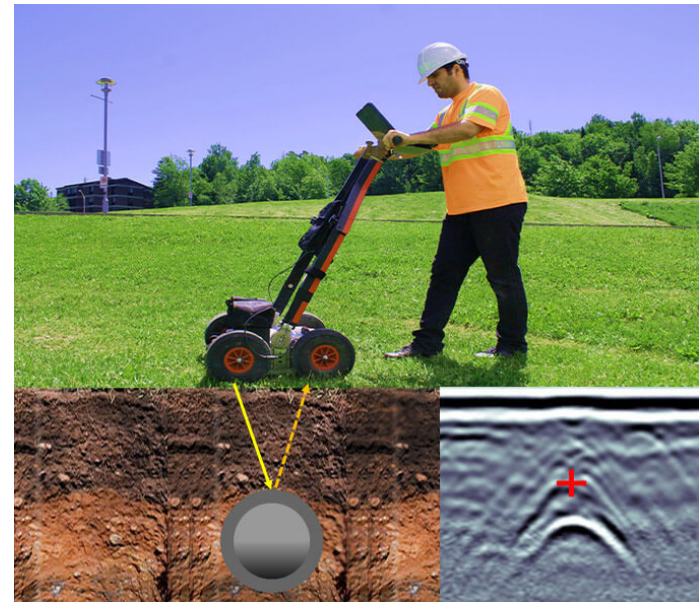


GPR (Ground Penetrating Radar)

Prof. Dr. Vinicius Louro

Método GPR

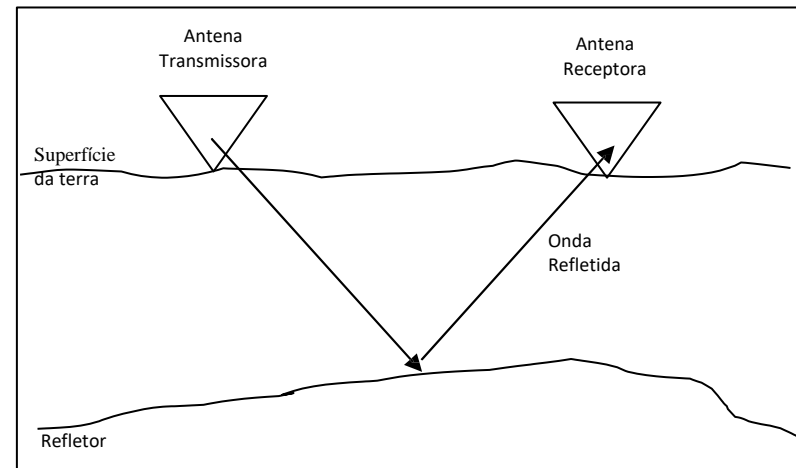
- Radar de Penetração em solo
 - GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou Georadar
 - Utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência
 - Entre 10 e 2500 MHz
 - Mapeamento de estruturas
 - Feições geológicas rasas da sub-superfície
 - Localização objetos enterrados.
 - Se assemelha ao método de reflexão sísmica e ao sonar
 - Baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas



<http://www.fprimec.com/wp-content/uploads/2016/06/GPR-Ground-Penetrating-Radar-Soil.jpg>

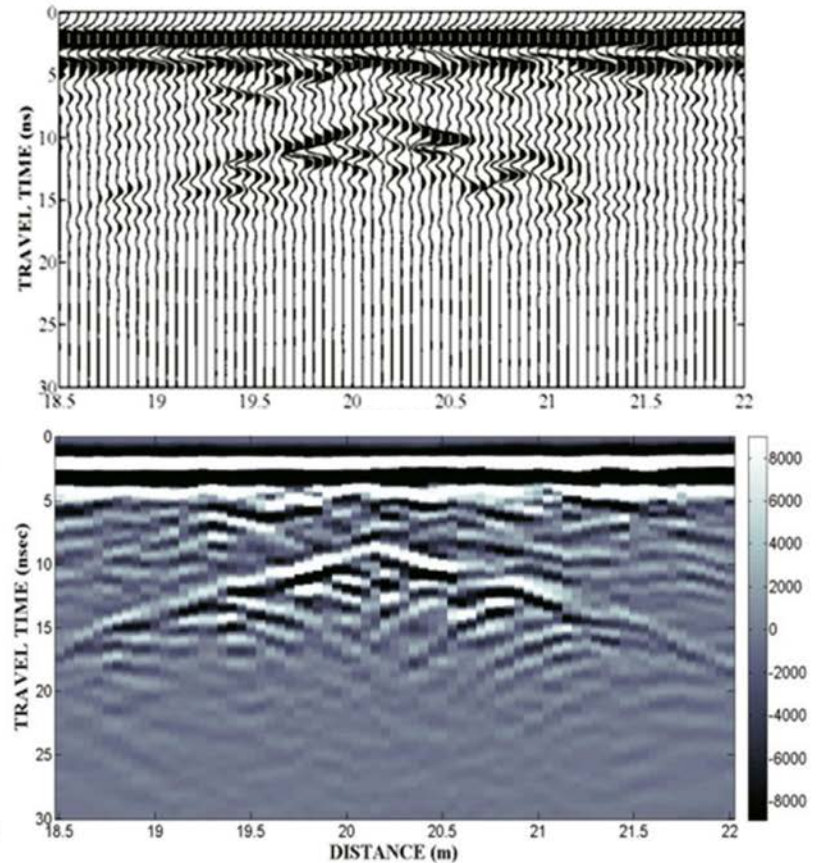
Qual a idéia?

- Consiste na emissão de ondas eletromagnéticas (EM)
 - Geradas através de um curto pulso de alta frequência
 - Repetidamente radiadas para dentro do terreno por uma antena transmissora
- Ondas refletidas e difratadas em subsuperfície
 - Recebidas por uma antena receptora
 - Registradas em função do tempo de percurso
 - Tempo duplo
 - Amplificada
 - Digitalizada
 - Gravada



Qual a idéia?

- Propagação e alcance das ondas EM dependem...
 - Frequência do sinal emitido
 - Propriedades elétricas dos materiais
 - Condutividade elétrica
 - Permissividade dielétrica
 - Permeabilidade magnética
- Variações nessas propriedades elétricas
 - Transmissão
 - Reflexão
 - Refração
 - Difração



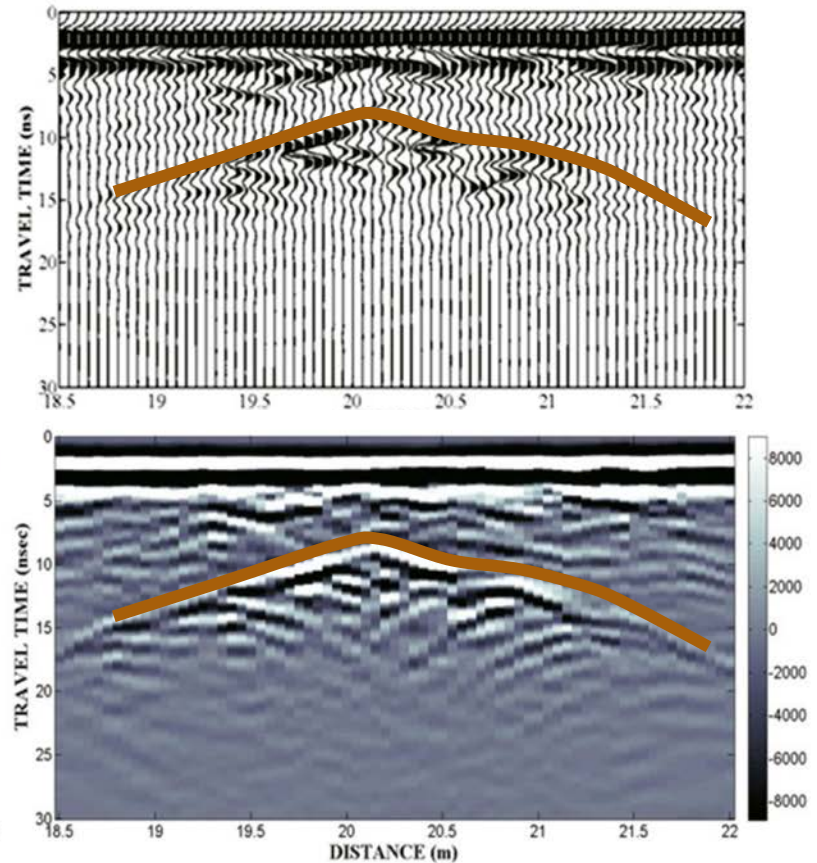
Qual a idéia?

- Propagação e alcance das ondas EM dependem...

- Frequência do sinal emitido
- Propriedades elétricas dos materiais
 - Condutividade elétrica
 - Permissividade dielétrica
 - Permeabilidade magnética

- Variações nessas propriedades elétricas

- Transmissão
- Reflexão
- Refração
- Difração



Qual a idéia?

- Perfis de reflexão GPR

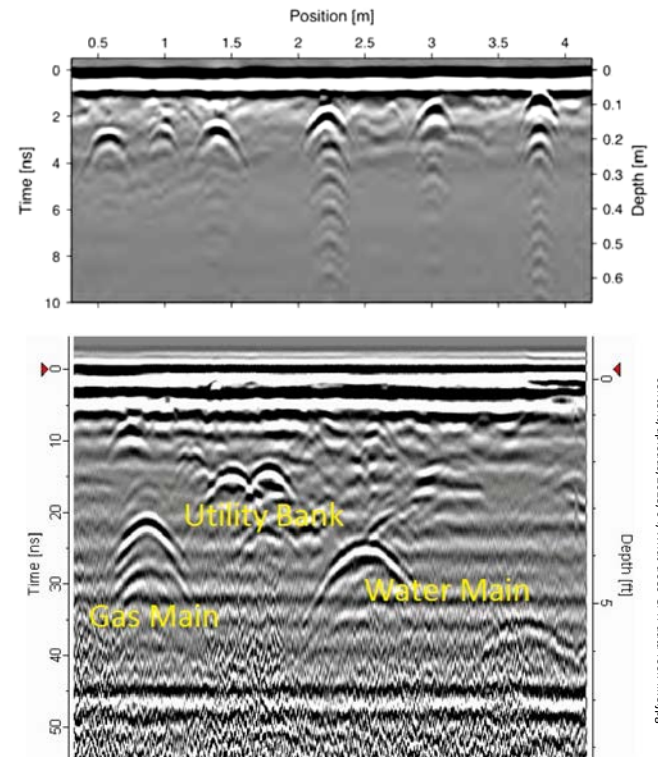
- Radargramas

- Obtidos movendo-se as antenas transmissora e receptora

- Espaçamento variável ou constante

- Variações das propriedades elétricas

- Em função do tempo duplo de percurso do pulso EM



Princípio Físico

- Teoria de propagação das ondas EM

Equações de Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J}.$$

Meios lineares, isotrópicos, homogêneos e estacionários:

$$\mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E}, \quad \mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}, \quad \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H},$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e, \quad \mu_r = 1 + \chi_m,$$

- Equações de Maxwell
- Utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra
- Propriedades elétricas e magnéticas
- Descrevem o comportamento do campo EM em qualquer meio
- Não possuem informações os materiais por onde os campos elétricos e magnéticos atuam
- Necessário introduzir as relações constitutivas do meio
- Relacionam o campo elétrico externo aplicado ao campo interno

Princípio Físico

- Propriedades elétricas e magnéticas

- Dependem de sua composição e umidade
- Controlam a velocidade de propagação e atenuação do sinal

- Materiais geológicos

- Podem ser considerados semicondutores ou dielétricos
- Caracterizados por
 - Condutividade elétrica
 - Permissividade dielétrica
 - Permeabilidade magnética



Solo úmido

Grafite



shutterstock.com · 748752910



Arenito poroso

Princípio Físico

- Condutividade elétrica (σ)

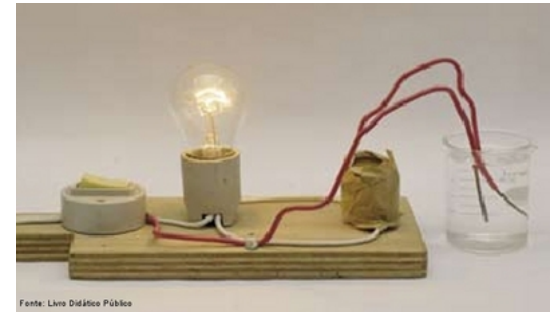
- Quão fácil o material conduz corrente elétrica

- Lei de Ohm

- Relaciona a densidade de corrente de condução (J) ao campo elétrico (E)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- Dado em S/m
 - Em GPR é mais comum utilizar mS/m
- Em materiais geológicos
 - Aproximadamente linear
 - Pode variar até 20 ordens de grandeza dependendo de
 - Teor de umidade
 - Porosidade
 - Salinidade
 - Fração de argila
 - Presença de minerais condutivos



Princípio Físico

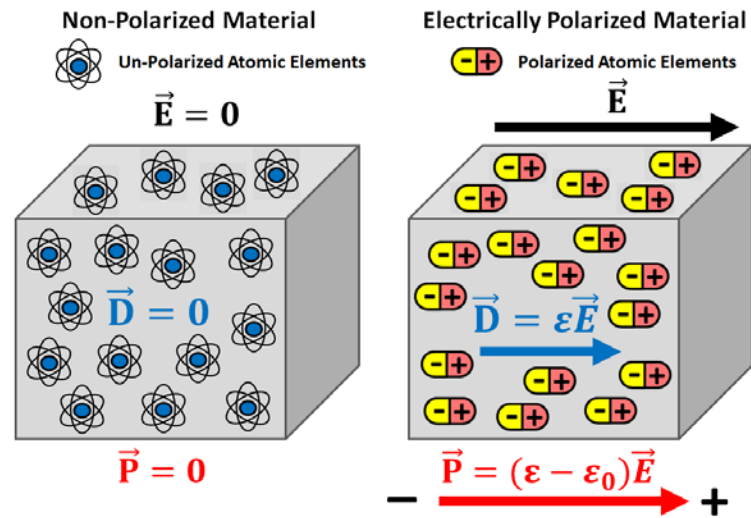
- Permissividade dielétrica (ϵ)
 - Habilidade de um material de se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado
 - Relaciona o campo elétrico (E) à corrente de deslocamento, ou à polarização (D)

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

- Em que ϵ é dada em F/m
- É comum utilizar
 - Permissividade dielétrica relativa (ϵ_R)
ou
 - Constante dielétrica dos materiais (k)

$$k = \epsilon_R = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

- Em que
 - ϵ_0 ≡ permissividade dielétrica no vácuo



Princípio Físico

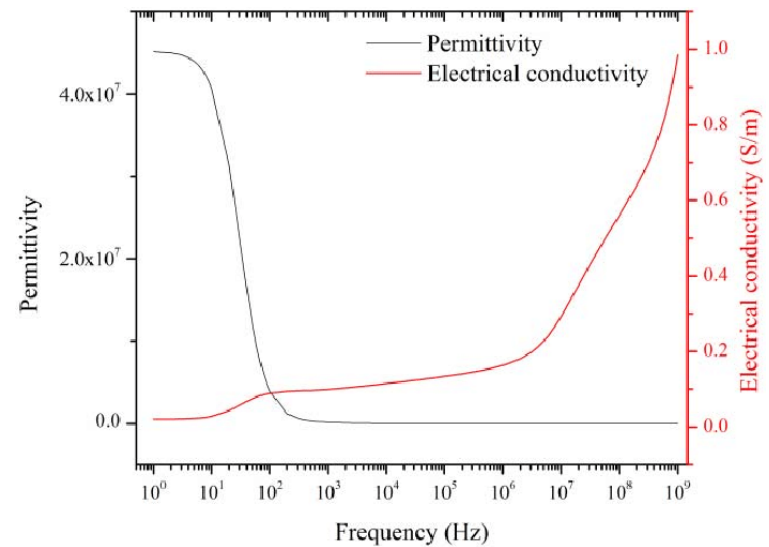
- Relação entre σ e ϵ

- Condutividade Elétrica

- Afeta a atenuação da onda no radar
 - É dominante para ondas EM de baixas frequências (<1MHz)

- Permissividade Dielétrica

- Afeta a propagação das ondas de radar
 - Dominante em altas frequências (>1MHz)



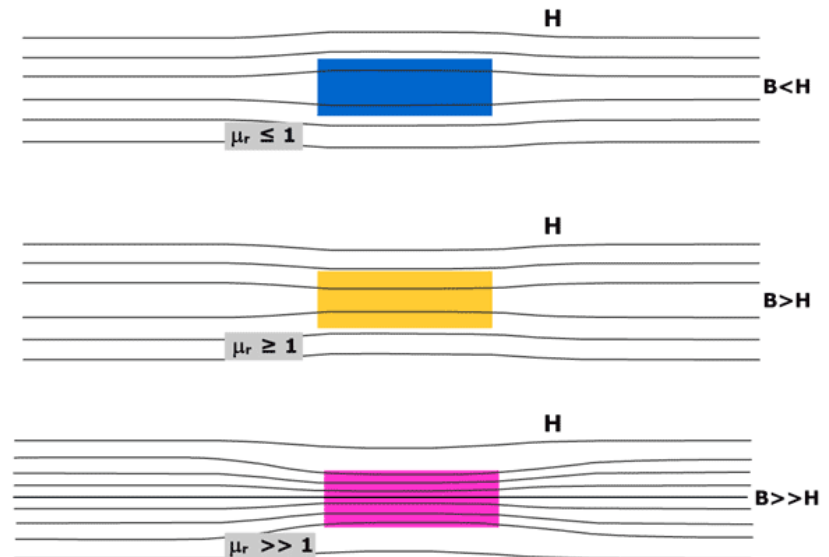
Princípio Físico

- Permeabilidade magnética (μ)

- Habilidade de um material suportar a formação de um campo magnético interno
- Quando exposto a um campo externo
- Relaciona o campo magnético (H) com o campo de indução magnética (B)

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

- Dada em N/A^2



<https://www.differencebetween.com/wp-content/uploads/2015/06/Difference-Between-Magnetic-Permeability-and-Susceptibility-1.gif>

Princípio Físico

- Propriedades elétricas controlam as respostas GPR
 - Supõe-se que...
 - A permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos NÃO depende da frequência
 - μ não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do vácuo (μ_0)
 - Efeitos da variação na permeabilidade magnética não são considerados em GPR
 - Em caso de forte permeabilidade magnética
 - Efeitos não podem ser desprezados



Minério de Ferro

Princípio Físico

- Substituindo-se as relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell
 - Equações de propagação da onda EM não-homogêneas
 - Fatores mais importantes
 - Velocidade
 - Atenuação
- Para materiais geológicos com baixa perda
 - Velocidade de fase das ondas EM

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

- Em que
 - $c \equiv$ velocidade da luz = $3 \cdot 10^9$ m/s
 - $k \equiv$ permissividade dielétrica ou constante dielétrica dos materiais

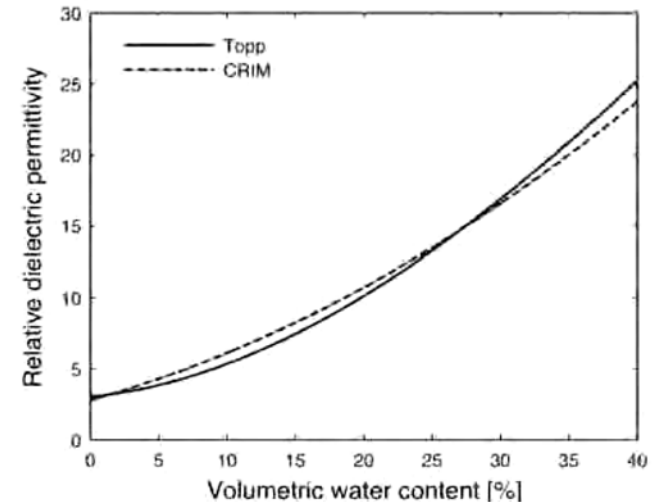
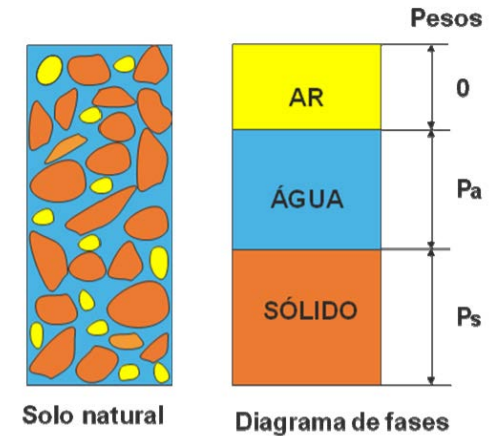
Princípio Físico

- Constante dielétrica e condutividade elétrica para vários materiais

Materiais	Constante Dielétrica	Condutividade Elétrica (mS/m)	Materiais	Constante Dielétrica	Condutividade Elétrica (mS/m)	Materiais	Constante Dielétrica	Condutividade Elétrica (mS/m)
Ar	1	0	Silte saturado	10	1-10	Ferro	1	10
Água destilada	81	0,01	Arenito saturado	20-30	40	Aço	1	---
Água fresca	81	0,5	Solo arenoso seco	2,6	0,14	PVC	8	0
Água do mar	81	3000	Solo arenoso saturado	25	6,9	Asfalto	3-5	0
Areia seca e cascalho	2-6	0,01	Solo argiloso seco	2,4	0,27	Concreto seco	5,5	0
Areia saturada	20-30	0,1-1	Solo argiloso saturado	15	50	Concreto saturado	12,5	0
Argila seca	5	2	Basalto seco	6	1	Diclorometano	8,3	1,1
Argila saturada	40	1000	Basalto saturado	8	10	Benzeno	2,24	0,11
Calcáreo seco	4	0,5	Diabásio seco	7	10	Metanol	33,7	0,38
Calcáreo saturado	8	2	Diabásio saturado	8	100	Mistura de óleo e outras substâncias orgânicas	2	0,5
Folhelho e siltito seco	5	1	Granito seco	5	0,01			
Folhelho saturado	7	100	Granito saturado	7	1			
Siltito saturado	30	100	Sal seco	5-6	0,01-1			

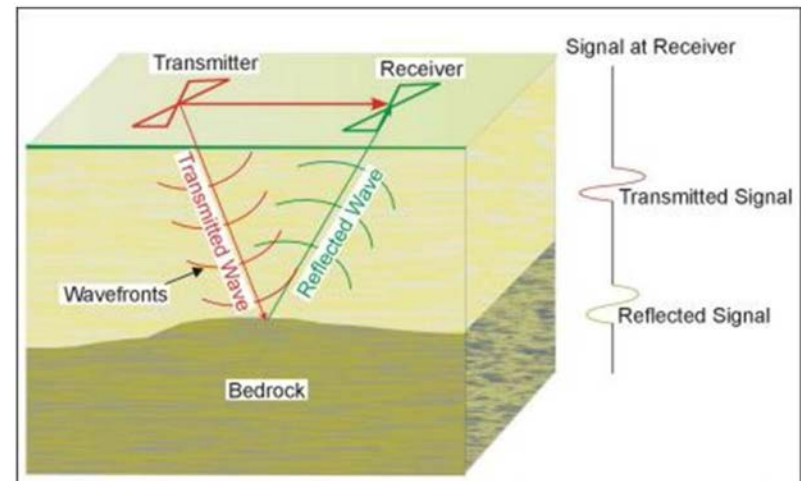
Princípio Físico

- Energia do campo EM
 - Extraída e transferida irreversivelmente para o meio
- Teor de umidade volumétrico de água
 - Pode alterar características elétricas de rochas e solos
 - Íons dissolvidos na água proporcionam um mecanismo de condução elétrica
 - Dissipando o campo EM aplicado
 - Atenuando e diminuindo a penetração da onda EM no meio
 - Constante dielétrica é influenciada pelo conteúdo de fluídos no meio
 - Porosidade
 - Características do fluido intersticial
 - Superfície específica
 - Mineralogia
 - Estrutura
 - Temperatura



Princípio Físico

- TDR (*Time Domain Reflectometry*)
 - Determinação da constante dielétrica do meio (k)
 - Consiste na medição do tempo de propagação de uma onda EM
 - Entre uma antena transmissora e uma receptora
 - Vários pulsos são gerados na antena transmissora
 - Produzindo um gráfico da relação entre
 - Variações da impedância (coeficiente de reflexão) e tempo
 - Radargrama



Princípio Físico

- Radargrama

- Fornece o tempo entre transmissão e recepção das ondas EM

- Tempo de passagem da onda EM (t)

- Calcula-se pela velocidade de propagação (v) do pulso no solo

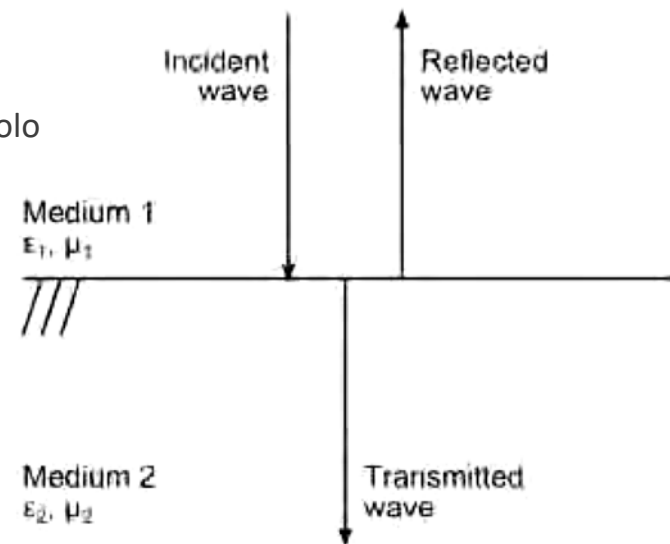
$$v = \frac{2L}{t}$$

- Em que

- $L \equiv$ trajeto de descida e subida da onda

- Constante dielétrica do meio

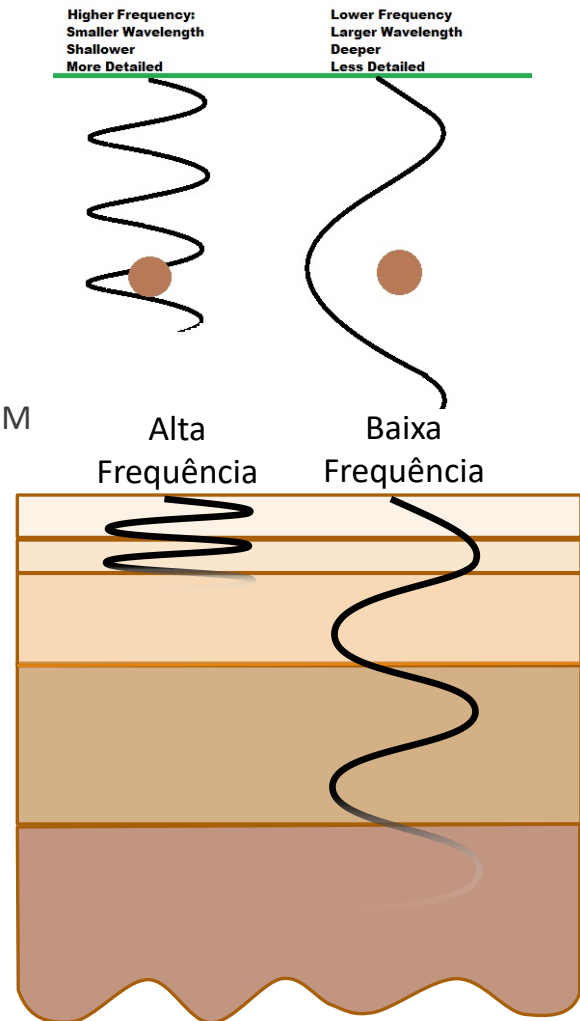
$$k = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2$$



Profundidade de penetração x resolução

- Sistema GPR

- Especificado pela sua frequência central (f_c)
 - Antenas transmissora e receptora
 - Projetadas para atuar numa faixa situada entre
 - 0.5x a frequência central (frequência mínima)
 - 1.5x a frequência central (frequência máxima)
- f_c tem papel importante na profundidade de penetração da onda EM
 - Principal limitação do GPR
 - Maior f_c = Maior resolução e menor penetração
 - Menor f_c = Menor resolução e maior penetração
- A profundidade de penetração da onda
 - Fortemente dependente das propriedades elétricas dos materiais geológicos



Profundidade de penetração x resolução

- Frequências centrais vs. Profundidades máximas

- Varia de acordo com o ambiente
 - Porém, pode ser usado como um guia...

- Resolução vertical

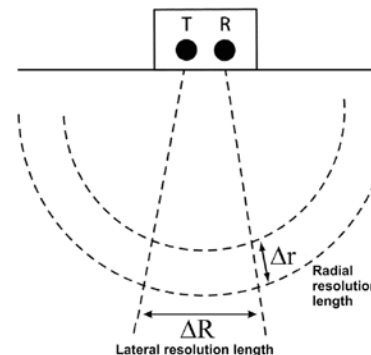
- Habilidade de distinguir as reflexões
 - Provenientes do topo e da base de camadas de pequena espessura

- Resolução horizontal

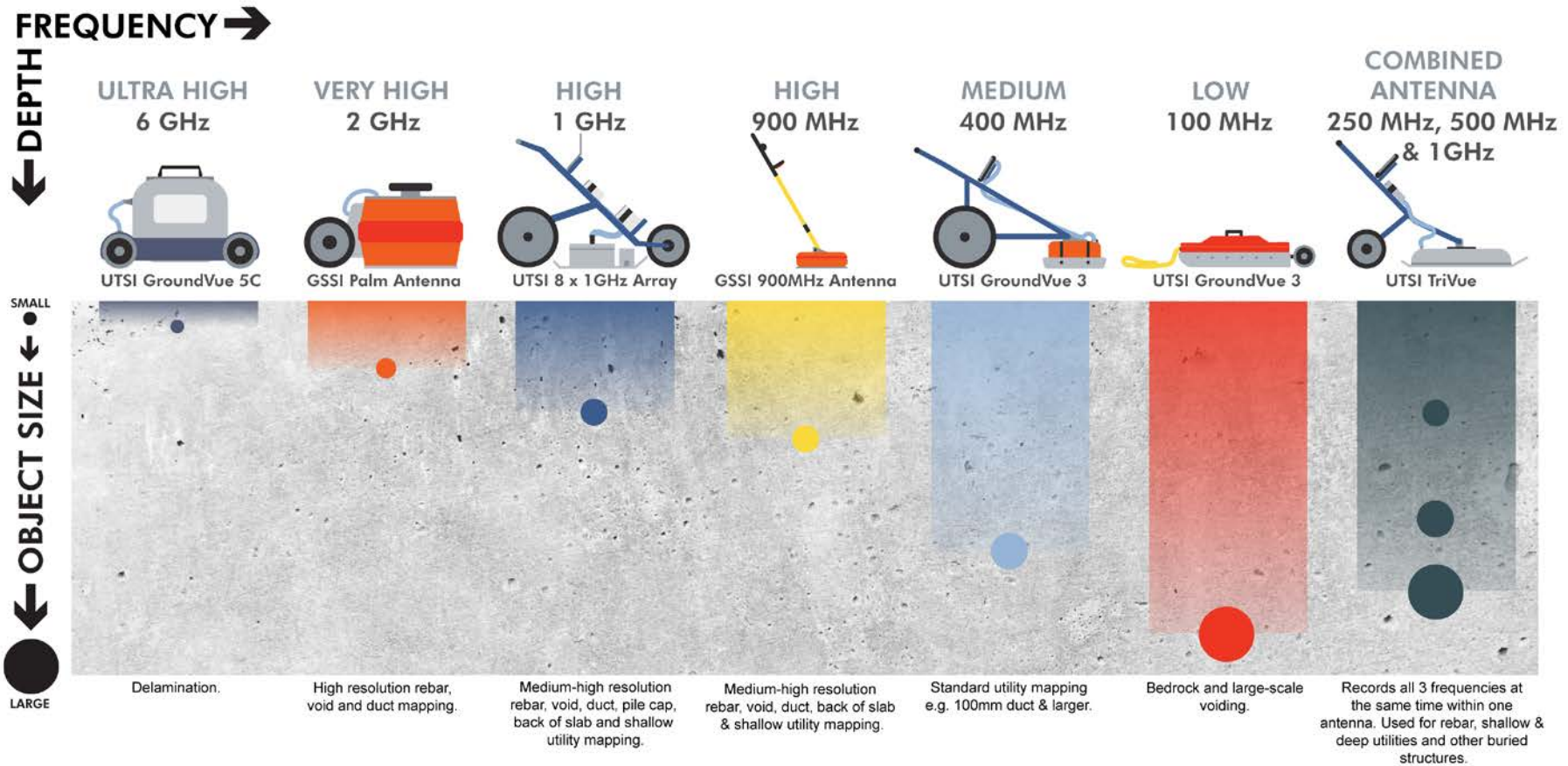
- Determinada pelo padrão de radiação da antena
 - Comparável a um feixe de luz de uma lanterna
 - Pode ser aproximado por um cone vertical
 - Ângulo de abertura de 30°
 - Com o vértice localizado na antena transmissora

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Frequência Central (MHz)	Resolução vertical (m)
200	0.25
100	0.50
50	1.00
25	2.00



Profundidade de penetração x resolução



Profundidade de penetração x resolução

- Casos extremos

- Permafrost

- Penetração pode chegar a 4 km

- Camadas de Sal

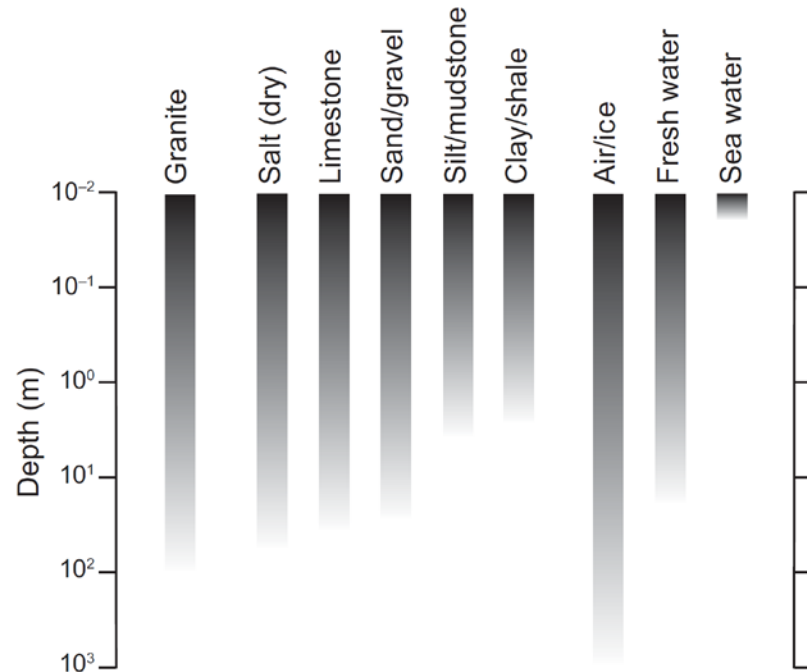
- Centenas de metros

- Granitos, areias e cascalhos

- Dezenas de metros

- Solos ricos em argilas

- Poucos metros



Profundidade de penetração x resolução

- Controle da profundidade de penetração

- Perdas por atenuação

- Condução elétrica

- Baixas frequências

- Proporcionais a condutividade elétrica do meio

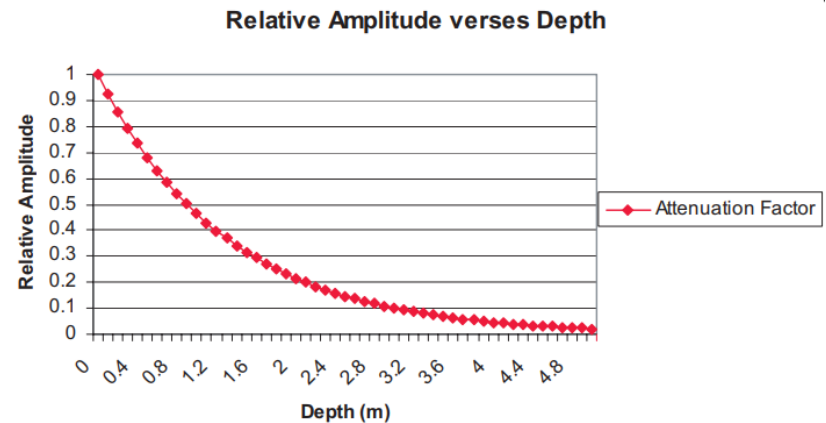
- Polarização

- Altas frequências

- Moléculas de água não conseguem mais se polarizar sob um campo aplicado

- Relaxação dielétrica da água

- Frequência de relaxação ≈ 20 GHz



Profundidade de penetração x resolução

- Controle da profundidade de penetração

- Perdas por atenuação

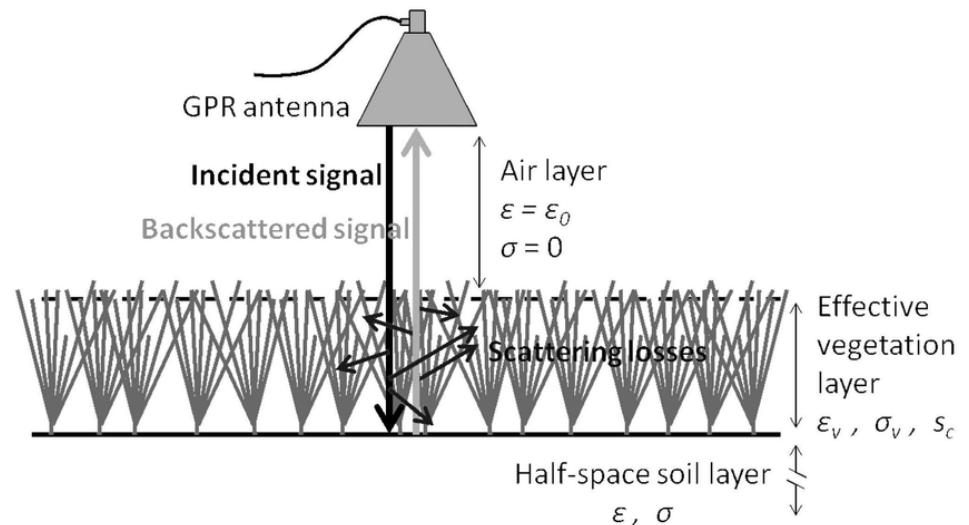
- Espalhamento geométrico (*geometric spreading*)
 - Independe do meio
 - Atenuação natural da amplitude do sinal pelo espalhamento esférico da energia

- Perdas por dispersão (*scattering losses*)

- Perdas por heterogeneidades dos materiais comparáveis com o comprimento da onda emitida.
 - Porosidade
 - Contatos litológicos
 - Tocas de animais e insetos
 - Vegetação

- Regra geral

- $d_{max} < \frac{30}{\alpha} < \frac{0.035}{\sigma}$
 - Em que
 - d_{max} \equiv profundidade máxima de detecção
 - α \equiv atenuação em dB/m
 - σ \equiv condutividade (S/m)

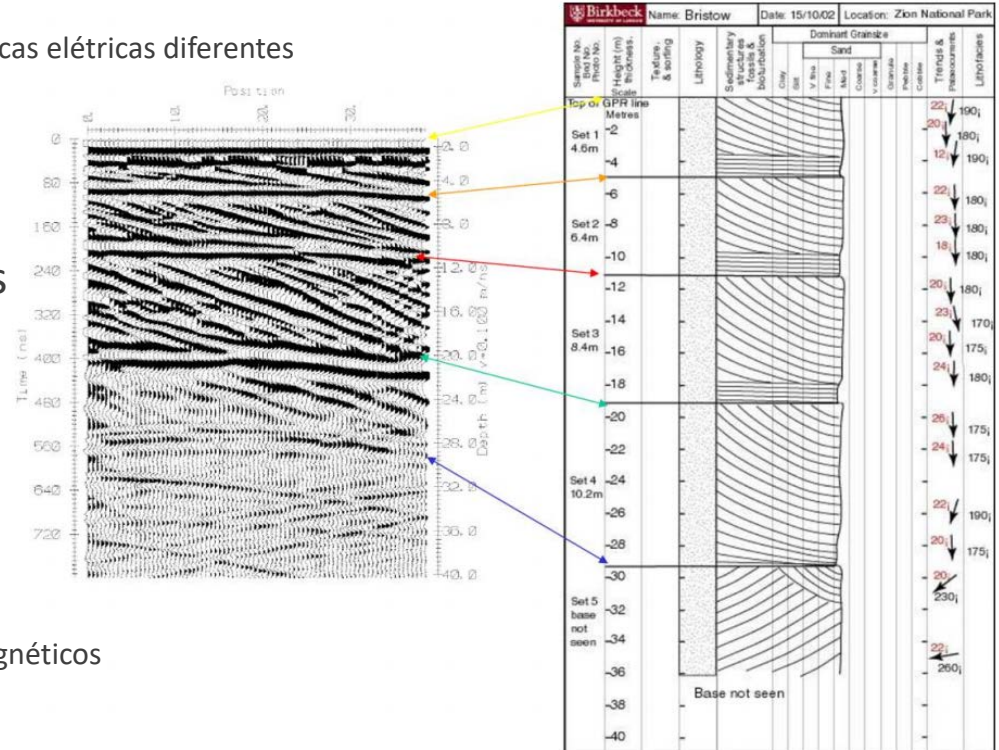


Coeficiente de reflexão

- Quando a onda do radar se propaga em um meio
 - Encontra variações nas propriedades elétricas
 - Variações podem causar uma forte impedância elétrica na interface que separa as camadas
 - Causando reflexões e refrações
 - Interfaces que separam meios com características elétricas diferentes
 - Quantidade do sinal refletido
 - Coeficiente de reflexão

Reflexão e a refração de ondas planas

- Lei de Snell
 - Relação angular
 - Entre as ondas incidentes, refletidas e refratadas
- Equações de Fresnel
 - Relação das amplitudes dos campos elétricos e magnéticos



Coeficiente de reflexão

- Em GPR

- Supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas

- Analogamente à sísmica de reflexão
- Amplitude do coeficiente de reflexão (r_{GPR})
- Razão do campo elétrico transmitido pelo incidente

$$r_{GPR} = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}$$

- Em que
 - $k_1 \equiv$ constante dielétrica acima da superfície refletora
 - $k_2 \equiv$ constante dielétrica abaixo da superfície refletora

De		Para		r_{GPR} (%)
Ar	$k_1 = 1$	Solo Seco	$k_2 = 5$	38
Solo Seco	$k_1 = 5$	Água	$k_2 = 81$	80
Solo Seco	$k_1 = 5$	Solo Saturado	$k_2 = 25$	38
Solo Seco	$k_1 = 5$	Rocha	$k_2 = 8$	12
Solo Saturado	$k_1 = 25$	Rocha	$k_2 = 8$	28
Solo	$k_1 = 3.5$	Metal	$k_2 = \infty$	100

Coeficiente de reflexão

- Interface ar/solo seco

- Forte reflexão
 - 38% da energia incidente
- Indesejada nos levantamentos GPR
 - Para minimizar essa reflexão
 - Antenas colocadas o mais próximo possível do solo

- Interface solo seco/água

- Excelente refletor
 - 80% da energia incidente
- Ótimo para localização de nível de lençol freático

- Interface solo/metal

- Reflexão total
- Ideal para localização de tubos e dutos metálicos enterrados

De		Para		r_{GPR} (%)
Ar	$k_1 = 1$	Solo Seco	$k_2 = 5$	38
Solo Seco	$k_1 = 5$	Água	$k_2 = 81$	80
Solo Seco	$k_1 = 5$	Solo Saturado	$k_2 = 25$	38
Solo Seco	$k_1 = 5$	Rocha	$k_2 = 8$	12
Solo Saturado	$k_1 = 25$	Rocha	$k_2 = 8$	28
Solo	$k_1 = 3.5$	Metal	$k_2 = \infty$	100

Aquisição de dados

- Sistema GPR

- Projetado em módulos acessados via computador
 - Maior flexibilidade nas operações de campo

- Antenas

- Não blindadas

- Podem trabalhar com diversas orientações entre as antenas transmissora e receptora
- Pode-se variar a distância entre as antenas
 - Emprego de diversas técnicas de aquisição
- Sofrem interferências de ruídos EM externos
 - e.g. torres de alta tensão, celulares, rádios, entre outros

- Blindadas

- Maior facilidade e velocidade nos trabalhos de aquisição
- Antenas alocadas a uma distância e orientação fixas em uma caixa blindada
- Protegidas de interferências externas



<http://www.ground-nadar.com/media/images/gprand-gpr.jpg>



https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTgWMMWdGGW4j_kYQIP3tWjaF9yIE2gQWle6zmDBripxDup5L1msvA

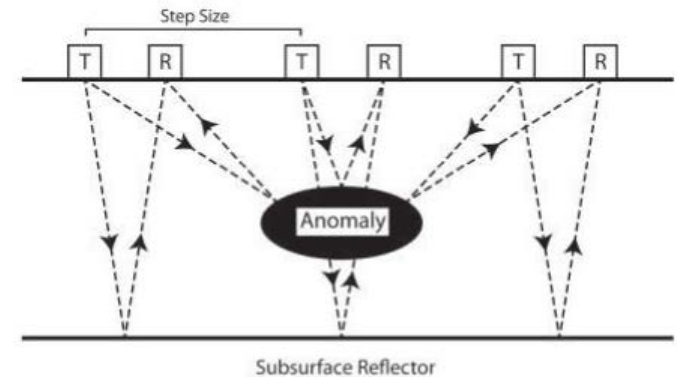
Planejamento de um levantamento GPR

- Como todo levantamento geológico, geoquímico, geofísico, etc.

- Deve avaliar previamente a viabilidade da utilização do método

- Definição do problema

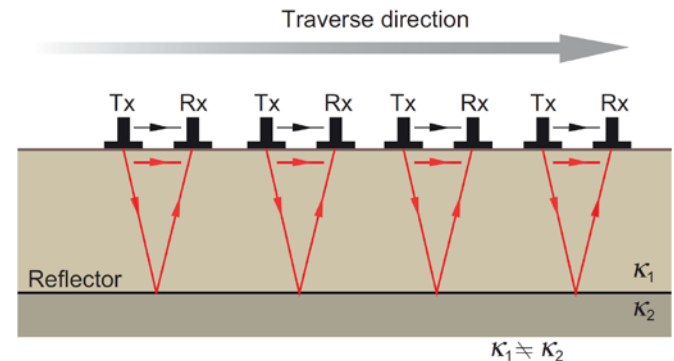
- Qual é a profundidade?
- Qual é a geometria do alvo?
- Existe contraste suficiente entre as propriedades elétricas?
- Quais são as dificuldades de acesso da região?
 - e.g. relevo acidentado, mata fechada, etc.
- Há fontes de ruído EM?
 - e.g. postes de iluminação, torres de alta tensão, cercas metálicas, antenas de rádio, etc.
- Existem dados disponíveis de levantamentos anteriores?
 - e.g. geológicos, geofísicos e geotécnicos



Planejamento de um levantamento GPR

- Perfis de reflexão com afastamento constante (*common offset*)

- Operação mais simples e comum de operação
- Geometria das antenas transmissora e receptora
 - Mantida a uma distância fixa constante
 - Transportada ao longo do perfil para imagear as reflexões versus a posição das antenas



- Resultado

- Perfil GPR
 - Eixo horizontal
 - Distâncias percorridas pelo deslocamento das antenas
 - Eixo vertical
 - Variações das propriedades elétricas de subsuperfície (reflexões) em função do tempo duplo



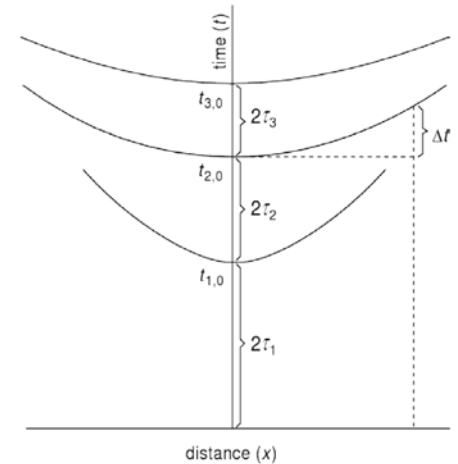
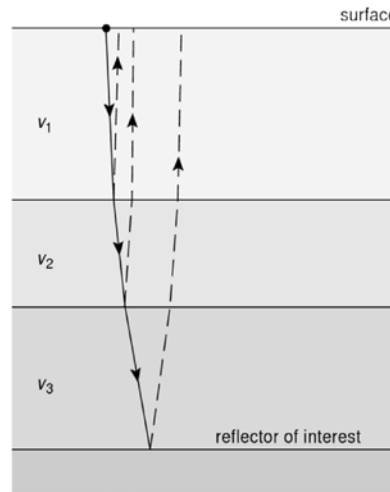
Cálculo de Profundidades dos Refletores

- Geometria em subsuperfícies conhecidas

- Usando um arranjo *Common Offset*
- Velocidade (v) para 2 camadas

$$v = \frac{2d}{t}$$

- Em que
 - $d \equiv$ profundidade do refletor
 - $t \equiv$ tempo-duplo



- Múltiplas camadas

- Fórmula de Dix

$$v_n = \sqrt{\frac{\bar{v}_n^2 t_n - \bar{v}_{n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}}$$

- Em que
 - $v_n \equiv$ velocidade intervalar para a n-ésima camada
 - $\bar{v}_{n-1} \equiv$ velocidade RMS do refletor acima da camada
 - $\bar{v}_n \equiv$ velocidade RMS do refletor abaixo da camada

- Root-Mean-Square Velocity – V_{RMS}

$$V_{RMS,n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i}}$$

- Em que
 - $v_i \equiv$ velocidade de cada camada
 - $\tau_i \equiv$ tempo simples para reflexão na i-ésima camada

Técnicas de aquisição de dados

- Geometria em subsuperfícies desconhecidas

- Levantamentos *Multi-Offset*

- Sondagens de velocidade

- Usadas na sísmica de reflexão

- Aplicadas no GPR

- Medidas indiretas

- CMP - "*Common Mid Point*"

- Abertura entre as antenas é crescente em sentidos opostos

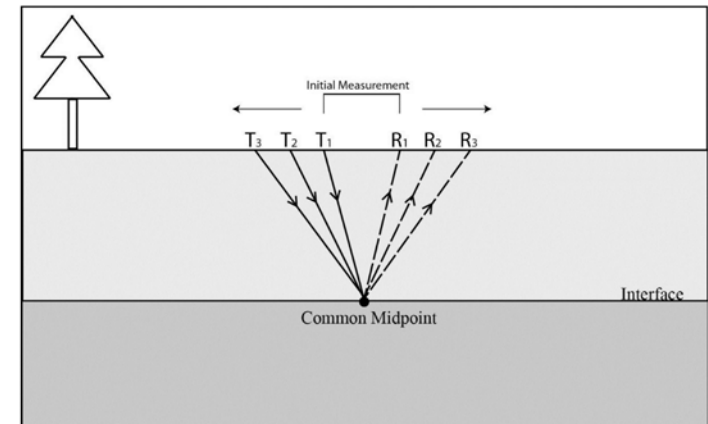
- Referência: um ponto central fixo

- WARR - "*Wide Angle Reflection and Refraction*"

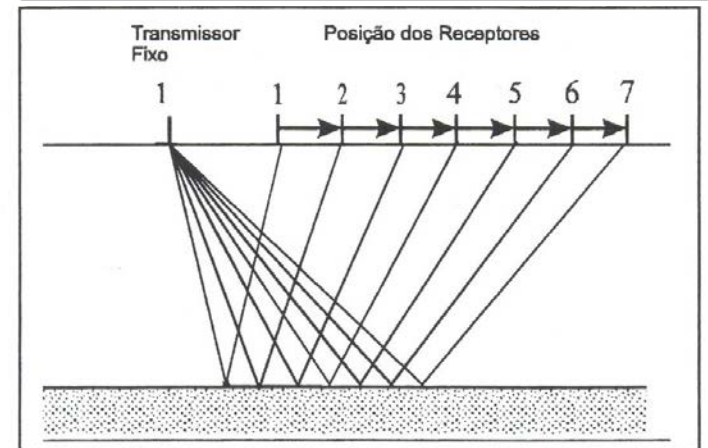
- Uma antena fixa

- Uma antena é sucessivamente afastada da primeira

CMP



WARR



Técnicas de aquisição de dados

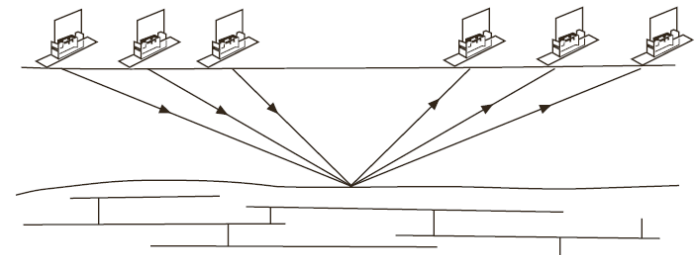
- Sondagens de velocidade

- CMP e WARR

- Usadas para obter uma estimativa da velocidade do sinal vs. profundidade do refletor

- Variação do espaçamento das antenas para uma localização fixa

- Medição do tempo duplo das reflexões de subsuperfície



- Velocidade verdadeira

- Determinada medindo a constante dielétrica do solo

- Utilizando a equação

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

#603469558



https://i0.ubtdn.com/photos/46/95/58/45_60346958c2.jpg

Técnicas de aquisição de dados

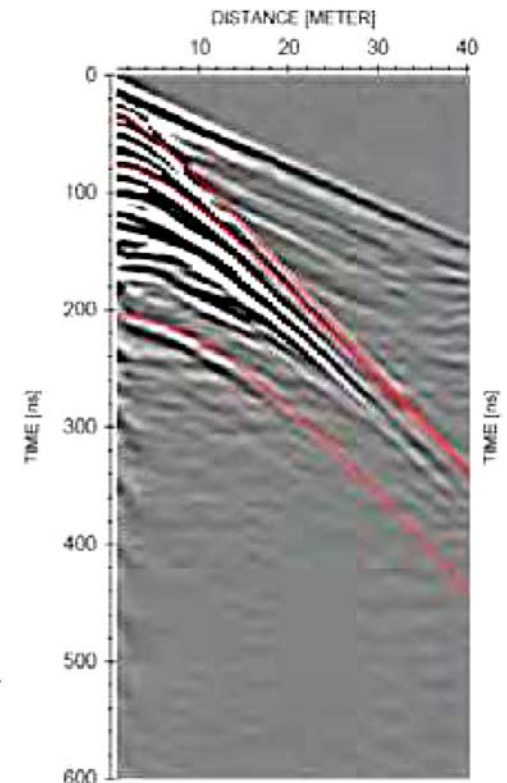
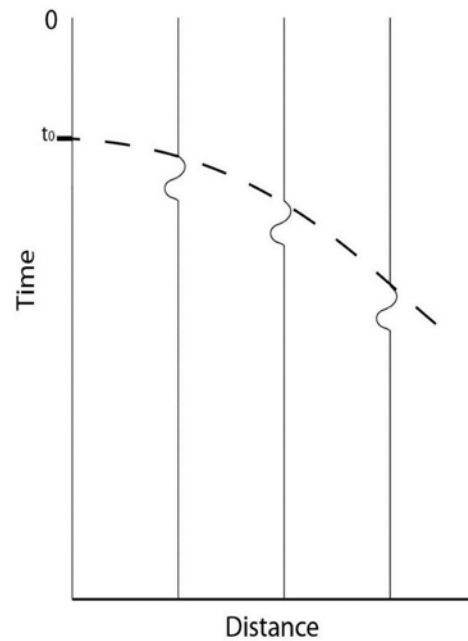
- Sondagens de velocidade

- Profundidade dos refletores (d)

$$t = \frac{2\sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}}{v}$$

- Em que

- $t \equiv$ tempo-duplo
- $x \equiv$ offset
- $v \equiv$ velocidade intervalar



Técnicas de aquisição de dados

- Sondagens de velocidade

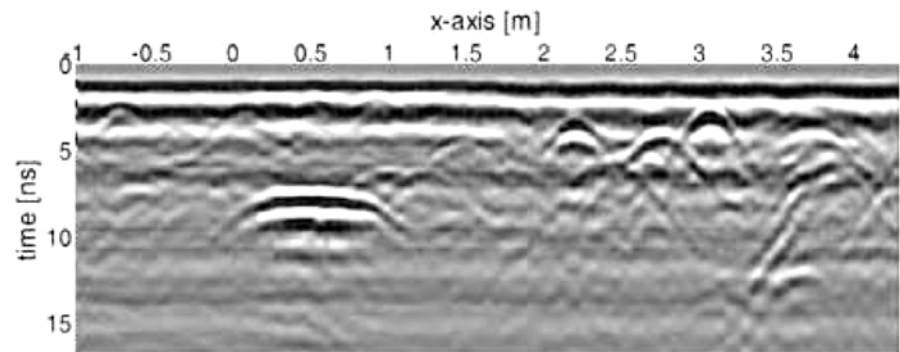
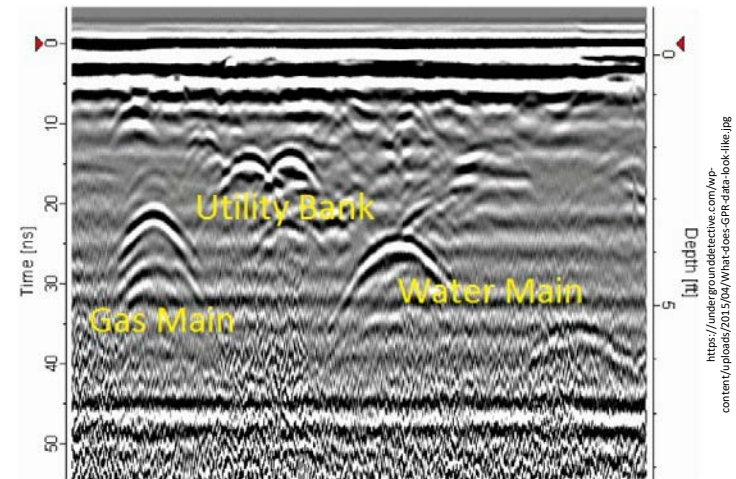
- Difrações

- Espalhamento de reflexões por conta de refletores não-paralelos
 - Tem uma importância significativamente maior no GPR
 - Comumente causados por corpos discretos em subsuperfície
 - Rochas
 - Raízes
 - Tubulações
 - Cabeamentos
 - etc

$$t = \frac{2\sqrt{d^2+x^2}}{v_{solo}}$$

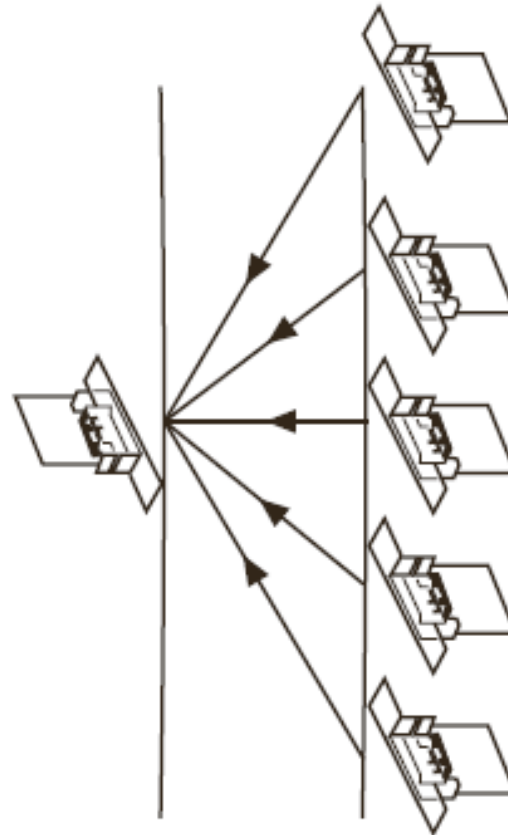
- Em que

- $d \equiv$ profundidade ao alvo
 - $t \equiv$ tempo-duplo
 - $x \equiv$ offset
 - $v \equiv$ velocidade intervalar



Técnicas de aquisição de dados

- Transiluminação ou tomografia
 - Perfilagem em poços
 - Não chega a ser uma reflexão de sinal
 - Em dois poços diferentes
 - 1° poço
 - Antena transmissora
 - 2° poço
 - Antena receptora
 - Medido o tempo simples de transmissão



Planejamento de um levantamento GPR

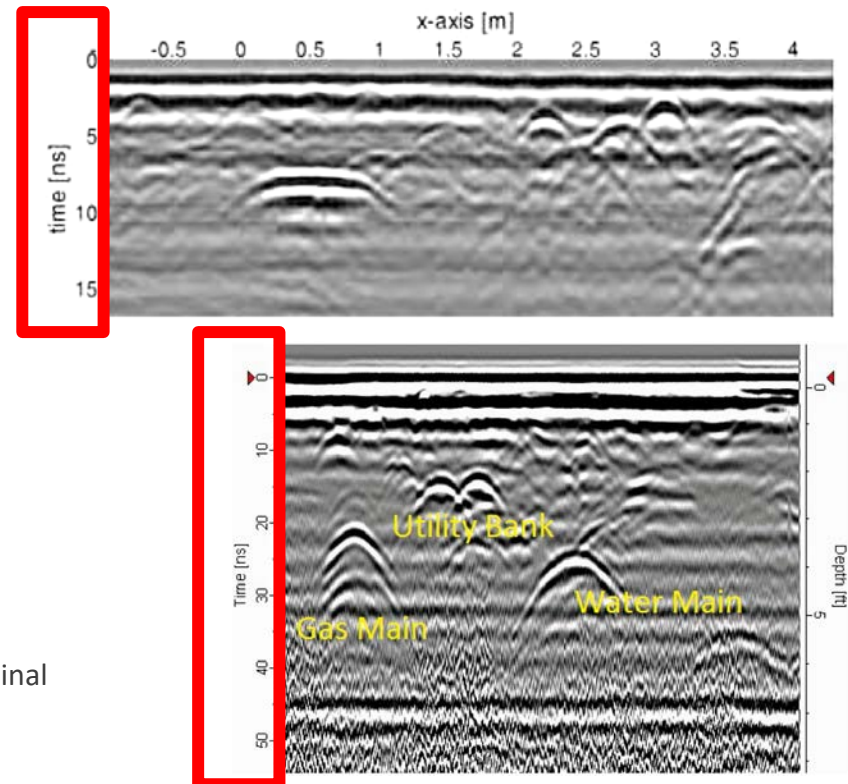
- Aquisição dos perfis de reflexão

- Parâmetros a serem analisados

- Frequência da antena
 - Profundidade de investigação vs. Resolução
 - Regra geral

$$f = \frac{150}{x\sqrt{k}}$$

- Em que
 - $x \equiv$ resolução espacial requerida
 - $k \equiv$ constante dielétrica
 - Abertura da janela temporal
 - Quanto tempo o GPR deverá continuar recebendo sinal
 - Mais profundo = Maior janela
 - Mais raso = Menor janela



Planejamento de um levantamento GPR

- Aquisição dos perfis de reflexão

- Parâmetros a serem analisados

- Espaçamento entre as antenas
 - No caso de antenas não blindadas
 - Separação das antenas igual a 20% da profundidade do alvo
 - Quando não se tem maior conhecimento da área a ser investigada
 - Na prática
 - Distância entre as antenas transmissora e receptora
 - Igual ao comprimento das antenas
 - Antenas blindadas
 - Espaçamento fixo fornecido pelo fabricante

Antena não blindada



Antena blindada



Planejamento de um levantamento GPR

- Aquisição dos perfis de reflexão

- Parâmetros a serem analisados

- Amostragem espacial

- Intervalo entre as emissões do sinal

- Para evitar subamostragem e/ou falsa amostragem (*aliasing*)

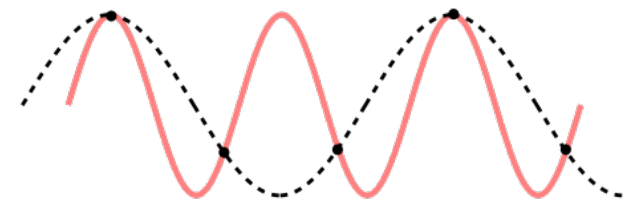
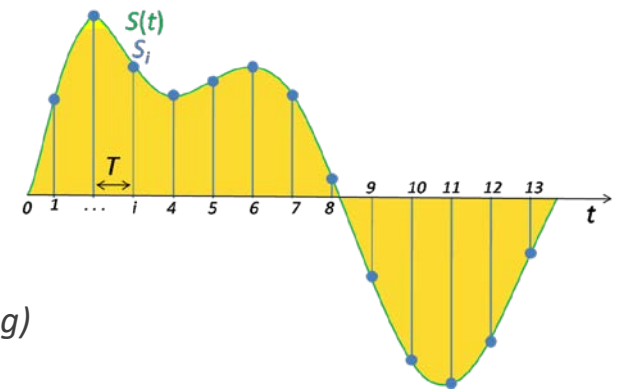
- Não exceder o intervalo de amostragem de Nyquist

- Número de amostras por traço.

- Utilizado para transformar o dado analógico em digital

- A discretização do traço pode variar de 128 a 1024

- Um valor adequado e comumente utilizado é 512



Planejamento de um levantamento GPR

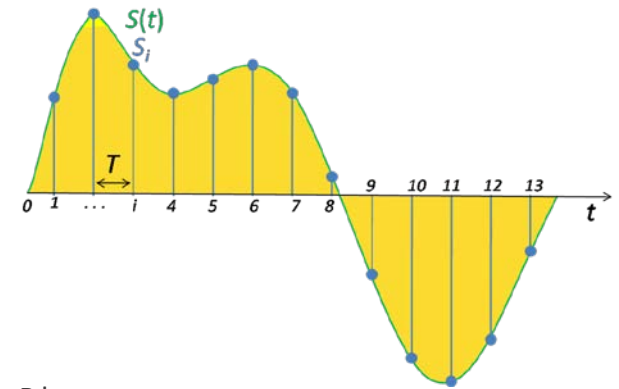
- Amostragem de um sinal

- Processo de converter um sinal contínuo em uma sequência numérica

- Discretização de um sinal

- Para amostrar corretamente um sinal

- Necessário respeitar o teorema de amostragem de Nyquist-Shannon

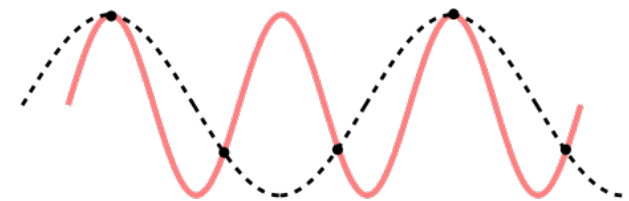


“Se uma função $x(t)$ não contém frequências maiores que B hertz, esta função é completamente determinada por pontos espaçados de $1/(2B)$ segundos”

- Assim

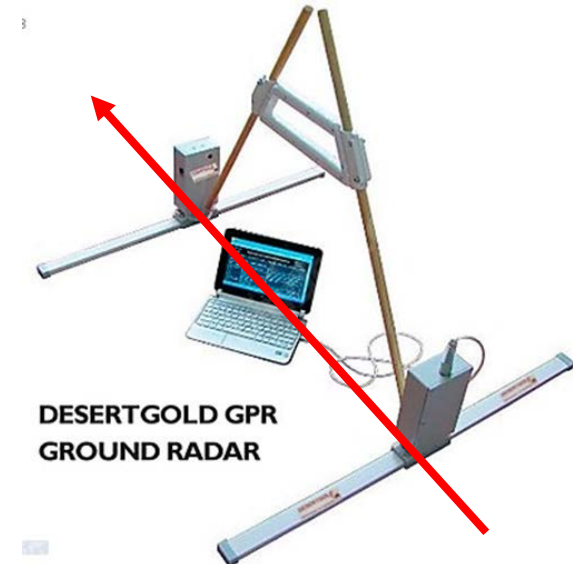
- Para evitar efeitos de subamostragem ou *aliasing*
 - Geração de um sinal diferente por subamostragem

- A taxa de amostragem (por unidade de espaço ou tempo)
 - Deve ser 2 vezes maior que frequência máxima do sinal



Planejamento de um levantamento GPR

- Aquisição dos perfis de reflexão
 - Parâmetros a serem analisados
 - Orientação
 - Afeta a qualidade dos dados devido aos diferentes padrões de radiação
 - Realiza-se levantamentos com ambas as antenas perpendiculares a direção do perfil
 - O pulso é radiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil
 - Padrão TE - transversal elétrico
 - Mais larga cobertura angular de um refletor em subsuperfície
 - Esta orientação também é a utilizada nas antenas blindadas
 - Localização e orientação do perfil
 - Importante para se saber a origem dos dados
 - Orientação
 - Perpendicular à direção da estrutura em subsuperfície
 - Distintas de ruídos (horizontais)
 - Mais fácil identificação

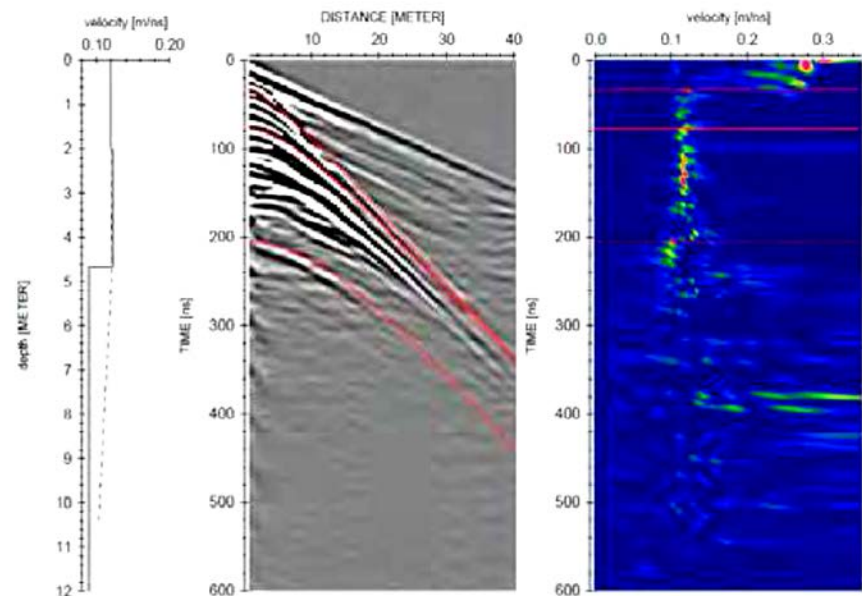


Processamento dos dados

- Realizado de maneira sistemática
 - Pode remover ou realçar certas feições de interesse
- Etapas*
 - Edição dos dados
 - Processamento do sinal
 - Apresentação da imagem processada

*Dependendo do tipo de aquisição

- Antenas de espaçamento fixo ou não



Processamento dos dados

- Após a aquisição dos dados

- 1º passo: Edição dos dados

- Melhorar a apresentação

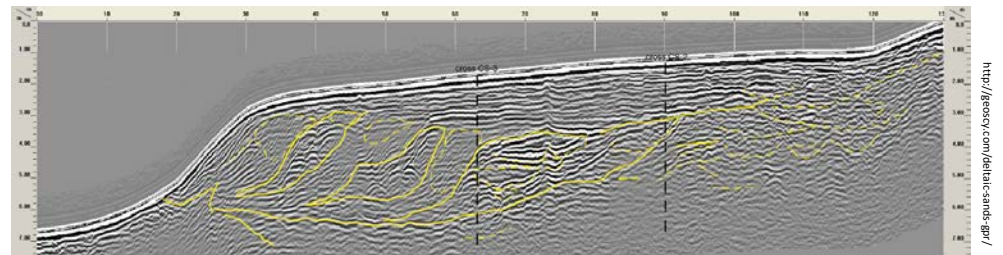
- Reverter a direção do perfil

- Incluir as informações da topografia

- Editar os traços

- Corrigir o tempo zero da chegada da onda

- entre outros



terraced mound in Taylor Valley, Antarctica

Processamento dos dados

- 2º passo: Processamento básico
 - Sem grandes ações
 - Resultados observáveis em tempo real
 - Radares com antenas blindadas de espaçamento fixo
 - Filtragem
 - Melhoramento da razão sinal/ruído
 - Delimitação uma banda de frequência da antena
 - Aplicação de ganhos
 - Equalizar as amplitudes de cada traço
 - Compensação da atenuação do sinal

Processamento dos dados

- 3º passo: Processamento Avançado

- Migração

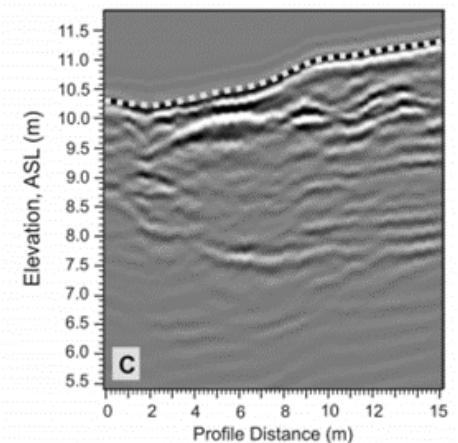
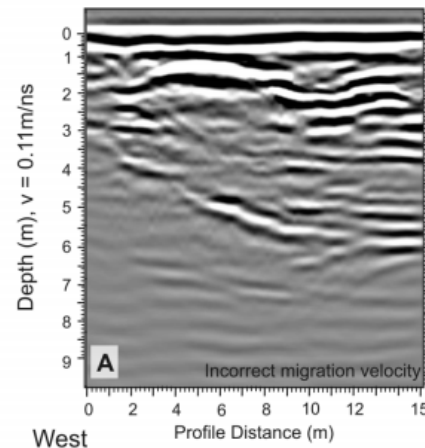
- Similar à migração sísmica

- Reposiciona os eventos de reflexão abaixo da sua localização superficial e no tempo de reflexão corretos

- Deconvolução

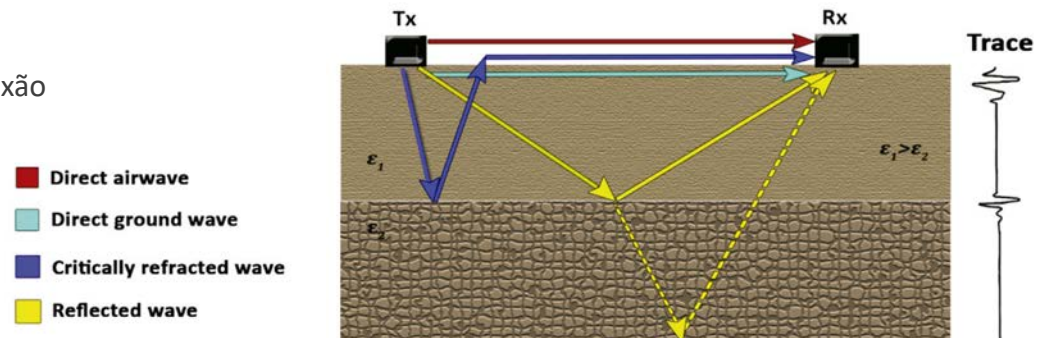
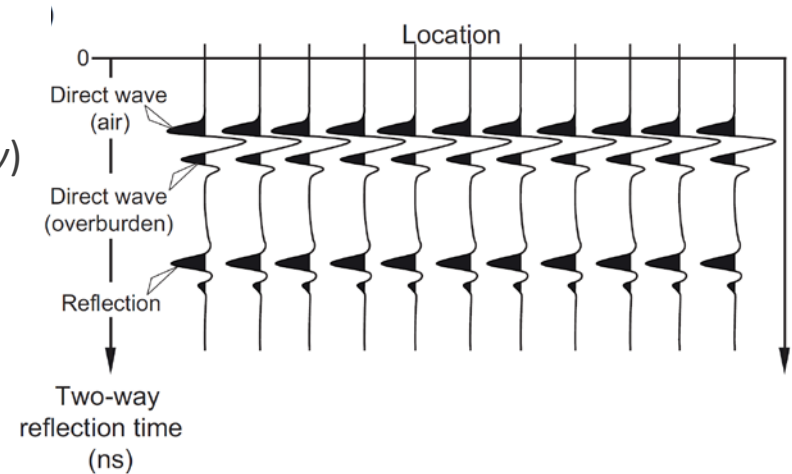
- Remove múltiplas ou "*ringing*" dos dados

- Causadas pela ressonância da energia do radar



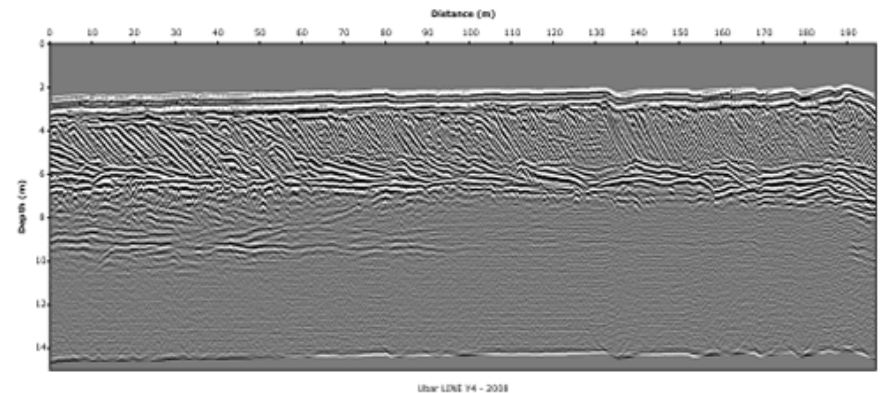
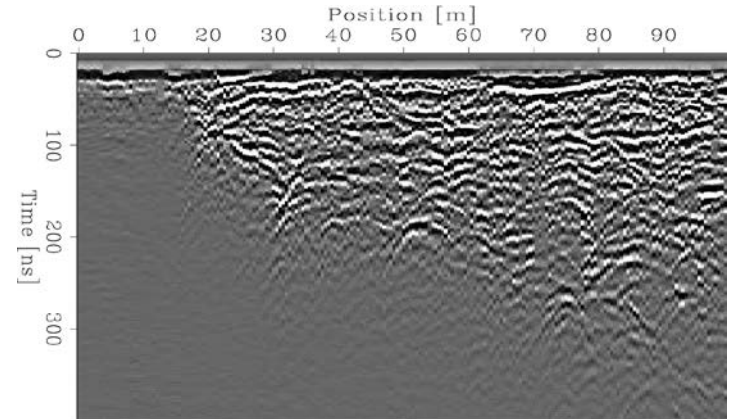
Interpretação dos dados

- Onda aérea
 - 1ª chegada em reta de inclinação aproximada ($1/c_0$)
 - Em que c_0 é a velocidade da luz
- Onda direta
 - 2ª chegada em reta de inclinação aproximada ($1/v$)
 - Em que v é a velocidade da onda no solo
- Ondas refletidas
 - Hipérboles seguintes
 - Em levantamentos com antenas de espaçamento fixo
 - Radargrama produzido em tempo real
 - Camadas plano-paralelas
 - Não há visualização de hipérboles por reflexão
 - Difração
 - Visualização hipérboles



Interpretação dos dados

- 1° passo
 - Identificar a origem das reflexões
- 2° passo
 - Identificar as interfaces indicadas pelas reflexões
 - Se representam mudanças na subsuperfície ou interferências
- 3° passo
 - Enquadrar as feições em uma das classes
 - Refletores horizontais contínuos
 - Refletores de objetos de duas e três dimensões (2D e 3D)
 - Dutos, tanques, galerias, entre outros
 - Hipérboles apertadas
 - Descontinuidades laterais
 - Hipérboles de difrações



Interpretação dos dados

- Fontes de interferências

- Objetos na superfície

- Árvores de grande porte, casas e edifícios, carros, estrada de ferro e cercas metálicas
 - Hipérboles abertas
 - Velocidade média para objetos 2D/3D \neq Velocidade de objetos na superfície
 - Facilmente distinguíveis num perfil de GPR

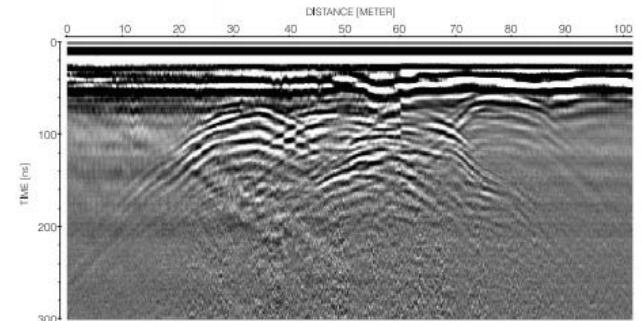
- Transmissores de sinais EM de alta frequência

- Estações de rádio FM
 - Antena de microondas
 - Aparelho de comunicação "walkie-talkie"

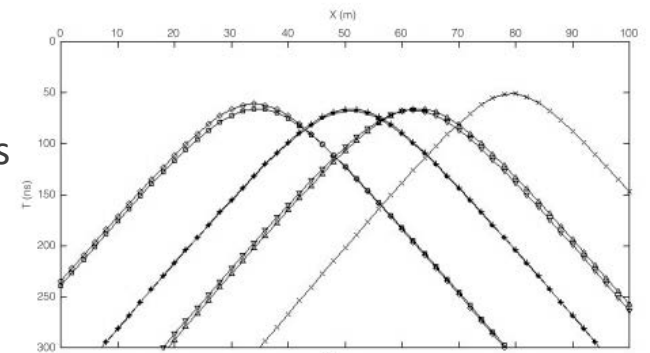
- Ressonância da antenas

- Muitas dessas feições podem ser identificadas nos perfis

- Fundamental uma boa descrição das observações de campo



(a)



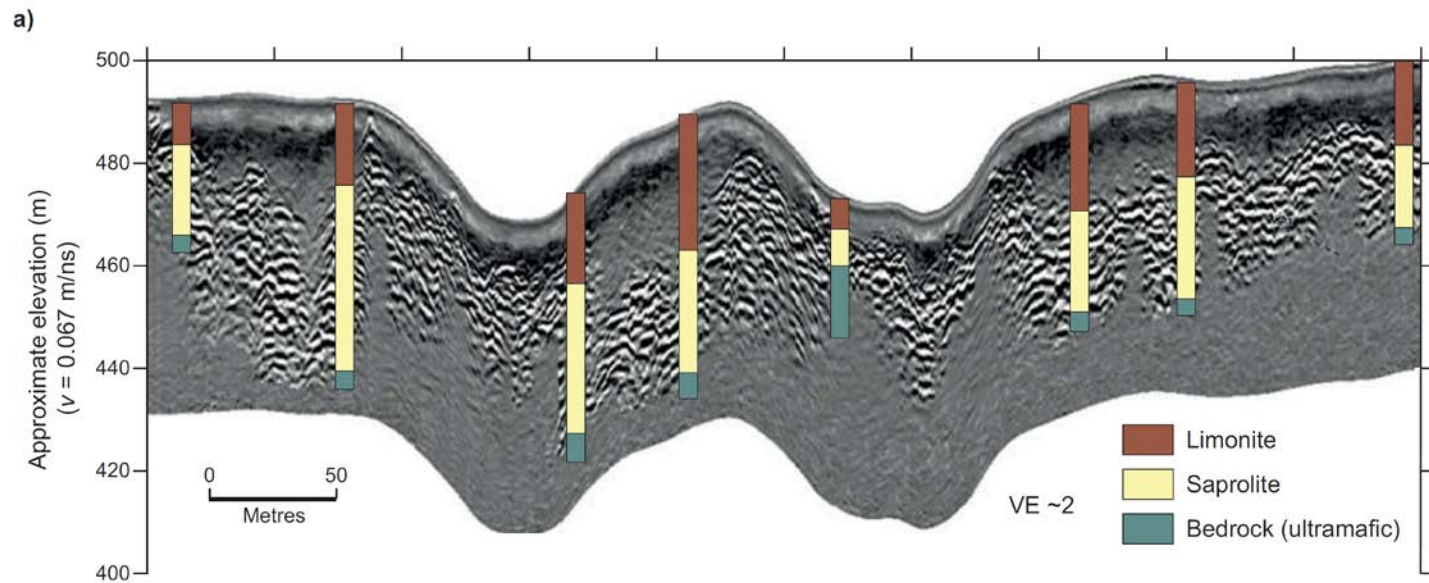
(b)

Interpretação dos dados

- Interpretação dos perfis GPR
 - Bastante subjetiva
 - Depende muito do intérprete
- Importante
 - Ter os objetivos do levantamento claros
 - Conhecimento sobre as propriedades elétricas
 - Do alvo
 - Do meio encaixante
- Todo e qualquer metodologia geofísica
 - Recomendável o uso de outras fontes de informações para complementar os dados
 - Geológicas e Geofísicas
 - Aumento da confiabilidade da interpretação dos dados

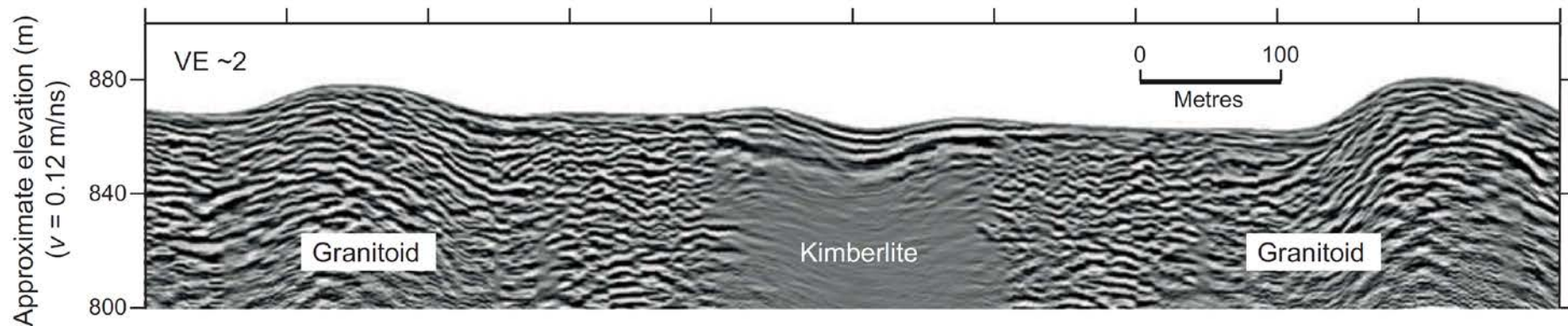
Cases

- Depósito de níquel laterítico
 - Sulawesi, Indonesia



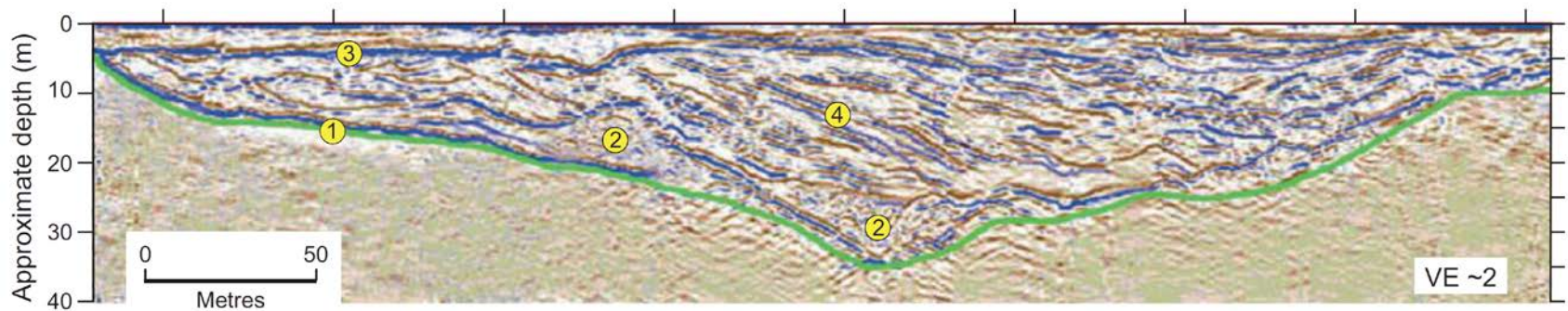
Cases

- Pipe kimberlítico
 - Goiás, Brasil



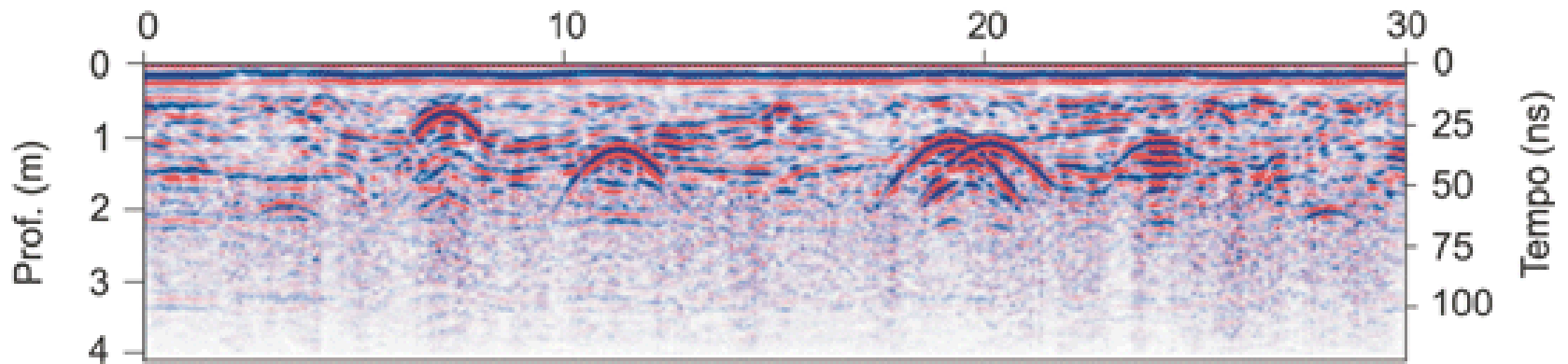
Cases

- Au em paleocanal
 - Maple Creek, Guiana
 - 1 – Base do paleocanal
 - 2 – Área de prospecção
 - 3 – Inconformidade
 - 4 – Camadas frontais do delta



Cases

- Tubulações de plástico e metal
 - Sítio Controlado IAG-USP



(c)