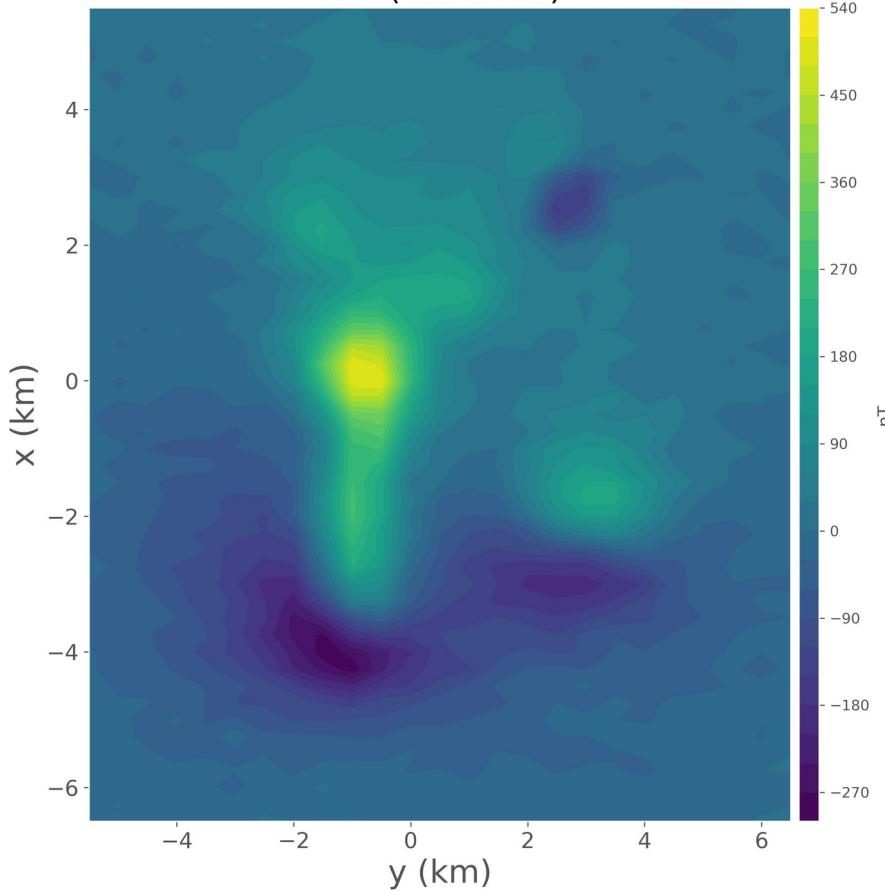
$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-28, 7^\circ, 31, 7^\circ)$$



3. Múltiplas fontes com uma direção de magnetização diferente

Modelagem dos dados

TFA (observed)



Direção do Campo principal

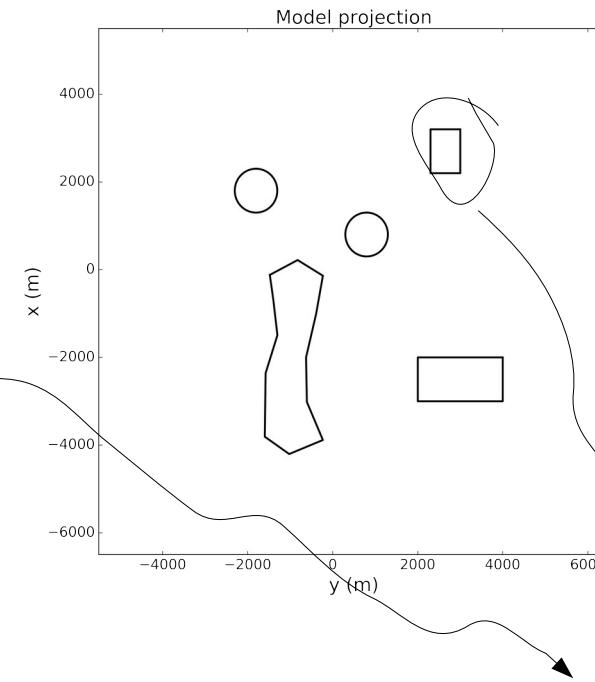
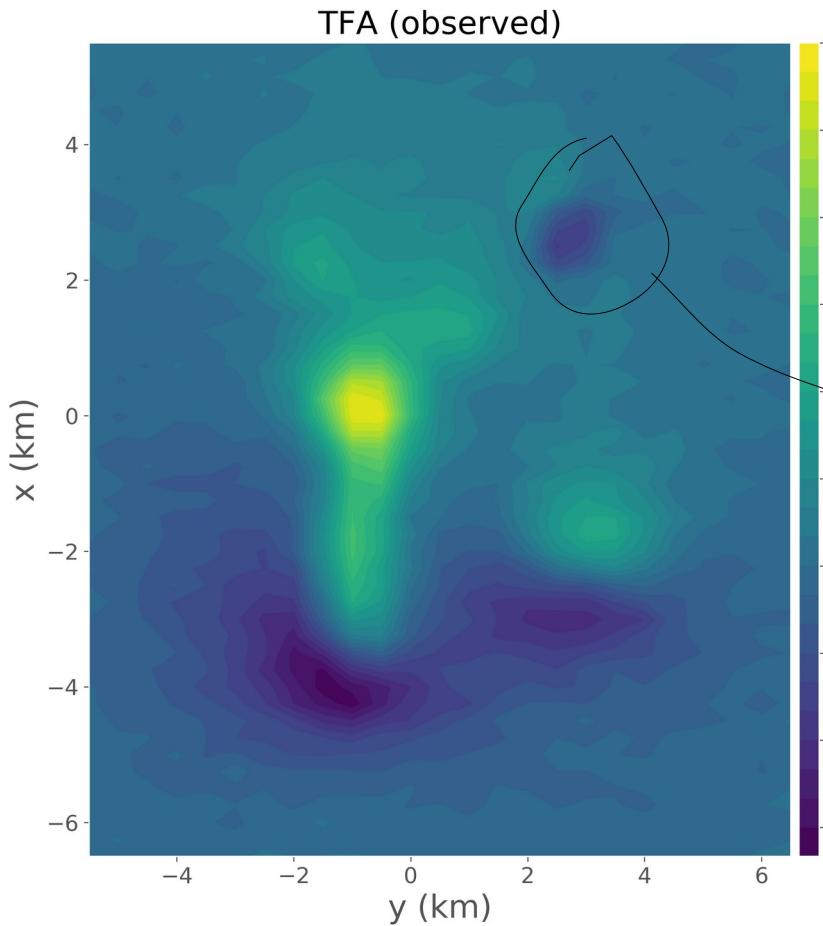
$$\hat{\mathbf{u}} = (-40^\circ, -22^\circ)$$

Direção das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Dado com ruído gaussiano!

Modelagem dos dados



Dado com ruído gaussiano!

Direção de magnetização
diferente das demais!

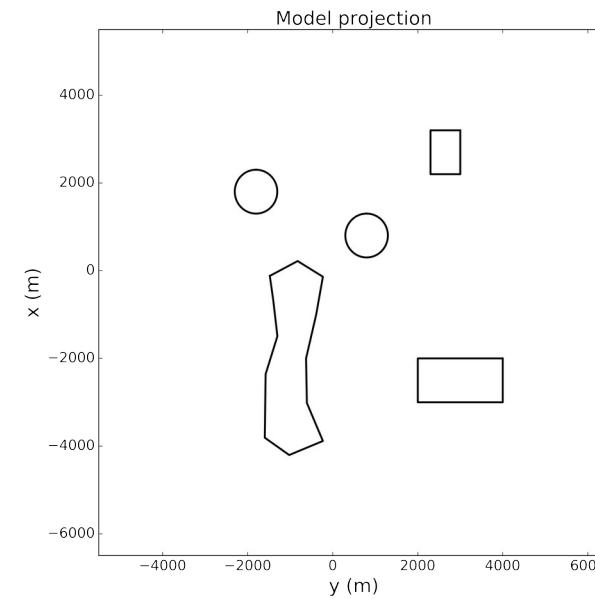
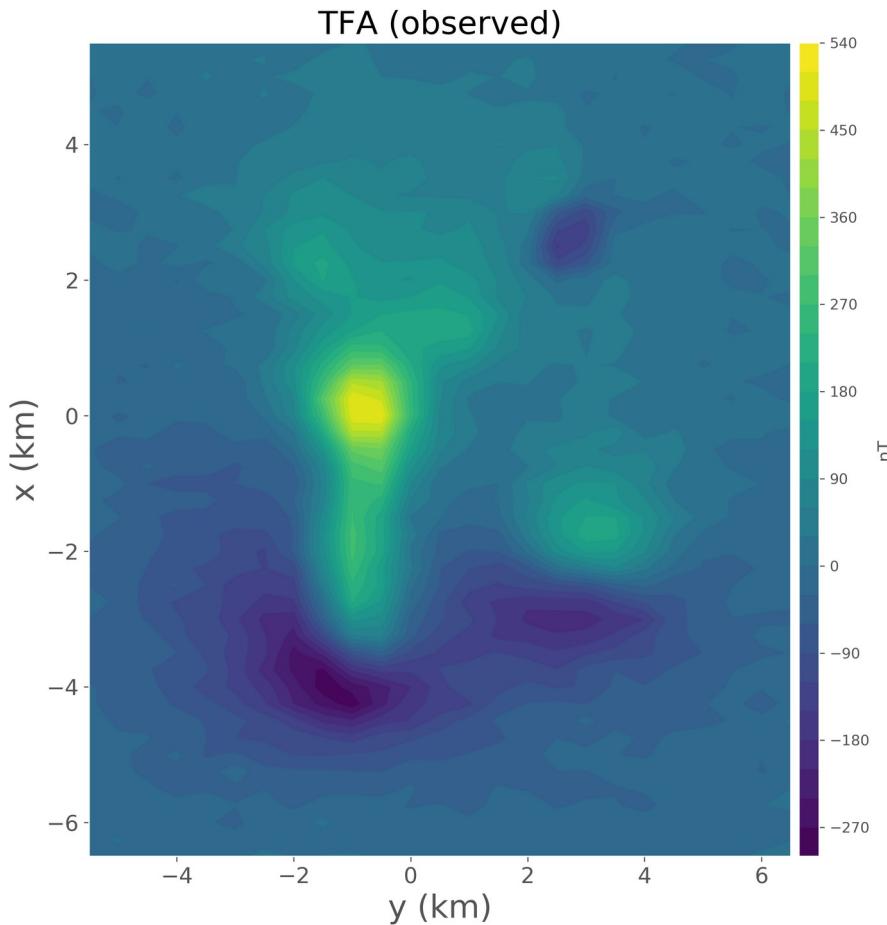
Direção do Campo principal

$$\hat{\mathbf{u}} = (-40^\circ, -22^\circ)$$

Direção das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Modelagem dos dados



Dado com ruído gaussiano!

Utilizo a camada com positividade em que estimo simultaneamente a direção de magnetização e a distribuição de momentos magnéticos

Direção do Campo principal

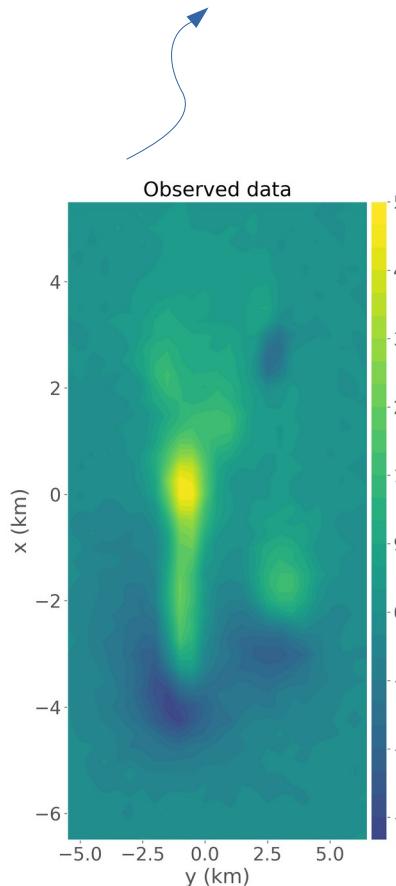
$$\hat{\mathbf{u}} = (-40^\circ, -22^\circ)$$

Direção das fontes

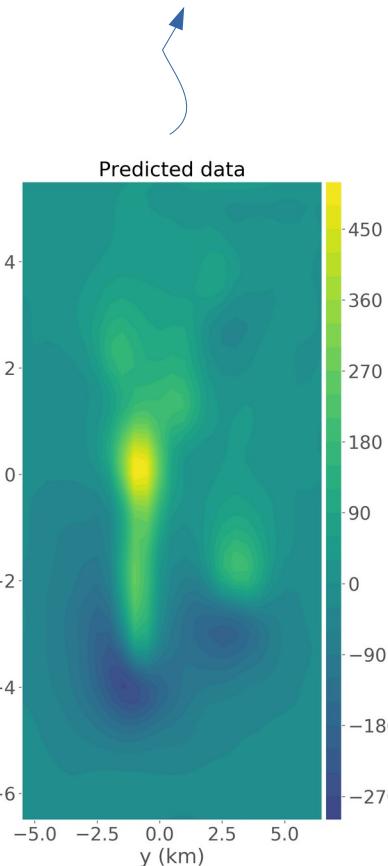
$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Ajuste dos dados

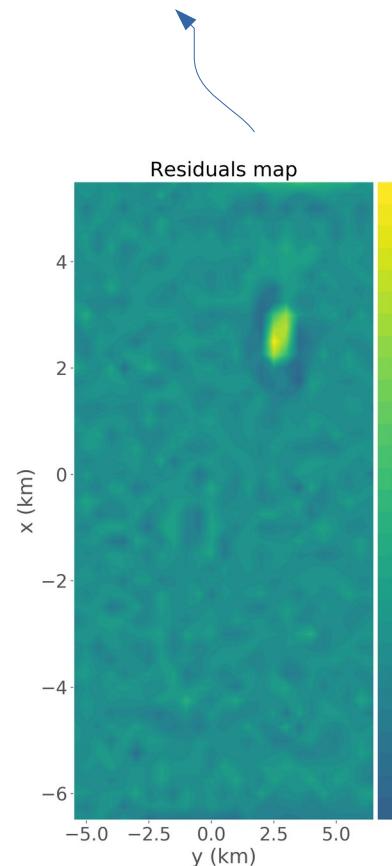
Dado gerado pelo modelo



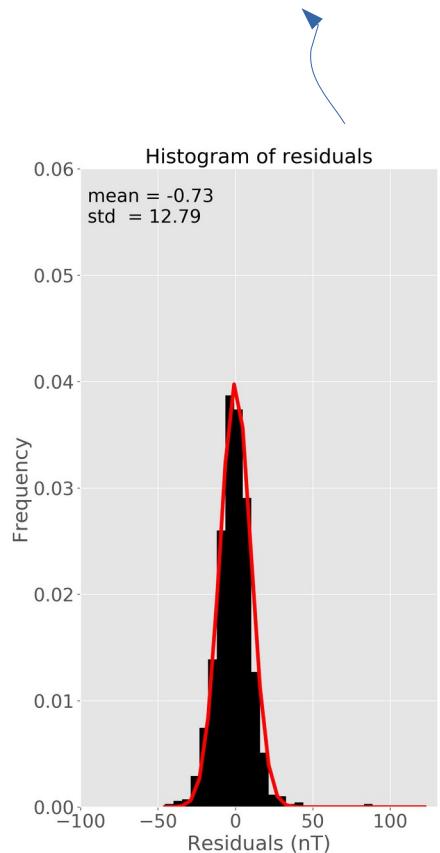
Dado gerado pela Camada Equivalente



Diferença entre os dados do modelo e da Camada

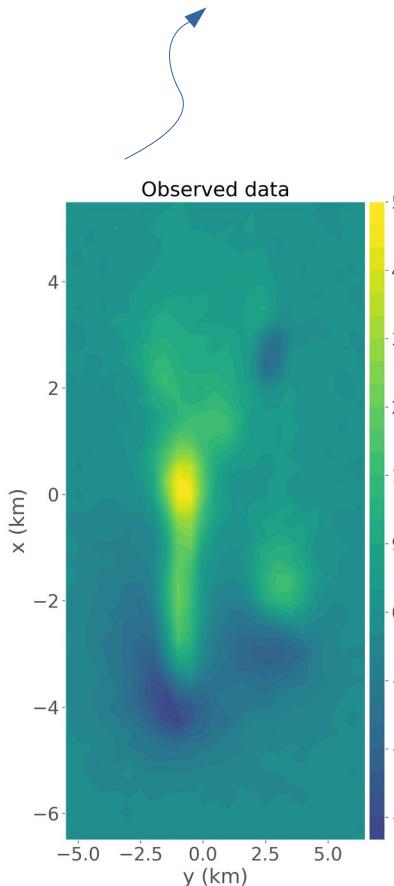


Mostra um bom ajuste do dados, o que quer dizer que a camada foi eficiente em recuperar o campo observado!

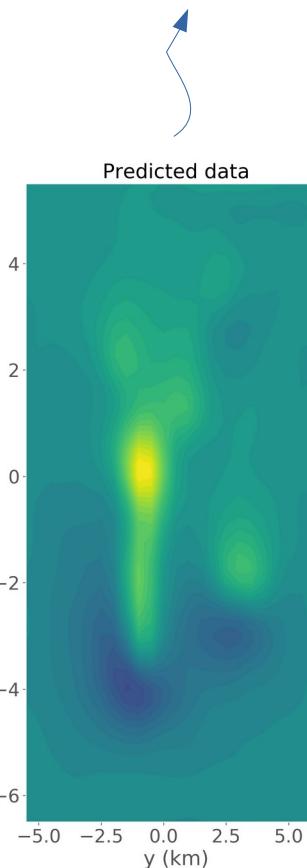


Ajuste dos dados

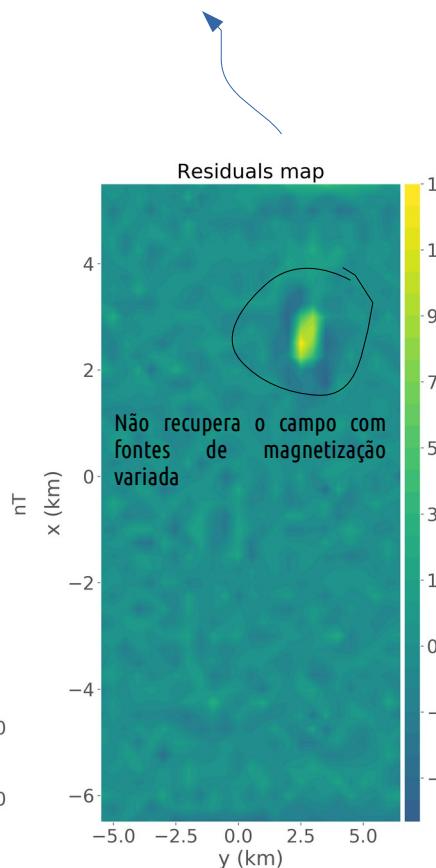
Dado gerado pelo modelo



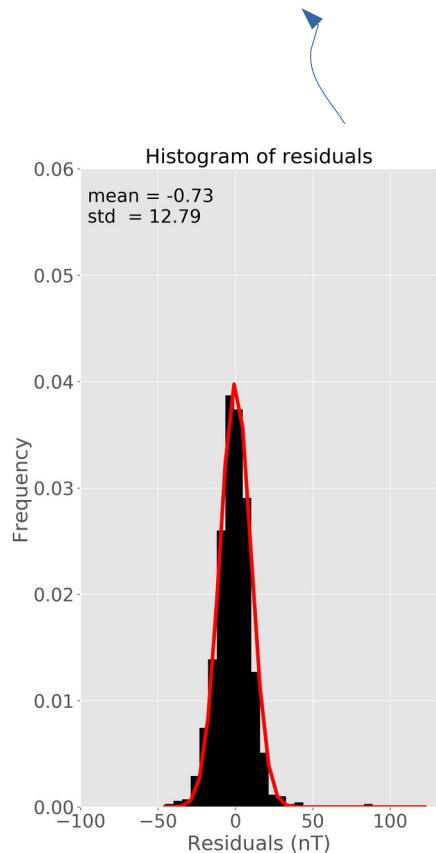
Dado gerado pela Camada Equivalente



Diferença entre os dados do modelo e da Camada

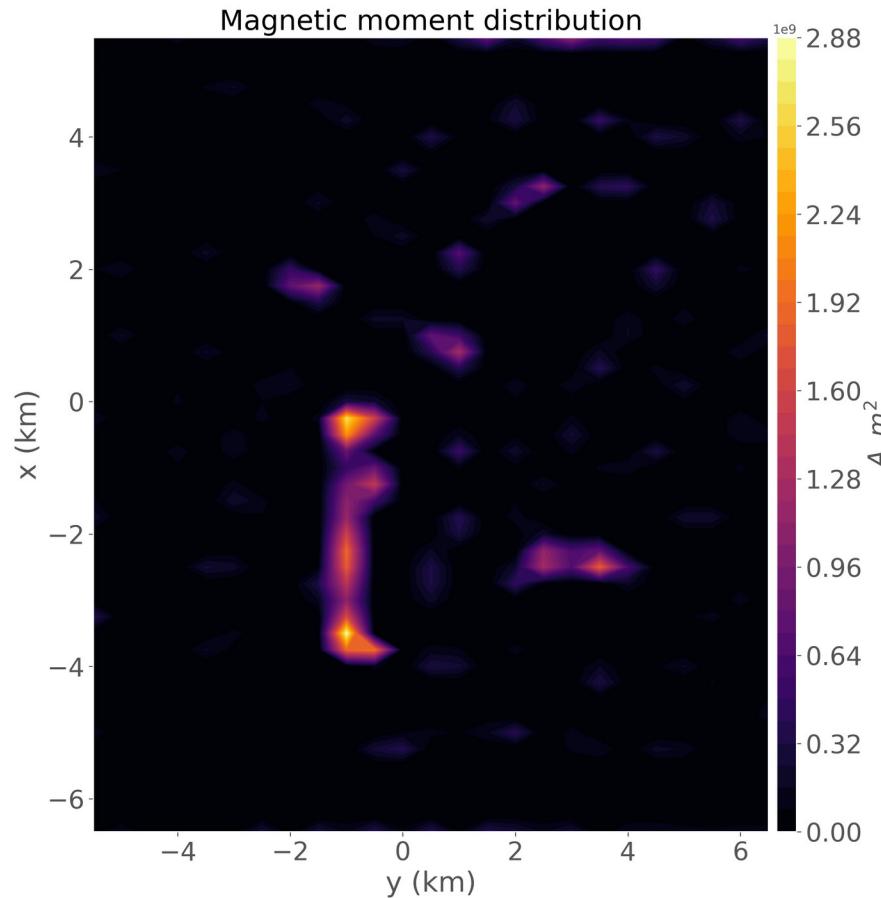


Mostra um bom ajuste do dados, o que quer dizer que a camada foi eficiente em recuperar o campo observado!



3. Múltiplas fontes

Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada



Direção verdadeira das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-30, 4^\circ, 27, 6^\circ)$$

3. Múltiplas fontes

Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada

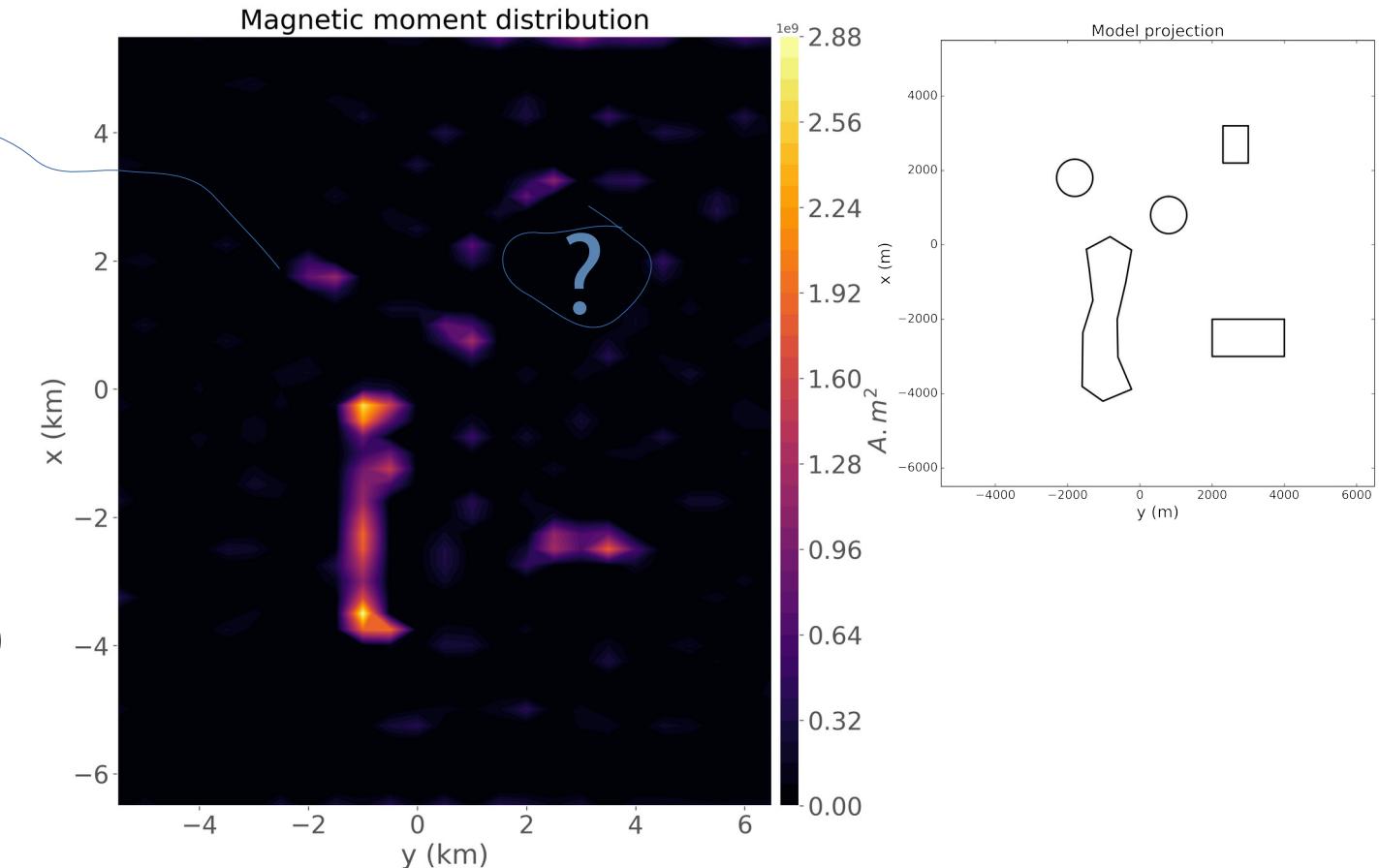
Distribuição de momentos magnéticos acima das fontes, o que pode ser o indicativo da projeção do corpo sobre a camada.

Direção verdadeira das fontes

$$\hat{\mathbf{m}} = (-25^\circ, 30^\circ)$$

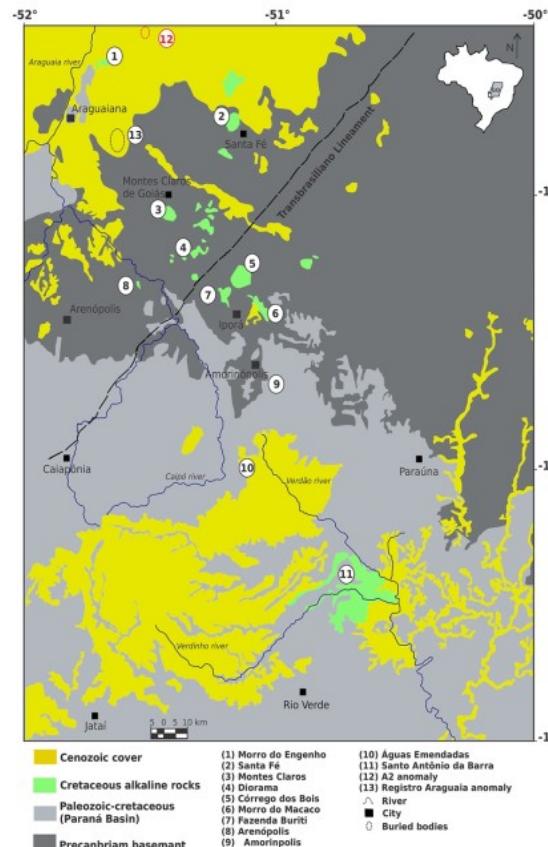
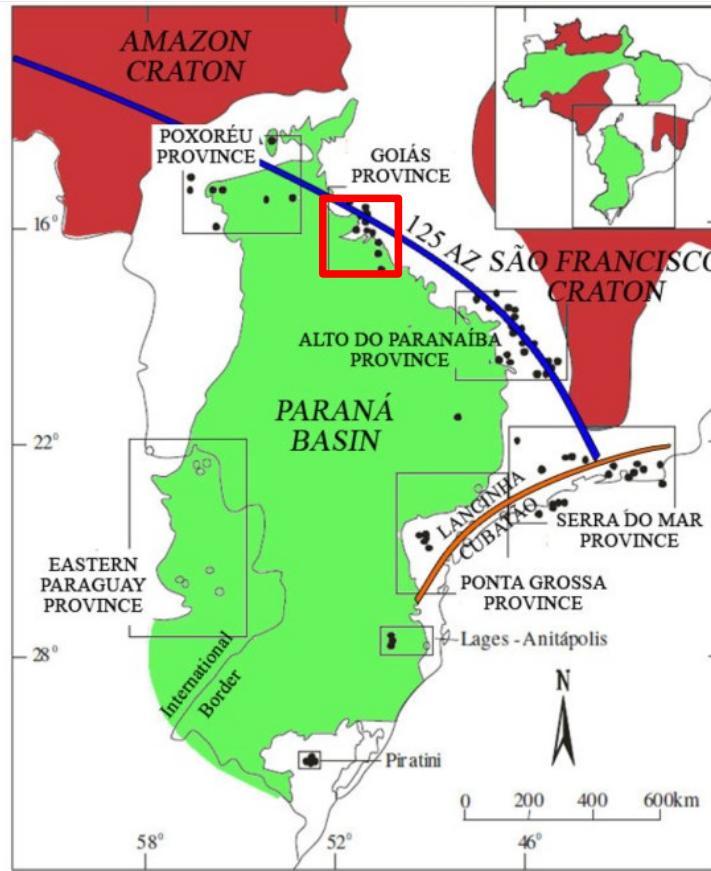
Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-30, 4^\circ, 27, 6^\circ)$$



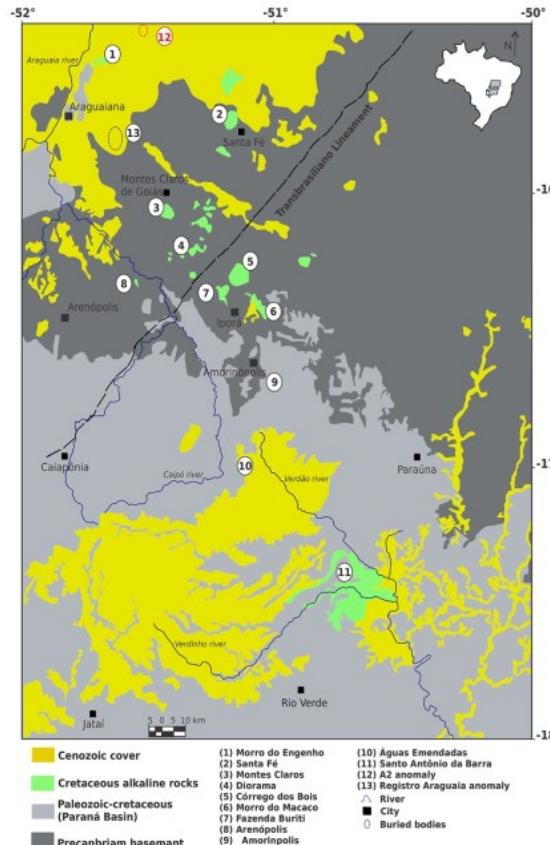
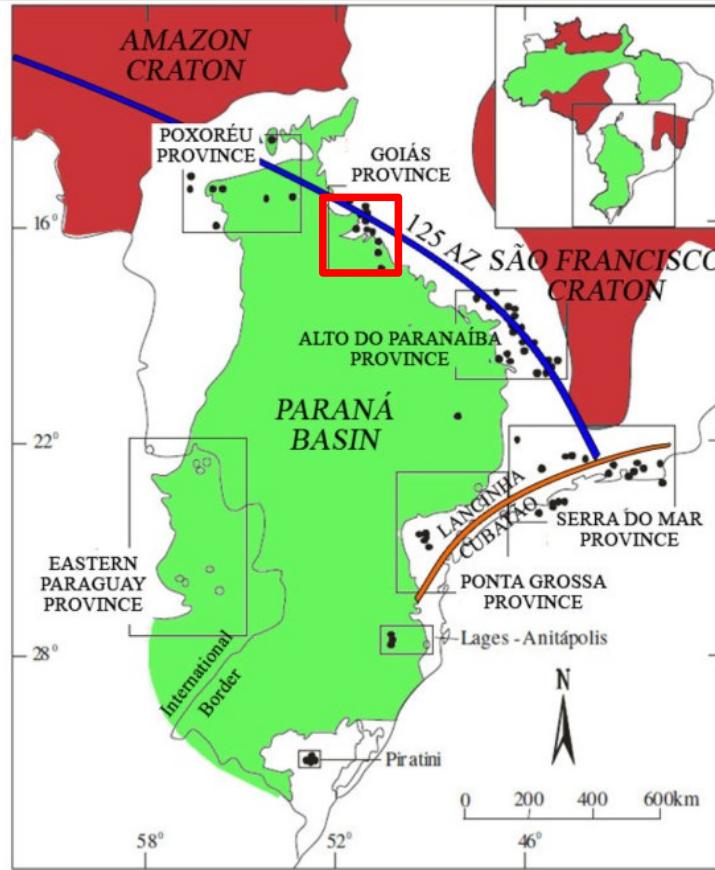
4. Dados magnéticos de Montes Claros de Goiás, GO, Brasil

Sobre a Província Alcalina de Goiás (PAGO)



A Província Alcalina de Goiás (PAGO), localizada na porção norte da região que margeia a Bacia do Paraná, é resultado de um intenso magmatismo alcalino na região no final do Cretáceo. A PAGO é composta por corpos plutônicos máficos e ultramáficos a Norte, intrusões alcalinas subvulcânicas na região Central e a sul por fluxos de lava extrusivos.

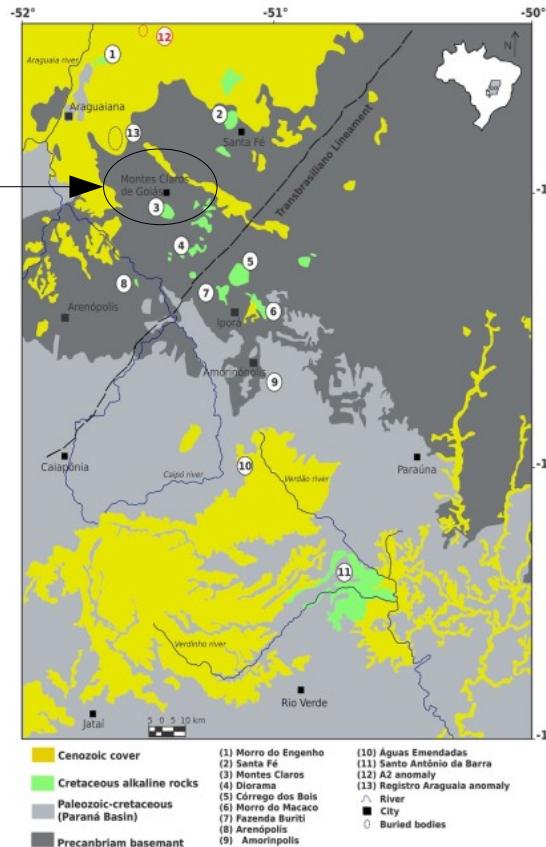
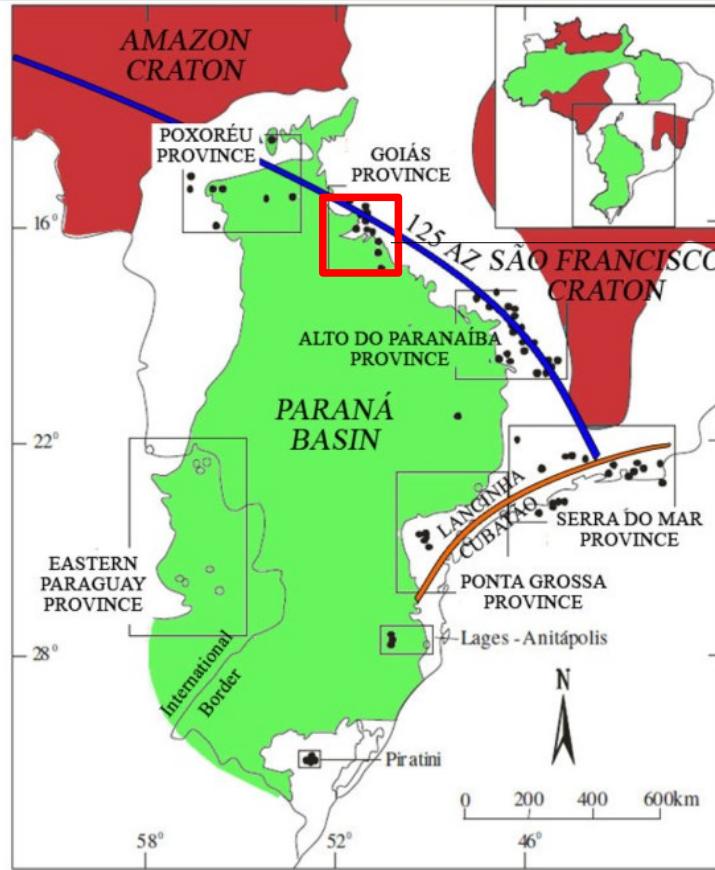
Sobre a Província Alcalina de Goiás (PAGO)



A Província Alcalina de Goiás (PAGO), localizada na porção norte da região que margeia a Bacia do Paraná, é resultado de um intenso magmatismo alcalino na região no final do Cretáceo. A PAGO é composta por corpos plutônicos máficos e ultramáficos a Norte, intrusões alcalinas subvulcânicas na região Central e a sul por fluxos de lava extrusivos.

Formada, principalmente, pelos complexos: Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros, Diorama, Córrego dos bois, Morro do Macaco, Fazenda Buriti, Arenópolis, Amorinópolis, Águas Emendadas, Santo Antônio da Barra, Registro do Araguaia, Anomalia A2.

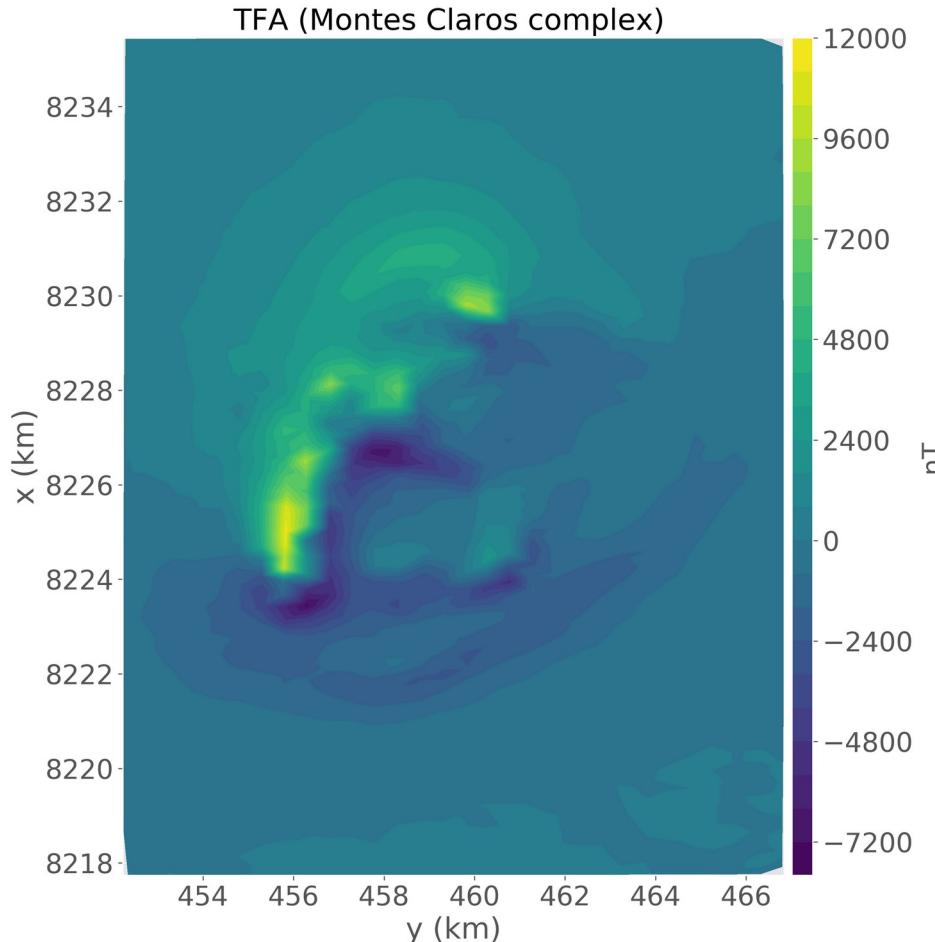
Sobre a Província Alcalina de Goiás (PAGO)



A Província Alcalina de Goiás (PAGO), localizada na porção norte da região que margeia a Bacia do Paraná, é resultado de um intenso magmatismo alcalino na região no final do Cretáceo. A PAGO é composta por corpos plutônicos máficos e ultramáficos a Norte, intrusões alcalinas subvulcânicas na região Central e a sul por fluxos de lava extrusivos.

Formada, principalmente, pelos complexos: Morro do Engenho, Santa Fé, **Montes Claros**, Diorama, Córrego dos bois, Morro do Macaco, Fazenda Buriti, Arenópolis, Amorinópolis, Águas Emendadas, Santo Antônio da Barra, Registro do Araguaia, Anomalia A2.

Os dados de Anomalia de Campo Total



Os dados magnéticos públicos de aerolevantamentos que foram obtidos em 2004 e disponibilizados pela série 1000 da CPRM .

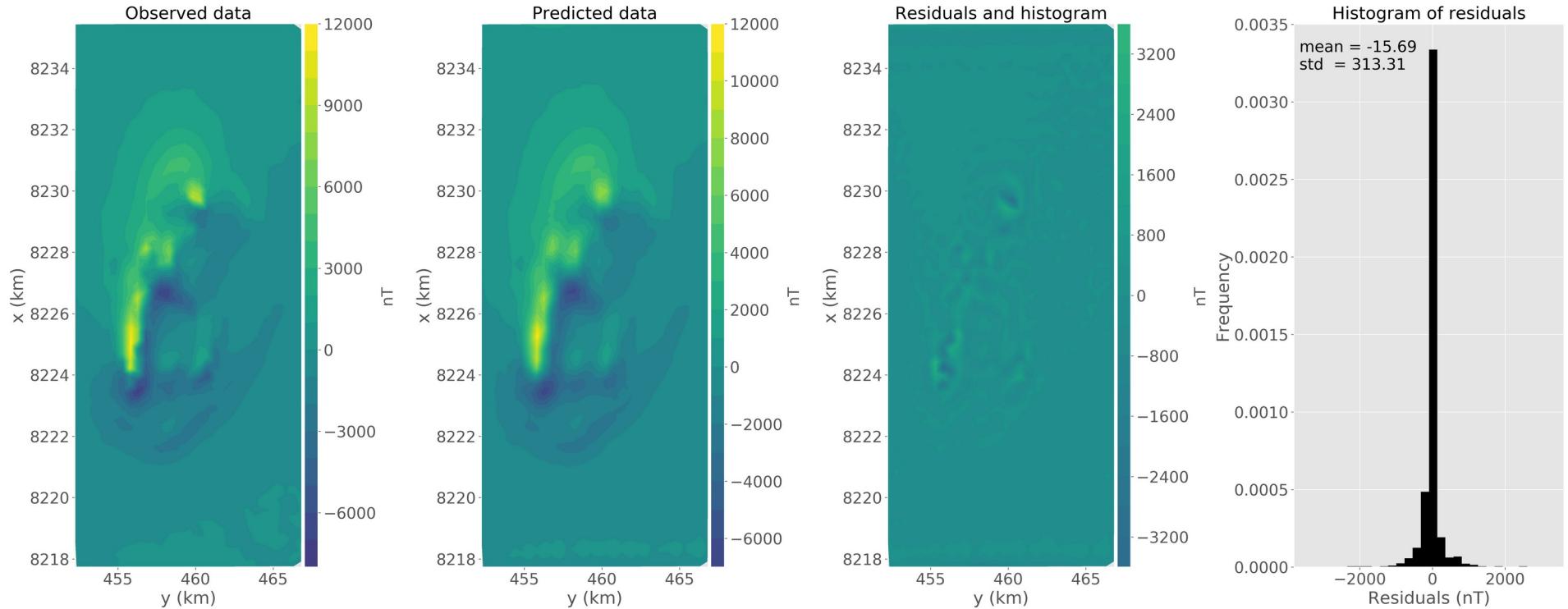
A região é marcada por anomalias de alta amplitude, o que indicam uma marcante presença de componente remanente na magnetização.

**Direção do Campo principal
(na época do levantamento)**

$$\hat{\mathbf{u}} = (-19, 5^\circ, -18, 5^\circ)$$

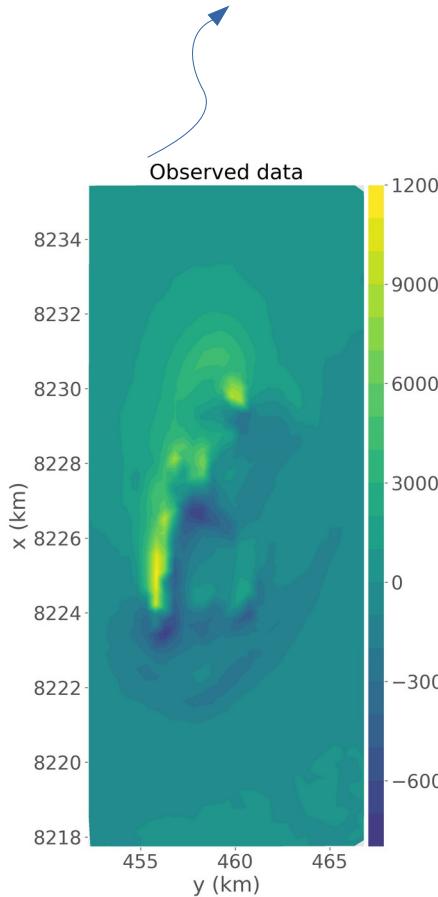
(Dutra et al, 2014; Oliveira Jr et al, 2015; Zhang et al, 2018; Gonzalez et al, 2022)

Ajuste dos dados

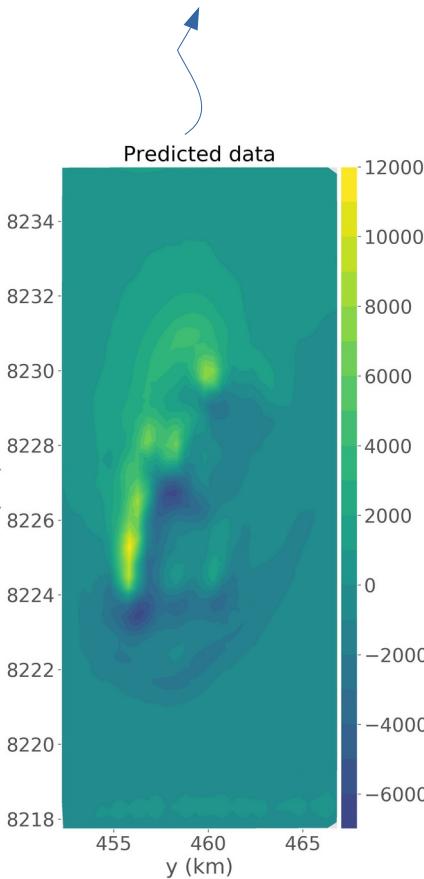


Ajuste dos dados

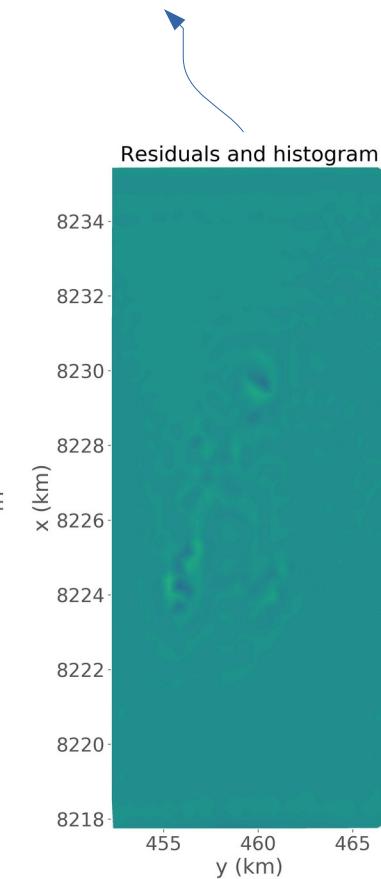
Dado magnético do aerolevantamento



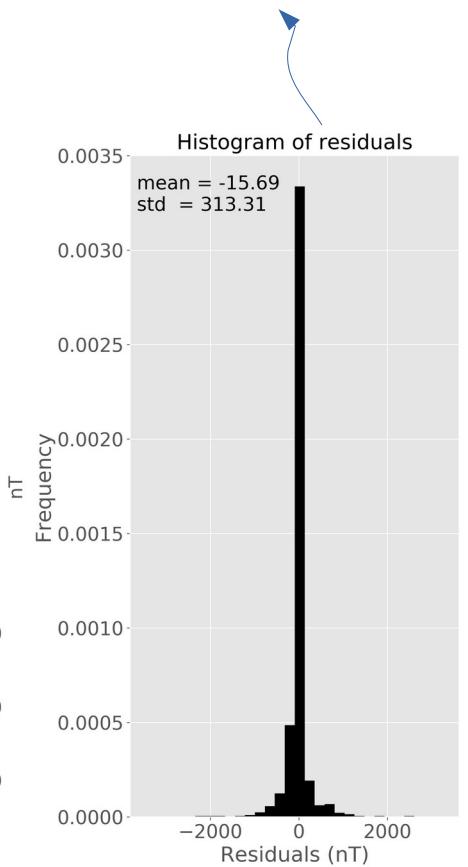
Dado gerado pela Camada Equivalente



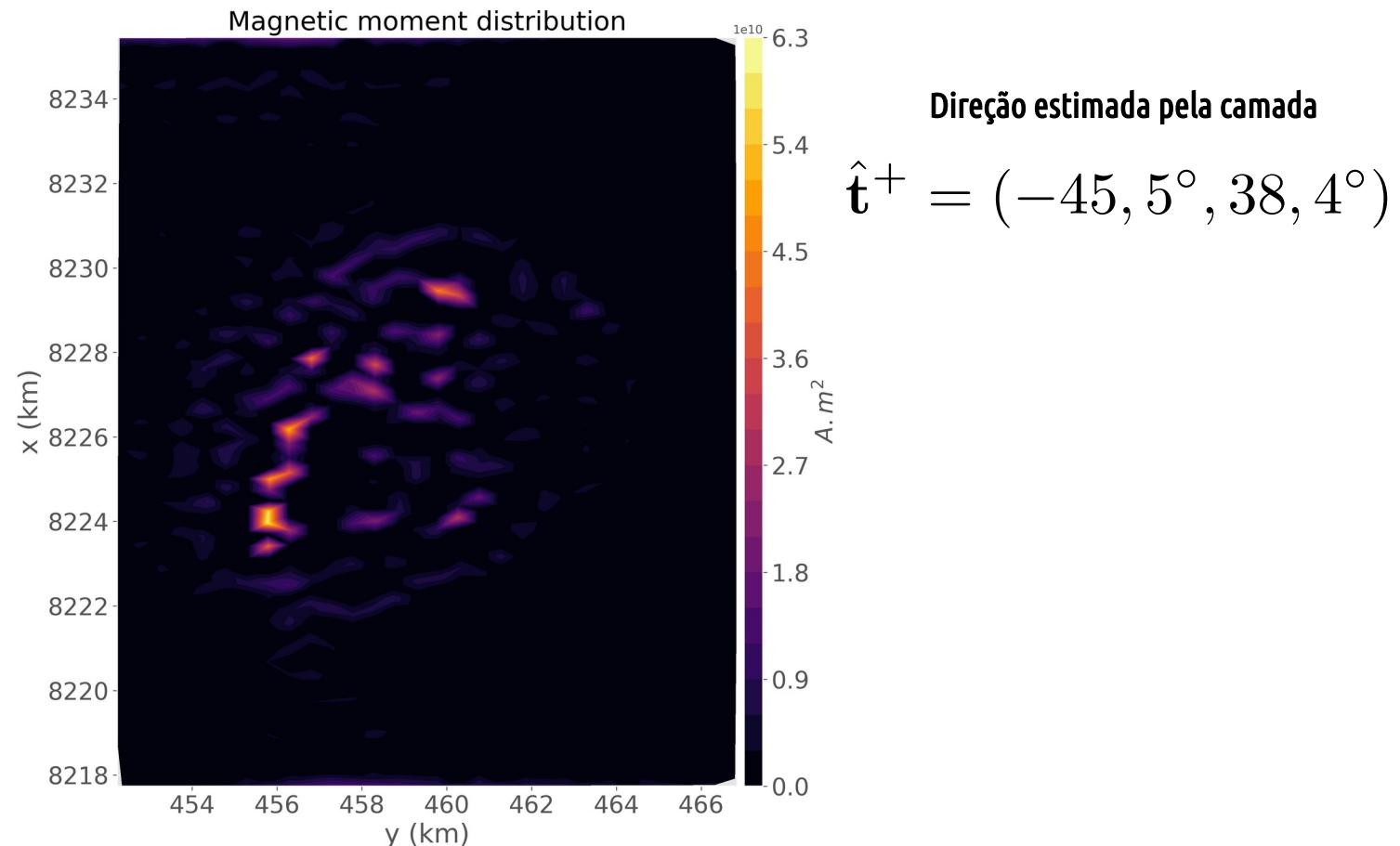
Diferença entre os dados do modelo e da Camada



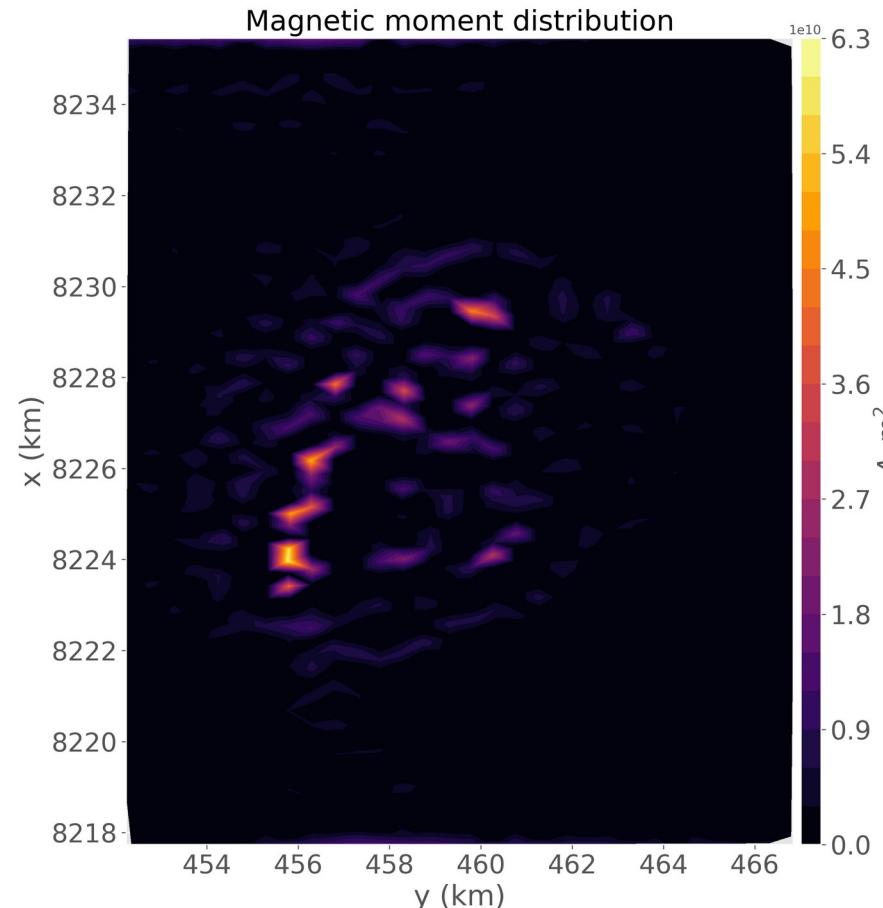
Mostra um bom ajuste do dados, o que quer dizer que a camada foi eficiente em recuperar o campo observado!



Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada



Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada



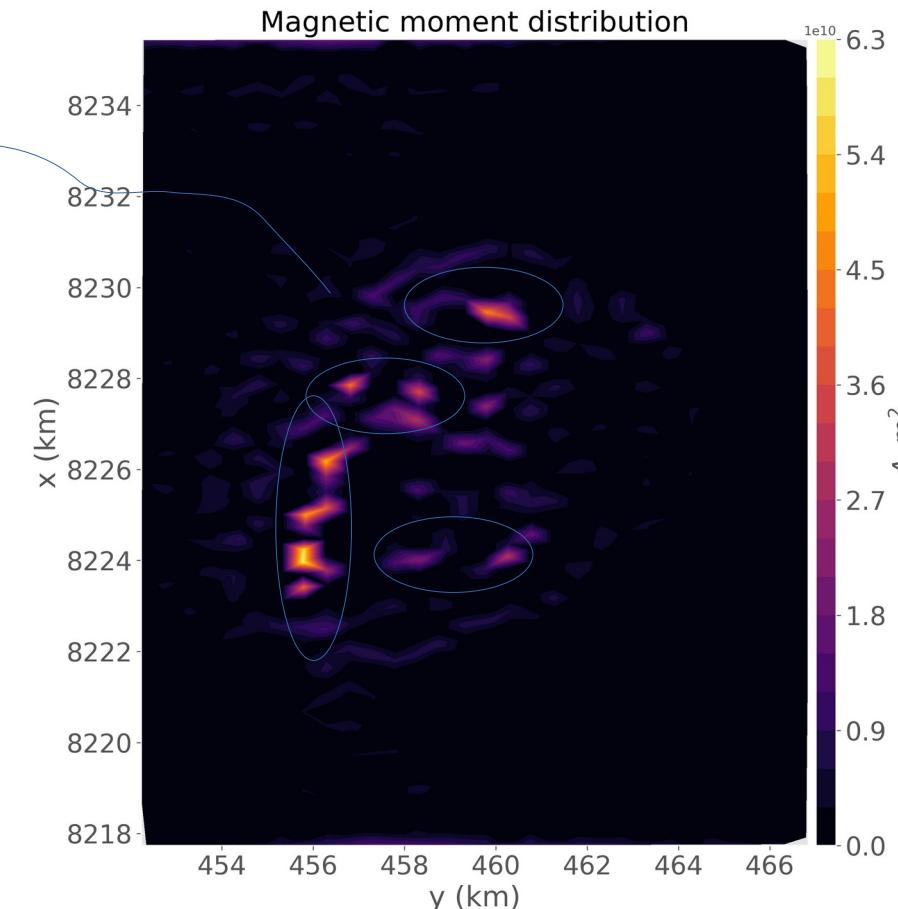
Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-45, 5^\circ, 38, 4^\circ)$$

Direção estimada que está de acordo com trabalhos anteriores na mesma região (Dutra et al., 2014; Zhang et al., 2018)

Distribuição de momentos e direção de magnetização estimada

Distribuição de momentos magnéticos do que podem ser as fontes magnéticas (as rochas ígneas da região de Montes Claros de Goiás).

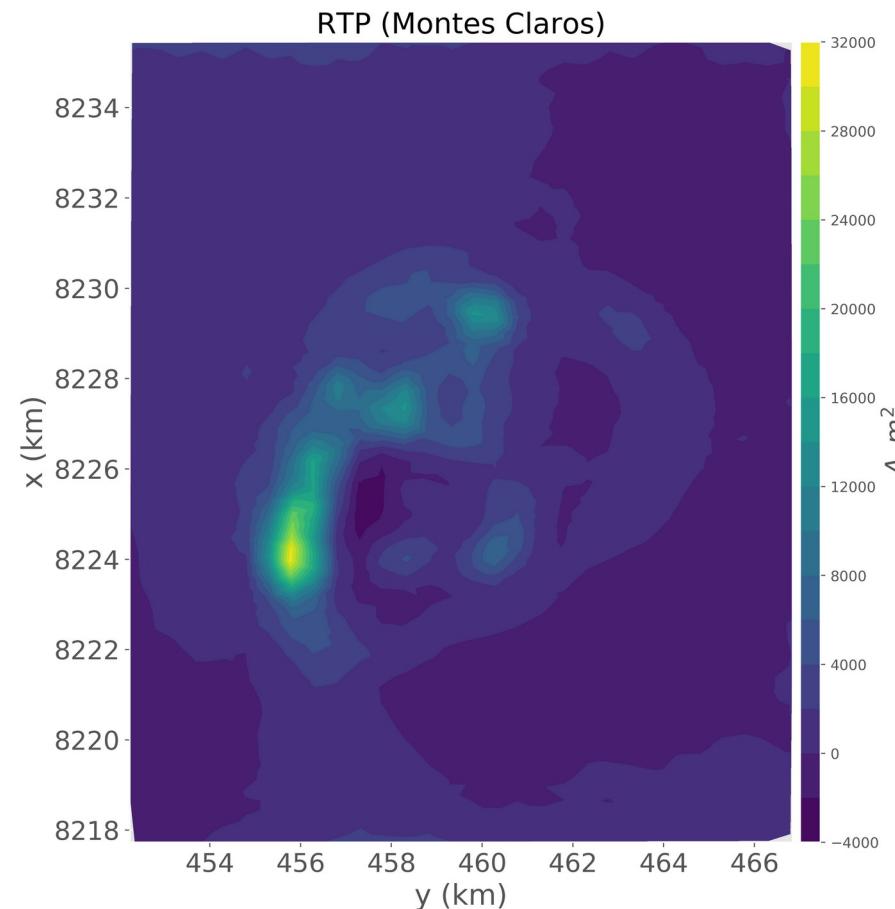


Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-45, 5^\circ, 38, 4^\circ)$$

Direção estimada que está de acordo com trabalhos anteriores na mesma região (Dutra et al., 2014; Zhang et al., 2018)

Campo reduzido ao polo (RTP)



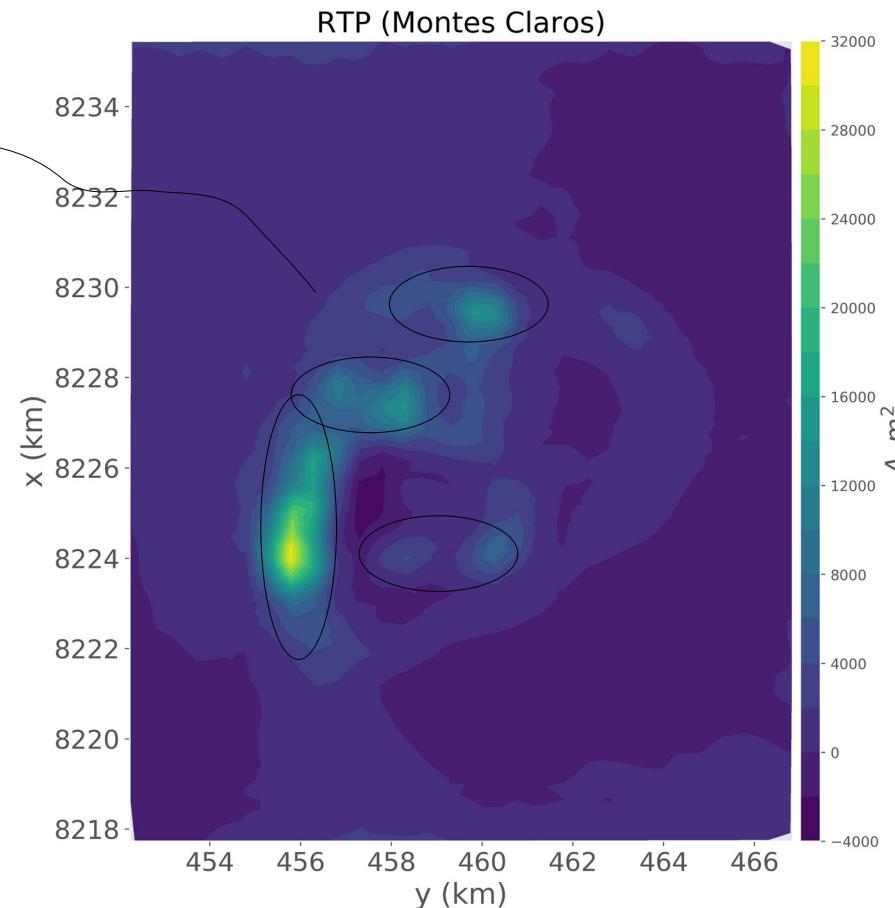
Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-45, 5^\circ, 38, 4^\circ)$$

Direção estimada que está de acordo com
trabalhos anteriores na mesma região
(Dutra et al, 2014; Zhang et al, 2018)

Campo reduzido ao polo (RTP)

Campo reduzido ao polo
que concentra o campo
acima das fontes



Direção estimada pela camada

$$\hat{\mathbf{t}}^+ = (-45, 5^\circ, 38, 4^\circ)$$

Direção estimada que está de acordo com
trabalhos anteriores na mesma região
(Dutra et al., 2014; Zhang et al., 2018)

Considerações finais

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda **existe MUITO** o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- O dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda existe MUITO o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- Os dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda **existe MUITO** o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- O dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda **existe MUITO** o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- **O dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);**
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda **existe MUITO** o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- O dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.

Considerações finais

- A técnica da Camada é uma potencial metodologia para fornecer a posição horizontal, bem como alguma propriedade física, das fontes magnéticas;
- Sobre a técnica da camada equivalente, ainda **existe MUITO** o que se desenvolver, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento teórico como prático;
- O dados magnéticos podem contribuir como um complemento para outros métodos geofísicos (interpretação multifísica);
- A geração de modelos faz com que tenhamos uma melhor interpretação da subsuperfície, bem como entender como os dados geofísicos se comportariam dado um cenário;
- **A modelagem numérica se torna um passo importante para testar tais metodologias.**

Por fim...



github.com/andrelreis/apresentacao-SAGEO

SCAN ME

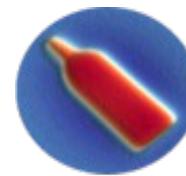


github.com/pinga-lab/eqlayer-magnetization-direction

SCAN ME



pinga-lab.org



PINGA

Grupo de problemas inversos em geofísica

A research group for inverse problems in geophysics
pinga-lab.org

SCAN ME



Meus contatos

E-mails : reisandreluis@gmail.com / andre.reis@uerj.br

Sala: 2029-A

Obrigado pela atenção!