

...

Processamento do Sinal Sísmico

ProSeisSN

Jandyr Travassos
LAMEMO/COPPE/UFRJ
2º Semestre de 2024

• **Módulo 1** •

Estrutura do Curso I

Formato de aulas discursivas combinadas com aplicação prática em forma dinâmica.

Exercícios práticos como principal forma de treinamento, complementados por referência à WWW e à Literatura.

Avaliação de desempenho por meio de projetos, eventualmente complementados por um exame escrito.

Estrutura do Curso II

As principais ferramentas e aplicativos computacionais, complementados com referências à Literatura.

Será utilizada a linguagem Python, utilizando **JupyterLab/Jupyter Notebooks**.

Processamento na nuvem com **Binder**, ou em máquina local, utilizando container **conda**.

GitHub para controle de versão e documentação.

Discord para comunicação entre o pessoal envolvido no curso.

Estrutura do Curso III

Serão utilizados alguns **Modules** e **Packages** de modo a estender o alcance computacional.

- **Python libraries:** `numpy`, `scipy`, `matplotlib`, ...
- **ObsPy** e **Geopsy**.
- ...

Estrutura do Curso IV

- Utilizaremos o método **sísmico** para imagear, ou modelar a distribuição das propriedades físicas no interior da Terra, por meio de medições, o **sinal**, realizadas no entorno da superfície terrestre.
- O processamento do sinal dar-se-á pela aplicação de filtros, algoritmos e transformações para torná-lo mais claro nos **domínios** do **tempo/espço** e da **frequência**.
- Utilizaremos dados reais e numéricos, ou modelados numericamente, de maneira intensiva, permitindo um processo de aprendizagem dinâmica e prática.

Estrutura do Curso V

O curso terá o formato de aulas discursivas combinadas com aplicação prática em um processo dinâmico.

- Aulas discursivas e práticas (computacionais).
- Exercícios práticos com dados reais e numéricos
- Avaliação através de **Projetos** e listas de exercícios. Pode haver a aplicação de exame escrito.

A Geofísica

Provê uma representação da Terra por meio de imagens ou modelos da distribuição das propriedades físicas e a correspondência com a realidade física objetiva.

Os Métodos Geofísicos

A Geofísica é um método indireto.

Uma janela ampla e rasa:
Bingham Canyon Copper Mine,
Salt Lake City ($r=4.5$ km, $p=1.2$ km).

As perfurações são mais profundas, transversalmente limitadas. Kola Superdeep Borehole: 12262 m, $\phi = 23$ cm.
Ex: Mineralização de urânio.



Os Métodos Geofísicos

A Geofísica é um método indireto, que pode produzir uma **imagem**, ou um **modelo**, ou uma representação de uma realidade.

Uma **imagem**, ou um **modelo** são intrinsicamente ambíguos e incompletos.

A intervenção direta não possui ambiguidade e é completa.



Os Métodos Geofísicos

A ligação entre a medição, o **sinal** e a propriedade física é feita com a Física Matemática.

O entendimento do dado é atingido realizando o processamento do **sinal**.

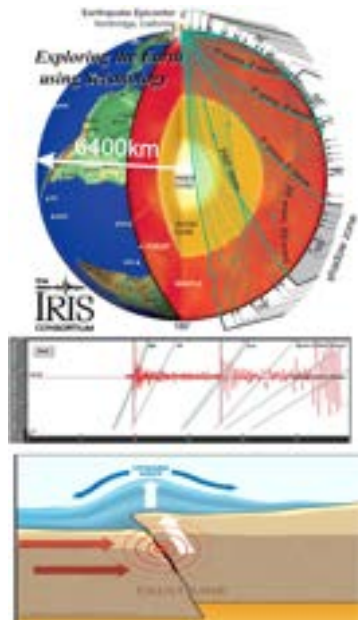
Os produtos da geofísica são: imagens, modelos, mapas etc.

O que se quer? Parâmetro em (x,y,z) Imagem-Modelo	O que se mede? Parâmetro em $(x,y,z=0)$ Dados
Density	Gravity
Elastic Parameters	Seismic Wavefields
Susceptibility	Magnetic Fields
Conductivity	Electric Potential
Modelo	Dados

Física matemática
Inversão, Imagem

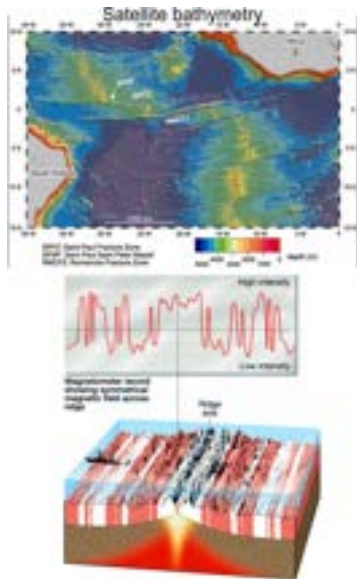
Os Métodos Geofísicos

- Propagação do campo elástico através da Terra: a Sismologia.
- Sensores estáticos: estações sismológicas.
- Produto Modelo da Terra.



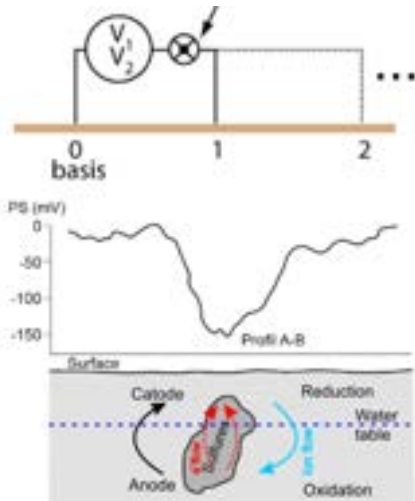
Os Métodos Geofísicos

- Variação do campo magnético crustal remanente: o Geo-Magnetismo.
- Sensores móveis a bordo de navios.
- Produto Abertura da cadeia meso-oceânica.

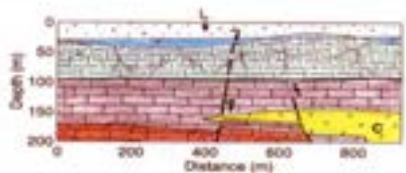
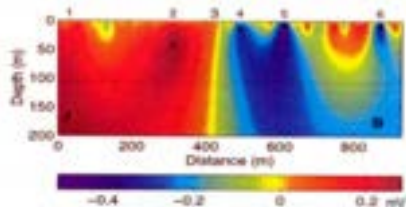
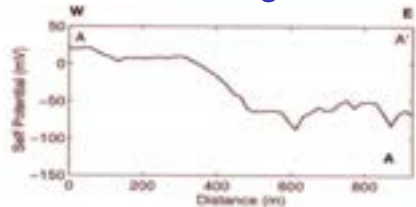


As Fontes de Energia

- A fonte de energia pode ser natural: Potencial espontâneo.
- Correntes elétricas são produzidas por processos eletroquímicos: sulfetos $\sim -100\text{mV}$ e movimento de água $\lesssim \pm 50\text{mV}$.



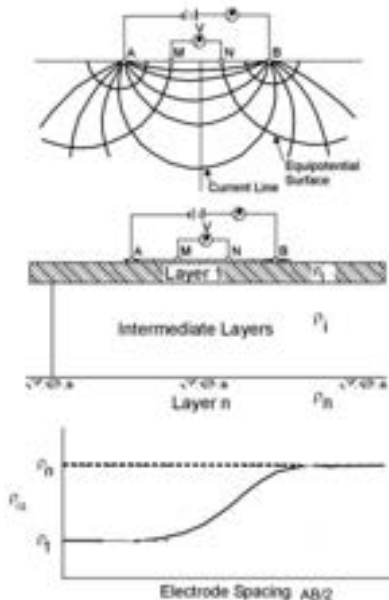
As Fontes de Energia



- Produto modelo geoeletrico.

As Fontes de Energia

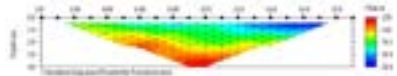
- Geralmente a fonte é controlada.
- A SEV (~ 1900): correntes AC de baixa frequência.
- Produto resistividade aparente ρ , representando a distribuição volumétrica da resistividade elétrica.



As Fontes de Energia



- Produto modelo geoeletrico
2-D/3-D.



As Fontes de Energia

- As fontes são utilizadas no ar, terra, ou água.
- As fontes podem ser impulsivas, ou contínuas.
- Nesses casos o método trabalha no domínio do tempo, ou da frequência.

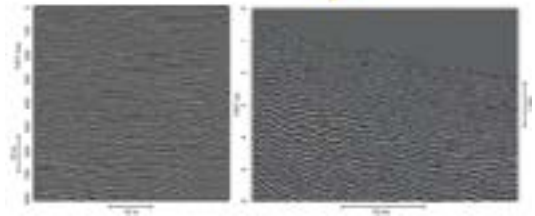
$$f = 1/t \text{ [Hz} \equiv 1/\text{s}]$$

$$\omega = 2\pi/T \text{ [Hz} \equiv \text{rad/s}]$$



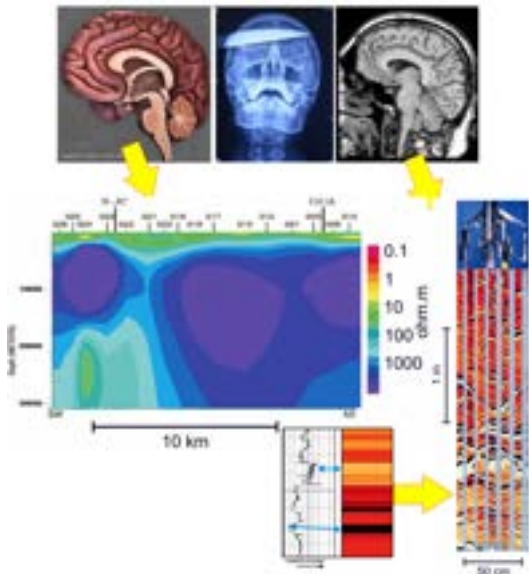
Os produtos

- Interpretação quantitativa: imagens, ou modelos.
- Processamento de dados \Rightarrow *imagem*: sísmica, GPR e LIDAR.



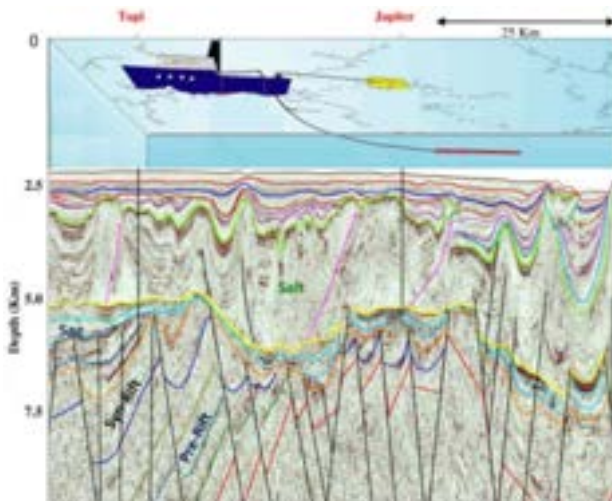
Os produtos

- Interpretação quantitativa: imagens, ou modelos.
- Modelagem numérica \Rightarrow *modelo*: métodos EM e potenciais.



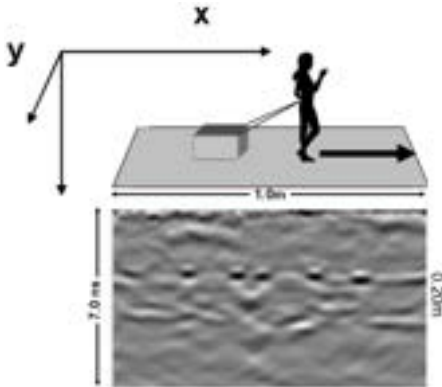
Os produtos

- Seção sísmica sobre lâmina d'água de 2.5 km, atingindo 10 km, mostrando os reservatórios de Tupi e Jupter, sob uma camada de sal entre 2.5 a 3.0 km.

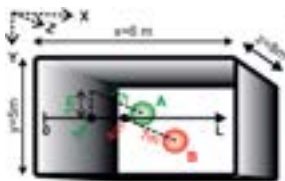


Os produtos

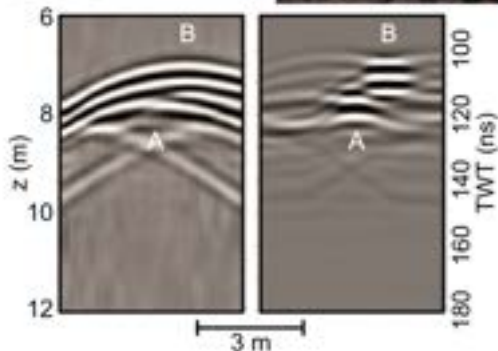
- Seção sobre piso de concreto.



Os produtos



- A modelagem numérica é amplamente utilizada.
- Teste de hipótese: 2 cavidades $\phi = 0.01\text{m}$ em halita.

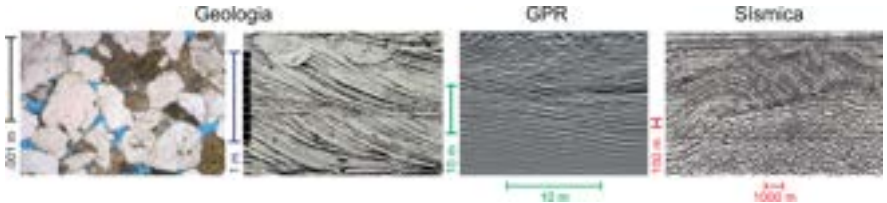


A Escala

- A métrica está condicionada ao comprimento de onda:

$$\lambda_{GPR} \sim 10^0 \text{m}; \lambda_{Seism} \sim 10^2 \text{m}$$

- λ_{GPR} determina a escala espacial.



O Movimento Ondulatório

Meio 1-D

A Onda Monofásica

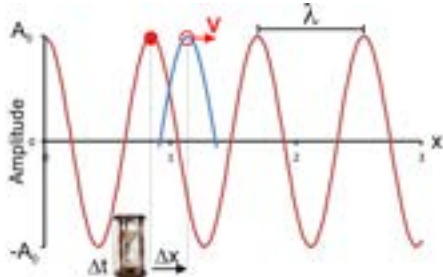
- Seja uma onda monofásica propagando-se na direção $x \rightarrow \infty$,

$$A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$$

onde

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

são o número de onda e a frequência angular.



A Onda Monofásica

- Seja uma onda monofásica propagando-se na direção $x \rightarrow \infty$,

$$A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$$

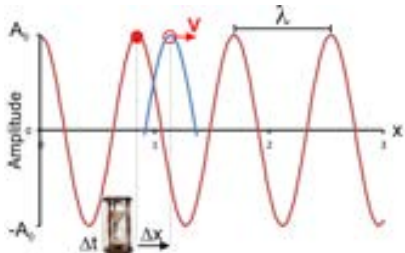
onde

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

são o número de onda e a frequência angular.

- $A(t, x)$ é solução da equação da onda 1-D,

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \left(\frac{\kappa}{\omega}\right)^2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0$$

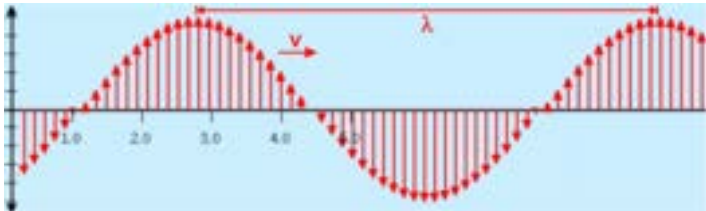


A Onda Monofásica

- Parâmetros da onda monofásica $A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\kappa} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$$

- A forma da onda propaga-se, com v_p , perpendicularmente ao movimento das "partículas".

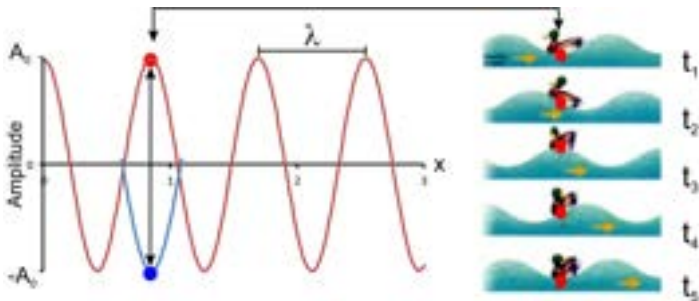


A Onda Monofásica

- Parâmetros da onda monofásica $A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\kappa} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$$

- A onda propaga-se dualmente, no espaço e no tempo.

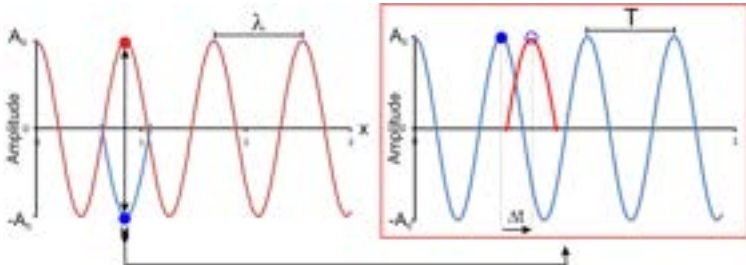


A Onda Monofásica

- Parâmetros da onda monofásica $A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\kappa} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$$

- A onda propaga-se dualmente, no espaço e no tempo.



A Onda Real

- Uma onda real *não* é monofásica: $A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$
- Uma onda real é uma soma de fases. Considere a soma de duas fases cujos parâmetros são: $\kappa \pm \Delta\kappa$ e $\omega \pm \Delta\omega$.

$$A(t, x) = A_0 \left[\cos((\kappa + \Delta\kappa) x - (\omega + \Delta\omega) t) + \cos((\kappa - \Delta\kappa) x - (\omega - \Delta\omega) t) \right]$$

com o auxílio da Álgebra...

A Onda Real

- Uma onda real *não* é monofásica: $A(t, x) = A_0 \cos(\kappa x - \omega t)$
- Uma onda real é uma soma de fases. Considere a soma de duas fases cujos parâmetros são: $\kappa \pm \Delta\kappa$ e $\omega \pm \Delta\omega$.

$$A(t, x) = A_0 [\cos((\kappa + \Delta\kappa)x - (\omega + \Delta\omega)t) + \cos((\kappa - \Delta\kappa)x - (\omega - \Delta\omega)t)]$$

com o auxílio da Álgebra...

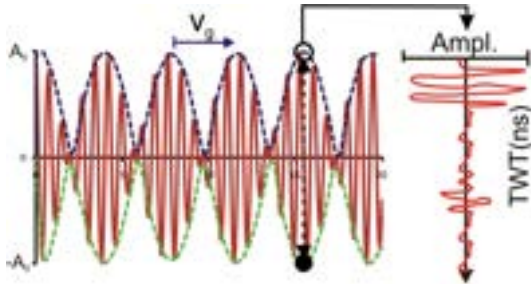
$$A(t, x) = 2 A_0 \cos(\kappa x - \omega t) \cos(\Delta\kappa x - \Delta\omega t)$$

A Onda Real

- O envelope (modulador das amplitudes) propaga-se com $v_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta\kappa}$ enquanto as 2 componentes o fazem com $v_p = \frac{\omega}{\kappa}$.

$$A(t, x) = 2 A_0 \cos(\kappa x - \omega t) \cos(\Delta\kappa x - \Delta\omega t)$$

- O sinal propaga-se com a modulação, resultado da soma de suas componentes harmônicas, com uma velocidade de grupo v_g .



$$A(t,x) = A_0 \cos(8x - 6t) \cos(0.5x - t)$$

◀ FIM ▶