INVERSÃO DE DADOS GPR

Emerson R. Almeida

Sumário

- O que é inversão?
- Problema direto
- Problema inverso
  - Análise qualitativa
  - Análise quantitativa
- Linearização e regularização
- Exemplos de aplicação

O que é “inversão”?

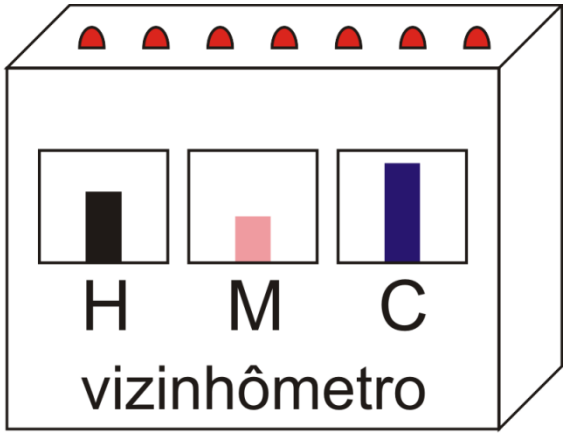
A inversão de dados é uma ferramenta matemática que permite obter um modelo aceitável a partir de um conjunto de dados adquiridos.

O que é “inversão”? – Análise quantitativa

- Considere a seguinte situação:
  - Seu vizinho está dando uma festa domingo à tarde.
  - Entediado, você inventa um passatempo: deduzir quantas pessoas estão na festa sem entrar na casa do vizinho.
  - Seus objetivos são saber:
    - Quantas pessoas estão lá;
    - Quantos homens;
    - Quantas mulheres;
    - Quantas são adultos e quantas são crianças.

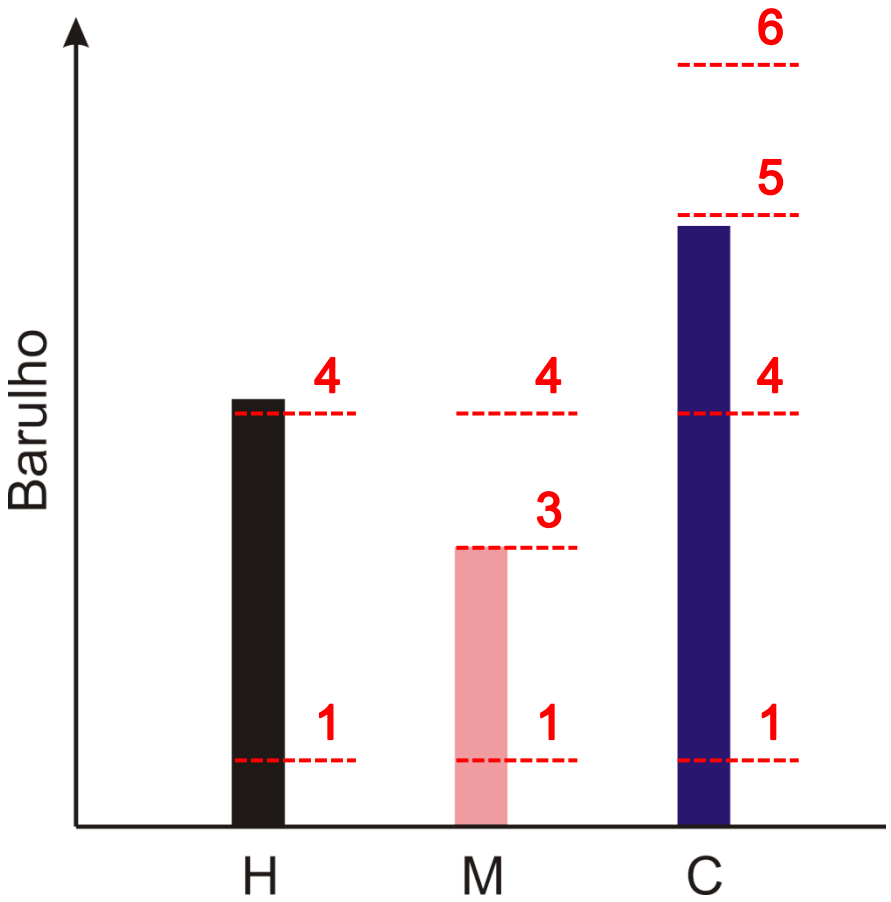
O que é “inversão”? – Análise quantitativa

- Mas como fazer isso? Você não vai sair da sua casa para ir até lá, então a única informação que você tem é o barulho.



O que é “inversão”? – Análise quantitativa

- Vozes masculinas, femininas e infantis possuem diferentes padrões.



- Você estima que 4 homens, 3 mulheres e 5 crianças poderiam produzir uma quantidade de barulho bastante similar à que você ouve.

O que é “inversão”? – Análise quantitativa

PARABÉNS!

VOCÊ ACABA DE EXECUTAR UMA INVERSÃO DE DADOS!!!

O que é “inversão”? – Análise quantitativa

- Dados mensuráveis:
  - Barulho
- Dados para comparação:
  - Diferenças nos padrões de voz
- Modelo Final:
  - Há 4 homens, 3 mulheres e 5 crianças na festa.

O que é “inversão”? – Análise quantitativa

- Qual a diferença entre a inversão com o “vizinhômetro” e os dados de GPR?

- Você vai testar vários modelos e comparar as respostas?

SIM !!!

- Você vai fazer tudo manualmente?

NÃO !!!

O que é “inversão”? – Análise qualitativa

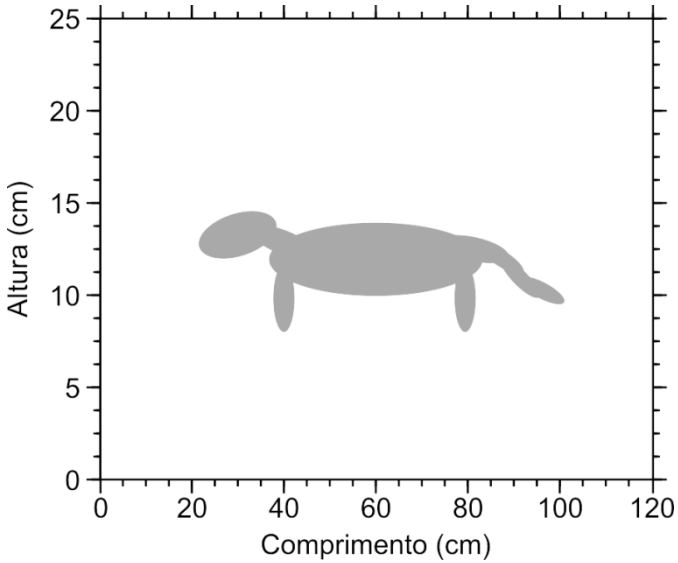
“*Holmes tirou do bolso uma grande folha de papel fino e desdobrou-a cuidadosamente sobre os joelhos. [...] O papel estava coberto de marcas de pegadas de um animal de pequeno porte. Patas de cinco dedos com vestígios de unhas longas, e as marcas inteiras não eram maiores do que uma colher de sobremesa.*

- *[...] Tentei reconstituí-lo com base nas medidas. Aqui estão quatro pegadas do local onde o animal estava imóvel. Como vê, não há mais de 40 centímetros entre as patas dianteiras e as traseiras. Acrescente a isso o comprimento do pescoço e da cabeça e verá que o animal tem cerca de 60 centímetros ao todo, provavelmente mais se tiver cauda. O animal estava em movimento; temos, portanto, a largura do seu passo. Em cada caso não ultrapassa 8 centímetros. Temos aqui a indicação de um corpo longo ao qual estão ligadas pernas curtas.*”

“O Corcunda” - Memórias de Sherlock Holmes.

O que é “inversão”? – Análise qualitativa

- Informações:
  - *Patas de cinco dedos com vestígios de unhas longas, não maiores do que uma colher de sobremesa;*
  - *40 centímetros entre as patas dianteiras e as traseiras;*
  - *60 centímetros considerando pescoço e cabeça;*
  - *Um pouco mais longo se tiver cauda;*
  - *Largura do passo não ultrapassa 8 centímetros, indicando pernas curtas.*



O que é “inversão”?

- Na Geofísica o processo é praticamente o mesmo.

- Utilizam-se cálculos matemáticos cuja complexidade depende do problema abordado.

- O processo de inversão é dividido em duas etapas:
  - Resolução do problema direto, ou modelagem dos dados – Correspondem aos dados teóricos, ou preditos.

  - Resolução do problema inverso – Corresponde à busca pela menor diferença entre os dados preditos e os dados medidos, ou dados observados.

Problema direto

- Os dados GPR dependem das propriedades constitutivas do meio.
- Permissividade dielétrica (ε): quantifica a capacidade que um material tem de se polarizar na presença de um campo elétrico. É dada em F/m e no vácuo vale 8.85×10^{-12} F/m.
- Condutividade elétrica (σ): quantifica capacidade que um material tem de conduzir corrente elétrica. É dada em S/m.
- Permeabilidade magnética (μ): quantifica a capacidade de um material tem de ser magnetizado na presença de um campo magnético de intensidade H. É dada em H/m e no vácuo vale $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

Problema direto

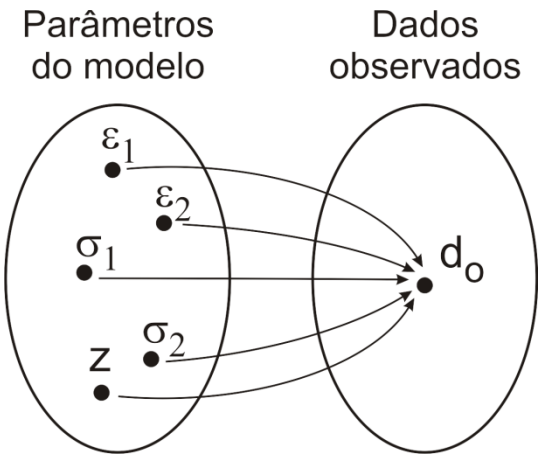
- Em geral, a permeabilidade magnética das rochas é considerada igual à do vácuo.
- É comum adotar um parâmetro adimensional denominado *permissividade dielétrica relativa* (ε_r), ou *constante dielétrica*, para caracterizar um meio geológico. Este parâmetro é simplesmente a razão entre a permissividade dielétrica do meio geológico (ε) e a permissividade dielétrica do vácuo (ε_0):

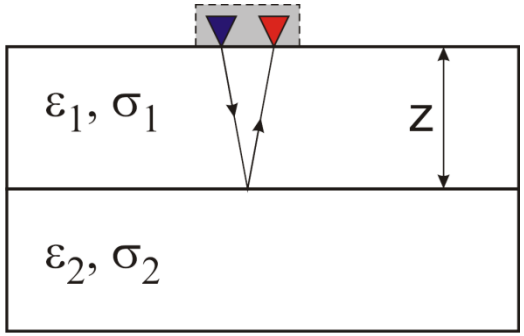
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

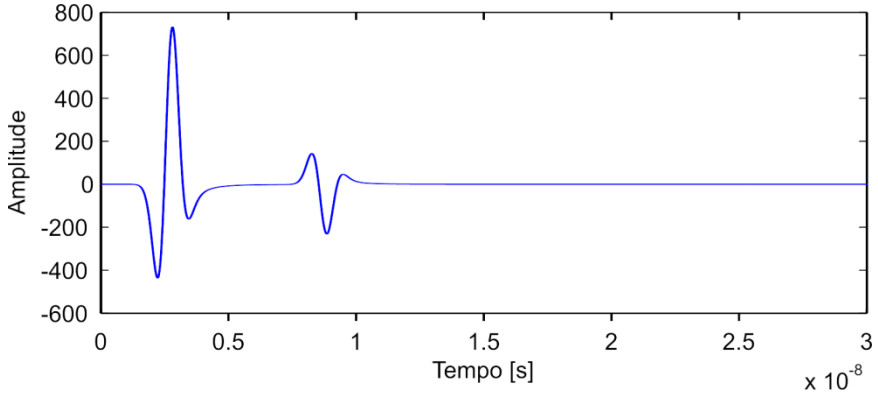
Problema direto

- O sinal enviado ao solo pelo GPR é uma onda eletromagnética, e portanto possui componentes elétricas e magnéticas.
- As relações constitutivas do meio permitem calcular a resposta teórica de um determinado modelo através de um conjunto complexo de equações.
- O cálculo pode ser feito utilizando diferentes métodos, porém todos os métodos devem apresentar a mesma resposta para que a modelagem seja considerada válida.

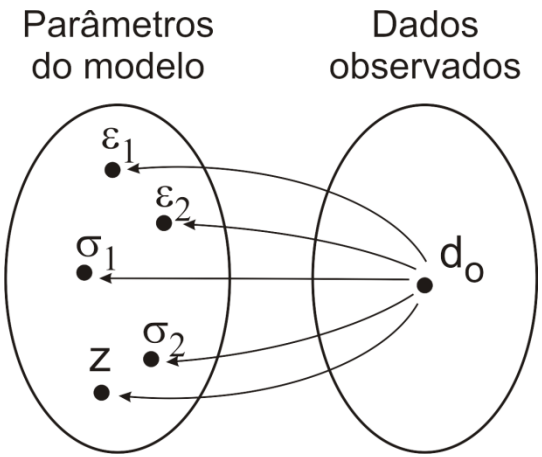
Problema direto

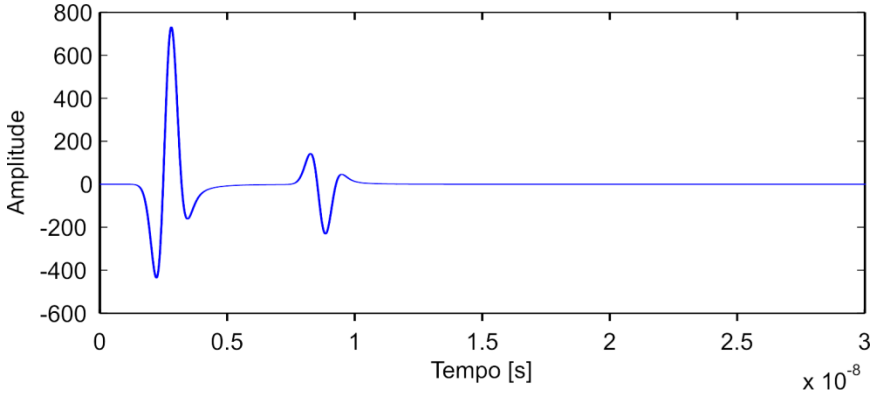


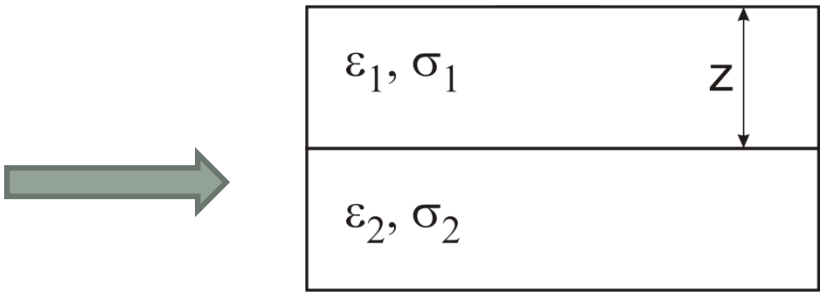




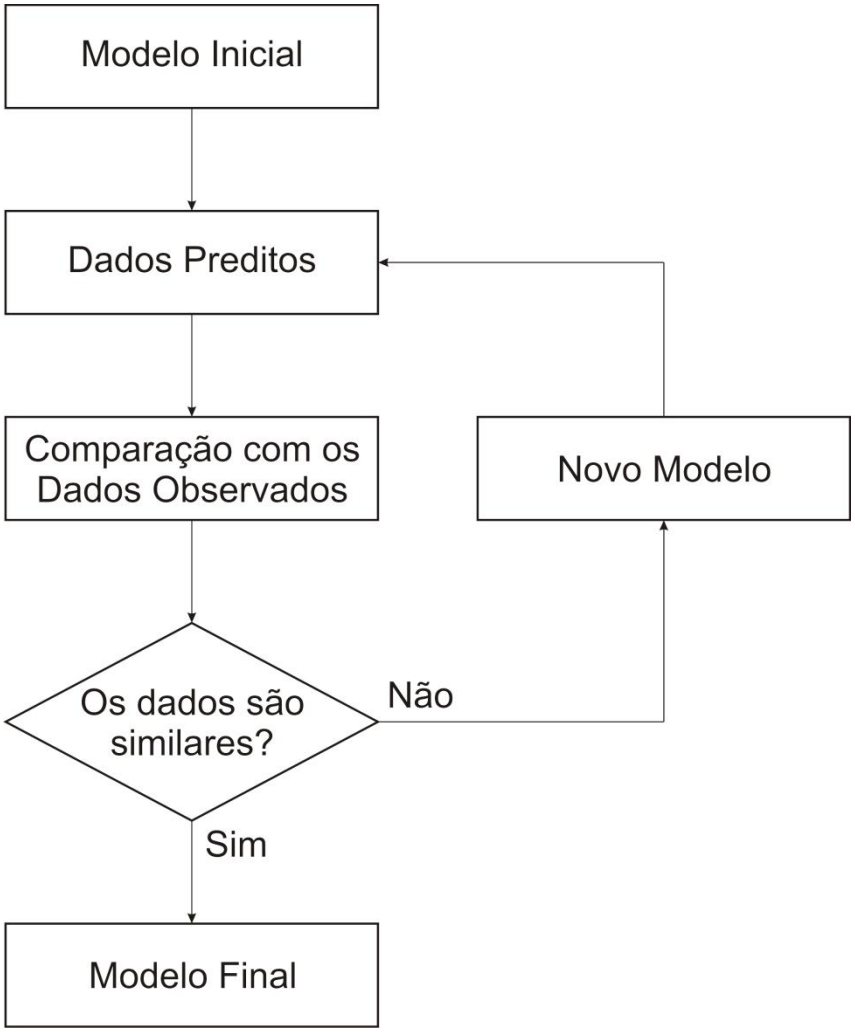
Problema inverso







Problema Inverso



Problema Inverso

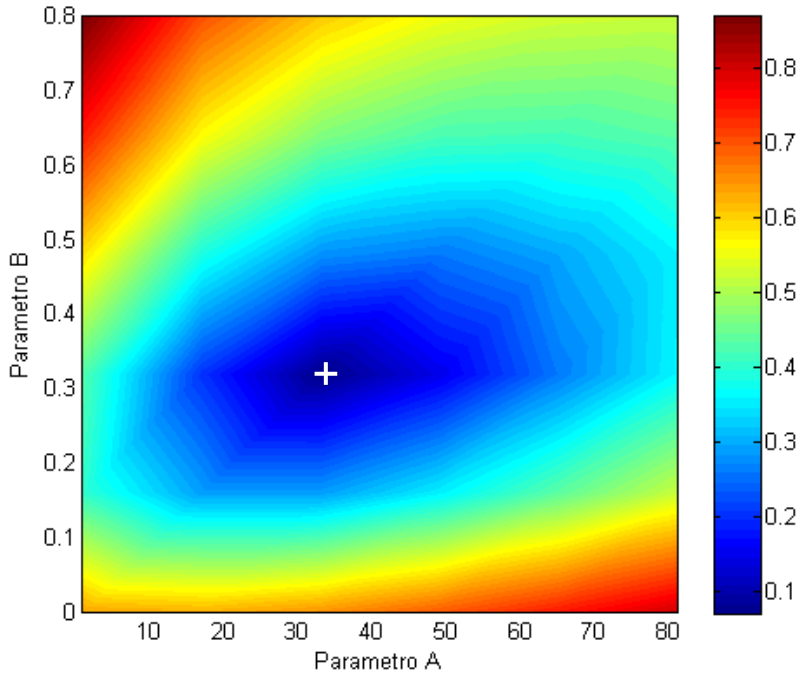
- Comparação entre dados preditos e dados observados

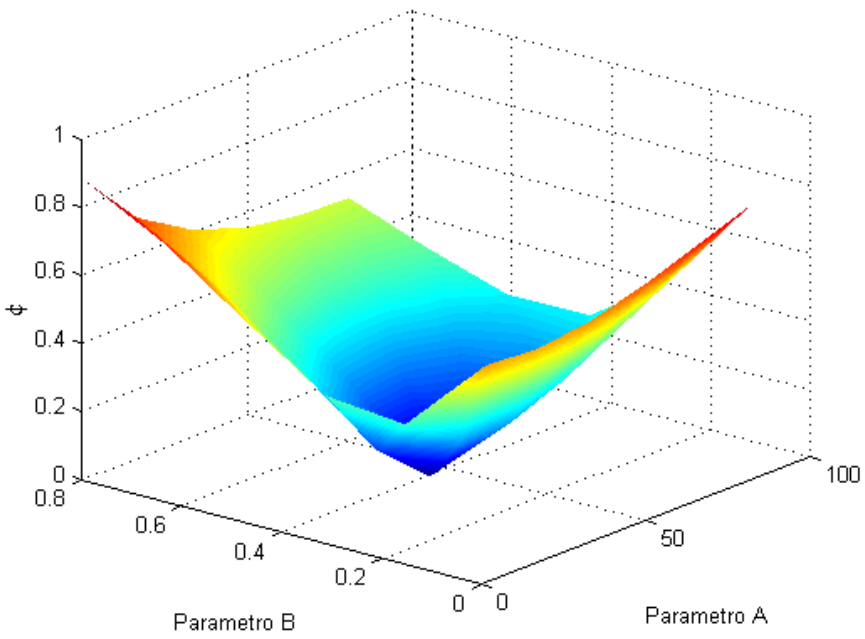
$$\phi = \sqrt{\sum |dp - do|^2}$$

- Estabelece-se um valor mínimo para ϕ.

Problema Inverso

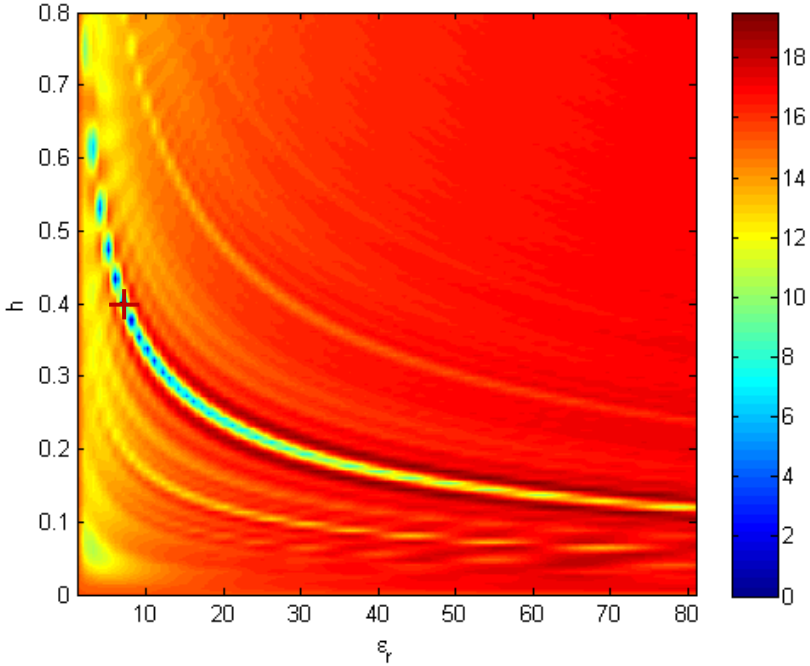
- Problema bem-posto (Hadamard, 1923): a solução existe e é única, e uma pequena variação nos dados provoca uma pequena mudança na solução.

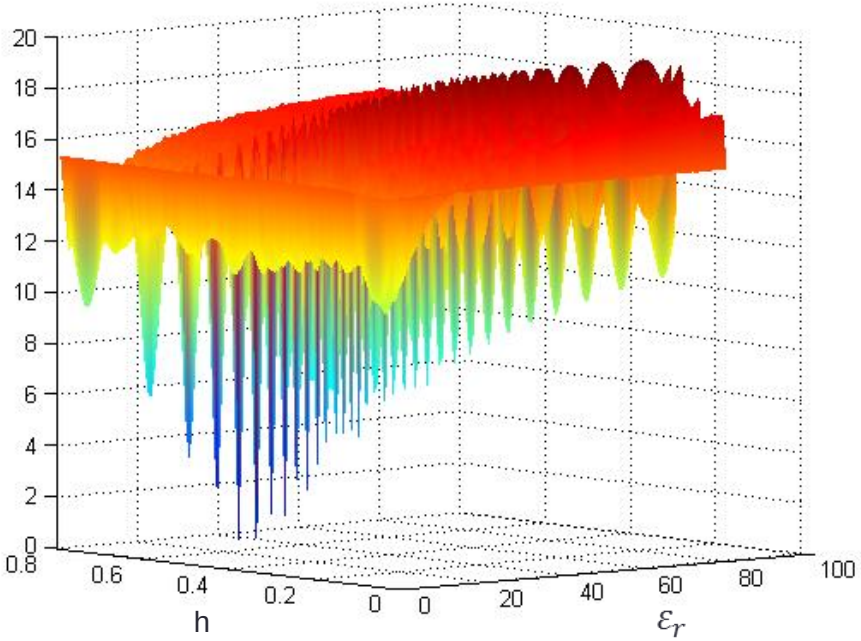




Problema Inverso

- GPR – problema mal posto (instável e solução não-única)

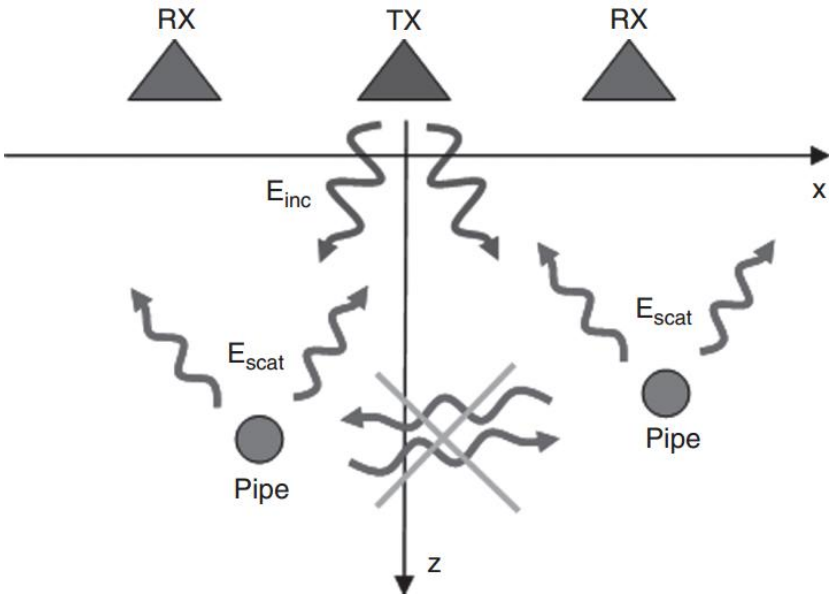




- Solução: regularização do problema.

Problema Inverso

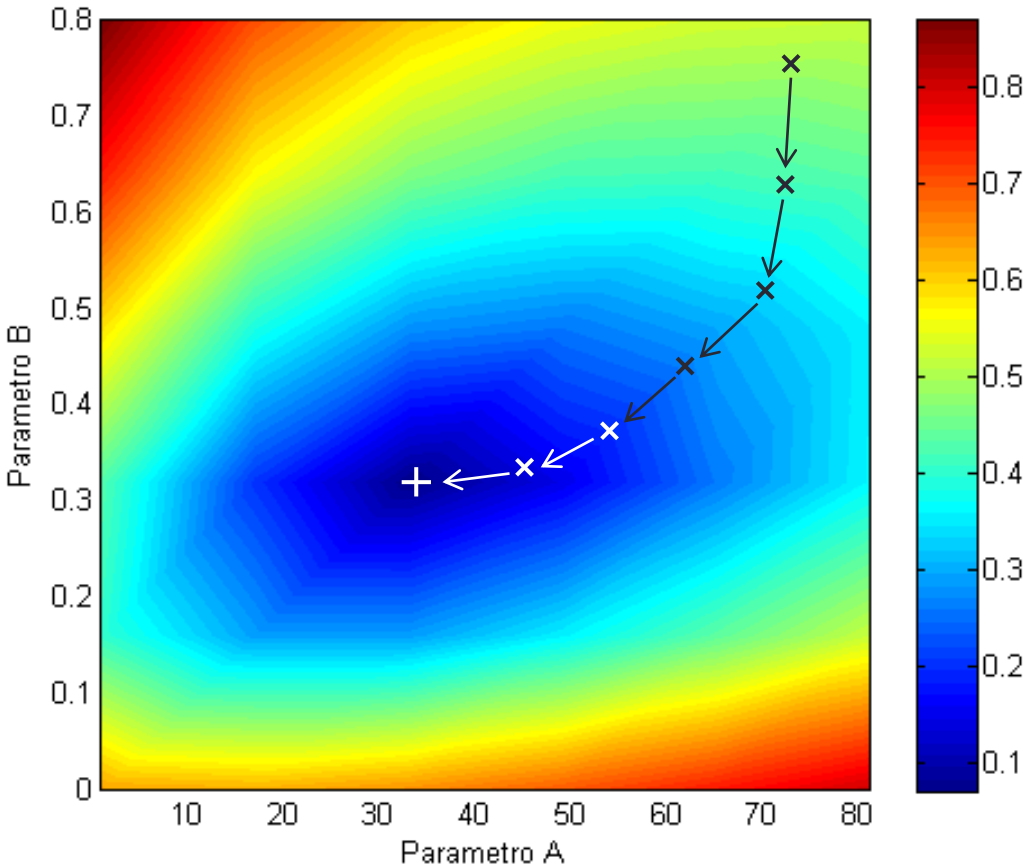
- Problema não-linear: múltiplas interações podem ocorrer entre diferentes objetos, ou mesmo dentro de um único objeto

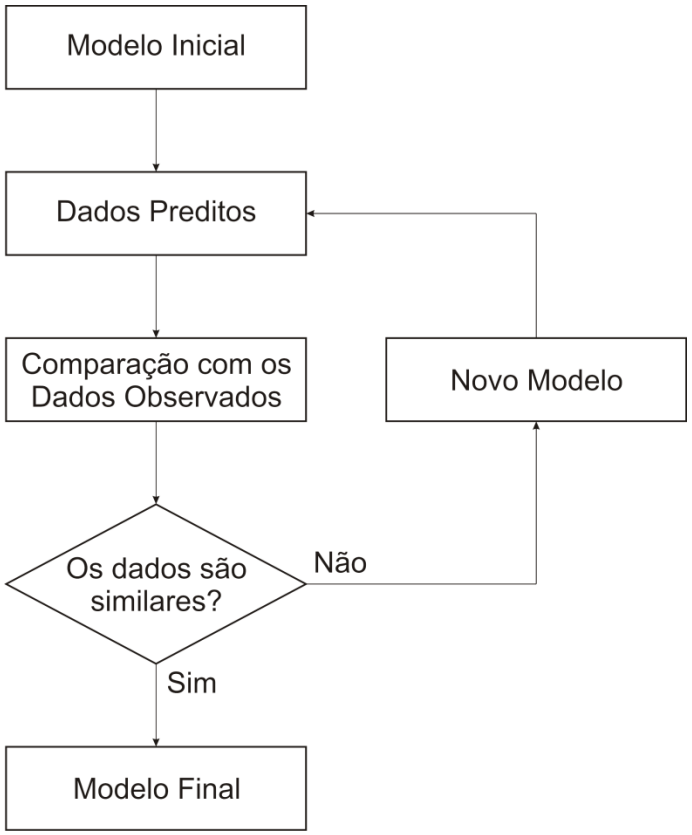


- Solução: linearização através de aproximações matemáticas

Problema Inverso

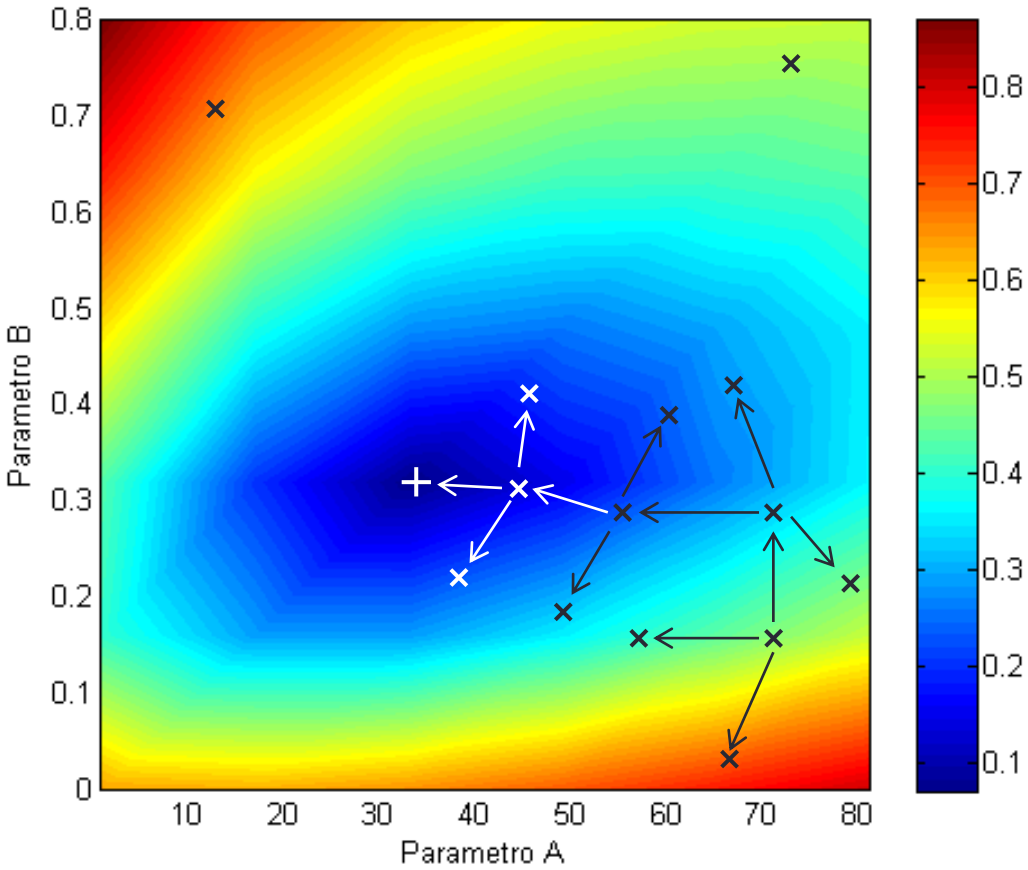
- Busca da solução baseada no gradiente

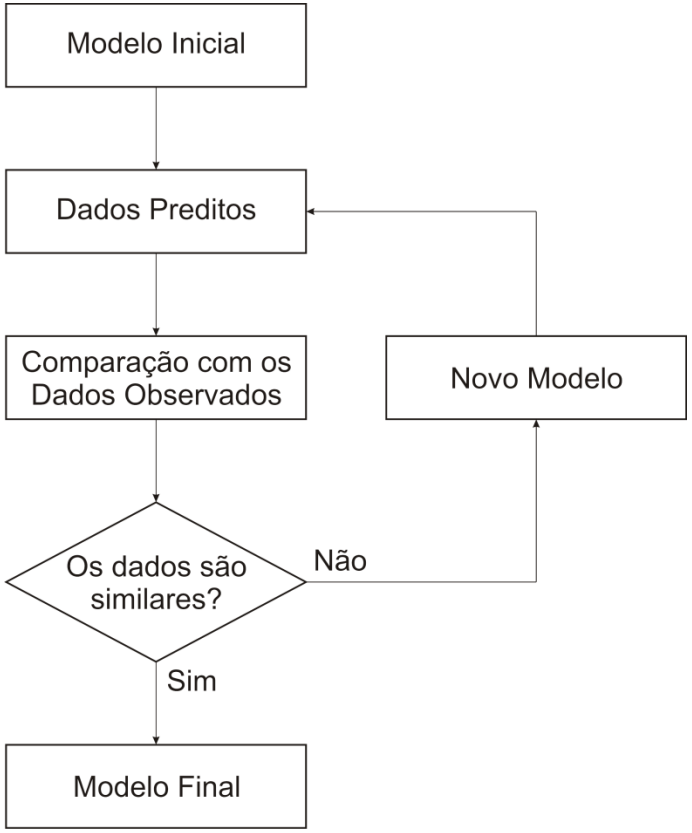




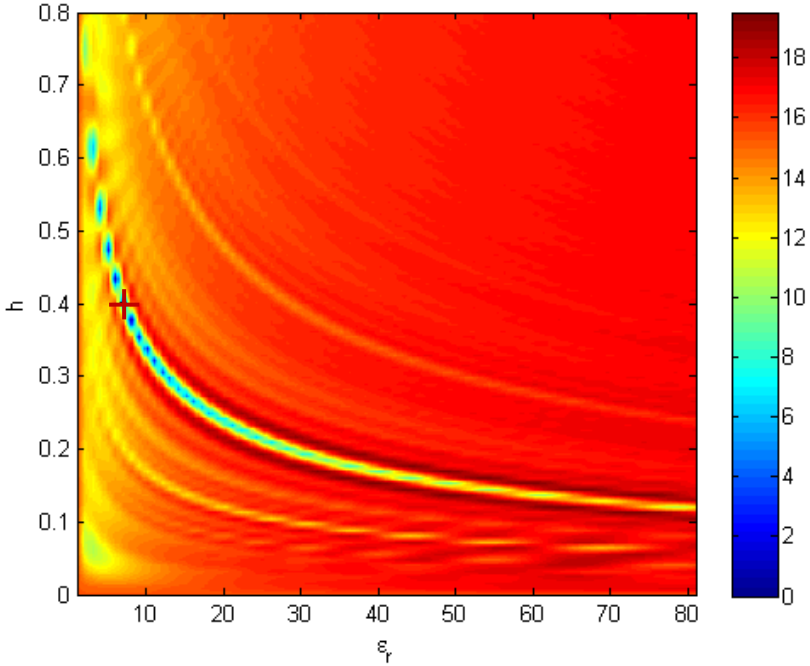
Problema Inverso

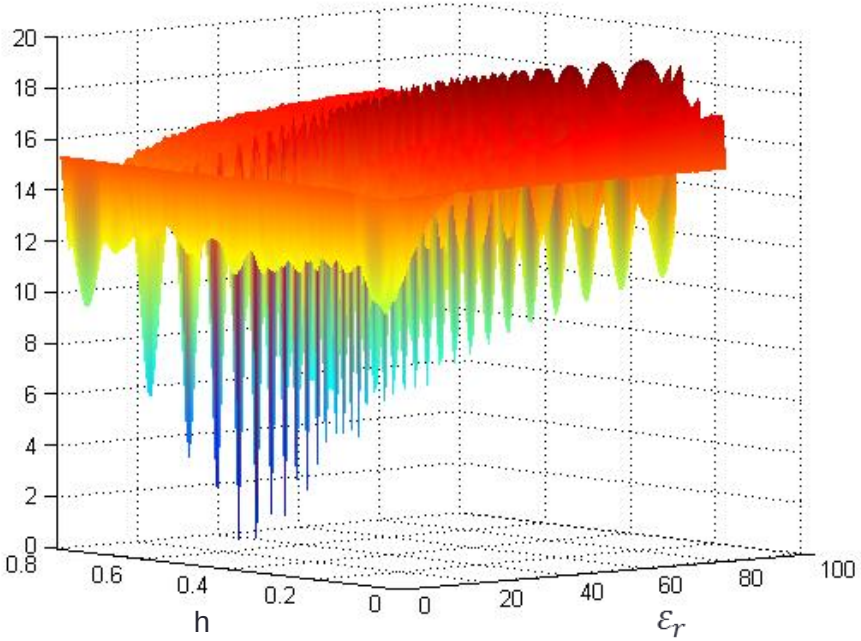
- Busca heurística global da solução





Problema Inverso



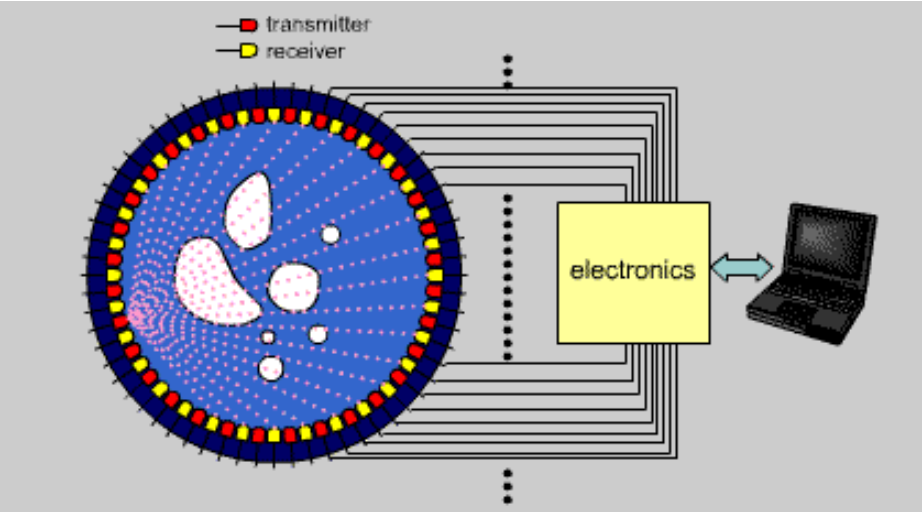


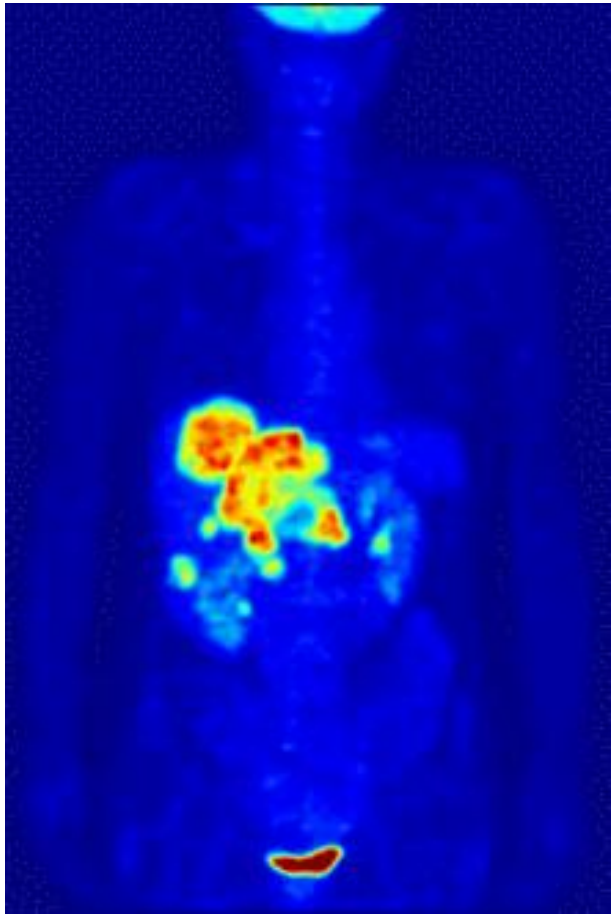
Problema Inverso – Análise qualitativa

- Geralmente relacionada à forma do alvo.
- Técnica empregada: Tomografia
- Adaptada das técnicas de tomografia médica

Problema Inverso – Análise qualitativa

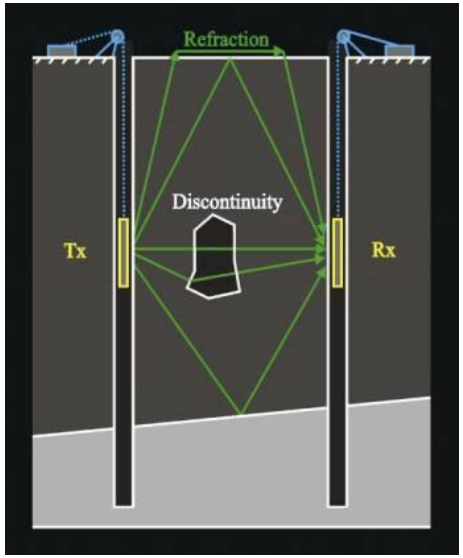
- Tomografia médica

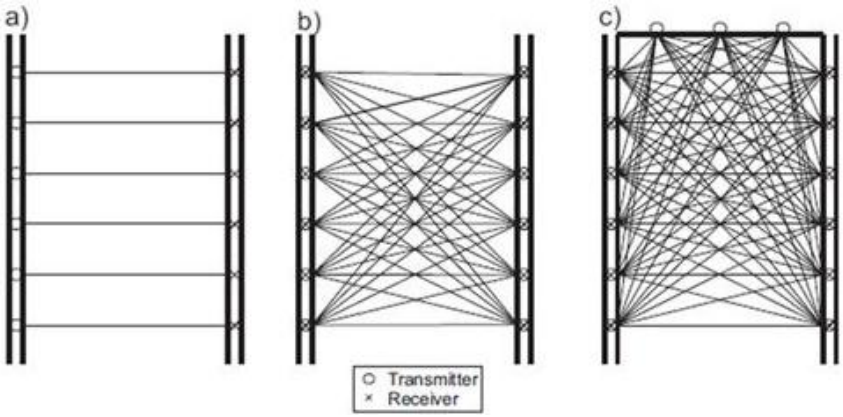


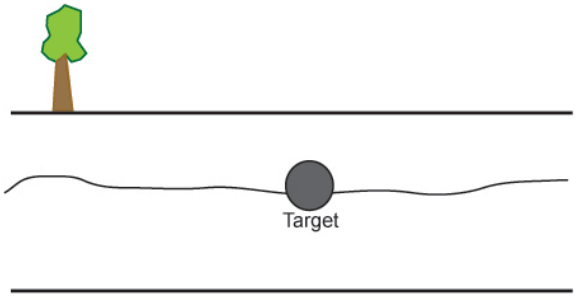


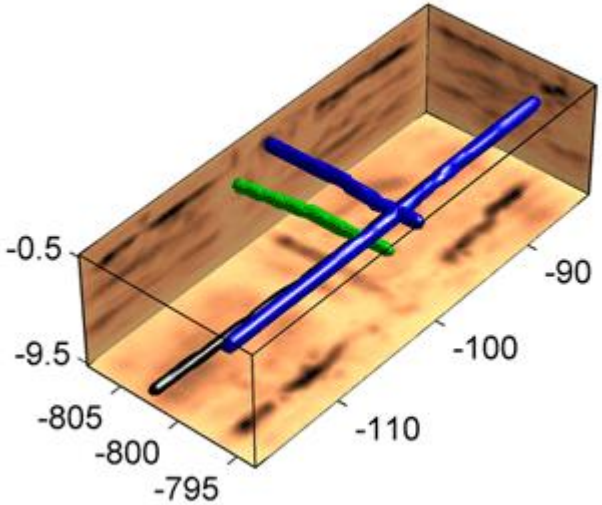
Problema Inverso – Análise qualitativa

- Geofísica









Problema Inverso – Análise qualitativa

- O espaço estudado é descrito através de uma função contraste, que permite avaliar a diferença entre a permissividade do solo e a permissividade do alvo

$$\chi(\boldsymbol{r}) = \frac{\varepsilon_{eq}(\boldsymbol{r})}{\varepsilon_{eqb}} - 1$$

- Problema inverso da tomografia: minimizar a função contraste.

Problema Inverso – Análise quantitativa

- Relacionada às propriedades do subsolo e dos alvos

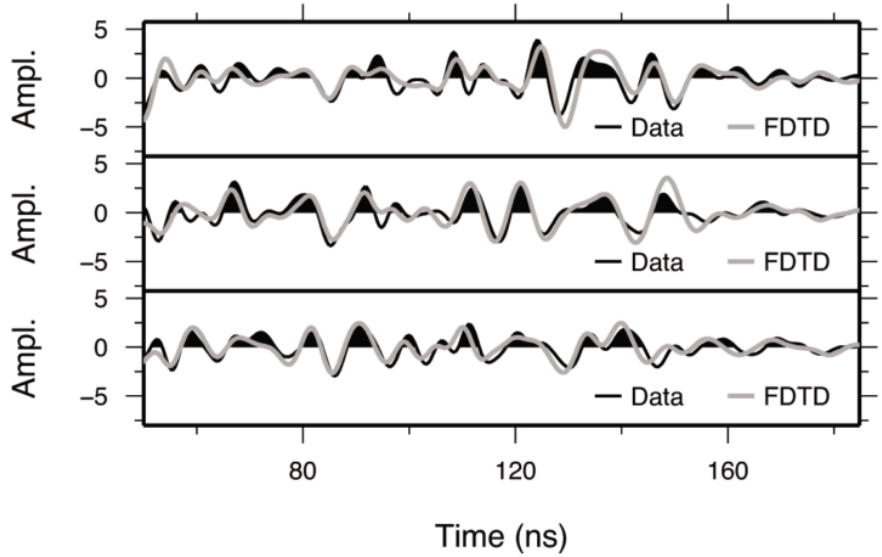
- Inversão de forma de onda completa – visa obter modelos de velocidade minimizando a diferença entre as formas de onda.

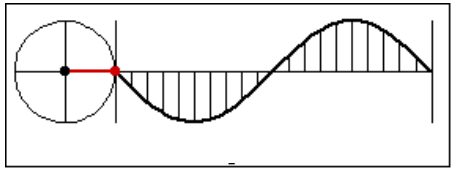
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

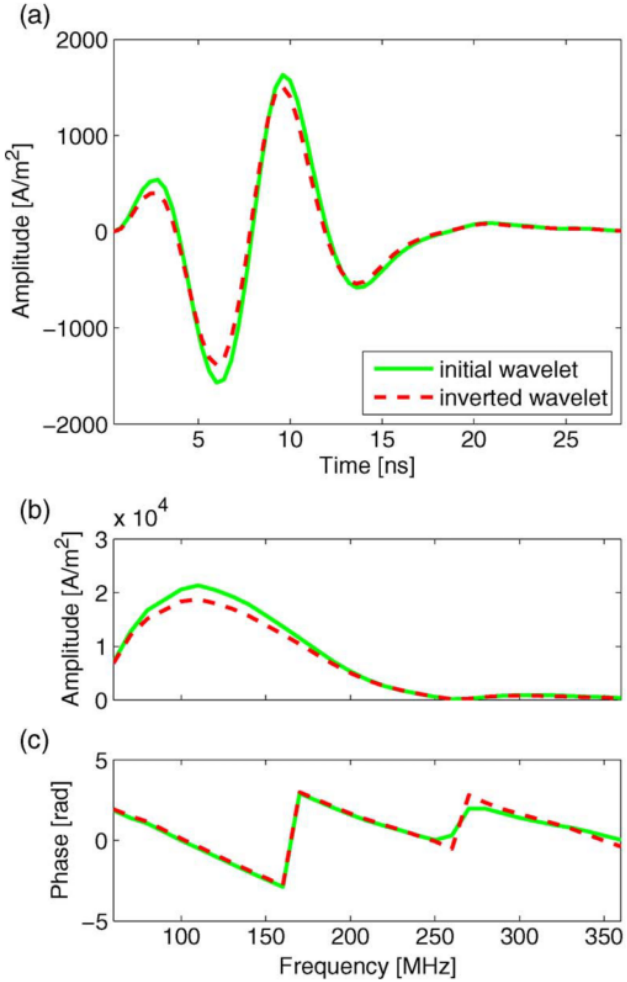
- Dados de poços ou de superfície

Problema Inverso – Análise quantitativa

- ε e σ influenciam diretamente no formato do pulso

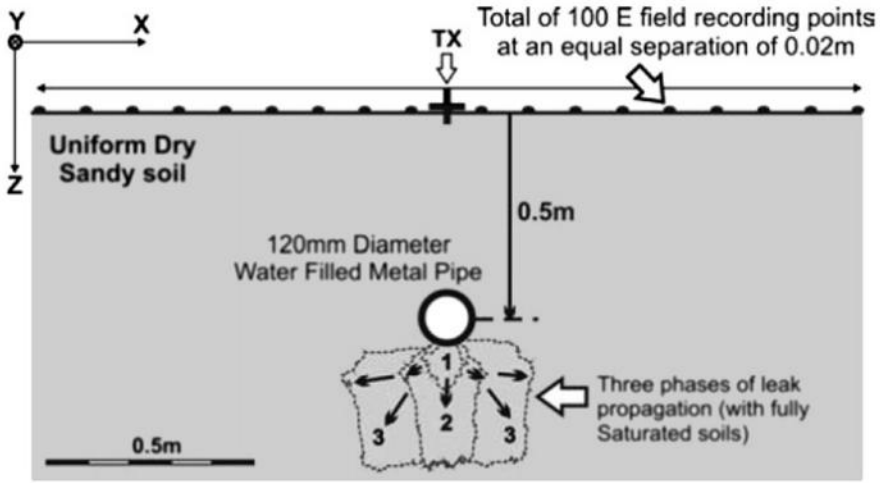


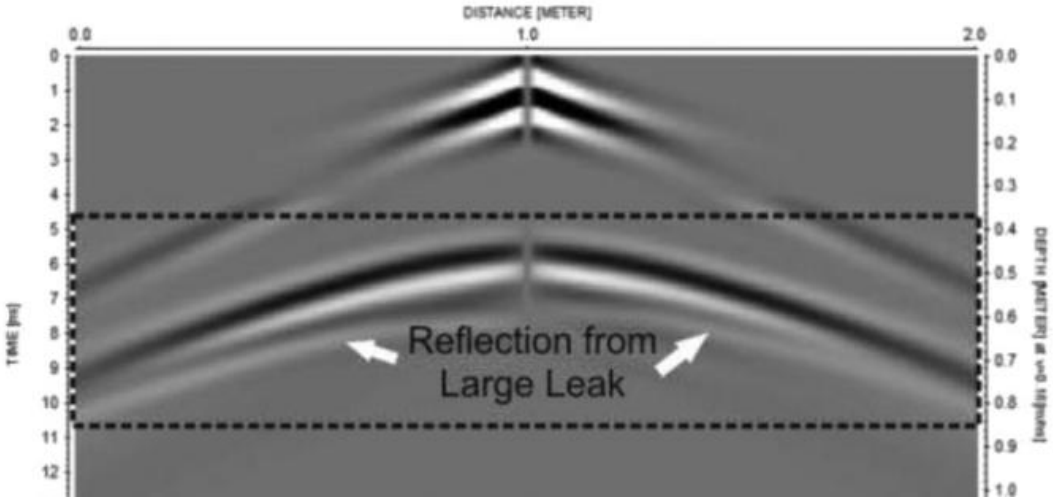




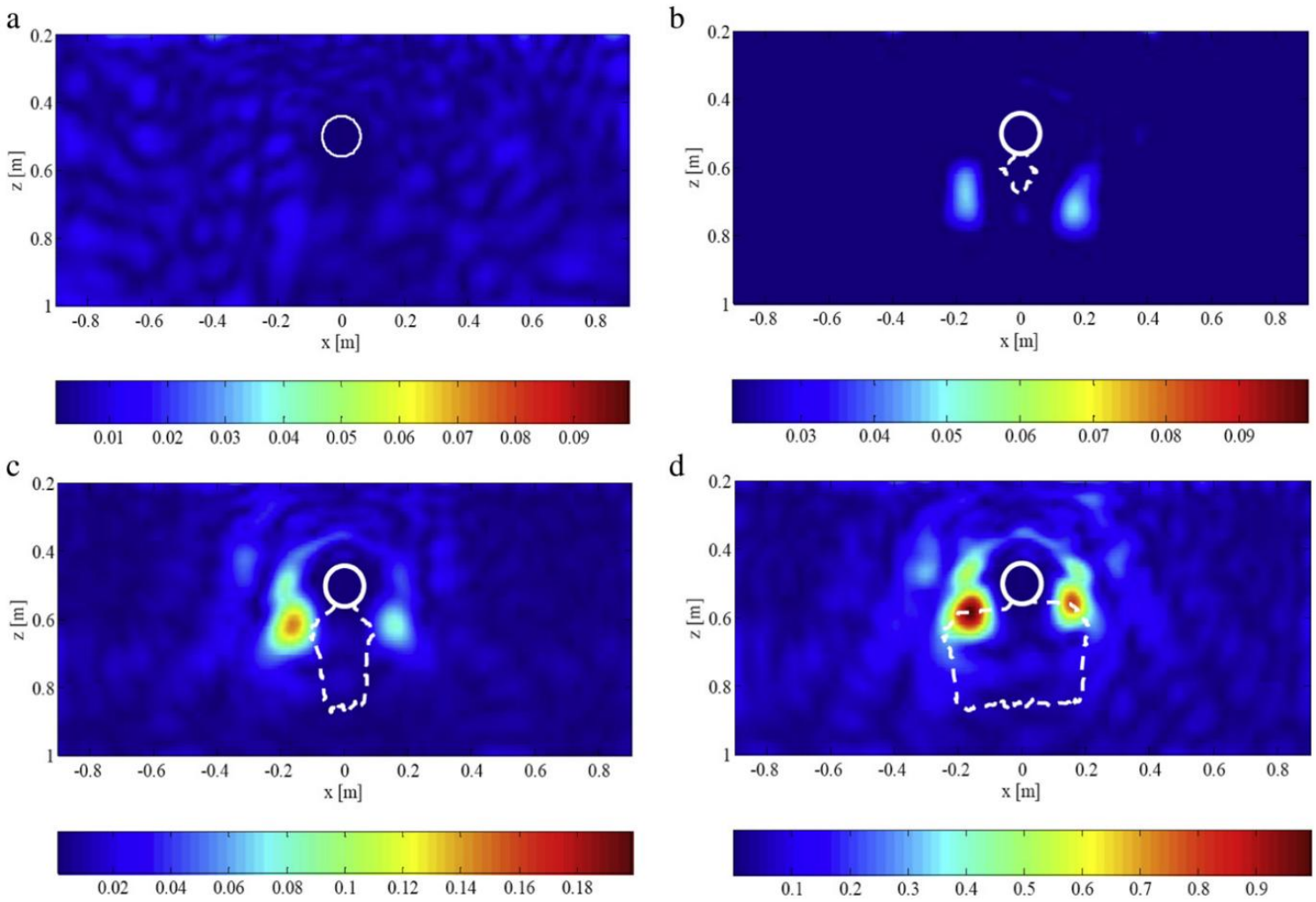
- Dados de poços ou de superfície

Inversão qualitativa - Exemplos



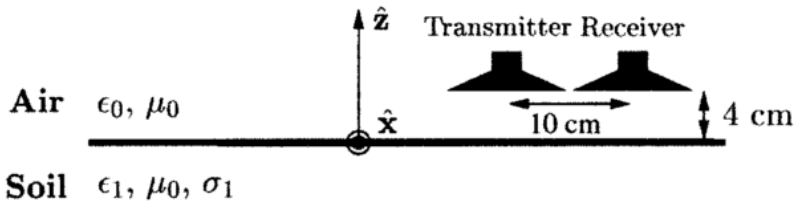


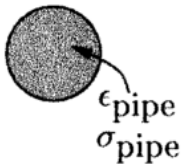
Inversão qualitativa - Exemplos

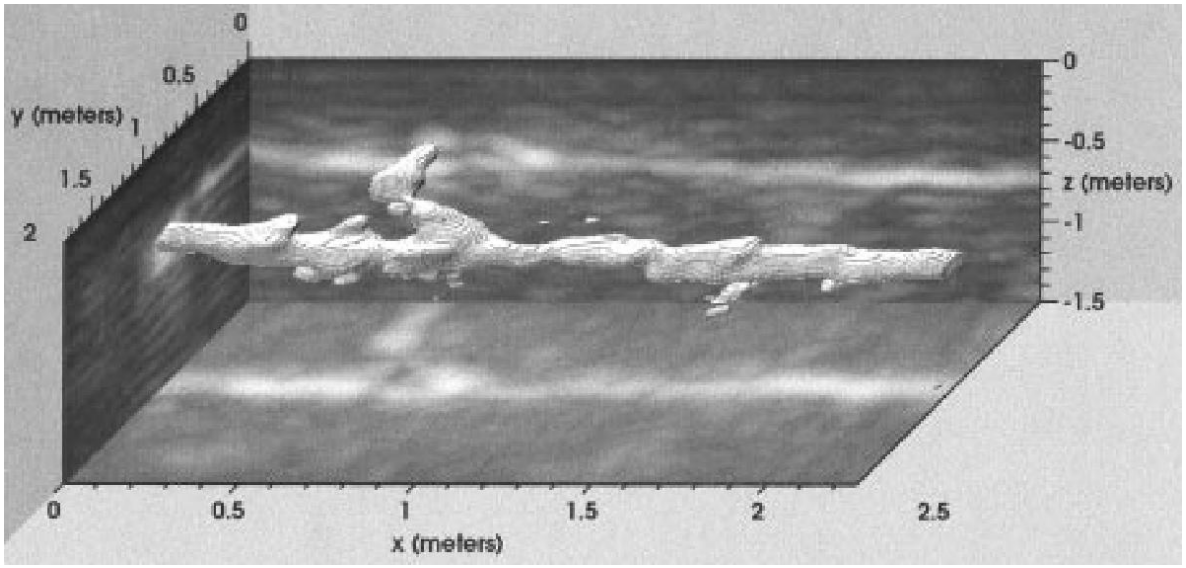


Inversão qualitativa - Exemplos

- Hansen & Johansen (2000)

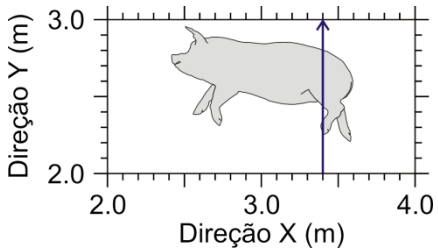


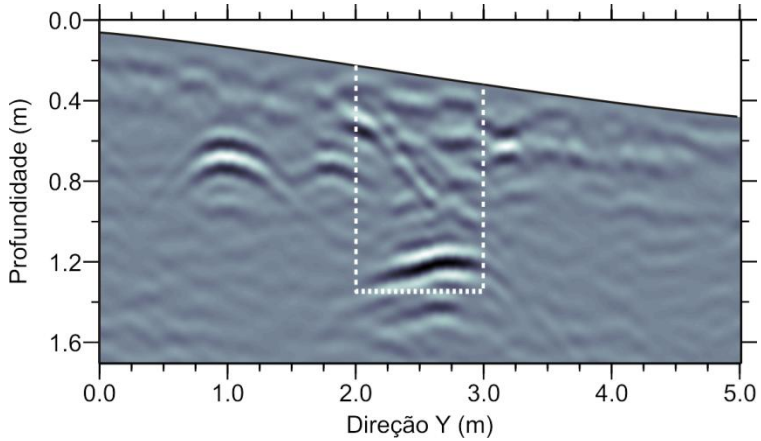


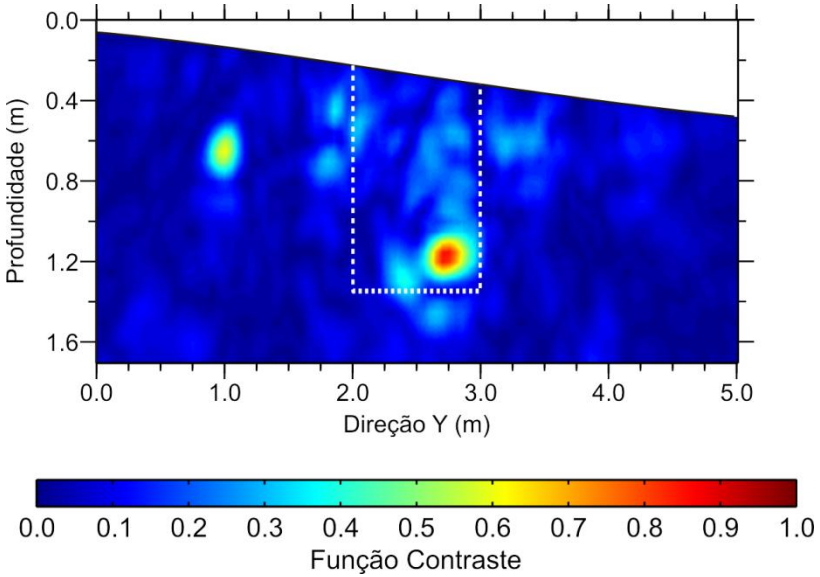


Inversão qualitativa - Exemplos

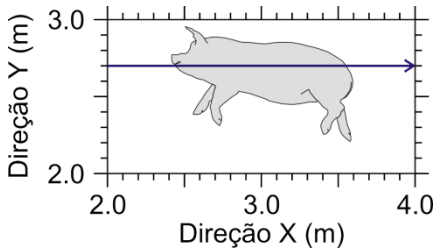
Inversão qualitativa - Exemplos

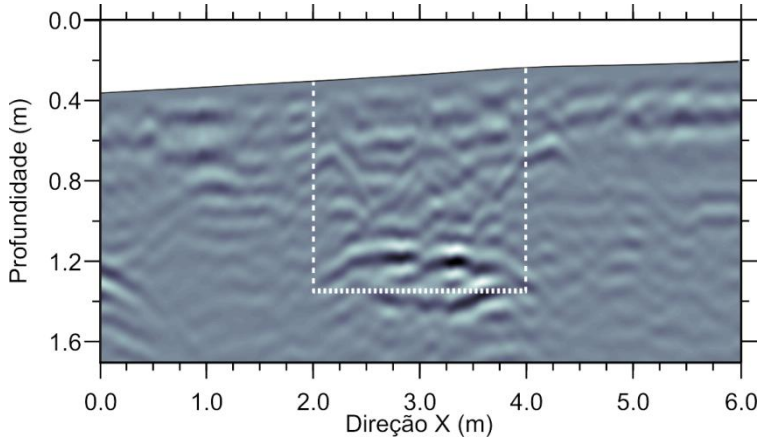


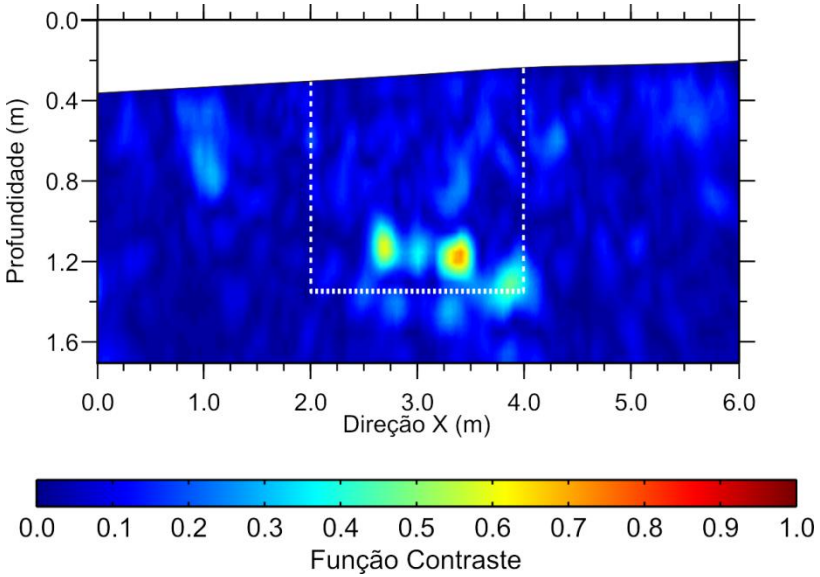




Inversão qualitativa - Exemplos

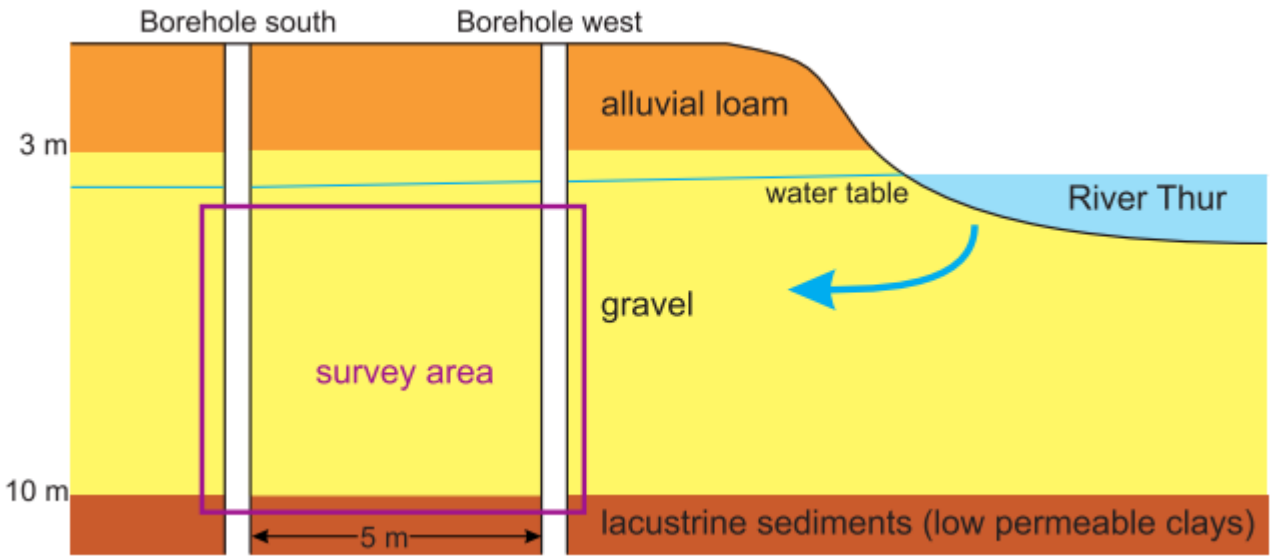






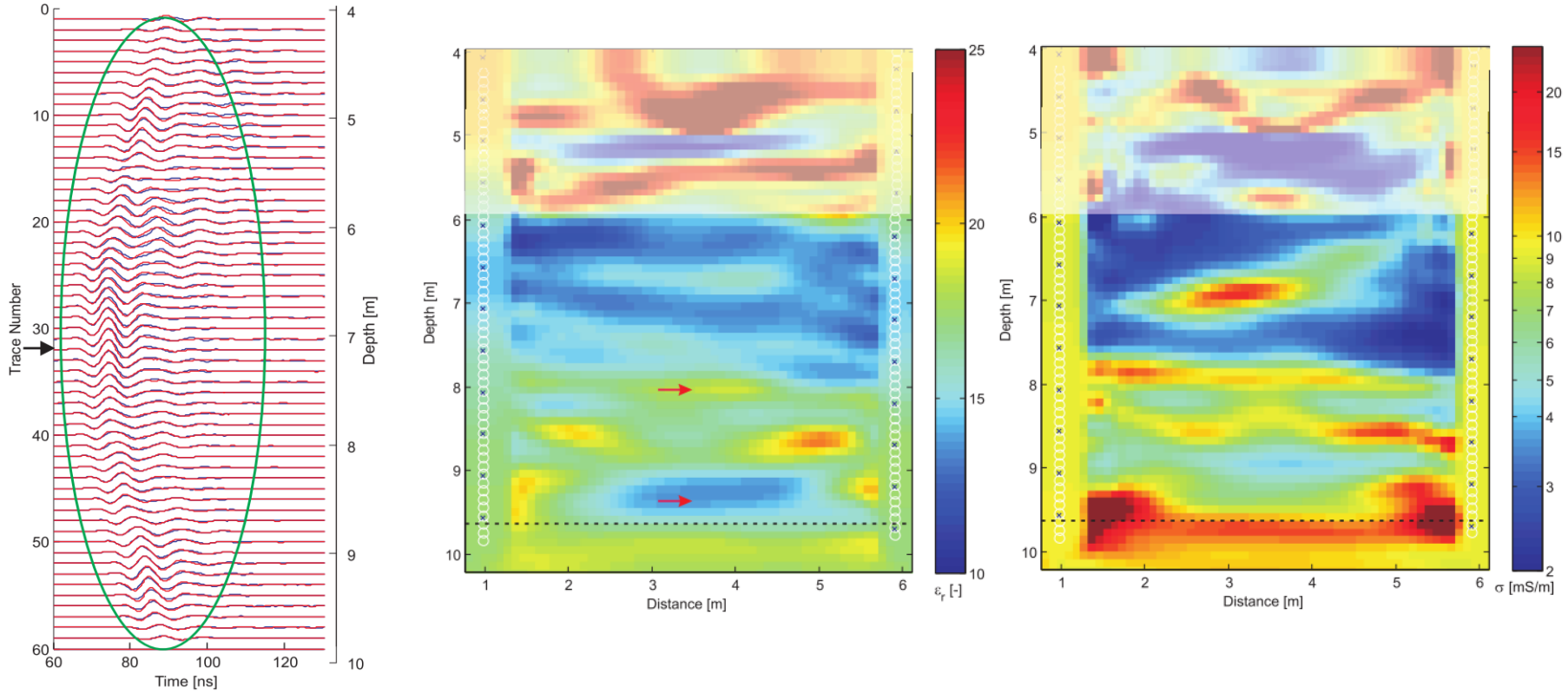
Inversão quantitativa - Exemplos

- Klotzsche *et al*. (2010)



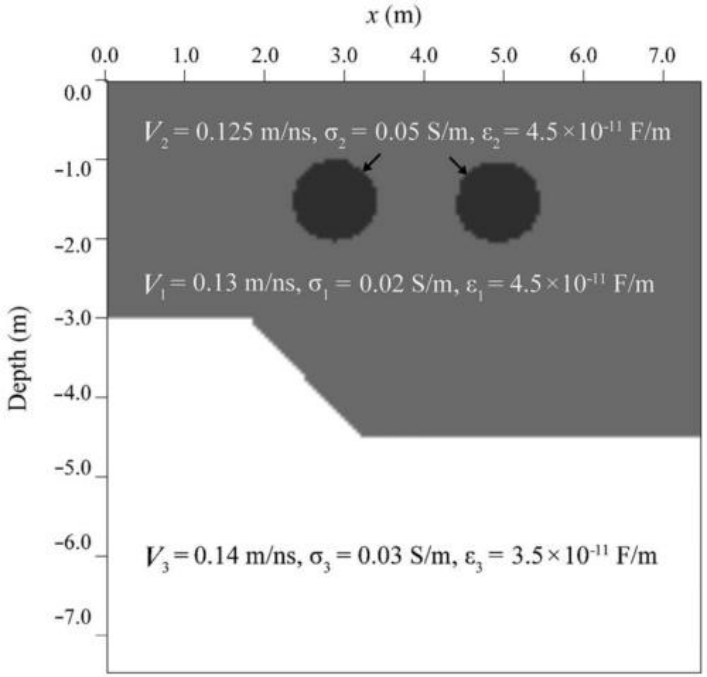
Inversão quantitativa - Exemplos

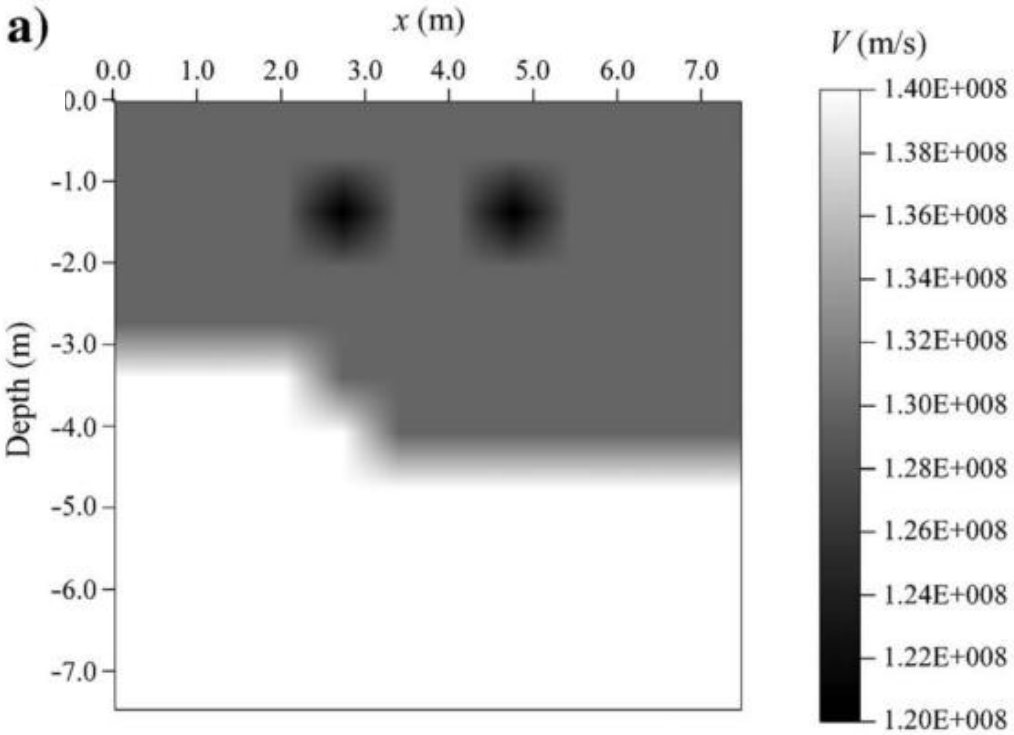
- Klotzsche *et al*. (2010)



Inversão quantitativa - Exemplos

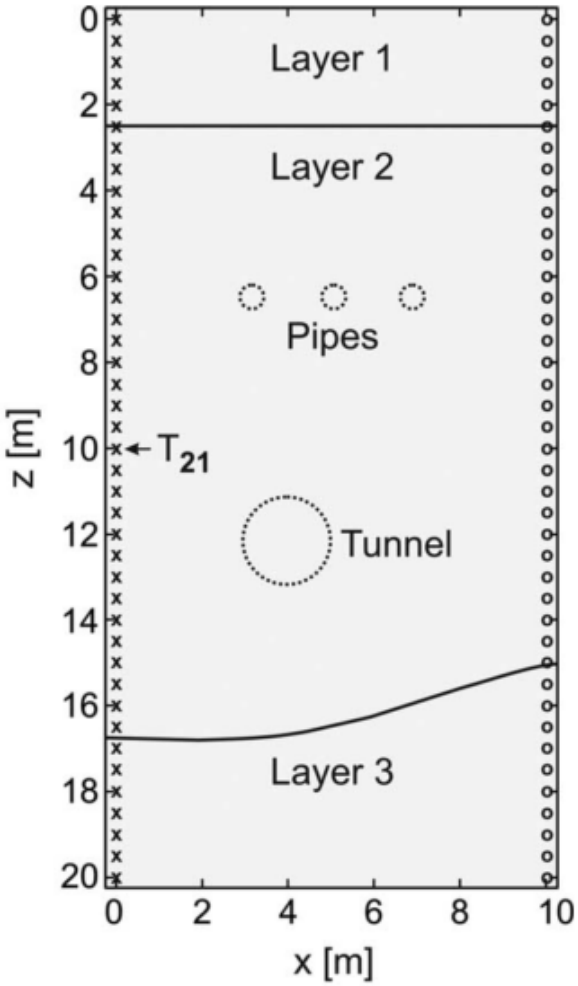
- Di *et al*. (2006)





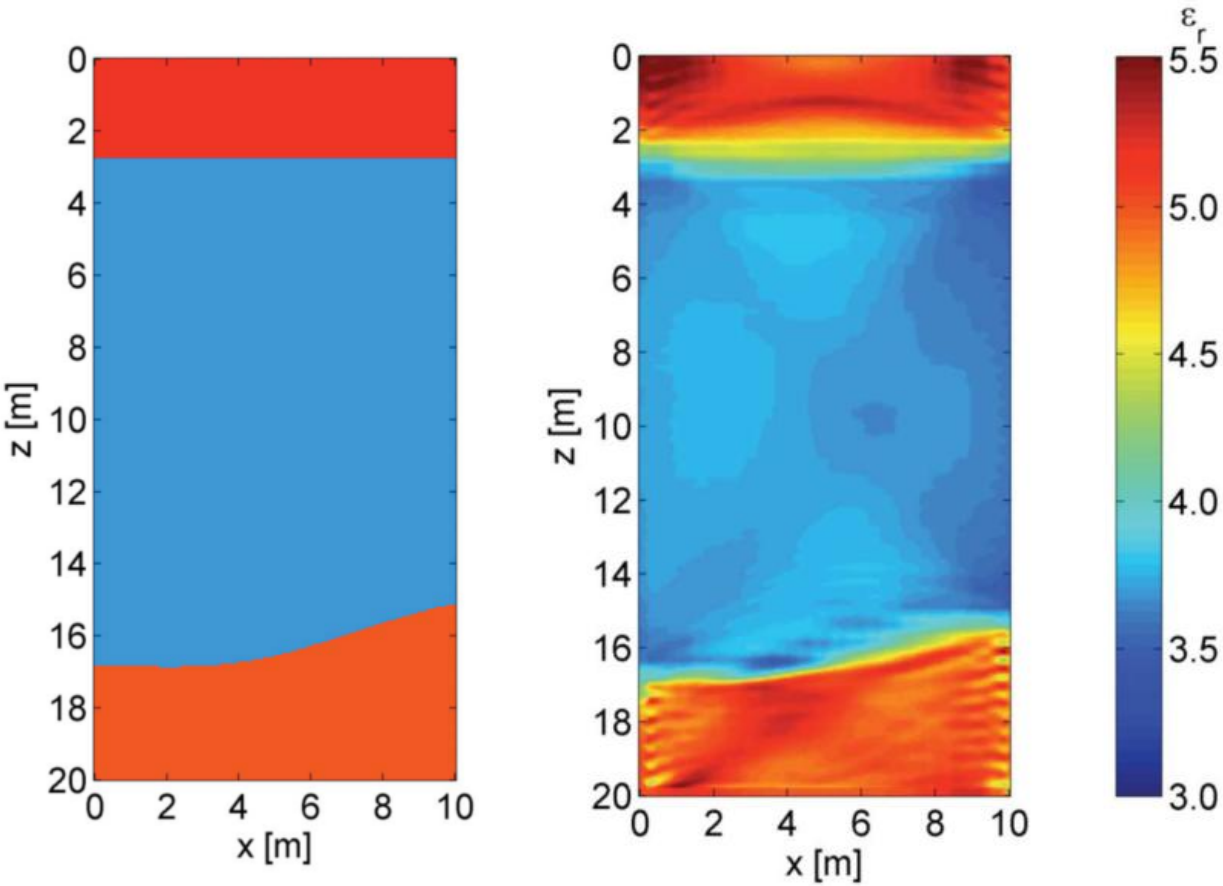
Inversão quantitativa - Exemplos

- Ernst *et al*. (2007)



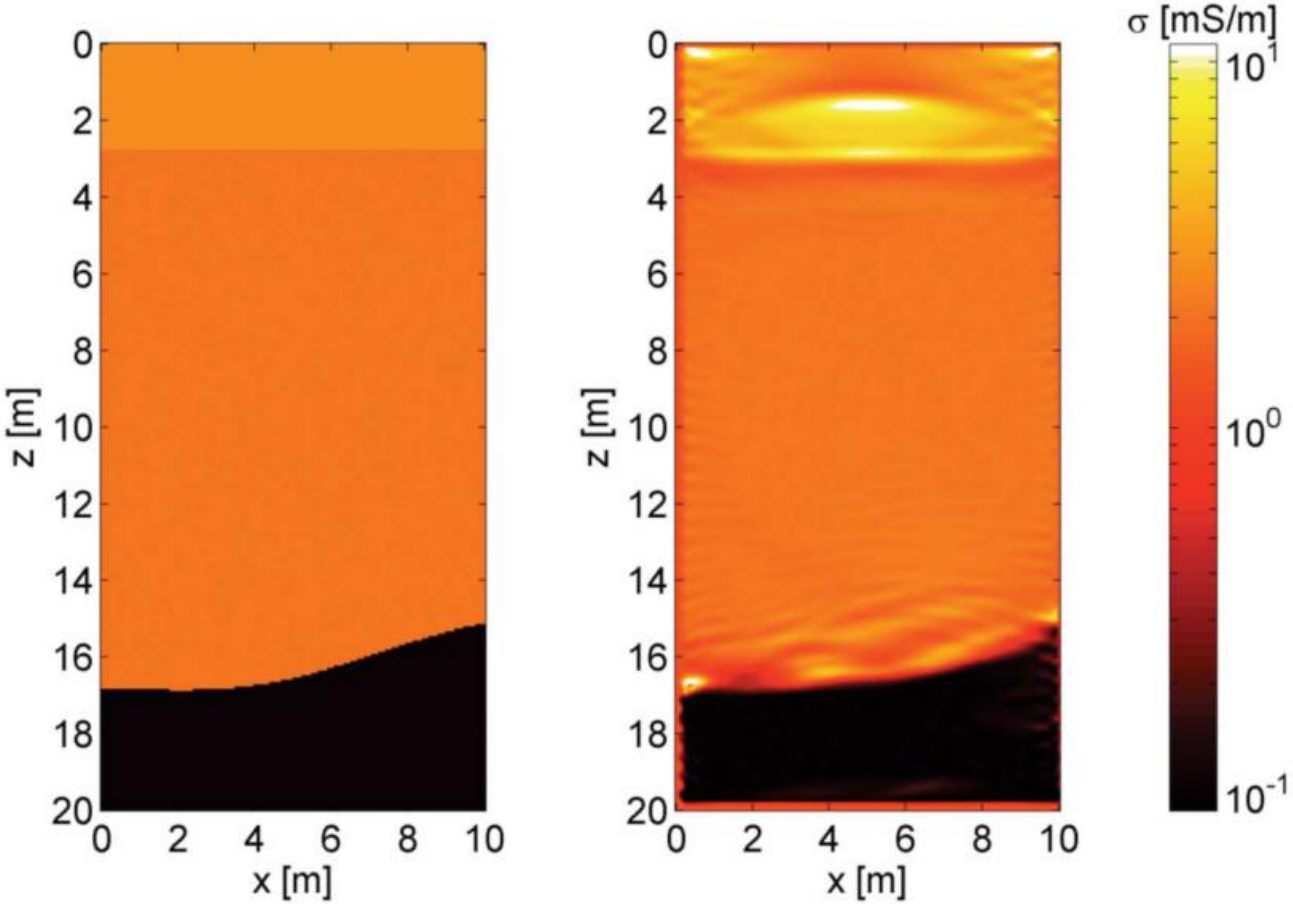
Inversão quantitativa - Exemplos

- Ernst *et al*. (2007)



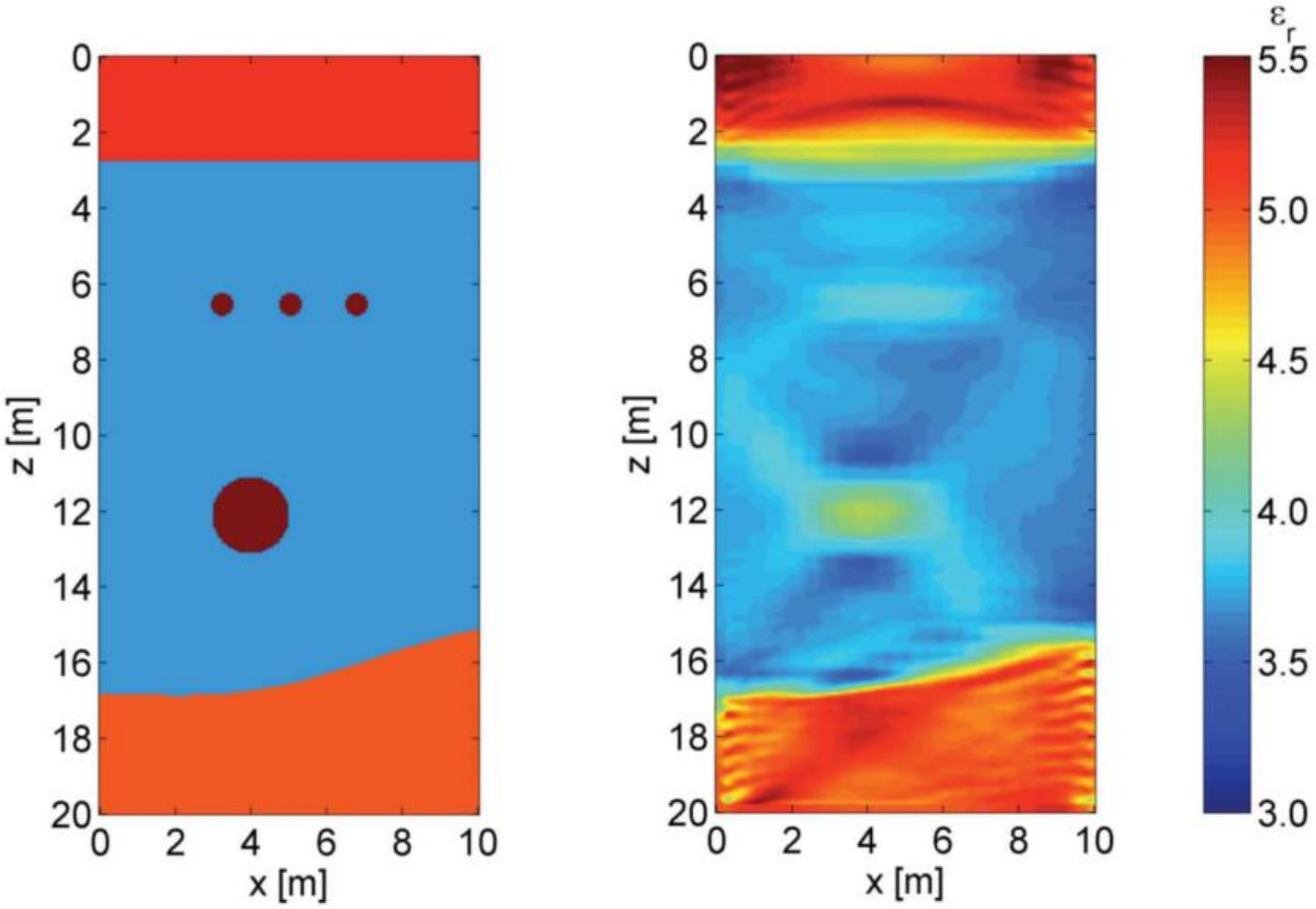
Inversão quantitativa - Exemplos

- Ernst *et al*. (2007)



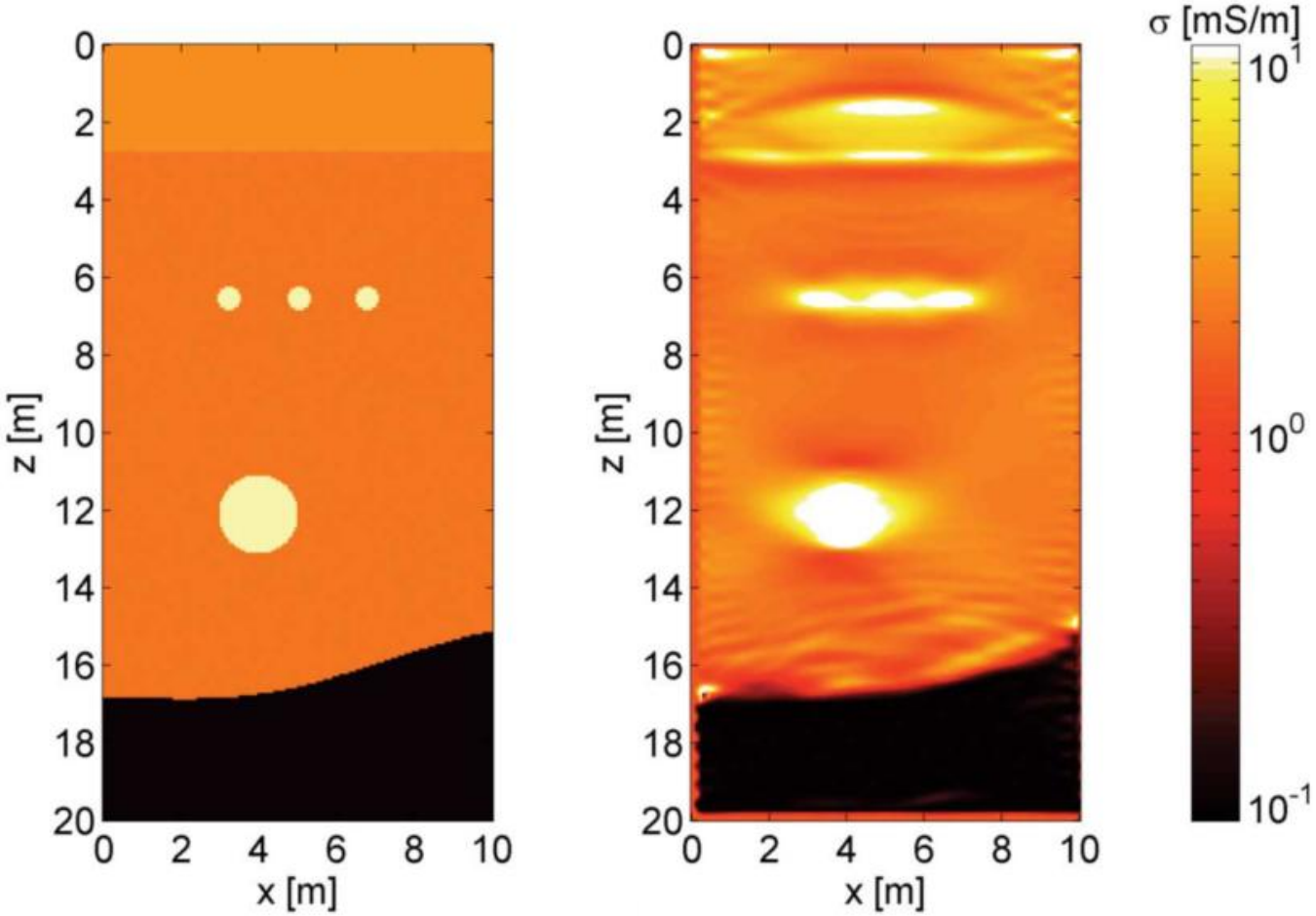
Inversão quantitativa - Exemplos

- Ernst *et al*. (2007)



Inversão quantitativa - Exemplos

- Ernst *et al*. (2007)



Referências

- Crocco, L.; Prisco, G.; Soldovieri, F.; Cassidy, N. J.; Early-stage leaking pipes GPR monitoring via microwave tomographic inversion. **Journal of Applied Geophysics**, v. 67, n. 4, p. 270-277, 2009.
- Di, Q; Zhang, M.; Wang, M.; Time-domain inversion of GPR data containing attenuation due to conductive losses. **Geophysics**, v. 71, n. 5, p. K103-K109, 2006.
- Ernst, J. R.; Maurer, H.; Green, A. G.; Holliger, K.; Full-waveform inversion of crosshole radar data based on 2-D finite-difference time-domain solutions of Maxwell's equations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 9, p. 2807-2828, 2007.
- Hadamard, J.; **Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations**. New Haven: Yale University Press, 1923.
- Hansen, T. B.; Johansen, P. M.; Inversion scheme for ground penetrating radar that takes into account the planar air-soil interface. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 1, p. 496-506, 2000.
- Klotzsche, A.; van der Kruk, J.; Meles, G. A.; Doetsch, J. A.; Maurer, H.; Linde, N.; Full-waveform inversion of crosshole ground penetrating radar data to characterize a gravel aquifer close to the Thur River, Switzerland. **Proceedings of the XIII Internarional Conference on Ground Penetrating Radar**, p. 1-5, 2010.