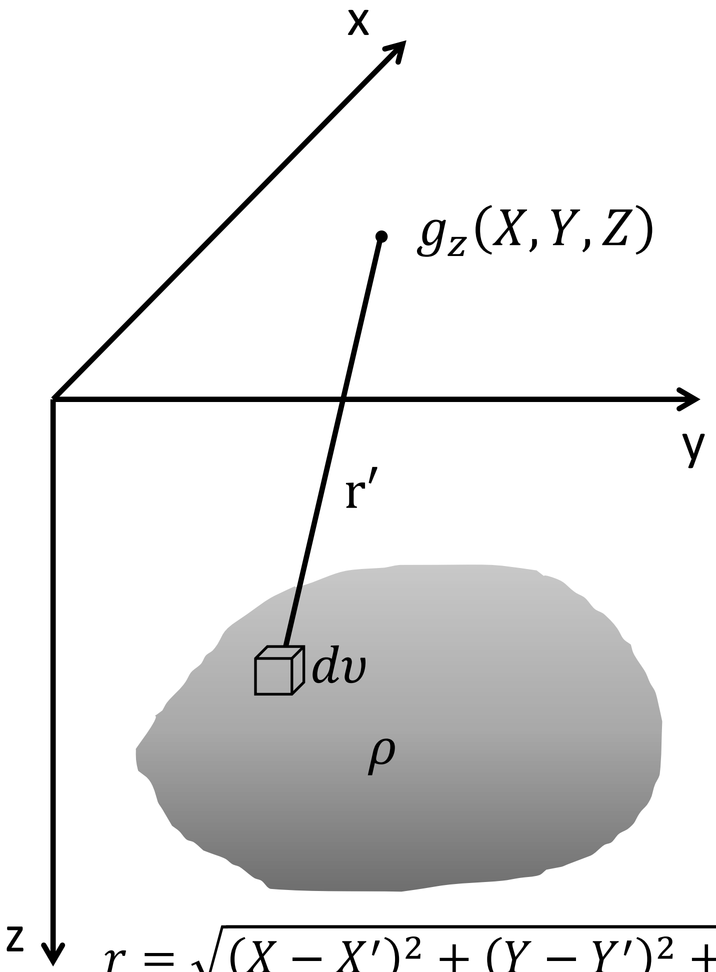
Introdução a Inversão de dados magnéticos e de gravidade (**Parte I**): Conceitos básicos

Prof. André Luis Albuquerque dos Reis

Rio de Janeiro 2021

Modelagem do efeito gerado por uma fonte gravimétrica

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$r = \sqrt{(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2}$$

O potencial gravitacional que gera a componente gravitacional de uma distribuição de densidade

$$U(X,Y,Z) = k_g \int_v \frac{\rho(X',Y',Z')}{\left[(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2\right]^{\frac{1}{2}}} dv$$

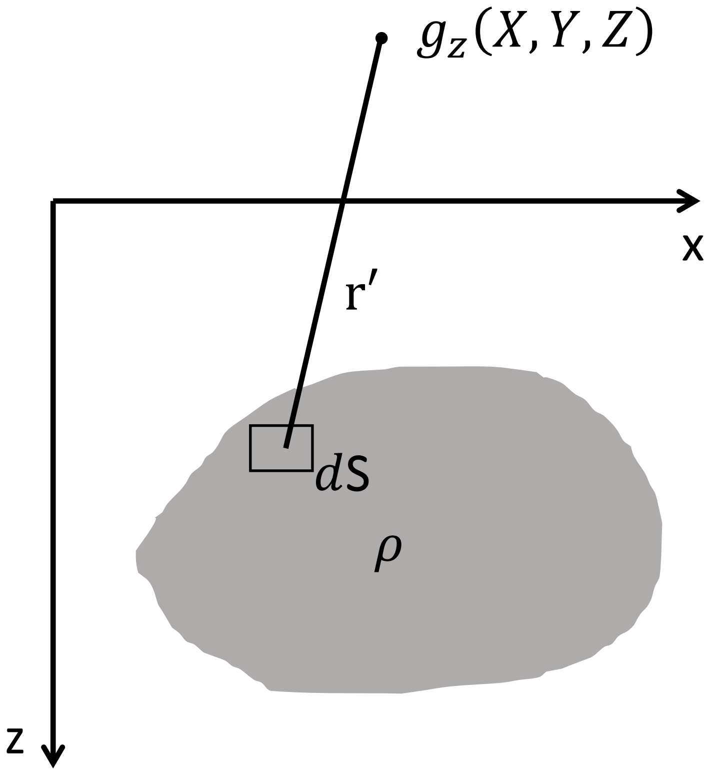
$$g_z(X,Y,Z) = -\frac{\partial U(X,Y,Z)}{\partial z}$$

Componente vertical do campo gravitacional

Exemplos com geometrias simples

1. Modelagem 2D com polígonos

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$g_z(X,Z) = -\frac{\partial U(X,Z)}{\partial z}$$

O potencial gravitacional que gera a componente gravitacional de uma distribuição de densidade

$$U(X,Z) = k_g \int_S \frac{\rho}{[(X-X')^2 + (Z-Z')^2]^{\frac{1}{2}}} dS$$

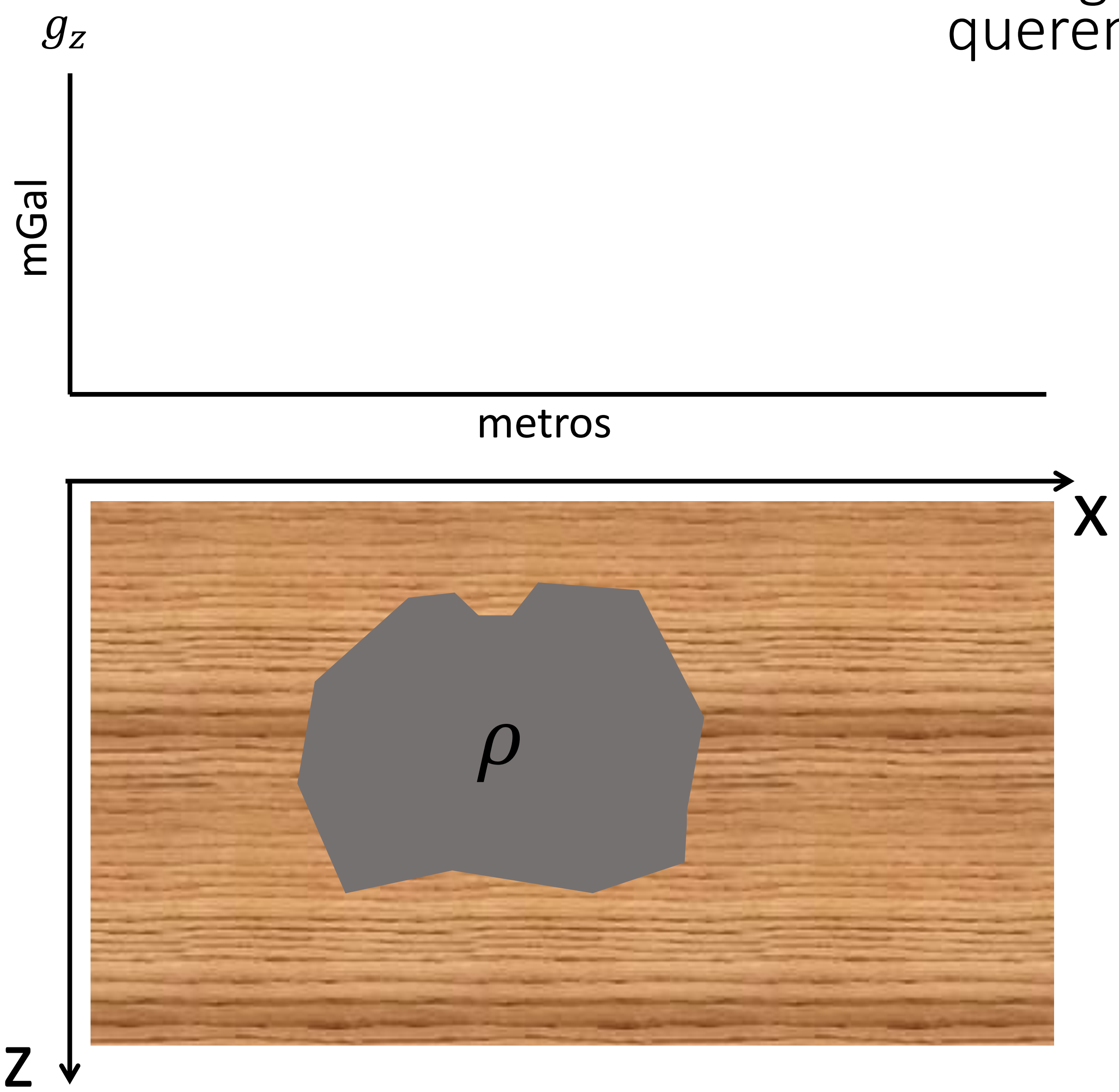
$$r = \sqrt{(X-X')^2 + (Z-Z')^2}$$

Resolver esta equação para um polígono

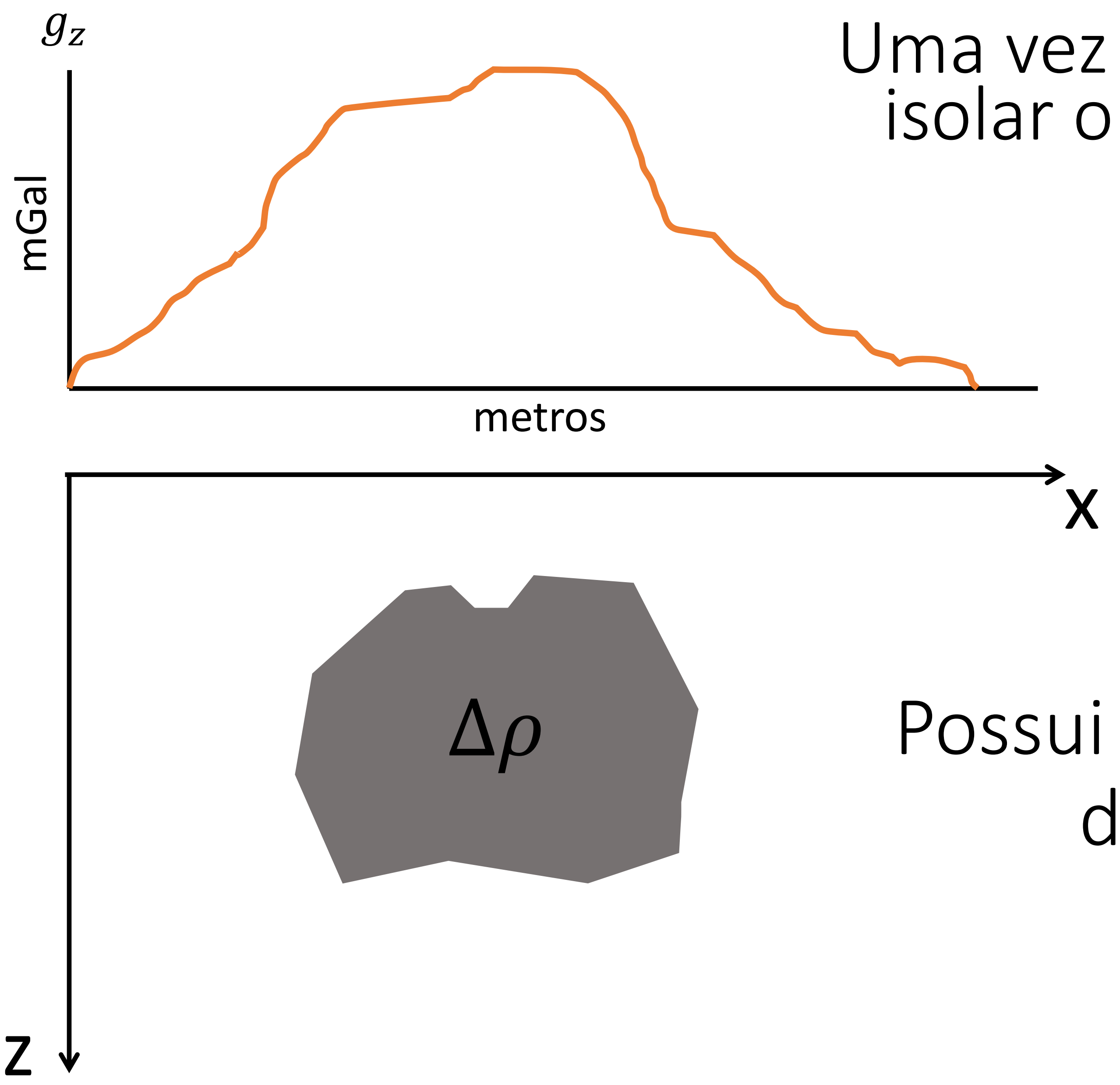
Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. (Talwani et al., 1959)

Modelagem 2D

Imagine uma situação na qual queremos estudar um corpo em subsuperfície.



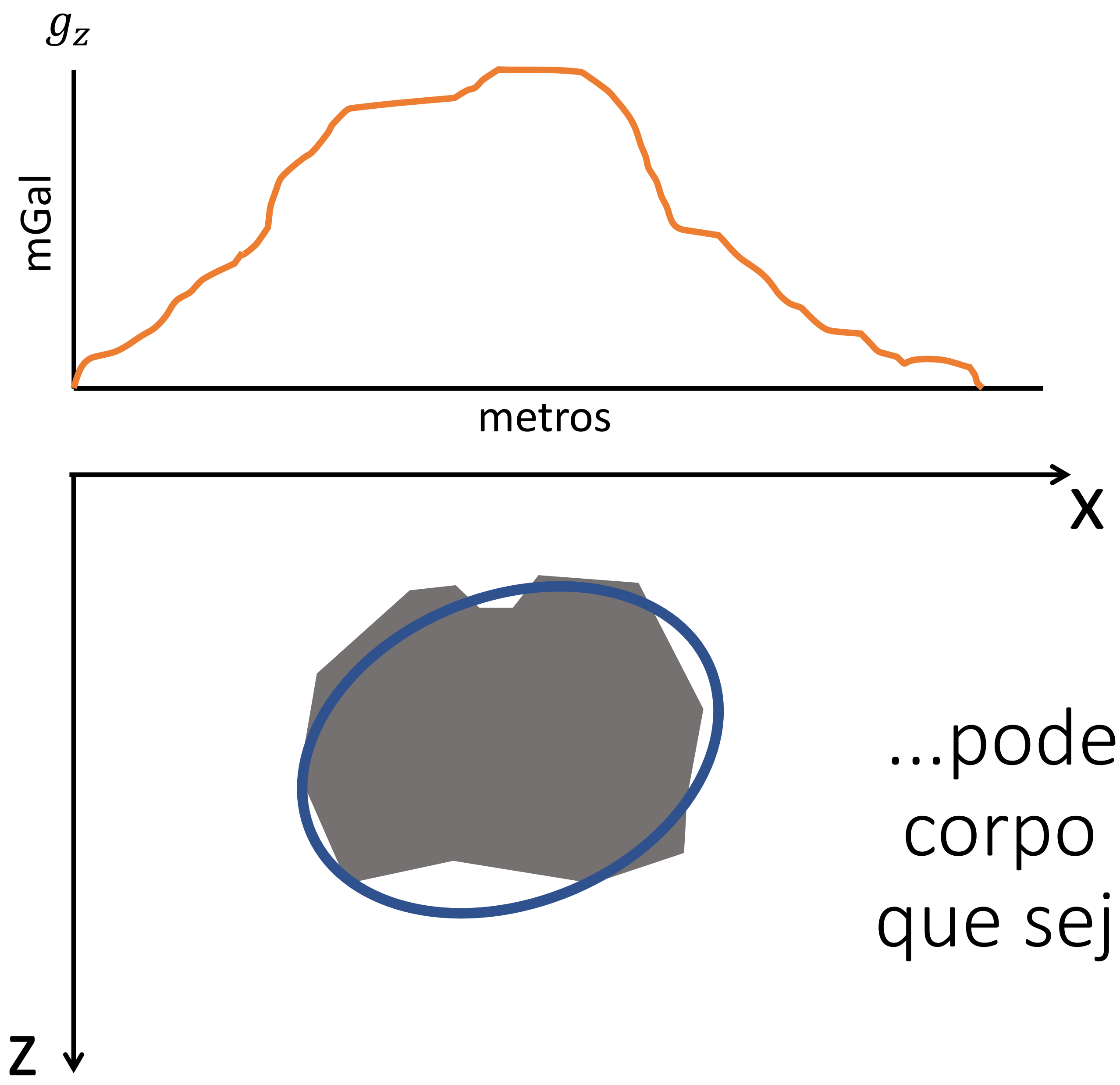
Modelagem 2D



Uma vez que a gente consiga isolar o efeito deste corpo

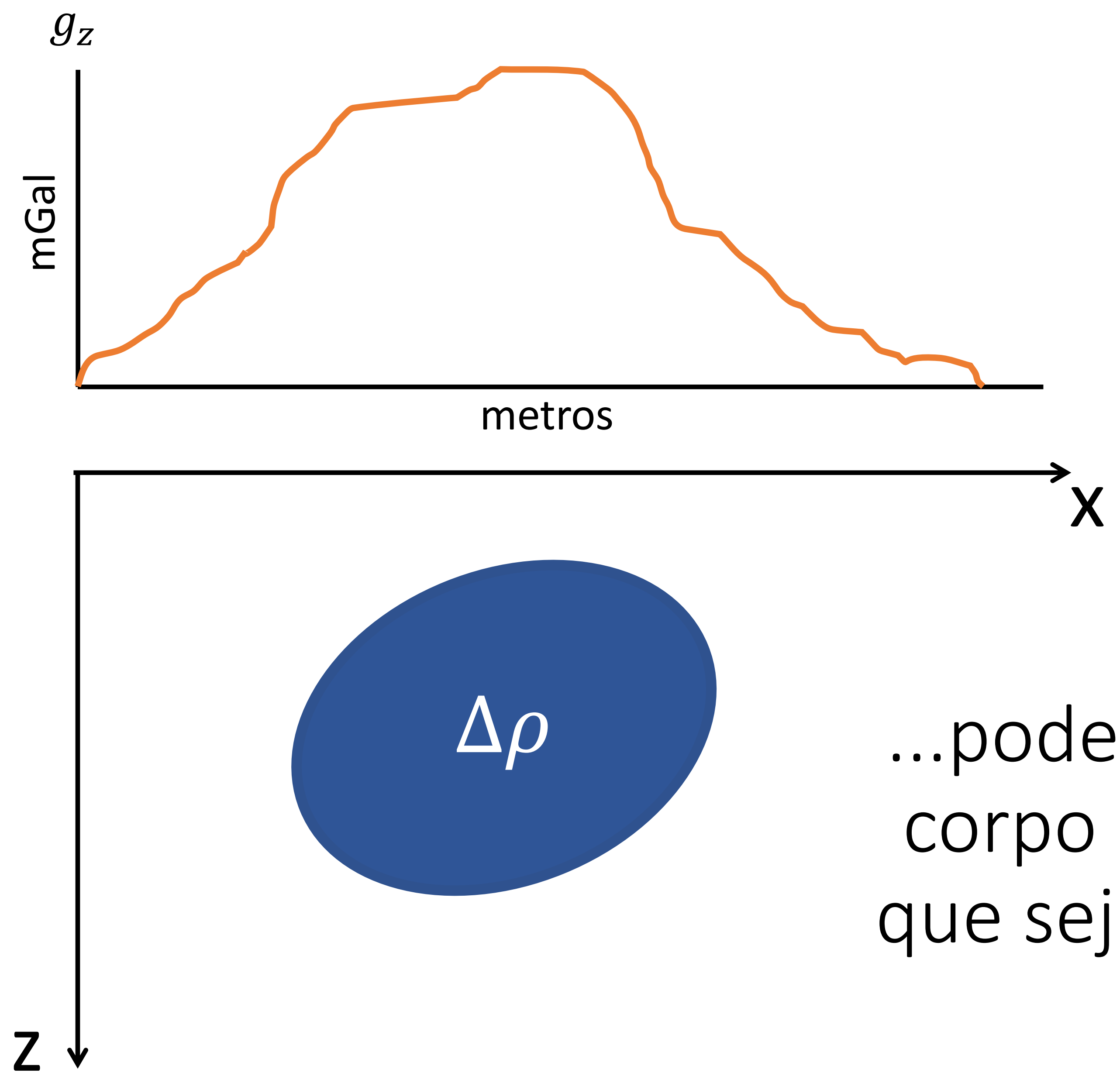
Possui um certo constraste de densidade....

Modelagem 2D



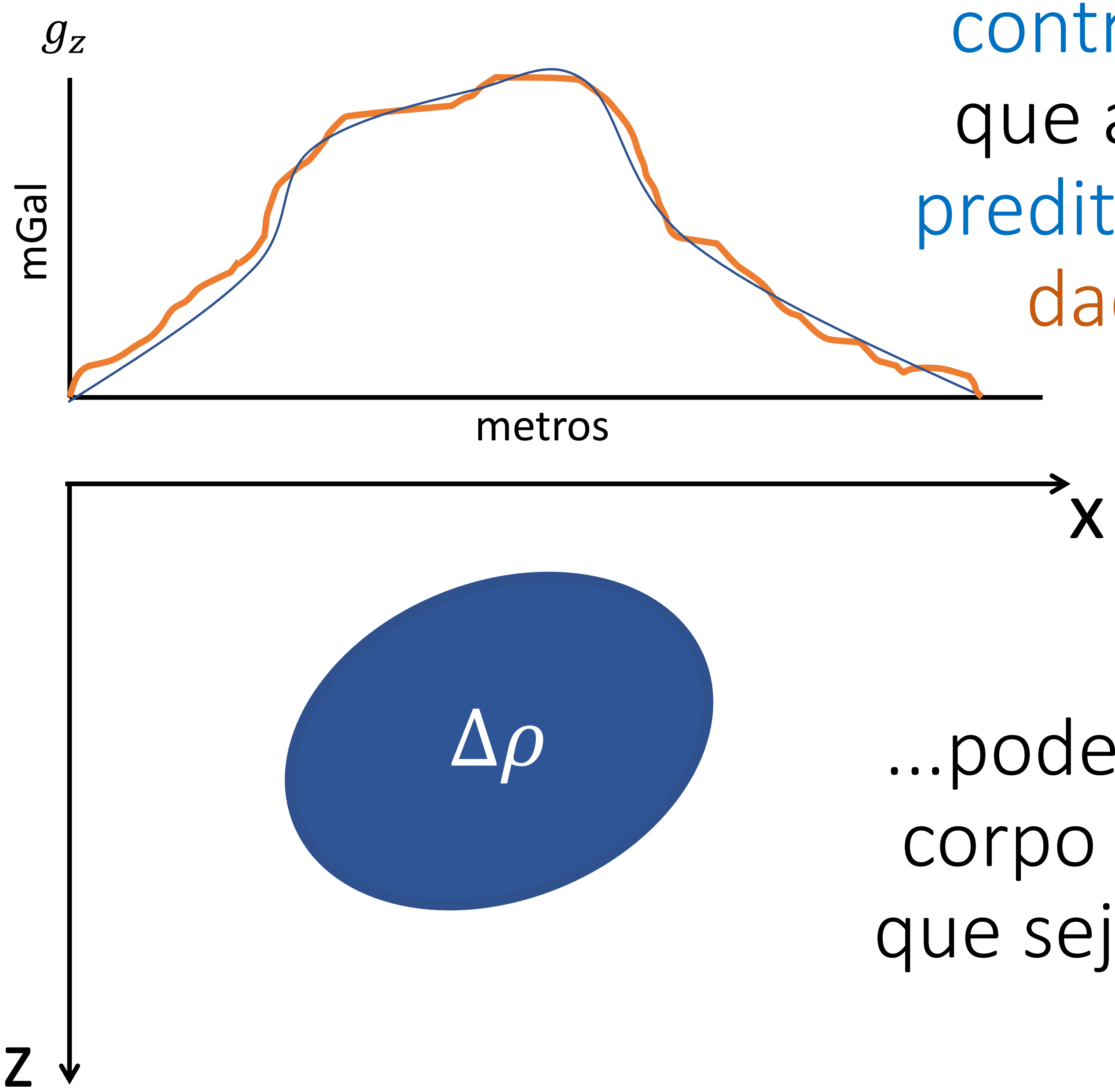
...podemos aproximar este corpo por uma geometria que seja de nosso controle.

Modelagem 2D



...podemos aproximar este corpo por uma geometria que seja de nosso controle.

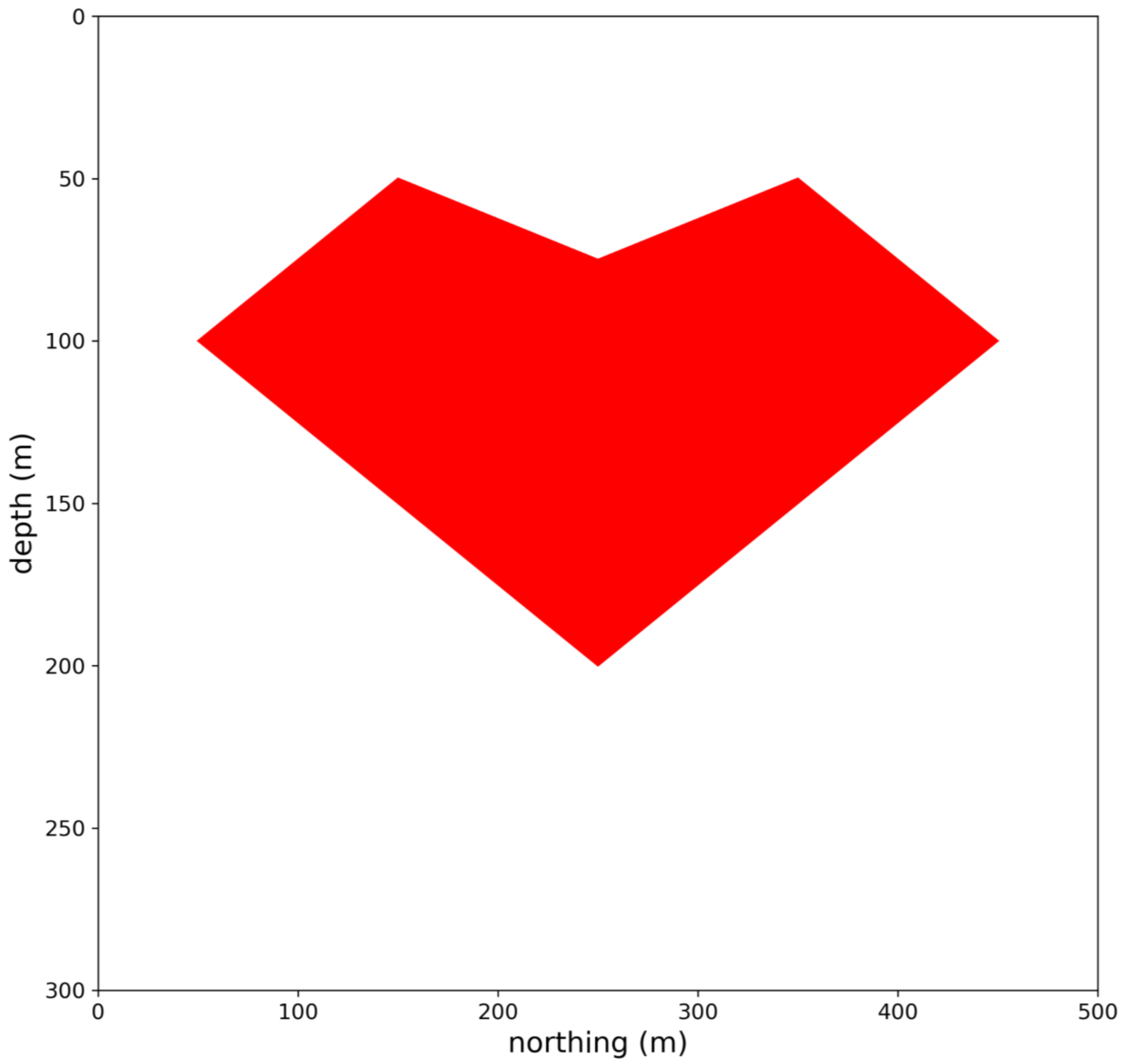
Modelagem 2D



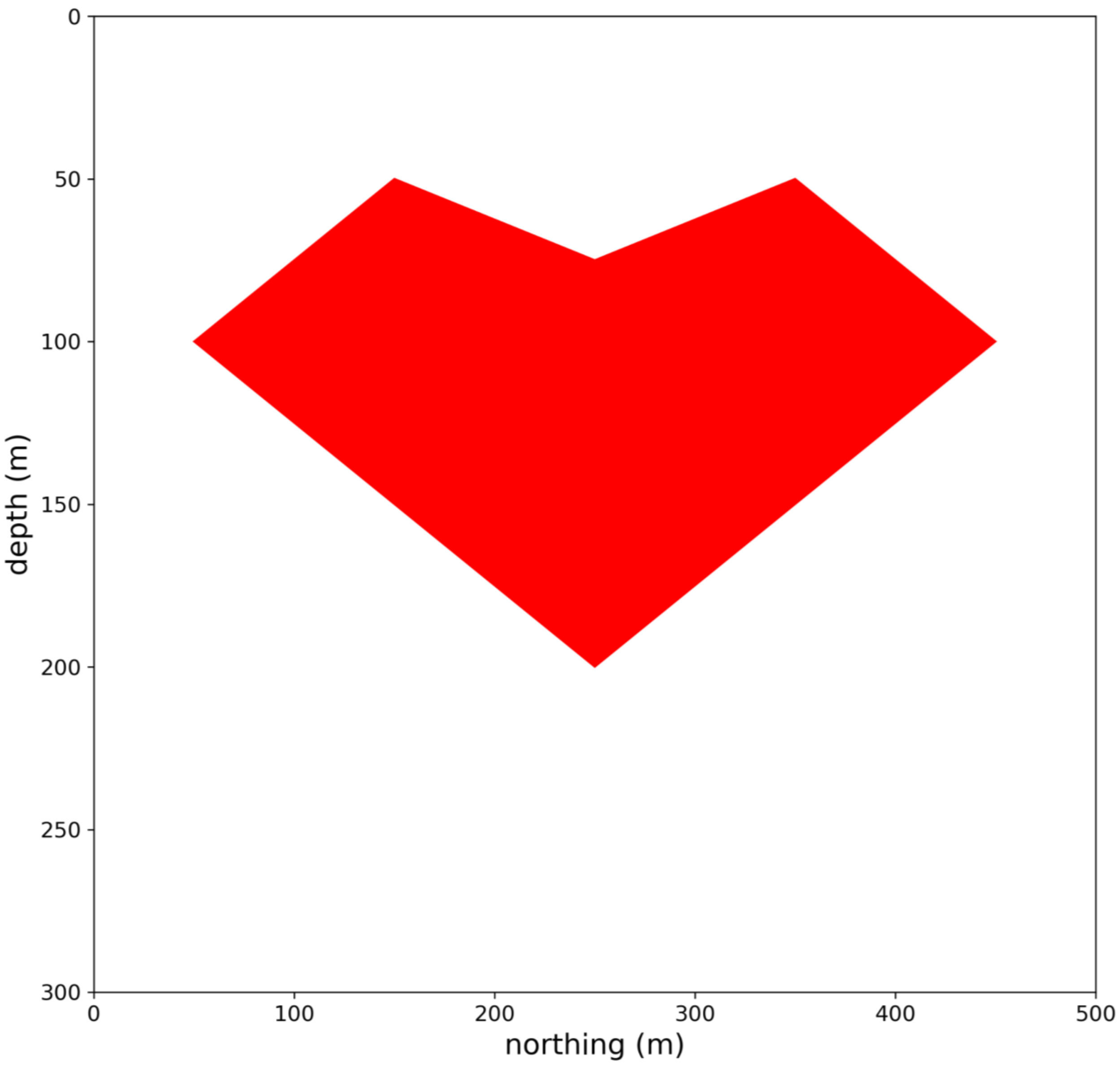
Conseguimos encontrar um contraste de densidade que aproxime os dados preditos pelo modelo dos dados observados!

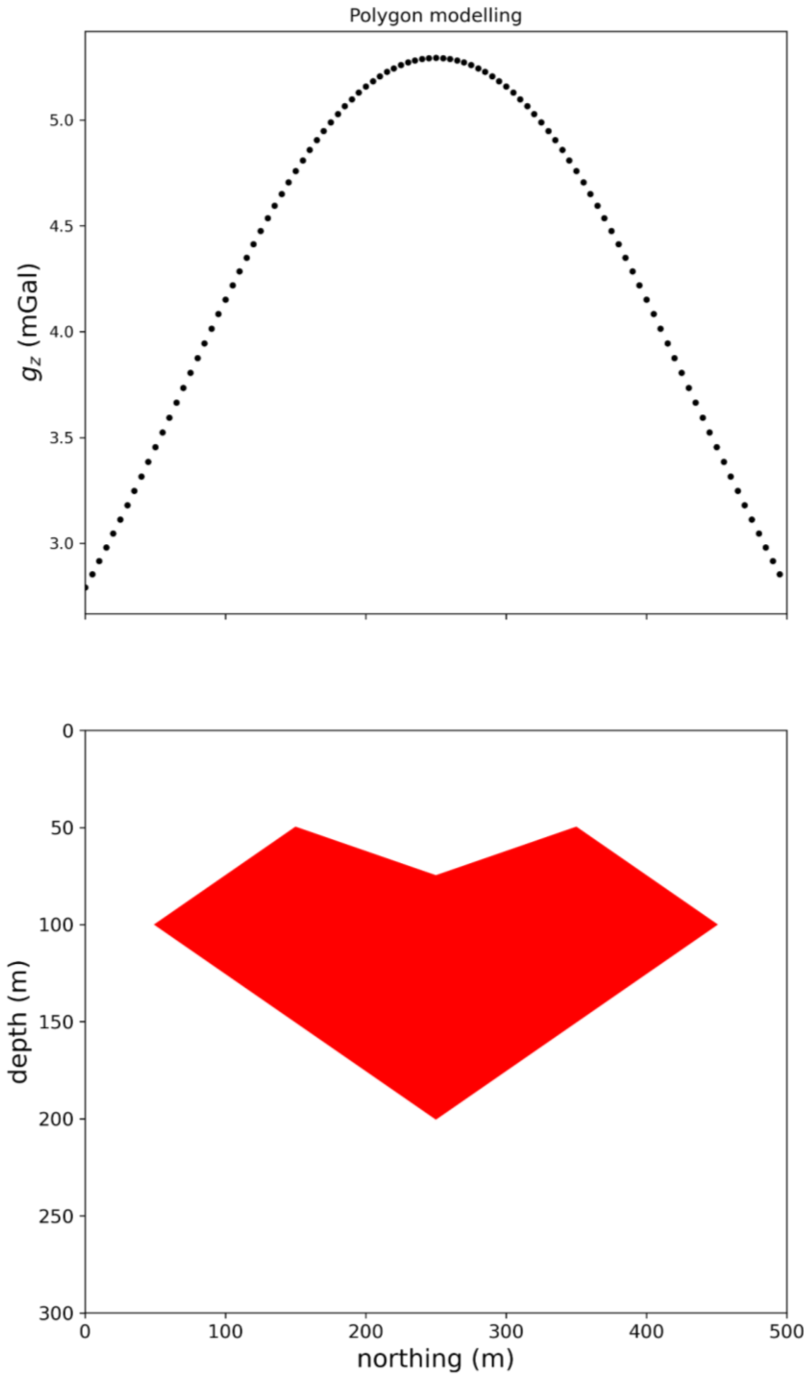
...podemos aproximar este corpo por uma geometria que seja de nosso controle.

Efeito gravimétrico de um polígono



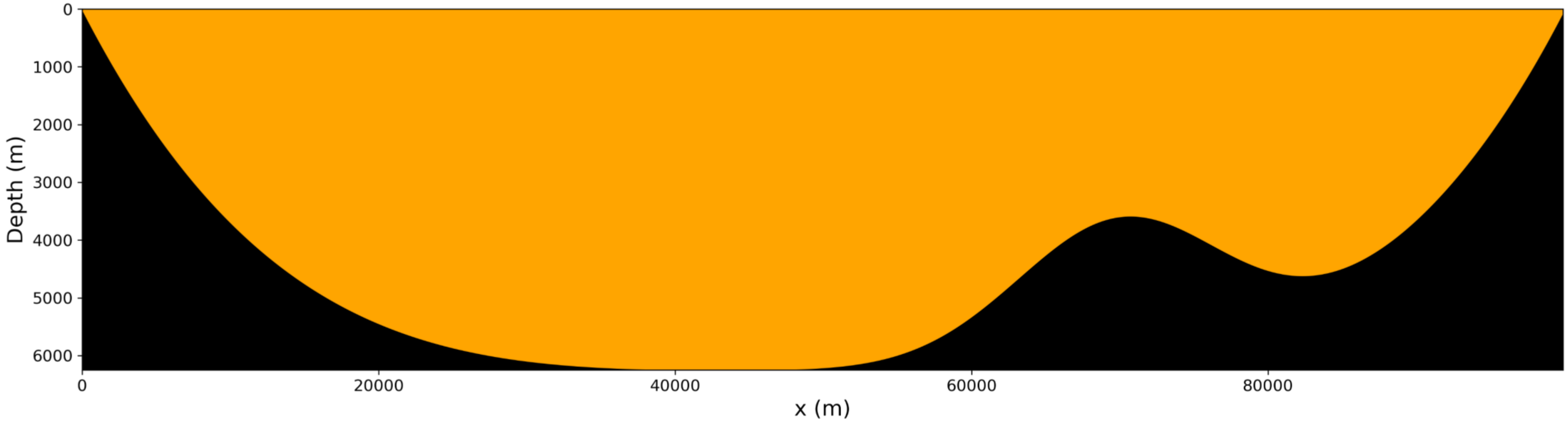
Efeito gravimétrico de um polígono



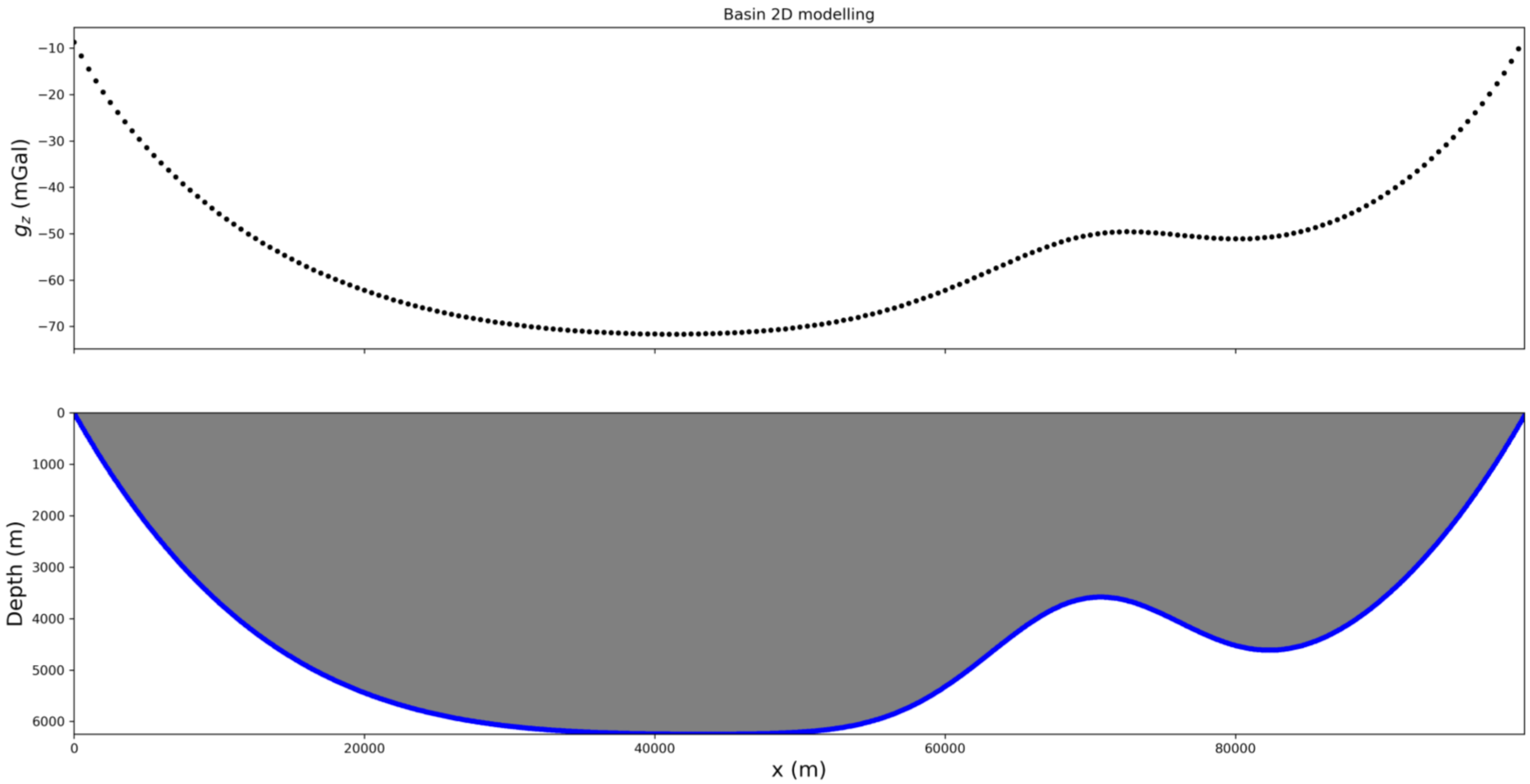


1.1. Bacia 2D simples

Bacia sedimentar 2D

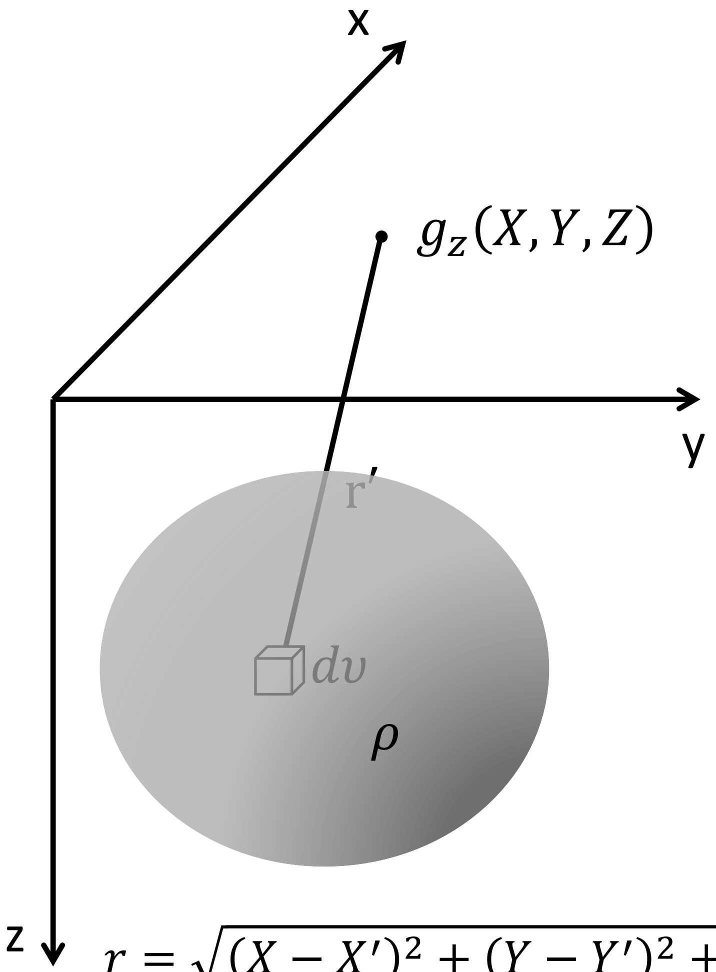


Bacia sedimentar 2D



2. Modelagem 3D grav com esferas

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$r = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2}$$

$$g_z(X,Y,Z) = -\frac{\partial U(X,Y,Z)}{\partial z}$$

O potencial gravitacional que gera a componente gravitacional de uma distribuição de densidade

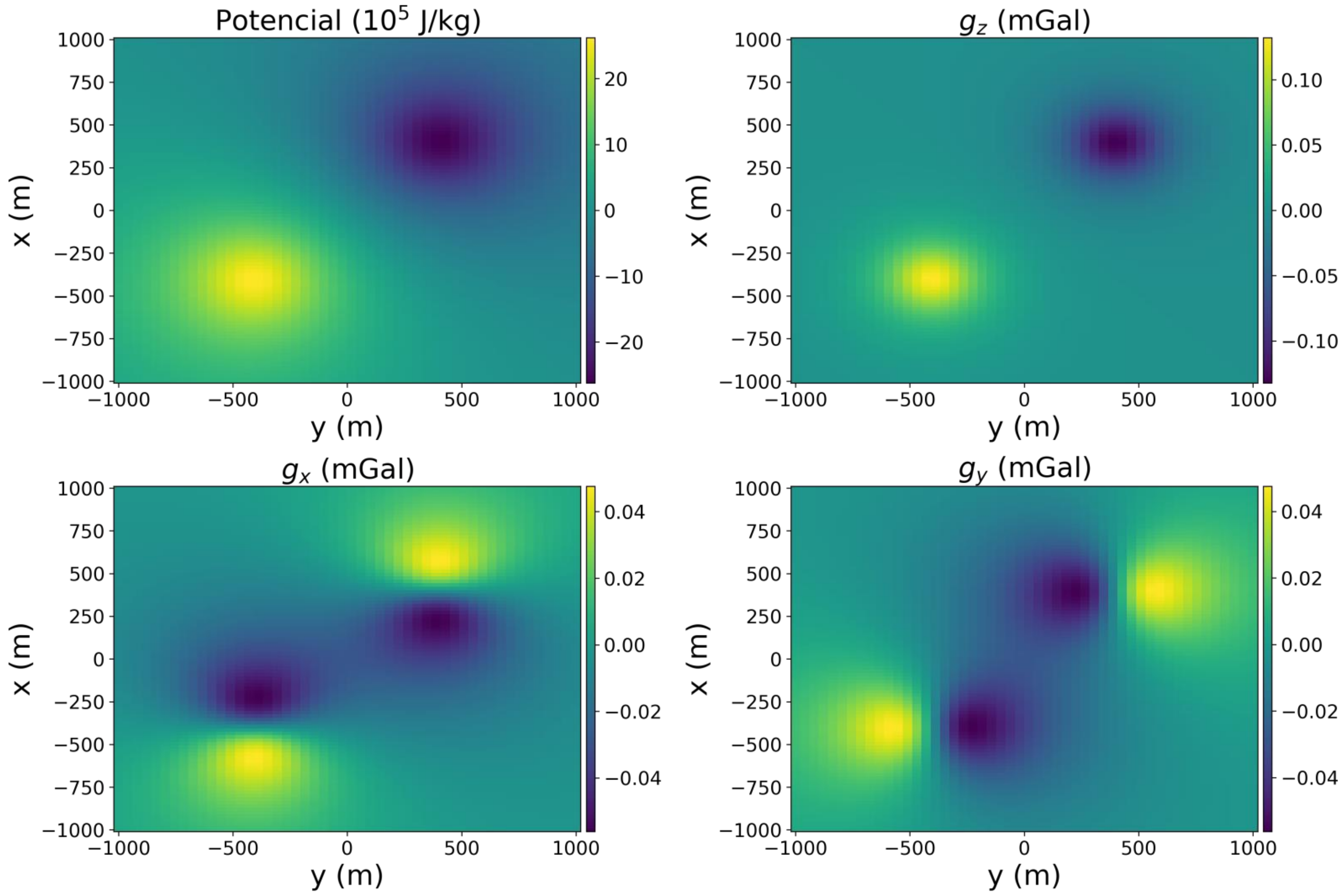
$$U(X,Y,Z) = k_g \int_v \frac{\rho(X',Y',Z')}{\left[(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2\right]^{\frac{1}{2}}} dv$$

Quando consideramos a densidade homogênea ao longo do corpo e resolvemos a integral de volume para uma esfera.

$$U(X,Y,Z) = k_g \frac{\rho V}{r}$$

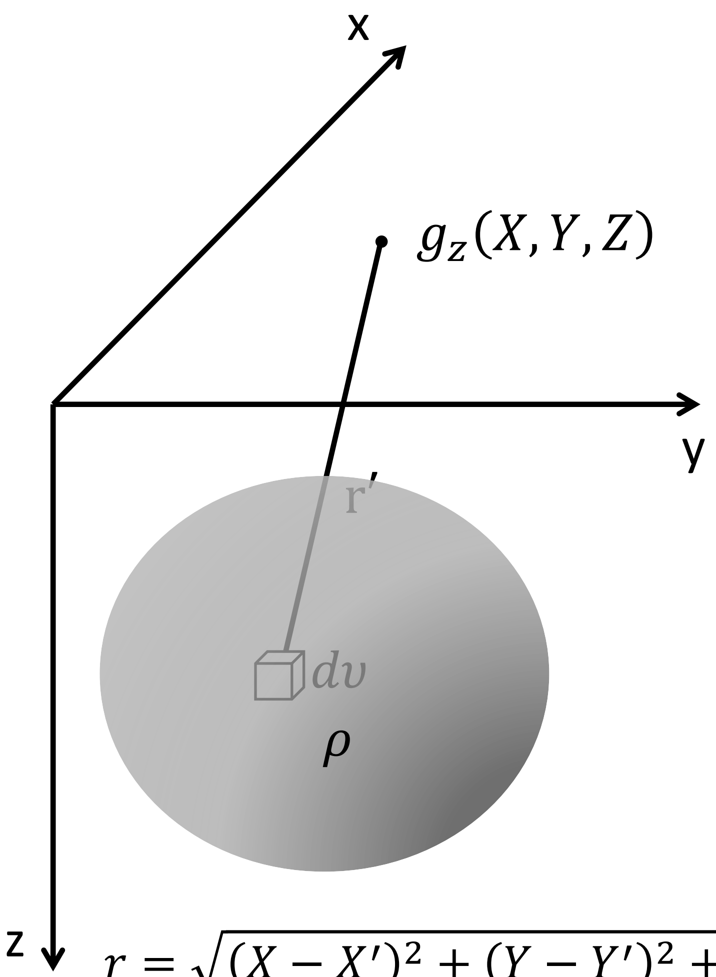
Que depende do volume V, da densidade ρ e da distância de observação r.

Efeito gravitacional de uma esfera



2.1. Gradiometria gravimétrica 3D com esferas

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$r = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z - Z')^2}$$

$$g_{\alpha\beta}(X,Y,Z) = -\frac{\partial^2 \partial U(X,Y,Z)}{\partial\alpha\partial\beta}$$

Um outro tipo de dado que utilizamos em estudos gravitacionais são os dados de **gradiometria gravimétrica**

$$\nabla \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \Rightarrow \nabla(\nabla \mathbf{U}) = \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix}$$

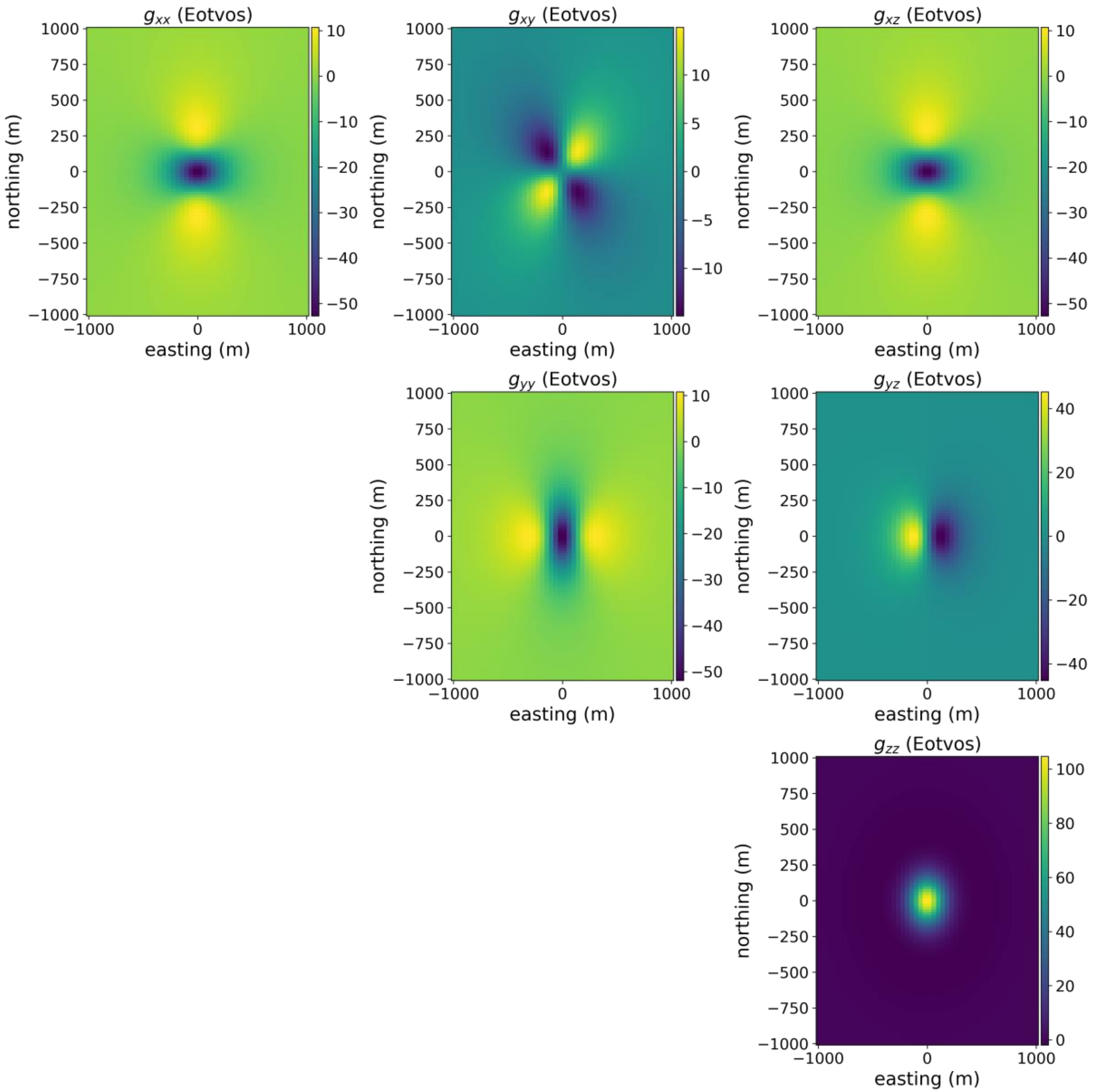
Tensor gradiente de gravidade

Quando consideramos a densidade homogênea ao longo do corpo e resolvemos a integral de volume para uma esfera.

$$U(X,Y,Z) = k_g \frac{\rho V}{r}$$

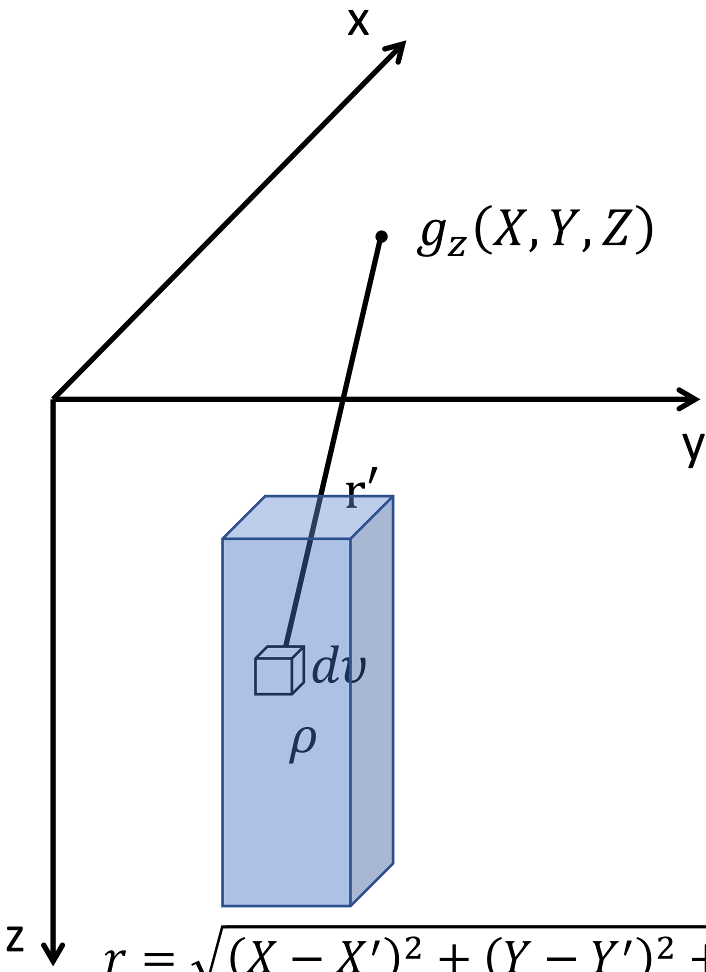
Que depende do volume V, da densidade ρ e da distância de observação r.

Gradiente da gravidade



3. Modelagem 3D grav com prismas

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$r = \sqrt{(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2}$$

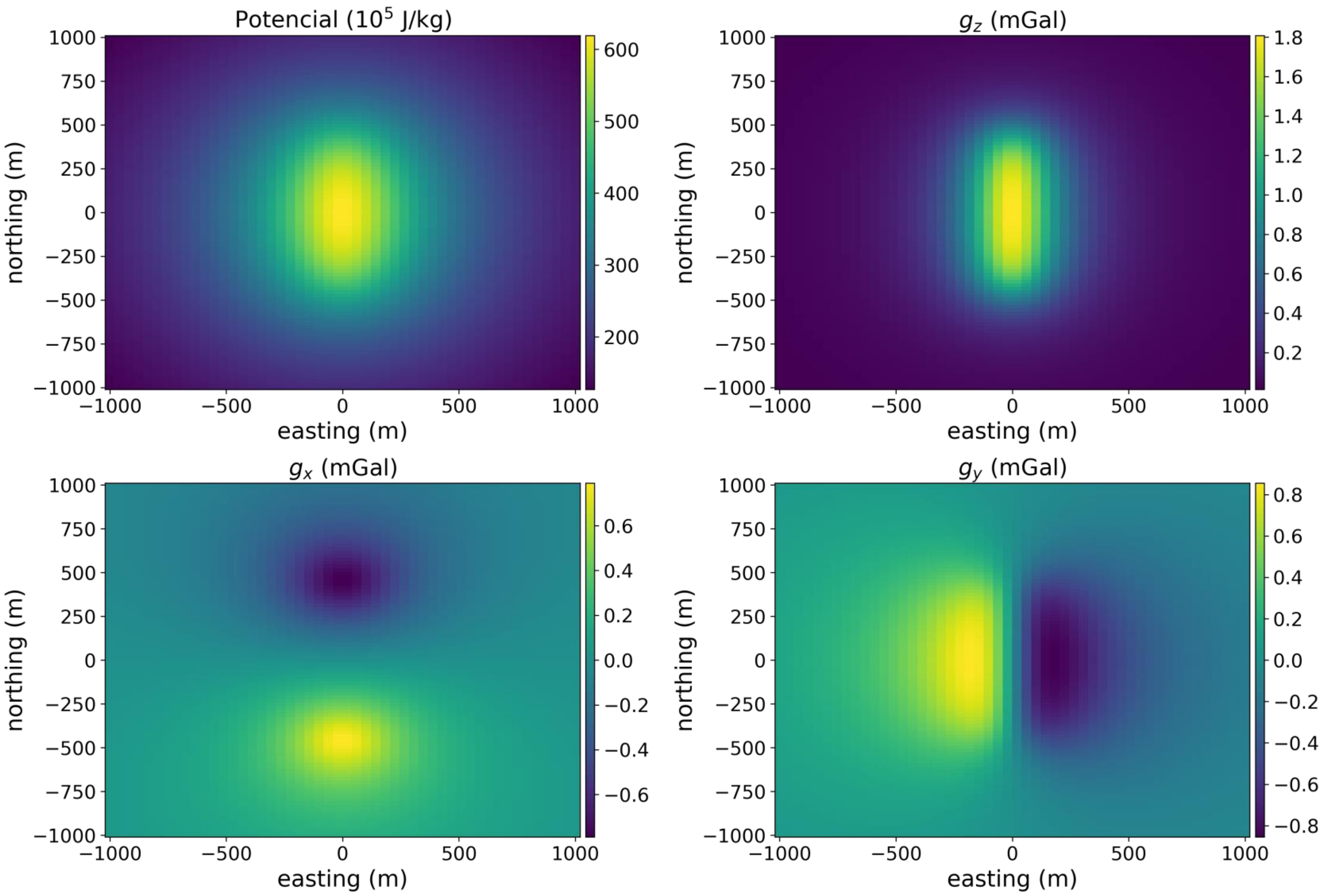
$$g_z(X,Y,Z) = -\frac{\partial U(X,Y,Z)}{\partial z}$$

O potencial gravitacional que gera a componente gravitacional de uma distribuição de densidade

$$U(X,Y,Z) = k_g \int_v \frac{\rho(X',Y',Z')}{[(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2]^{\frac{1}{2}}} dv$$

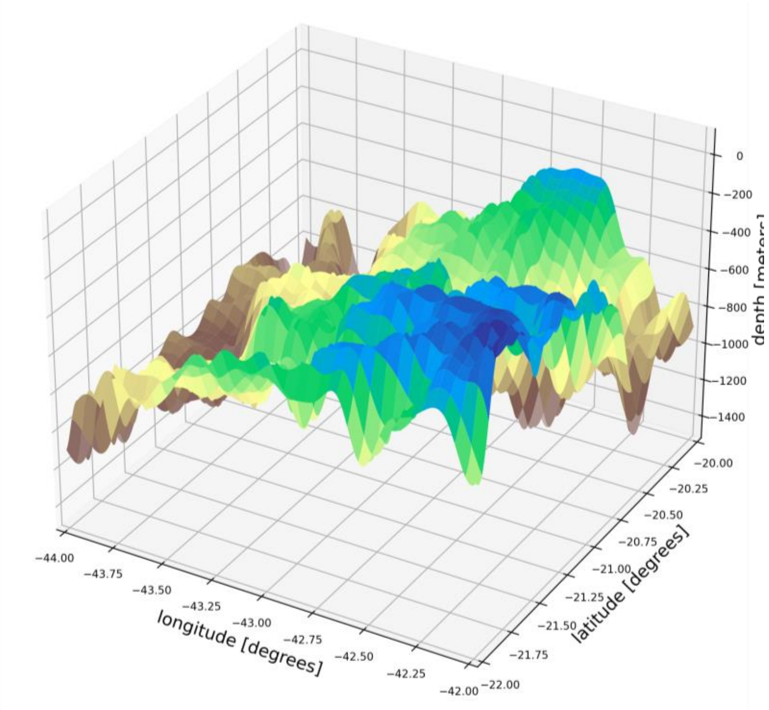
The gravitational potential and its derivative for the prism (Nagy et al., 2000)

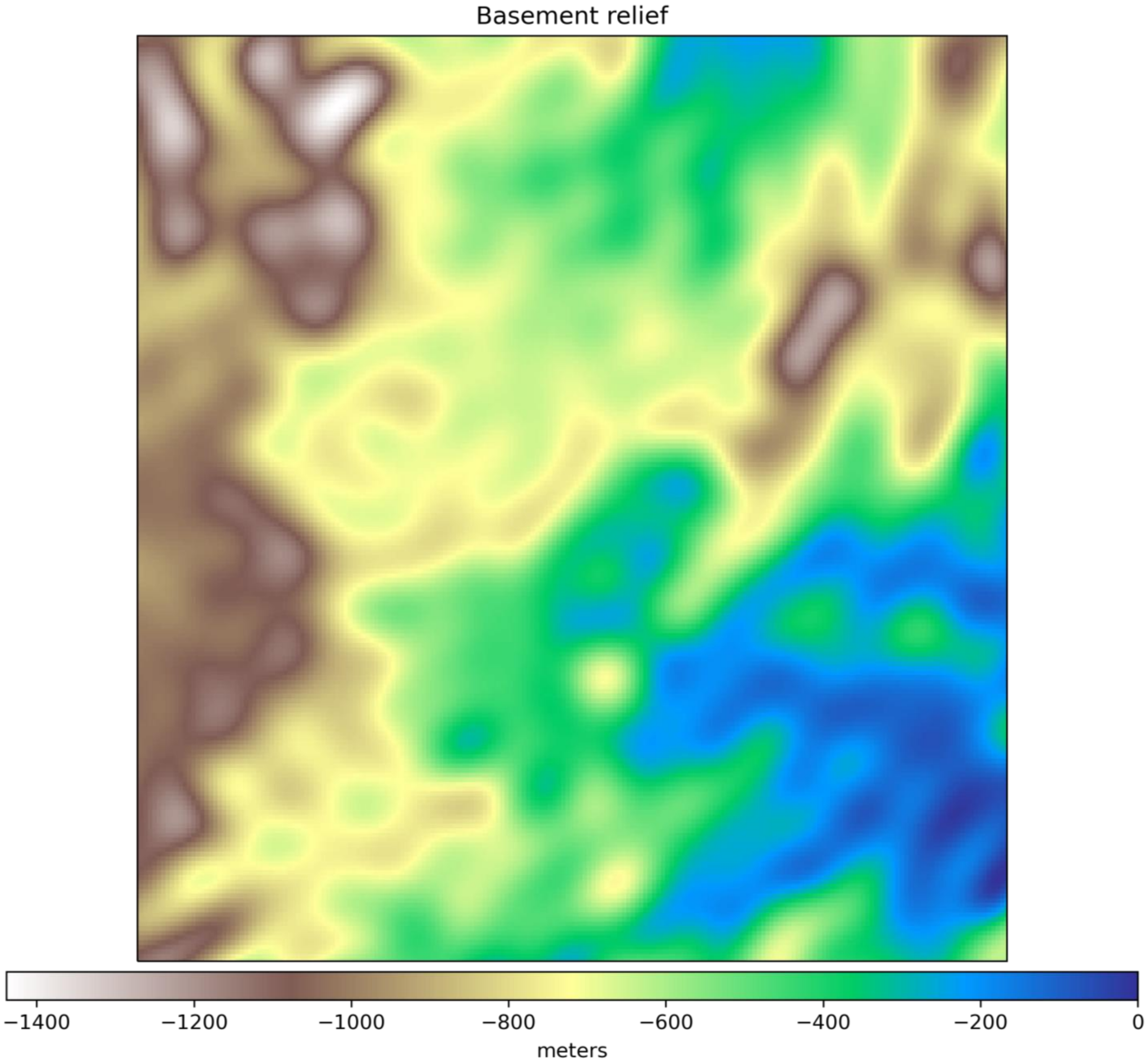
Efeito gravitacional de um prisma



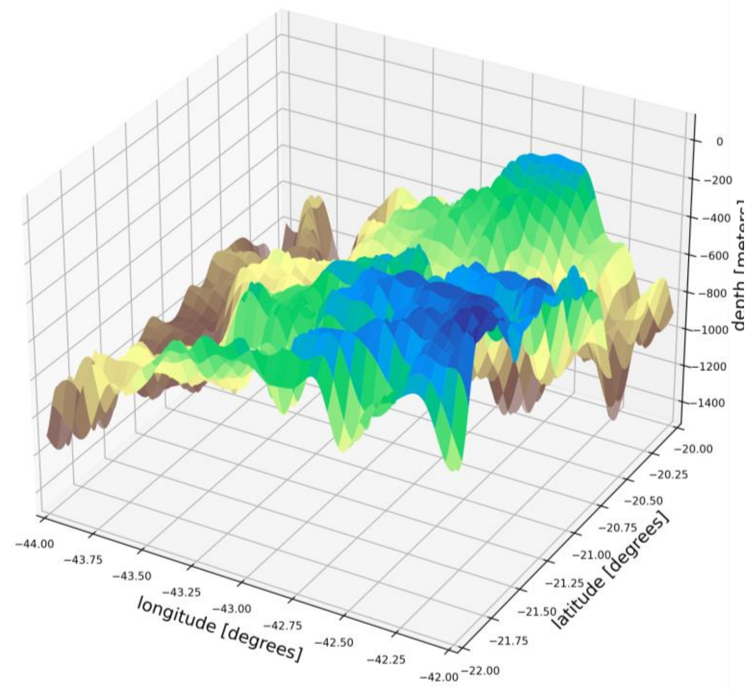
3.1. Bacia 3D simplificada

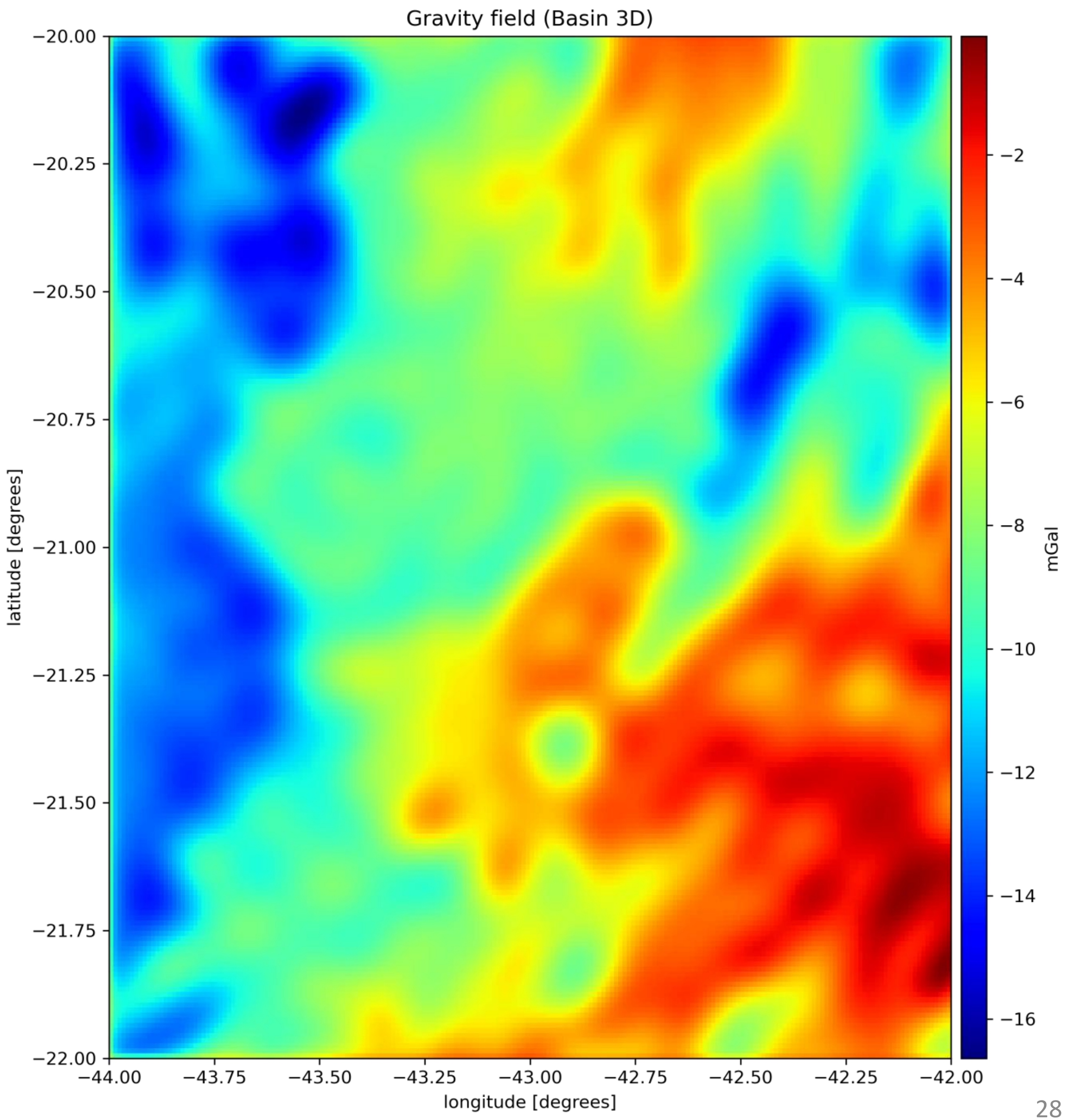
Bacia sedimentar 3D





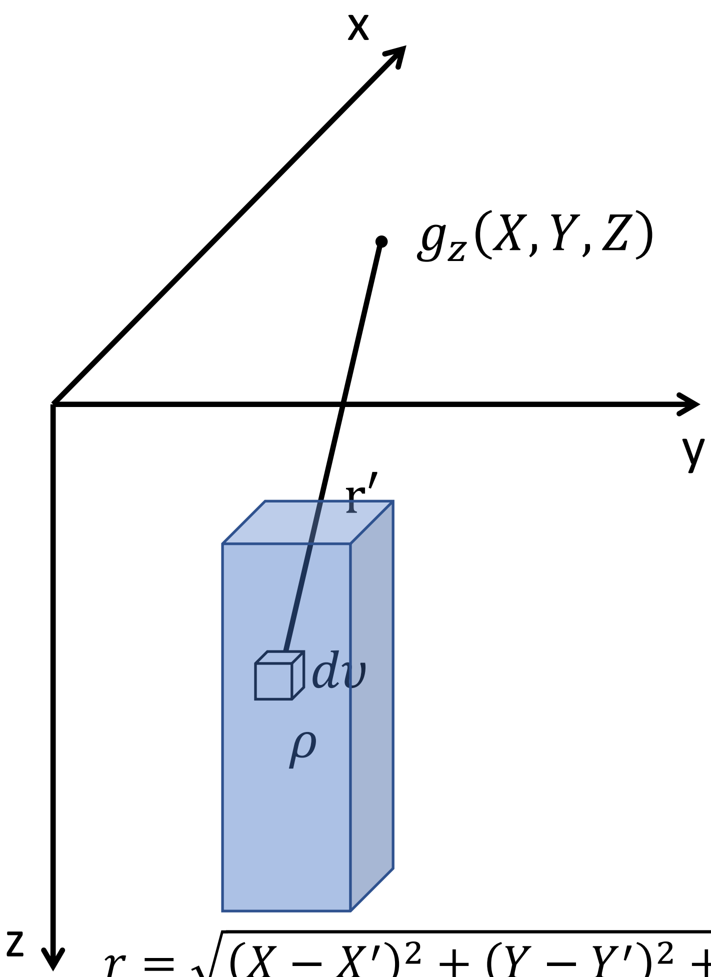
Bacia sedimentar 3D





3.2. Gradiometria gravimétrica 3D com prismas

Efeito gravitacional de uma distribuição de densidade



$$r = \sqrt{(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2}$$

$$g_{\alpha\beta}(X,Y,Z) = -\frac{\partial^2 \partial U(X,Y,Z)}{\partial\alpha\partial\beta}$$

O distúrbio de gravidade é a componente vertical do campo gravitacional gerado pela fonte gravimétrica

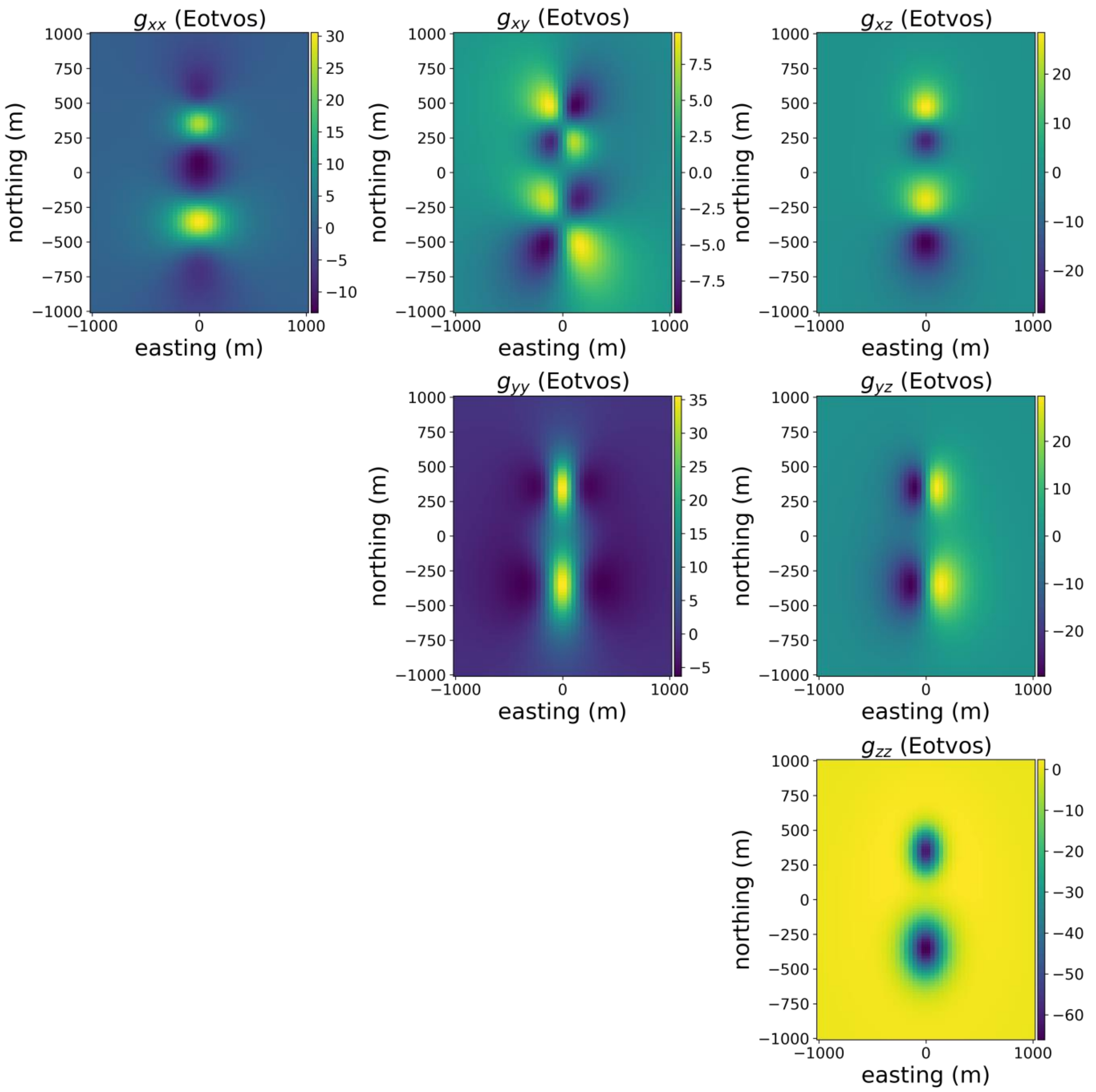
$$U(X,Y,Z) = k_g \int_v \frac{\rho(X',Y',Z')}{[(X-X')^2 + (Y-Y')^2 + (Z-Z')^2]^{\frac{1}{2}}} dv$$

The gravitational potential and its derivative for the prism (Nagy et al., 2000)

$$\nabla\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \Rightarrow \nabla(\nabla\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix}$$

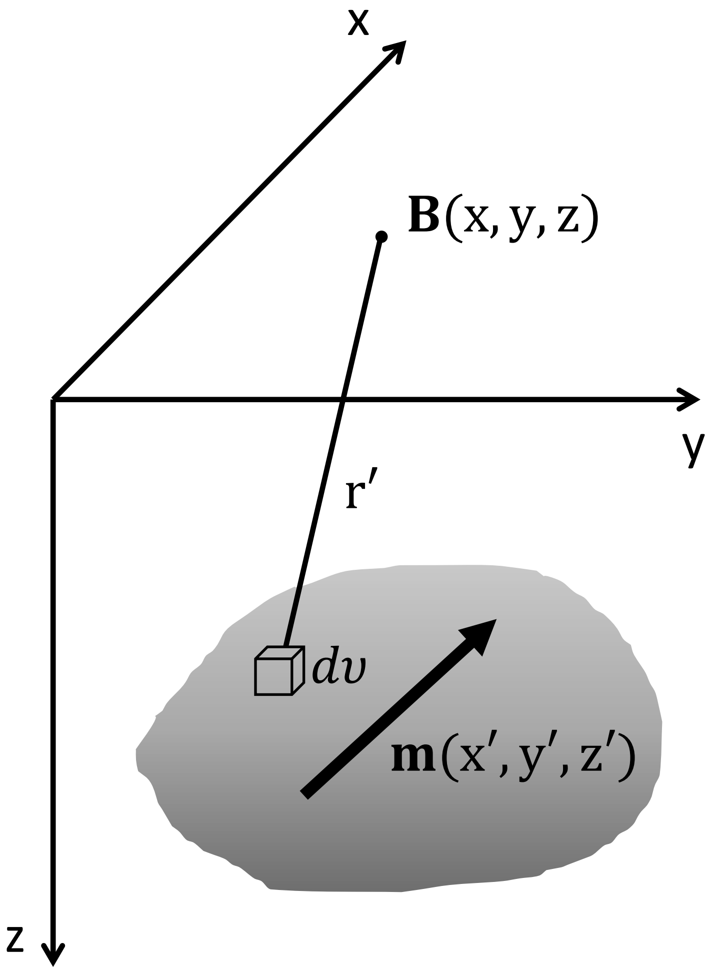
Tensor gradiente de gravidade

Gradiometria de um prisma



Modelagem do efeito de fontes magnéticas

Fonte magnética 3D



O campo magnético gerado por uma fonte arbitrária, em regiões livres de correntes, é dado por

$$\mathbf{B}(x, y, z) = -\nabla\Gamma(x, y, z)$$

em que

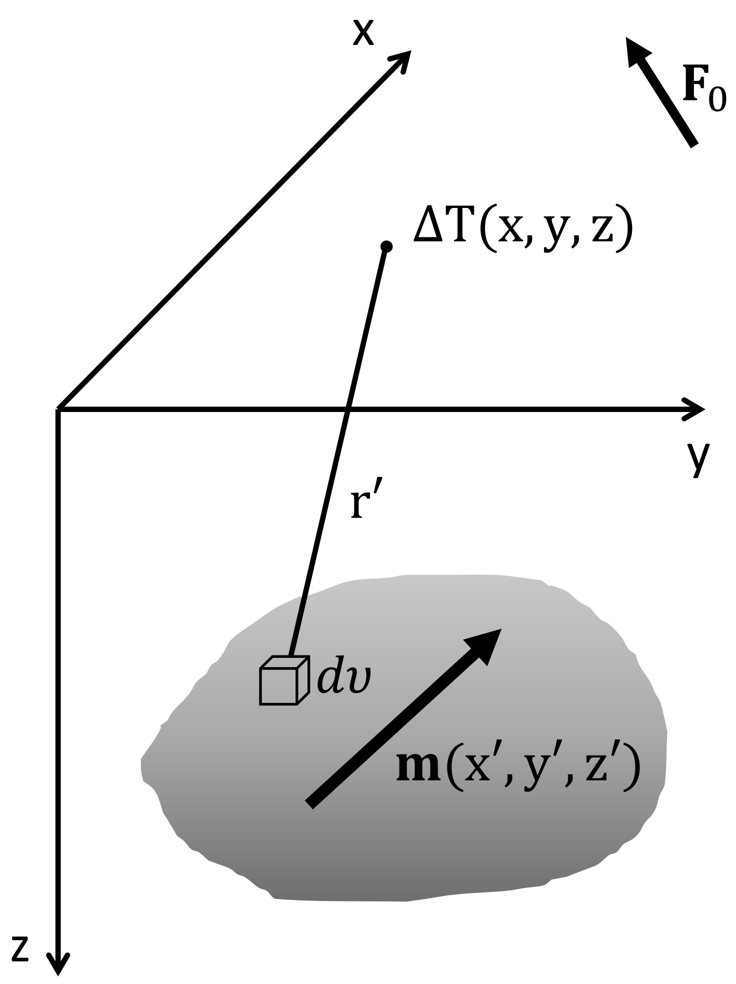
$$\Gamma(x, y, z) = -\gamma_m \iiint_v \mathbf{m}(x', y', z') . \boldsymbol{\nabla} \frac{1}{r'} dv'$$

que é o potencial magnético escalar.

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}$$ **Função escalar**

$$\mathbf{m}(x', y', z') = \begin{bmatrix} m_x(x', y', z') \\ m_y(x', y', z') \\ m_z(x', y', z') \end{bmatrix}$$ **Vetor magnetização**

Fonte magnética 3D

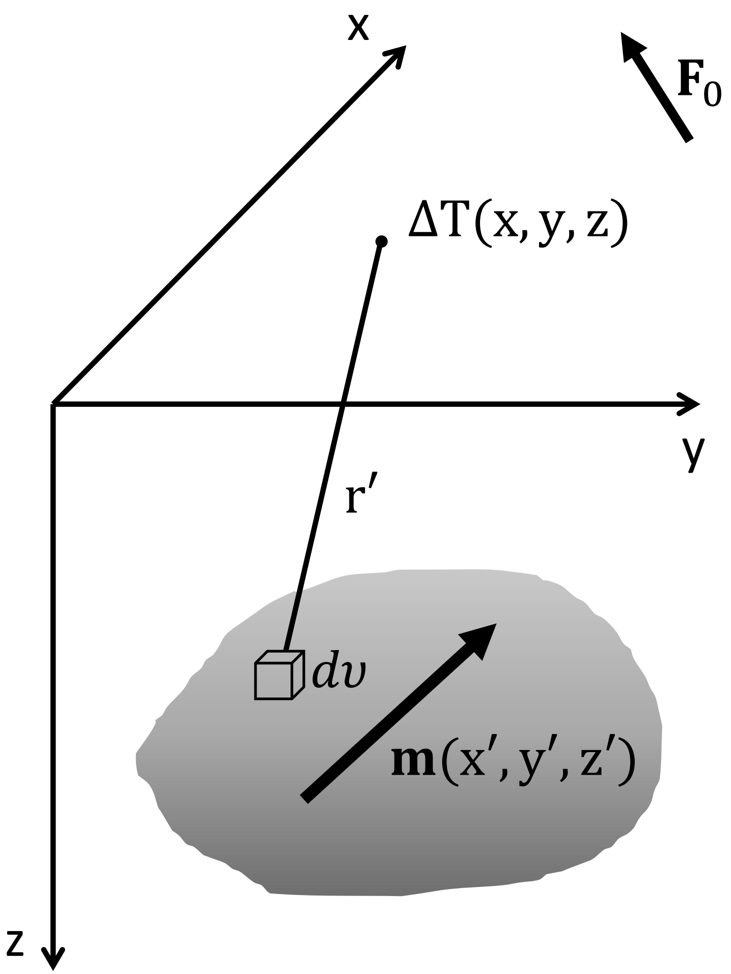


E, portanto a **Anomalia de campo total**...

Matematicamente, é representada pela expressão

$$\Delta T(x, y, z) = \widehat{\mathbf{F}_0}.\,\mathbf{B}(x, y, z)$$

Fonte magnética 3D



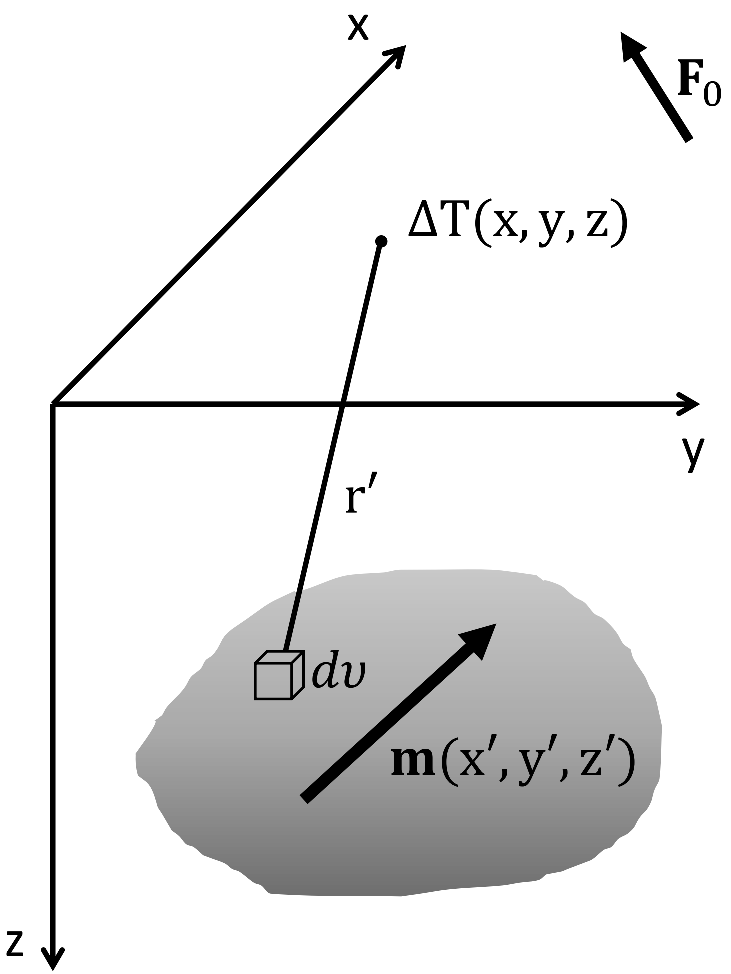
E, portanto a **Anomalia de campo total**...

Matematicamente, é representada pela expressão

$$\Delta T(x, y, z) = \widehat{\mathbf{F}_0} . \mathbf{B}(x, y, z)$$

Vetor unitário na direção do campo principal

Fonte magnética 3D



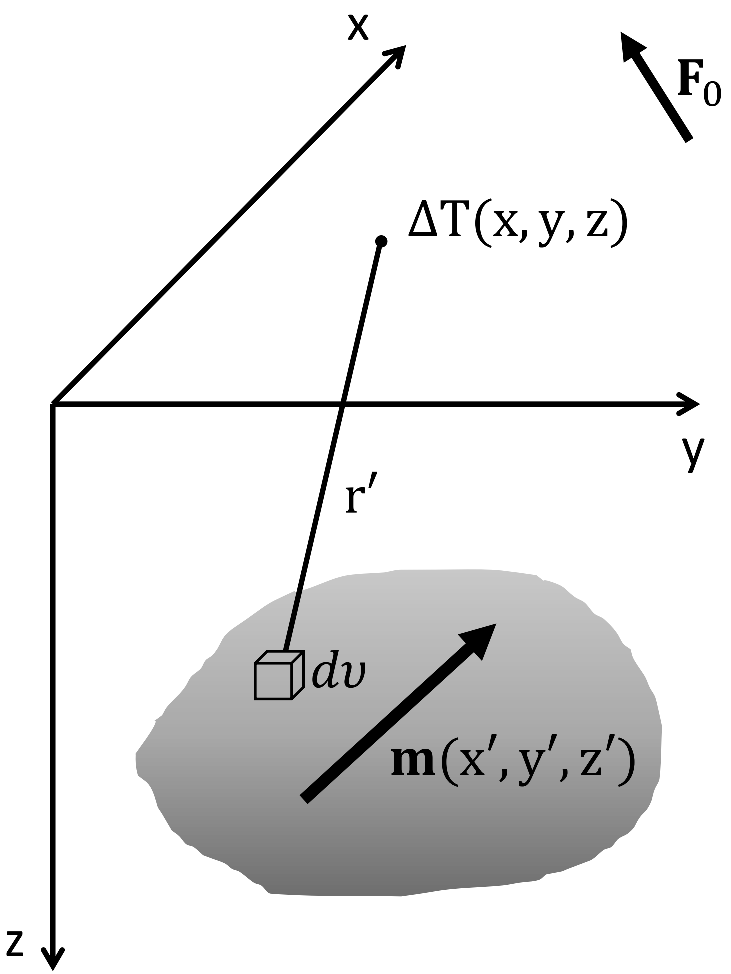
E, portanto a **Anomalia de campo total**...

Matematicamente, é representada pela expressão

$$\Delta T(x, y, z) = \widehat{\mathbf{F}_0}.\mathbf{B}(x, y, z)$$

Campo magnético gerado pela fonte geológica

Fonte magnética 3D



E, portanto a **Anomalia de campo total**...

Matematicamente, é representada pela expressão

$$\Delta\mathrm{T}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z}) = \widehat{\mathbf{F}_0}.\,\mathbf{B}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z})$$

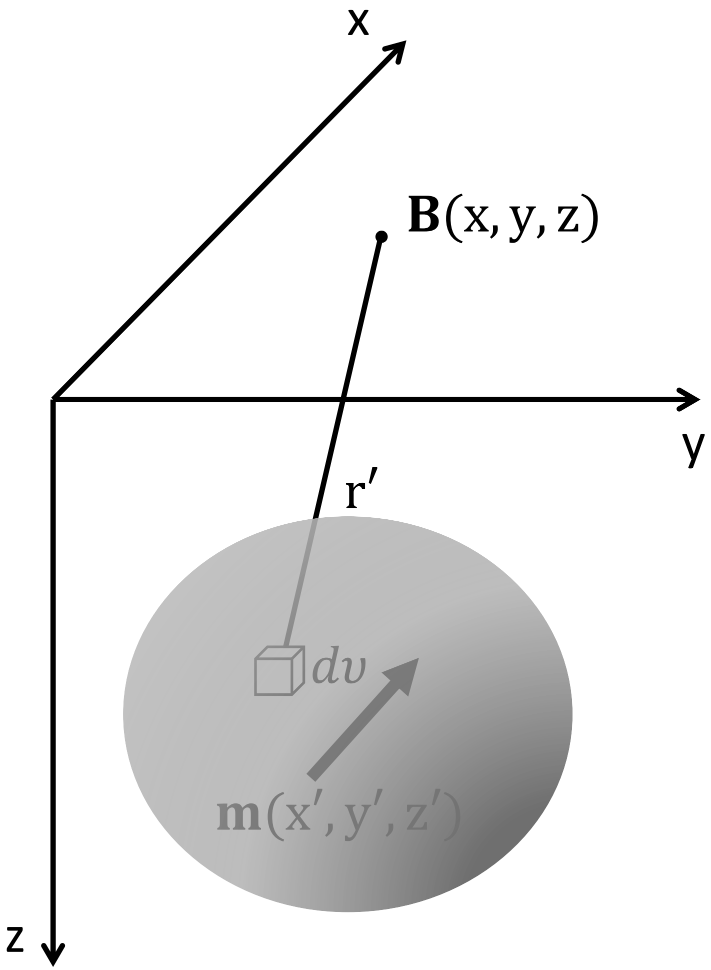
Anomalia de campo total

Projeção do campo gerado pela fonte na direção do campo geomagnético.

Exemplos com geometrias simples

1. Campo magnético e anomalia de campo total de uma esfera

Fonte magnética 3D



O campo magnético gerado por uma fonte arbitrária, em regiões livres de correntes, é dado por

$$\mathbf{B}(\mathrm{x,y,z}) = -\nabla\Gamma(\mathrm{x,y,z})$$

em que

$$\Gamma(\mathrm{x,y,z}) = -\gamma_{\mathrm{m}} \iiint_{v} \mathbf{m}(x',y',z').\boldsymbol{\nabla}\frac{1}{\mathrm{r}\prime}dv'$$

que é o potencial magnético escalar.

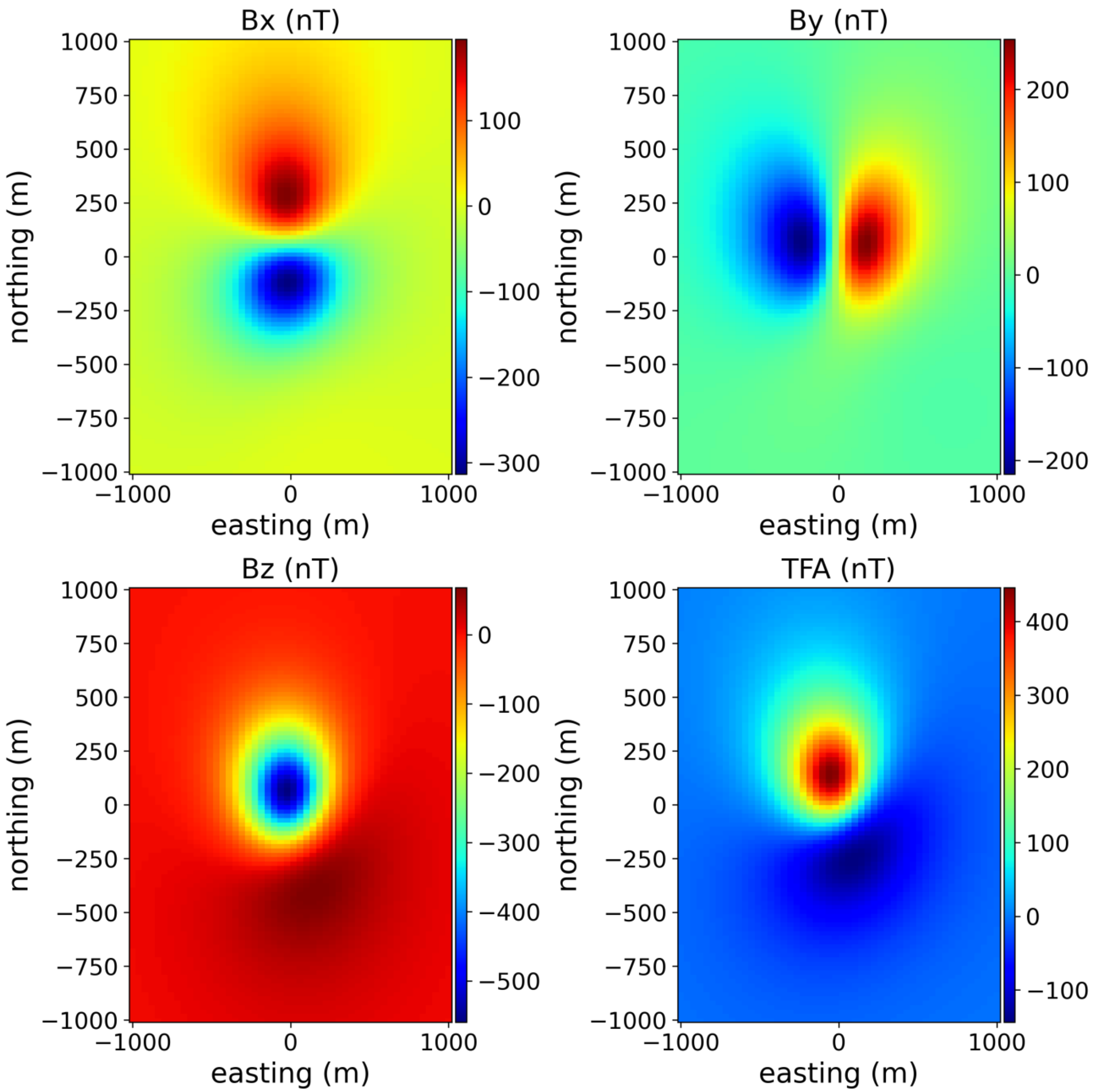
$$\frac{1}{\mathrm{r}\prime} = \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}$$ **Função escalar**

$$\mathbf{m}(x',y',z') = \begin{bmatrix} m_x(x',y',z') \\ m_y(x',y',z') \\ m_z(x',y',z') \end{bmatrix}$$ **Vetor magnetização**

$$\Delta\mathrm{T}(\mathrm{x,y,z}) = \widehat{\mathbf{F}_0}.\mathbf{B}(\mathrm{x,y,z})$$

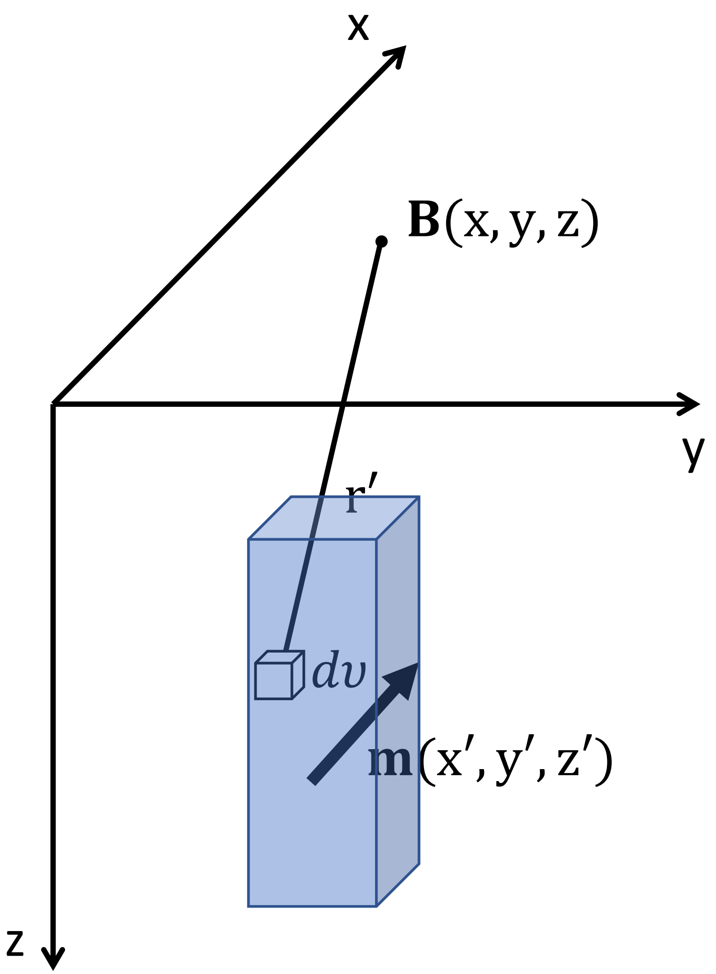
Anomalia de campo total

Efeito de uma esfera magnetizada (Hemisfério Sul)



2. Campo magnético e anomalia de campo total de um prisma

Fonte magnética 3D



O campo magnético gerado por uma fonte arbitrária, em regiões livres de correntes, é dado por

$$\mathbf{B}(\mathrm{x,y,z}) = -\nabla\Gamma(\mathrm{x,y,z})$$

em que

$$\Gamma(\mathrm{x,y,z}) = -\gamma_\mathrm{m} \iiint_v \mathbf{m}(x',y',z').\boldsymbol{\nabla}\frac{1}{\mathrm{r}\prime}dv'$$

que é o potencial magnético escalar.

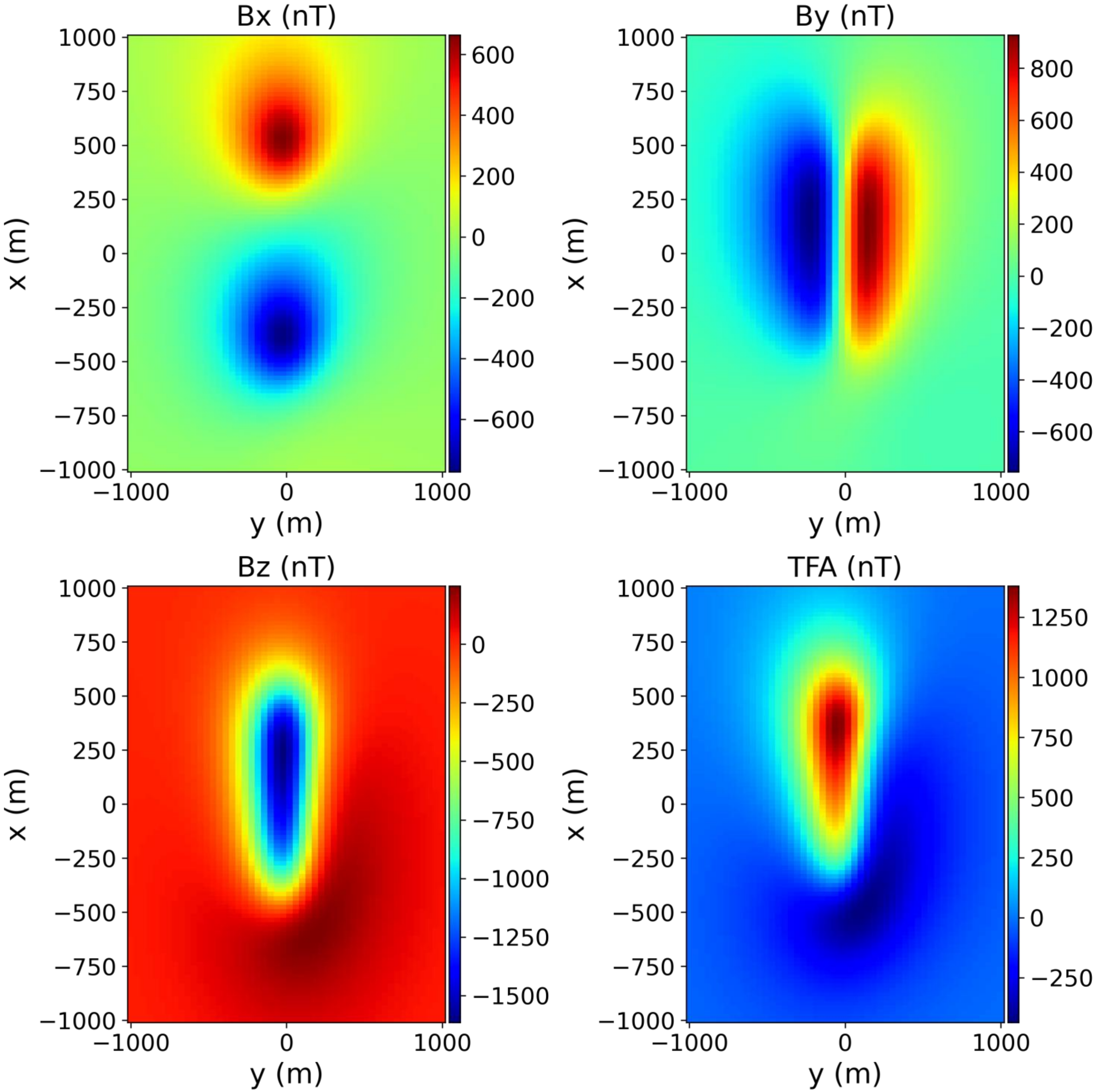
$$\frac{1}{\mathrm{r}\prime} = \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}$$ **Função escalar**

$$\mathbf{m}(x',y',z') = \begin{bmatrix} m_x(x',y',z') \\ m_y(x',y',z') \\ m_z(x',y',z') \end{bmatrix}$$ **Vetor magnetização**

$$\Delta\mathrm{T}(\mathrm{x,y,z}) = \widehat{\mathbf{F}_0}.\mathbf{B}(\mathrm{x,y,z})$$

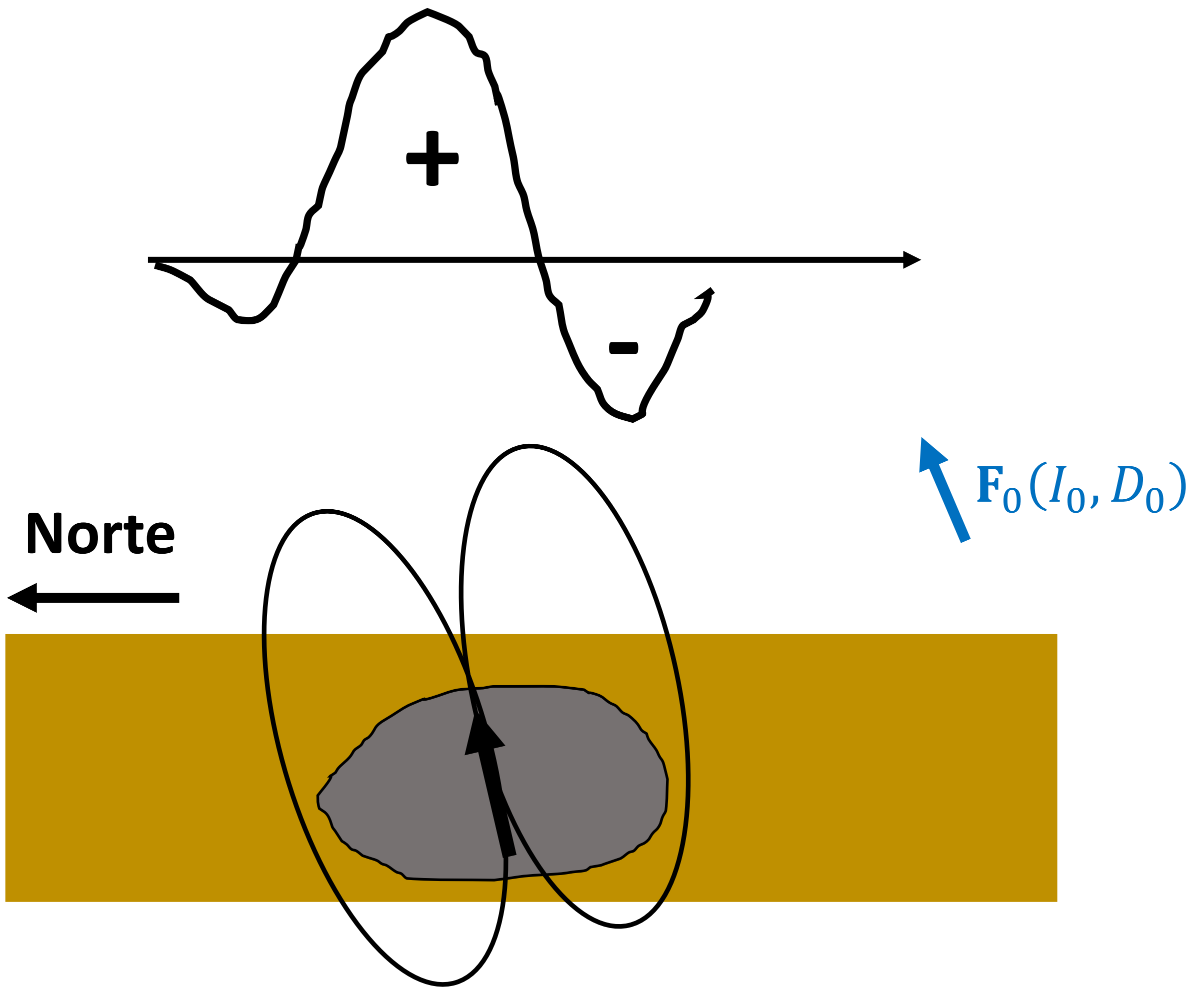
Anomalia de campo total

Efeito de um prisma magnetizado (Hemisfério Sul)

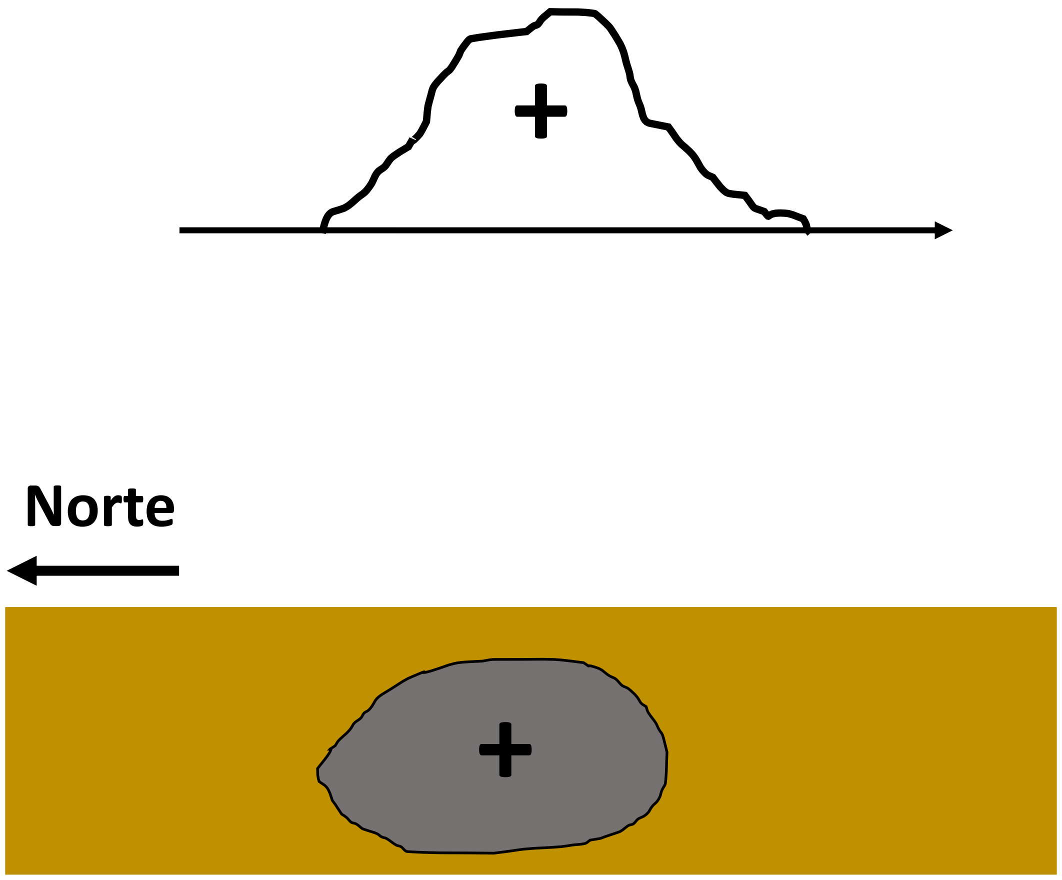


Em resumo:

Dados magnéticos



Dados de gravidade



Uma vez que a gente saiba calcular os efeitos gravitacionais e magnéticos, conseguimos modelar cenários que nos auxiliam a interpretar os dados.

Inversão de dados potenciais

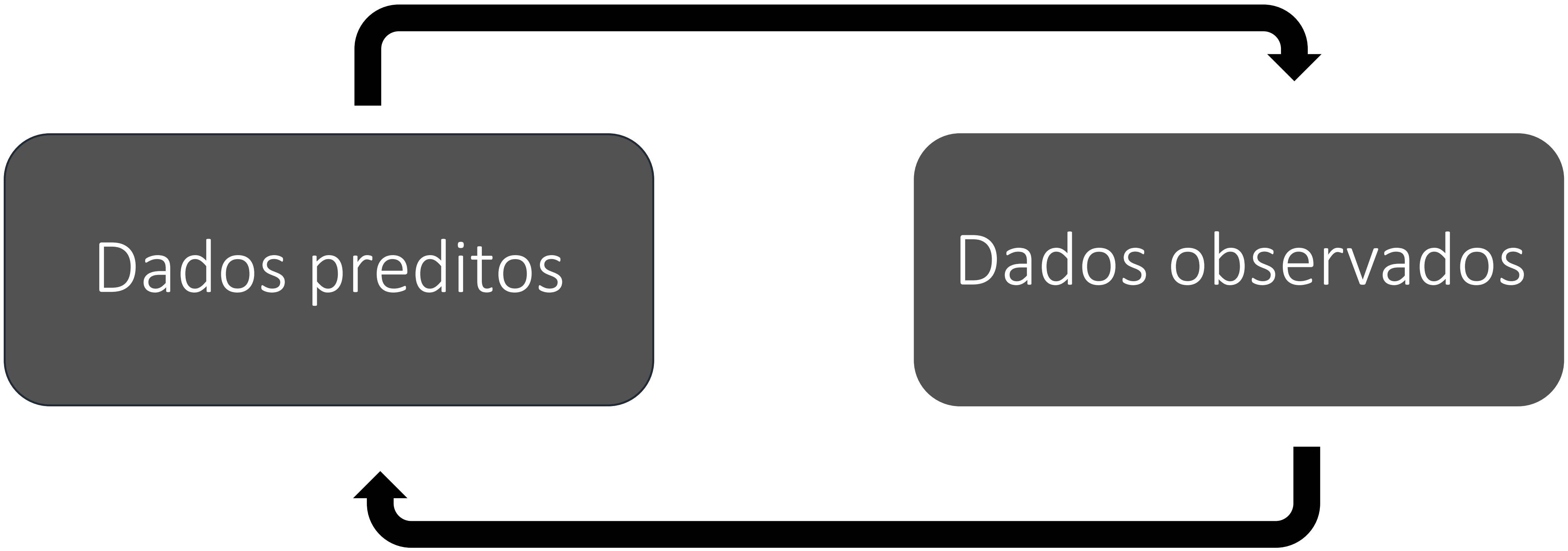
Problema direto: *"Sintoniza" manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.

Dados preditos

Dados observados

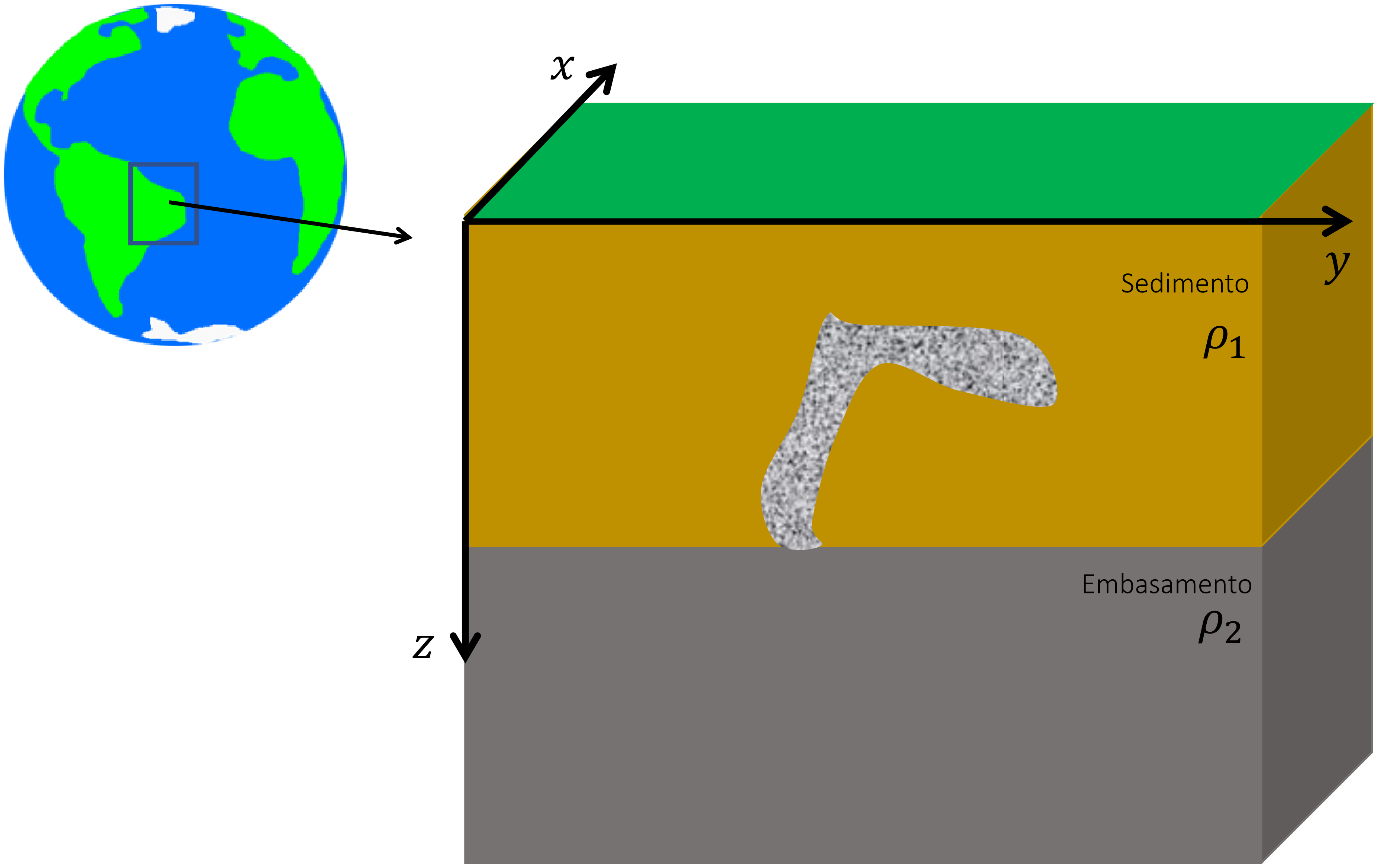
Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.



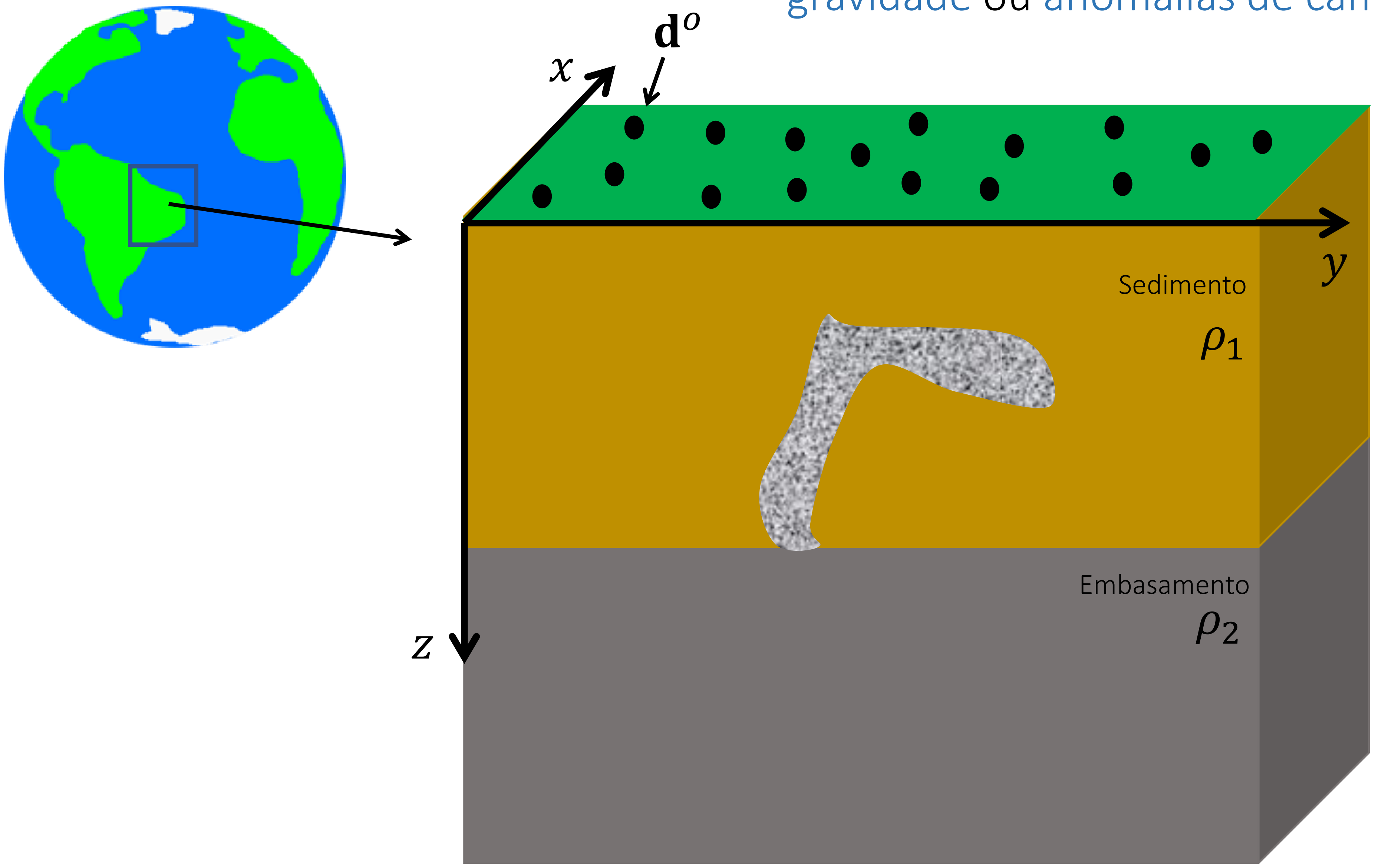
Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Como funciona isso?



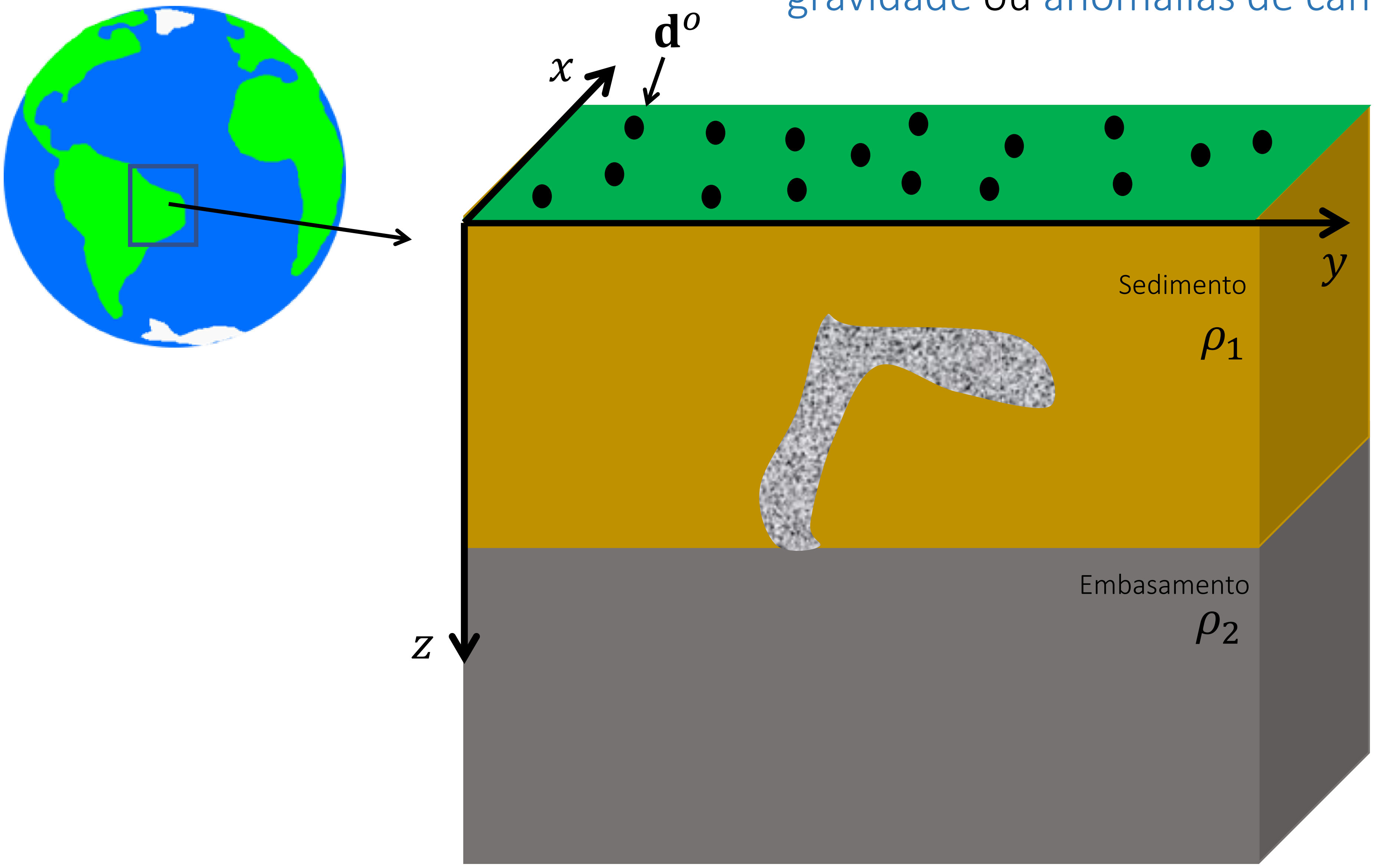
Como funciona isso?

Um conjunto de dados observados, que podem ser dados de distúrbio de gravidade ou anomalias de campo total



Como funciona isso?

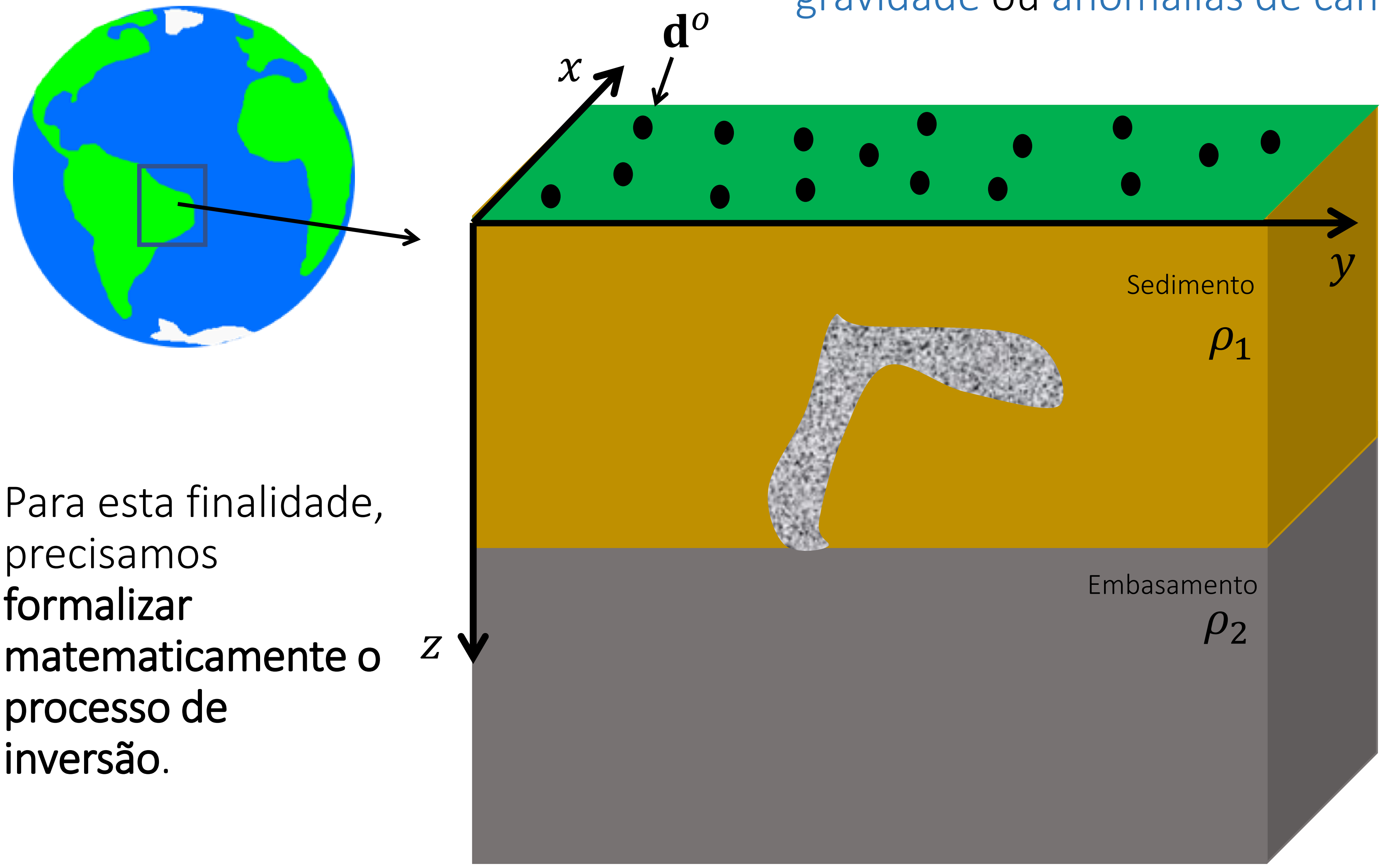
Um conjunto de dados observados, que podem ser dados de distúrbio de gravidade ou anomalias de campo total



A partir destas medições podemos estimar as propriedades físicas da fonte geológica, ou até mesmo a sua geometria.

Como funciona isso?

Um conjunto de dados observados, que podem ser dados de distúrbio de gravidade ou anomalias de campo total

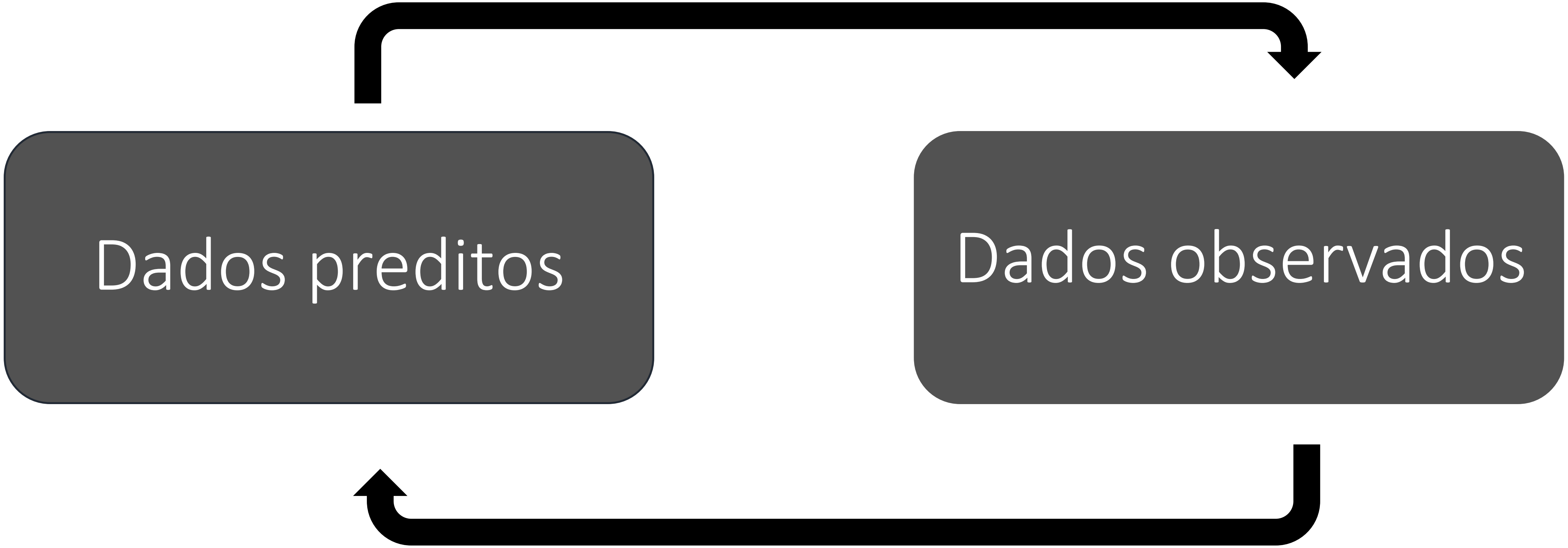


A partir destas medições podemos estimar as propriedades físicas da fonte geológica, ou até mesmo a sua geometria.

Para esta finalidade, precisamos **formalizar matematicamente o processo de inversão**.

Formulação matemática de um problema inverso

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.



Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.

Dados observados: dados medidos na superfície da Terra.

Dados preditos

$\mathbf{d}^{o}$

Dados observados

Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.

Dados observados: dados medidos na superfície da Terra.

$$\mathbf{d}^p = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^o$$

Dados observados

Dados preditos: dados gerados pelo modelo, que é dada pela relação física e matemática do problema a ser resolvido.

Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.

Vetor de parâmetros: conjunto de variáveis que descrevem o modelo.

Dados observados: dados medidos na superfície da Terra.

$$\mathbf{d}^{p} = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^{o}$$

Dados observados

Dados preditos: dados gerados pelo modelo, que é dada pela relação física e matemática do problema a ser resolvido.

Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Problema direto: *“Sintoniza” manualmente* o conjunto de parâmetros e compara com os dados observados.

Vetor de parâmetros: conjunto de variáveis que descrevem o modelo.

Dados observados: dados medidos na superfície da Terra.

$$\mathbf{d}^{p} = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^{o}$$

Dados observados

Dados preditos: dados gerados pelo modelo, que é dada pela relação física e matemática do problema a ser resolvido.

Problema inverso: *estima automaticamente* o conjunto de parâmetros a partir dos dados observados.

Linear

Não linear

$$\mathbf{d}^p = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^o$$

Dados observados

$$\mathbf{d}^p = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^o$$

Dados observados

$$\mathbf{d}^o = \begin{bmatrix} \mathrm{d}^{1o} \\ \vdots \\ \mathrm{d}^{No} \end{bmatrix}$$

[N x 1]

Vetor de dados observados

$$\mathbf{d}^p = \begin{bmatrix} \mathrm{d}^{1p} \\ \vdots \\ \mathrm{d}^{Np} \end{bmatrix}$$

[N x 1]

Vetor de dados preditos

$\mathbf{d}^p = f(\mathbf{p})$

Dados preditos

$\mathbf{d}^o$

Dados observados

$$\mathbf{d}^o = \begin{bmatrix} \mathrm{d}^{1o} \\ \vdots \\ \mathrm{d}^{No} \end{bmatrix}$$

[N x 1]

Vetor de dados observados

$$\mathbf{d}^p = \begin{bmatrix} \mathrm{d}^{1p} \\ \vdots \\ \mathrm{d}^{Np} \end{bmatrix}$$

[N x 1]

Vetor de dados preditos

$$\mathbf{d}^p = f(\mathbf{p})$$

Dados preditos

$$\mathbf{d}^o$$

Dados observados

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathrm{p}^{1} \\ \vdots \\ p^{M} \end{bmatrix}$$

[M x 1]

Vetor de parâmetros

$$\mathbf{d}^o = \begin{bmatrix} \mathrm{d}^{1o} \\ \vdots \\ \mathrm{d}^{No} \end{bmatrix}$$

[N x 1]

Vetor de dados observados

O que procuramos na inversão é um conjunto de parâmetros que minimize a distância entre o vetor de dados preditos e o vetor de dados observados!

O que procuramos na inversão é um conjunto de parâmetros que minimize a distância entre o vetor de dados preditos e o vetor de dados observados!

Este processo é realizado através de um processo de otimização, no qual minimizamos uma função que mede a norma Euclidiana entre os dois vetores.

O que procuramos na inversão é um conjunto de parâmetros que minimize a distância entre o vetor de dados preditos e o vetor de dados observados!

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Função de ajuste

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Minimizar esta função quer dizer que:

$$\boldsymbol{\nabla}\psi(\mathbf{p}) = 0$$

Tomarmos o gradiente desta função e igualarmos a zero.

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Minimizar esta função quer dizer que:

$$\boldsymbol{\nabla}\psi(\mathbf{p}) = 0$$

$$\boldsymbol{\nabla}\psi(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \partial_{\mathrm{p}^1}\psi(\mathbf{p}) \\ \vdots \\ \partial_{\mathrm{p}^M}\psi(\mathbf{p}) \end{bmatrix}$$

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Uma vez que esta função é minimizada:

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Uma vez que esta função é minimizada:

$$(\mathbf{G}^T\mathbf{G})\mathbf{p}^{\#} = G^T\mathbf{d}^o$$

Estimador de mínimos quadrados (Linear)

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Uma vez que esta função é minimizada:

$$(\mathbf{G}^T\mathbf{G})\mathbf{p}^{\#} = G^T\mathbf{d}^o$$

Estimador de mínimos quadrados (Linear)

$$\left(\mathbf{G}^{kT}\boldsymbol{G}^k\right)\Delta\mathbf{p}^k = \mathbf{G}^{kT}\left[\mathbf{d}^o - f\left(\mathbf{p}^k\right)\right]$$

Método de Gauss-Newton (Não linear)

Função de ajuste

$$\psi(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - f(\mathbf{p})\|_2^2$$

Uma vez que esta função é minimizada:

$$(\mathbf{G}^T\mathbf{G})\mathbf{p}^\# = G^T\mathbf{d}^o$$

Matriz de sensibilidade: matriz de dimensão N x M, que expressa a sensibilidade do i-ésimo dado predito em relação ao j-ésimo parâmetro do modelo.

Estimador de mínimos quadrados (Linear)

$$\left(\mathbf{G}^{kT}\boldsymbol{G}^k\right)\Delta\mathbf{p}^k = \mathbf{G}^{kT}\left[\mathbf{d}^o - f\left(\mathbf{p}^k\right)\right]$$

Método de Gauss-Newton (Não linear)

No entanto, devido a própria natureza do problema inverso, os dados não são suficientes para descrever os fenômenos físicos que surgem na Geofísica.

No entanto, devido a própria natureza do problema inverso, os dados não são suficientes para descrever os fenômenos físicos que surgem na Geofísica.

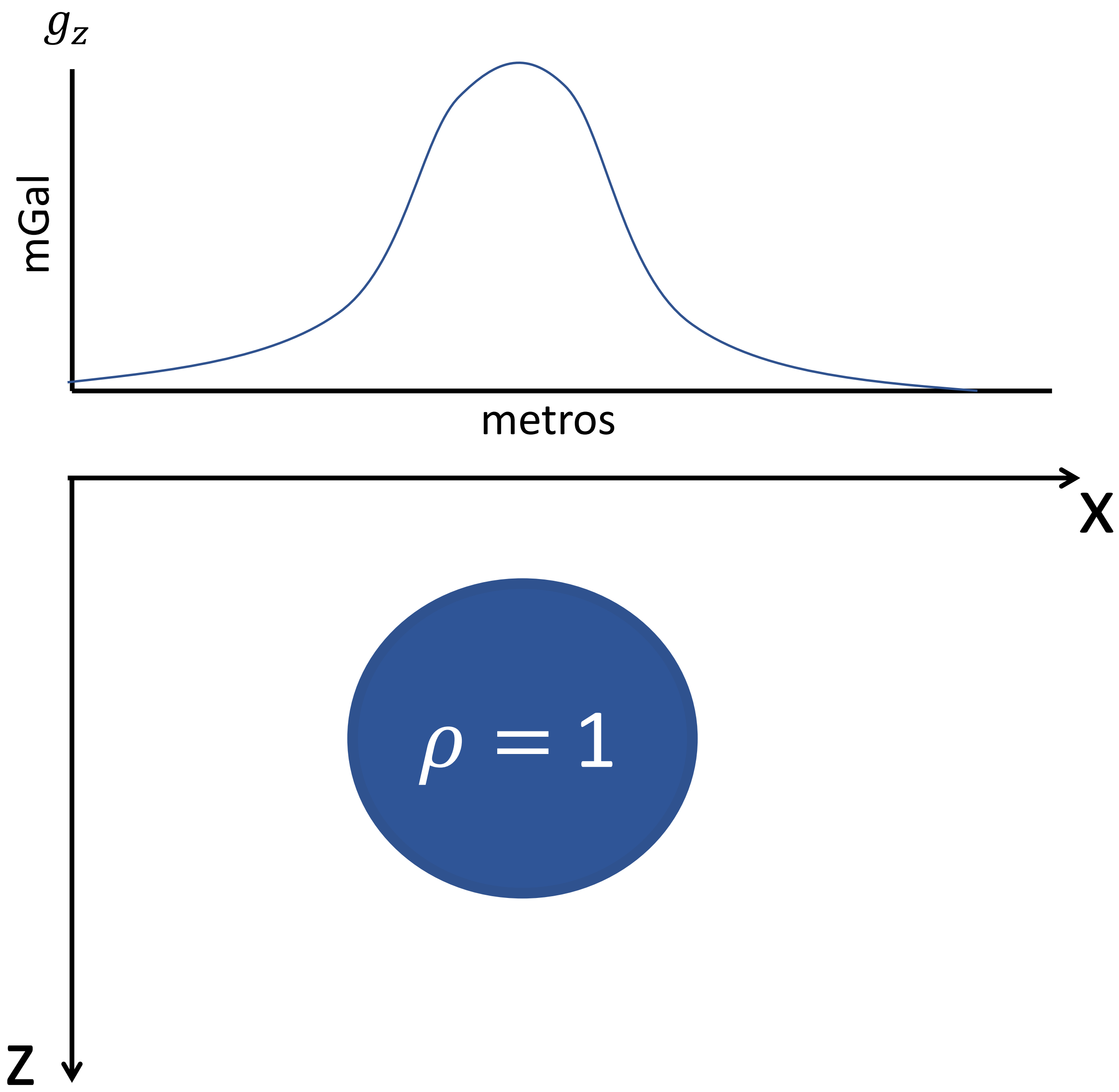
Por este motivo, dizemos que o problema é mal-posto. Ou seja, ele sofre com três fatores: falta de unicidade, instabilidade ou inexistência da solução.

Falta de unicidade: é a existência de diversos conjuntos de parâmetros que descrever um mesmo conjunto de dados

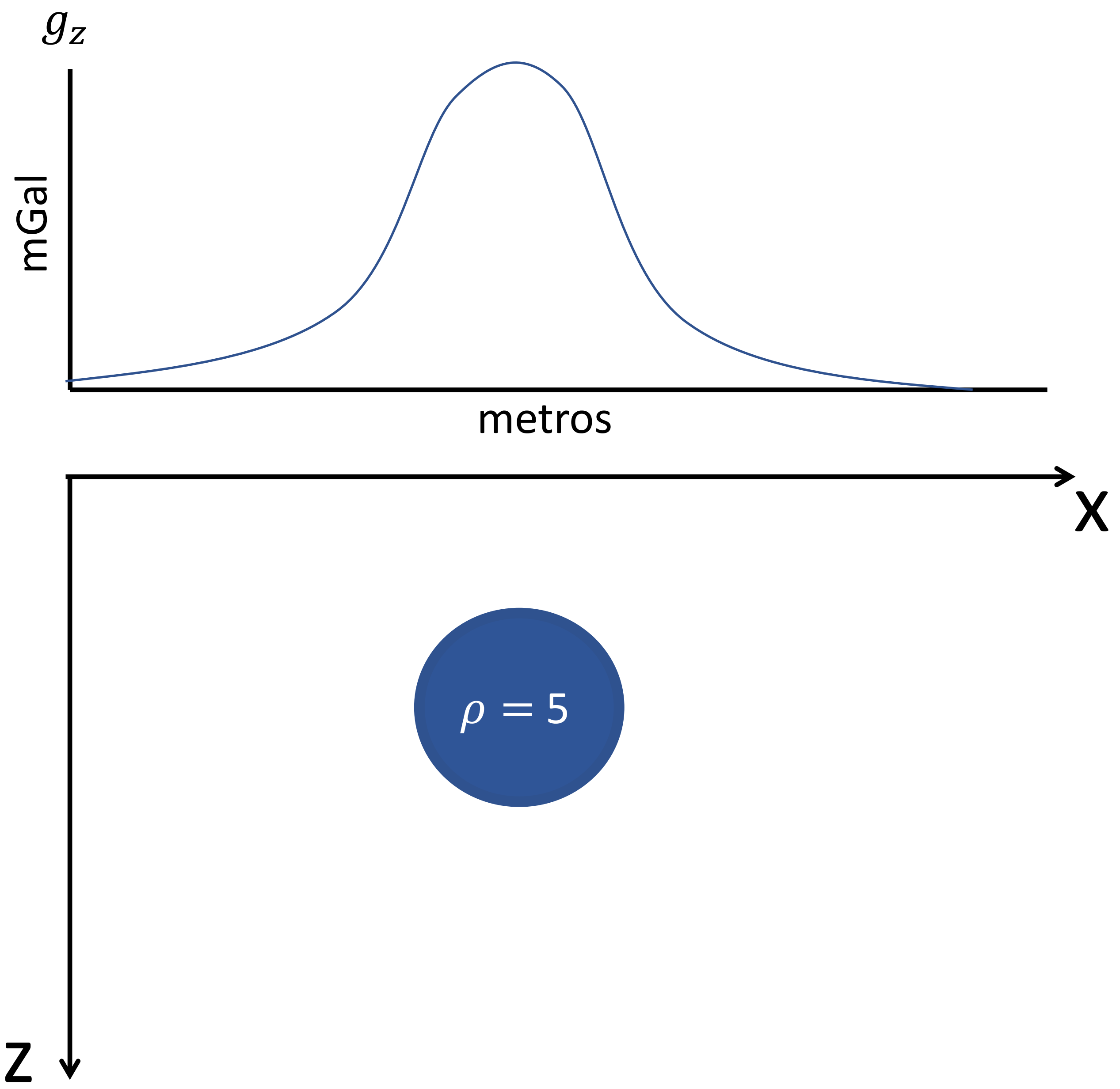
Falta de unicidade: é a existência de diversos conjuntos de parâmetros que descrever um mesmo conjunto de dados

Instabilidade: uma pequena perturbação nos dados gera conjuntos diferentes de parâmetros

Ambiguidade em Geofísica



Ambiguidade em Geofísica



Para contornar este problema devemos adicionar mais informações ao nosso problema inverso (i.e. informações a priori)

Para contornar este problema devemos adicionar mais informações ao nosso problema inverso (i.e. informações a priori)

Estas informações podem ser de origem matemática ou geológica, e isto é o que chamamos de regularização!

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Somamos a função de ajuste o que chamamos de função regularizadora, em que μ é o que chamamos de parâmetro de regularização.

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Exemplo: Regularização de Tikhonov de ordem 1 (Suavidade)

Função Objetivo

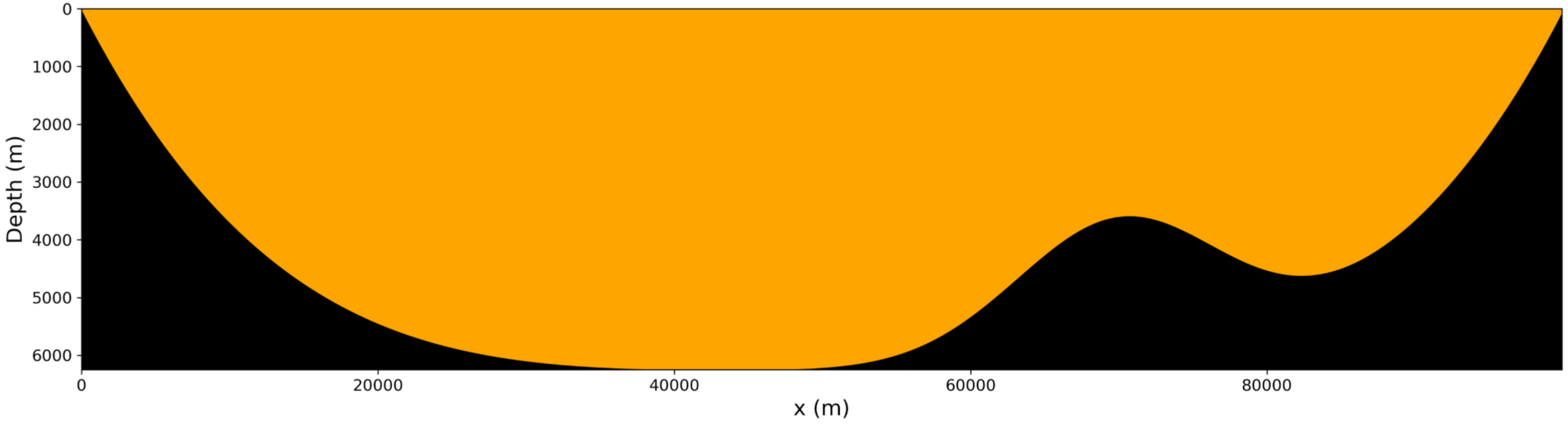
$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Exemplo: Regularização de Tikhonov de ordem 1 (Suavidade)

$$\theta(\mathbf{p}) = \mathbf{p}^T\mathbf{R}^T\mathbf{R}\mathbf{p}$$

Esta vínculo impõe que parâmetros adjacentes variem suavemente.

Função Objetivo



Esta vínculo impõe que parâmetros adjacentes variem suavemente.

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Uma vez que esta função é minimizada:

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Uma vez que esta função é minimizada:

$$(\mathbf{G}^T\mathbf{G} + \mu\mathbf{R}^T\mathbf{R})\mathbf{p}^{\#} = G^T\mathbf{d}^o$$

Estimador de mínimos quadrados regularizado (Linear)

Função Objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \psi(\mathbf{p}) + \mu\theta(\mathbf{p})$$

Uma vez que esta função é minimizada:

$$(\mathbf{G}^T\mathbf{G} + \mu\mathbf{R}^T\mathbf{R})\mathbf{p}^{\#} = G^T\mathbf{d}^o$$

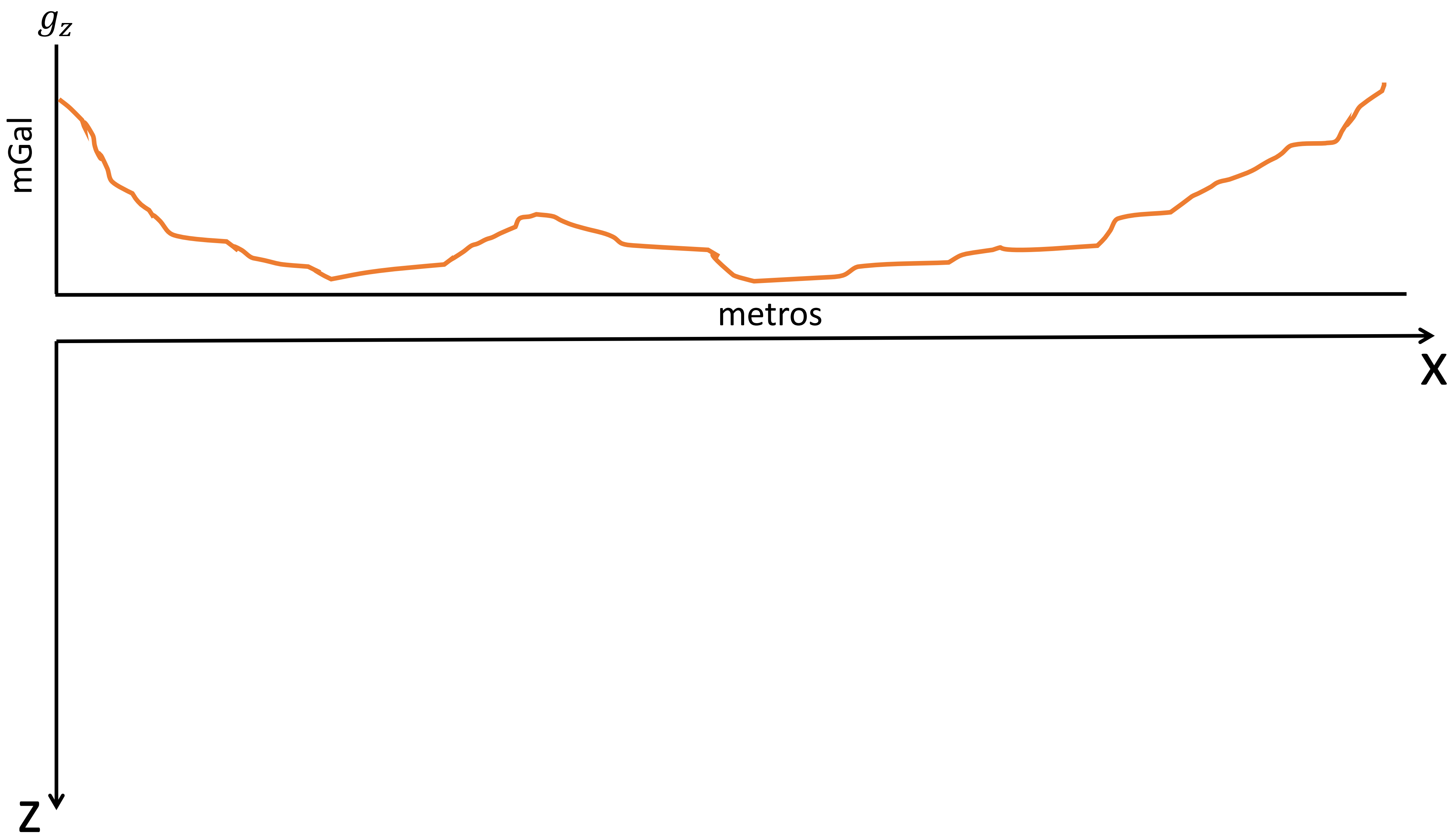
Estimador de mínimos quadrados regularizado (Linear)

$$\left(\mathbf{G}^{kT}\boldsymbol{G}^k + \mu\mathbf{R}^T\mathbf{R}\right)\Delta\mathbf{p}^k = \mathbf{G}^{kT}\left[\mathbf{d}^o - f\left(\mathbf{p}^k\right)\right] - \mu\mathbf{R}^T\mathbf{R}\mathbf{p}^k$$

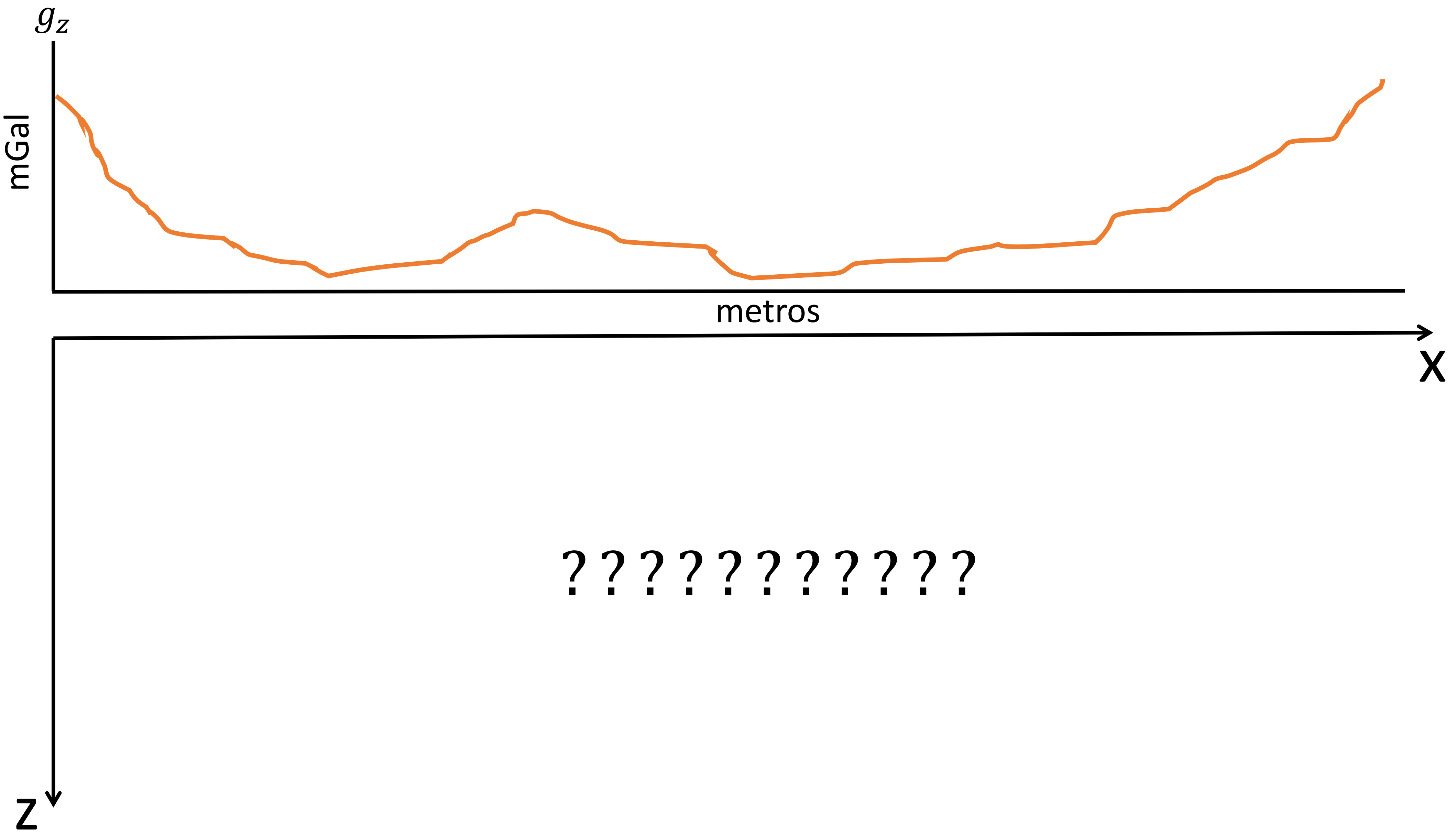
Método de Gauss-Newton regularizado (Não linear)

Exemplo. Estimativa do relevo do embasamento de uma Bacia sedimentar

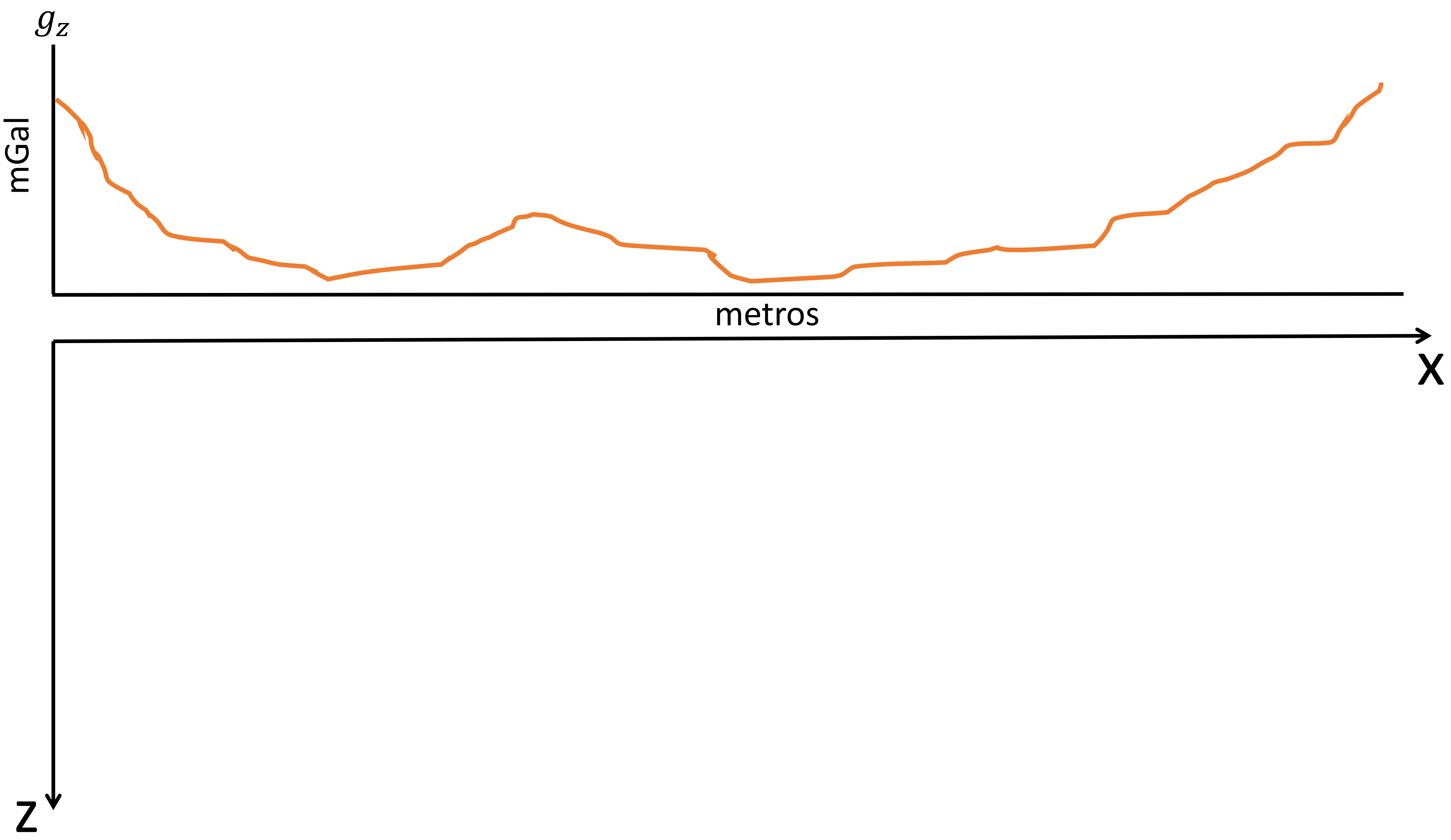
Bacia sedimentar 2D



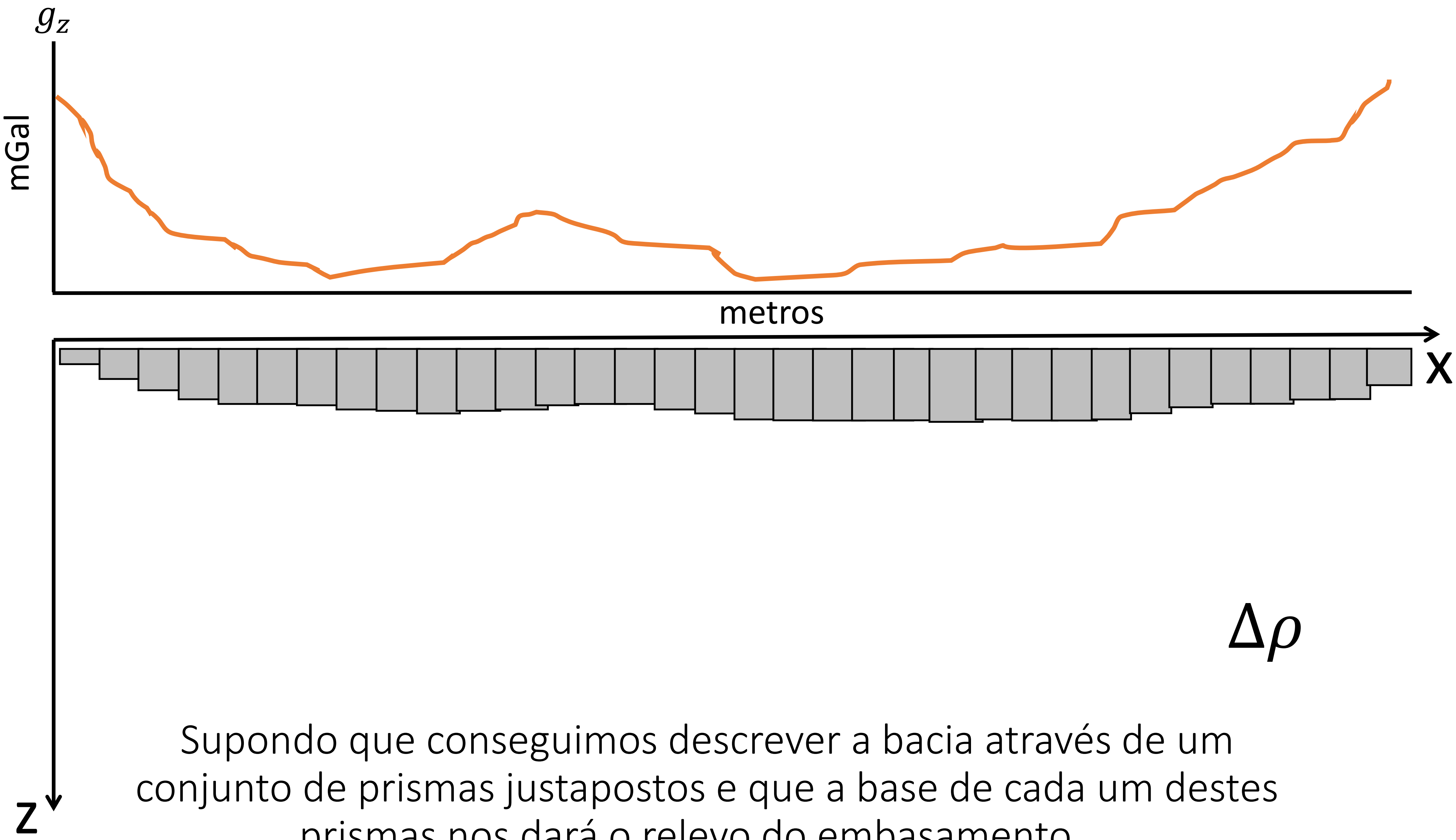
Bacia sedimentar 2D



Bacia sedimentar 2D

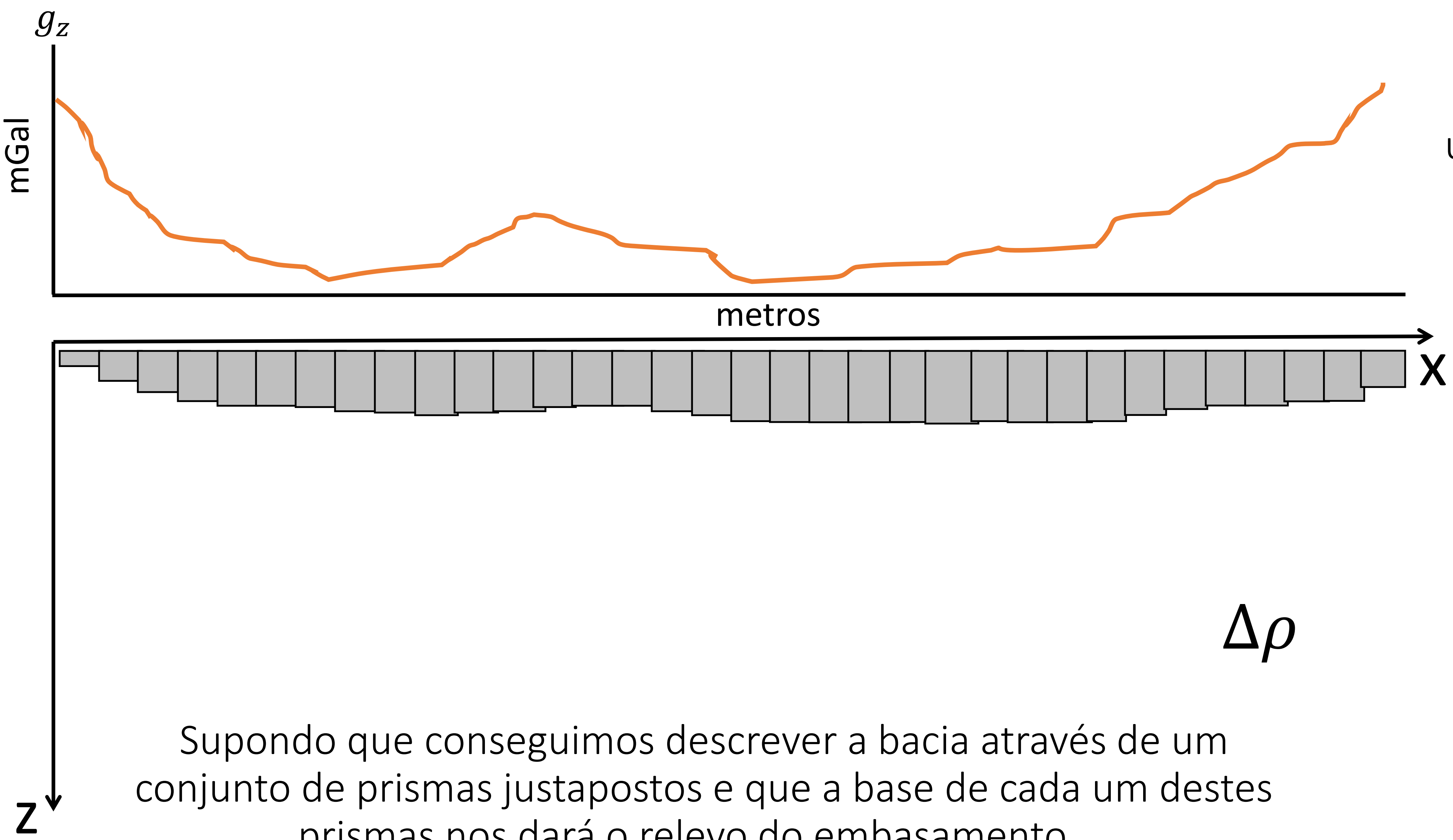


Bacia sedimentar 2D



Supondo que conseguimos descrever a bacia através de um conjunto de prismas justapostos e que a base de cada um destes prismas nos dará o relevo do embasamento....

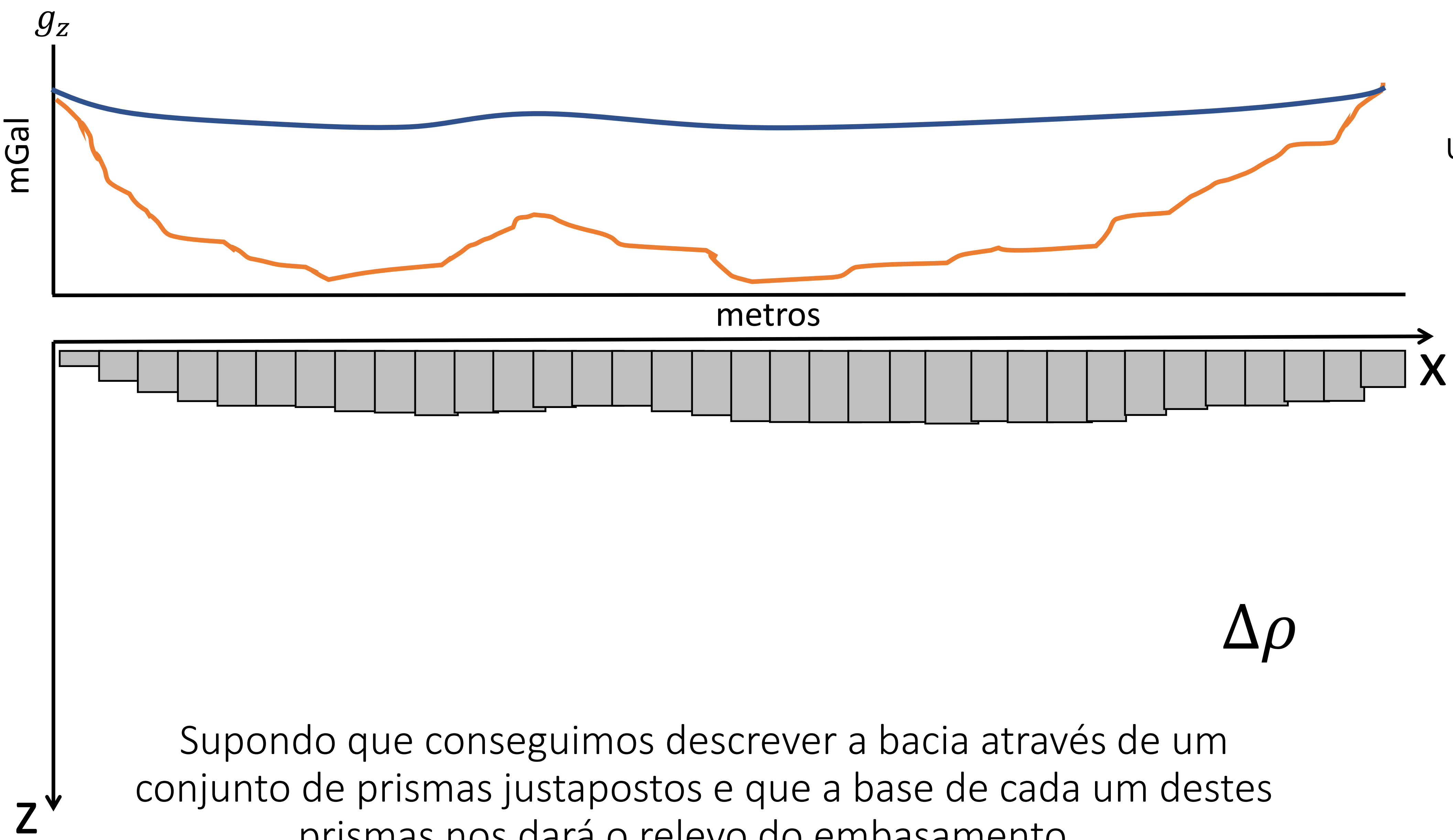
Bacia sedimentar 2D



...através de um processo matemático (**PESADO**)!

Supondo que conseguimos descrever a bacia através de um conjunto de prismas justapostos e que a base de cada um destes prismas nos dará o relevo do embasamento....

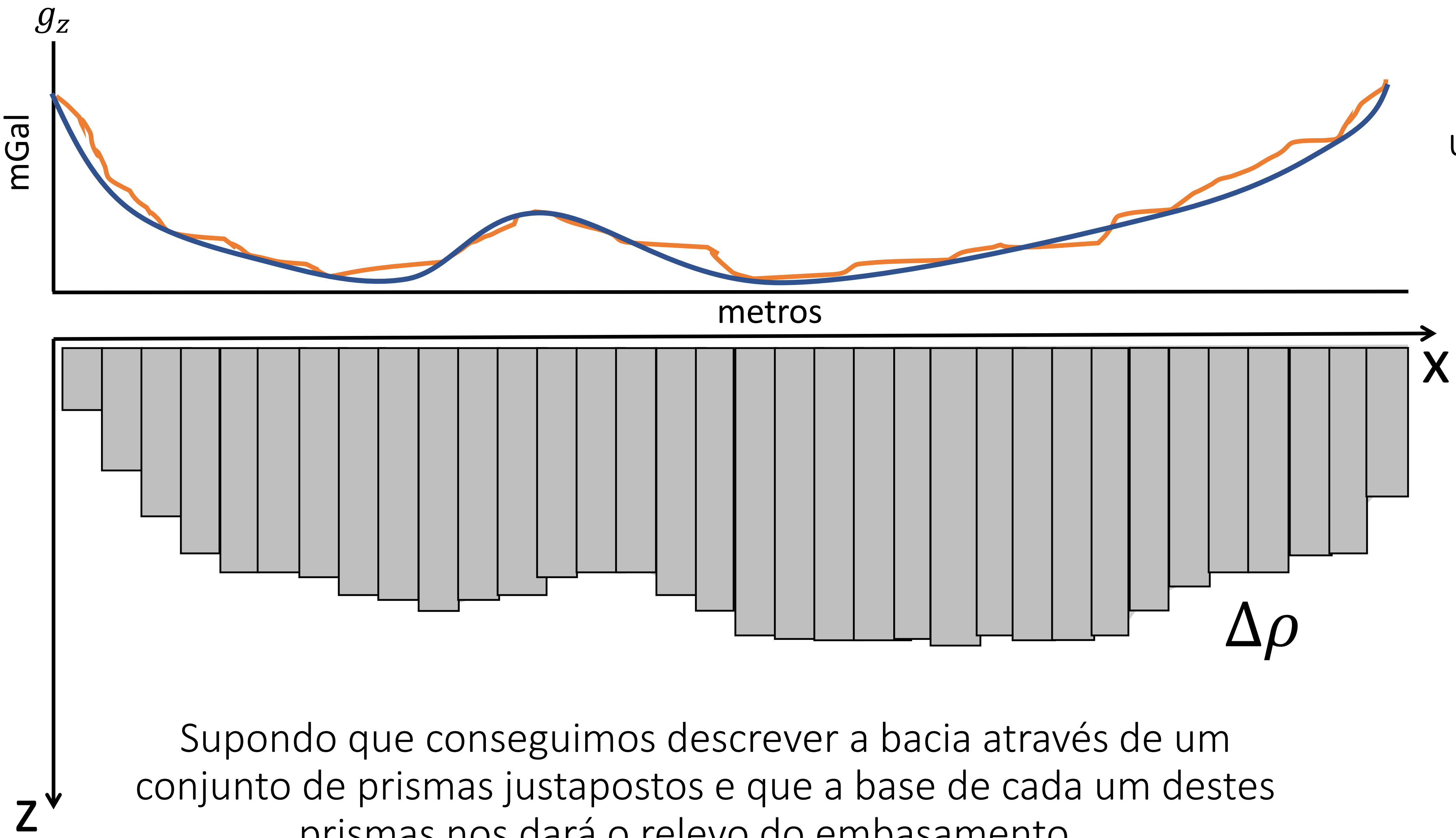
Bacia sedimentar 2D



...através de
um processo
matemático
(**PESADO**)!

Supondo que conseguimos descrever a bacia através de um conjunto de prismas justapostos e que a base de cada um destes prismas nos dará o relevo do embasamento....

Bacia sedimentar 2D

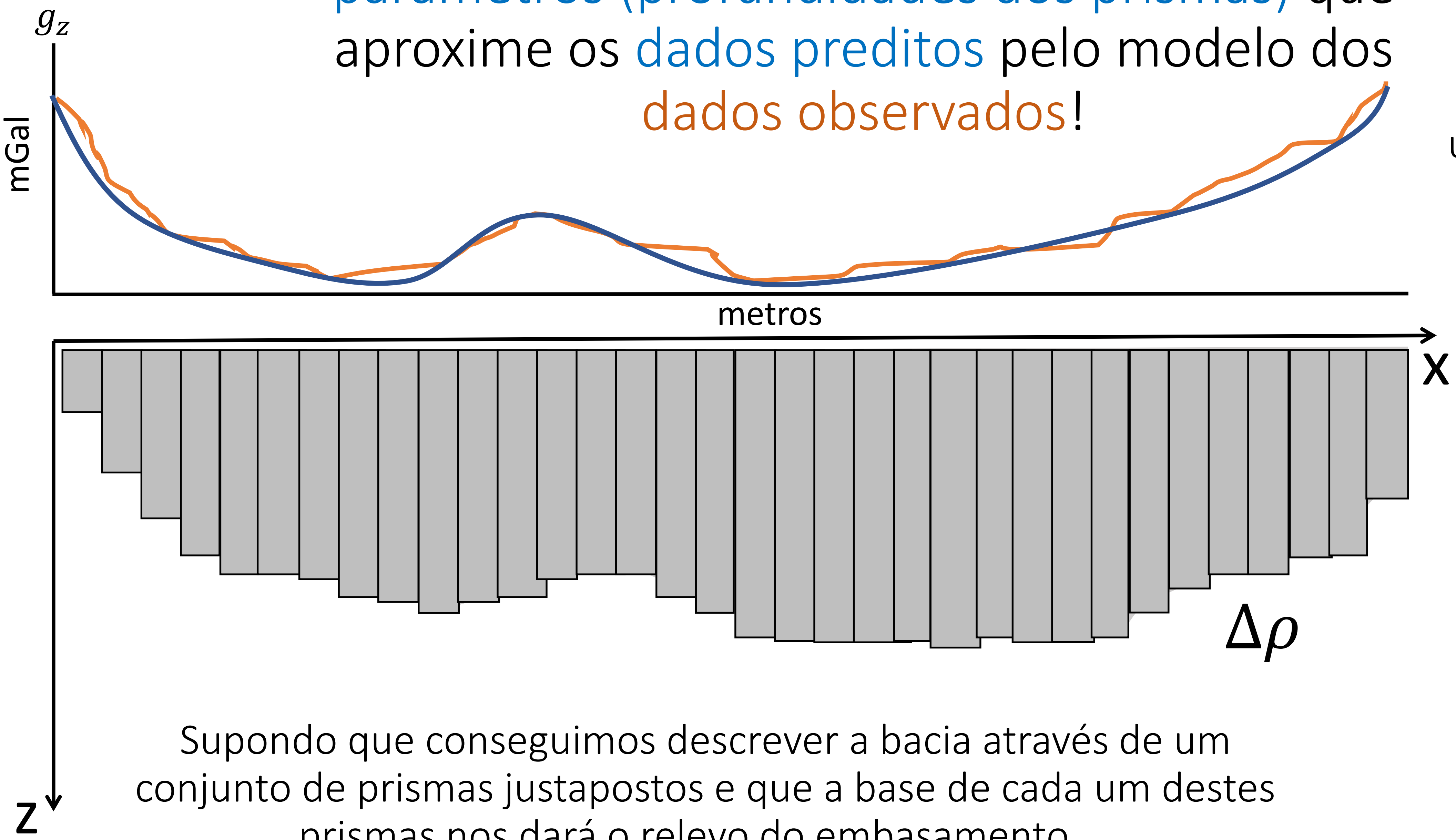


...através de um processo matemático (**PESADO**)!

Supondo que conseguimos descrever a bacia através de um conjunto de prismas justapostos e que a base de cada um destes prismas nos dará o relevo do embasamento....

Bacia sedimentar 2D

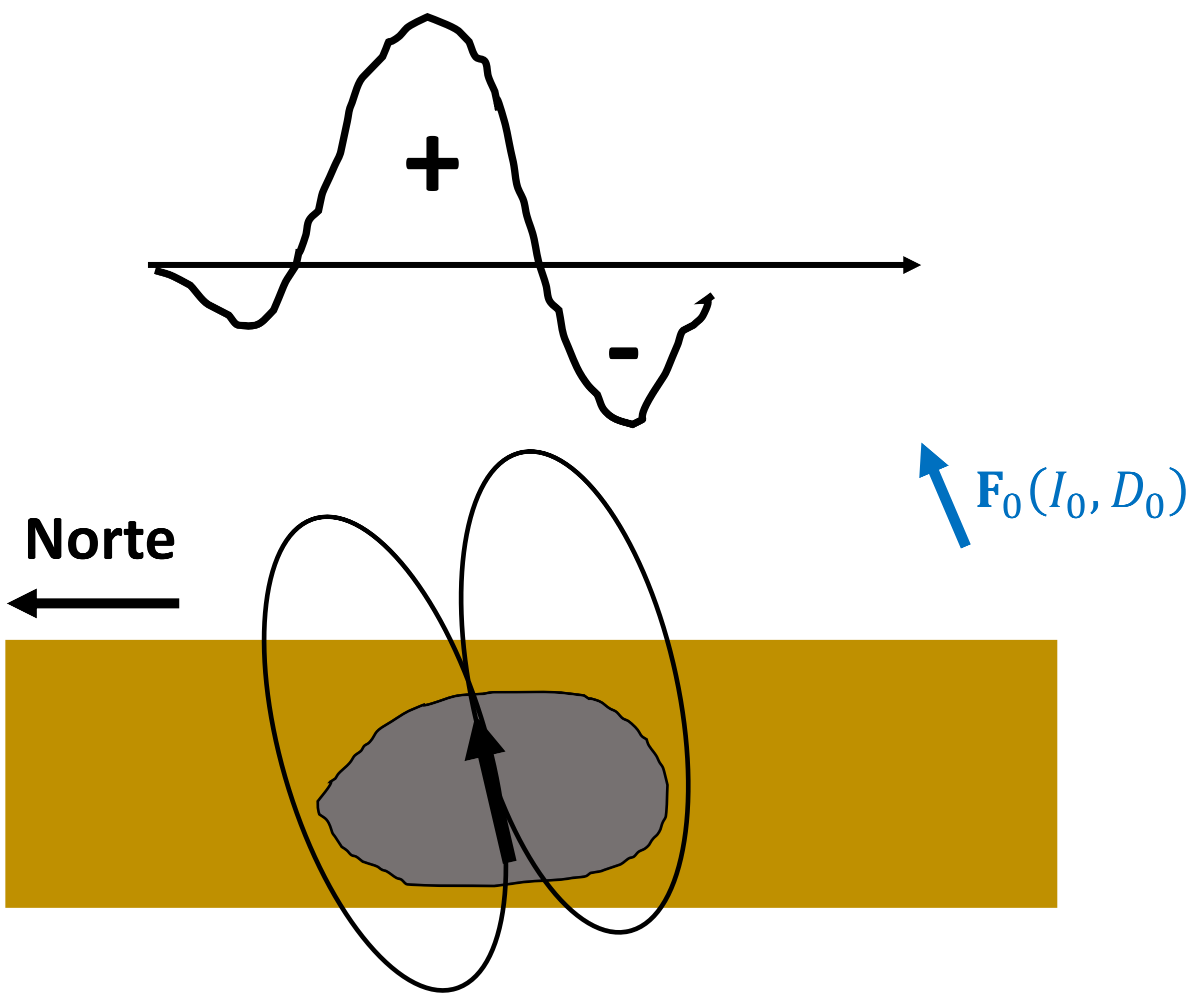
Conseguimos encontrar um conjunto de parâmetros (profundidades dos prismas) que aproxime os dados preditos pelo modelo dos dados observados!



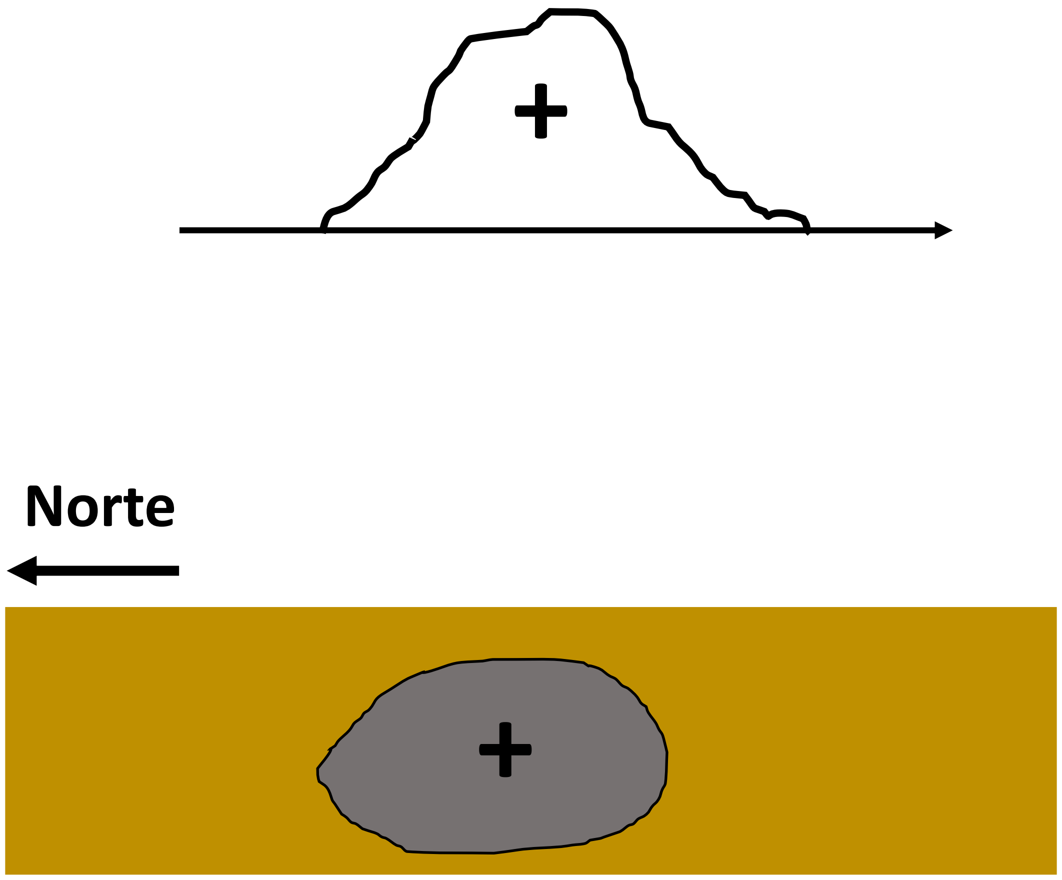
...através de um processo matemático (**PESADO**)!

Supondo que conseguimos descrever a bacia através de um conjunto de prismas justapostos e que a base de cada um destes prismas nos dará o relevo do embasamento....

Dados magnéticos



Dados de gravidade



Como utilizar o problema inverso para processarmos dados potenciais?

OBRIGADO!