

Geofisica Applicata
Scienze Geologiche

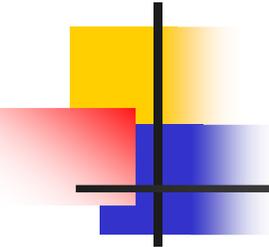
LM - UNIFE

Georadar (GPR)

Tecnica elettromagnetica ad alta
frequenza

AA 2018-2019

N. Abu Zeid



Metodi EM ad alta frequenza

GPR: Ground Probing Radar

Ground Penetrating Radar

parte 01

Taranto, furgone precipita in una voragine



voragini



Particolare della misure gravimetrica

Strumentazione attualmente funziona in automatico

Applicazioni di uso comune:

- Individuare difetti nel sottosuolo vicino (<3 m),
- Individuare cavità (comune al metodo gravimetrico= → a destra)
- Individuare sottoservizi,
- Caratterizzare opere ingegneristiche
- Caratterizzazione dei ghiacciai,
- Indagini forense,
- Indagini archeologiche, geologiche, paleosismologiche, sedimentologiche



GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica, applicazioni: investigazione mezzi isolanti o dielettrici
Foto: Zona industriale (Emilia-Romagna) – **ricerca sottoservizi**
Il problema: **Bonifica ambientale**
Topografia: freccia



GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica, applicazioni: investigazione mezzi isolanti o dielettrici

Il problema: Indagini ai fini archeologici/forensi

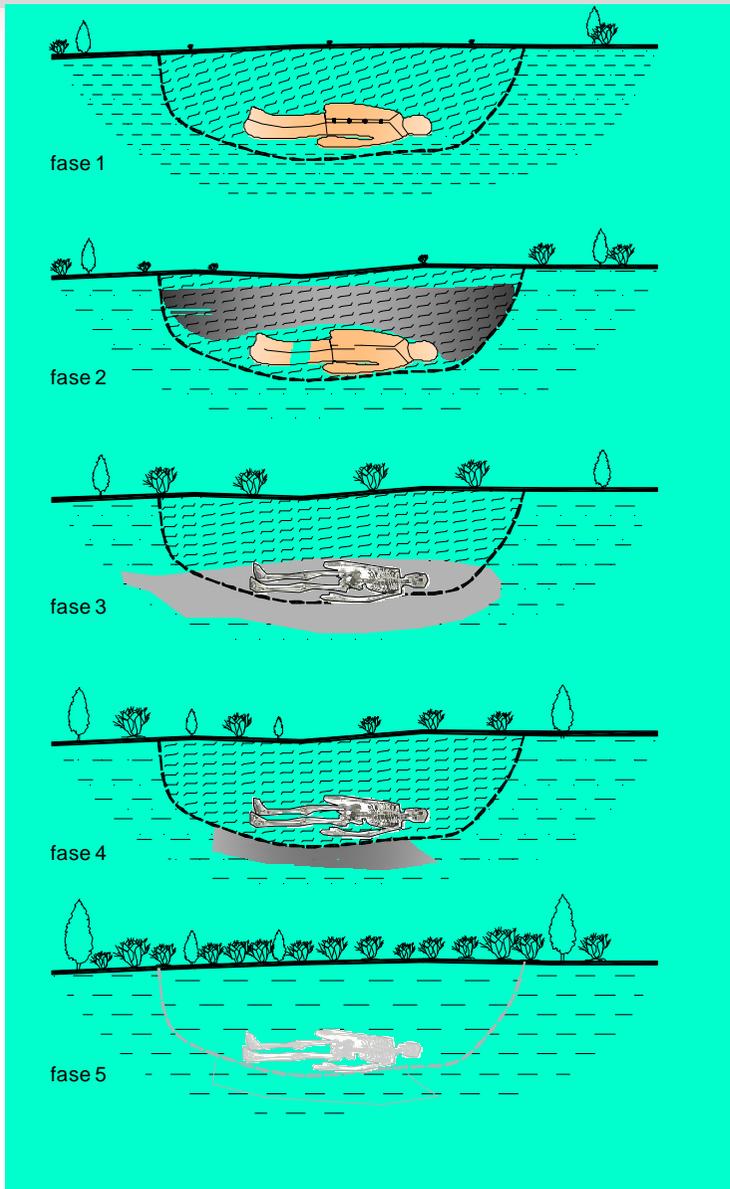


Figura: possibili stadi di una sepoltura clandestina.

Fase 1: Sepoltura recente: di facile individuazione;

Fase 2: Inizia la decomposizione: è lo stadio dove sono utili i cani da cadavere od i rivelatori di metano;

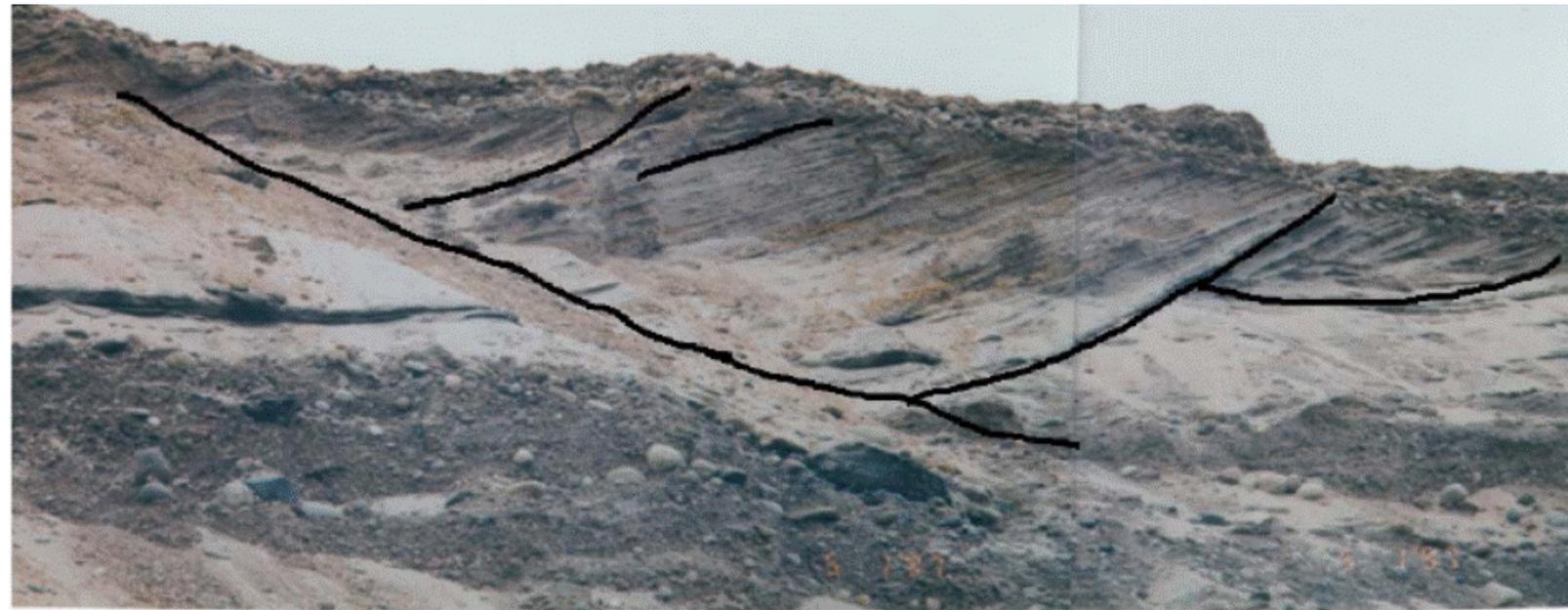
Fase 3: Decomposizione avanzata: produce percolato, la cui presenza può essere individuate da metodi geofisici;

Fase 4: Decomposizione finale (mineralizzazione): rimangono solo le ossa: è la situazione più difficile da risolvere;

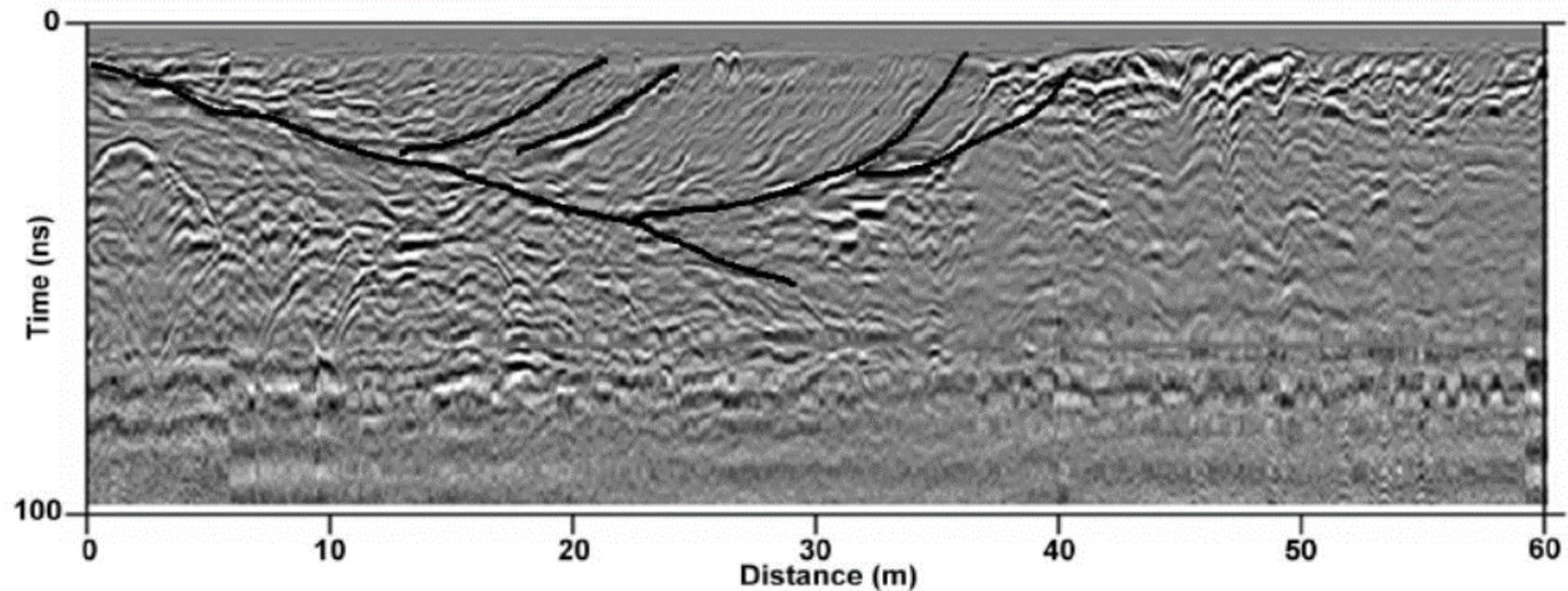
Fase 5: dopo molto le possibilità il terreno diventa quasi-omogeneo escludendo di fatto la possibilità di rilevare differenze apprezzabile nelle proprietà fisiche mediante indagini da superficie.

GPR: riflessione onde EM – area: cava di sabbia e ghiaia

Realtà geologica



Risposta fisica
Indagine EM
Ad alta frequenza
Con il Georadar
50 MHz



GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica

La propagazione di onde E.M. generata da campi elettromagnetici (E.M.) che investono un mezzo materiale dipendono da 3 proprietà fisiche diverse:

- permittività dielettrica (ϵ)
- resistività elettrica (σ),
- permeabilità magnetica (μ),

come si può facilmente dimostrare tramite le equazioni di Maxwell.

GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica



Le prime due proprietà possono essere stimate con altri metodi (rispettivamente i metodi geoelettrici e la magnetometria),
Mentre, **l'elettromagnetismo resta l'unico metodo** per stimare la permittività dielettrica (ϵ), che infatti viene rilevata mediante il georadar o GPR (Ground Probing Radar).

GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica (ϵ)

2. Permittività dielettrica =====> F/m

- descrive il comportamento di un materiale dielettrico in presenza di un campo elettrico

Isolante elettrico: assenza di cariche libere
ovvero impossibilità di condurre corrente nel mezzo

Dielettrico: materiali isolanti assoggettati ad un campo elettrico le molecole si polarizzano

Proprietà fisica: permittività dielettrica

Polarizzazione (P): elettroni, atomo, molecole

$$P (= \epsilon_0 \chi E)$$

χ : suscettività elettrica

- $D = \epsilon E$

$$\epsilon \text{ [F/m]}$$

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

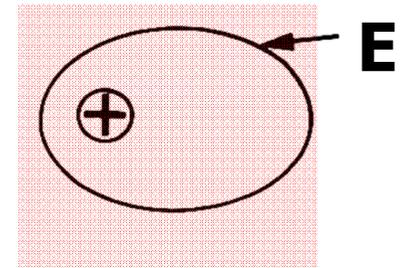
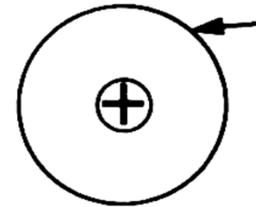
$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m (del vuoto)}$$

$$\epsilon_r: \mathbf{1} \text{ ===aria}$$

$$\epsilon_r: \mathbf{80} \text{ (o } \mathbf{81) nell'acqua}$$

campo EM#0

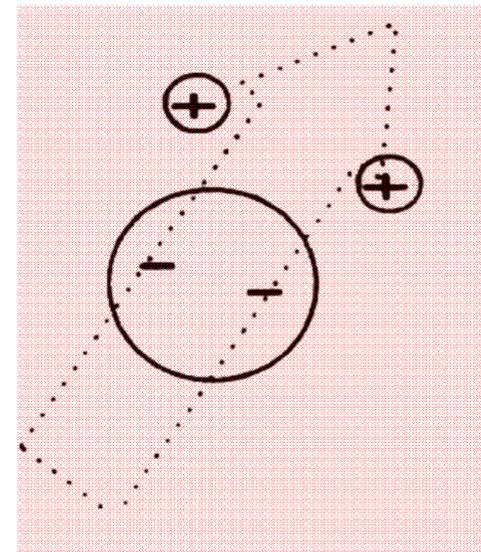
Polarizzazione elettroni



Polarizzazione atomo



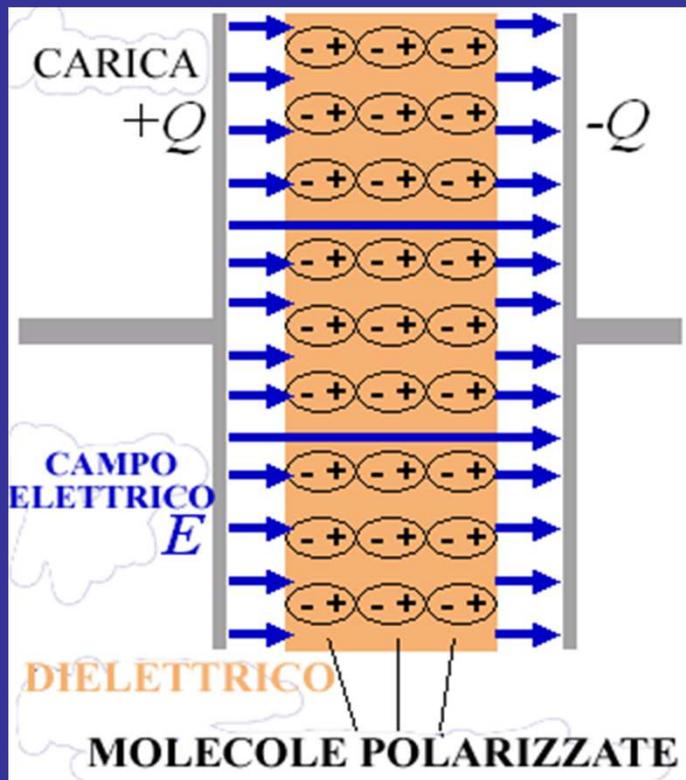
Polarizzazione molecole



Le proprietà fisiche

2. Permittività dielettrica \implies F/m

Dielettrico: materiali isolanti assoggettati ad un campo elettrico le molecole si polarizzano



il campo elettrico applicato causa lo spostamento delle cariche (elettroni e nuclei) dalla loro posizione di equilibrio, formando così dei piccoli dipoli microscopici che generano un campo aggiuntivo all'interno del mezzo

Le proprietà fisiche

2. Permittività dielettrica =====> F/m

Dielettrico: materiali isolanti assoggettati ad un campo elettrico le molecole si polarizzano

Il vettore induzione elettrica **D** (**C/m²**)
descrive il modo in cui un campo elettrico
E influenza la disposizione delle cariche
elettriche in un mezzo, tenendo conto della
polarizzazione elettrica del materiale.

$$D = \epsilon E$$

Le proprietà fisiche

2. Permittività dielettrica =====> F/m

$$D = \varepsilon E$$

i materiali isolanti possono essere trattati come dielettrici lineari omogenei ed isotropi (relazione lineare tra D ed E con un fattore di scala:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (= \varepsilon_0 X E)$$

$$D = \varepsilon_0 (1 + X) E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon E$$

D (induzione elettrica) descrive il modo in cui un campo elettrico influenza la disposizione delle cariche elettriche in un mezzo, tenendo conto della polarizzazione elettrica del materiale ovvero `il vettore spostamento elettrico).

Le proprietà fisiche

2. Permittività dielettrica (ϵ) \implies F/m

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

ϵ_0 : permittività del vuoto

$$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

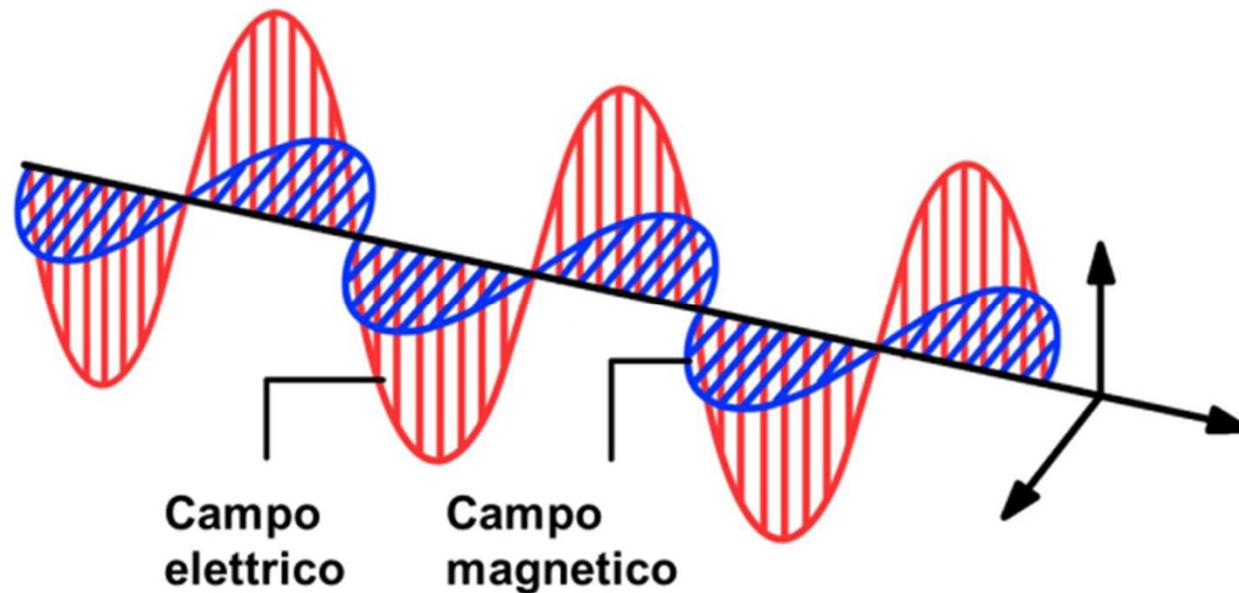
$$\frac{F}{m} = \frac{C^2}{m \cdot J} = \frac{C^2}{m^2 N} = \frac{A^2 S^2}{m^3 kg}$$

GPR: concetti propagazione onde EM

una radiazione elettromagnetica è considerata essere simile ad una onda, che ha come componenti:

- un campo magnetico,
- un campo elettrico

perpendicolari fra loro e con la stessa direzione di propagazione.

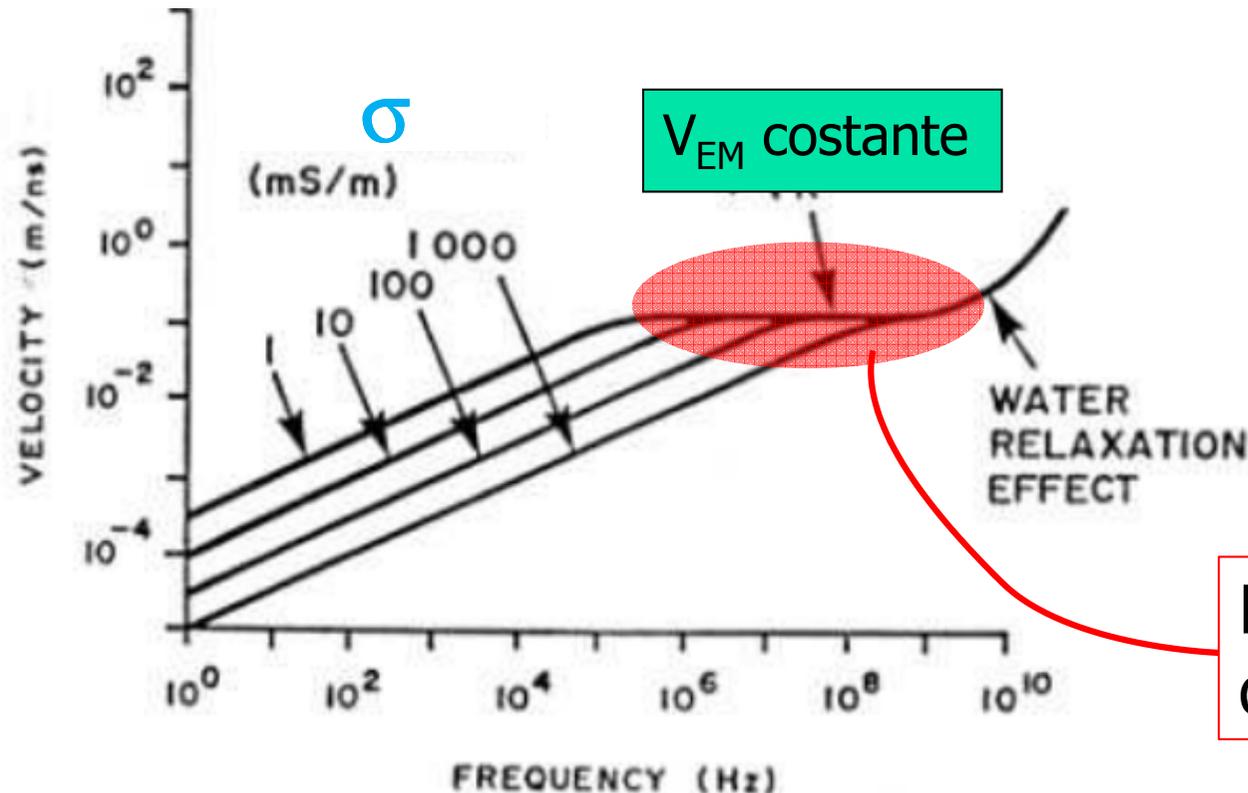


GPR: valori di frequenza delle antenne comunemente utilizzate

Le antenne Radar trasmettono onda EM a frequenze comprese tra i 10/25MHz e i 2-3GHz.

Queste frequenze sono lontane da quella di rilassamento dell'acqua e dei materiali (Davis & Annan 189). Un'onda elettromagnetica centrata su queste frequenze offre una discreta penetrazione nel terreno, ma soprattutto la sua velocità di fase si mantiene costante.

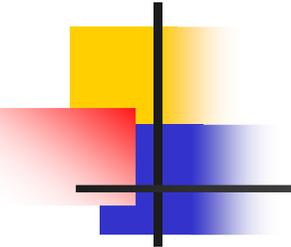
$$\epsilon_r = 87.74 - 0.40008 * Temp. + 9.398 * (10^{-4}) * T^2 - 1.41 * (10^{-6}) * T^3$$



Range di frequenze di onde EM dove la velocità 'V_{EM}' è costante

Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

FDEM – diffusione/propagazione delle onde EM


$$\nabla^2 \vec{E} - i\mu\omega \vec{E} (\sigma + i\omega\varepsilon) = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\mu\omega \vec{H} (\sigma + i\omega\varepsilon) = 0$$

In base alla frequenza (ω) utilizzata prevale l'effetto della (1) Conduzione (σ) o della (2) propagazione (ε)

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}$$
$$\beta = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

Metodi EM: concetti base – equazioni di Maxwell

FDEM – diffusione/propagazione delle onde EM

La soluzione di queste equazione è riportata di seguito

$$\alpha = \varpi \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \varpi^2} + 1} \right) \right]^{1/2}$$
$$\beta = \varpi \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \varpi^2} - 1} \right) \right]^{1/2}$$

Metodi EM: concetti base – soluzione equazioni di Maxwell

In altre parole le proprietà elettriche σ e ϵ in funzione della frequenza definiscono la seguente quantità:

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$$

Ad elevate frequenze prevale il fenomeno della propagazione

$$(1) \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$$

$$(2) \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$$

Come è facile intuire:

(1) Materiale dielettrico

(2) Materiale conduttivo

Metodi EM: concetti base – ruolo della frequenza

Si può dedurre che in questo caso di elevata frequenza prevale il fenomeno della propagazione:

- Conduzione :

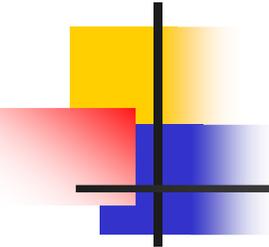
$\sigma: 10^{-3} - 1 \text{ (Ohm.m)}^{-1}$ e per frequenze (bassa frequenza
 \Rightarrow FDEM) *frequenza* $< 1 \times 10^6 \text{ Hz}$

- Propagazione (alta frequenza

\Rightarrow EM Georadar)

frequenza $> 1 \times 10^7 \text{ Hz}$

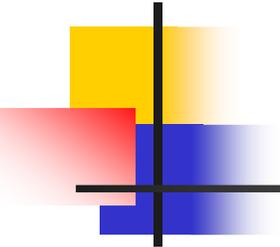
La soluzione delle equazioni di Maxwell –
può essere scritta


$$E = E_0 e^{-\alpha r} \cdot e^{i(\omega t - \beta r)}$$

E se poniamo che il campo elettrico oscilla lungo l'asse orizzontale X e si propaga nella direzione Z cioè profondità, avremo la seguente espressione:

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

La soluzione delle equazioni di Maxwell – può essere scritta


$$E = E_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

Dove,

α (1/m): attenuazione (o fattore di dissipazione)

β (rad/m) propagazione (o numero d'onda)

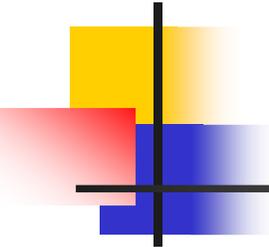
ω ($2\pi f$ [rad/s]) frequenza angolare

f (1/s) frequenza

$V = \omega/\beta$ (m/s) velocità propagazione onde EM

$\lambda = 2\pi/\beta = V/f$ (m) lunghezza d'onda

La soluzione delle equazioni di Maxwell – può essere scritta

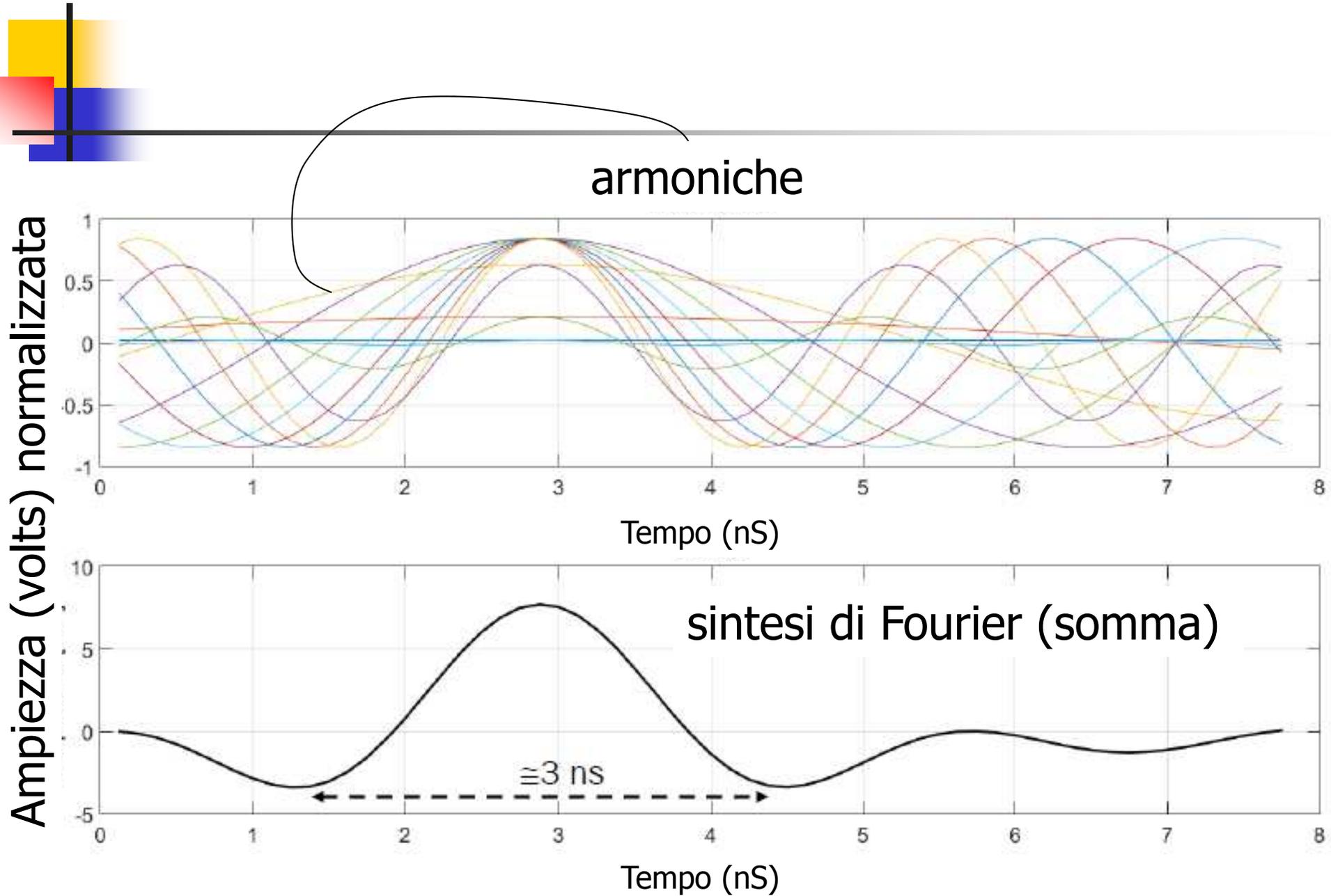

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

- Questa equazione rappresenta un segnale armonico che oscilla ad una frequenza nel tempo ovvero segnale **monocromatico**,
- L'antenna del Georadar invia normalmente un impulso con diverse frequenze,
- Questo impulso può essere costruito da una somma di segnali ciascuna di essi ha la sua frequenza ω_i , α_i e β_i ,
- La teoria di Fourier ci dice che un impulso può essere costruito dalla somma di segnali monocromatici,
- In definitiva il segnale che trasmette l'antenna del georadar è una valida soluzione alle equazioni di Maxwell

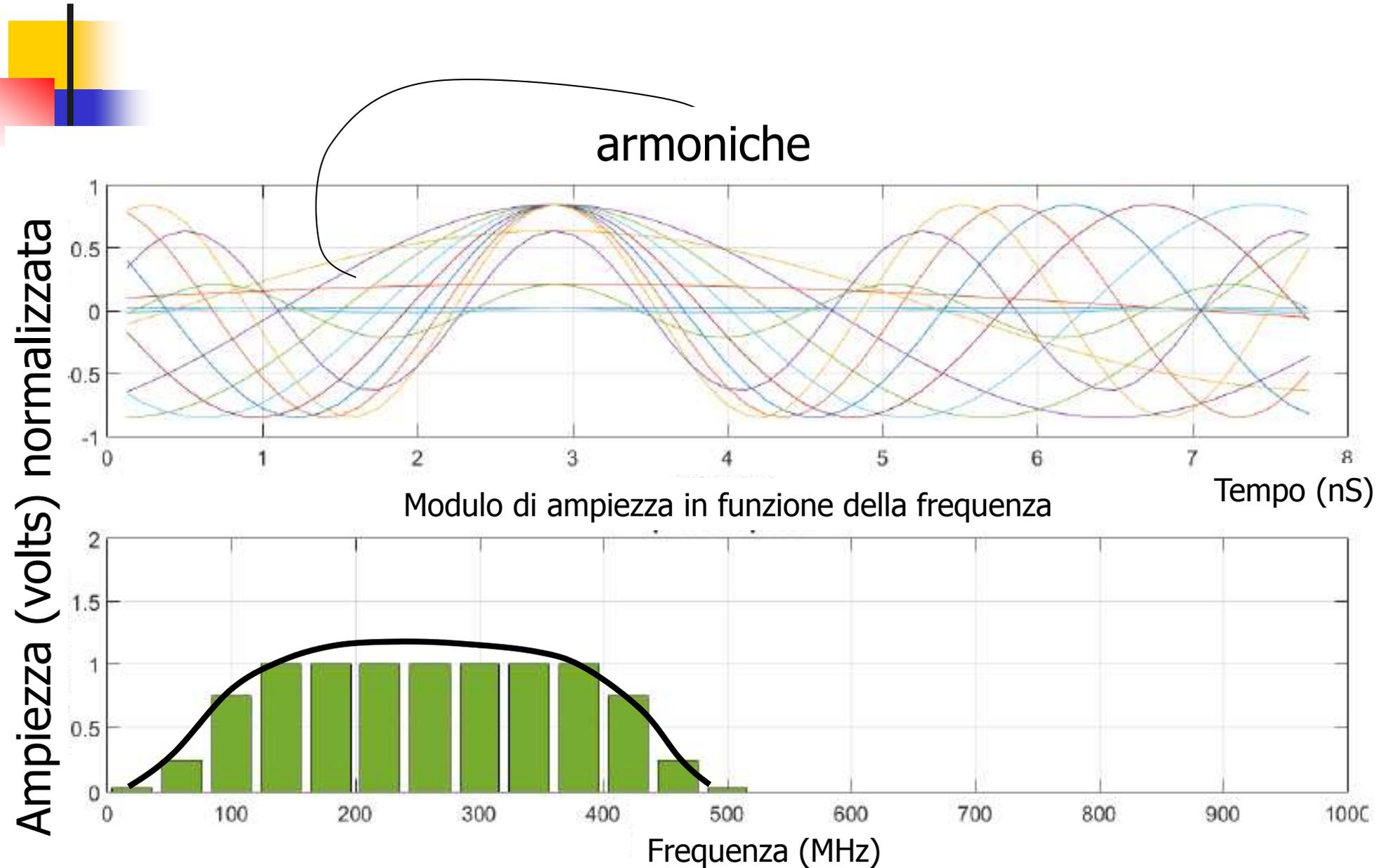
Nelle prossime due diapositive sono riportate rappresentazioni grafiche del concetto della sintesi dei segnali (Fourier),

- **Il grafico in alto illustra 13 segnali monocromatici ciascuna di essi è caratterizzato da una frequenza di oscillazione propria,**
- La somma di questi 13 segnali (sintesi di Fourier) è illustrata nel figura sotto,
- **La frequenza centrale o fondamentale dell'antenna simulata è pari a 330 MHz**

GPR: impulso EM Tx dall'antenna – come si costruisce



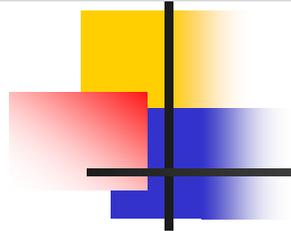
GPR: impulso EM Tx dall'antenna – lo spettro



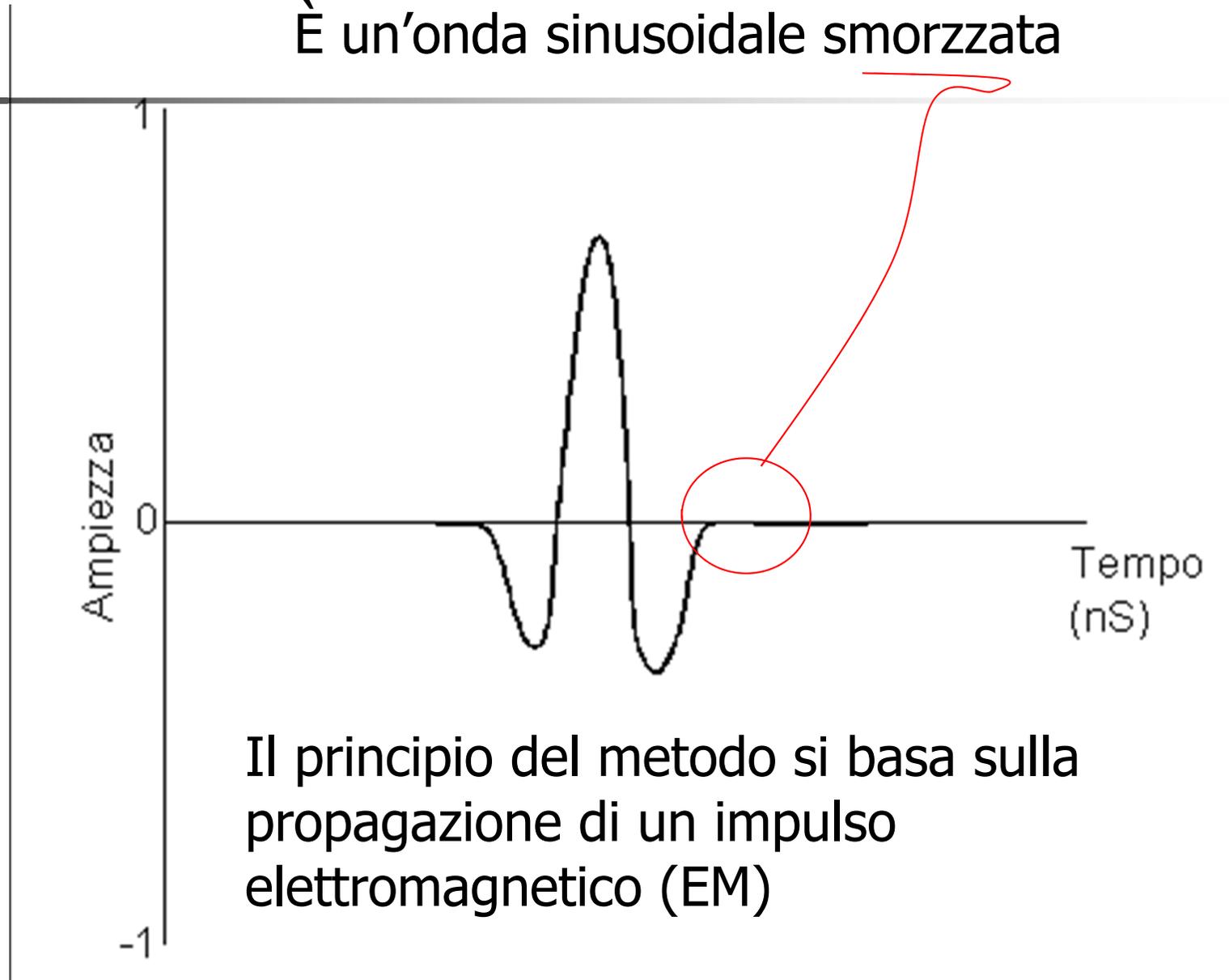
- **La prospezione GeoRadar o Ground-Penetrating Radar (GPR) è una recente metodologia di indagine indiretta del sottosuolo, ma che ad esempio può anche essere utilizzata nella verifica dell'integrità strutturale di opere di ingegneria civile, basata su tecnologie di indagine non distruttive (*Non Destructive Techniques NDT*)**
- **Il sistema GPR trasmette nel terreno o in mezzi artificiali (edifici - muratura) degli impulsi elettromagnetici di una determinata frequenza dette fondamentale o centrale tramite un trasduttore (Antenna).**

- **Il sistema GPR trasmette nel terreno o in mezzi artificiali (edifici - muratura) degli impulsi elettromagnetici di una determinata frequenza dette fondamentale o centrale tramite un trasduttore (Antenna).**
- L'impulso si propaga verticalmente nel terreno (o nella struttura) con una certa velocità in funzione della ϵ_r
- **quando incontra una interfaccia (superficie di contatto tra due materiali diversi caratterizzati da proprietà dielettriche diverse) parte dell'impulso viene riflessa verso la superficie, mentre l'altra parte viene trasmessa. L'antenna ricevente riceve in superficie gli impulsi riflessi.**

Forma d'onda dell'impulso EM trasmesso da antenna GPR

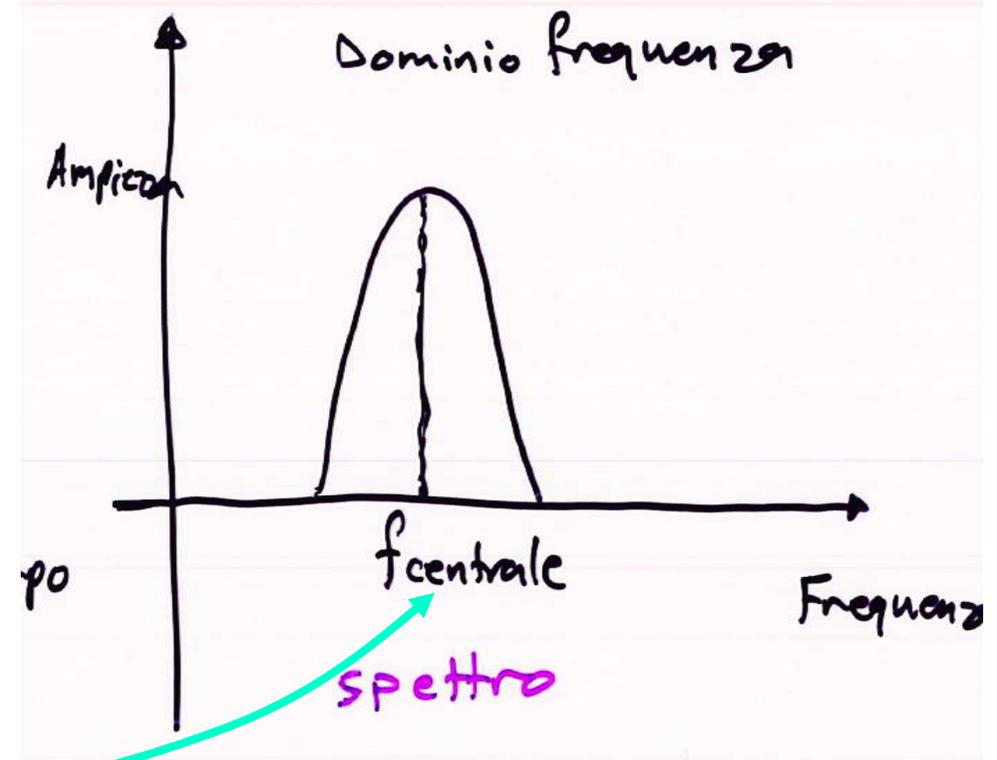
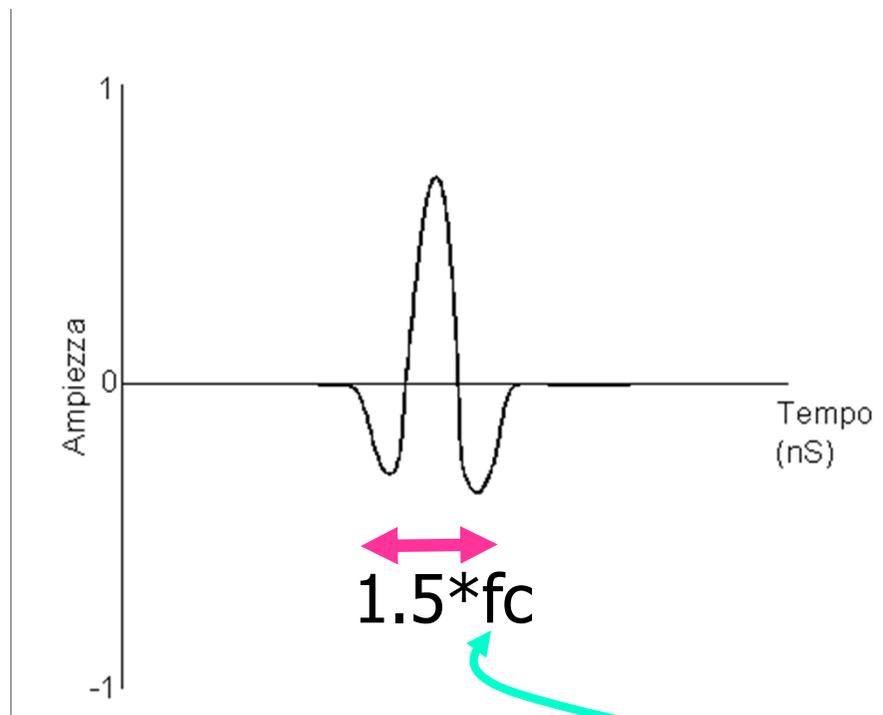


È un'onda sinusoidale smorzata



Forma d'onda dell'impulso EM trasmesso da antenna GPR

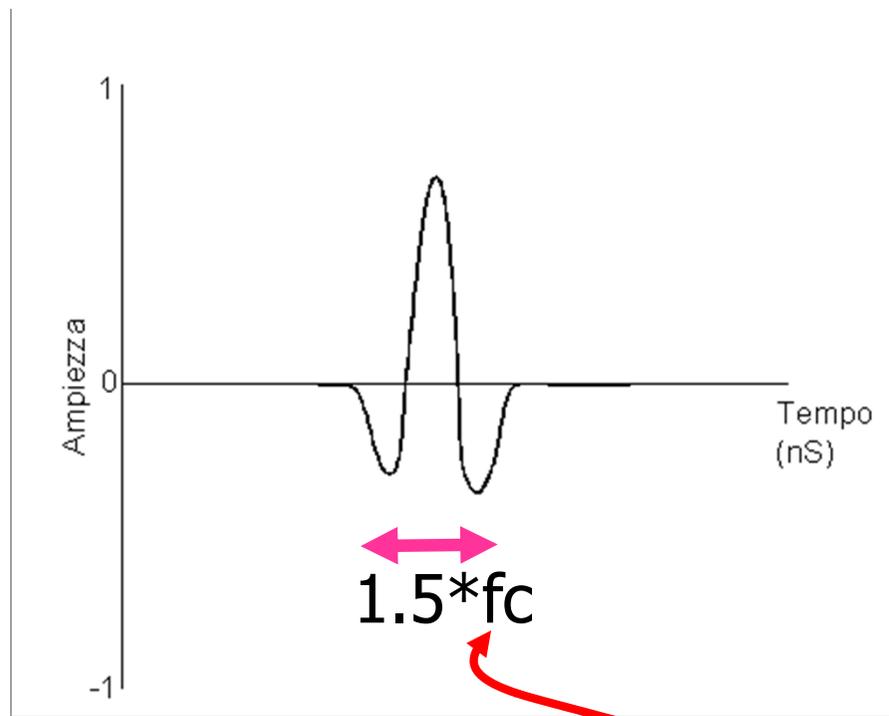
È un'onda sinusoidale smorzata



Lunghezza impulso di pochi nS
viene trasmesso migliaia di volte,
in media, 50K/s.

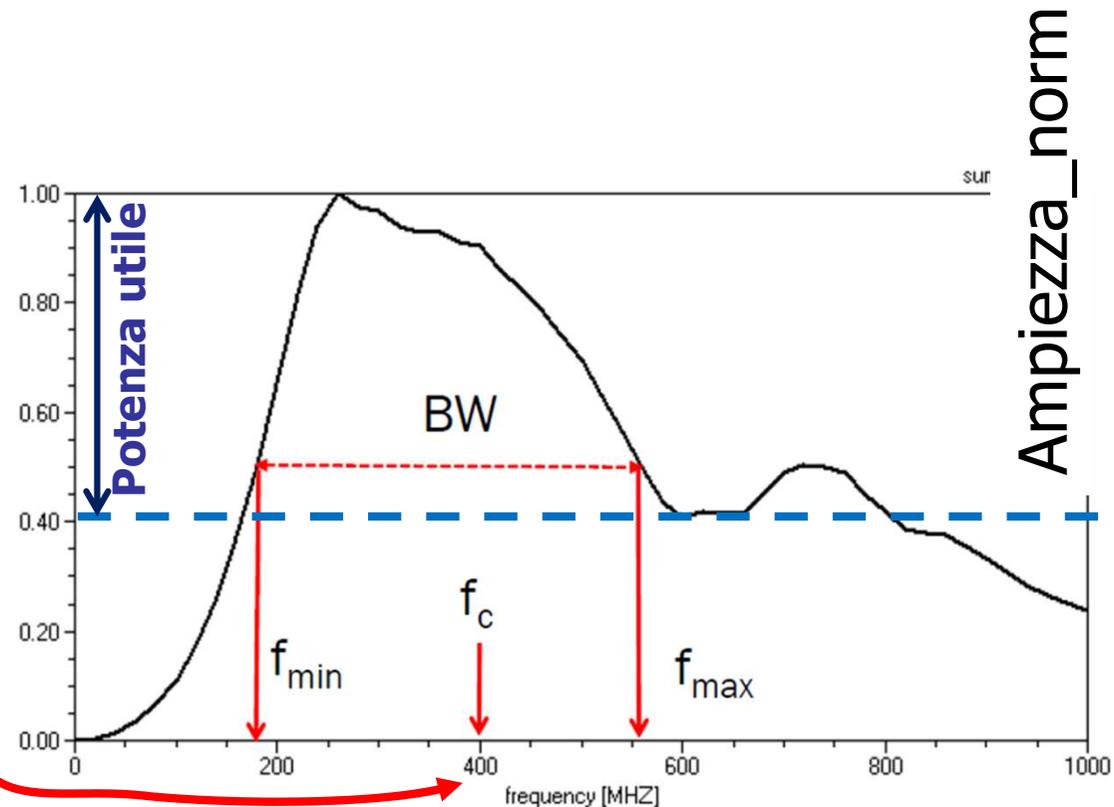
Forma d'onda dell'impulso EM trasmesso da antenna GPR

È un'onda sinusoidale smorzata



Lunghezza impulso di pochi nS viene trasmesso migliaia di volte, in media, 50K/s.

Spettro medio di un radargramma
Acquisito con antenna da 400 MHz
Composto da 1000 tracce



BW: larghezza banda utile

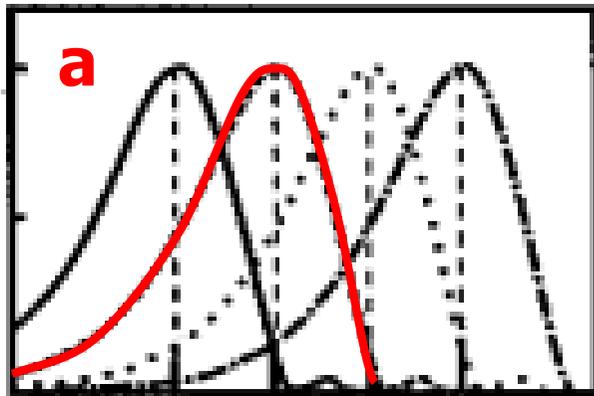
GPR: lunghezza dell'impulso EM trasmesso

l'onda trasmessa può avere un contenuto di frequenza di ampio spettro

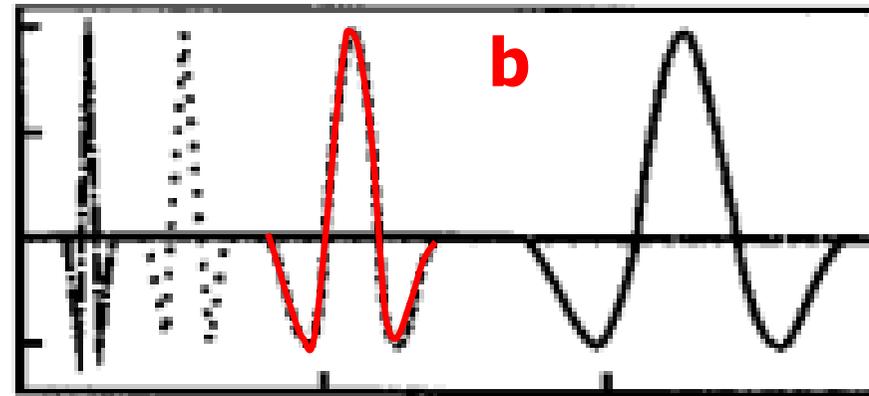
Dominio della frequenza

dominio del tempo

ampiezza



f_0 $2f_0$ $4f_0$ $8f_0$
Log (frequenza)



Tempo (ns)

Se l'antenna (o antenna a banda larga) produce oltre alla frequenza centrale altre frequenze che sono **multipli binari (a)** della **fondamentale** allora si parla di antenna **ad ampio spettro** (f_c , $2*f_c$, $4*f_c$, $8*f_c$,... **(b)**).

Questa operazione permette di incrementare la risoluzione verticale grazie all'incremento di banda di frequenze centrali delle antenne ma anche ad aumentare la profondità di esplorazione.

GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica

il campo EM irradiato si propaga come un'onda elettromagnetica, cioè come le onde radio e la luce visibile, ad una velocità, nel vuoto, espressa dalla seguente eq.

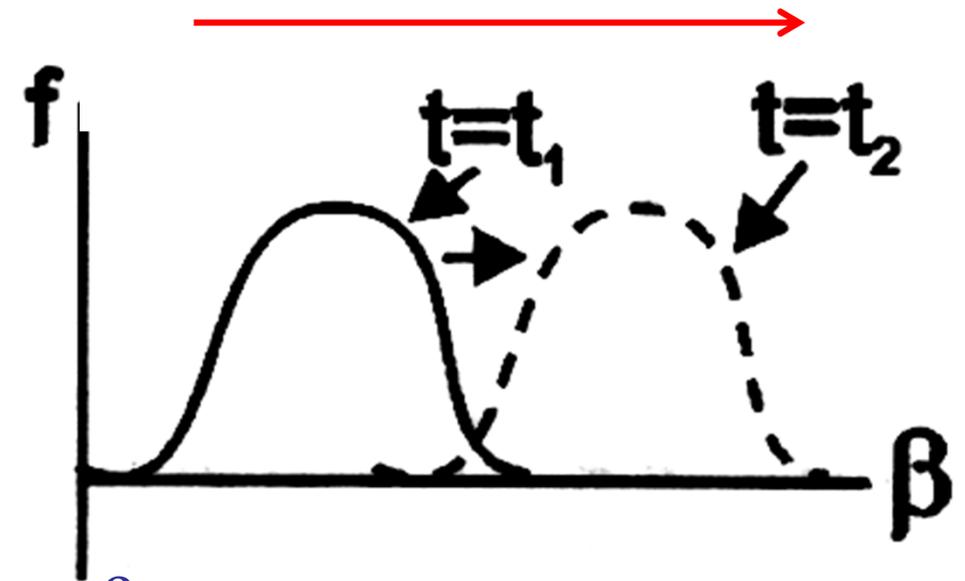
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

GPR: propagazione onde EM nei mezzi in relazione all'attenuazione



- Se $\sigma=0, \epsilon_r=1$

l'onda piana si propaga senza subire attenuazione



β propagazione
(o numero d'onda)

$$\lambda=2\pi/\beta, \beta=2\pi/\lambda$$

β =numero di cicli/distanza

- Se $\sigma \neq 0, \epsilon_r=1 \gg 1$

l'onda EM subisce attenuazione

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r}}, \text{ cm/nS}$$

■ Dipende dall'attenuazione

- ϵ_r può variare di circa 5 ordini,
- σ varia di multi ordini,
- Quindi, l'attenuazione delle onde EM è controllata principalmente dalla conduttività a parità della frequenza che comunque deve essere nel range di decine di MHz,

attenuazione – decremento dell'ampiezza



- **Risulta che la penetrazione del segnale EM decresce all'aumentare della σ ,**
- Una regola semplice da ricordare è quella di vedere se il target si trova ad una profondità $> 0.035/s$

GPR: tecnica geofisica attiva, proprietà fisica: permittività dielettrica

Nei materiali diversi dell'aria, la velocità è espressa dalla seguente eq.

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r}}, \text{ cm/nS}$$

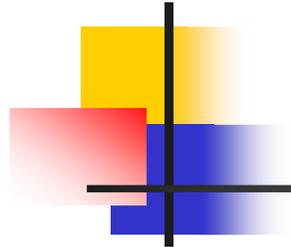
C=30 cm/nS

=81 per l'acqua
=1 per l'aria

per cui la V_{EM} è sempre < della V_{EM} nell'aria;
p.es. nell'acqua la $V_{EM} = 3/9 = 3.33 \text{ cm/nS}$

GPR:

range dei valori di velocità di propagazione delle onde EM



I valori sono compresi tra:

$$0.01 \text{ m/nS} < V_{EM} < 0.3 \text{ m/nS}$$

$$1 \text{ cm/nS} < V_{EM} < 30 \text{ cm/nS}$$

proprietà dielettriche dei materiali. L'attenuazione del segnale EM aumenta con l'aumento della ϵ_r e con l'aumento della conducibilità elettrica dei materiali

Tipo materiale	ϵ_r	Velocità _{EM} (cm/ns)
Aria	1	30
Acqua dolce	80	3.3
Acqua salata	80	0.03
Sabbia secca	4-6	12-15
Sabbia satura d'acqua	30	5.5
Argilla satura d'acqua	8-12	9-11
Ghiaccio (permafrost)	3-5 (4-8)	13-17
granito	5	13
Rocce carbonatiche (calcari, dolomie)	7-9	10-11
Cemento asciutto (bagnato)	6.4 (10-25)	12

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

C: VEM nell'aria



proprietà dielettriche dei materiali. L'attenuazione del segnale EM aumenta con l'aumento della ϵ_r e con l'aumento della conducibilità elettrica dei materiali

Tipo materiale	ϵ_r	Velocità EM (cm/ns)
Aria	1	30
Acqua dolce	80	3.3
Acqua salata	80	0.03
Marna	5-15	Calcolare valore
Asfalto asciutto	3-5	Calcolare valore
Asfalto bagnato	6-12	Calcolare valore
PVC	3	Calcolare valore
Suolo/sedimenti sciolti	4-30	Calcolare valore

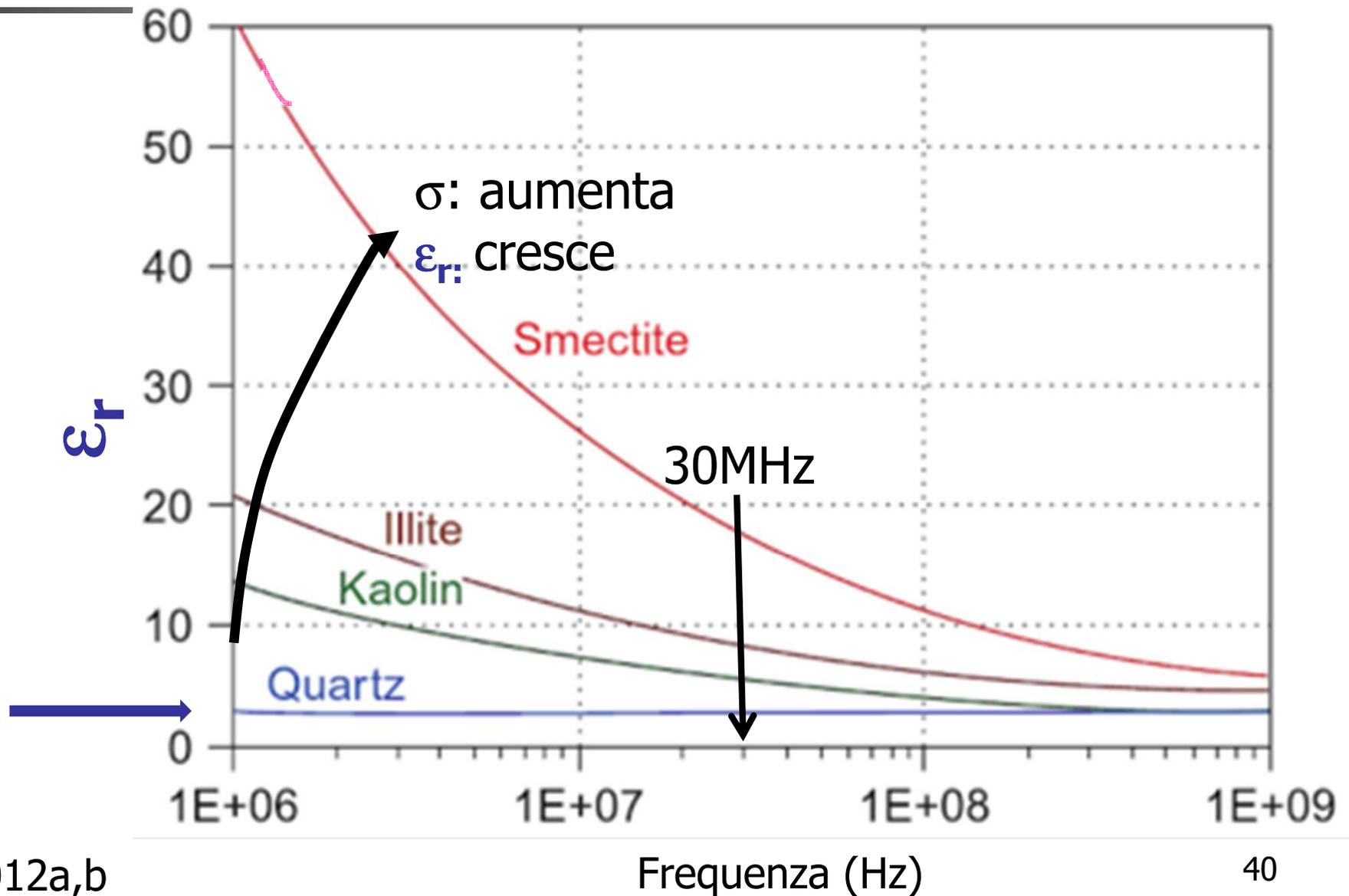
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

C: VEM nell'aria



GPR: variazione della permittività dielettrica relativa (ϵ_r) di alcuni minerali in funzione della frequenza delle onde EM. L'incremento della (ϵ_r) limita la profondità di esplorazione a causa dell'assorbimento dell'energia elettromagnetica



GPR: variazione della permittività dielettrica relativa (ϵ_r) di alcuni minerali in funzione della frequenza delle onde EM. L'incremento della (ϵ_r) limita la profondità di esplorazione a causa dell'assorbimento dell'energia elettromagnetica

Materiale	attenuazione (dB/m)		permittività dielettrica	
	Secco	Bagnato	Secco	Bagnato
Asfalto	2-15	2-20	2-4	6-12
Argilla	10-20	20-100	2-10	4-40
Granito	0,5-3	2-5	5	7
Calcere	0,5-10	10-25	7	8
Sabbia	0,01-1	0,03-0,3	4-6	10-30
Cemento/mattoni	2-12	10-25	4-10	10-20
Terreno sabbioso	0,1-2	1-5	4-6	15-30
Terreno argilloso	0,3-3	5-30	4-6	10-15

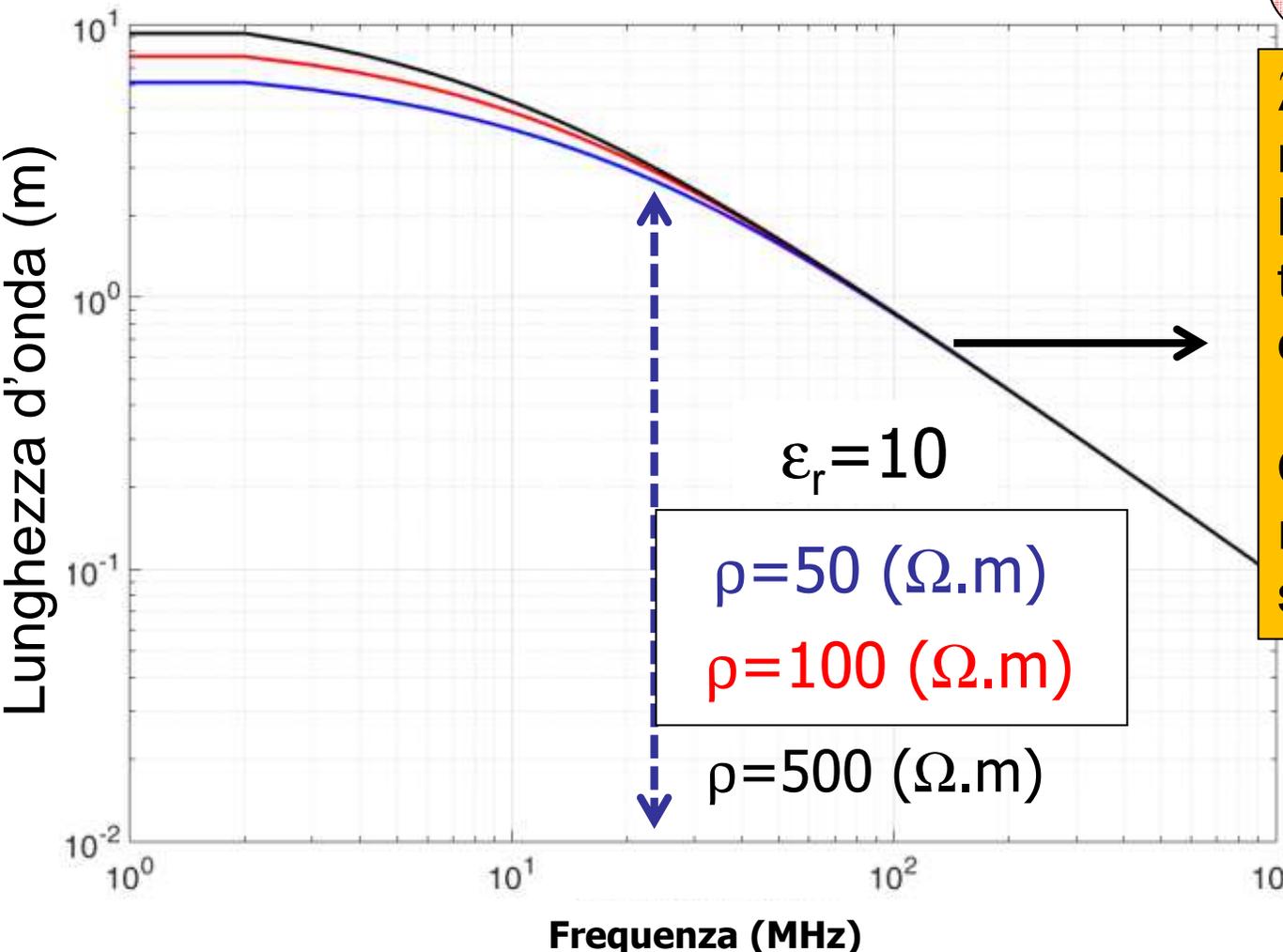
GPR: frequenza (lunghezza d'onda EM) vs conduttività materiali

- Nel range di funzionamento dei sistemi GPR ci si chiede se al variazione della σ varia anche λ dell'impulso EM inviato usando antenne a diversa frequenza,
- Le osservazioni sperimentali hanno dimostrato che la lunghezza d'onda dell'impulso Tx non varia **MENTRE** variazione di permittività dielettrica relativa causa variazione di lunghezza d'onda

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r}}, \lambda = \frac{V}{f}, \lambda = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r} f} \text{ cm}$$

GPR: frequenza (lunghezza d'onda EM) vs conduttività materiali

$$V_{EM} = \frac{C}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r}} \text{ (cm / nS)}, \lambda = \frac{V}{f}, \lambda = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r} f} \text{ cm}$$



λ : variazione di conduttività di materiali geologici non modifica la lunghezza d'onda del segnale trasmesso nel range di frequenza delle antenne GPR,

Questo fatto non modifica la risoluzione verticale teorica dei segnali radar pari a $\frac{1}{4} * \lambda$

GPR: valori di frequenza delle antenne comunemente utilizzate vs λ

- I sistemi operano nella fascia compresa tra 40 MHz e 2.5/3 GHz
- relazione tra frequenza e lunghezza d'onda per diverse frequenze quando il mezzo è l'aria:
- Tempo (in nS): è il tempo necessario per compiere uno spazio di lunghezza paragonabile ad 1 lunghezza d'onda
- Per esempio:

25MHz = 12m (λ) in 40ns

50MHz = 6m (λ) in (20ns)

100MHz = 3m (λ) in (10ns)



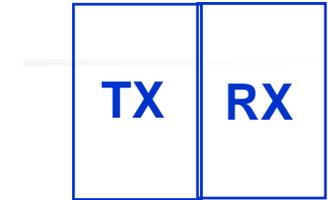
Applicazioni geologiche

1GHz = 0.3m (λ) in (1ns)-Applicazioni 'NDT' ingegneristiche

NB: numeri da ricordare quando si parlerà della risoluzione verticale e laterale

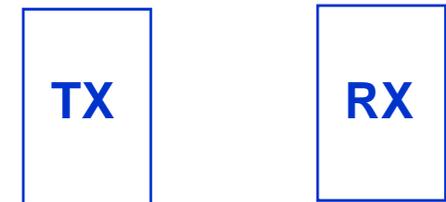
Monostatiche o offset zero:

tx-rx attaccati tra loro e situati nella stessa scatola



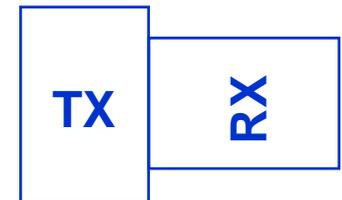
Bistatiche:

tx-rx distanziati tra loro e situati in due scatole



Crosspolari:

tx-rx perpendicolari tra loro e normalmente contenute nella stessa scatola o in due scatole adiacenti.



Monostatiche: tx-rx attaccati tra loro e situati nella stessa scatola

SECTION

TID10001 Name

C:\K2\mission\unibenif.MIS\130506AA.ZON\ Path

ARRAY

T	Direction	0.00	T-Coord [m]	0.14	D-bistatic [m]	1	Scan Id
1	Id-Tx	1	Id-Rx	400	Freq-tx [MHz]	400	Freq-Rx [MHz]

MAP

4493	Camp X	2048	Camp Y	0.0112	X.Cell [m]	6.5917E-03	Y.Cell [m]
0.1464	T.Cell [ns]	90	Prop Vel [m/nms]	300	Sweep [ns]	Two way	

MARKER

Marker Quantum [m] 1

X-Offset [m] -0.28

X-Max [m] 50.0304

Marker X value [m]

Complete shift

Set value -->

N°Sweep	X [m]

GPR: particolare della fase di acquisizione dati con antenna bistatica da 200 MHz. Area archeologica dello scavo di Isernia la Pineta (Molise)



GPR: Concetto base di funzionamento – antenna monostatica da 100 MHz



Frequenza fondamentale o centrale: 100 MHz (**monostatica**)

Tipo frequenza: **bassa** - risoluzione: medio-bassa

Applicazione:

Finalizzata a indagini geologiche ed archeologiche

Antenna bistatica a bassa frequenza



Frequenza fondamentale o centrale
50 MHz

Tipo frequenza: **bassa**

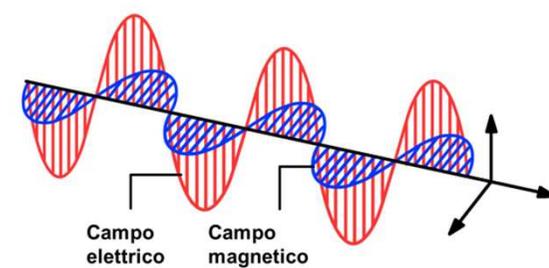
Applicazione:

Finalizzata a indagini geologiche

In particolare:

si usa per investigare
grandi profondità
circa 50 m

GPR: configurazione antenne Monostatiche e bistatiche



Daniels, J., 1989 & Sensors and Software

Variable antenna separation and orientation to conduct transillumination and multi-offset surveys or to work in rough, poorly accessible areas.

Easy GPS integration

DVL & Control Module

DVL Carrier

12 V belt battery

Fibre optic cables for high quality signal

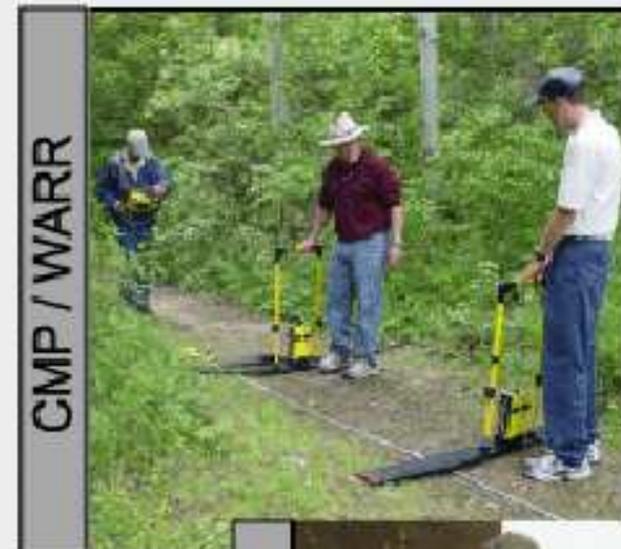
Receiver

Trigger acquisition or enter survey markers

Wide range of Transmitters

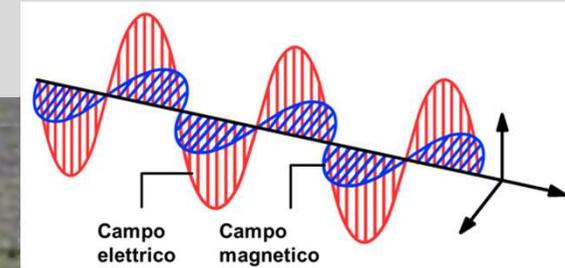
Bistatic operation

100 MHz Antennas

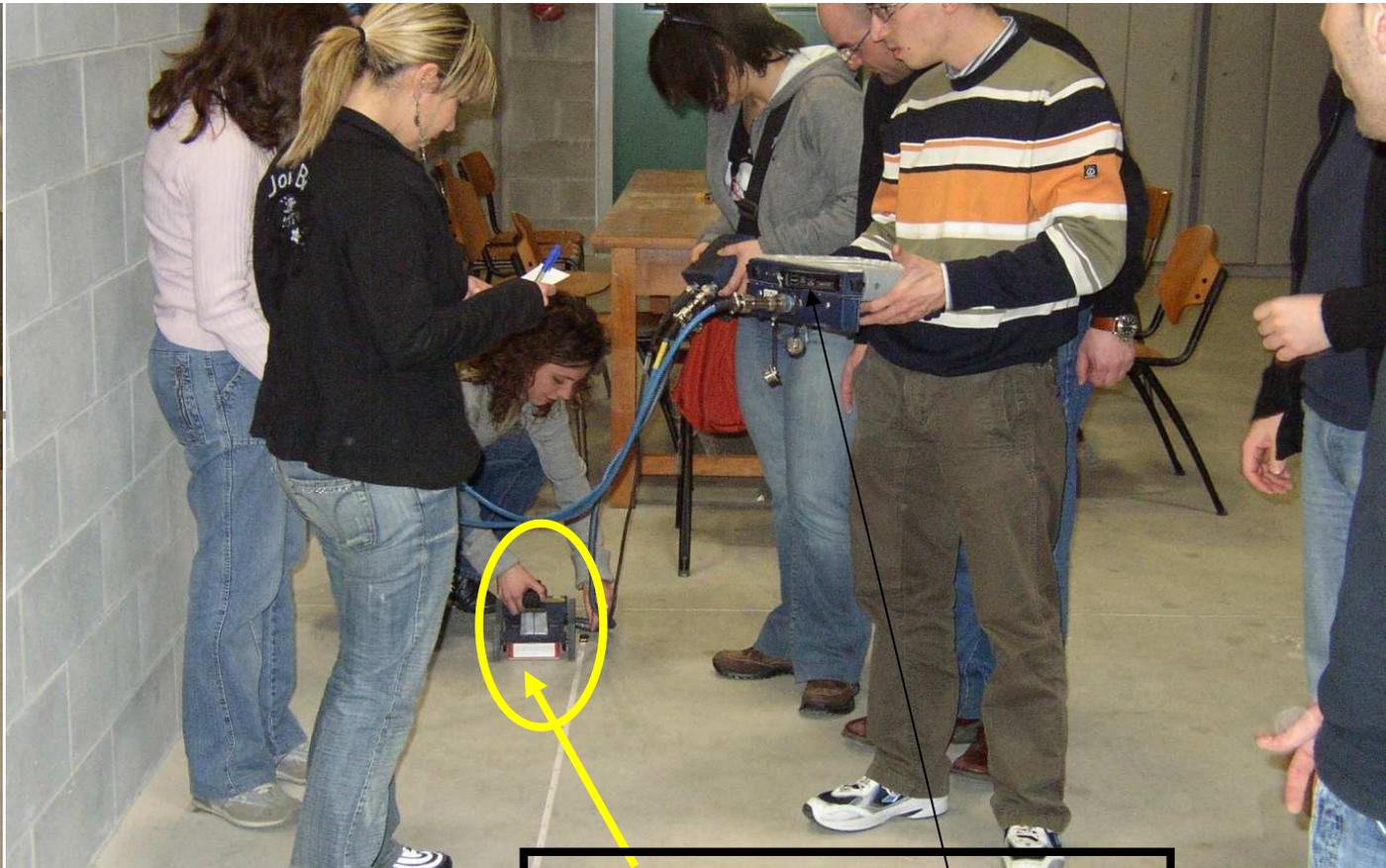


GPR: frequenze fondamentali dei segnali

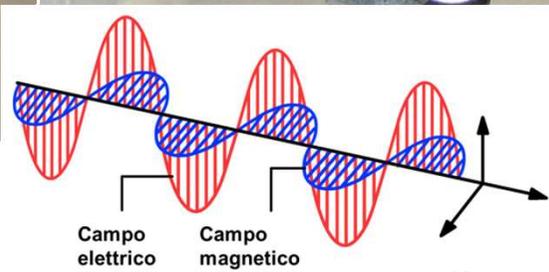
EM utilizzate. Nella figura sono riportate una serie di antenna modello 'PulsEkko'; le antenne sono a copia e sono separate (cioè Bistatiche)



antenna GSSI (USA)
da 270 MHz
monostatica



**antenna GSSI
da 1500 MHz 'monostatica'**



Metodo Elettromagnetico (GPR)

Frequenza onde EM: 70 MHz – 2 GHz

Proprietà fisica: permittività elettrica relativa (ϵ_r)

Cioè capacità di immagazzinare corrente

Svantaggi: in presenza di falda o argilla il segnale subisce una forte attenuazione per cui non si ha onde riflesse (quindi diventa cieco)

Unità di visualizzazione
Radargrammi/impostazione
parametri
GPR: modello SIR3000
Tipo acquisizione: monostatica
Cioè l'antenna Tx e Rx sono nella stessa
scatola distanziate pochi cm

**Particolare dell'attività didattica presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Univ. Di Ferrara
(prima Dipartimento di Scienze della Terra)**





Esercitazione di Geofisica Applicata

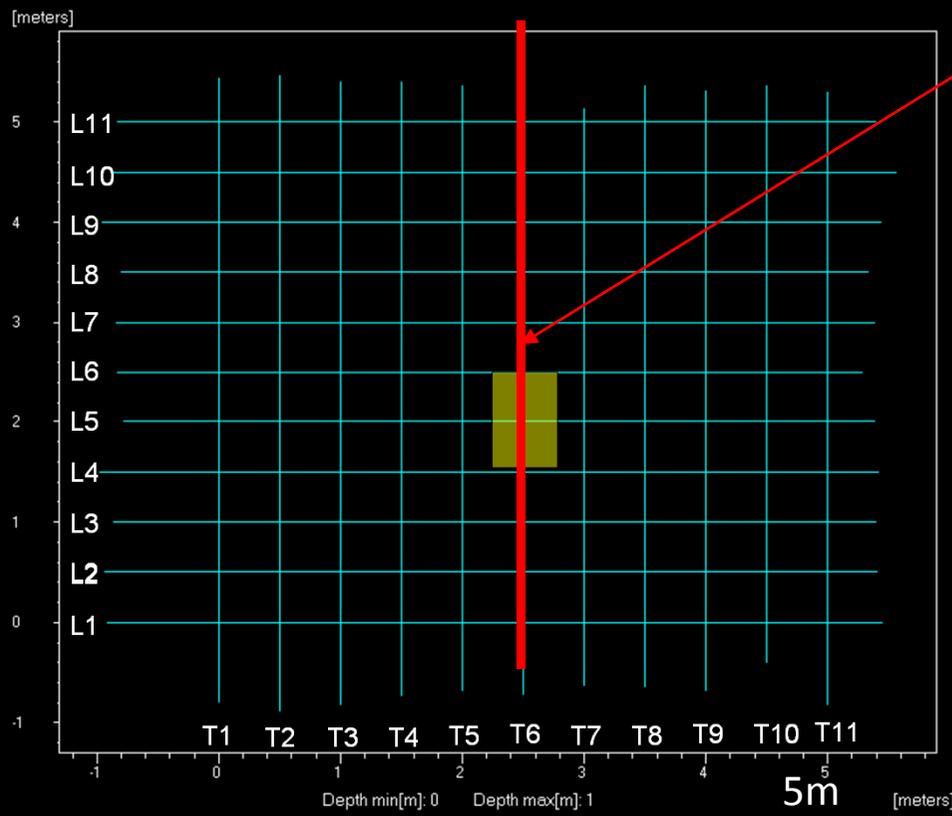
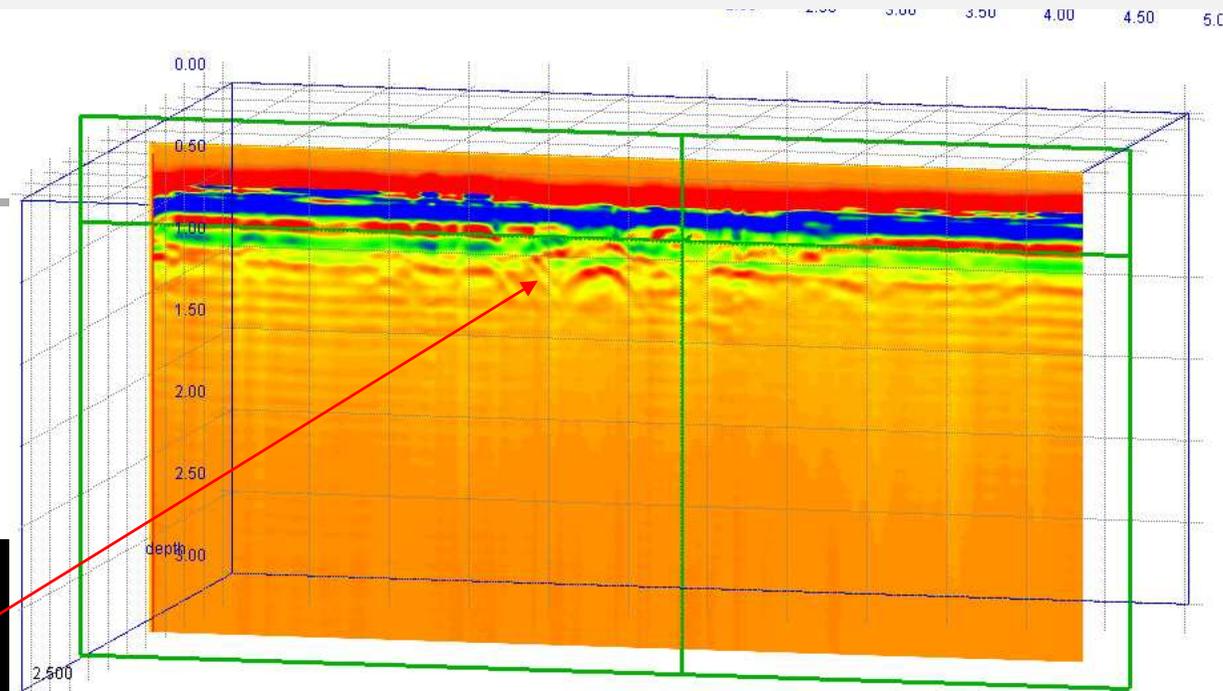
Impiego Georadar (SIR3000) - Antenna: **1.500 MHZ**

Sito: Università degli Studi di Ferrara, polo scientifico

Strumentazione Italiana della IDS/PISA antenna (monostatica) da 400 MHz. The best equipment



area investigata: 5mX5m. Tempo: 1 ora



In alto a sinistra: strumentazione GPR (antenna da 400 MHz)

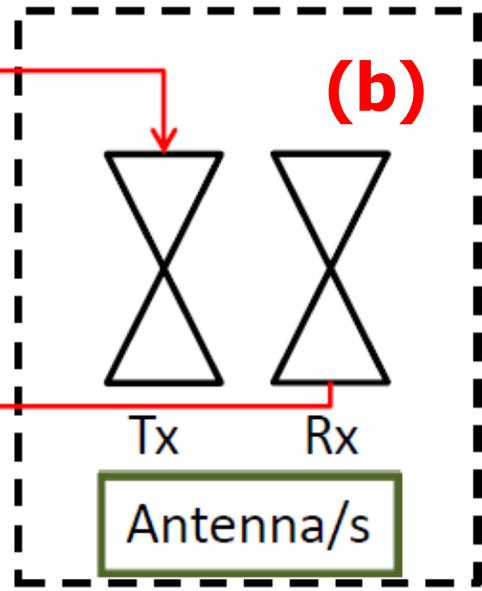
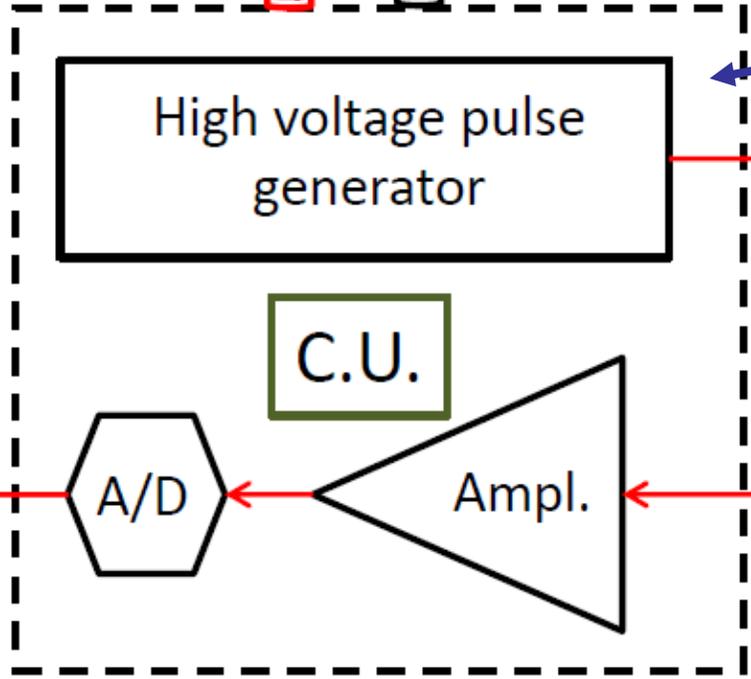
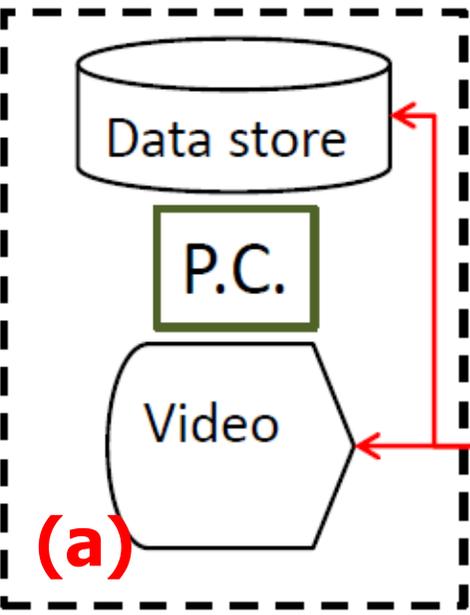
In basso a sinistra: linee GPR acquisite

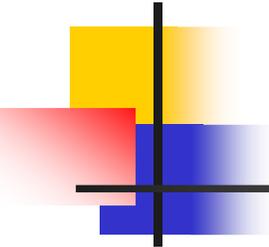
In alto a destra: radargramma che evidenzia la presenza di segnale riflesso ai bordi dello scavo.

Vantaggio: non richiede il contatto fisico con il terreno e/o il mezzo da investigare



GPR: schema che riassume le principali componenti della strumentazione GPR



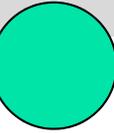


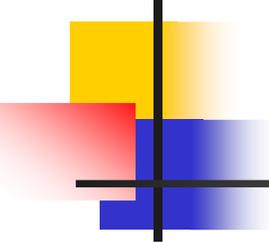
Metodi EM ad alta frequenza

GPR: Ground Probing Radar

Ground Penetrating Radar

Fine parte 01




$$E = E_0 \cdot e^{-\alpha z}$$

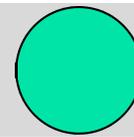
L'attenuazione descrive la rapidità di decadimento dell'ampiezza del segnale con la distanza, di andamento esponenziale e rappresenta **l'assorbimento dell'energia EM tramite l'effetto Joule.**

L'attenuazione limita la profondità di penetrazione (propagazione dell'onda EM) nel sottosuolo o nei mezzi in generale)

L'attenuazione è funzione di:

- (1) Conduttività
- (2) Permittività
- (3) frequenza

GPR: profondità pelle



$$\frac{1}{\alpha} = \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$

La propagazione delle onde e.m. nei mezzi materiali è però condizionata dal cosiddetto effetto pelle, quantificato dalla profondità pelle δ , **che è** la distanza, **in m**, alla quale l'ampiezza dell'onda si riduce a **1/e**. L'attenuazione è infatti esponenziale e rappresenta l'assorbimento, tramite effetto Joule, dell'energia e.m.

Un esempio numerico può forse aiutare ad illustrare il problema. Normalmente gli strumenti (GPR) registrano impulsi EM riflessi da profondità da 5 a 10 volte la profondità pelle (δ),

Esempio:

$\sigma = 10^{-3} (\Omega \cdot m)^{-1}$ (sabbia asciutta, calcare, dolomia, ...)

$f_c = 100$ MHz.

$\delta \cong 1.6$ m \Rightarrow **profondità esplorazione approx.: (8-16 metri)**

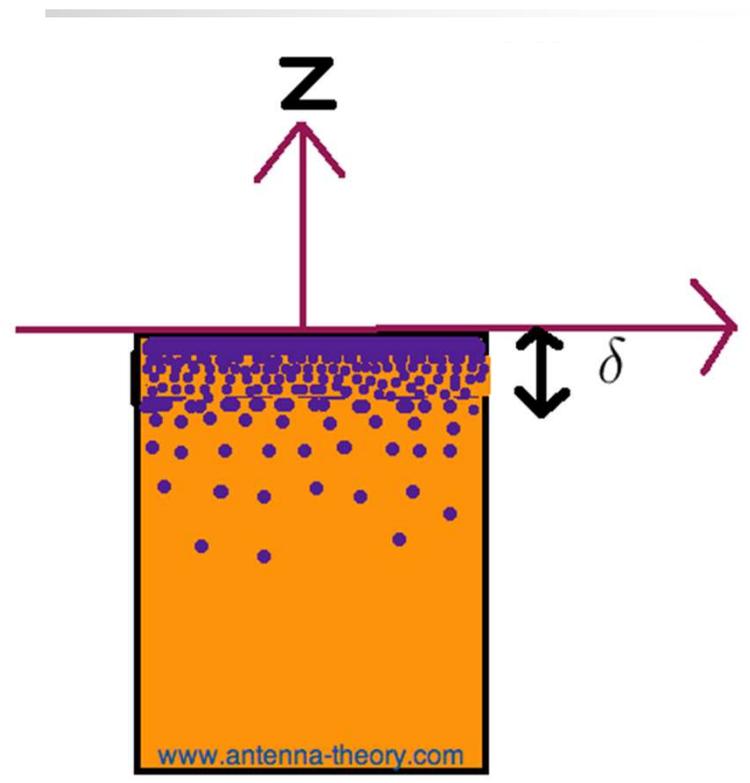
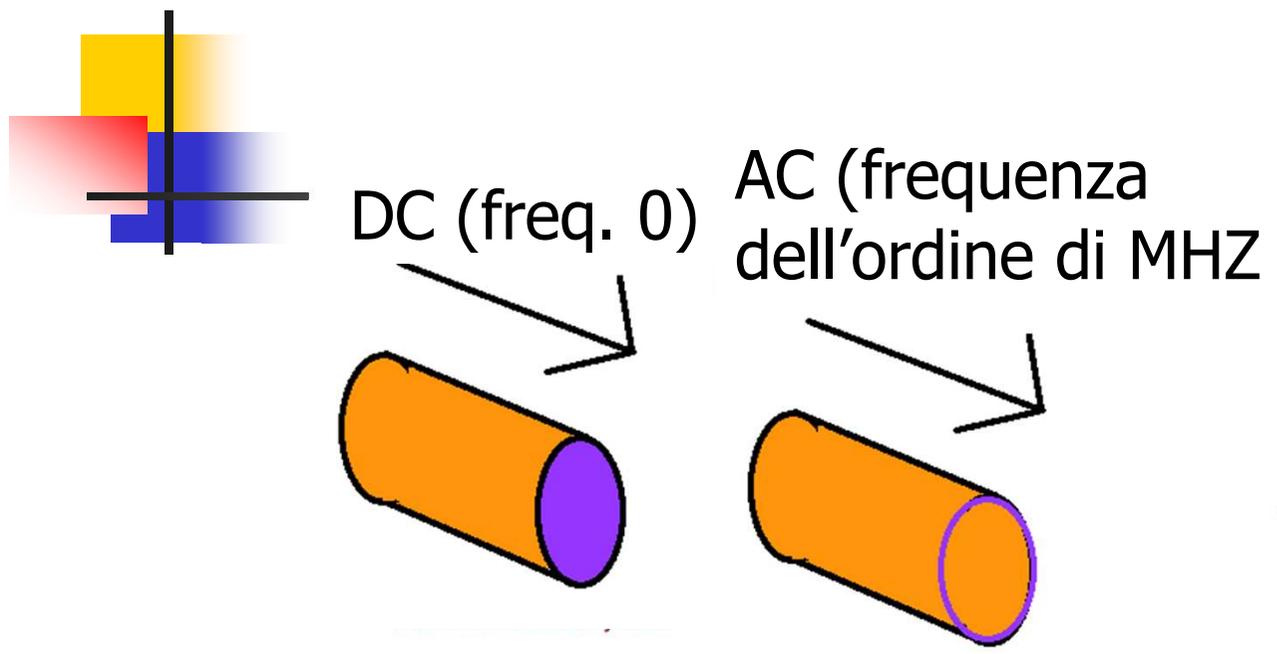
$\sigma = 10^{-1} (\Omega \cdot m)^{-1}$ (argilla satura in acqua dolce),

$\delta \cong 0.16$ m **soltanto (profo. esplorazione approx.: (0.8-1.6m!))**

A causa dell'elevata conducibilità elettrica.

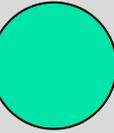
Profondità pelle:

$$\frac{1}{\alpha} = \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$



$$J = J_0 e^{-\left(\frac{z}{\delta}\right)}$$

GPR: profondità di esplorazione (da usare con cautela!)

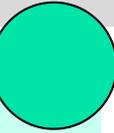


Esempio:

$$\text{profondità (m)} \equiv \frac{\rho(\text{Ohm.m})}{30}$$

A parità della frequenza la profondità di penetrazione dipende fortemente dalla resistività elettrica. P.es. Si riporto sotto l'effetto della resistività:

- argilla: 0.8 - 1m
- Sabbia satura: \approx 2m
- Sabbia asciutta: \approx 5m

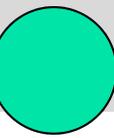


Nell'ambito delle indagini GPR, la conduttività e la permittività dielettrica sono due variabili che controllano il grado di attenuazione del segnale ovvero la profondità di esplorazione.

Essi sono due variabili complesse caratterizzate da una componente reale (σ_{re} e ϵ_{re}) e da una componente immaginaria (σ_i e ϵ_i).

$$\sigma = \sigma_{re} + i\sigma_i \quad \epsilon = \epsilon_{re} + i\epsilon_i$$

La componente reale (ϵ_{re}) \rightarrow descrive l'energia contenuta nel materiale dielettrico ad una determinata frequenza e temperatura, mentre la componente immaginaria (ϵ_i) \rightarrow descrive la dissipazione di energia del sistema soprattutto per l'elevata conduttività dei materiali



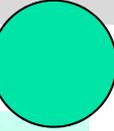
La componente reale (ϵ_{re}) \rightarrow descrive l'energia contenuta nel materiale dielettrico ad una determinata frequenza e temperatura, mentre la componente immaginaria (ϵ_i) \rightarrow descrive la dissipazione di energia del sistema soprattutto per l'elevata conduttività dei materiali.

Quando il materiale è di tipo dielettrico, la permittività dielettrica è definita come:

$$\epsilon = \epsilon_{re} + i\left(\epsilon_{relativa} + \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}\right)$$

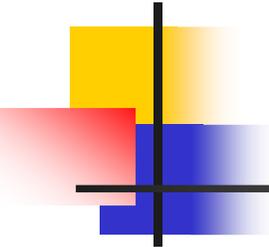
L'equazione, descrive i due processi principali che determinano le perdite di energia (*detto tangent loss o δ*) in un materiale, come il suolo:

- il rilassamento del materiale dielettrico
- la conducibilità elettrica



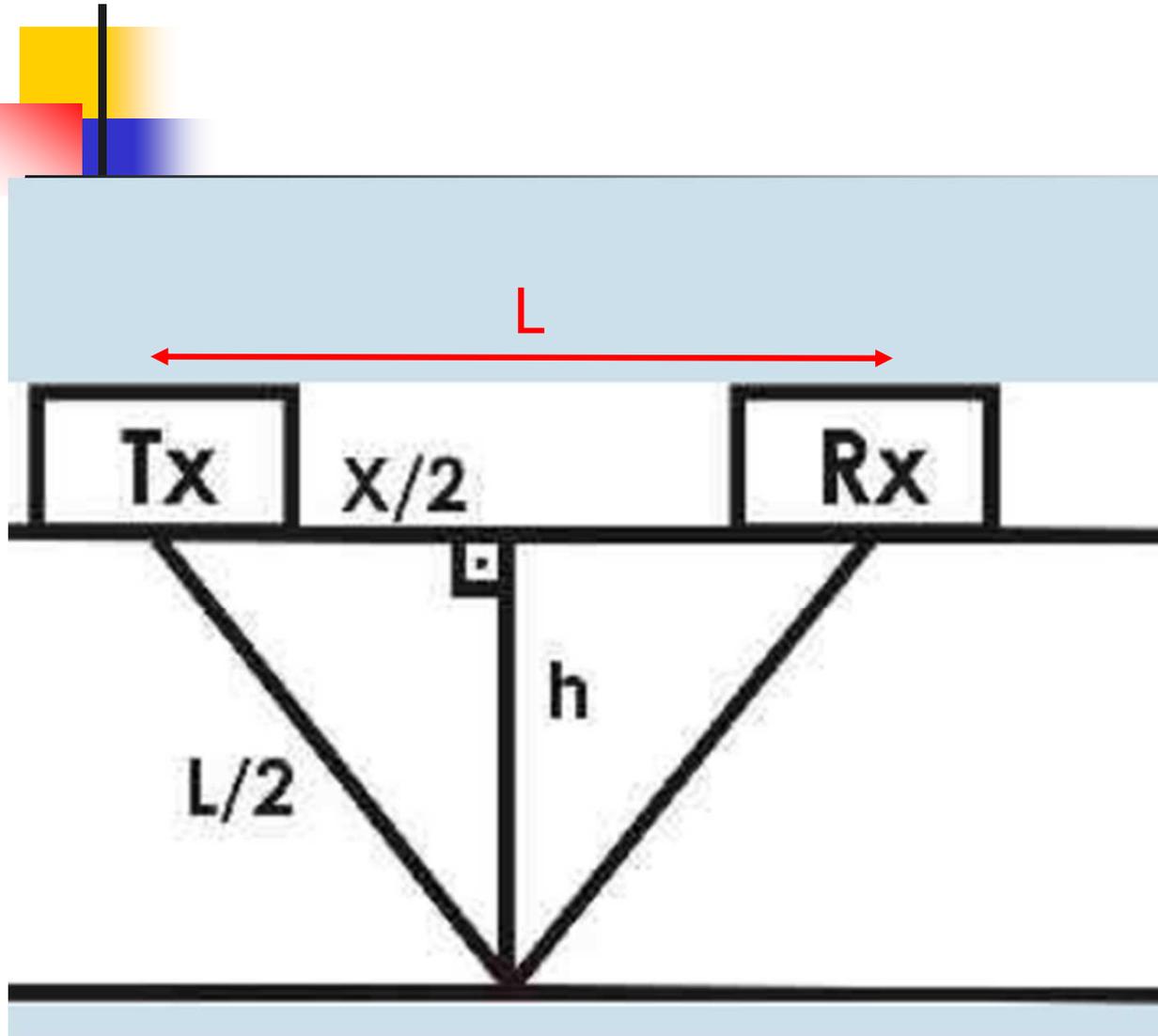
Cosa si intende con il termine rilassamento:

- Esso descrive il fenomeno della dissipazione dell'energia dovuta al tempo richiesto dai dipoli dell'acqua per orientarsi in direzione del campo elettromagnetico applicato. Il processo risulta in un assorbimento di energia da parte dei dipoli.
- Il secondo è dovuto all'elevata conduttività dei materiali



acquisizione

GPR: equazione dell'onde riflesse



$$(L/2)^2 = (x/2)^2 + h^2$$

$$\frac{L^2}{4} = \frac{x^2}{4} + h^2$$

$$L = \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

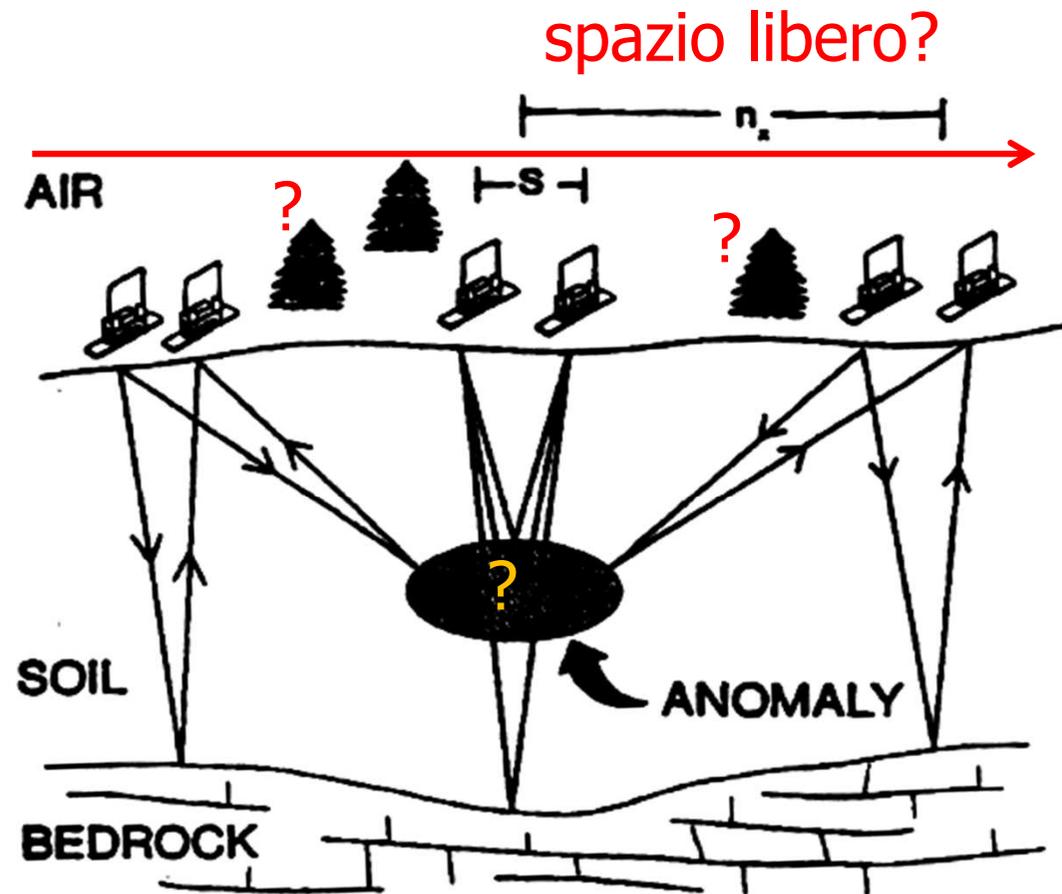
t: normalmente in nano secondi

GPR: considerazioni per la corretta impostazione dell'indagine

Fattori da considerare prima di iniziare il processing dei dati:

(1) Corretta pianificazione dell'indagine:

- caratteristiche elettriche del terreno da investigare, del target,
- Dimensioni e possibile profondità del target
- Presenza di falda e profondità
- Presenza di argilla
- Esiste un contrasto di permittività dielettrica
- Condizioni del terreno superficiale
- topografica



GPR: considerazioni per la corretta impostazione dell'indagine

Scelta della distanza tra i profili Radar
evita errori di campionamento
spaziale errato: nota come:

Campionamento Spaziale

Significa: quanti SCAN occorre
registrare in un spazio? **Per non
perdere qualche target**

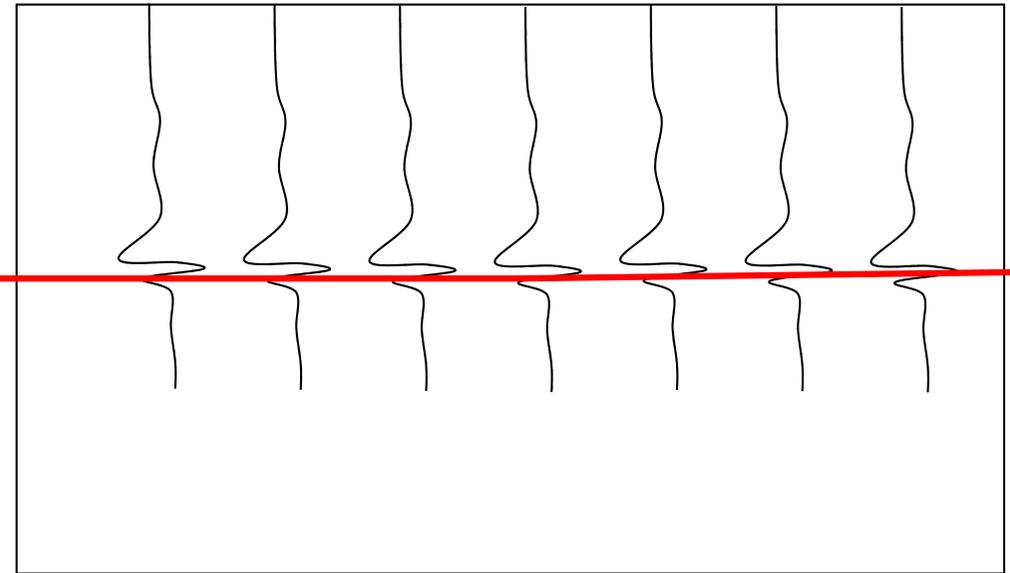
Normalmente si usa la regola:

$$\frac{1}{4} * \lambda$$

Si può anche calcolare la distanza
ottimale per il corretto campionamento
spaziale:

$$\Delta x(m) < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * fc \text{ in MHz}} * \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Distanza tra gli SCAN tipo A
(diapositiva n. 78)



Esempio: $f_c = 500 \text{ MHz}$, $\epsilon_r = 8$ ($c = 0.3 \text{ m/nS}$)
===== $\Delta x = 0.07 \text{ m}$

$$f = \frac{150}{X \sqrt{\mu_0 \epsilon_r}} \quad (\text{MHz})$$

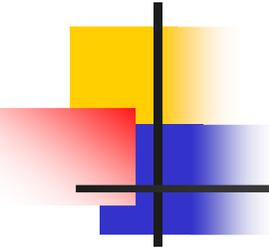
μ_0 : permeabilità magnetica del vuoto ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

ϵ_r : permittività relativa (adimensionale)

f : frequenza centrale antenna (MHz)

X : passo campionamento orizzontale (m o cm?).

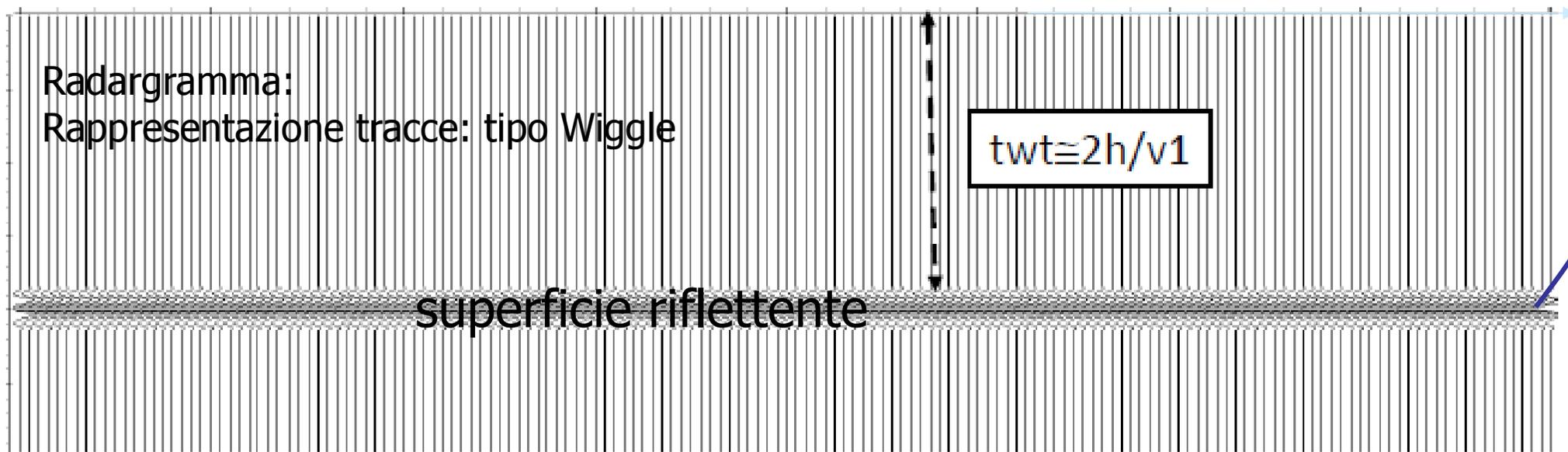
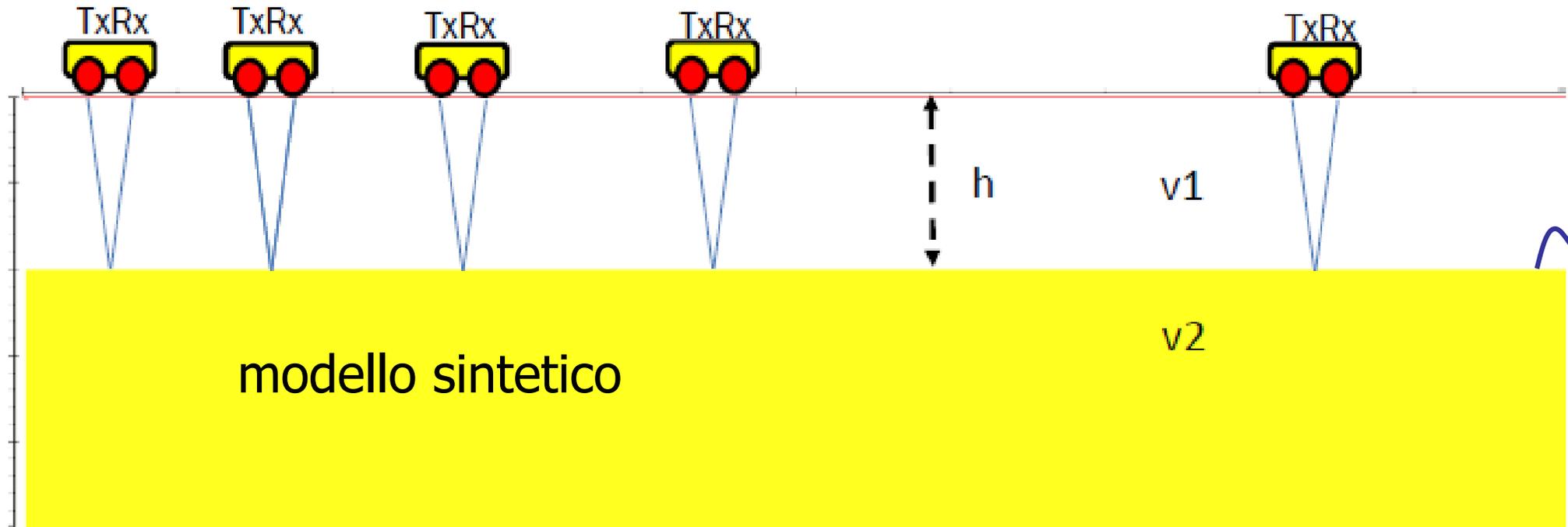
determina la risoluzione laterale (prima zona di Fresnel)



Geometria onde EM registrate da strumentazione GPR

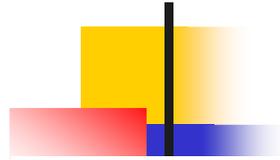
GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo



GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo

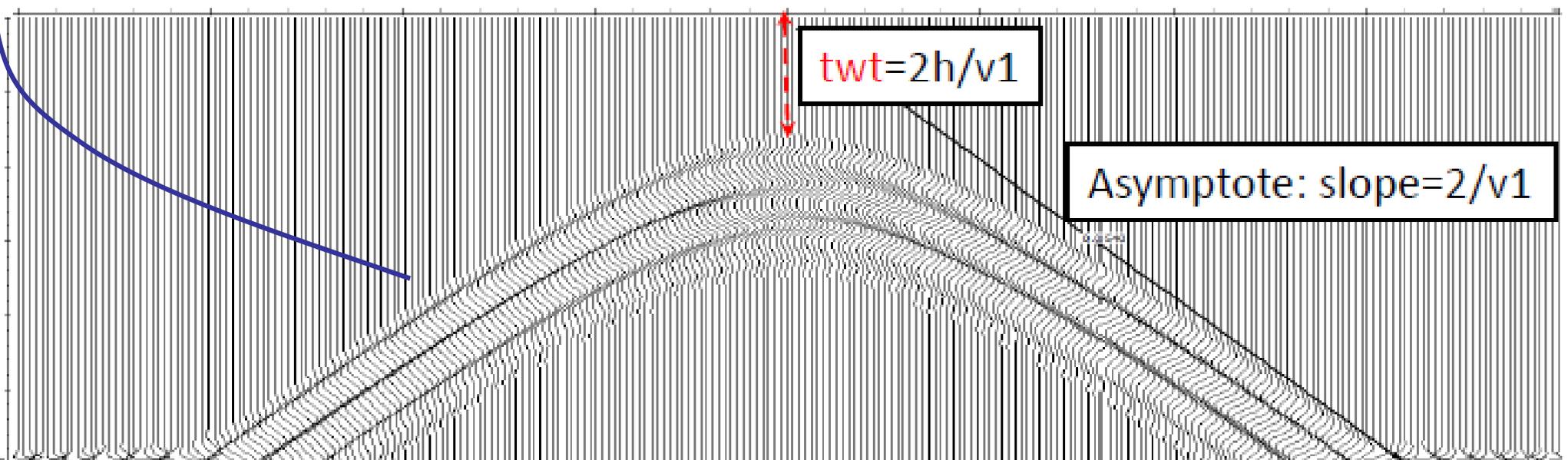
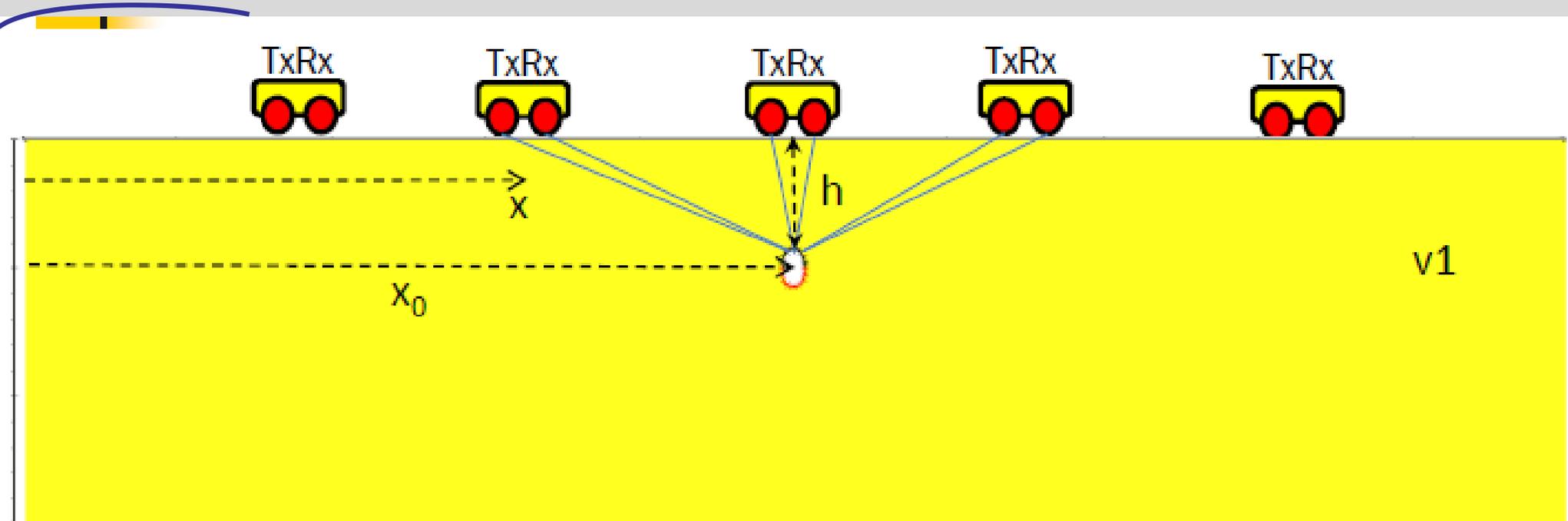


L'energia EM trasmessa dall'antenna ed in presenza di corpo puntiforme (cioè dimensioni $< \lambda$ del segnale) si verifica il fenomeno della diffrazione cioè l'energia viene riflessa dal corpo in accordo con il principio di Hygens. A causa della variazione della distanza antenna Tx-bersaglio il tempo (twt) cambia formando delle iperbole di diffrazione. Il twt si esprime con le seguente equazione:

$$twt \cong \frac{2\sqrt{(x - x_0)^2 + h^2}}{v_1}$$

GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo in presenza di corpo puntiforme si verificano le diffrazioni



GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo

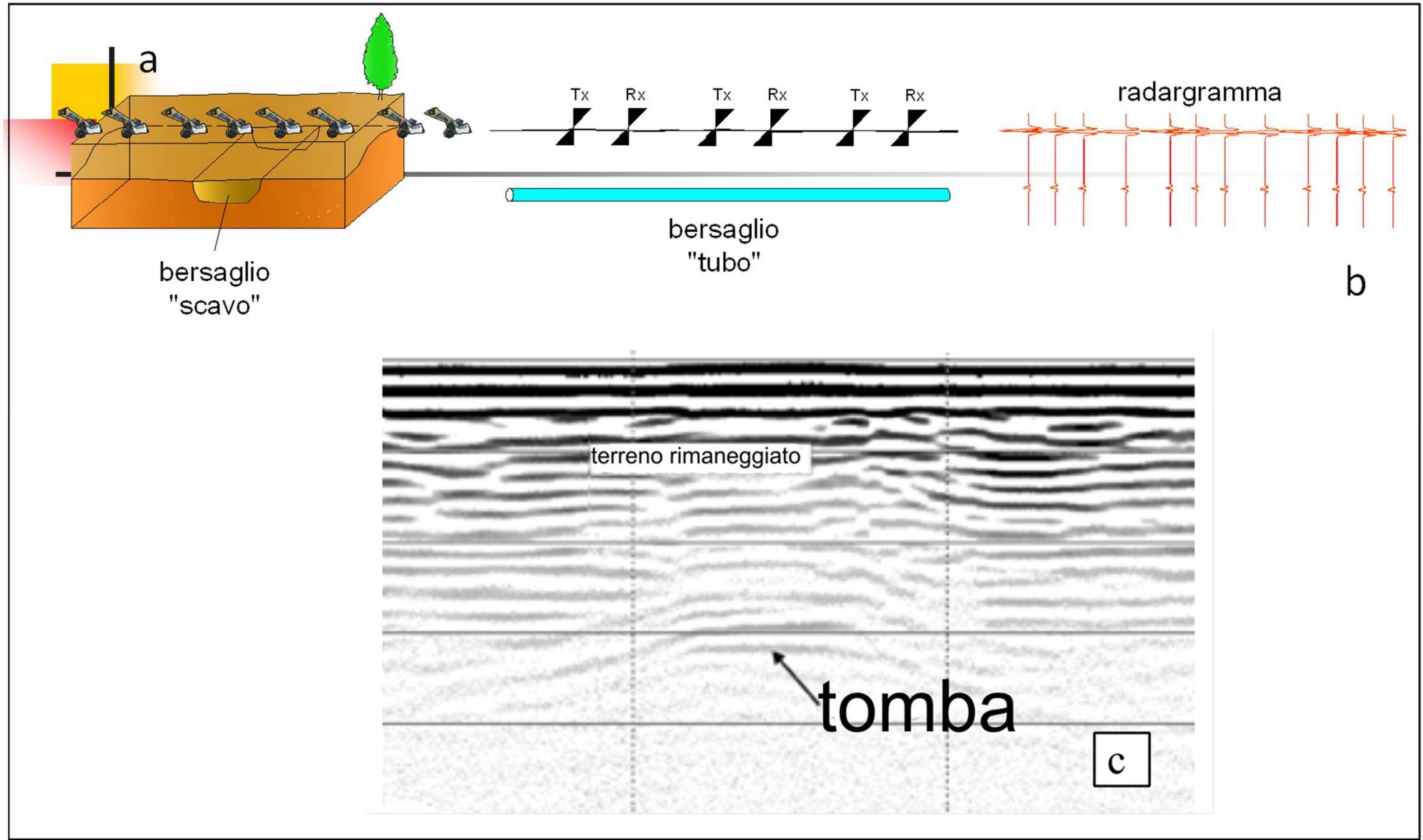
$$twt \cong \frac{2\sqrt{(x - x_0)^2 + h^2}}{v1}$$

NB: la pendenza dell'equazione definisce l'asintoto dell'iperbole e permette di determinare la velocità di propagazione dell'onda EM nel mezzo: all'apice dell'iperbole avremo:

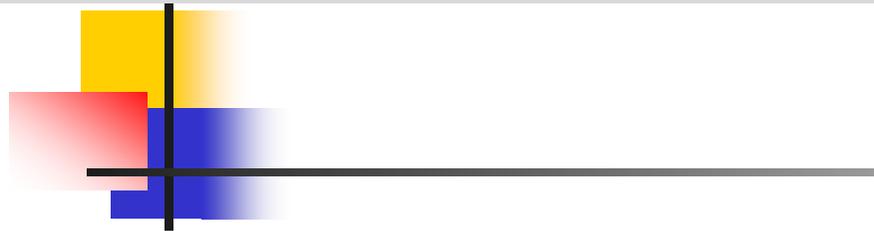
$$twt = 2/v1$$

Modellistica diretta dinamica permette di effettuare questa operazione già durante la fase di acquisizione

Principi di funzionamento



Geometria onde EM registrate da strumentazione GPR

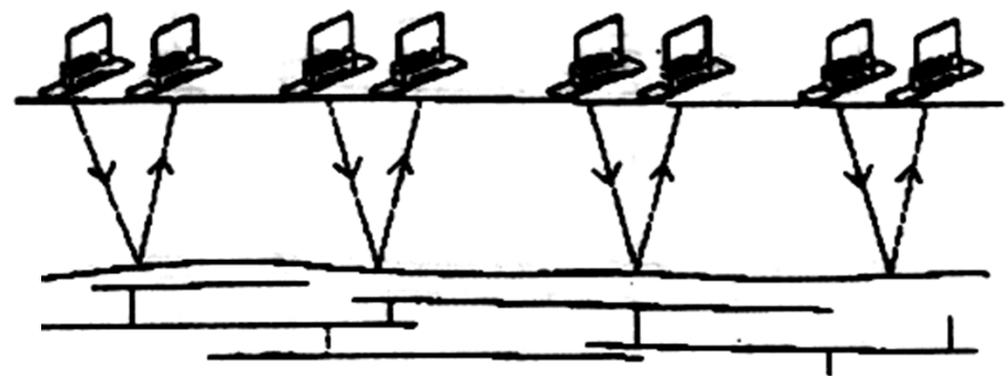


- Riflessione onde EM:

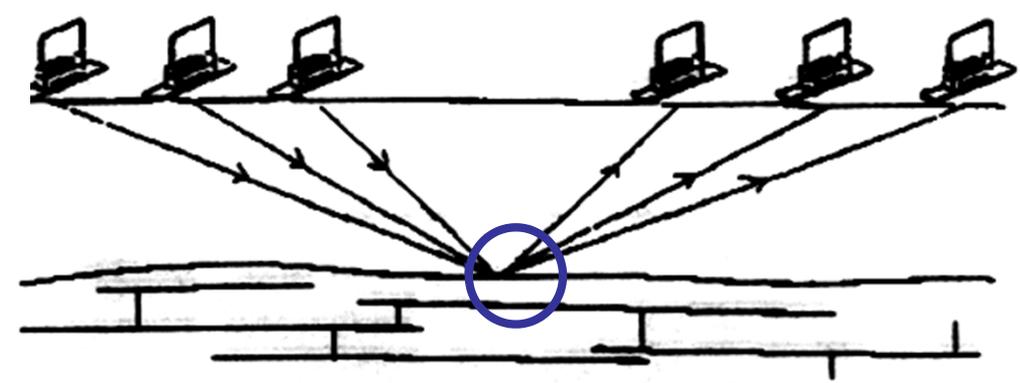
- (alto) modalità acquisizione con un'antenna (monostatica)
- (basso) modalità acquisizione con due antenne (bistatica)

- La modalità CMP, simile a quella utilizzata nella sismica a riflessione, ha due obiettivi:
 - (1) Determinare la velocità di propagazione delle onde EM,
 - (2) Migliorare qualità Segnale/Rumore

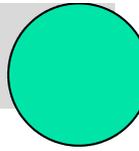
Onde riflesse



Onde riflesse da uno stesso punto



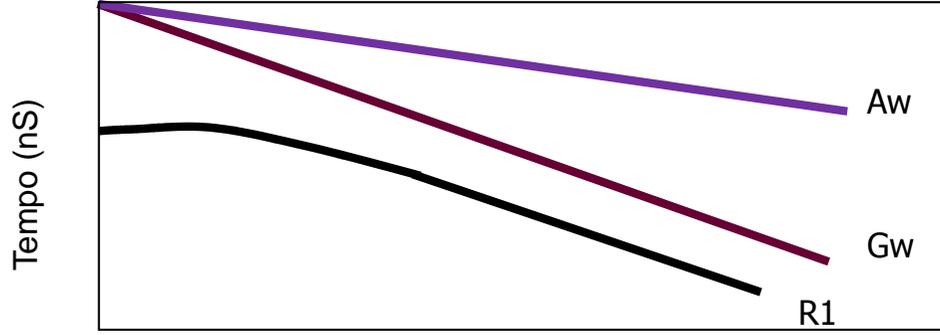
Common Mid Point



GPR: pianificazione – Wide-Angle

- La modalità wide-angle, simile a quella utilizzata nella sismica a rifrazione; permette di:
 - (1) Separare i diversi tipi di onde: (a) onda d'aria (b) onda diretta nello strato superficiale (detto Ground wave) (c) onde riflesse
 - (2) Determinare la velocità di propagazione delle onde EM per ciascuno mezzo ,
 - (3) Migliorare qualità Segnale/Rumore

Distanza (m) – distanza tra le due antenne: una fissa al centro e la seconda è mobile



Aw: onda d'aria $t = \frac{x}{v}$

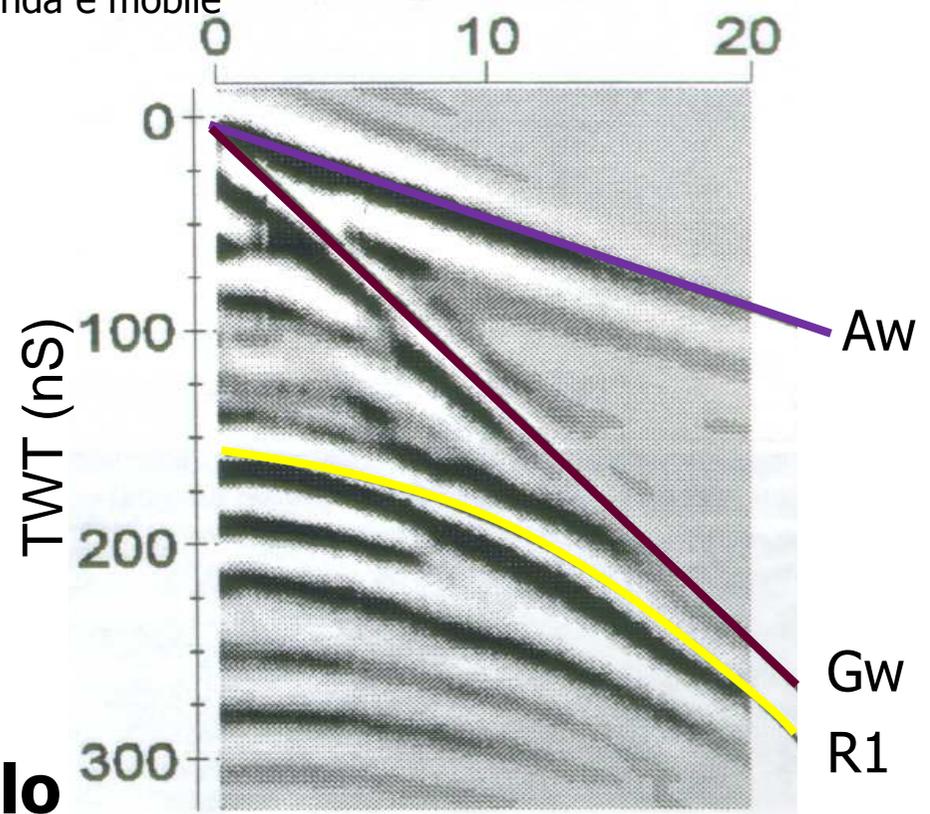
Gw: onda diretta/superficie terreno: $t = \frac{x}{v}$

Onda Riflessione (R1) $t = \frac{\sqrt{(x^2 + 4h^2)}}{v}$

'iperbole?'

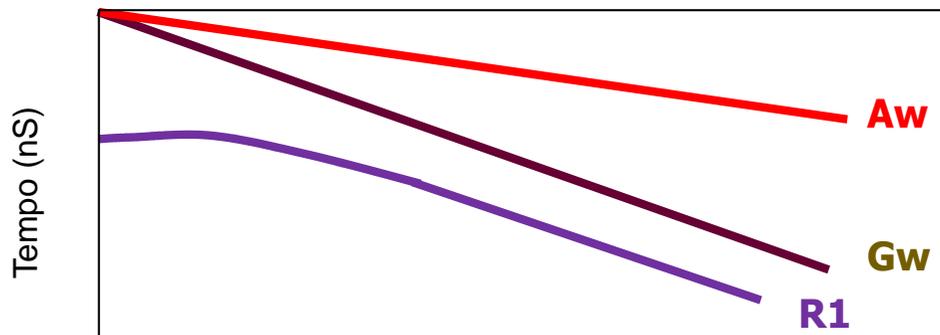
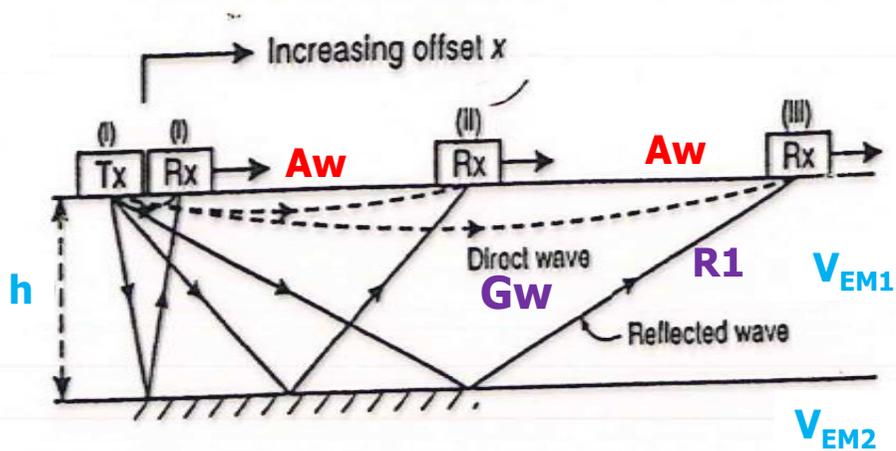
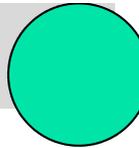
(vedremo meglio nel capitolo della sismica a riflessione)

Radargramma



Radargramma tipo B

GPR: pianificazione – Wide-Angle reflection (WAR)



Aw: onda d'aria $t = \frac{x}{v}$

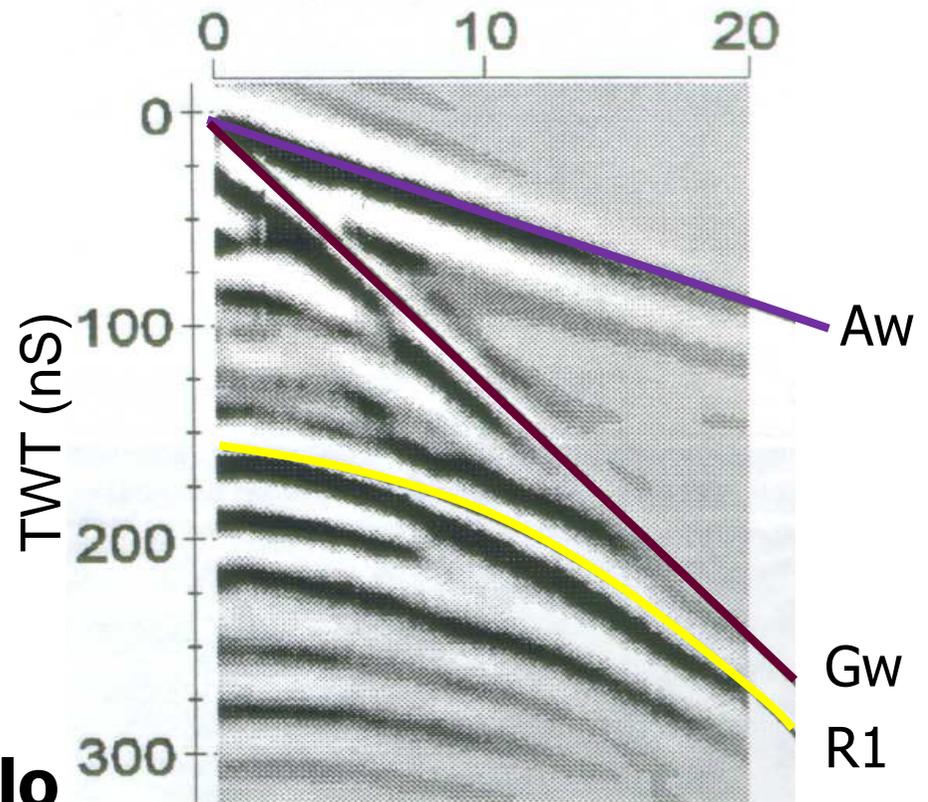
Gw: onda diretta/superficie terreno: $t = \frac{x}{v}$

Onda Riflessione (R1) $t = \frac{\sqrt{(x^2 + 4h^2)}}{v}$

'iperbole?'

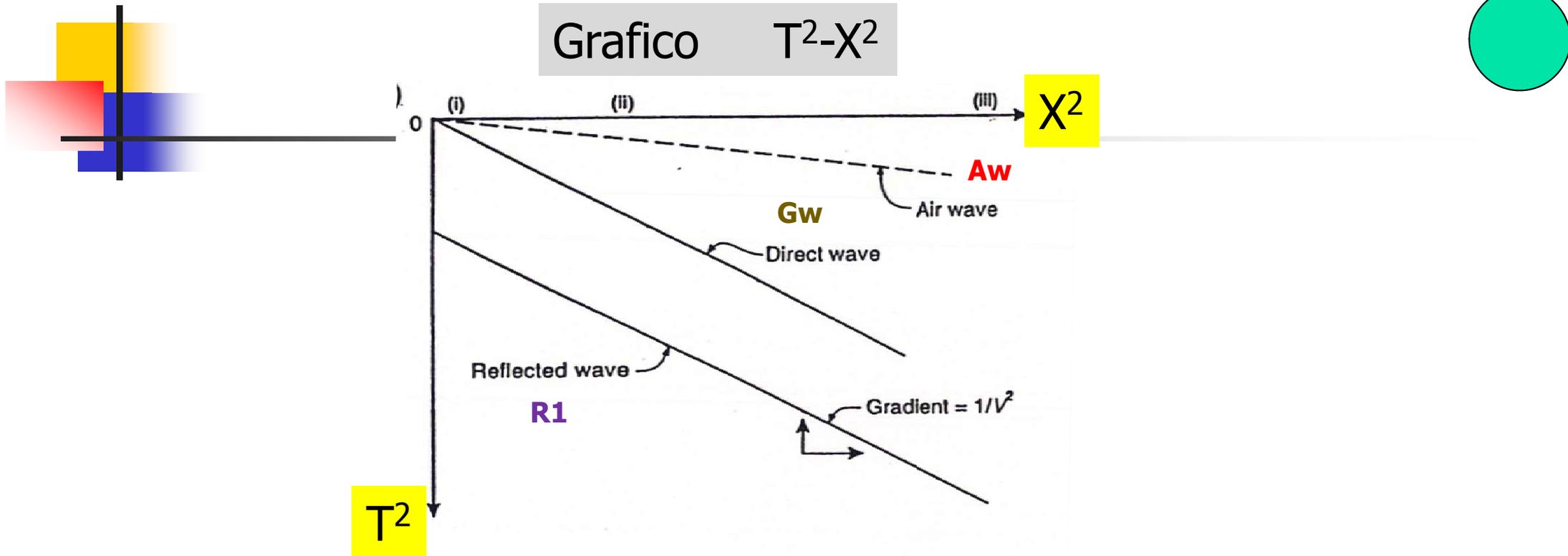
(vedremo meglio nel capitolo della sismica a riflessione)

Radargramma

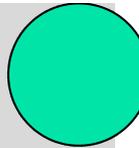


Radargramma tipo B

GPR: stima della velocità (acquisizione dati con due antenne cioè bistatiche)



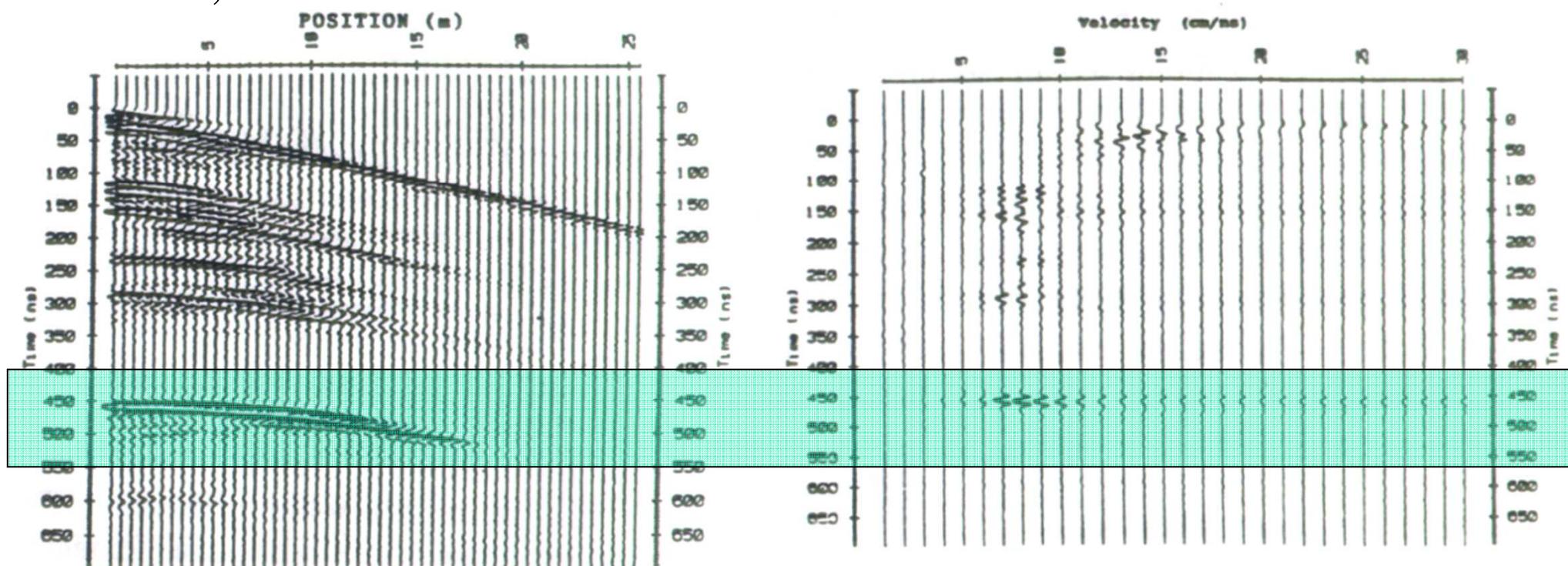
La linearizzazione dell'iperbole di riflessione mediante il calcolo del quadrato della distanza e del tempo di volo **permette di determinare la velocità di propagazione nel primo mezzo soltanto.**



GPR: pianificazione – analisi velocità (acquisizione dati con due antenne cioè bistatiche)

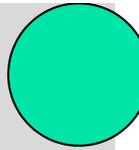
- La modalità CMP, simile a quella utilizzata nella sismica a riflessione, ha due obiettivi:

(1) Determinare la velocità di propagazione delle onde EM,



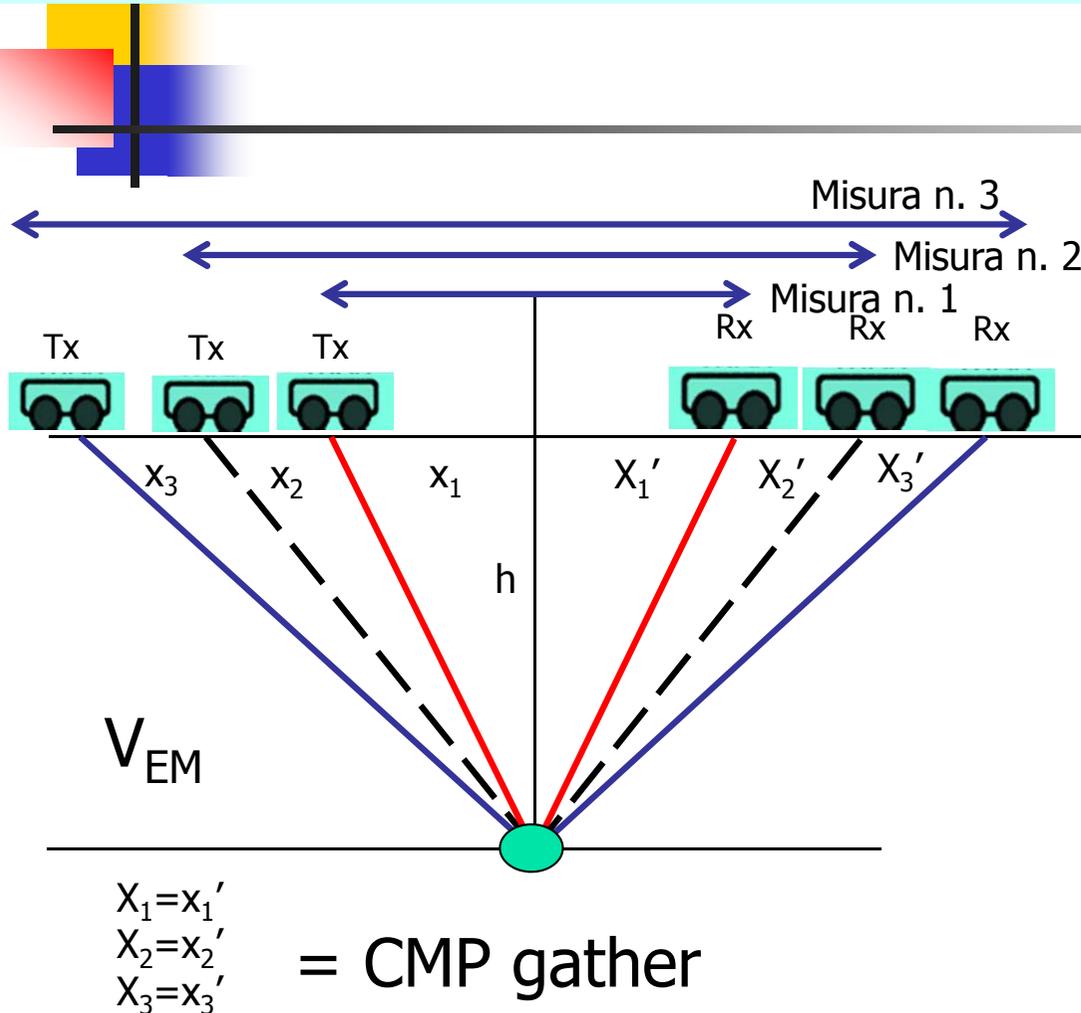
La velocità corretta è quella che permette a tutte le onde riflesse di allignarsi orizzontalmente cioè il tempo di andata e ritorno è unico per tutte le acquisizioni fatte con separazioni diversi.

(vedremo meglio nel capitolo della sismica a riflessione)



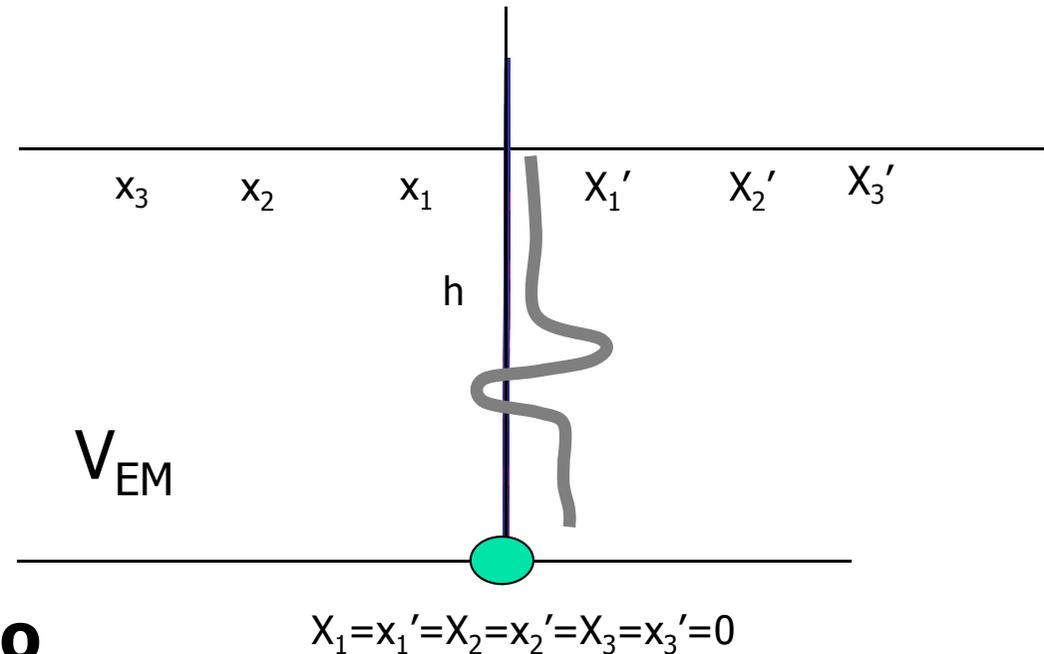
GPR: pianificazione – analisi velocità (acquisizione dati con due antenne cioè bistatiche)

Vedremo questa tecnica nell'analisi dei dati di sismica a riflessione.

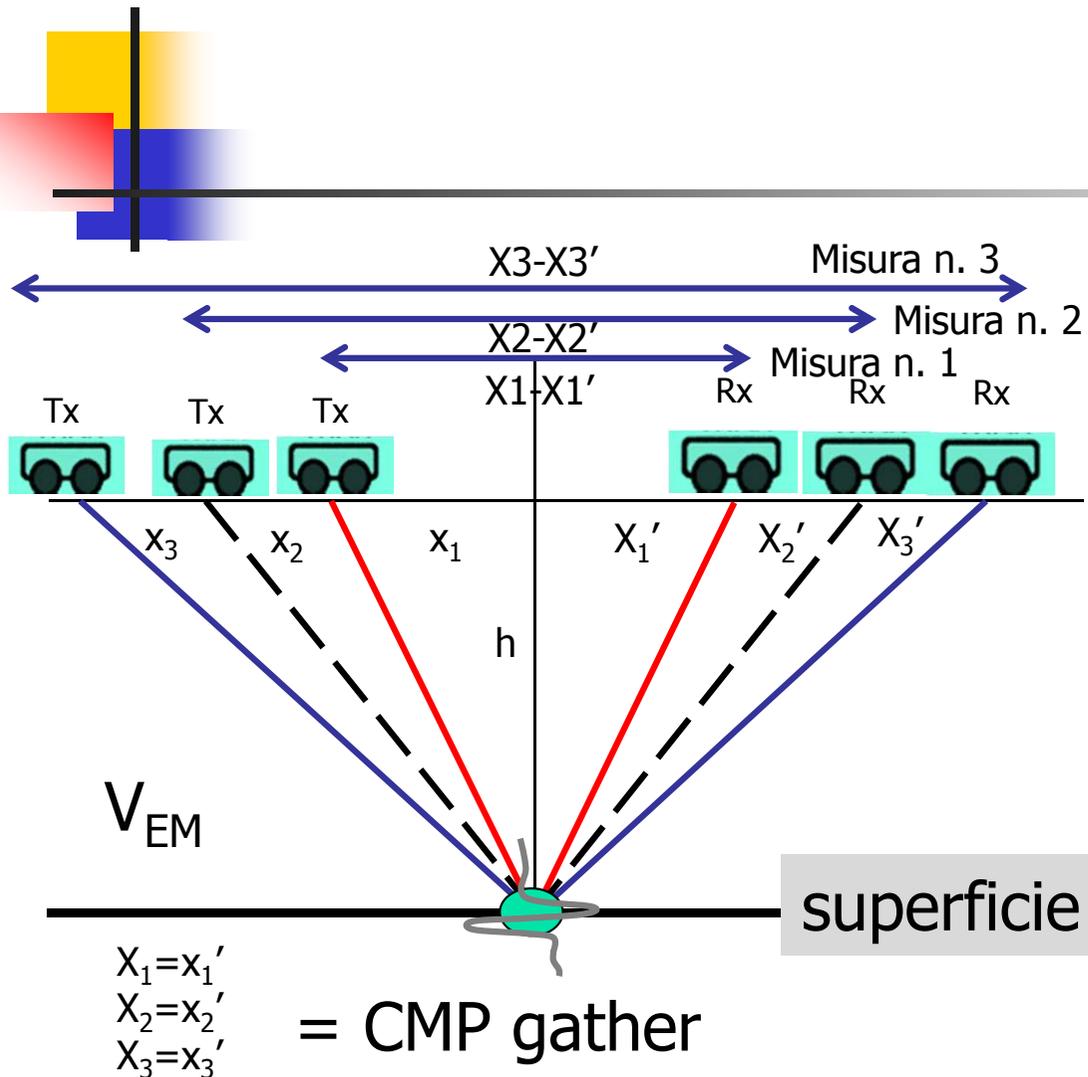


(vedremo meglio nel capitolo della sismica a riflessione)

Tutti i raggi EM si piegano su se stessi
Se e solo se la Velocità utilizzata per calcolare il tempo aggiuntivo impiegato per percorrere la distanza X_1-0 e $0-X_1'$ è quella corretta del mezzo. Questa operazione si chiama Normal Move-out Time correction



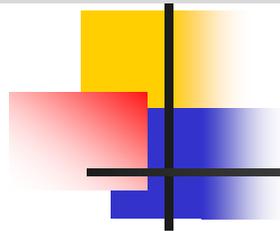
GPR: stima della velocità (acquisizione dati con due antenne cioè bistatiche)



- La stima della velocità si basa sulla misura del tempo di VOLO che impiega un'onda EM a percorrere la distanza Tx-punto di riflessione 'CMP'-Rx,
- Misure del tempo di volo effettuate a diversa separazione 'crescente' simmetricamente rispetto al punto mediano tra Tx-Rx , ci permettono di calcolare la velocità media di propagazione dell'onda EM nel mezzo al di sopra della superficie riflettente utilizzando la seguente espressione:

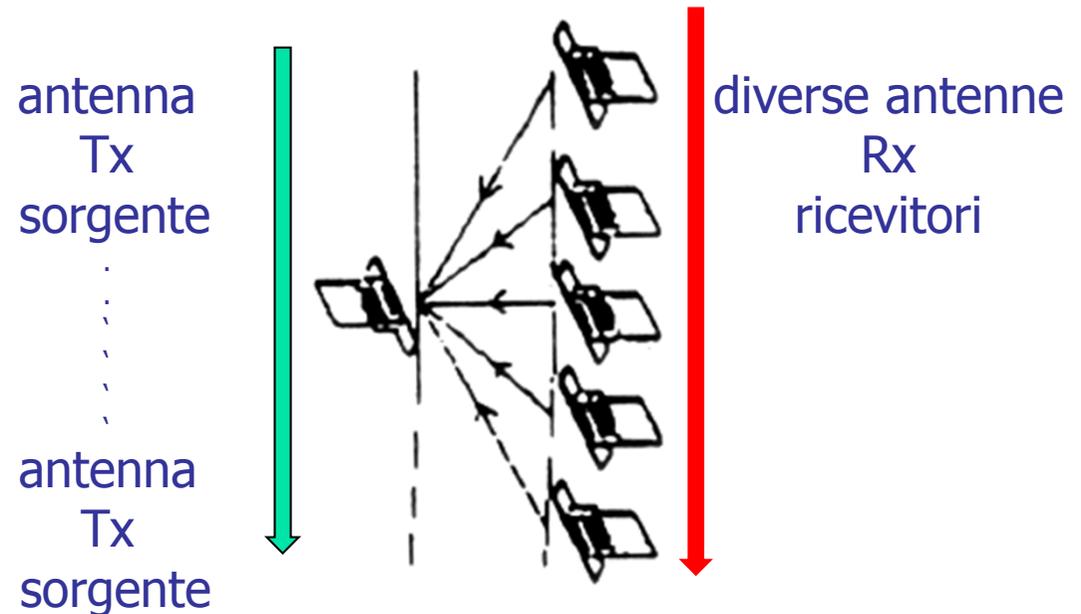
$$V_{EM} = \frac{(x_1 - x'_1)}{\sqrt{t_{(x_1-x'_1)}^2 - t_h^2}}$$

Geometria onde EM registrate da strumentazione GPR



Transilluminazione Modalità tomografica

- Trasmissione onde EM:
 - modalità acquisizione con due antenne poste alle due facce del corpo,
 - Modalità transilluminazione (o anche tomografica),
 - Tra due fori (tipo cross-hole)

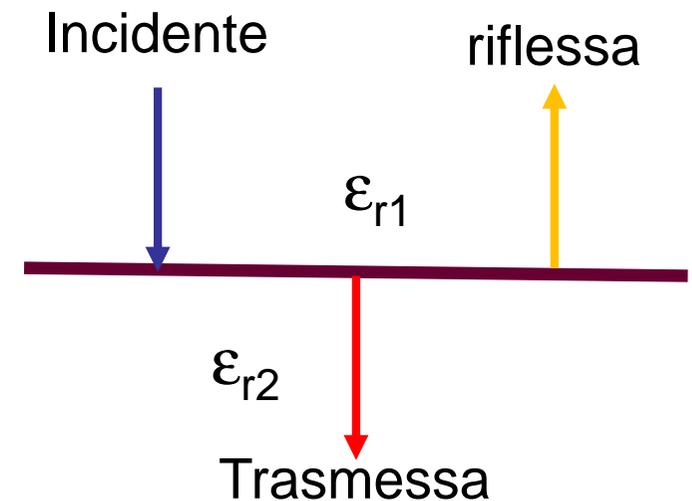


GPR: principio di acquisizione dati – perché si verifica la riflessione - coefficiente di riflessione

Quando si verifica un contrasto di ϵ tra due mezzi separati da una discontinuità il segnale EM subisce riflessione e rifrazione cioè trasmissione.

Il coefficiente di riflessione è espresso dal rapporto di velocità o della ϵ_r :

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$



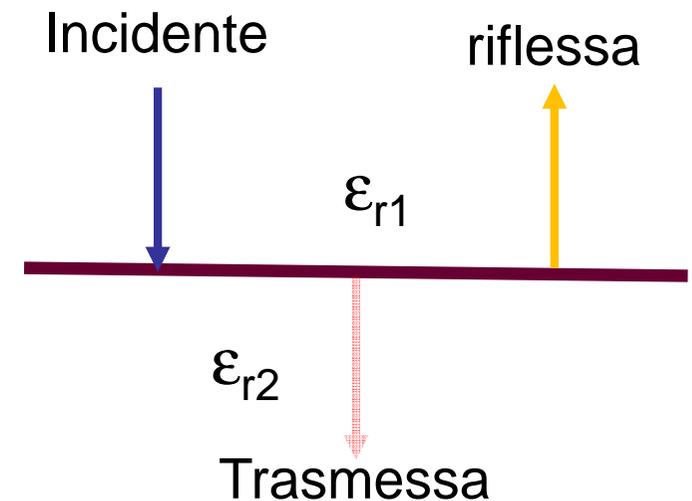
si ricordi che la Vem dei mezzi geologici è compresa, valori indicativa, tra 6 e 20 cm/nS.

GPR: principio di acquisizione dati – perché si verifica la riflessione - coefficiente di trasmissione

Quando si verifica un contrasto di ϵ tra due mezzi separati da una discontinuità il segnale EM subisce riflessione e trasmissione.

Il coefficiente di trasmissione è espresso dal rapporto di velocità o della ϵ_r :

$$T = \frac{2v_1}{v_2 + v_1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$



GPR: principio di acquisizione dati – perché si verifica la riflessione - coefficiente di trasmissione

Quando il corpo riflettente è metallico cosa succede?

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

$$T = \frac{2v_1}{v_2 + v_1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

In questo caso abbiamo:

$\epsilon\omega \ll \sigma$ quindi $v_2 =$

$$R = -1$$

$$T \approx 0$$

piccola

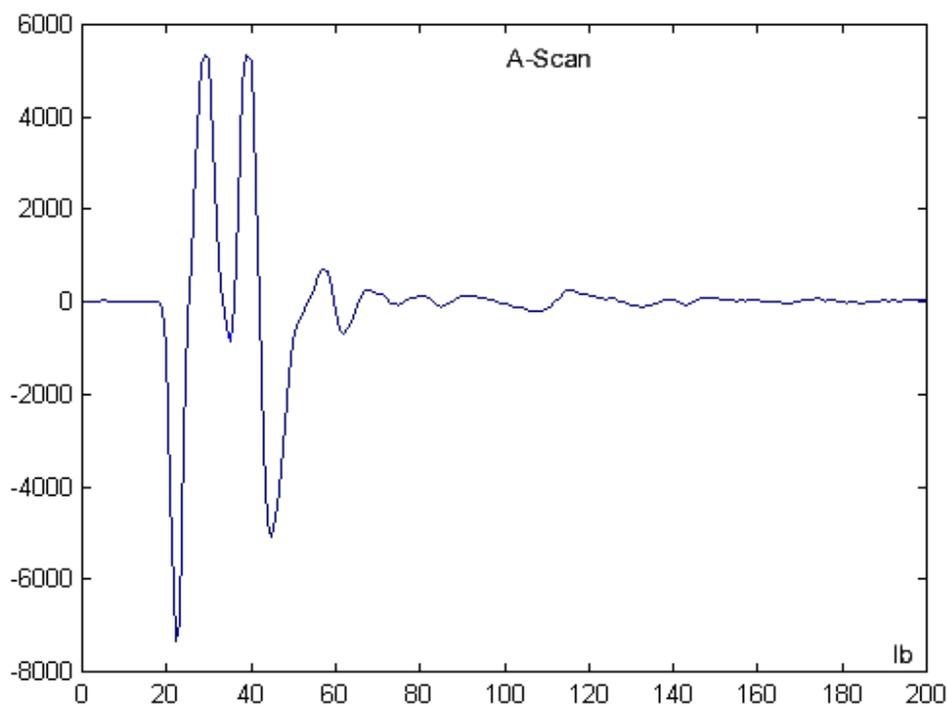
La forte riflessione spiega del perché si possono rilevare i sottoservizi metallici; il segno (-) significa inversione di polarità

GPR: analisi impulso EM trasmesso e ricevuto.

- Tipo di scan (o SWEEP in inglese)

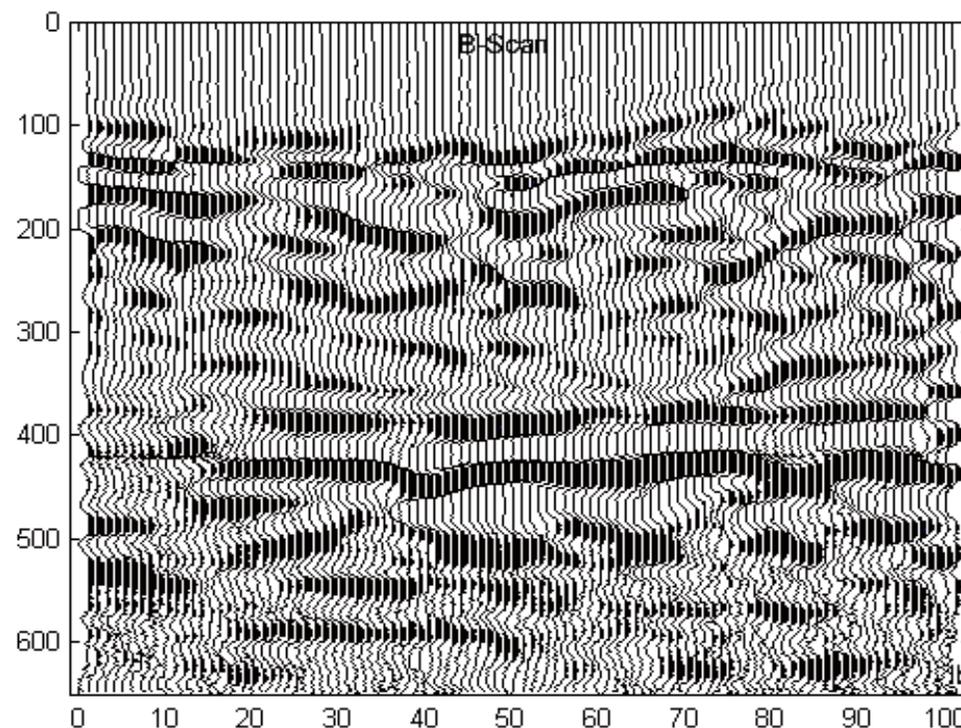
A-scan (1D)

questo tipo di visualizzazione permette di analizzare dettagliatamente l'ondina



B-SCAN (2D)

si intende un'immagine georadar formata da un insieme di A-SCAN.

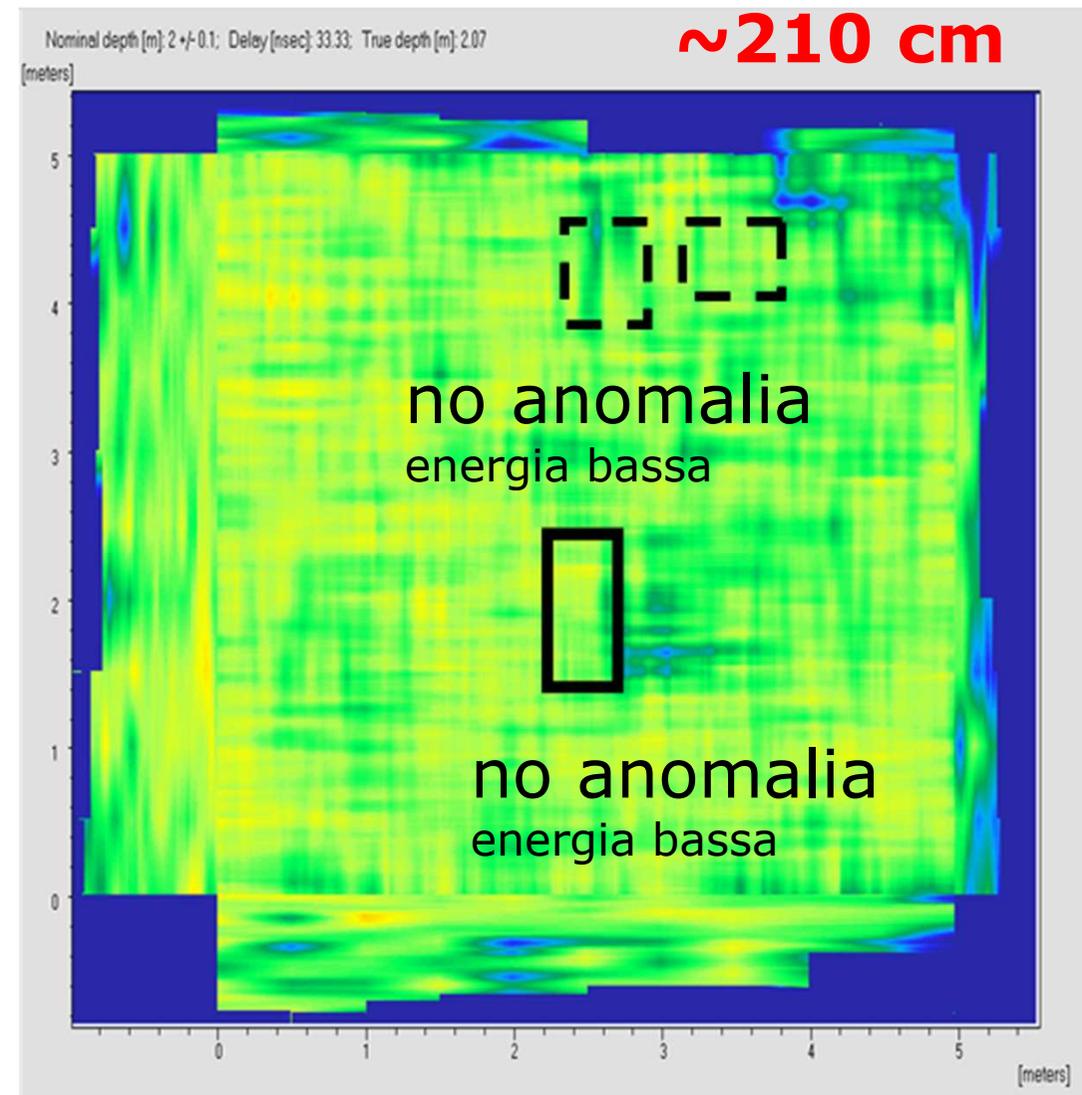
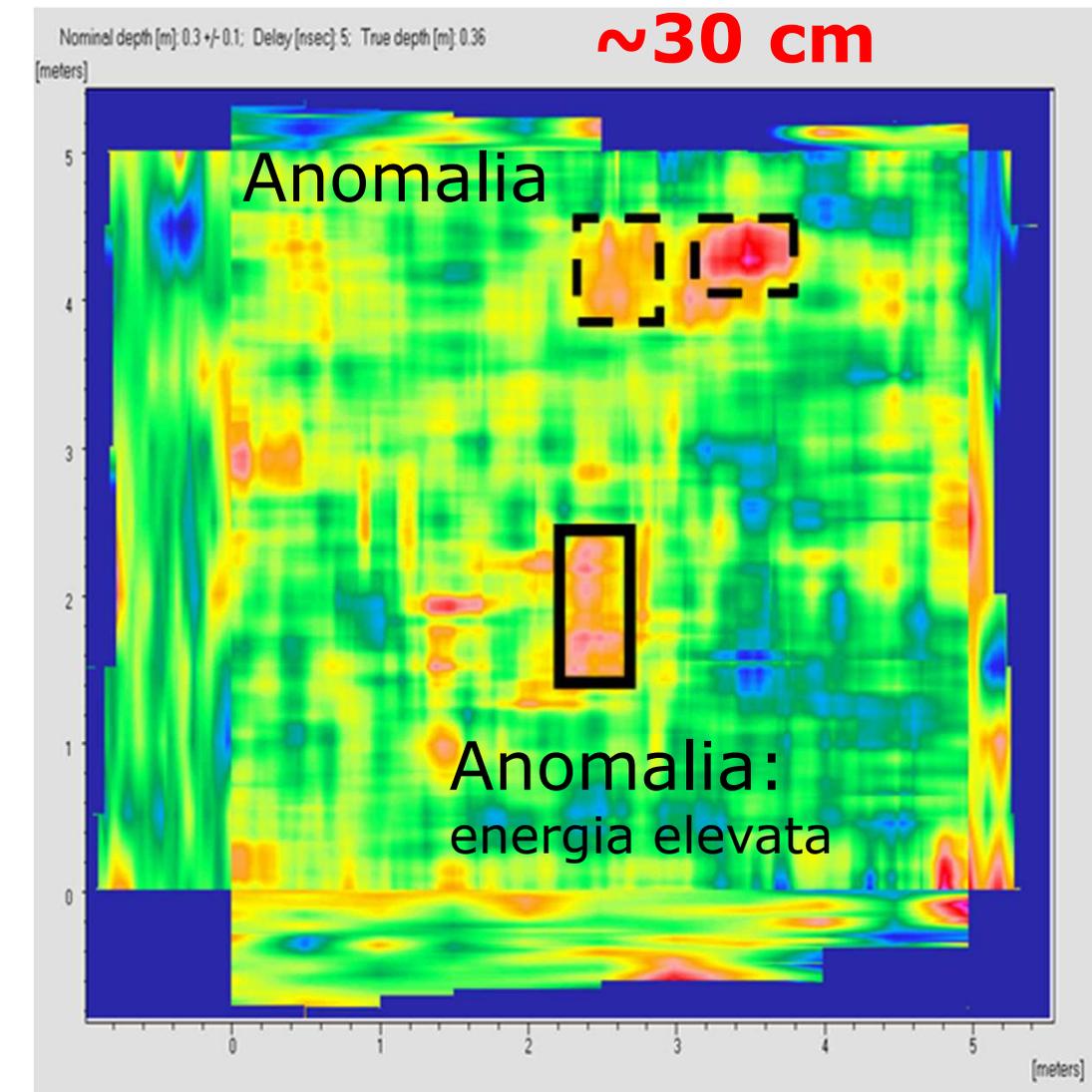


GPR: analisi impulso EM trasmesso e ricevuto.

- Tipo di scan

C-SCAN

si intende un'immagine della quantità di energia ricevuta in un determinato intervallo di tempo (TWT ovvero ad un intervallo di profondità. **L'energia (E) = |ampiezza|²**. è un modo efficace per delimitare i corpi riflettente



- **Ciascuna strumentazione ha una modalità propria per l'acquisizione dei dati ma i concetti fisici che stanno alla base di queste diverse modalità sono simili tra loro**
- **TWT: *Two-Way-Time* ($>0.7 * TWT$):**
dipende da:
 - (a) velocità del mezzo
 - (b) profondità del corpo/superficie riflettente

GPR: calcolo tempo di volo di Andata e Ritorno

Oggetto: posto a 50 cm dalla sorgente

Mezzo di propagazione: aria

$$\begin{aligned} \text{Tempo di volo} &= \frac{TWT}{V_{EM}} = \frac{1 \text{ metro}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3 \times 10^{-9} \\ &= 3 \text{ nS} \end{aligned}$$

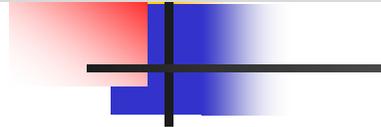
Onde elastiche (V_p) :

$$\begin{aligned} \text{Tempo di volo} &= \frac{\text{distanza}}{V_p} = \frac{1 \text{ metro}}{3 \times 10^2 \text{ m/s}} \\ &= 0.0033 \text{ s} = 3300.0 \text{ nS} \end{aligned}$$

GPR: calcolo lunghezza d'onda EM

Mezzo di propagazione: Granito

Frequenza fondamentale dell'antenna: 200 MHz

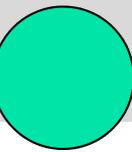

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{1.3 \times 10^8 \text{ m/s}}{200 \times 10^6 \text{ Hz}} = 0.65 \text{ m}$$

Lunghezza d'onda sismica

Mezzo di propagazione: Granito

Frequenza segnale: 100 Hz

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{5000 \text{ m/s}}{100 \text{ Hz}} = 50 \text{ m}$$



➤ *Numero dei campioni*

frequenza di campionamento deve rispettare la seguente equazione:

Esempio: antenna: monostatica, 500 MHz, profondità corpo: 1 m, $V_{em}=0.1$ m/nS
Cioè terreno sabbioso asciutto. Calcolare il numero di campioni da acquisire?

$$n. \text{campioni} = 20 \cdot \frac{TWT}{\text{frequenza}}$$

$$t_0 = \frac{2 \cdot h}{V} = 2 * \frac{1}{0.1} = 20 \text{ nS}$$

TWT ad offset zero

$$n. \text{campioni} = 20 \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^{-9}}{500 \cdot 10^6} \right) = 1200$$

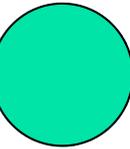
GPR: Equazioni per determinare alcuni parametri di un riflettore singolo
...progettazione e pianificazione: occorre stimare velocità e permittività
dielettrica ==> usare tabelle integrate con conoscenze geologiche

$$h = \frac{TWT \times V}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad eq.1$$

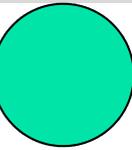
Procedure simili
permettono di
determinare h , ϵ_r ed
anche il twt atteso

$$\epsilon_r = \left(\frac{TWT \times V}{2 \times h} \right)^2 \quad eq.2$$

$$TWT = \frac{2 \times h \times \sqrt{\epsilon_r}}{V} \quad eq.3$$



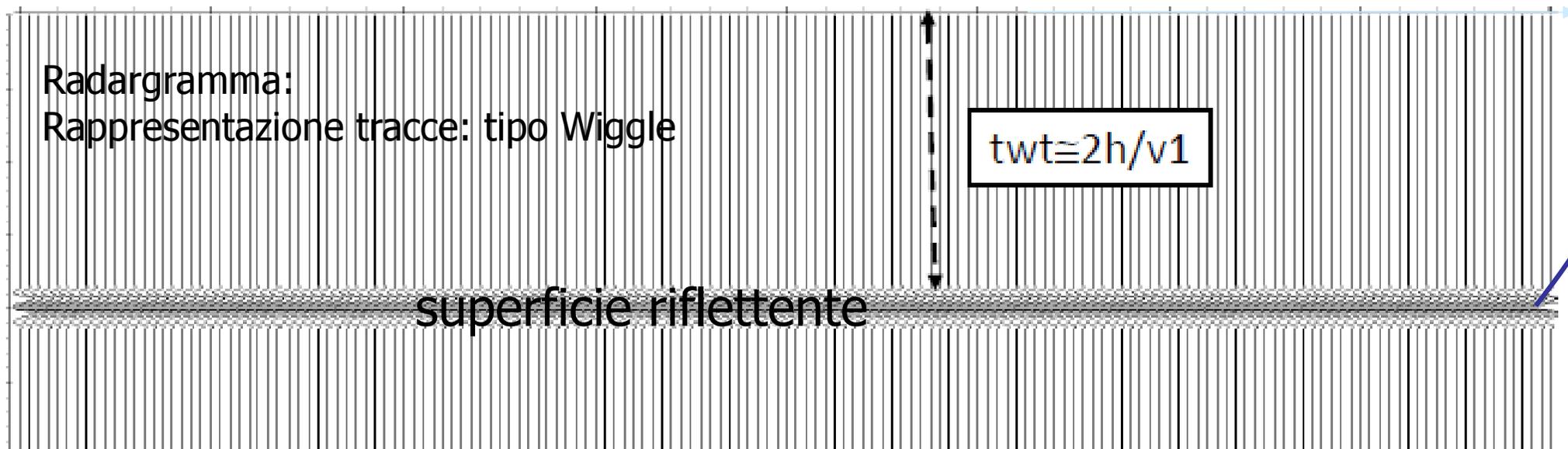
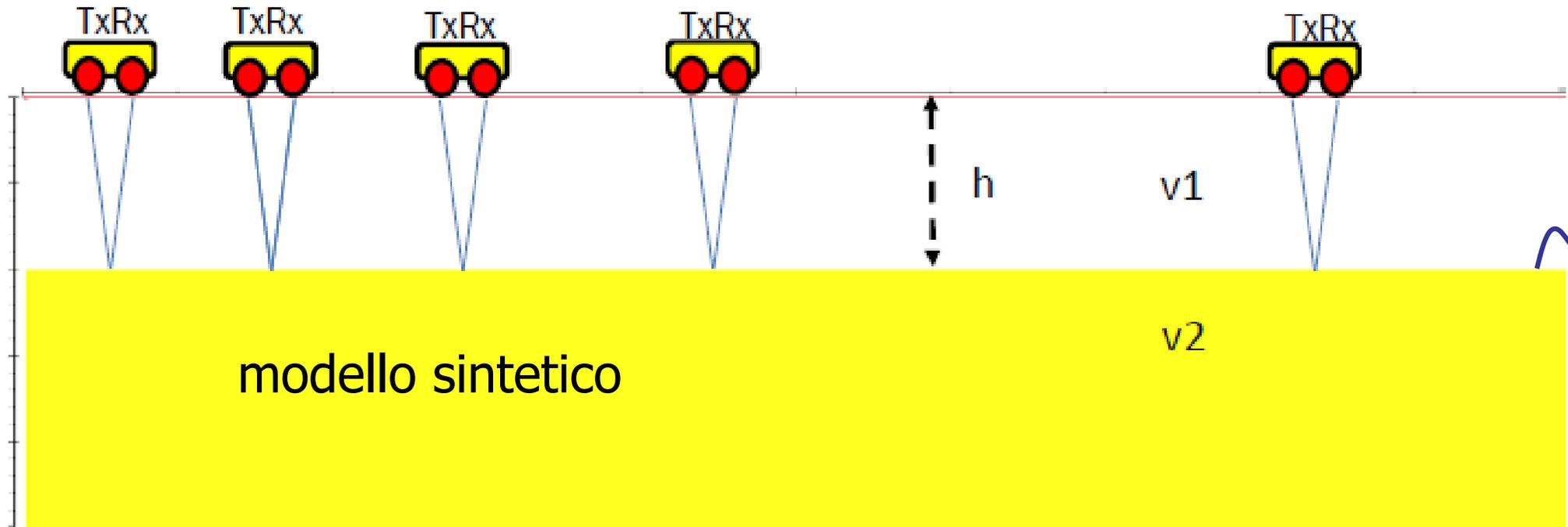
➤ **Amplificazione segnale in fase di acquisizione**



- Costruzione della funzione di guadagno in dB in funzione del tempo doppio 'TWT',
- Deve essere ricostruita sul campo come avete avuto occasione di vedere durante la campagna GPR effettuata sotto le mura orientale di Ferrara (Baluardo di San Tommaso),
- Il guadagno in dB è da impostare per ciascuno tratto temporale detto polo; normalmente un buon filtro è costruito con almeno 4 poli (**sono i punti di cambio pendenza della funzione di guadagno**),
- la funzione di guadagno non deve causare il *clipping* del segnale ovvero l'incremento dell'ampiezza oltre la dinamica del sistema di acquisizione dati. I sistemi A/D attuali sono a 24 bit ovvero 2^{24} livelli di numeri divisi in metà per ampiezze positive e l'altra metà per ampiezze negative.

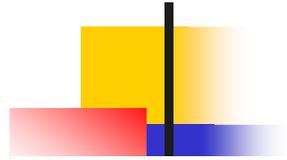
GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo



GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

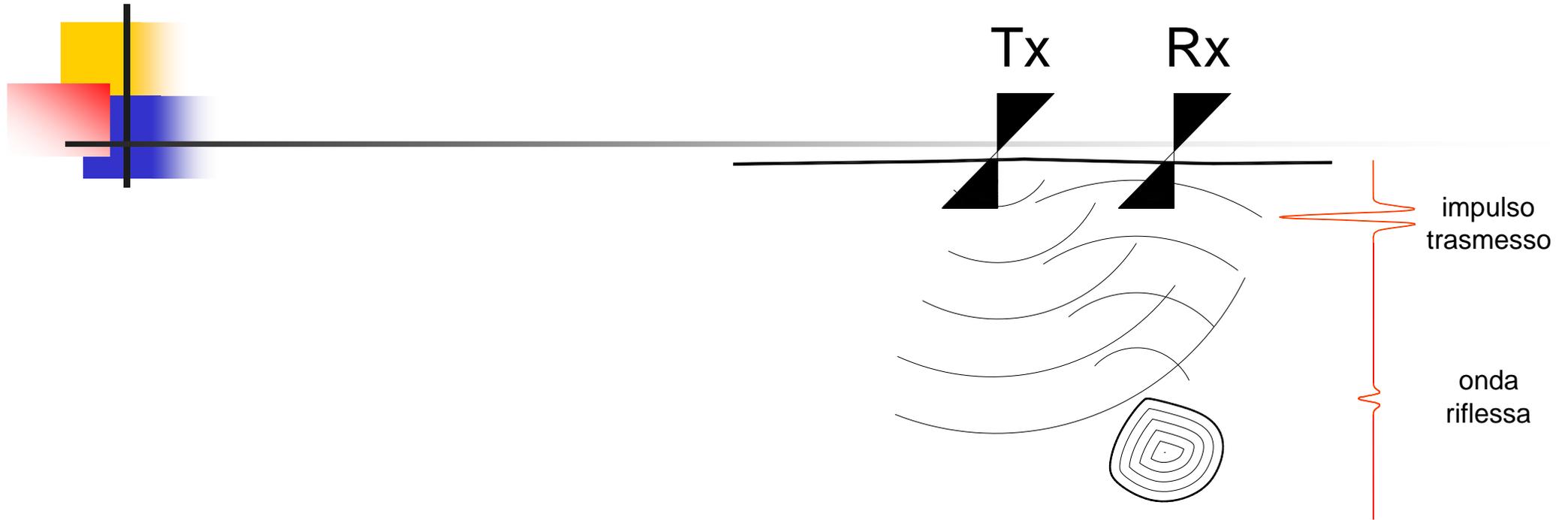
TWT: tempo doppio di volo



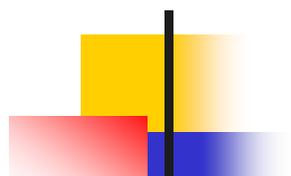
L'energia EM trasmessa dall'antenna ed in presenza di corpo puntiforme (cioè dimensioni $< \lambda$ del segnale) **si verifica il fenomeno della diffrazione cioè l'energia viene riflessa dal corpo in accordo con il principio di Hygens**. A causa della variazione della distanza antenna Tx-bersaglio il tempo (twt) cambia formando delle iperbole di diffrazione. Il twt si esprime con le seguente equazione:

$$twt \cong \frac{2\sqrt{(x - x_0)^2 + h^2}}{v_1}$$

GPR: principio di funzionamento



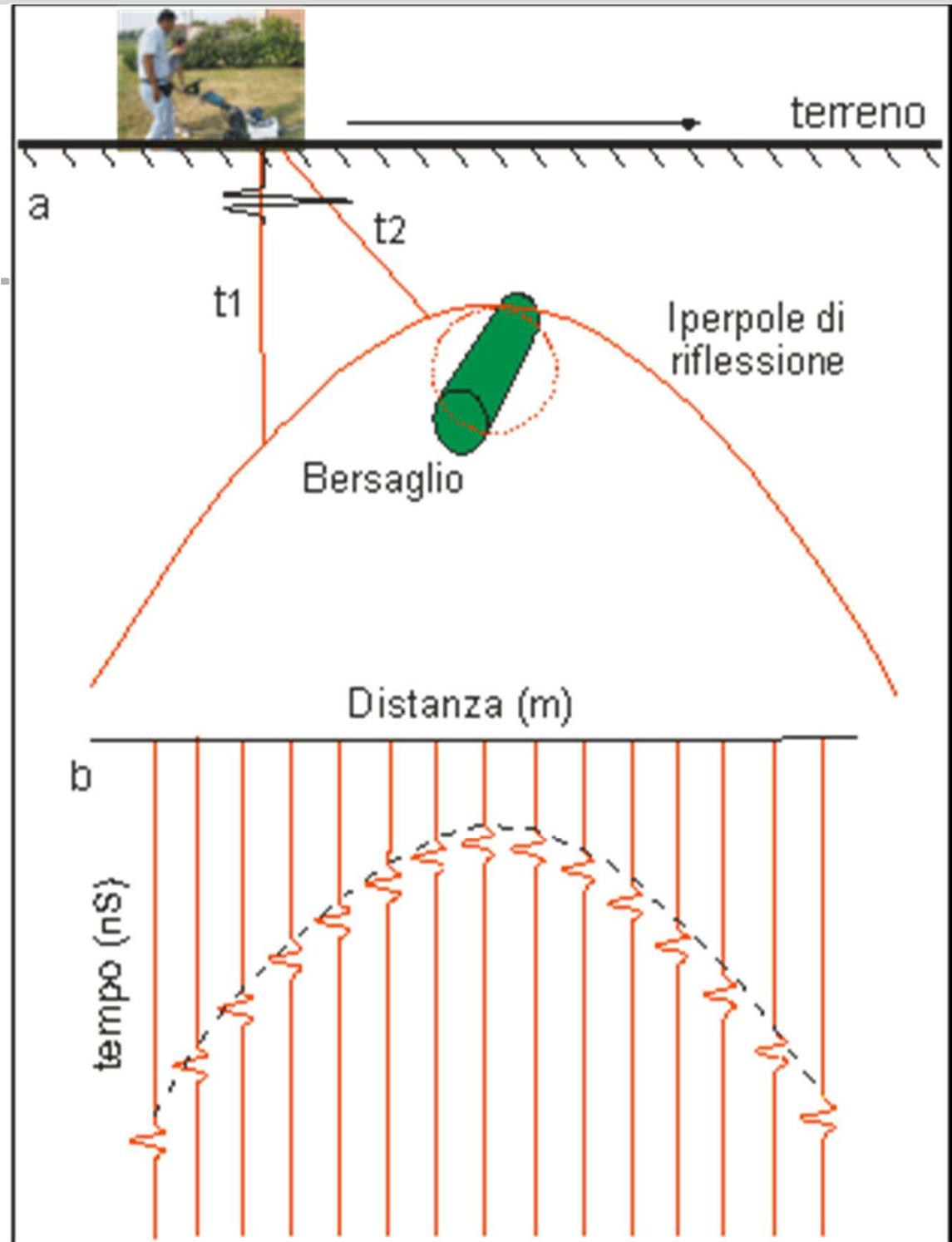
principio del georadar per "riflessione": l'impulso generato dall'antenna trasmittente (Tx) si propaga come onda e.m., si riflette sull'oggetto e ritorna all'antenna ricevente (Rx). Di fianco la traccia, cioè la registrazione all'antenna ricevente dell'impulso emesso dalla sorgente (impulso trasmesso) e dell'evento di riflessione (onda riflessa).



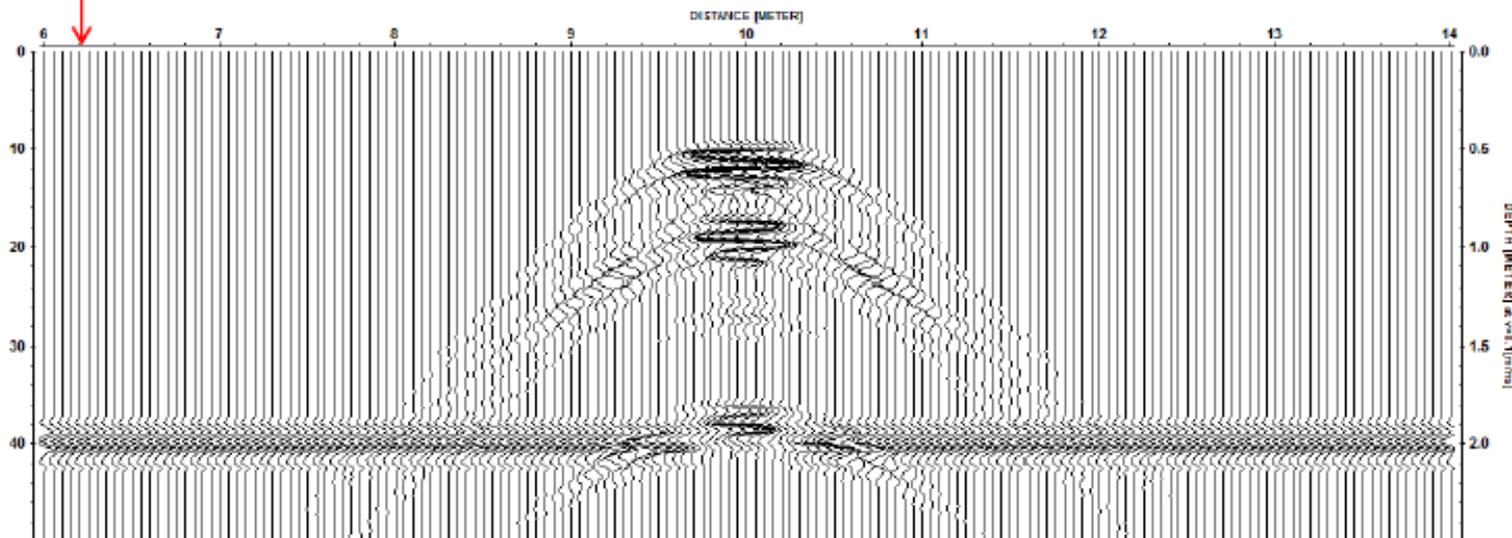
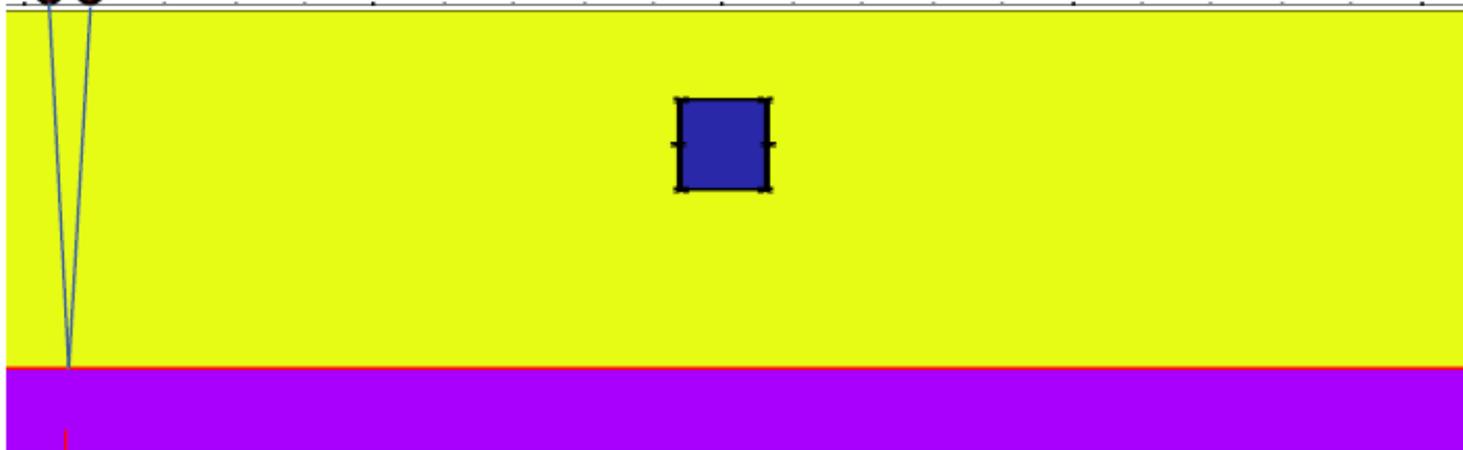
formazione dell'iperbole di diffrazione a causa della presenza di un oggetto isolato: essa si forma in quanto l'antenna trasmittente emette un fascio di radiazione molto ampio: a forma di cono a base ellittica.

(a) modello,

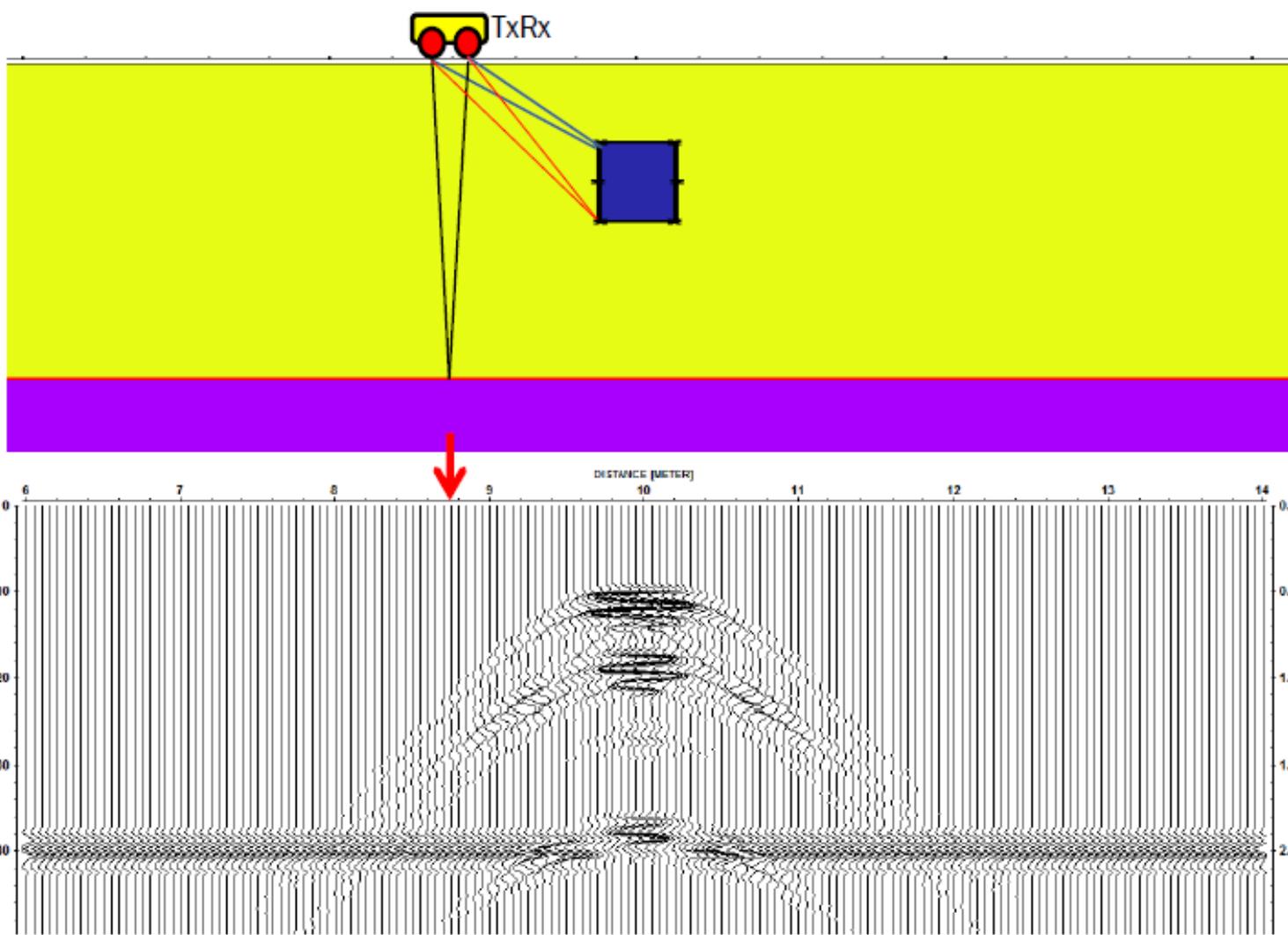
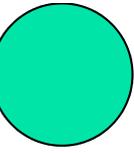
(b) radargramma sintetico.



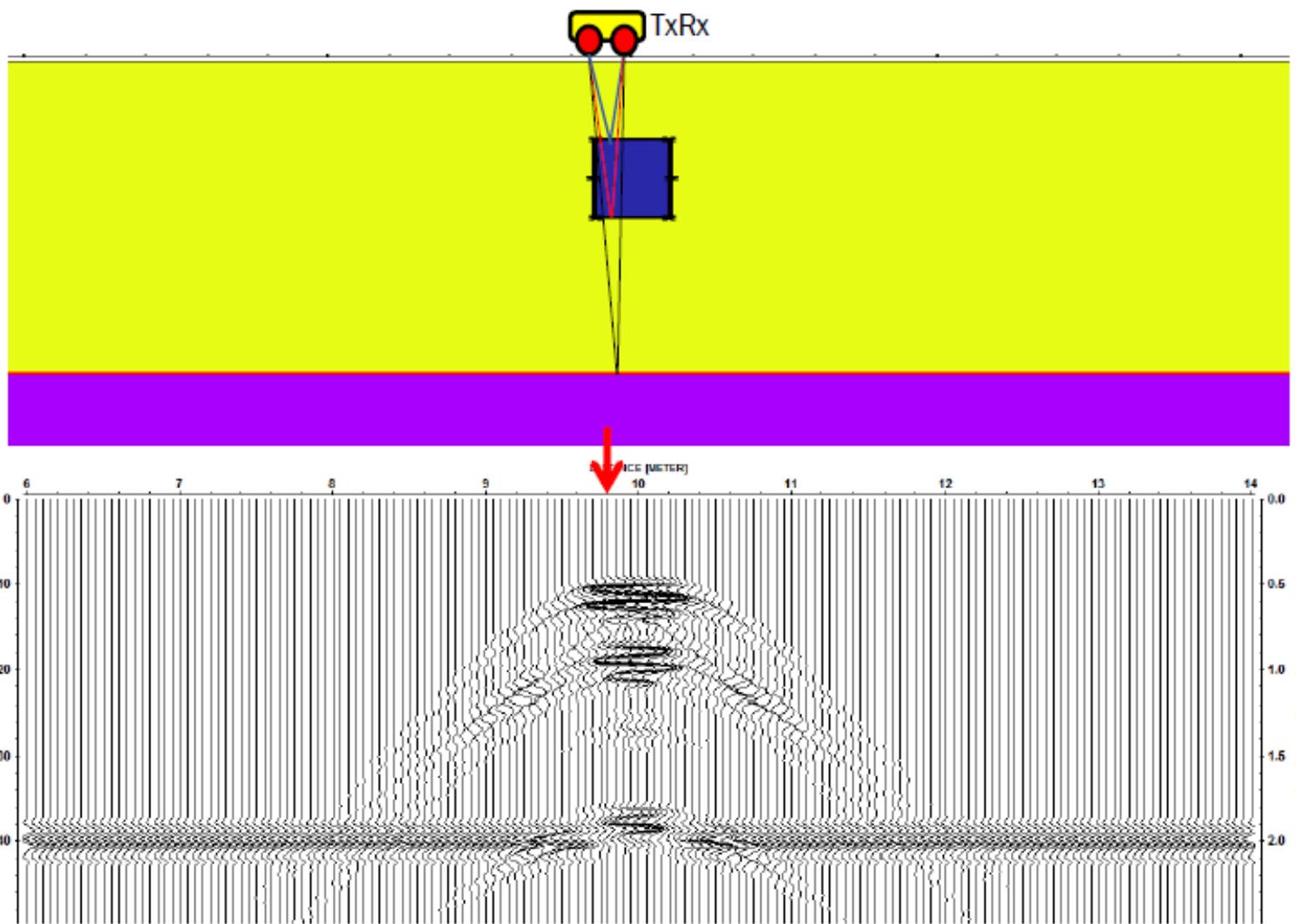
TxRx



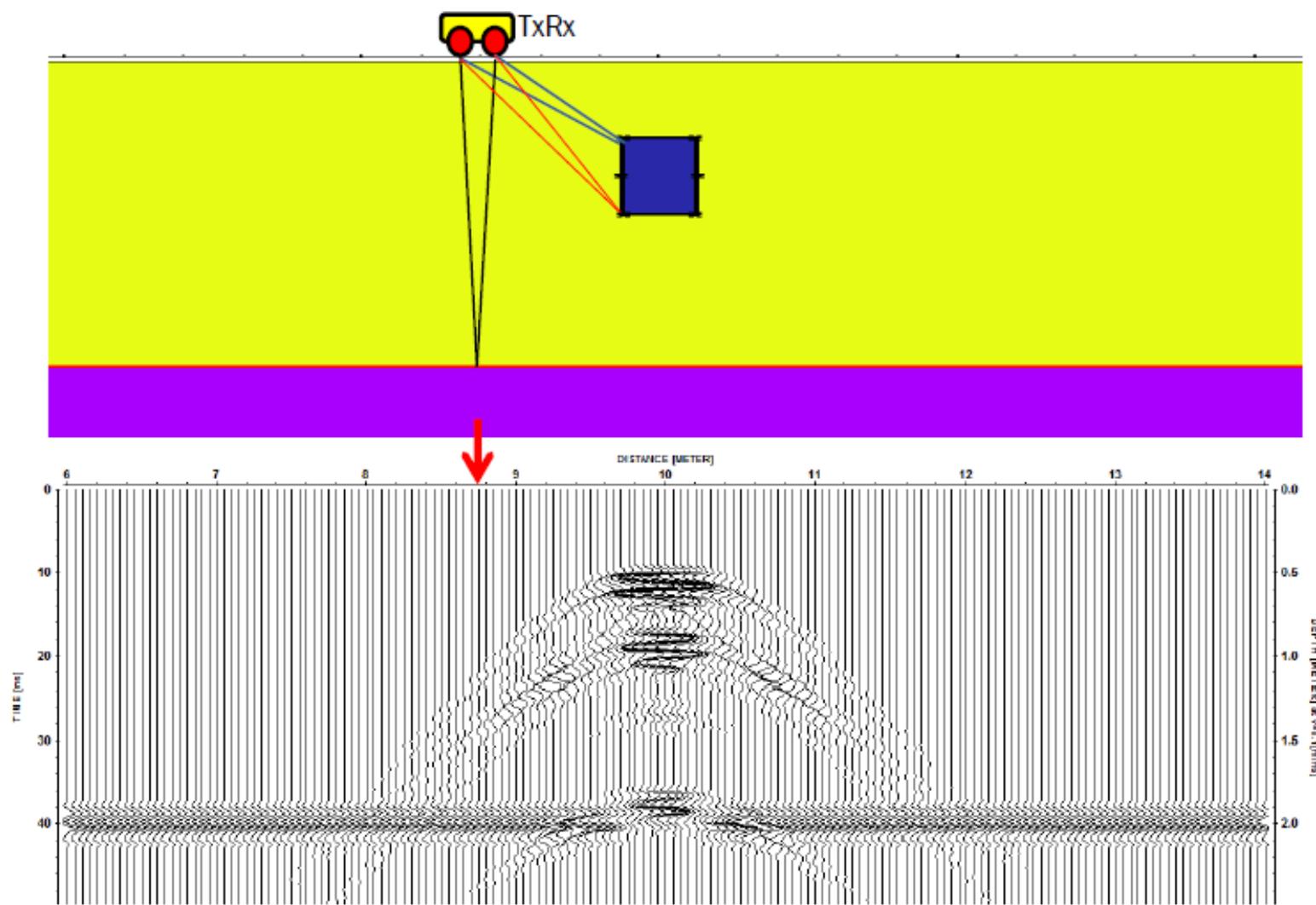
GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta



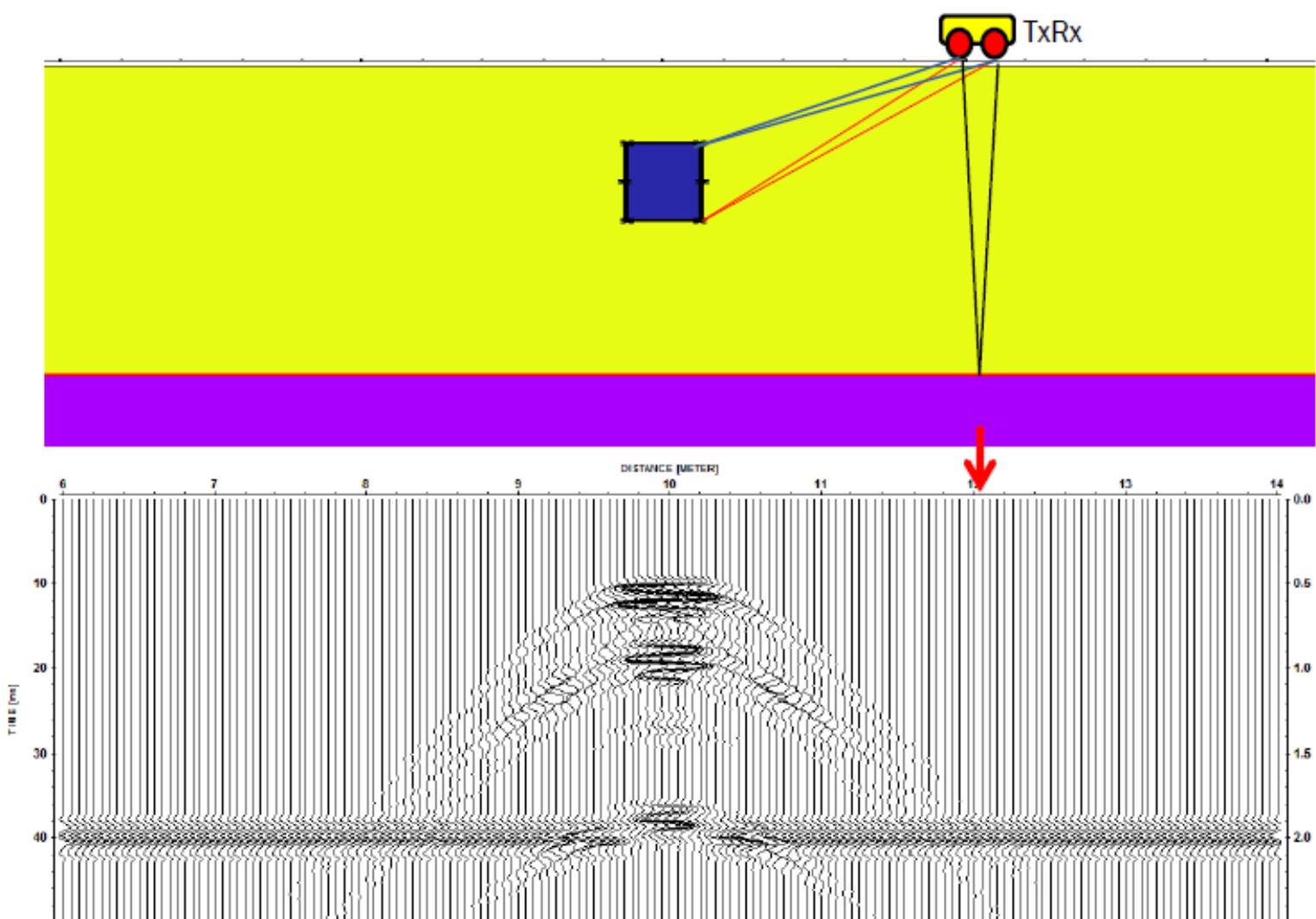
GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta



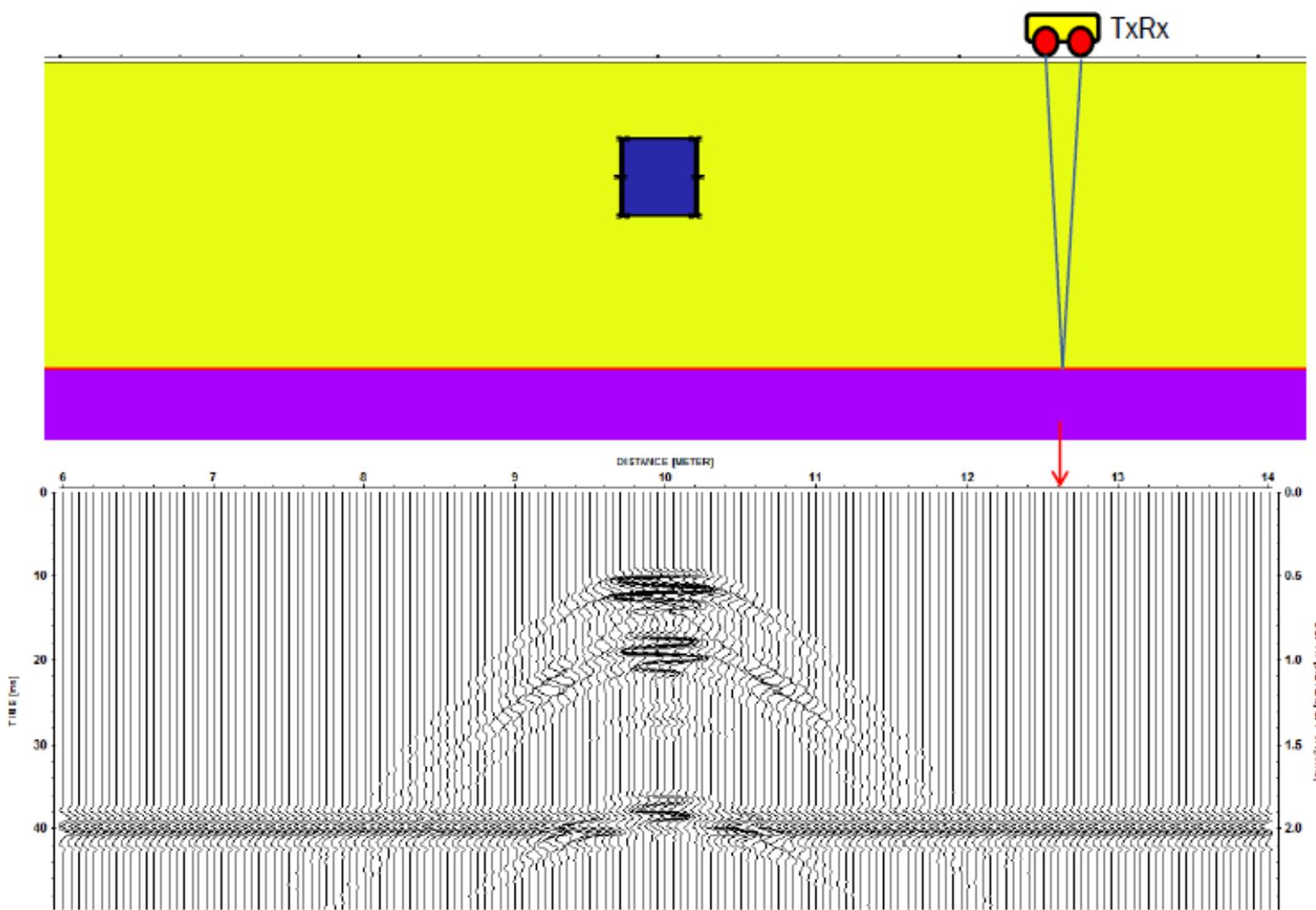
GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta



GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta



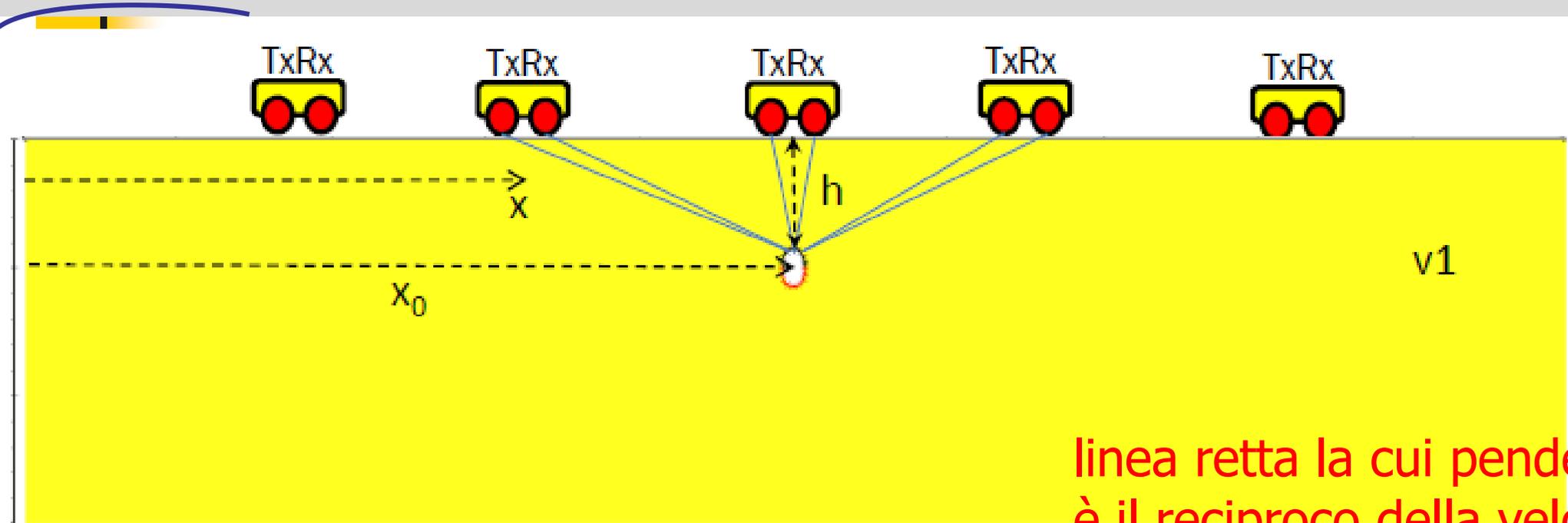
GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta



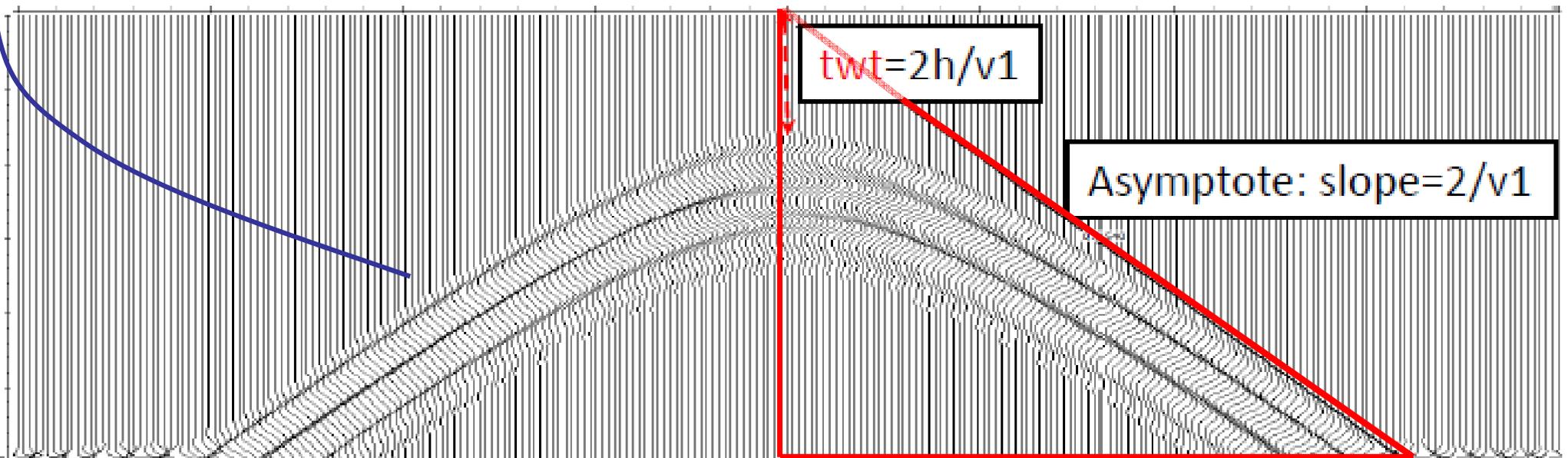
GPR: simulazione onde EM riflesse in presenza di corpo finito nel sottosuolo tipo condotta

GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo in presenza di corpo puntiforme si verificano le diffrazioni



linea retta la cui pendenza è il reciproco della velocità



GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo

$$twt \cong \frac{2\sqrt{(x-x_0)^2 + h^2}}{v_1}$$

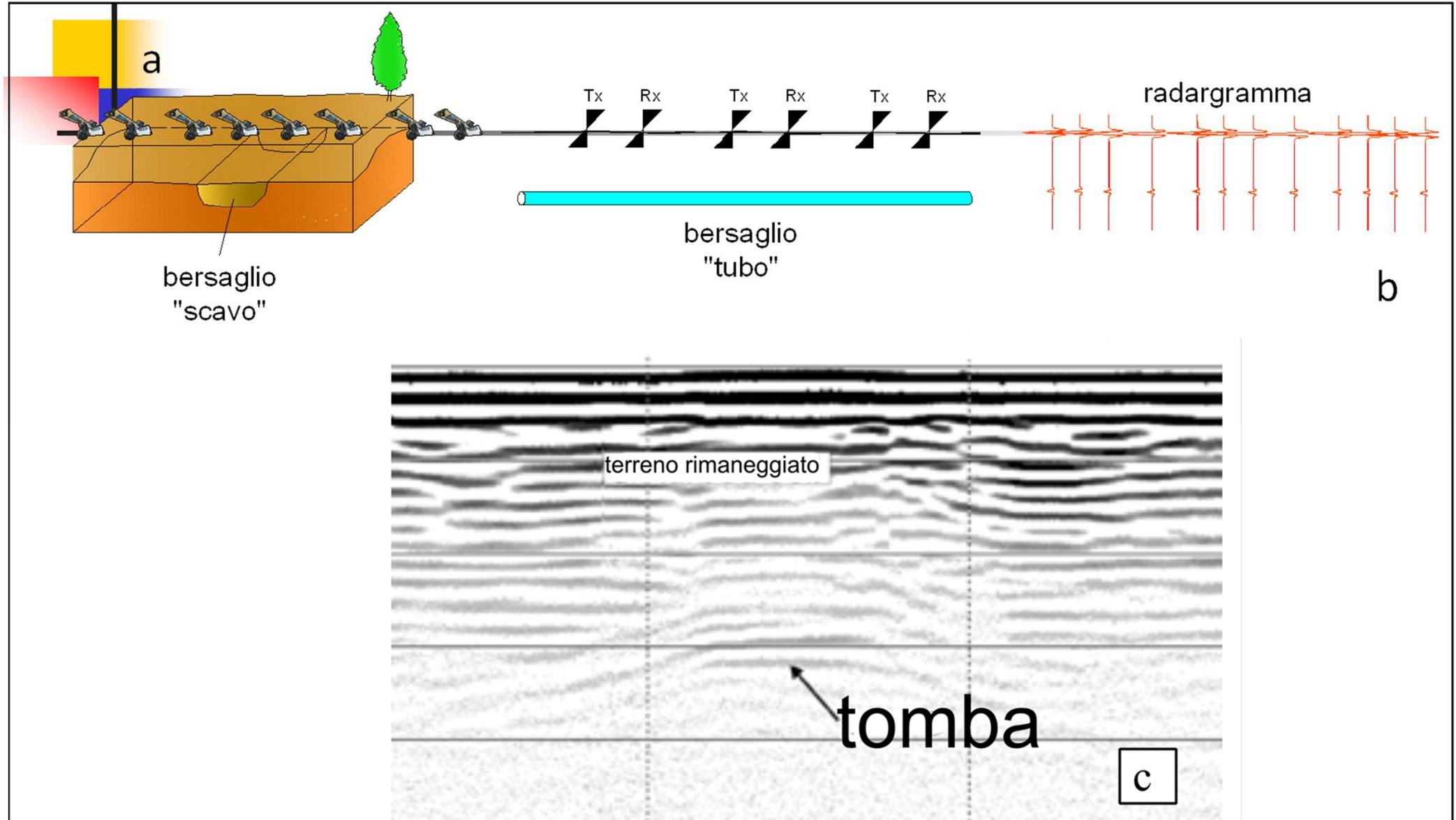
NB: la pendenza dell'equazione definisce l'asintoto dell'iperbole e permette di determinare la velocità di propagazione dell'onda EM nel mezzo: **all'apice dell'iperbole ($x-x_0=0$) avremo:**

$$twt=2h/v_1$$

Modellistica diretta e dinamica permette di effettuare questa operazione già subito dopo aver terminato la fase di acquisizione



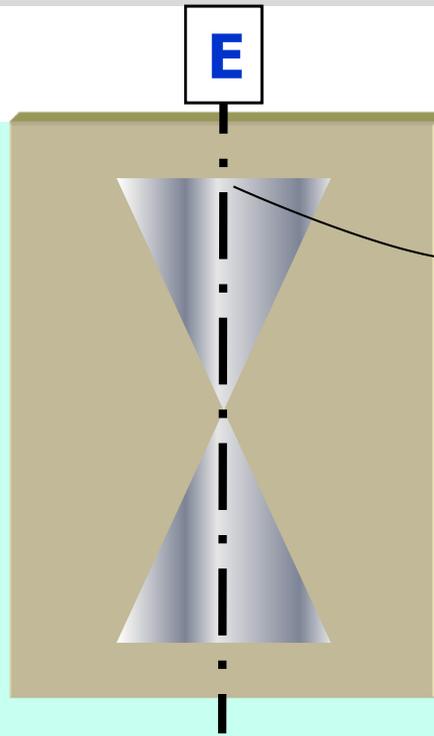
Principi di funzionamento: visibilità dei corpi in funzione dell'orientazione del campo elettrico del segnale EM trasmesso



a) modalità di acquisizione monostatica sul terreno; **b)** formazione del radargramma; **c)** radargramma processato per presentazione finale.

GPR: le antenne comunemente utilizzate nella prospezione sono ad impulsi. Tipi principali:

- **Bow-tie:**



- Fascia di irradiazione a 90° nella direzione di **E**,
- 60° nella direzione perpendicolare
- Sono schermate dalle interferenze provenienti dallo spazio circostante (GSM,.. ecc.).

- Si usano nella maggiore parte di applicazioni superficiali, ottima fase lineare, ma minore efficienza di irradiazione

GPR: le antenne comunamente utilizzate nella prospezione sono ad impulsi. Tipi principali:

▪ Horn:

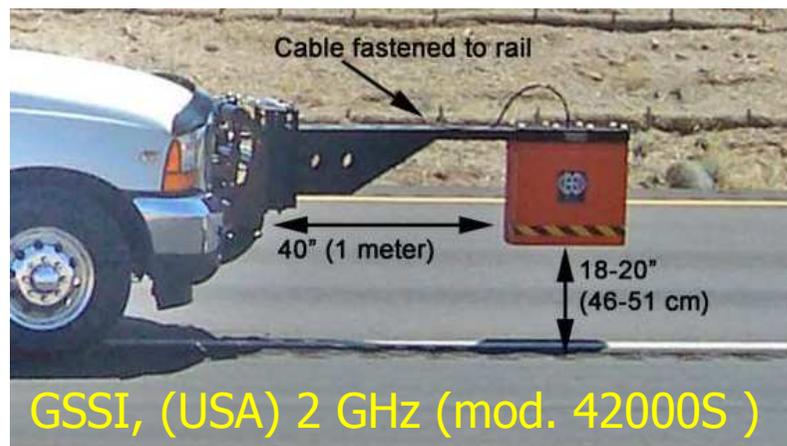
- Si usano per quelle applicazioni che richiedono velocità di acquisizione: non richiedono il contatto con il terreno

Geoscope, 3d-radar AS antenna (VX2125)

25 antenne, lunghezza: 2.1m



50cm

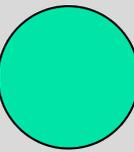


GSSI, (USA) 2 GHz (mod. 42000S)

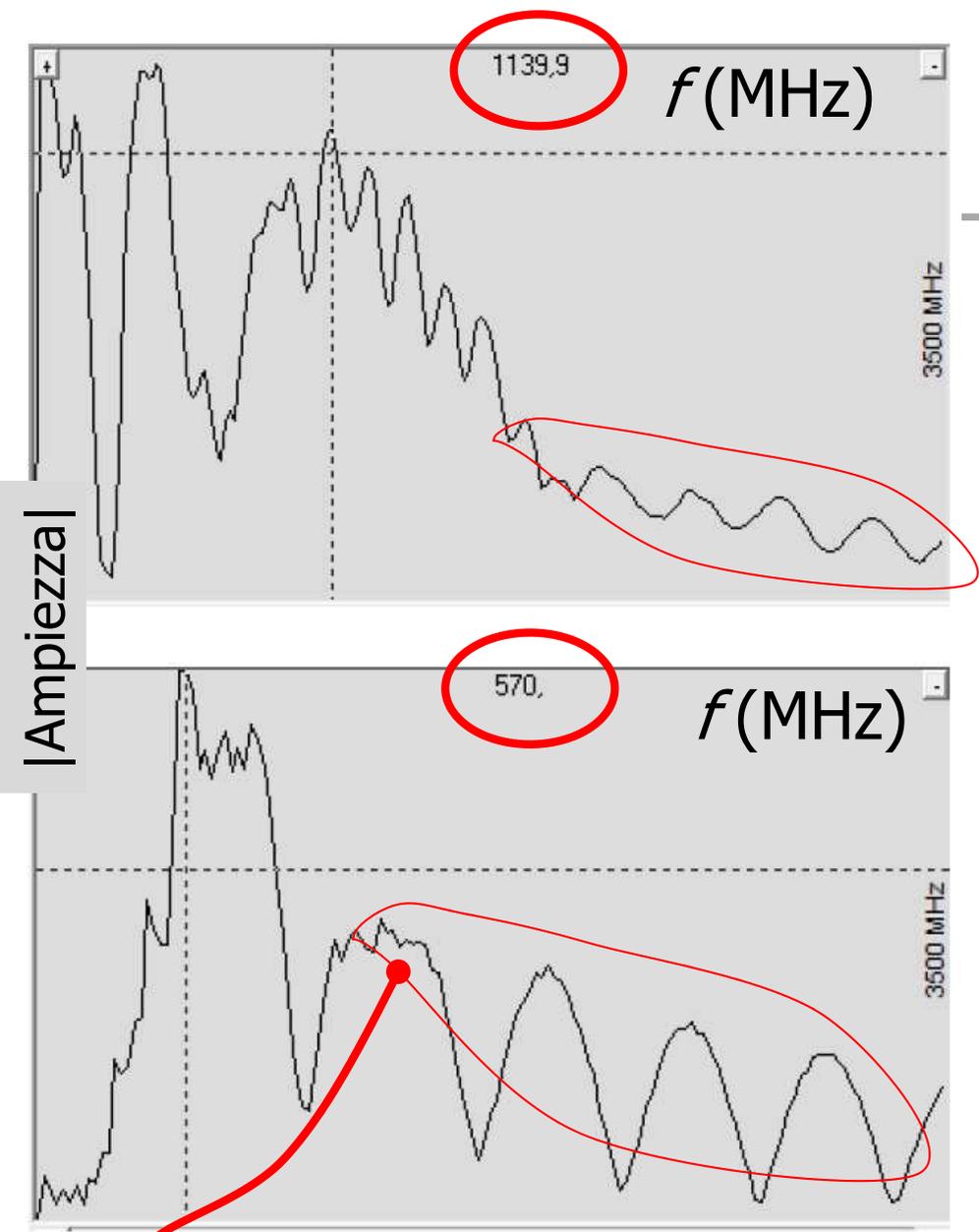


23x52x50cm

IDS 1 GHz
80km/h 10 A-SCANS per metro



GPR: antenna senza contatto con il terreno (HORN) confronto qualità segnale (spettro di potenza: energia vs frequenza)



- Spettro di potenza del segnale ricevuto da antenna da 1 GHz (IDS, Horn) = → in questo caso la qualità è superiore; effetto ringing è ridotto

- Spettro di potenza del segnale ricevuto da antenna da 1 GHz (GSSI, Horn)

Questo effetto è noto come **RINGING** e causa l'oscuramento dei segnali riflessi rendendo la sezione radar di fatto inutile

GPR: le antenne comunemente utilizzate nella prospezione sono ad impulsivi. Tipi principali:



- **Dipole / Folded Dipole:**

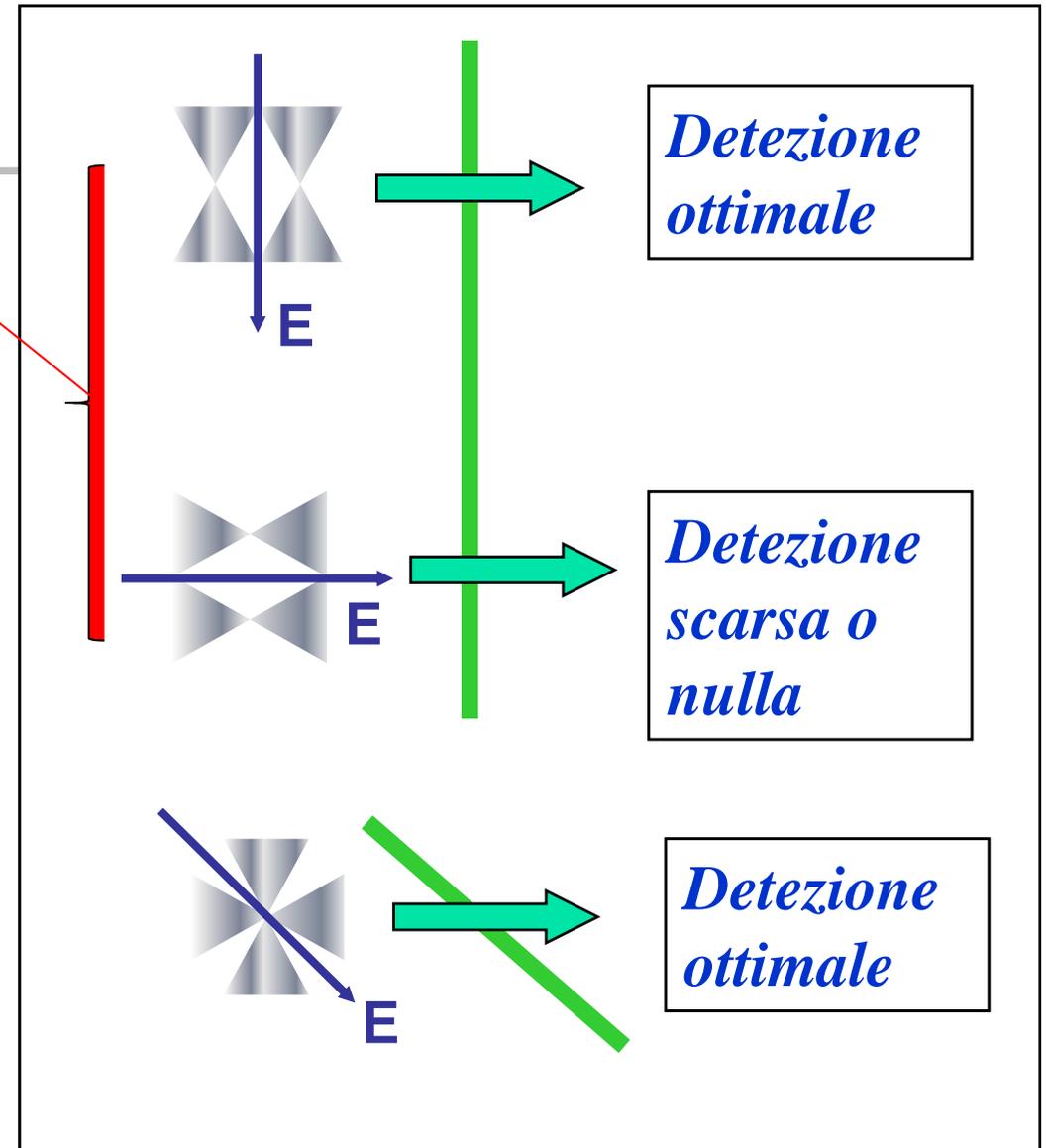
- Vengono utilizzate per applicazioni a bassa frequenza ed in foro di sondaggio

GPR: orientazione dipolo in funzione dell'orientamento del bersaglio

Campo Elettrico

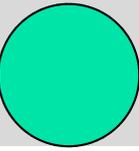
Polarizzazione:

- Le antenne sono caratterizzate da una polarizzazione, ovvero una direzione dei campi irradiati e ricevuti.
- I bersagli sono rilevati più chiaramente se il vettore campo elettrico **rimane parallelo** ad essi durante la scansione.
- Nella pratica più comune si usano antenne co-polari per intercettare meglio i bersagli allineati perpendicolarmente alla direzione di scansione.
- Con le antenne cross-polari sono rilevati in modo ottimale i bersagli orientati a 45° rispetto alla direzione di scansione.



GPR: direzione di acquisizione – uso di una singola antenna

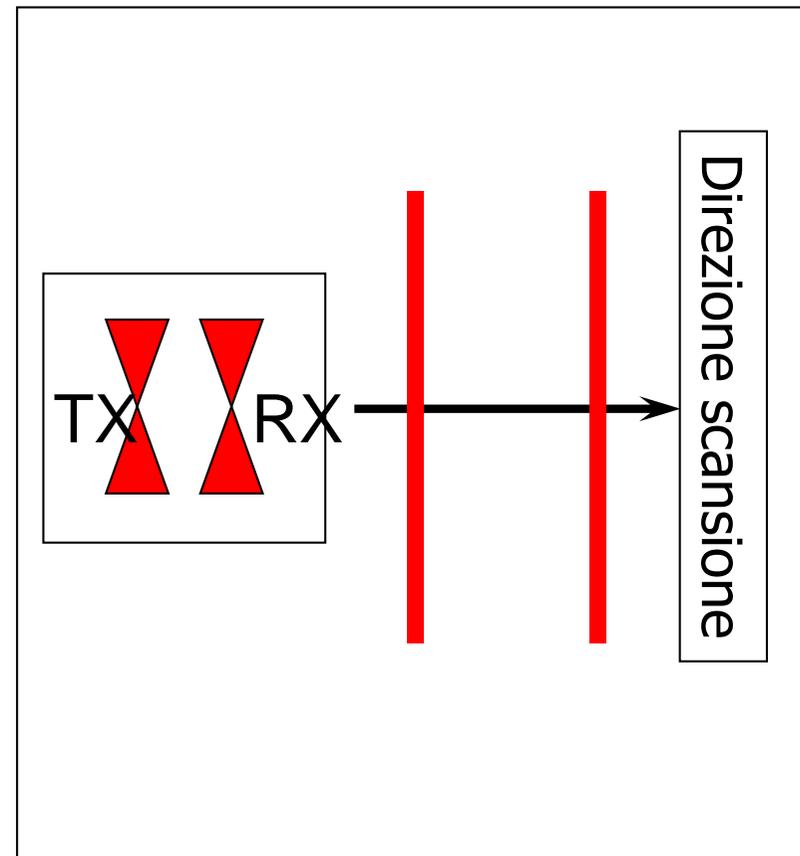
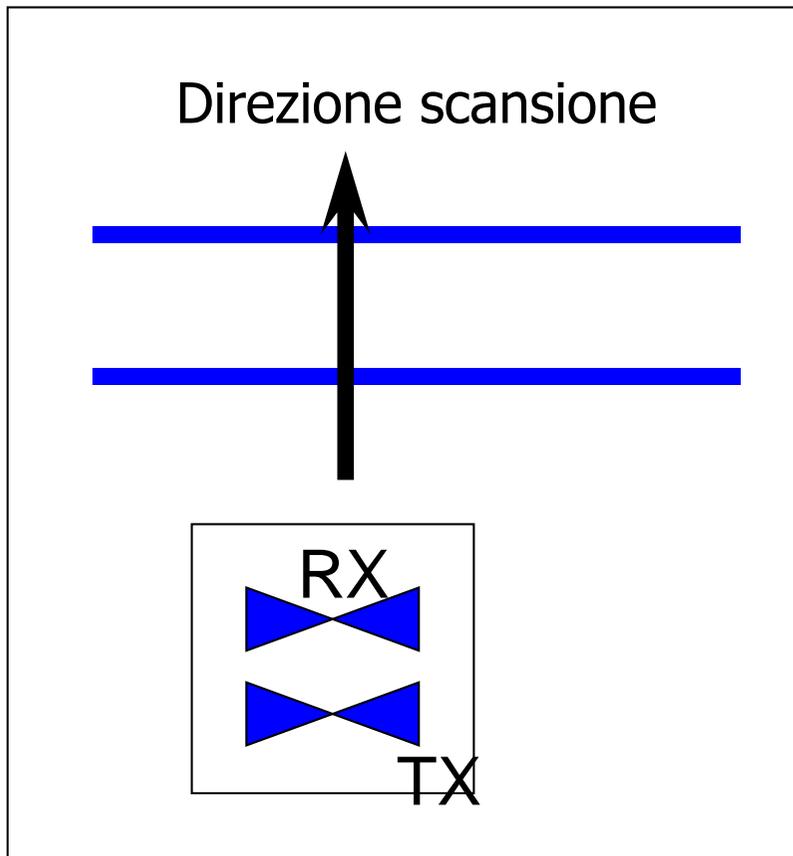
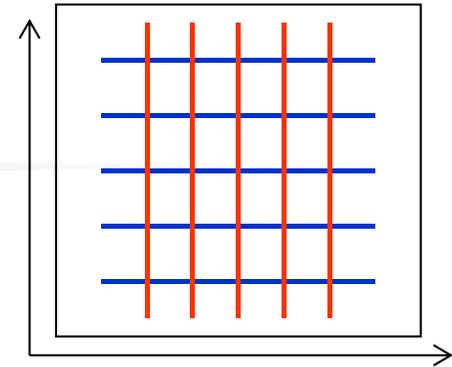
orientazione dipolo in funzione dell'orientamento del bersaglio

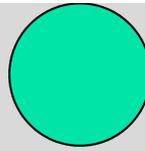


Esempio: verifica pavimentazione in cemento armato

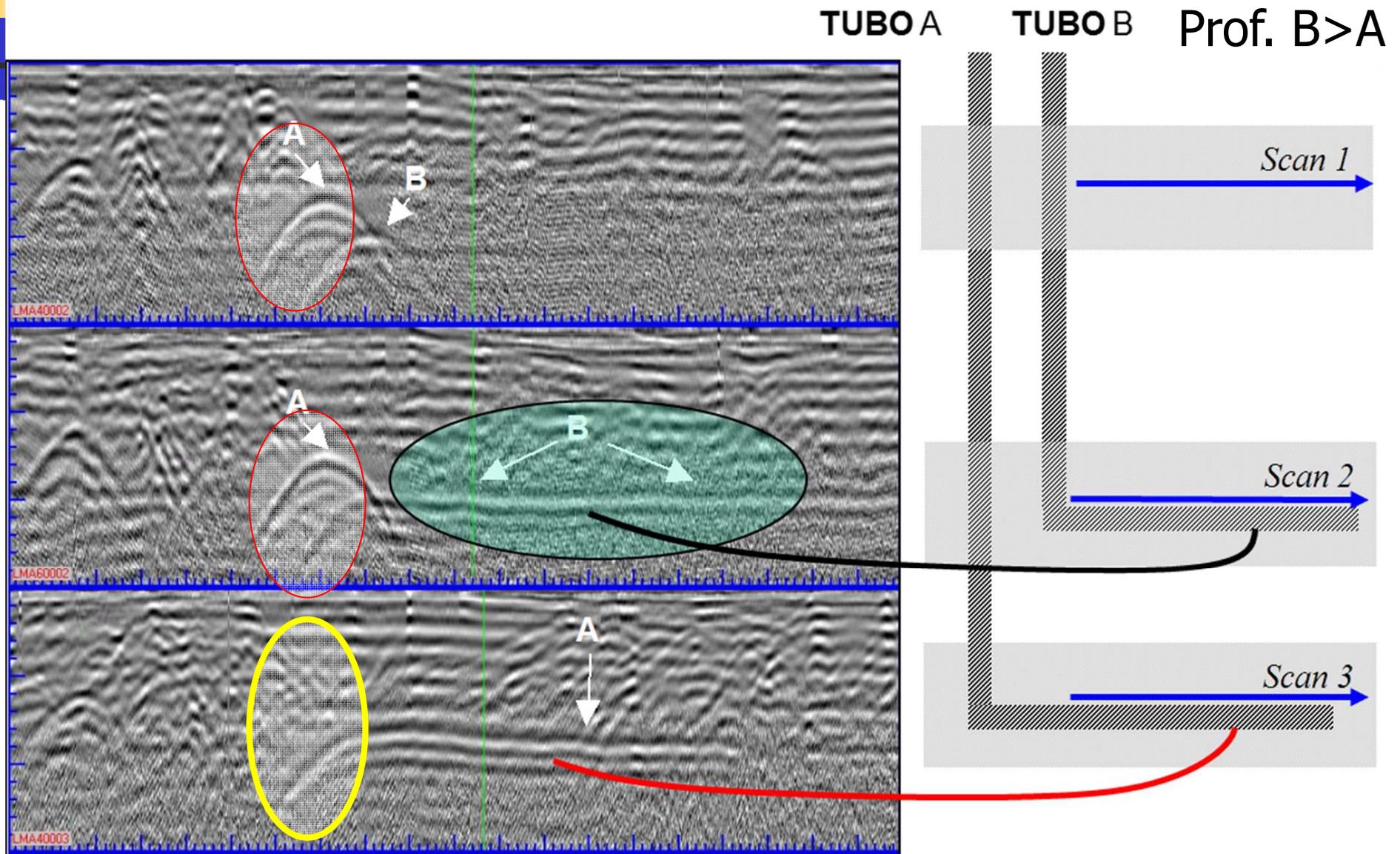
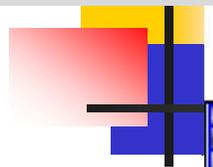
**Armatura è orientata perpendicolarmente
Alla direzione del profilo
campo elettrico invece è parallelo.**

**L'uso di una singola antenna richiede acquisizione dei
profili incrociati come lo vedremo più avanti**





Effetto della direzione per la mappatura sottoservizi con orientazione non ottimale rispetto all'illuminazione del sottosuolo

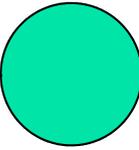


Andamento dei tubi rispetto alla **direzione di acquisizione dati GPR**

GPR: Concetto base di funzionamento – come si fa



Terreno privo di ostacoli



**direzione
profilo**

**antenna
monostatica**

Odometro (conta metri)

Frequenza fondamentale o centrale

500 MHz

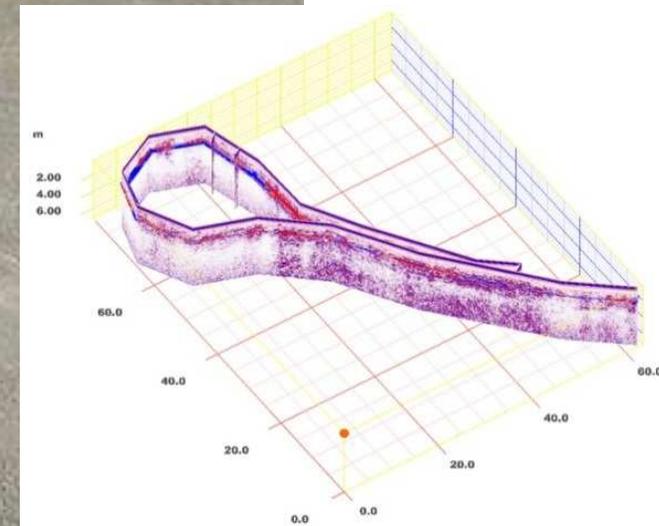
Tipo frequenza: **medio-alta** - risoluzione: buona (sottosuolo)

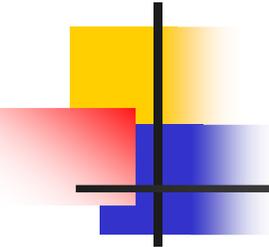
Applicazione:

Finalizzata a indagini sottoservizi, archeologia ed ambiente

GPR: Concetto base di funzionamento – quale antenna usare: antenna per rilievi estesi in 3D – **multiantenna monostatica**

TerraVision by GSSI



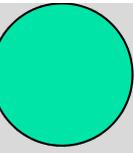


Risoluzione verticale ed orizzontale

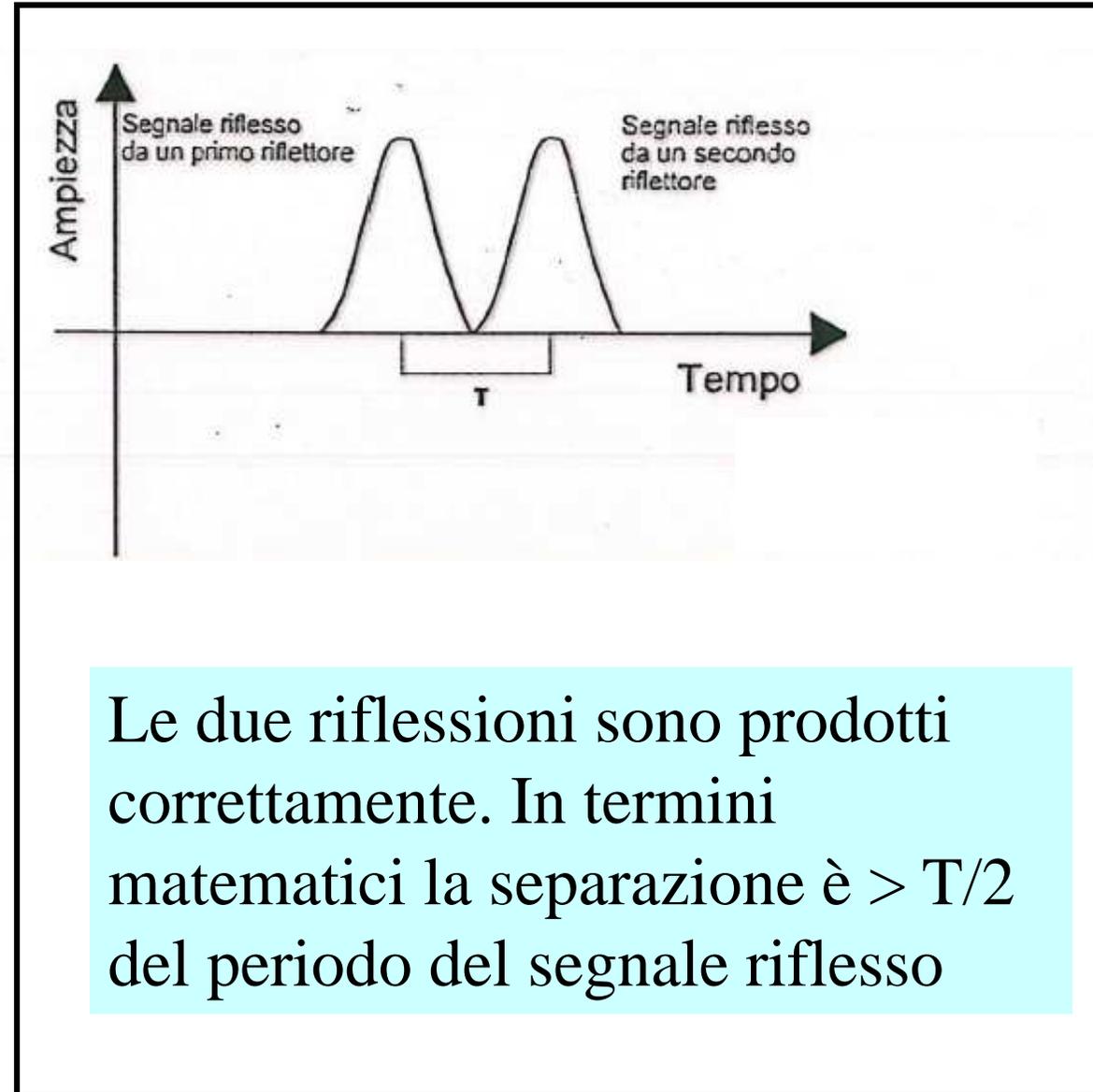
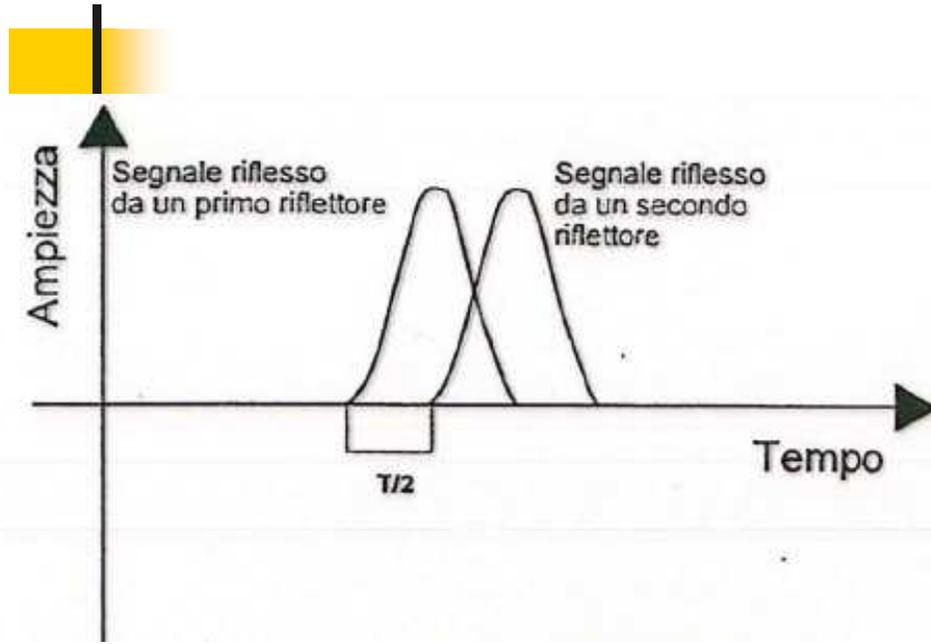
Si può definire la risoluzione verticale di una segnale EM, ma non solo, trasmesso dall'antenna TX come:

la distanza tra una riflessione e quella successiva lungo la stessa traccia. Si fa riferimento però alla regola di Nyquist o teoria di Shannon (**teorema del campionamento Nyquist-Shannon**), secondo la quale detta distanza, X :

- in condizioni ideali è pari $\lambda/4$,
- in condizioni reali è intorno a $\lambda/2$



GPR: risoluzione verticale è la distanza minima affinché due riflettori siano distinguibile sul radargramma

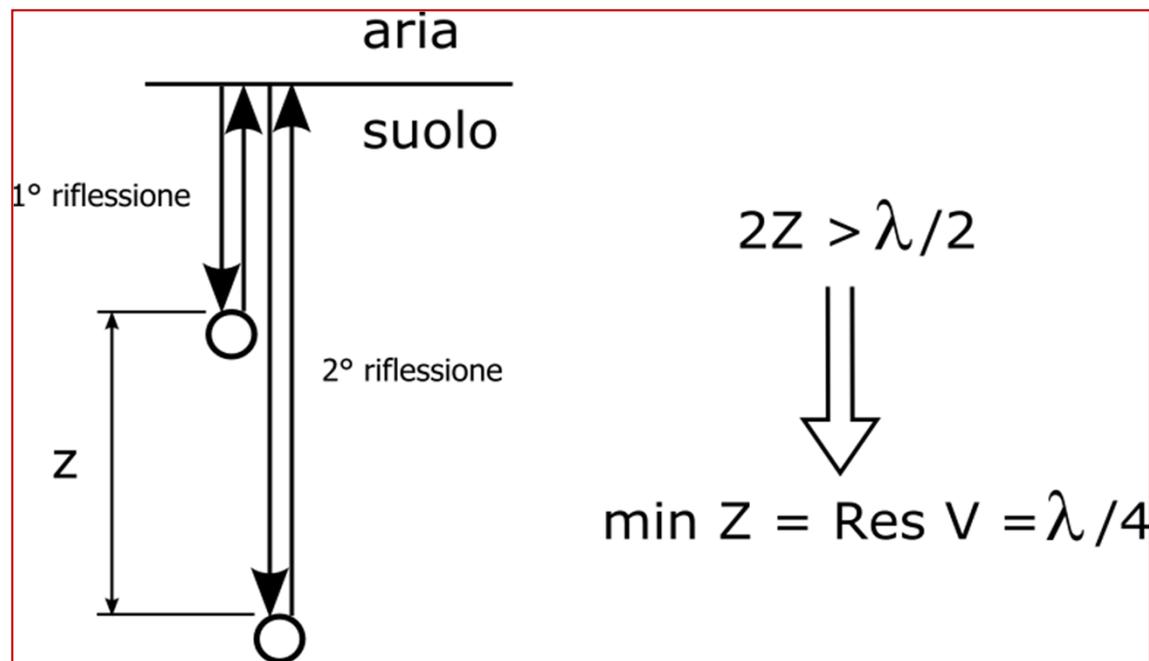


Le due riflessioni sono prodotti da due corpi collocati a profondità diverse. Le riflessioni sono troppo vicine. In termini matematici la separazione è $< T/2$ (semiperiodo del segnale riflesso).

Le due riflessioni sono prodotti correttamente. In termini matematici la separazione è $> T/2$ del periodo del segnale riflesso

GPR: risoluzione verticale

$$\begin{cases} \lambda = V/f = V \cdot T_0 \\ \Delta T > T_0/2 \\ \Delta T = 2z/V \end{cases} \Rightarrow \frac{2z}{V} = \frac{T_0}{2} = \frac{4z}{V} = T_0 \implies \lambda = V \cdot T_0 \implies \lambda = 4z$$
$$\implies \text{Risoluzione Verticale (z)} = \frac{\lambda}{4}$$

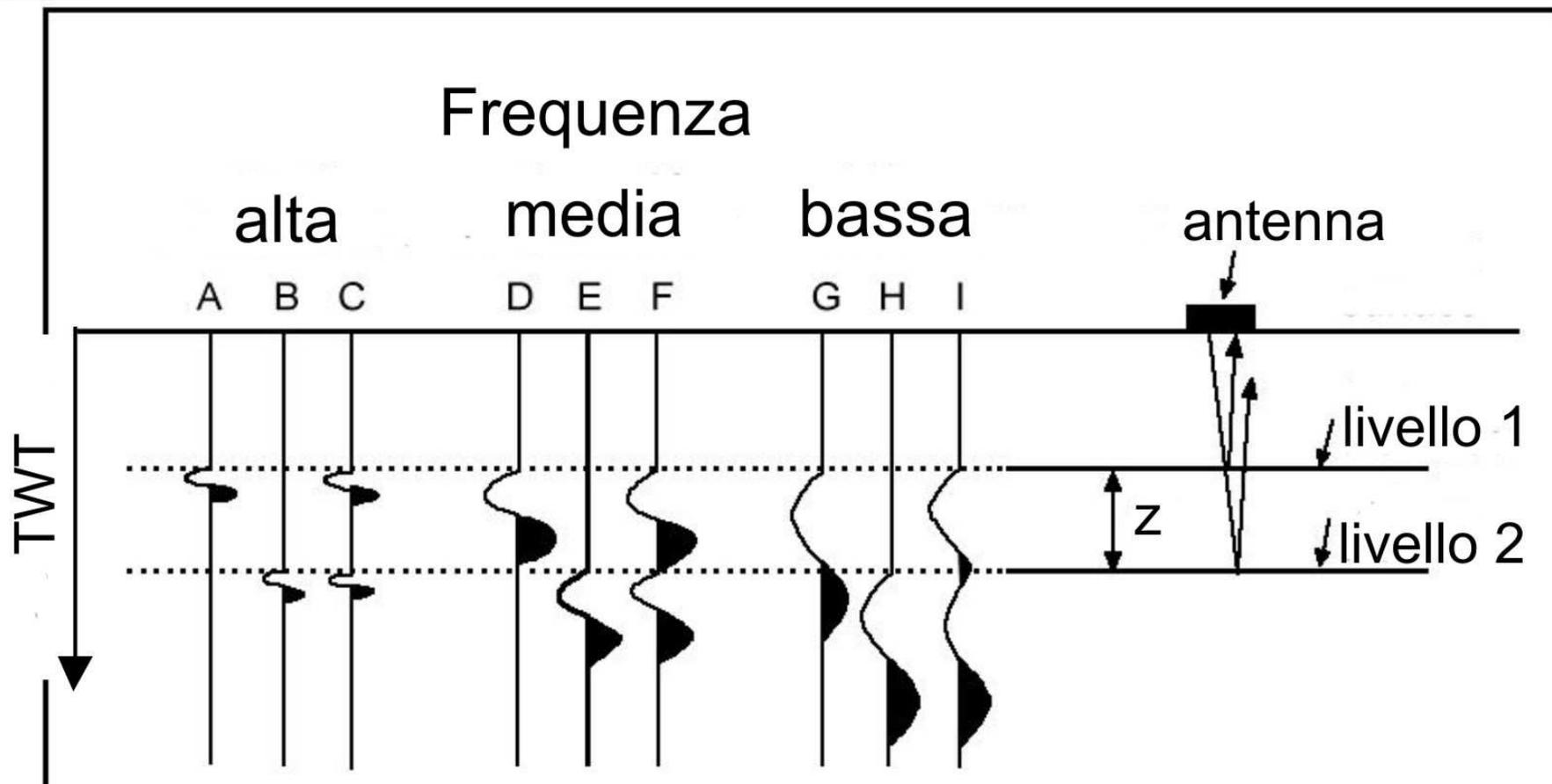


- V - velocità del mezzo considerato
- T_0 - periodo dell'onda
- λ - lunghezza d'onda
- ΔT - intervallo tra le due riflessioni
- Z - distanza tra i riflettori

distanza minima affinché due riflettori siano distinguibili

GPR: la scelta della frequenza di trasmissione deve **invece tener conto** dell'esigenza di avere il **massimo potere risolutivo**, **compatibilmente** con la **profondità d'indagine** da raggiungere. Come efficacemente illustrato nella figura sotto.

Il potere risolutivo lungo l'asse verticale dipende dalla frequenza



il potere risolutivo: è la capacità di distinguere le riflessioni da due orizzonti riflettenti in maniera distinta sul radargramma. Questa capacità è funzione della frequenza dell'onda trasmessa (TWT: "Two-Way-Time").

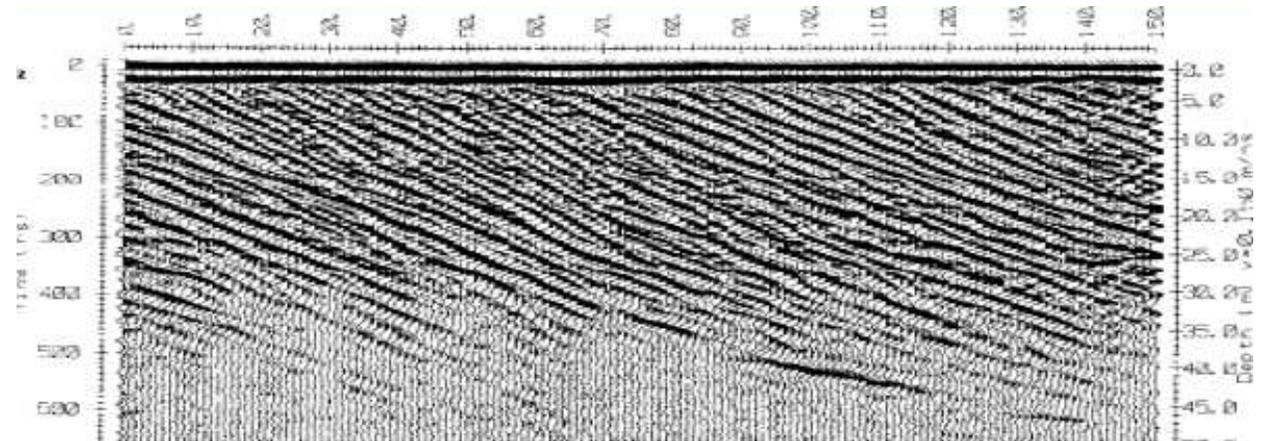
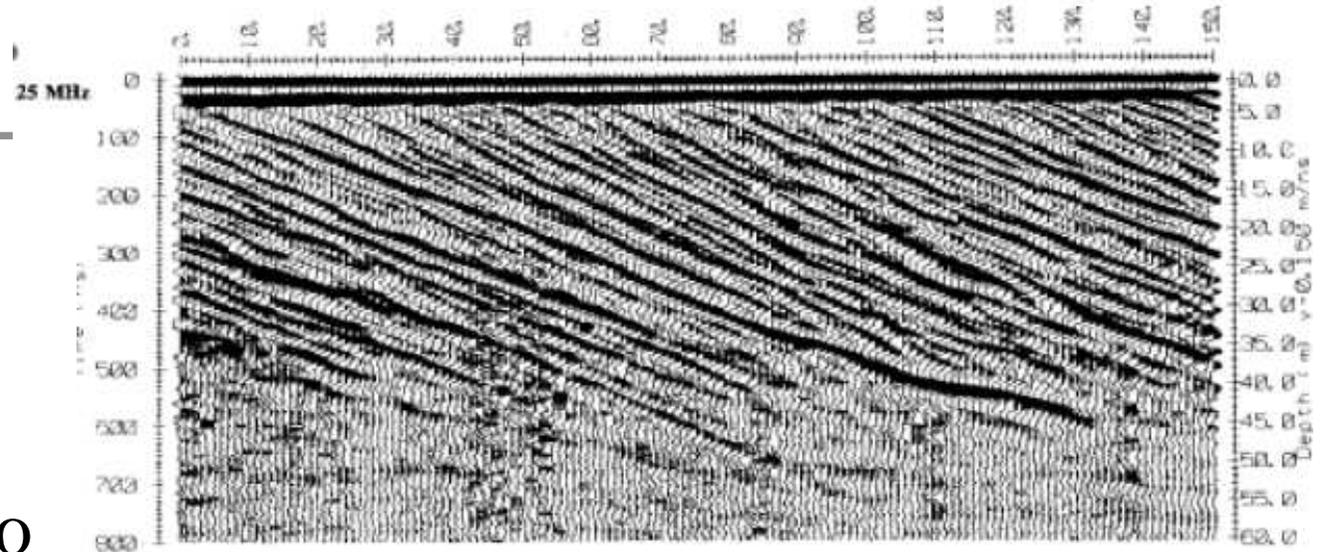
GPR: risoluzione – frequenza antenna e risoluzione



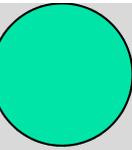
L'uso di antenna con frequenza di 50 MHz incrementa la risoluzione ovvero migliora il dettaglio delle riflessioni rispetto al radargramma acquisito con antenna da 25 MHz.

Questo fatto è da collegare alla risoluzione verticale ovvero $\lambda/4$

25 MHz



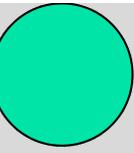
50 MHz



GPR: risoluzione – frequenza antenna e risoluzione verticale teorica applicando il concetto ($\lambda/4$)

f (MHz)	v (cm/ns)	Risoluzione (cm)
120	5	42
	7	58
	9	75
	10	83
	15	125
500	5	10
	7	14
	9	18
	10	20
	15	30

nella diapositiva successiva si presenta il **foglio di calcolo excel** che svolge questo tipo di calcolo.

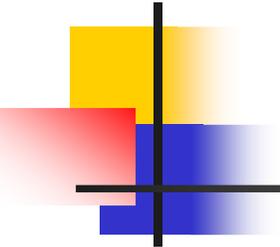
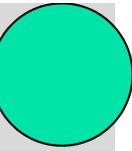


GPR: risoluzione – frequenza antenna e risoluzione

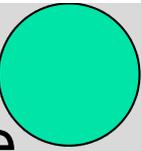
Foglio excel scaricabile dalla pagine docente.

utility/software/GPR_risoluzione_x_studenti_ok_.xlsx

Corso di Geofisica Applicata					
AA2018-2019					
Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Unife					
$l=V/4$	risoluzione verticale				
frequenza (MHz)	f_c (Hz)	Vel.EM (cm/nS)	Vel.E.M (cm/s)	Lamda (cm)	Lamda/4 (cm)
100	1E+08	5	5.00E+09	50	13
121	1.21E+08	7	7.00E+09	58	14
122	1.22E+08	9	9.00E+09	74	18
123	1.23E+08	10	1.00E+10	81	20
125	1.25E+08	15	1.50E+10	120	30
250	2.5E+08	10	1.00E+10	40	10
300	3E+08	10	1.00E+10	33	8
400	4E+08	10	1.00E+10	25	6
750	7.5E+08	10	1.00E+10	13	3
900	9E+08	10	1.00E+10	11	3
1500	1.5E+09	10	1.00E+10	7	2
2000	2E+09	10	1.00E+10	5	1



Si fa riferimento però alla regola di Nyquist o teoria di Shannon (**teorema del campionamento Nyquist-Shannon**)

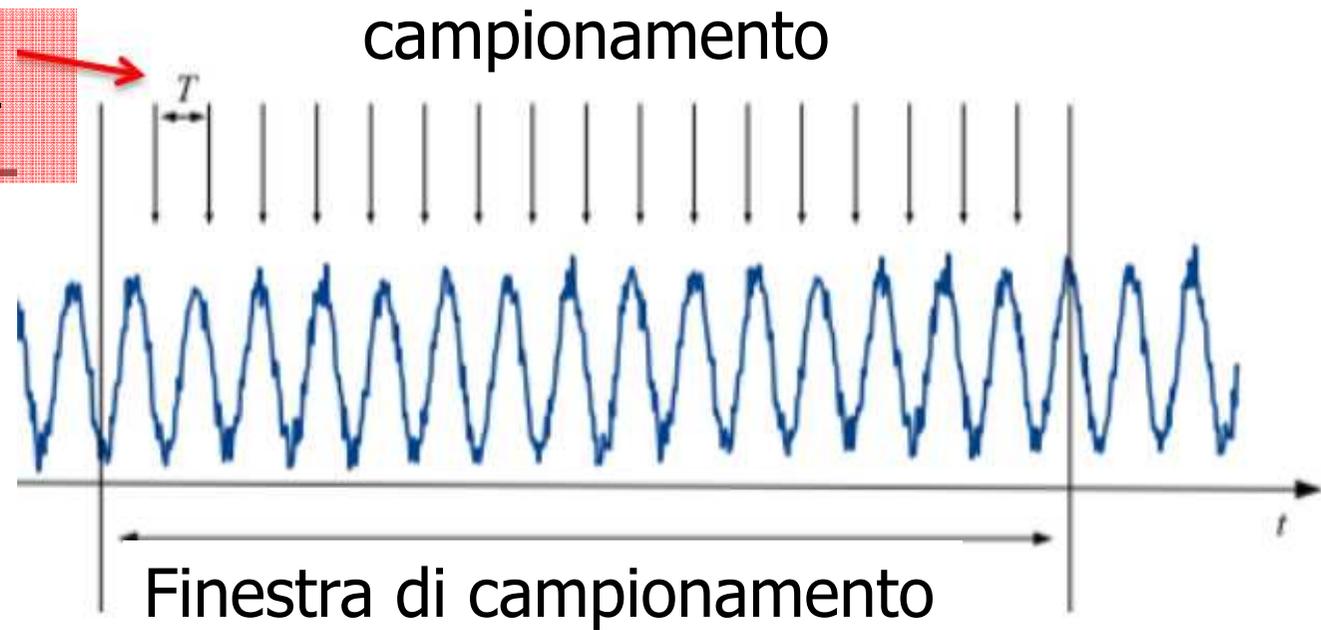


GPR: teoria di campionamento di Nyquist-Shannon

Frequenza di campionamento (segale analogico) ed aliasing temporale

frequenza di Nyquist (f_N)

$$f_c = \frac{1}{T}$$



$$f_N = \frac{f_c}{2}$$

p.es.
 $f_c = 500$ Hz
 $f_N = 250$ Hz

Finestra di campionamento

- Il processo di campionamento avviene, normalmente, per un periodo di tempo finito (frequenza di campionamento, f_c) dove il segnale viene campionato e digitalizzato a intervalli temporali regolari (periodo di campionamento) ben definiti dalla frequenza di campionamento,
- Una corretta conversione analogico-digitale richiede che la minima frequenza di campionamento necessaria, per evitare perdita di informazione nella ricostruzione del segnale analogico ordinario (ovvero nella riconversione digitale-analogica), deve essere pari al doppio delle sua **frequenza massima** nota come **frequenza di Nyquist (f_N)**

GPR: teoria di campionamento di Nyquist-Shannon

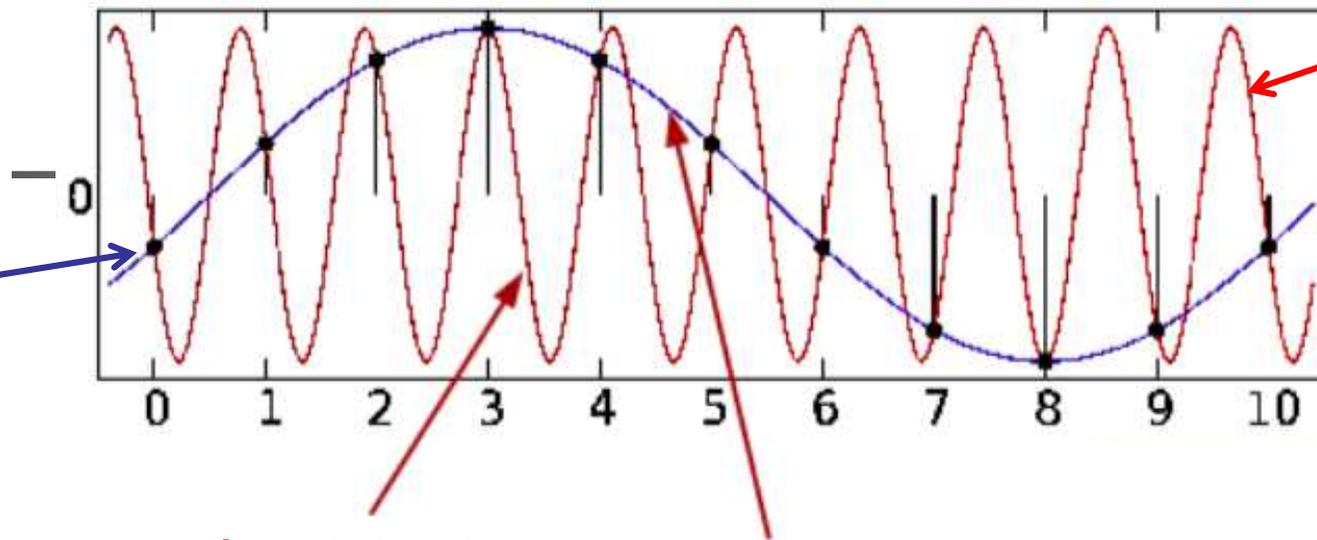
Aliasing temporale

p.es.

$f_c = 1$ Hz
 $f_N = 0.5$ Hz

$T_c = 2$ sec
 $T_N = 1$ sec
passo di campionamento errato

(Aliasing)



segnale originario

segnale con aliasing temporale

p.es.

$f_c = 1$ Hz
 $f_N = 0.5$ Hz

$T_c = 1$ sec
 $T_N = 2$ sec
campiono. corretto

$$f < f_N = \frac{f_c}{2} \quad T > T_N = 2T_c \quad \text{quindi} \quad T_c < \frac{T}{2}$$

Osservando il grafico si può giudicare qualitativamente che il segnale blue (soffre del fenomeno dell'aliasing) perché non riproduce il segnale originario. In questo caso **l'aliasing detto TEMPORALE** è dovuto all'errato passo di campionamento fatto con un **periodo** $> T/2$ del segnale originario ovvero la sinusoide è stata campionata ad intervalli di tempo superiori al semiperiodo della sinusoide stessa.

GPR: Aliasing – teoria di campionamento di Nyquist-Shannon

frequenza segnali affetti dal problema dell'aliasing temporale (f_a)

(f_a): È data dalla differenza tra la frequenza di campionamento del segnale originario, f_c ed il multiplo della frequenza di **Nyquist**, f_N , immediatamente maggiore:

p.es.

Un segnale campionato a frequenza $f_c=100$ kHz,
 $f_{scam.} = 50$ kHz; questa frequenza è \leq quella di Nyquist ($f_N= 50$ kHz) \Rightarrow il segnale è corretto. **È la massima frequenza utile.**

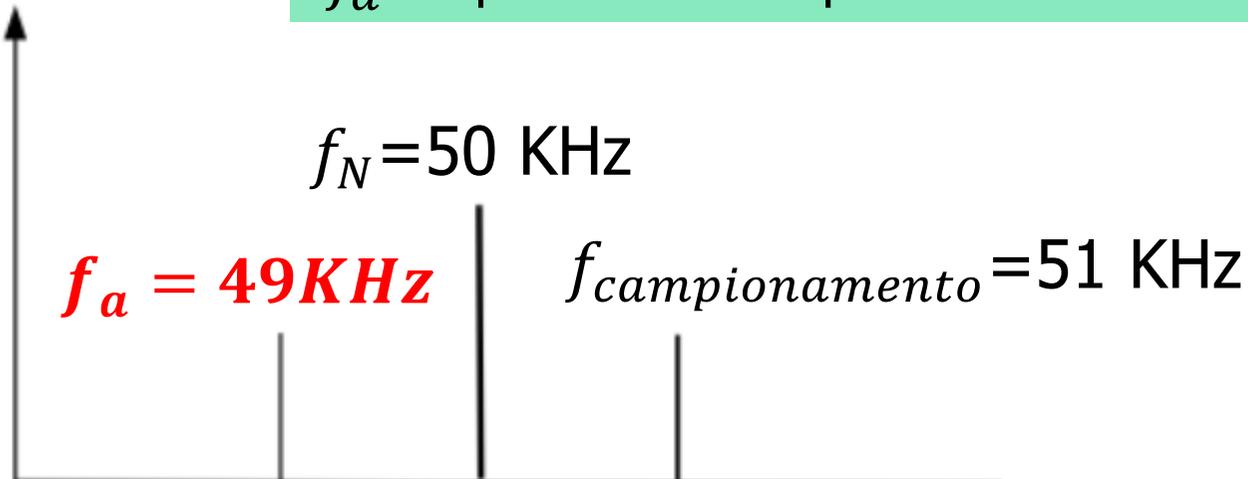
Se $f_{campionamento} = 51$ kHz, campionamento errato, produce un alias con frequenza (f_a) **apri a 49 KHz. Questo succede in assenza di filtri specifici noti come anti-aliasing**

esempio

$$f_a = |f_c - N \times f_N|$$

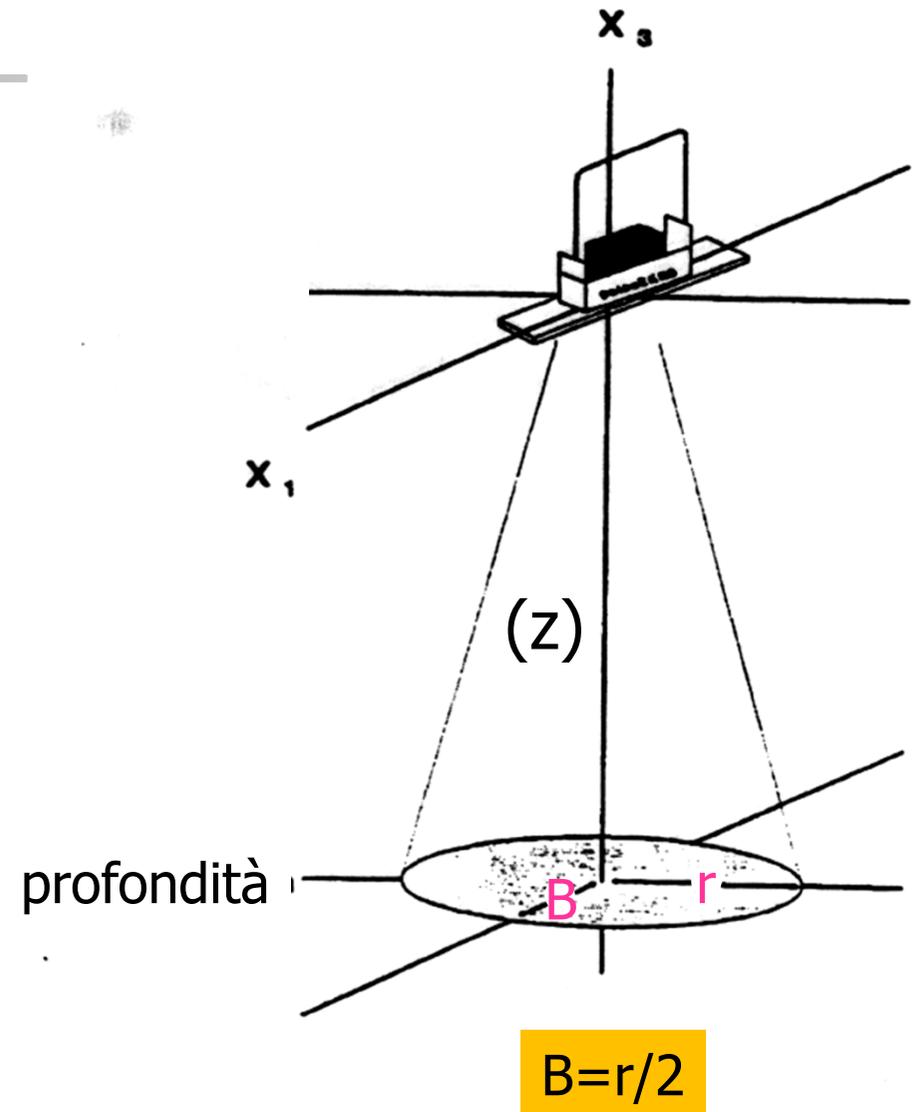
$$f_a = |51 - 2 \times 50| = 51 - 100 = 49 \text{ KHz}$$

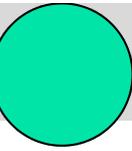
$$f_N = \frac{f_c}{2}$$



GPR: illuminazione del sottosuolo 'Foot Print'

- Radiazione onde EM non ha forma circolare,
- Le dimensioni dell'area illuminata è nota in fisica con il termine: la prima zona di Fresnel (si pronuncia Frenel)
- Come è spiegato nella diapositiva successiva il raggio di questa zone è direttamente proporzionale alla profondità **MA Non SOLO**
- Quindi dipende anche dalle proprietà dei mezzi attraversati e la frequenza fondamentale dell'antenna,



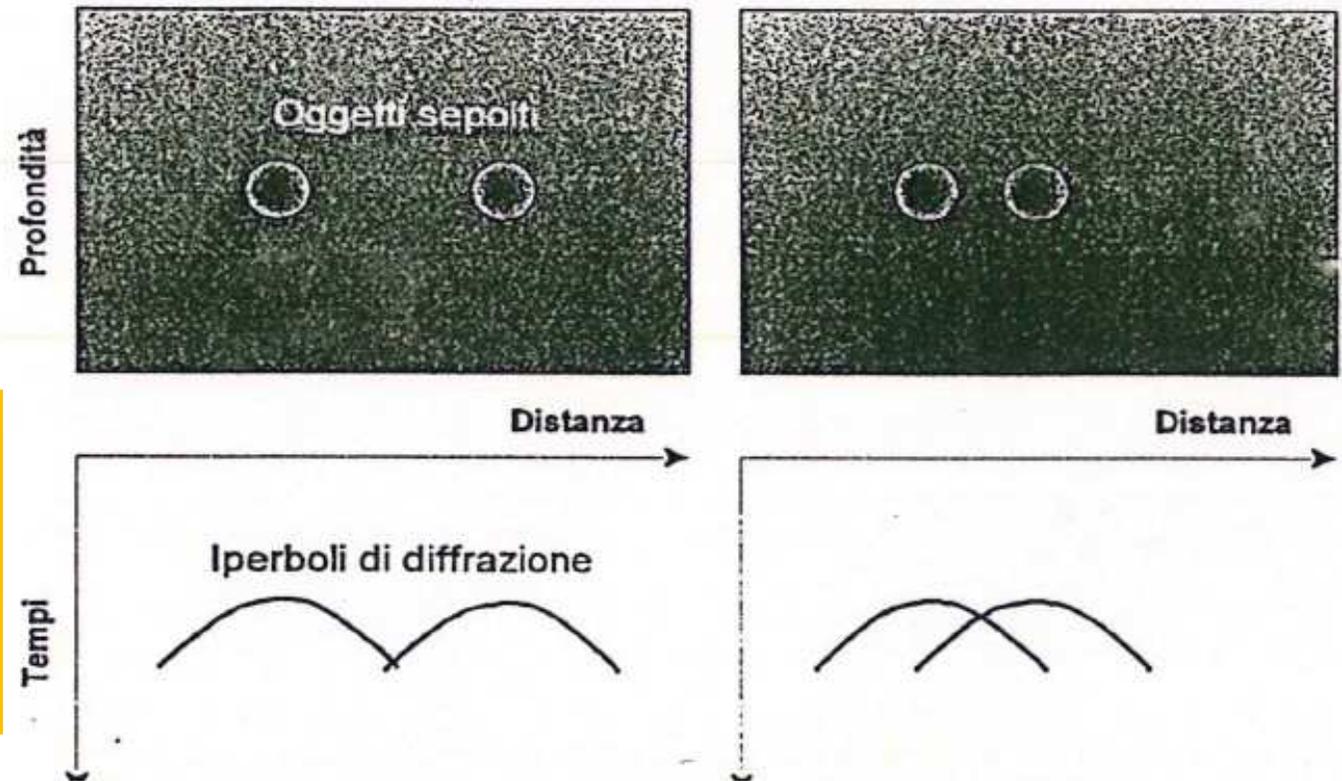
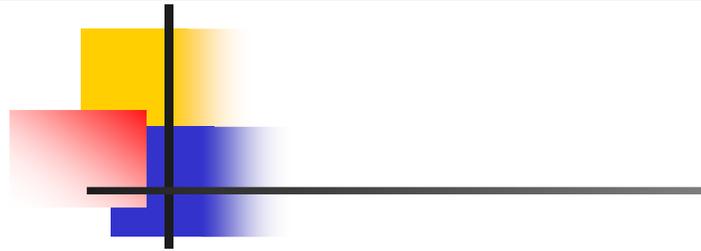


Definizione:

R.L. è la **distanza laterale minima** tra due punti riflettenti per cui i punti stessi possano essere **riconosciuti individualmente**.

La risoluzione laterale è **determinata** dal raggio della “prima zona di Fresnel”

GPR: illuminazione del sottosuolo 'Foot Print' – definizione schematica



La R.L. è funzione di:

- Profondità
- Velocità
- frequenza

Modello illustrativo che descrive il concetto della R.L.

A sinistra:

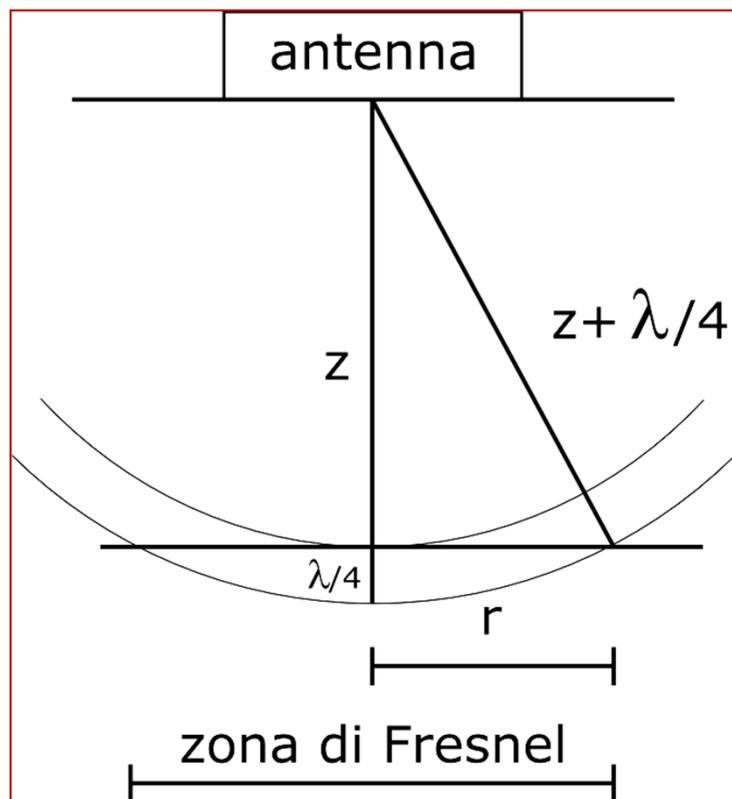
I due oggetti sepolti producono due iperboli distinte solo se la distanza tra di loro è $>$ ad una distanza soglia detta (I zona di Frenel),

A destra:

I due oggetti sepolti alla stessa profondità producono due iperboli vicine che possono non essere rilevati come due firme distinte.

GPR: risoluzione orizzontale

è definita mediante il calcolo del raggio della “**Prima zona di Fresnel**”, ovvero la zona all’interno della quale due riflettori adiacenti risultano indistinguibili. Il raggio è anch’esso funzione della frequenza e contiene l’espressione della risoluzione verticale:



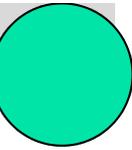
$$r = \sqrt{(z + \lambda/4)^2 - z^2} = \sqrt{\frac{\lambda z}{2}} = \sqrt{\frac{zV}{2f}}$$

$$z \geq \frac{\lambda}{4}$$

$$r \geq \sqrt{\frac{Z \cdot V}{2 \cdot f}}$$

$$r \geq \sqrt{\frac{Z \cdot \lambda}{2}}$$

r: distanza orizzontale minima affinché due oggetti siano distinguibili



Esempio di calcolo del raggio della prima zona di Fresnel

Profondità superficie riflettente = 2000m
 Velocità di propagazione onda EM = 13500 m/s
 $f_c = 50$ MHz (in MHz nella formula)
 TWT = 0.296296 sec
 Lunghezza d'onda = 270 m
 I zona di Fresnel (raggio) eq. 1 = 524 m
 Formula approx. (raggio) eq. 2 = 520 m

$$r = \sqrt{\left(z + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - z^2} \cong \sqrt{\frac{\lambda z}{2}} \cong \sqrt{\frac{zV}{2f}}$$

eq.1

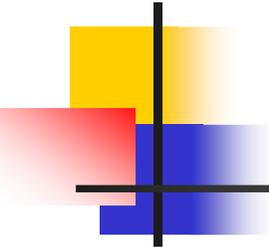
$$r \geq \sqrt{\frac{Z \cdot V}{2 \cdot f}}, f \text{ (MHz)}, Z \text{ (m)}, V \text{ (m/s)}$$

$$r_{approx.} \cong \sqrt{\frac{z\lambda}{2}}, \text{ (in m) (eq.2)}$$

NB:
 Le due formule (eq. 1 e eq. 2)
 danno risultati pressoché simili

GPR: parametri di acquisizione: terminologia

- Tipo antenna: monostatica – modello GSSI (USA)
- Frequenza antenna Tx: 500 MHz
- Modalità acquisizione dati: continua
- Tempo massimo acquisizione tracce singole (SCAN): 100 ns
- Campionamento temporale: sps (512)
- Funzione di amplificazione: 5 poli
- Frequenza ripetizione segnale: 64 KHz
- Filtro HP (verticale): 62.5 MHz, Filtro LP (verticale) 1000 MHz
- Numero SANS per secondo: 32 (determina la risoluzione laterale) è importante per non cadere nel problema dell'aliasing spaziale
- Filtro orizzontale: ogni 4 scans
- Profondità massima di illuminazione
- (considerando un valore di $\epsilon_r = 9$) è 4-5 m circa



Processing

Obiettivo principale:

Eliminare segnali di rumore sovrapposte
al segnale riflesso ricercato

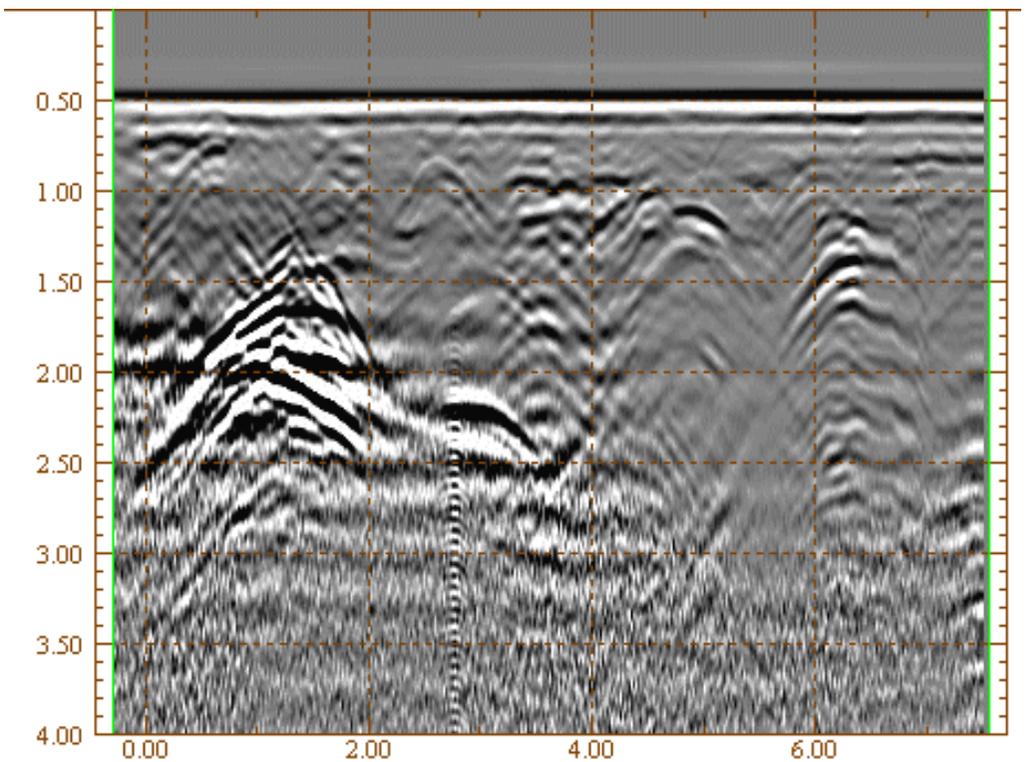
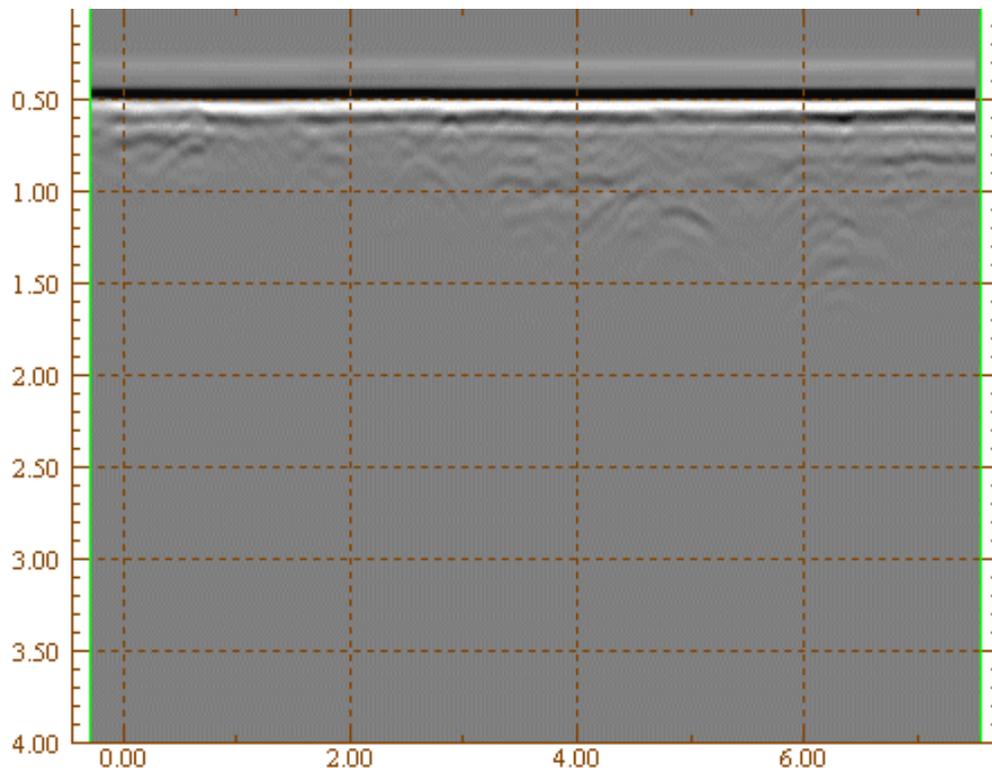
GPR: data processing – Filtraggio – Automatic Gain Control



Radargramma non
processato

Radargramma processato
con filtro tipo: **Automatic Gain Control**

— **Significato: normalizzare ampiezza
rispetto all'ampiezza massima
registrata da ciascuno SCAN A**

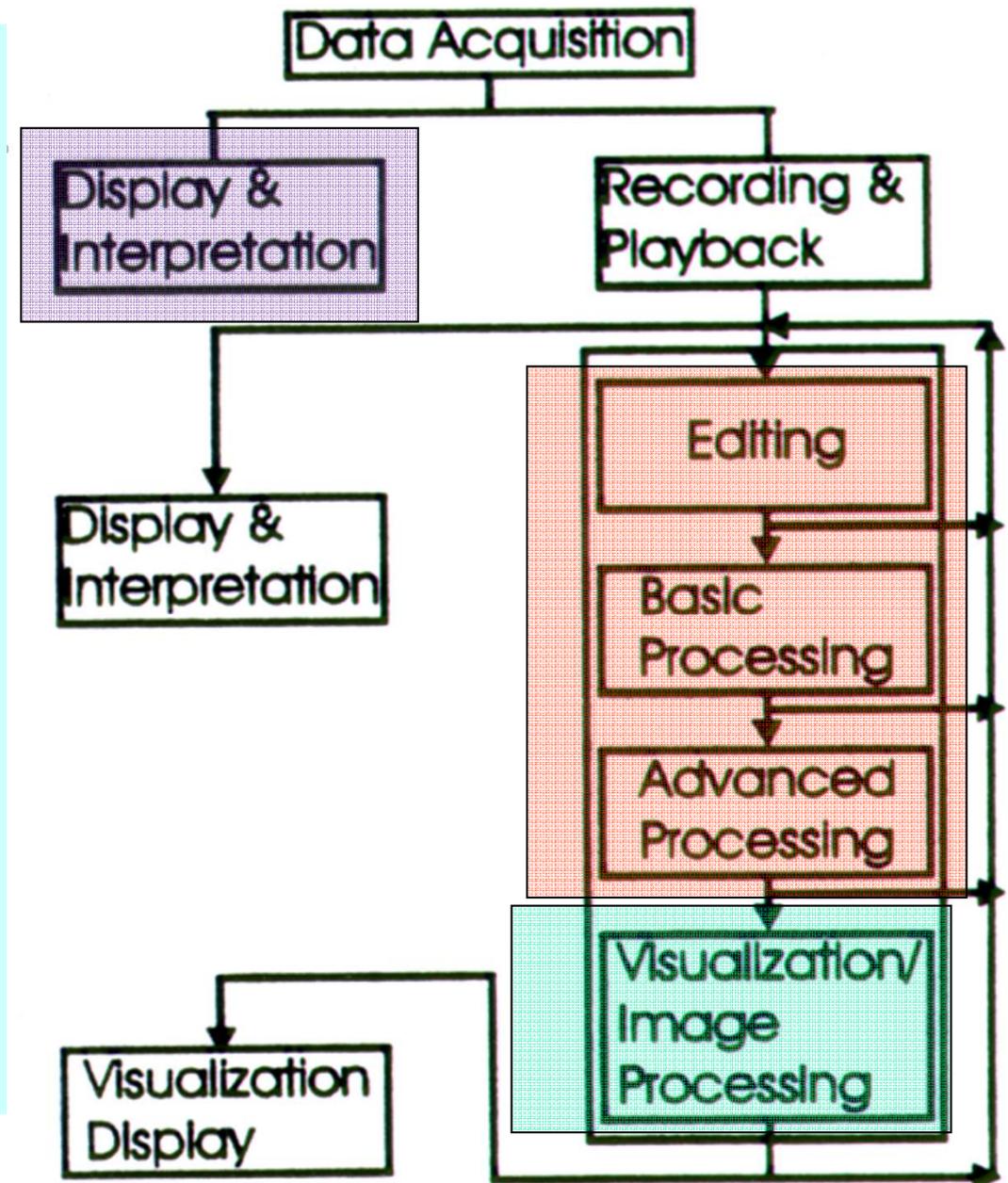


sezione obbiettivo del processing

GPR: percorso per il processing dei dati riportato sotto a destra. I passaggi principali sono colorati in trasparenza

Fattori da considerare prima di iniziare il processing dei dati:

- (1) Corretta pianificazione dell'indagine:
 - Accuratezza,
 - Risoluzione
- (2) interpretazione qualitativa è sufficiente?
- (3) Tipo di risultati da fornire che dipende dalle esigenze del progetto: **visualizzazione** e **soprattutto** interpretazione delle sezioni radar!



GPR: (1) processing in verticale

(2) processing tracce radar in orizzontale

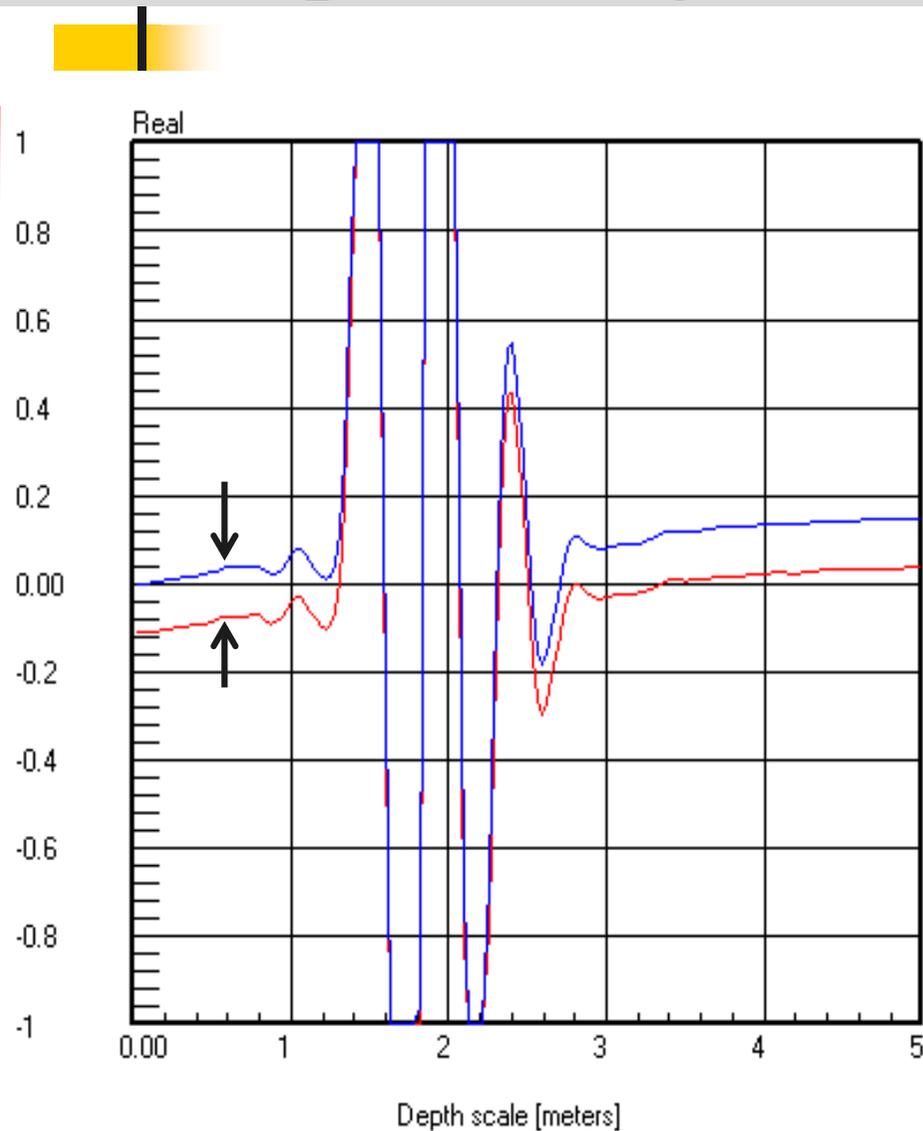
(1) processing in verticale

- E' quello che viene applicato su ogni singolo SCAN,
- E' un processing "senza memoria" (non tiene conto degli scan precedenti e seguenti)

- I principali processing di questo tipo sono:
 - Eliminazione del valor medio (dewow o CLEAR Y)
 - Filtro **passa – alto**
 - Filtro **passa – basso**
 - Filtro **passa – banda**
 - **Stacking**
 - **Trasformata di Fourier (spettro del segnale)**

GPR: (1) processing in verticale: **dewow**

(2) processing tracce radar in orizzontale



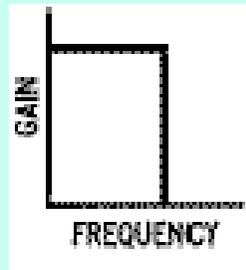
- **Il segnale di partenza (rosso) non è a valor medio nullo,**
- **L'eliminazione del valor medio (blù) serve per correggere questo effetto eliminando l'offset: valore in mV dovuto all'elettronica.**
- **Questa operazione permette di sfruttare tutta la "dinamica" utile che possiede la scheda di acquisizione**

GPR: (1) processing in verticale: **Filtraggio**

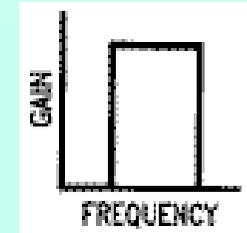
(2) processing tracce radar in orizzontale

Si distingue tra 4 tipi di filtri

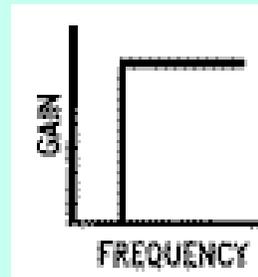
Passa-basso



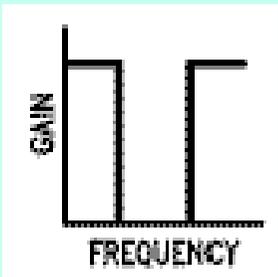
Passa-banda



Passa-alto



banda stop



I filtri possono essere applicati nel dominio del tempo o in quello della frequenza

- I filtri passa banda (BP) si applicano per rimuovere *componenti "non utili" dal segnale GPR; in particolare per:*
 - (1) le componenti a bassa frequenza e
 - (2) per limitare il rumore ad alta frequenza
cioè *per rimuovere*

GPR: (1) processing in verticale

(2) processing tracce radar in orizzontale

(1) processing orizzontale (B SCAN)

- E' quello che viene applicato su tutta la mappa o su porzioni di essa => **lungo la direzione X della sezione,**
- E' un processing "con memoria" ovvero i parametri sono calcolati su tutta la mappa o su porzioni di essa

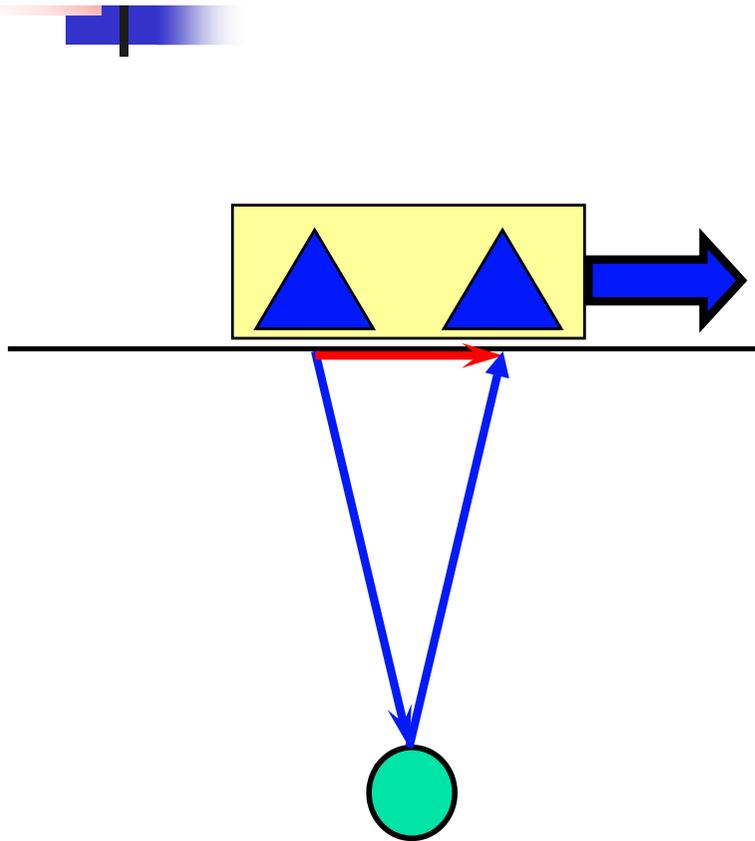
I principali processing di questo tipo sono:

- Soil sample (**o move start time: segnale inutile**)
- Gain (STC) lineare e "smoothed"
- Filtro passa – banda orizzontale
- Background removal (bande orizzontali visibili nella sezione)
- Migrazione

- Inoltre
- Stima della velocità di propagazione

GPR: processing orizzontale: soil sample (o Moce Start Time)

Il "main bang"

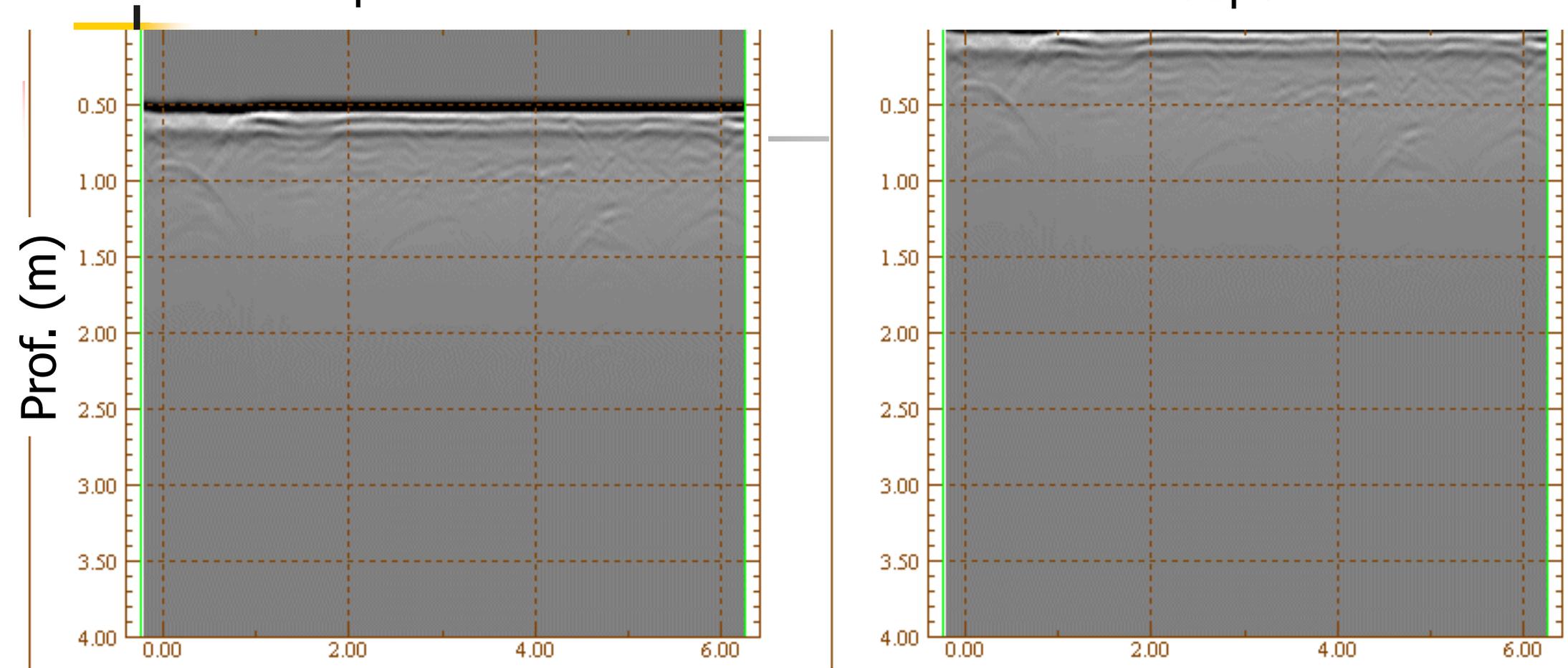


- E' il primo segnale che raggiunge il Rx (**rosso**) (**onda diretta**)
- E' dovuto all'interfaccia aria-terreno,
- Non è un segnale utile per il rilievo, ma serve per tarare lo zero della profondità,

GPR processing: Move Start Time o Il Soil sample

prima

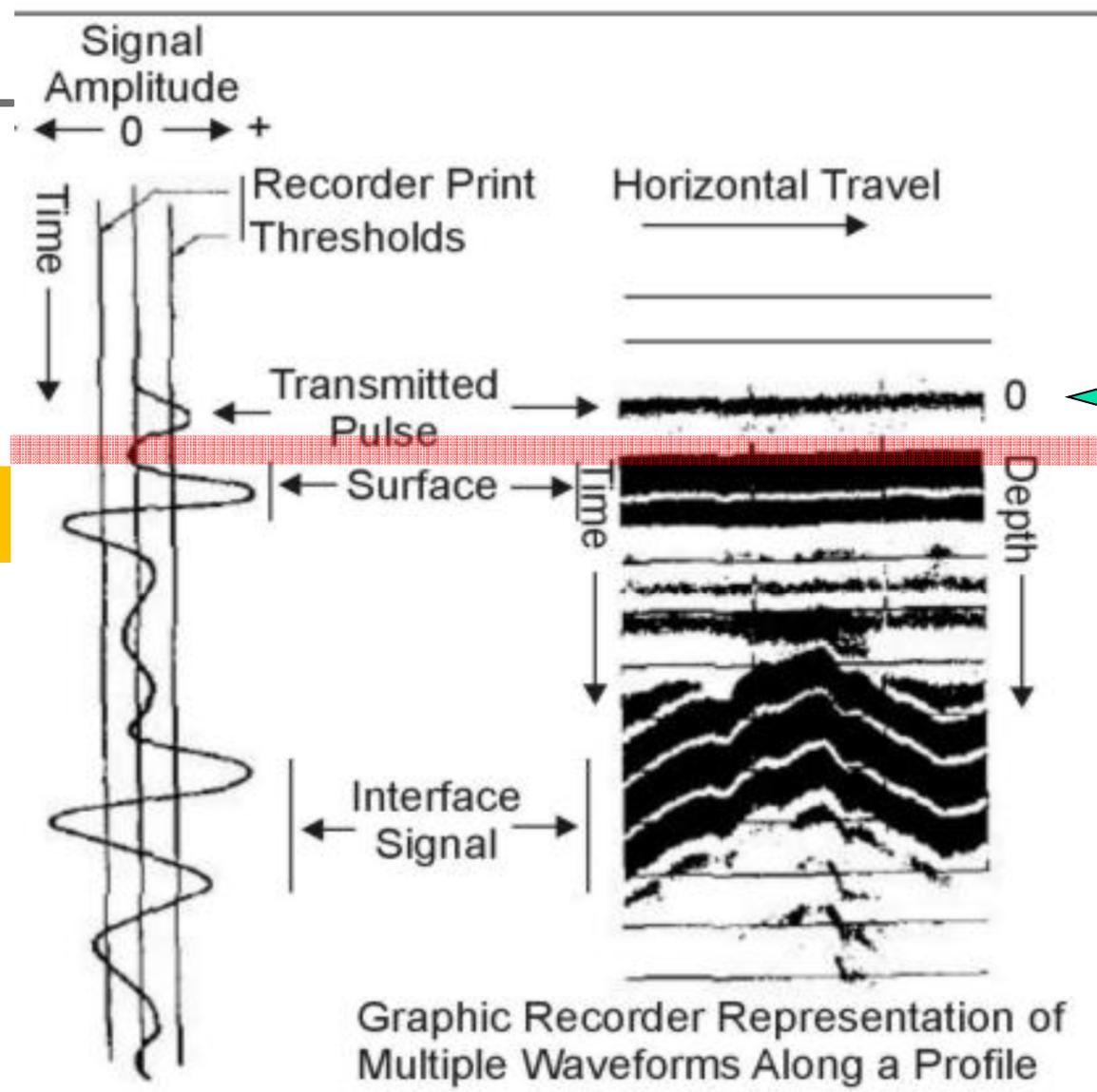
dopo



**Consente di tarare lo "zero" della scala delle profondità
Utilizza il main bang, quindi deve essere applicato prima
di rimuoverlo**

GPR: analisi impulso EM trasmesso e ricevuto.

- sinistra scan tipo A
- Destra scan tipo B o sezione radar o radargramma

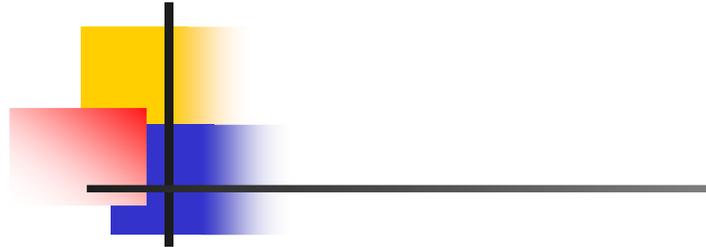


Il tempo zero T_0 ?

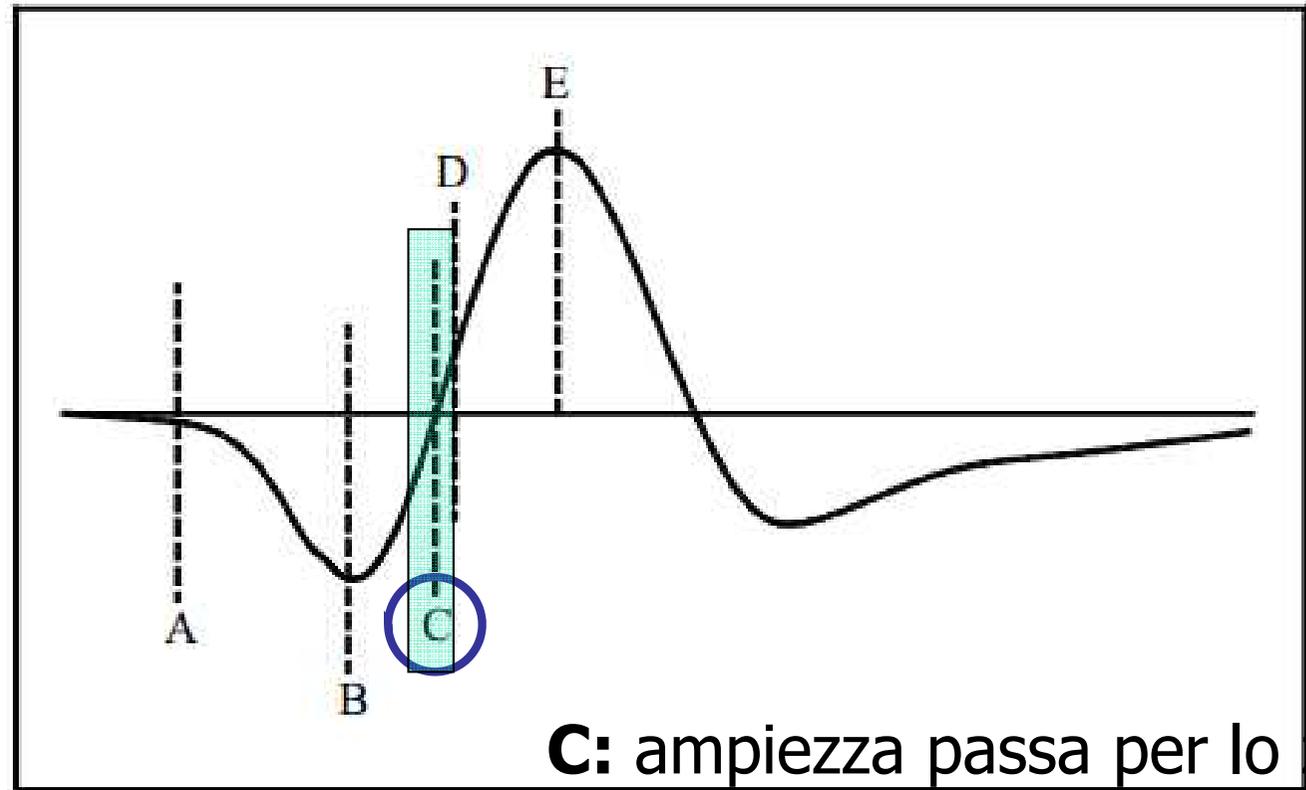
Sketch of Typical Single Waveform

GPR: analisi impulso EM ricevuto.

- Assegnazione il tempo zero (T_0)



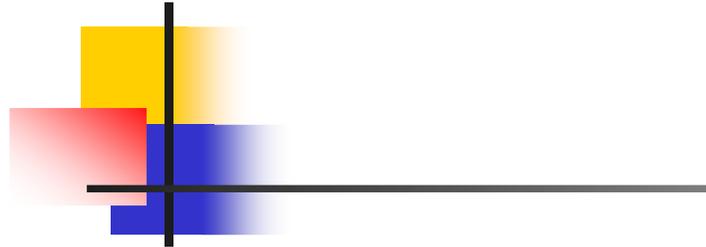
Il tempo zero T_0 ?



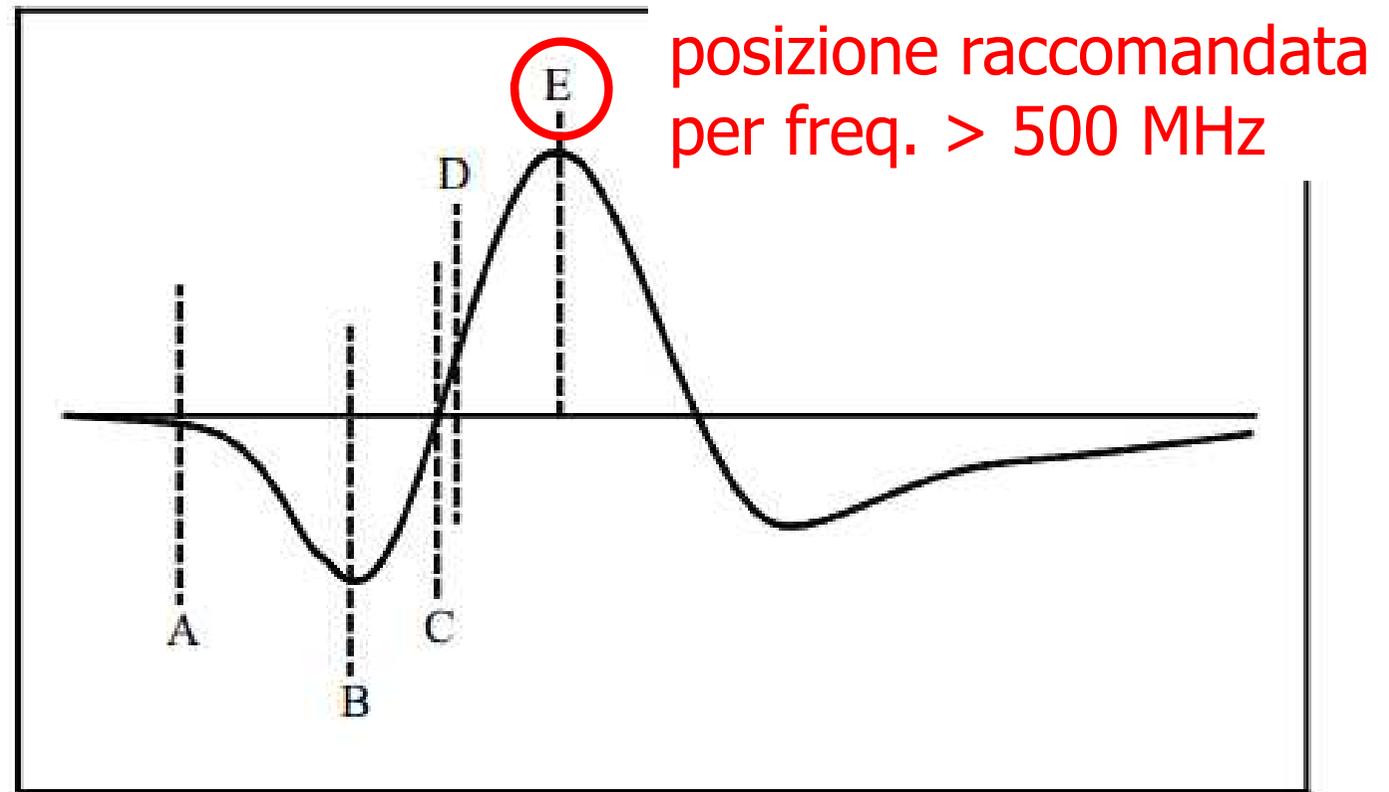
- **A-E:** rappresentano i tempi che possono essere scelti dall'operatore o dall'algoritmo per assegnare il valore al T_0 : tempo usato per il calcolo della profondità delle riflessioni
- La posizione **C** è quella usata dagli esperti e dalla maggiore parte degli algoritmi pre-programmati. Adeguata per antenne da (25-500 MHz)

GPR: analisi impulso EM ricevuto.

- Assegnazione il tempo zero (T_0)



Il tempo zero T_0 ?

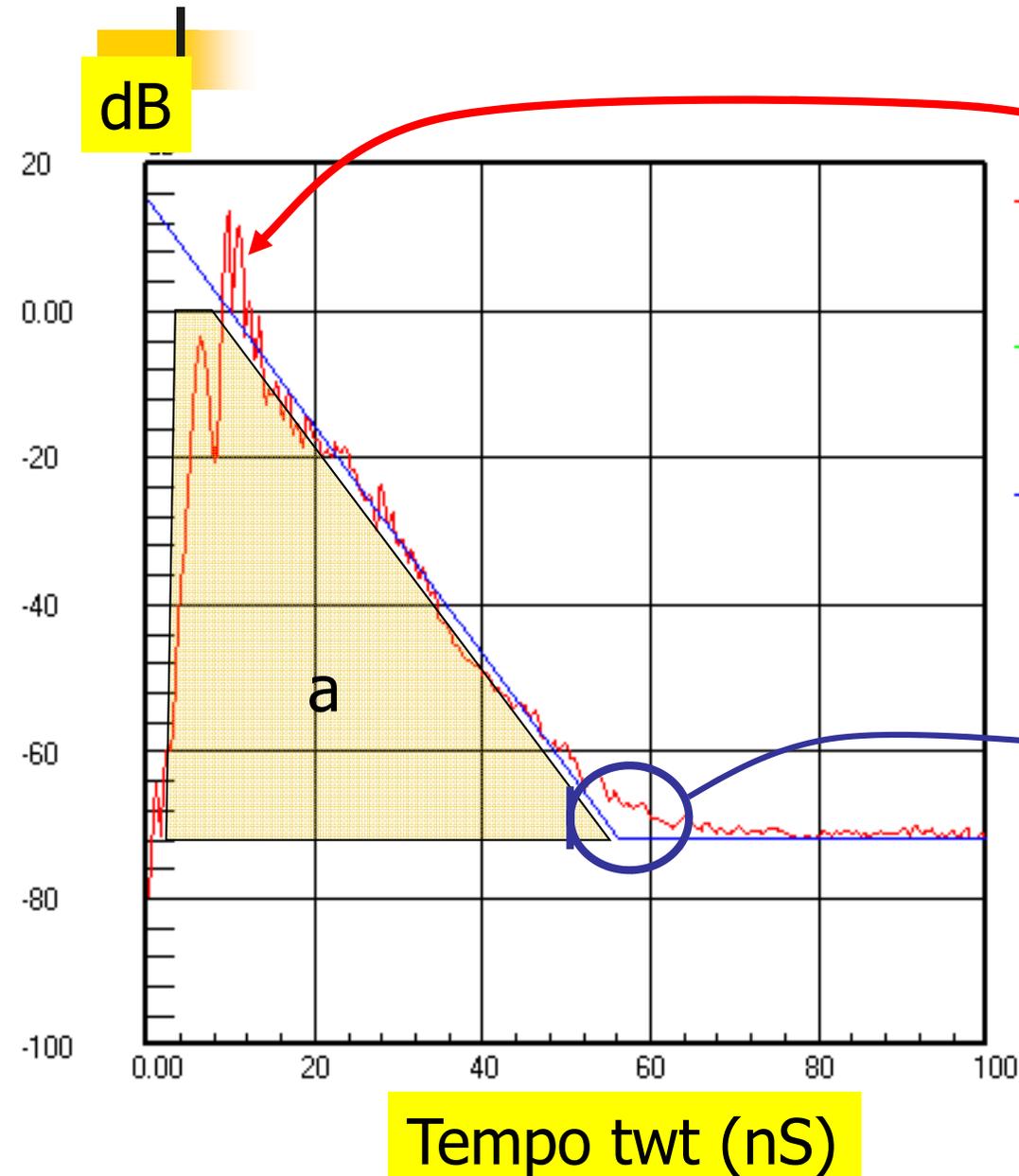


- **A-E**: rappresentano i tempi che possono essere scelti dall'operatore o dall'algoritmo per assegnare il valore al T_0 : tempo usato per il calcolo della profondità delle riflessioni
- La posizione **E** è quella da usare con antenne ad alta frequenza > 800 MHz (facile da individuare, si ricordi che ad alta frequenza λ è piccola)

Il Gain o Sensitivity Time Control

- **compensare l'attenuazione subita dal segnale EM durante la propagazione,**
- **Equalizzazione della dinamica: la dinamica del segnale ricevuto dal GPR è molto ampia (da microVolt a 10 volt), quindi deve essere compressa per poter essere rappresentata con un numero limitato di colori, si intende il numero dei colori identificati dall'occhio umano,**
- **...per poter apprezzare piccole variazioni dell'ampiezza**
- **Il STC (Sensitivity Time Control) si applica in 2 passaggi consecutivi ma dipende dall'algoritmo specifico utilizzato per la costruzione dell'antenna,**
- **I termini possono variare ma il concetto rimane quello dell'equalizzazione**

GPR: dinamica del segnale – far emergere piccole ampiezze e ridurre grandi ampiezze

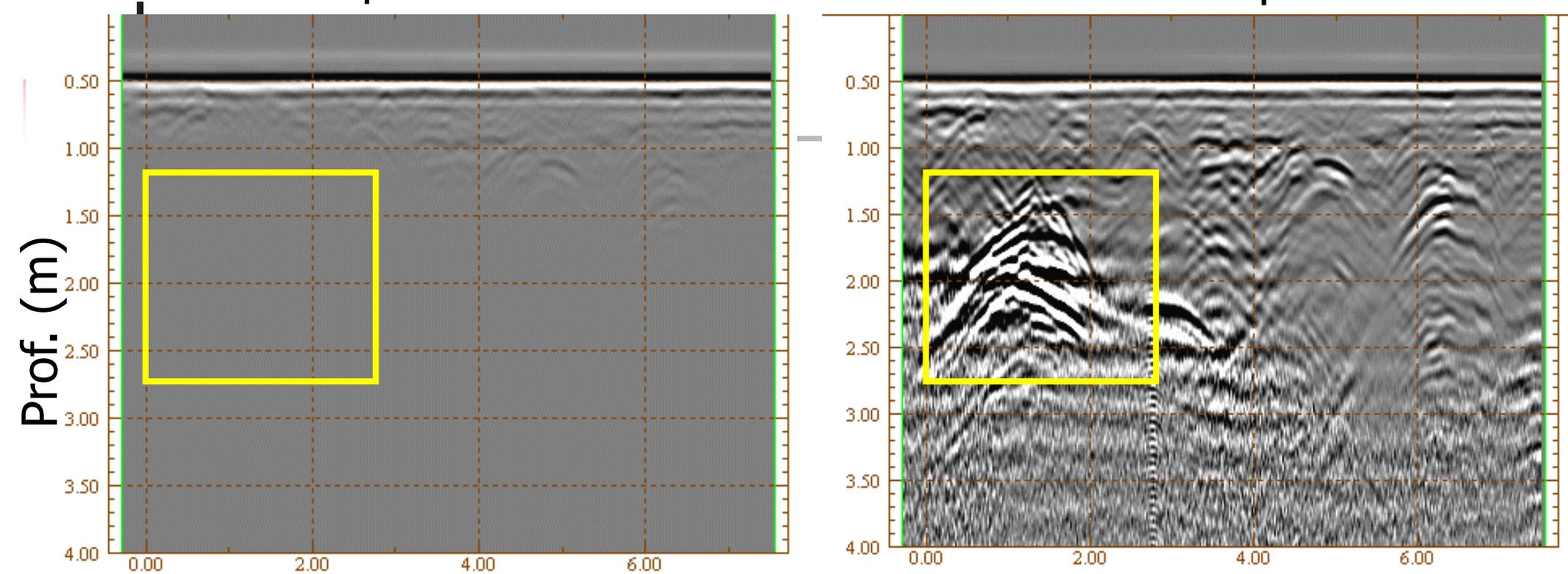


- In rosso è rappresentato l'andamento della potenza media ricevuta da un'antenna a 400 MHz
- Nell'esempio la dinamica (zona a) utile è superiore a 70 dB (il rapporto tra max e min è superiore a 3000)
- Il raccordo tra i 2 andamenti della curva rossa (**x=56 nS, y=-70 dB**) consente di stimare la penetrazione o massimo tempo twt utile
- La curva blu è calcolata dagli algoritmi utilizzati per l'analisi dei dati utilizzando una forma o un'altra di guadagno. I sistemi IDS utilizzano il gain l'STC lineare

GPR: dinamica del segnale – far emergere piccole ampiezze e ridurre grandi ampiezze

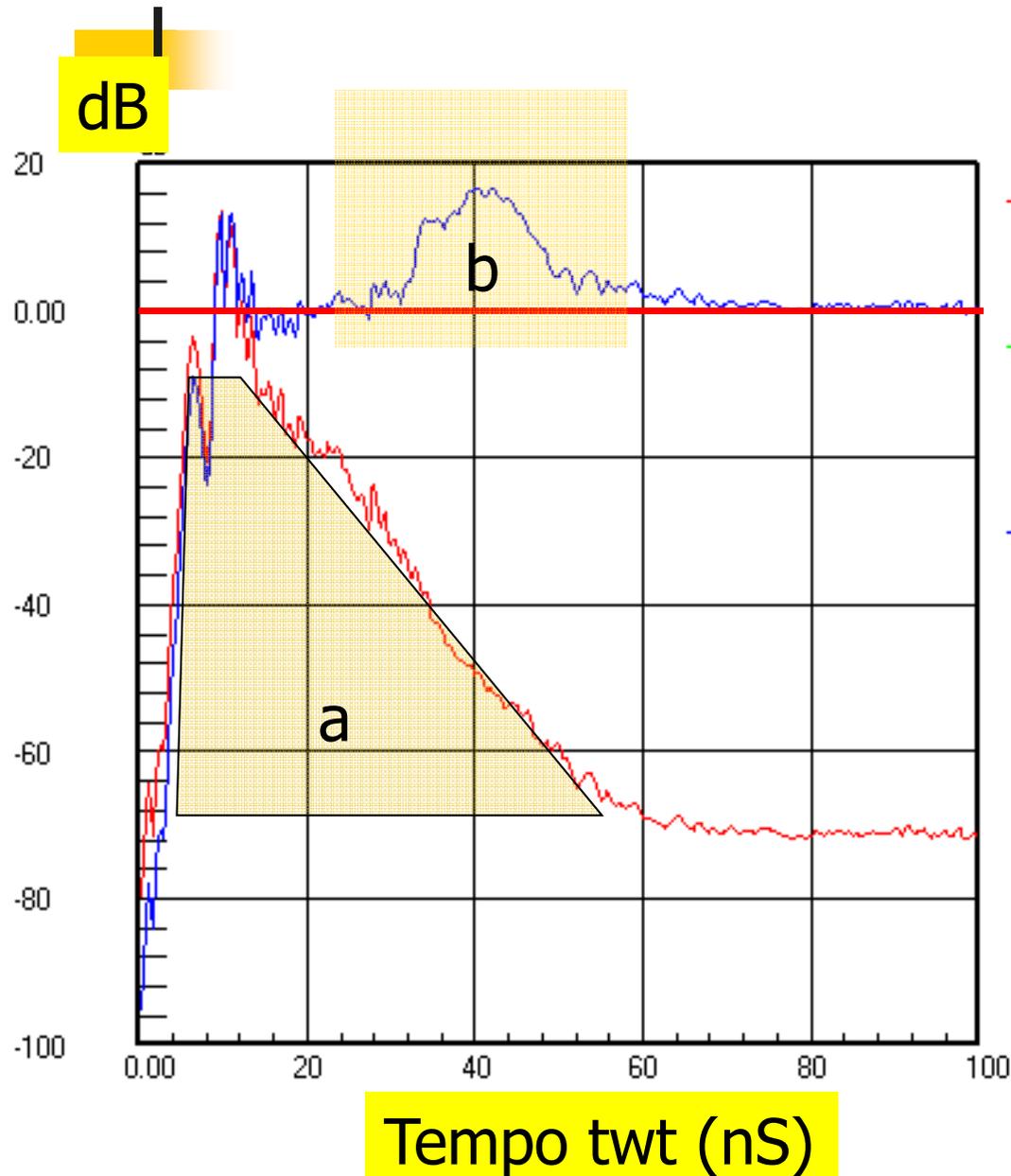
prima

dopo



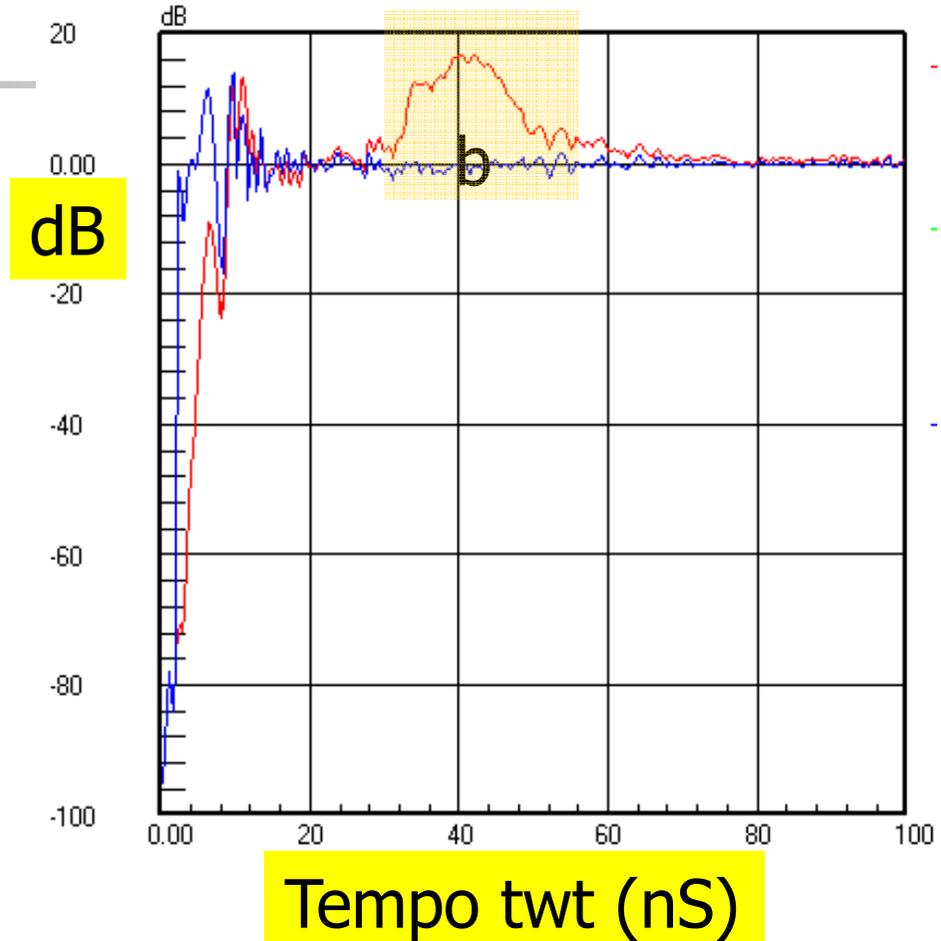
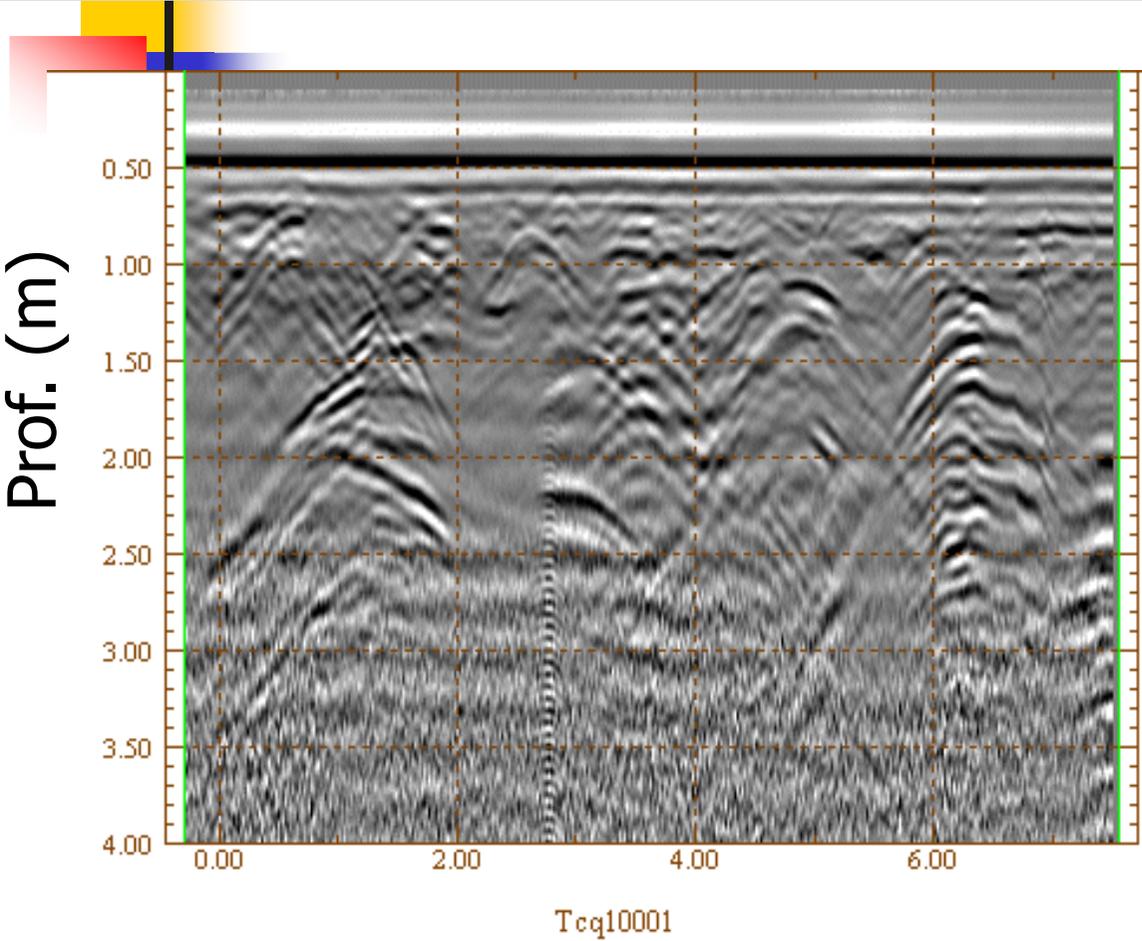
- **E' il primo passo di equalizzazione. La dinamica non è completamente compressa,**
- **Il target a sinistra (zona gialla) è molto più intenso (saturato) mentre a destra compare dopo aver applicato l'equalizzazione (o STC)**

GPR: dinamica del segnale – far emergere piccole ampiezze e ridurre grandi ampiezze.



- Il segnale in blu illustra in termini di potenza media il risultato dell'applicazione del Gain lineare o il primo passaggio dell'equalizzazione
- Il segnale riflesso dal bersaglio (**b**) emerge ma questo segnale non è simmetrico rispetto allo zero decibile (dB).

GPR: dinamica del segnale – far emergere piccole ampiezze e ridurre grandi ampiezze. STC smooth: equalizzare ampiezze riflessioni a scala di sezione radar .



- La dinamica è ora completamente compressa (b),
- Le anomalie (bersaglio) hanno intensità comparabili

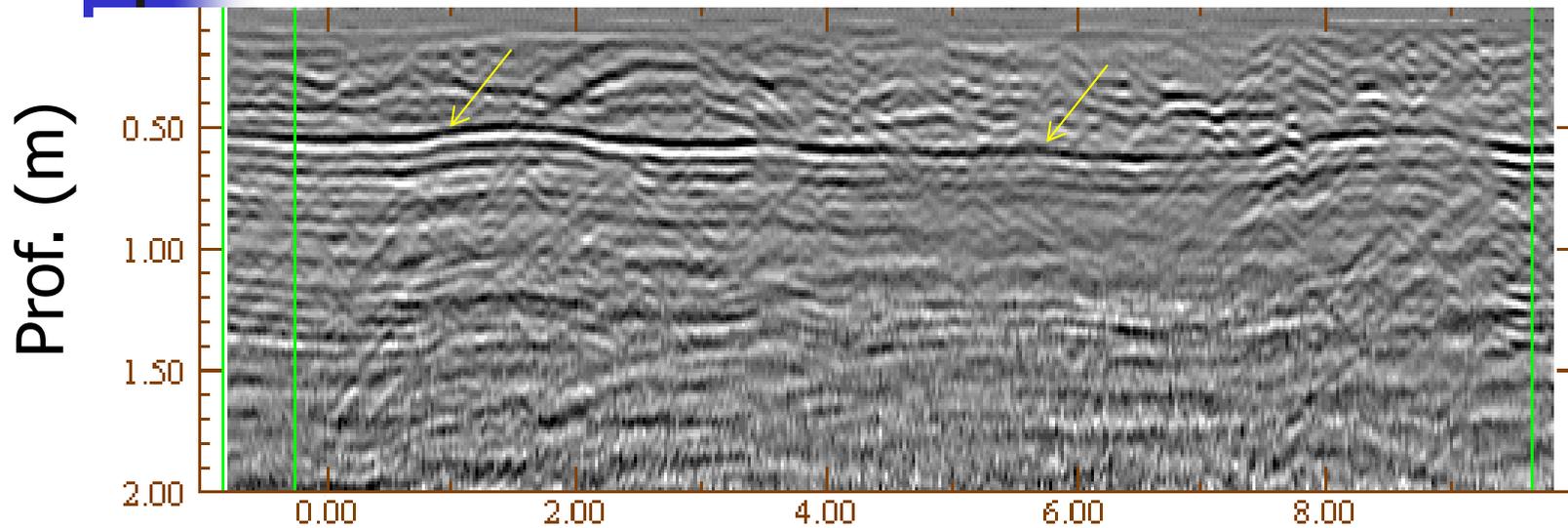
GPR: filtraggio orizzontale applicato su tutte le tracce (A-SCAN)

Si applica se si vuole fare emergere bersagli puntiforme o hanno geometria limitata. Questa operazione rimuove riflessioni orizzontali prodotti anche da stratificazione (p.es.)

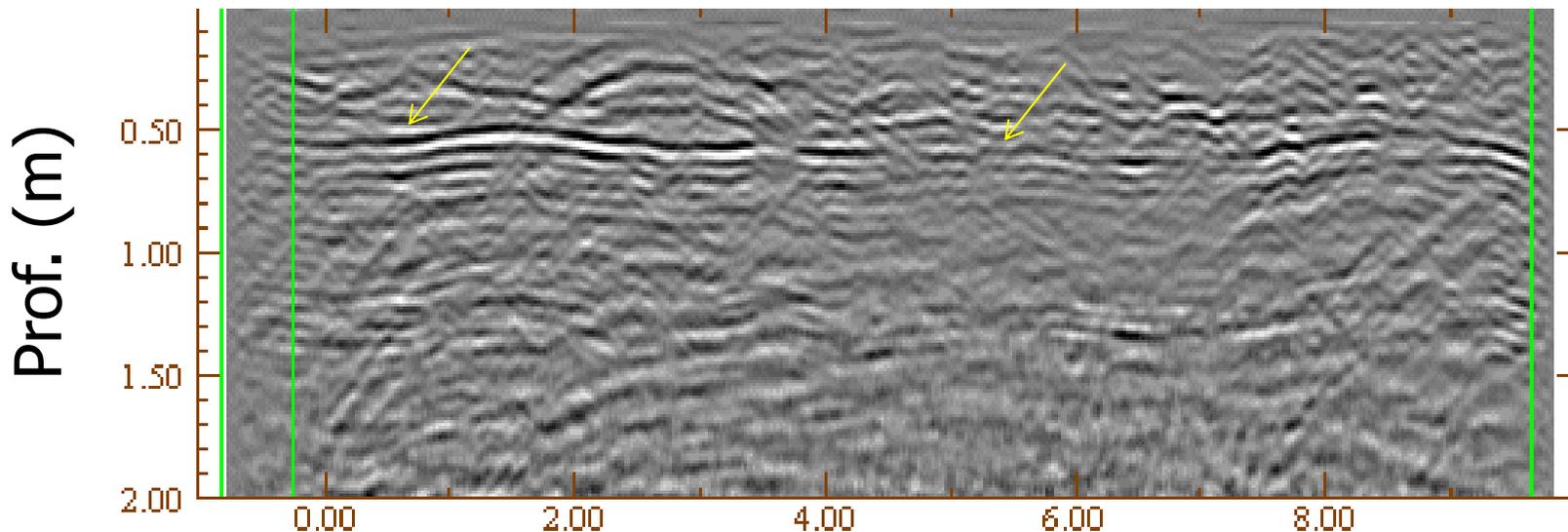
- **Si applica un filtro spaziale a banda passa (frequenza spaziale (m^{-1})) a tutti i campioni acquisiti (SCAN A) che costituiscono il radargramma (SCAN B),**
- **Il range dei valori della frequenza spaziale definiscono la minima e la massima lunghezza dei bersagli (di andamento orizzontale) che si vogliono conservare,**
- **Il filtro può assumere i seguenti valori: da $0.2m^{-1}$ a $5m^{-1}$, si vogliono conservare tutti gli oggetti aventi lunghezza superiore a $1/5=0.2m$ ed inferiore a $1/0.2=5m$**
- **La scelta dei poli del filtro deve essere fatta con cura con la raccomandazione di provare diversi range di valori**

GPR: filtraggio orizzontale applicato su tutte le tracce

Si applica se si vuole fare emergere bersagli puntiforme o hanno geometria limitata. Questa operazione rimuove riflessioni orizzontali dovuti a stratificazione (p.es.)



prima
**Processing
senza filtro
orizzontale
(frecce)**



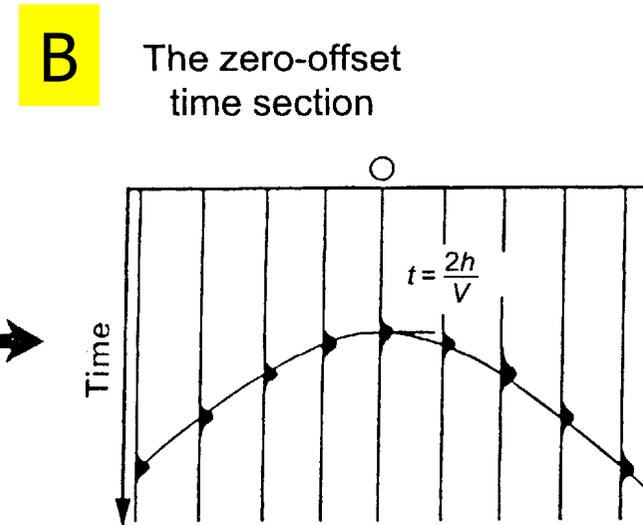
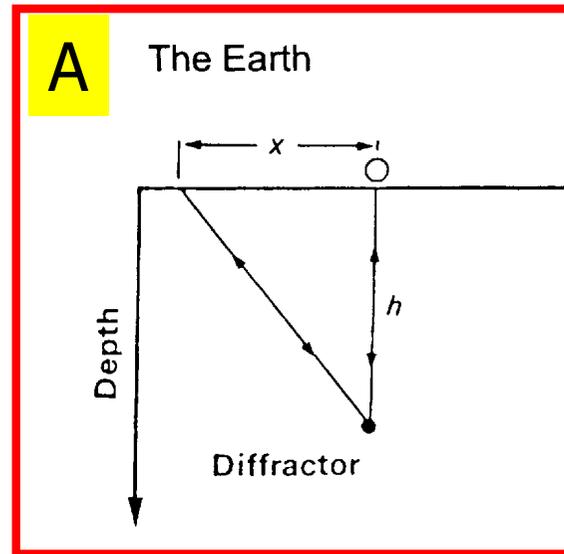
dopo
**Processing
con
l'applicazione
del filtro
orizzontale
(frecce)**

- Il termine "migrazione" descrive l'operazione di riportare al loro posto, nella sezione investigata, gli elementi riflettenti non paralleli alla superficie del terreno supposta piana (**si applica anche alle sezioni di sismica a riflessione**) ed anche
- consente la focalizzare dell'energia delle onde riflesse (iperbole di diffrazione) da oggetti di dimensioni inferiori a quella della lunghezza d'onda incidente nel punto di origine,
- è una tecnica di elaborazione mutuata dalla sismica a riflessione,
- L'operazione di migrazione **richiede l'accurata conoscenza** della V_{EM} ,

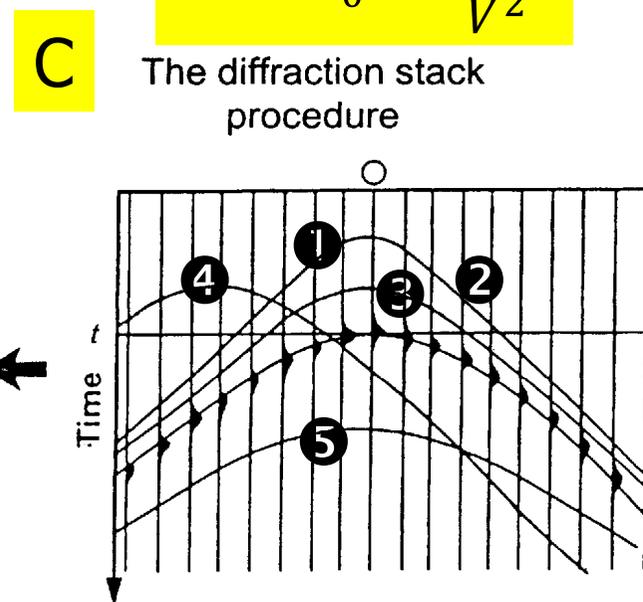
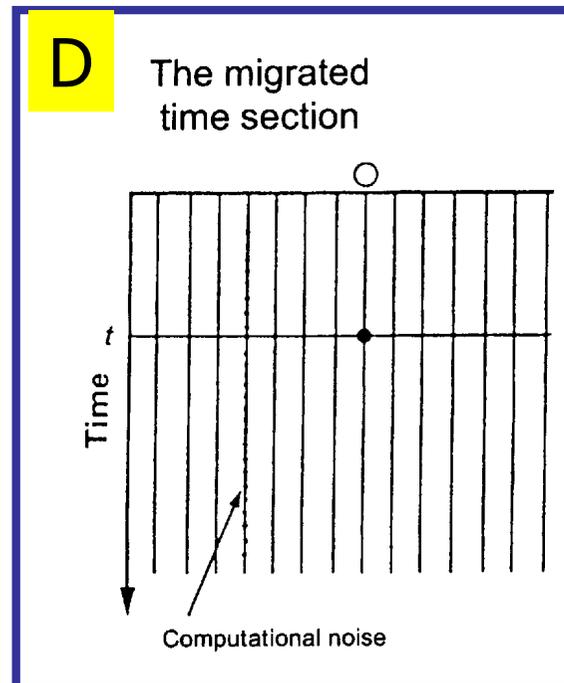
GPR: migrazione:

Concetto del metodo di Kirchhoff (A-D) implementato negli algoritmi

- A) Modello di un sottosuolo con oggetto piccolo che produce onde diffratte
- B) Modalità acquisizione dati con antenna monostatica
- C) Iperboli di prova (1-5) ricostruite con diversi valori di velocità. Quando si trova una coincidenza perfetta si identifica il punto difattore quindi tutte le onde riflesse degli altri A-SCAN vengono azzerate,
- D) Risultato: migliorare visibilità sezione radar ma soprattutto eliminare segnali di disturbo che possono nascondere altri copri

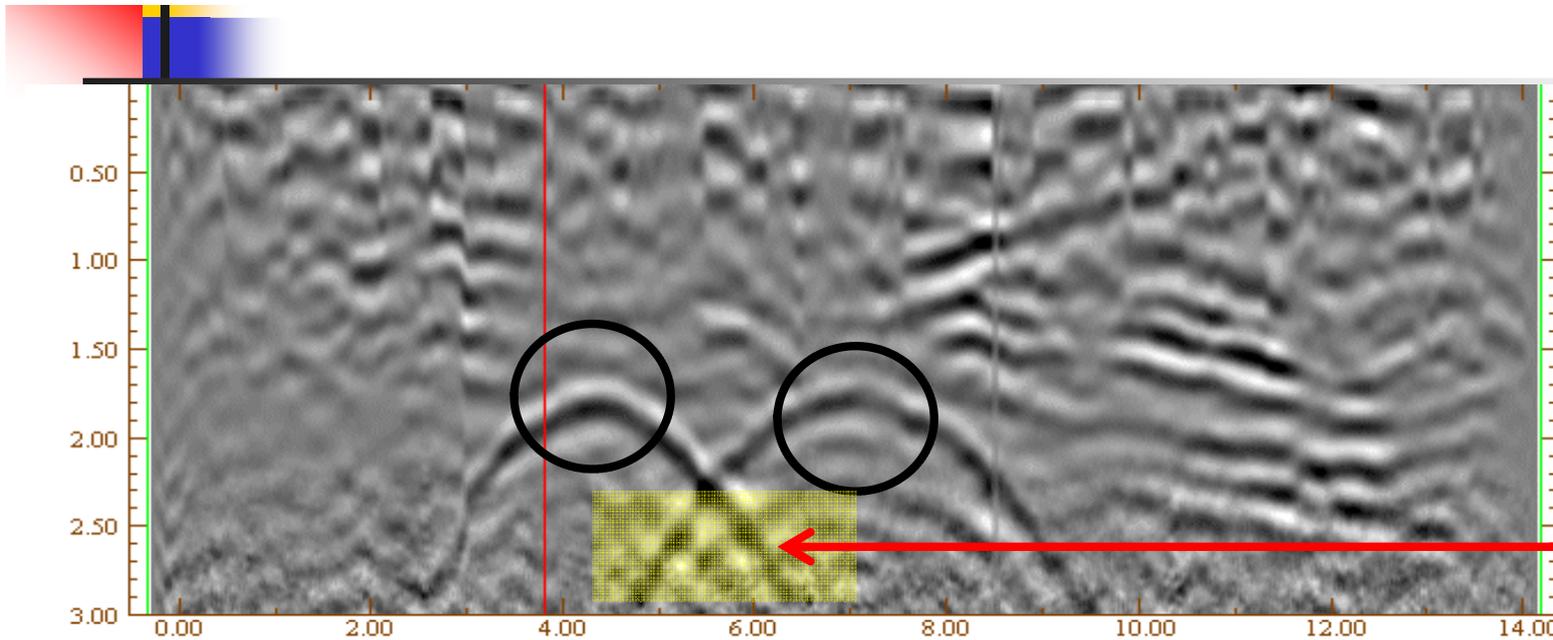


$$T^2 = t_0^2 + \frac{4x^2}{V^2}$$

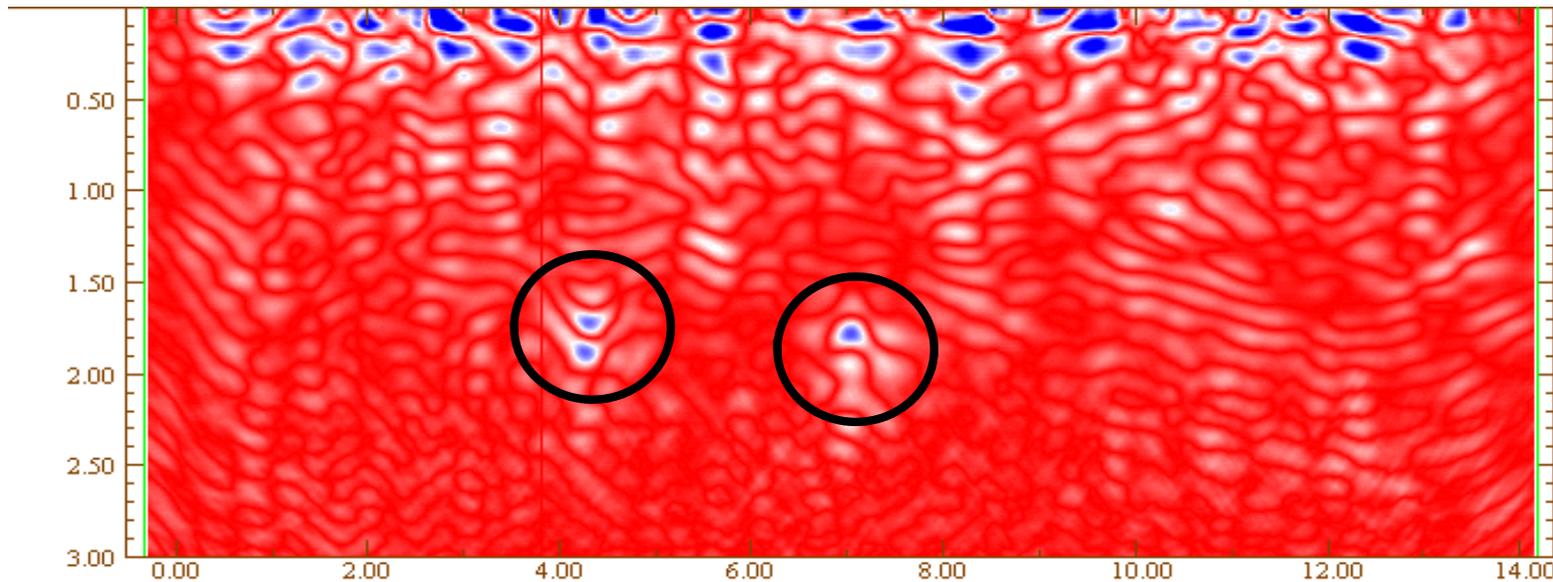


GPR: migrazione

Le iperbole di diffrazione vengono focalizzate nel punto di origine.
Le sezione radar si semplifica



prima
**Sezione
radar Non
migrata**
Artefatto(!)



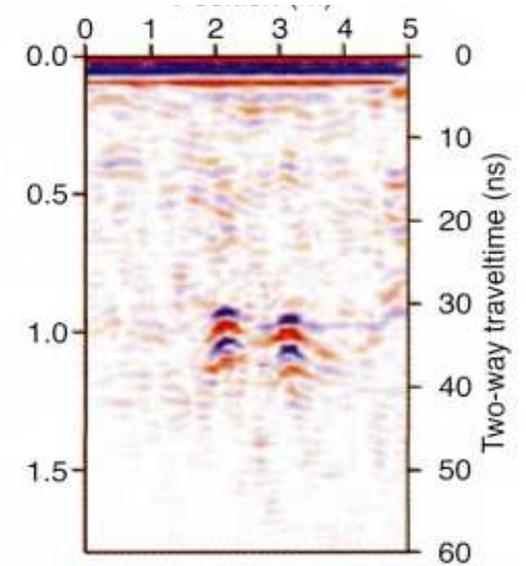
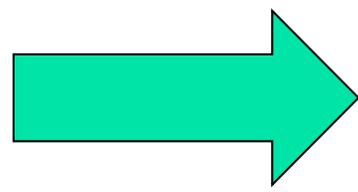
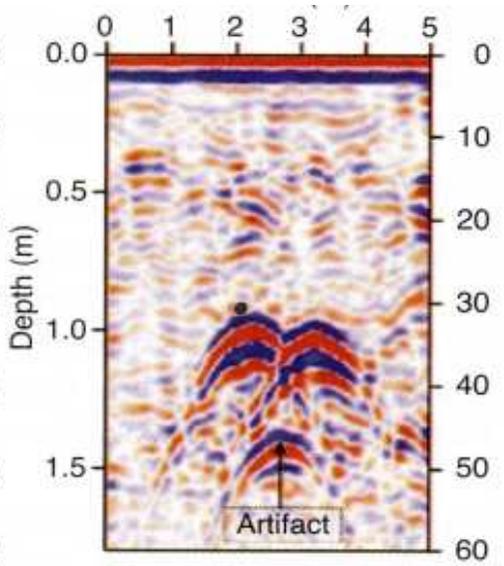
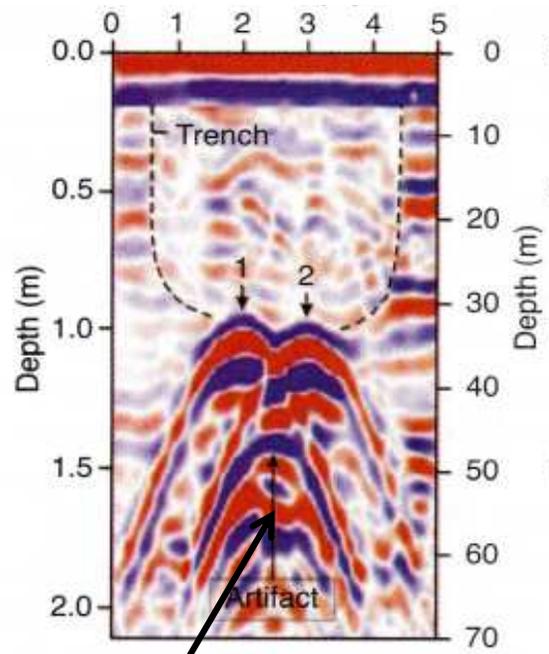
dopo
**Mappa
radar
migrata**

GPR: migrazione, due serbatoioi metallici

200 MHz

400 MHz

Sezione migrata
400 MHz

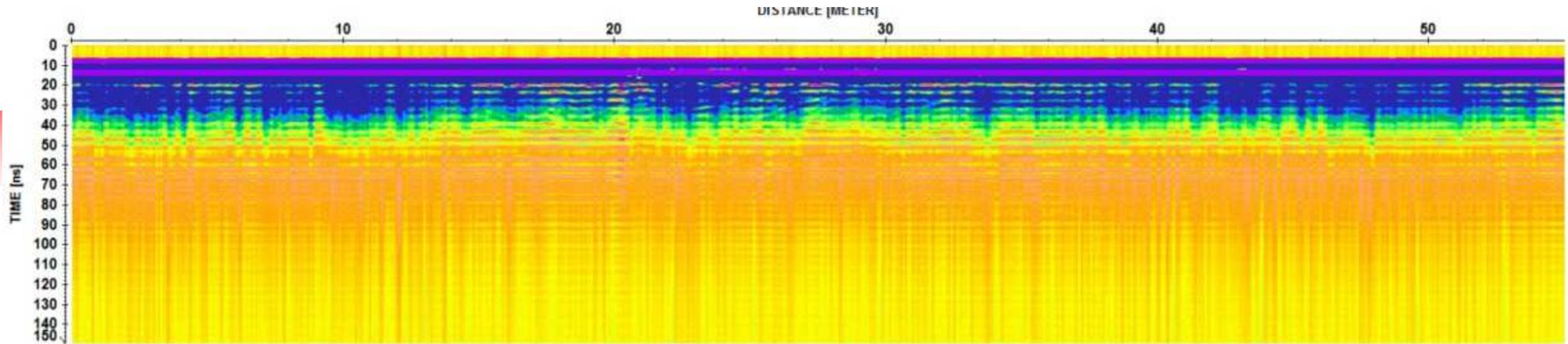


a

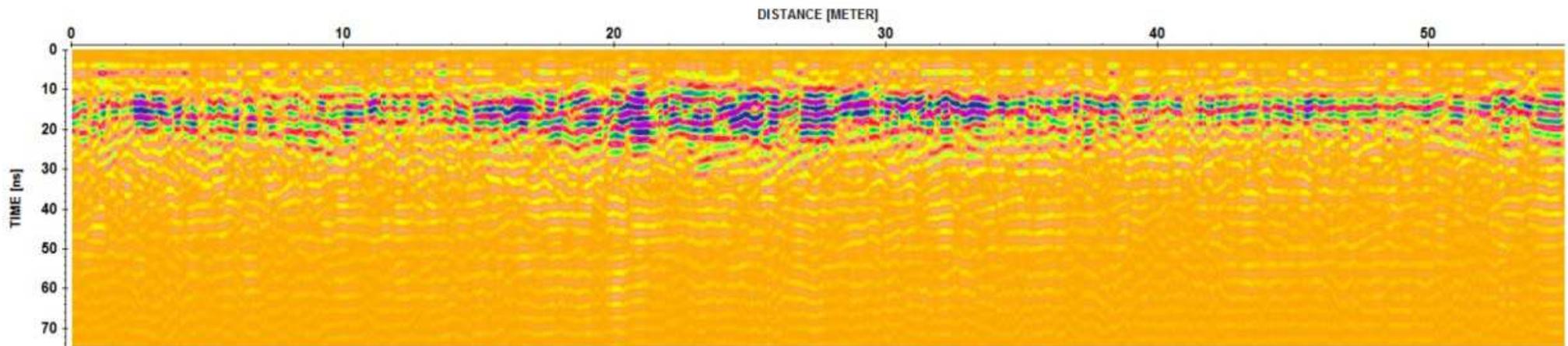
An Introduction to Applied and Environment Geophysics, Second Edition. John Reynolds
© 2011 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2011 by John Wiley & Sons, Ltd.

- Le due sezioni radar sono state acquisite con antenne monostatiche con frequenza centrale propria (200 MHz e 400 MHz),
- I radargrammi evidenziano le iperboli di diffrazione correttamente,
- La risoluzione verticale è migliore della sezione a 400 MHz,
- Le due sezioni presentano una terza iperbole fittizia (a)

GPR: data processing – esempio di processing con sequenza di operazioni riportata sotto



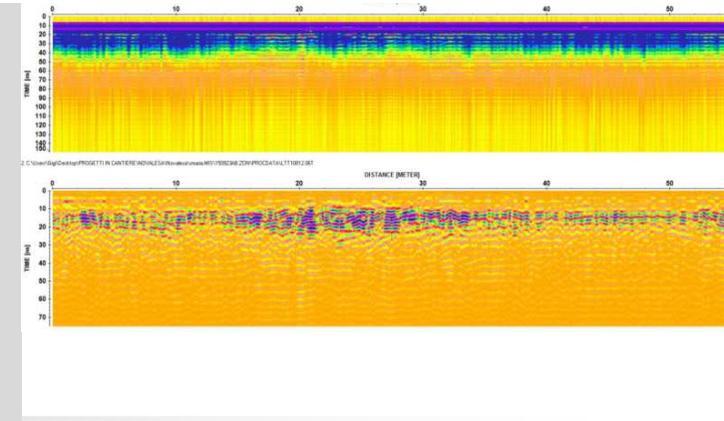
2. C:\Users\Gig\Desktop\PROGETTI IN CANTIERE\NOVALESA\Novalesa\maria.MIS\150923AB.ZON\PROC\DATA\LTT10012.06T



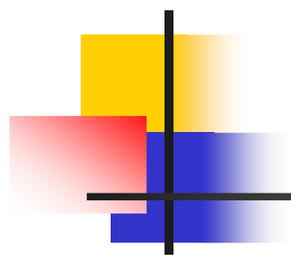
- Nome file\150923AB.ZON\PROC\DATA\LTT10012.06T
- subtract-mean(dewow) / 5 / 0 / 0 / 0 // 0 / 0 / 1 / 869
- move starttime / -3.5 / 0 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 866
- time cut / 75 / 0 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 866
- manual gain (y) / -19.57447 / 8.116377E-7 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 870
- bandpassbutterworth / 100 / 400 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 871
- background removal / 0 / 75 / 0 / 55 // 0 / 0 / 1 / 870

vede diapositiva
successiva

GPR: data processing – operazioni di diagramma di flusso processing esempio

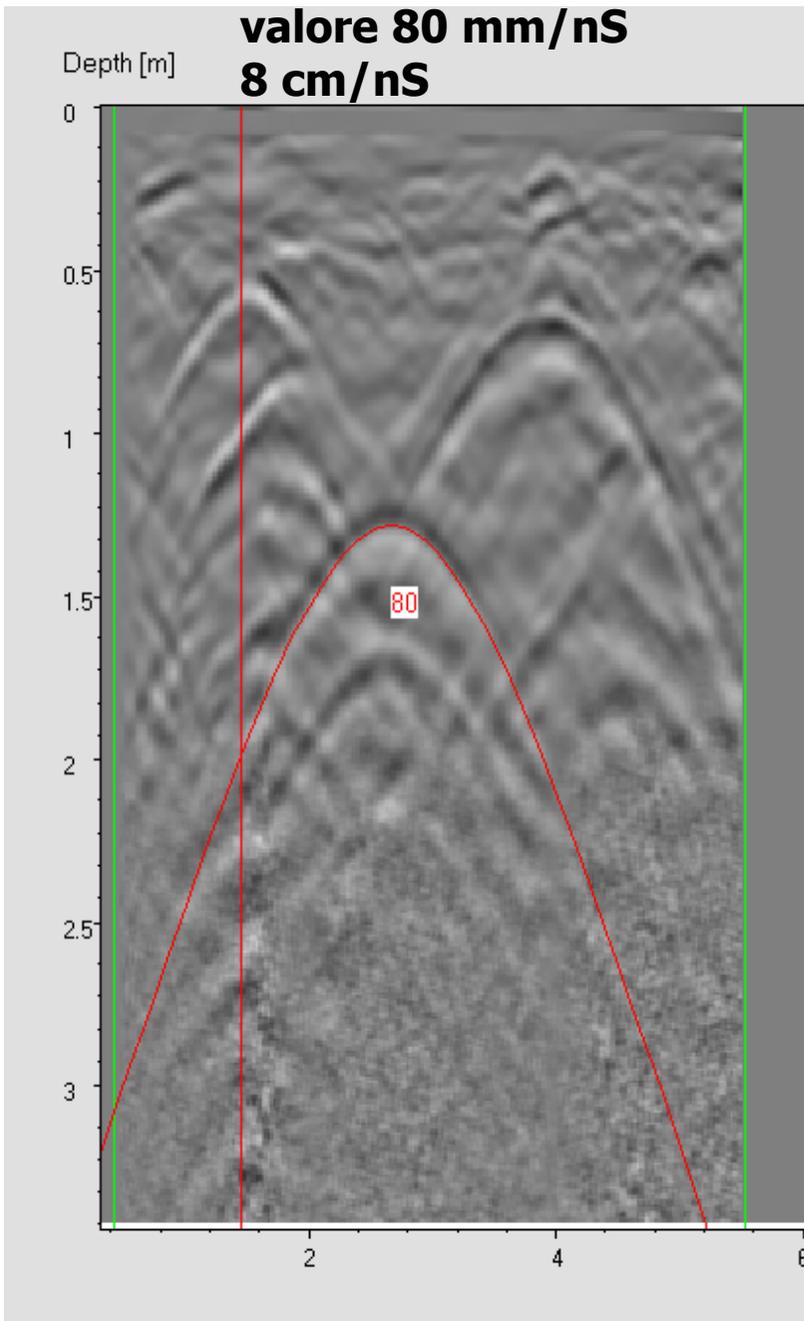


- **Nome file** \150923AB.ZON\PROCDATA\LTT10012.06T
- subtract-mean(dewow) / 5 / 0 / 0 / 0 // 0 / 0 / 1 / 869
- **move starttime** / -3.5 / 0 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 866
- time cut / 75 / 0 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 866
- **manual gain (y)** / -19.57447 / 8.116377E-7 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 870
- bandpassbutterworth / 100 / 400 / 0 / 0 // 1 / 0 / 1 / 871
- **background removal** / 0 / 75 / 0 / 55 // 0 / 0 / 1 / 870



stima velocità propagazione onde EM nel sottosuolo

GPR: data processing – Stima della velocità dalla forma dell'iperbole diffratta



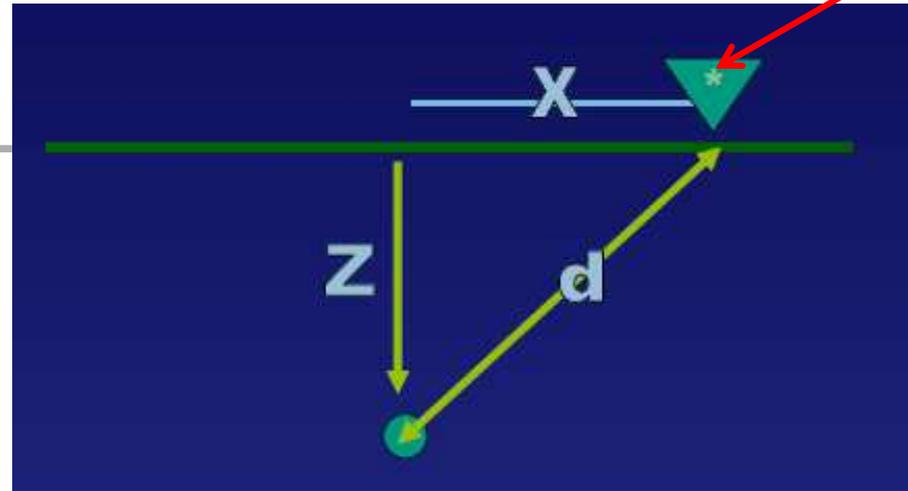
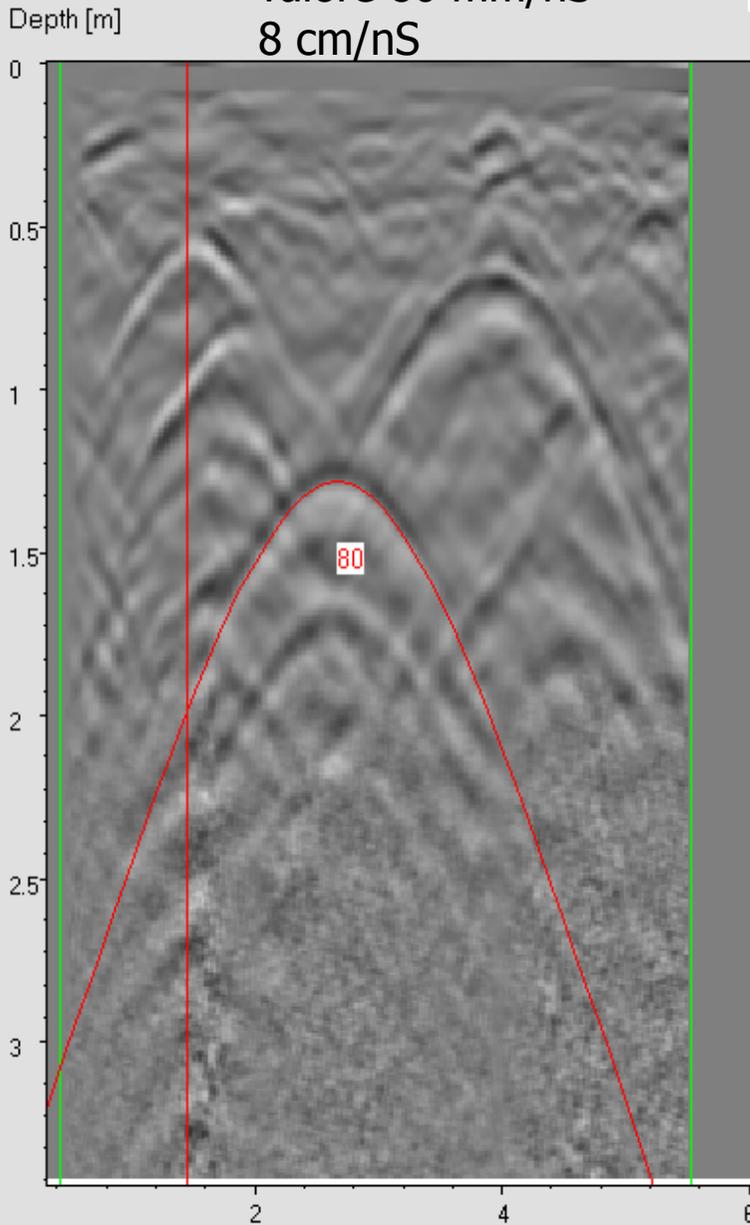
- Si cerca di adattare la forma di un'iperbole sintetica (**rossa**) alla forma di quella realmente acquisita dal sistema georadar
- Una volta individuato il vertice del target si cerca di trovare quella teorica che ricalca perfettamente quella sperimentale. Normalmente sono disponibili comandi in automatico per effettuare la simulazione in tempo reale

GPR: data processing – Stima della velocità dalla forma dell'iperbole

Formulazione matematica:

antenna

valore 80 mm/nS
8 cm/nS



$$d = 2\sqrt{x^2 + z^2}$$

$$d^2 = 4x^2 + 4z^2$$

$$t = \frac{d}{V}, t^2 = \frac{d^2}{V^2}$$

$$V^2 t^2 - 4x^2 = 4z^2$$

$$\frac{V^2 t^2}{4z^2} - \frac{x^2}{z^2} = 1$$

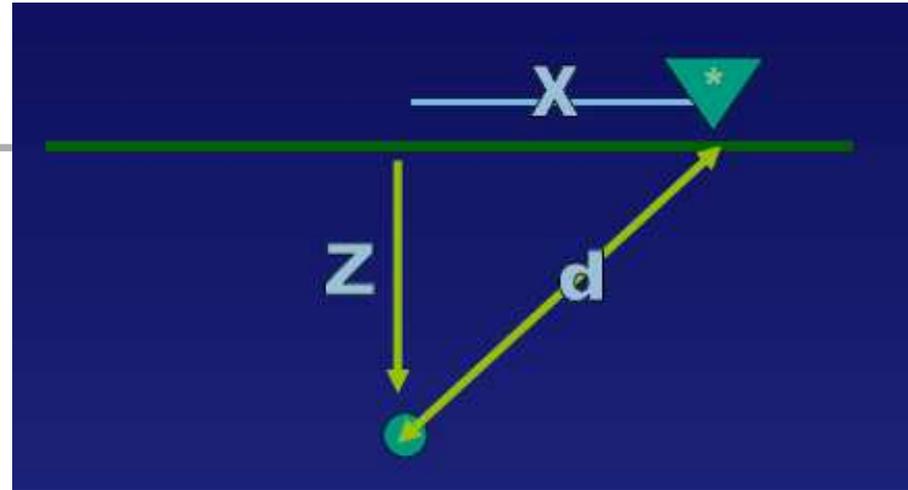
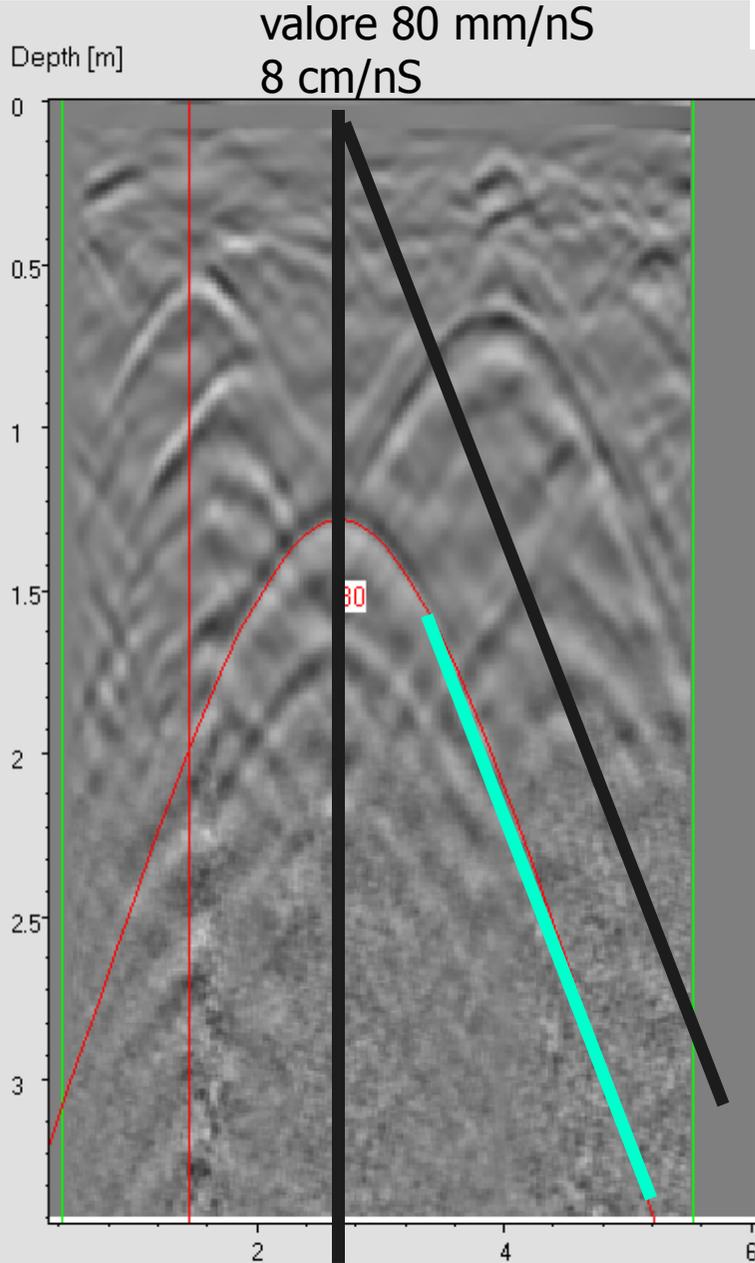
$$a = \frac{2z}{V}$$

$b = z$ pendenza asintoto

$$= \frac{a}{b} = \frac{2}{v}$$

GPR: data processing – Stima della velocità dalla forma dell'iperbole

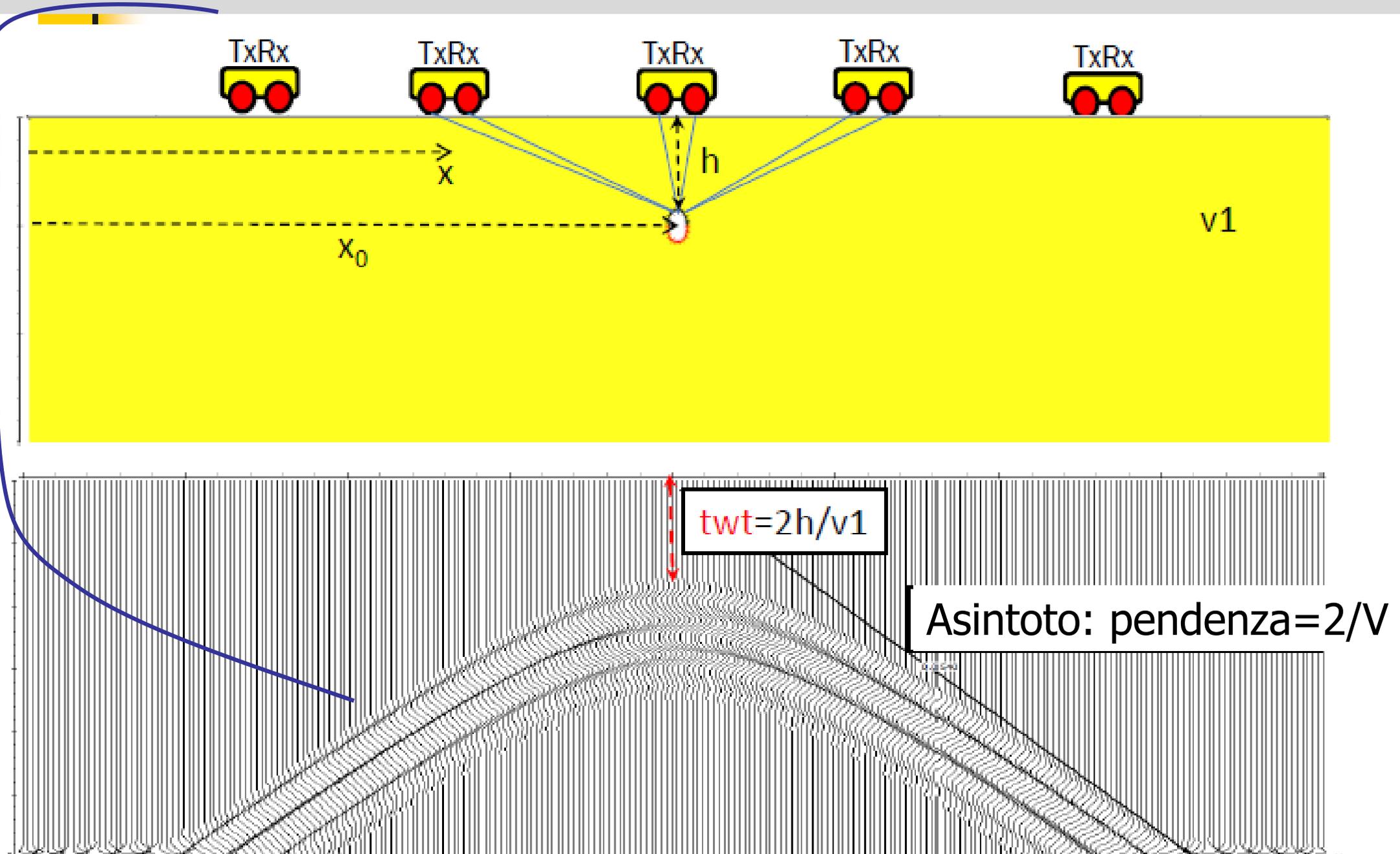
Formulazione matematica:

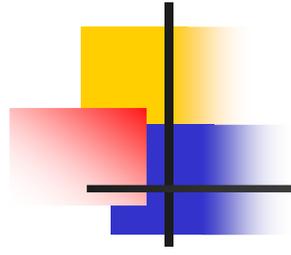


$$V_{media} = \frac{1}{2} (\text{pendenza 'linea nera'})^{-1}$$

GPR: acquisizione dati con antenna monostatica:

TWT: tempo doppio di volo in presenza di corpo puntiforme si verificano le diffrazioni

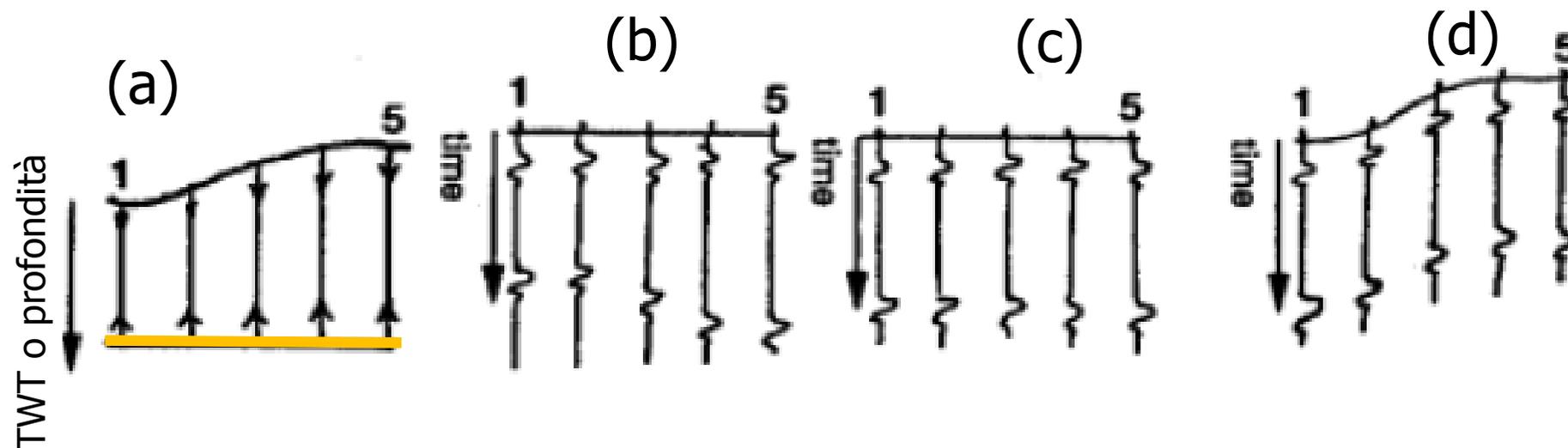




Correzione statica

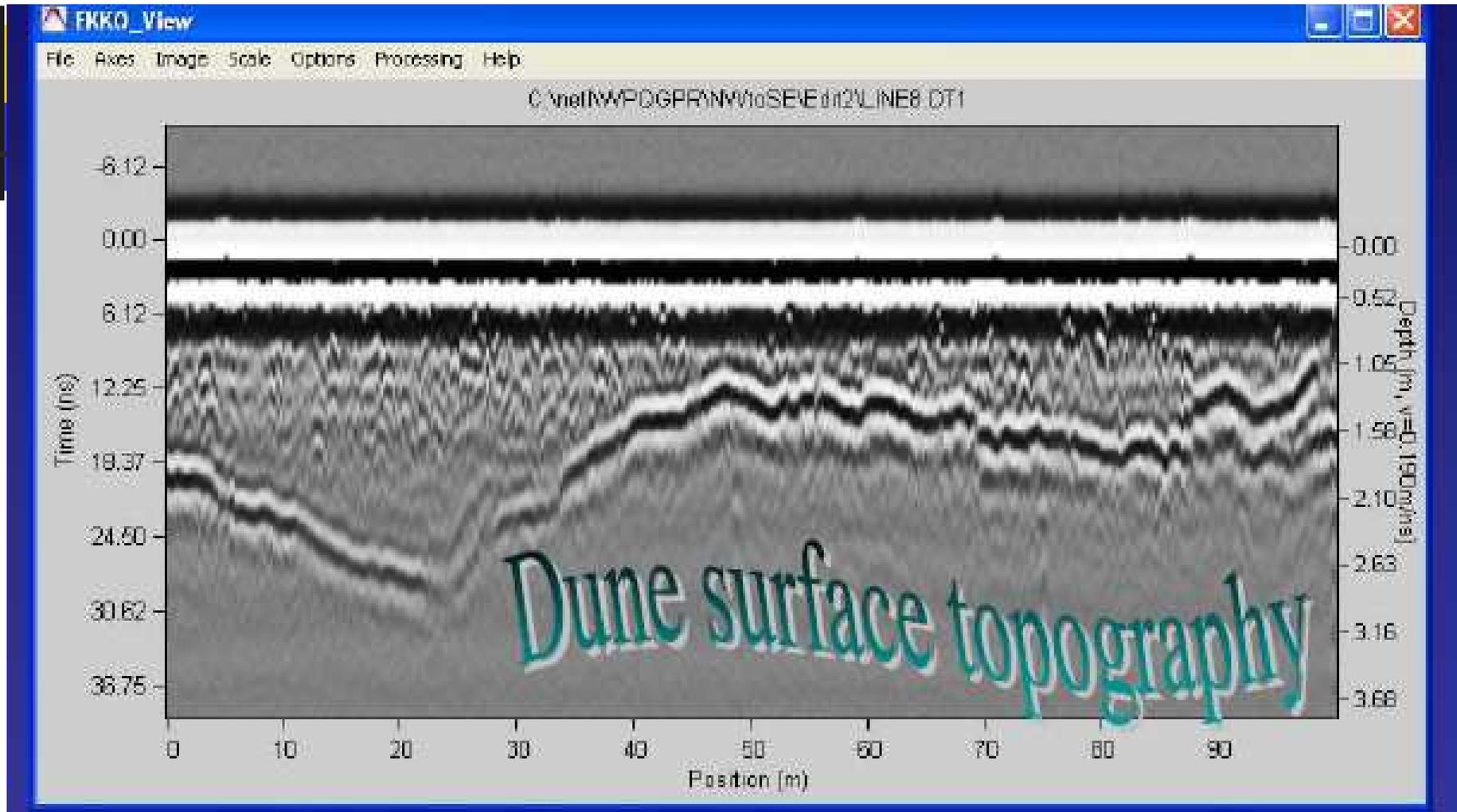
GPR: data processing – correzione statica dati GPR

Sezioni radar acquisite su superficie con topografia
Superficie riflettente è orizzontale

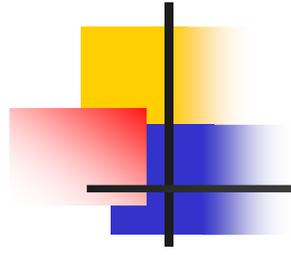


- (a) Discontinuità orizzontale – topografia non pianeggiante
- (b) Sezione non corretta
- (c) Sezione corretta (tempi di volo TWT riferiti ad un datum di riferimento,
- (d) Spostamento dei tempi TWT per replicare la topografia

GPR: data processing – cosa succede se non viene effettuata la correzione statica (!)



Possiamo arrivare a considerazioni sbagliate. La riflessione che si vede nella sezione radar è dovuta solo alla variazione topografica non compensata o corretta.

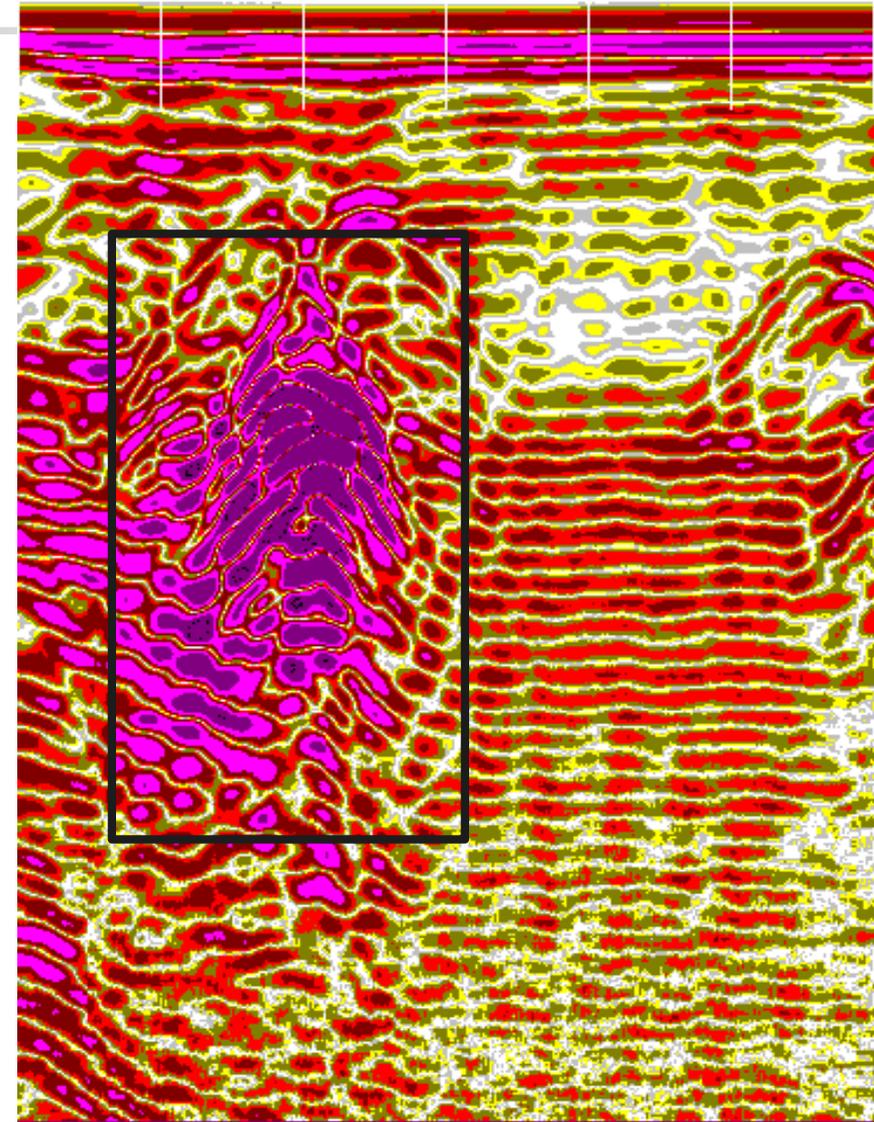


Tipo applicazioni
superficiale
sottoservizi

Costruzione di una sezione del sottosuolo col georadar

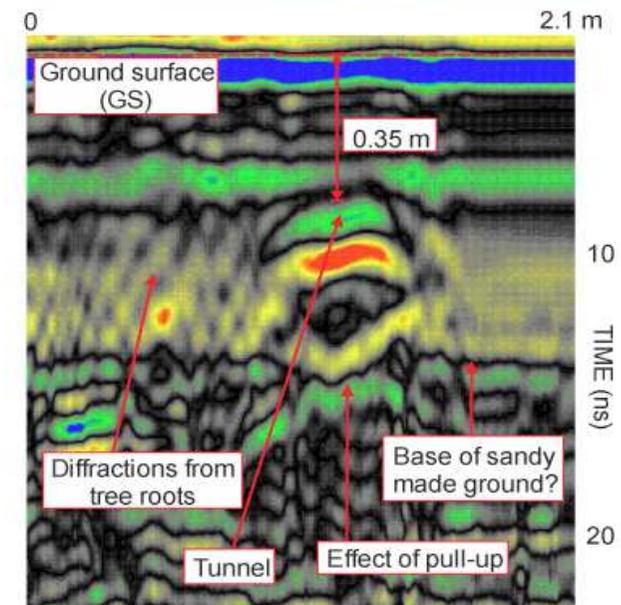
scavo area urbana
Porta Reno, FE
(400 MHz)

Sezione GPR migrata



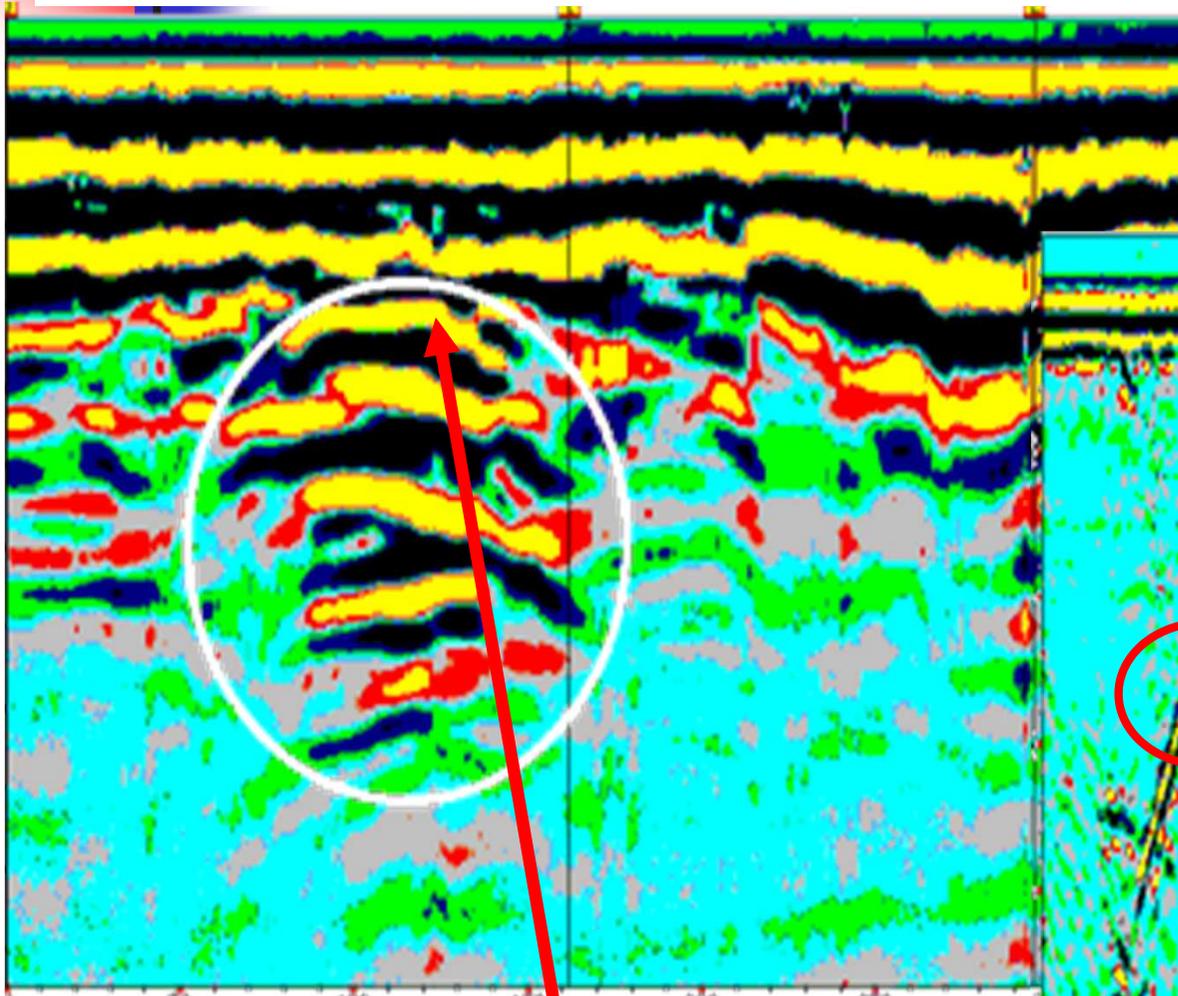
GPR: verifica dimensioni voragine,
Serve anche per determinare la Vem
se la profondità è nota

Antenna: GSSI (400 MHz)
Monostatica

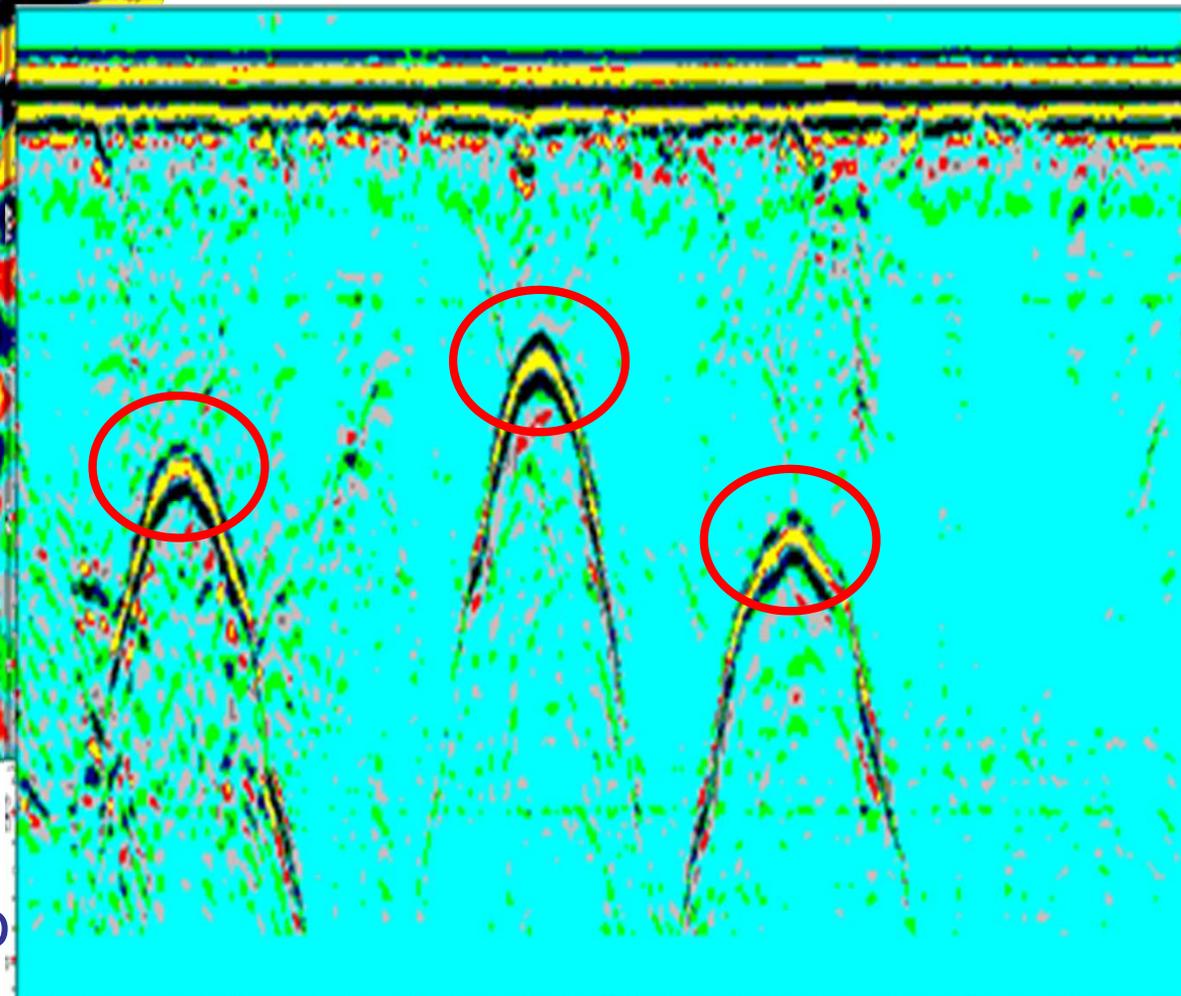


GPR: esempi di anomalie - sottoservizi

Singola – scavo o possibile cavità



Condotte



Inversione di polarità
coefficiente di riflessione negativo

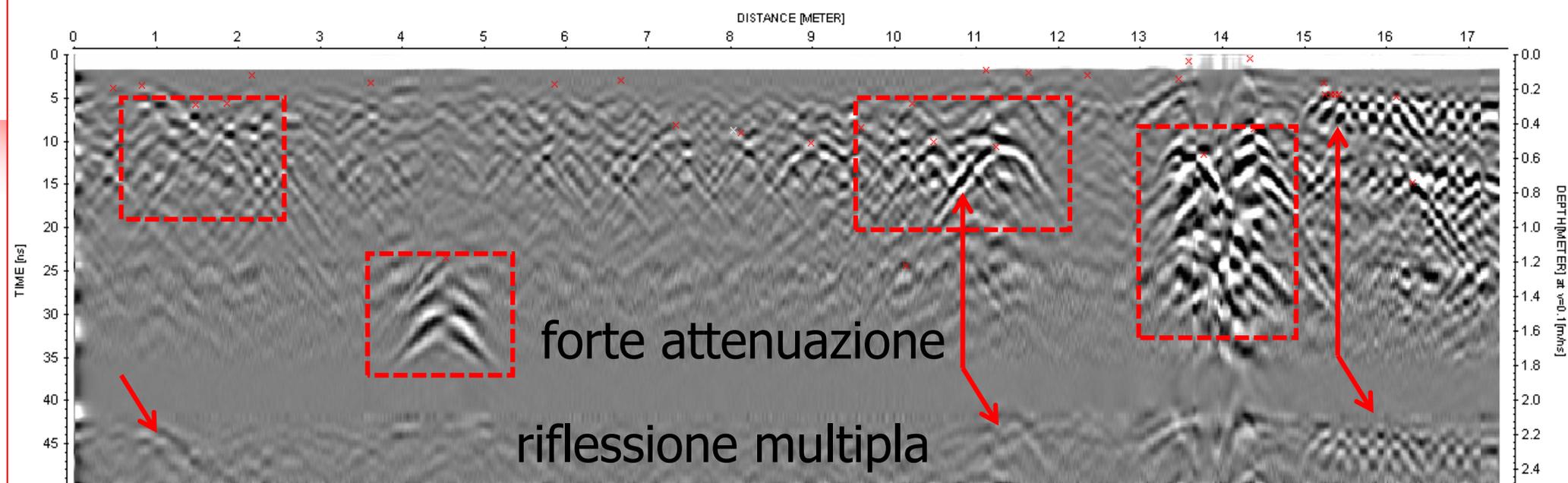
GPR: 400 MHz - monostatica

Zona industriale

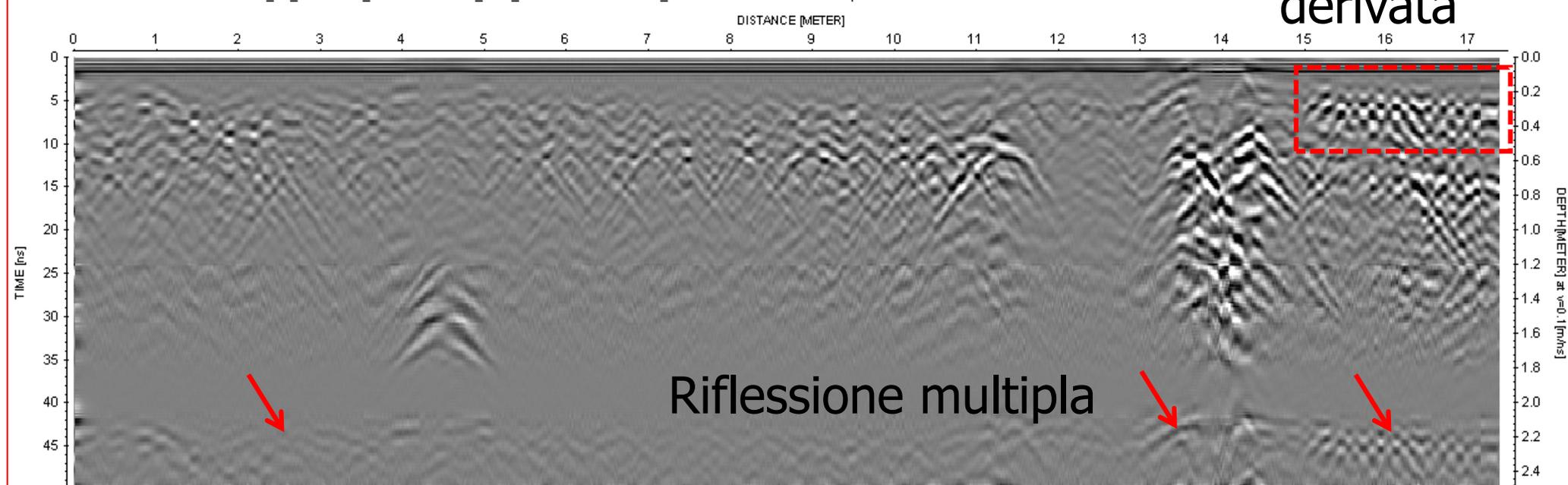


GPR: 400 MHz – monostatica **Zona industriale sezione elaborata**

1. E:\NASSER\PROGETTI\2015\STUDIO_BL_BOLOGNA_28-07-2015\DATI_GPR_3DR\PROC\DATA\DAT_2129.03T / traces: 1006 / samples: 376



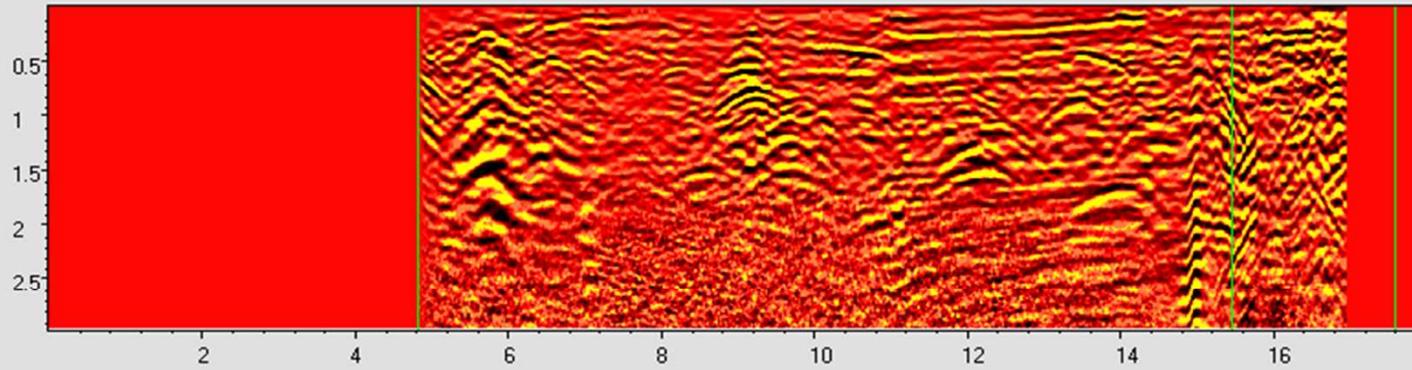
2. E:\NASSER\PROGETTI\2015\STUDIO_BL_BOLOGNA_28-07-2015\DATI_GPR_3DR\PROC\DATA\DAT_2129.04T / traces: 1006 / samples: 376



Area: piazzale ingresso chiesa - Profilo 1 (-0.5, 3m) direzione N-S

Depth [m]

TID10001.D00



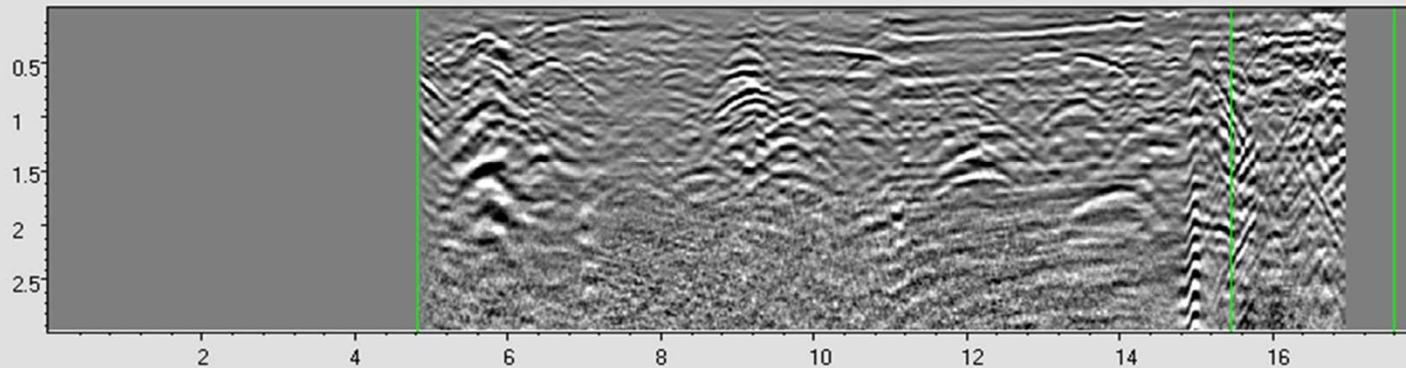
X[m]

Move start time
Start time profile
Subtract mean
Vertical bandpass filter (TD)
Linear gain
Smoothed gain
Horizontal bandpass filter (TD)



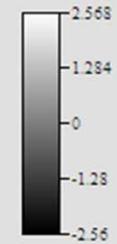
Depth [m]

TID10001.D00



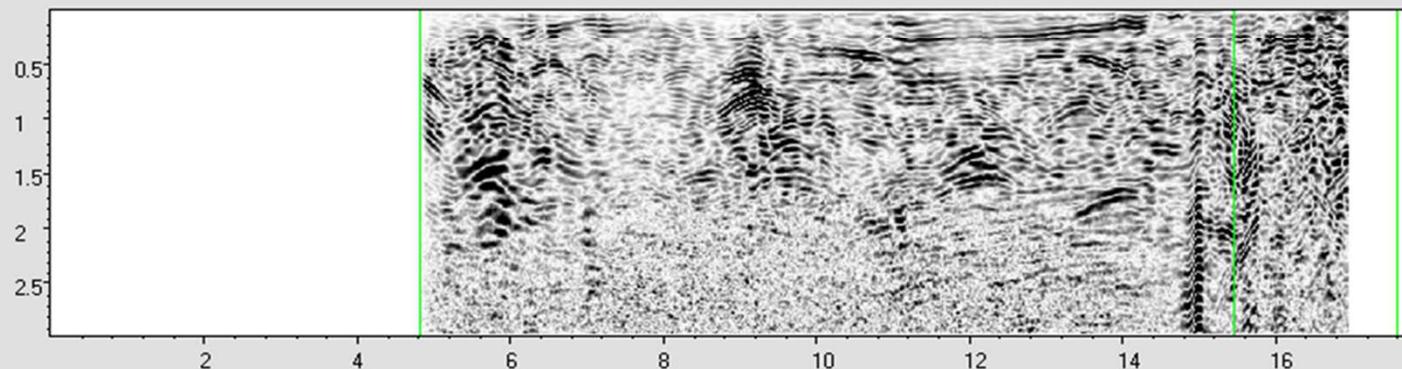
X[m]

Move start time
Start time profile
Subtract mean
Vertical bandpass filter (TD)
Linear gain
Smoothed gain
Horizontal bandpass filter (TD)



Depth [m]

TID10001.D00

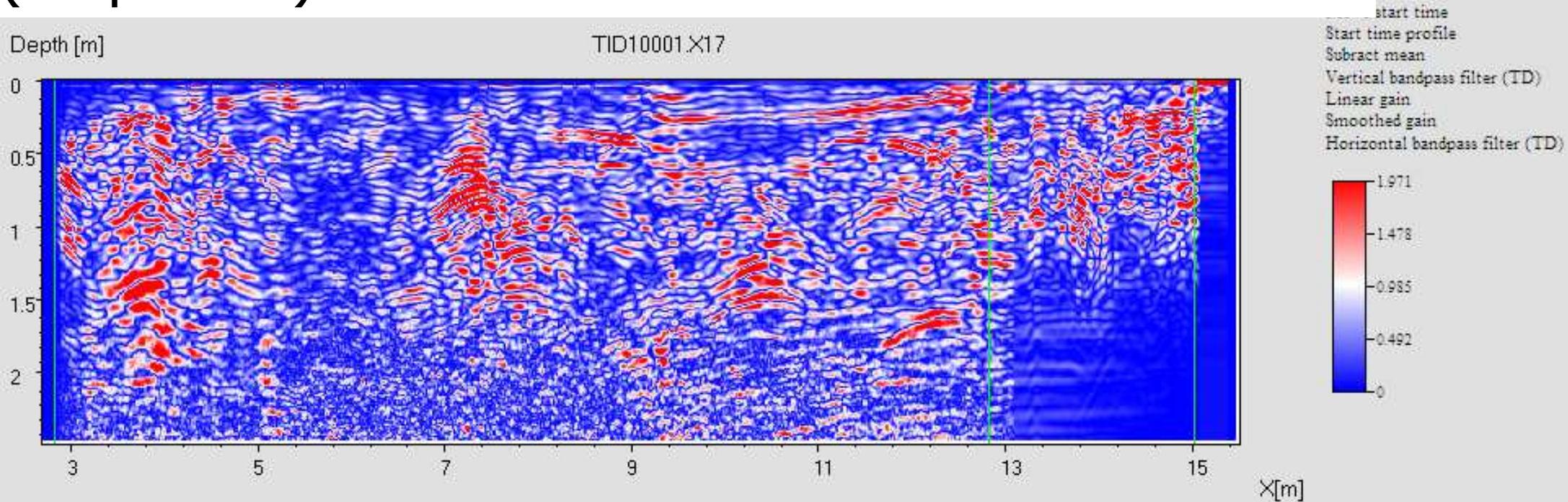


X[m]

Move start time
Start time profile
Subtract mean
Vertical bandpass filter (TD)
Linear gain
Smoothed gain
Horizontal bandpass filter (TD)

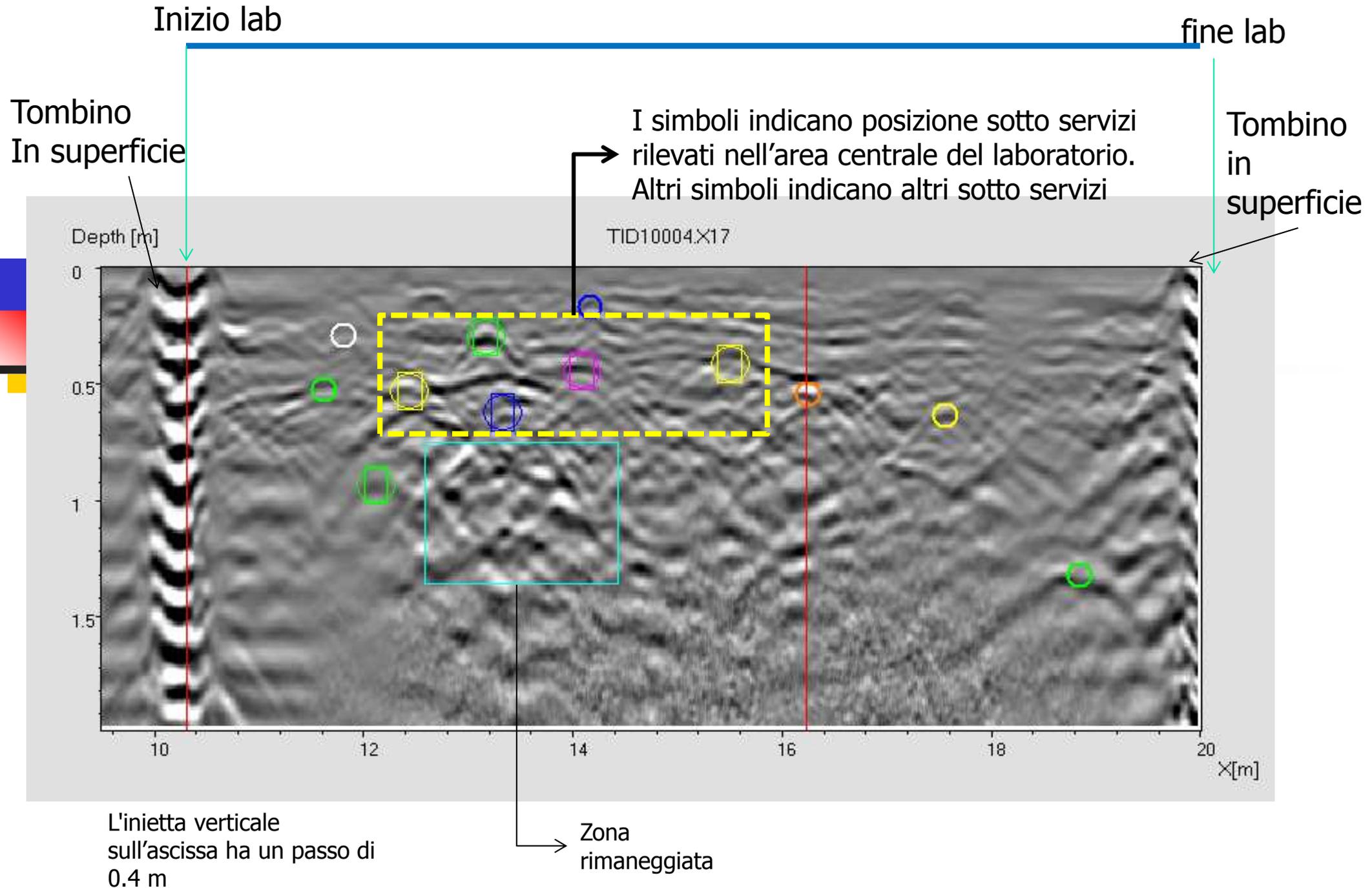


Rappresentazione grafica dei segnali riflessi mediante il calcolo del modulo dell'ampiezza (Ampiezza^2)



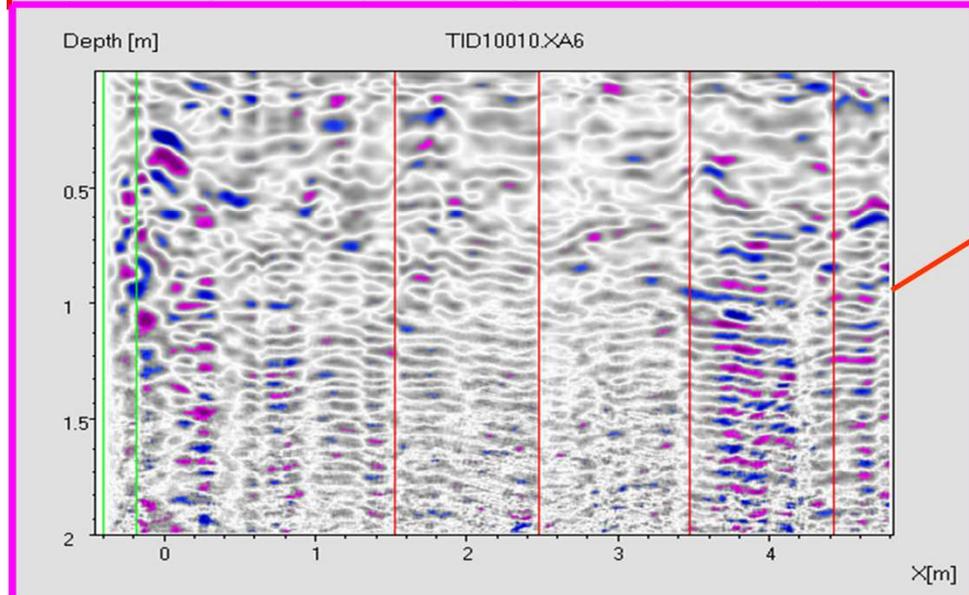
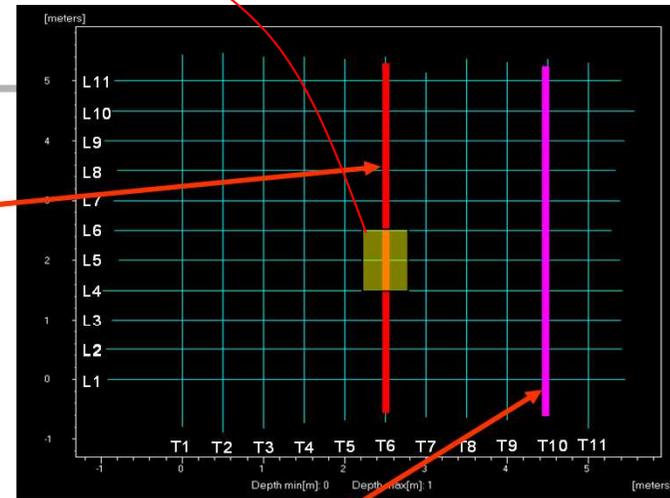
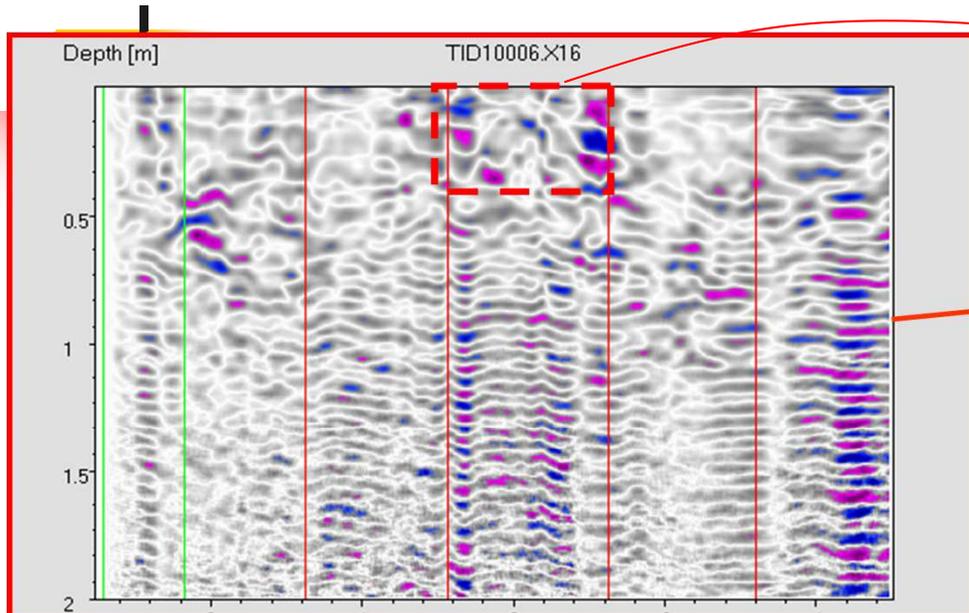
Area: polo scientifico – davanti al blocco F – lato lab. Sedimentologia

Profilo 1 direzione NE-SW. Antenna: 400 MHz



GPR: 400 MHz, monostatica

Applicazione: ricerca forense (sepoltura illegale); simulazione



nessun'anomalia

confronto fra sezioni profondità sopra la fossa (a sinistra in alto) e fuori (in basso). Il radargramma in alto evidenzia la presenza di segnale riflesso ai bordi dello scavo, mentre quello in basso conferma l'assenza di questi segnali.

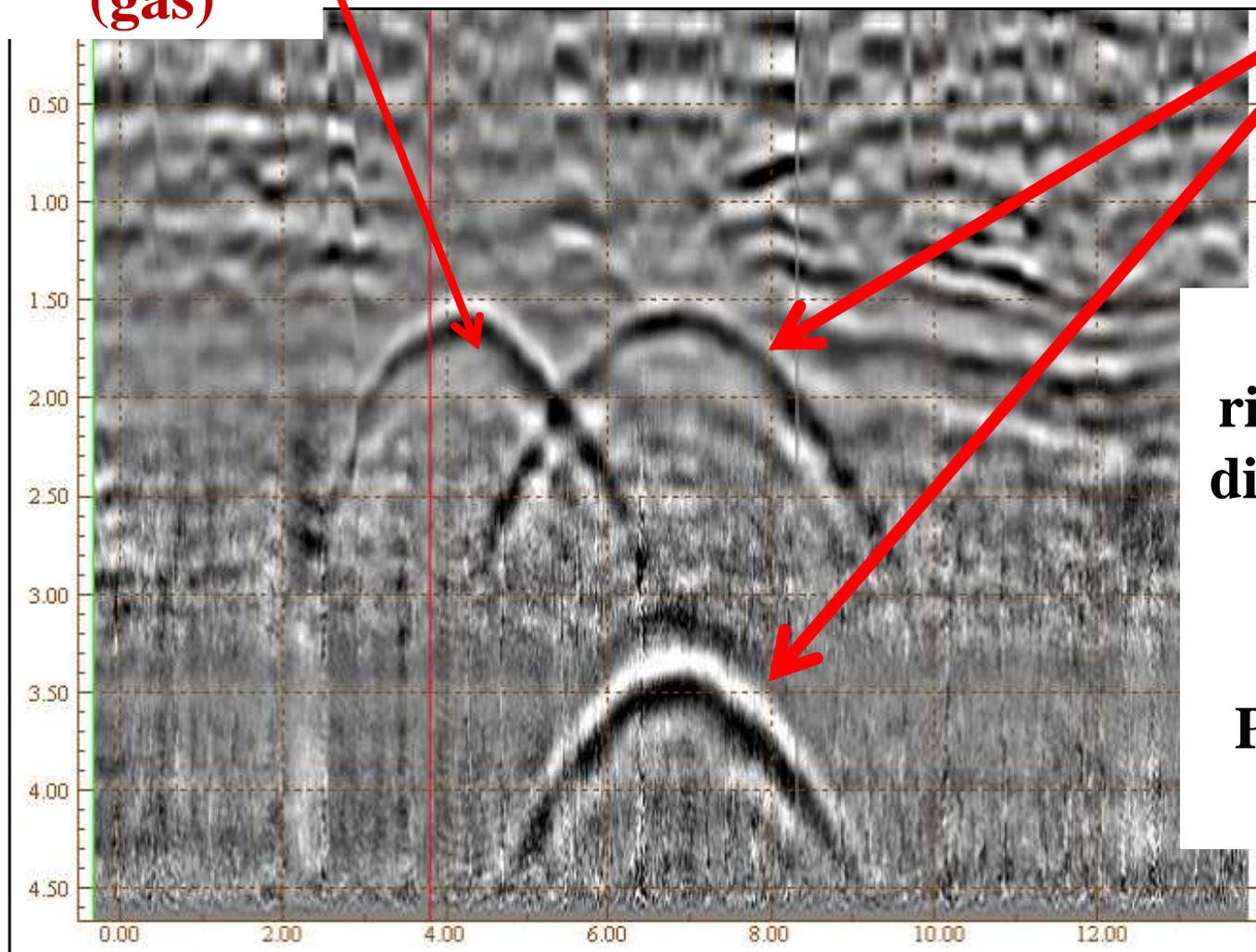
GPR: criteri per l'individuazione di anomalie nella sezione radar – esempio acquedotti e gasdotti

Profilo acquisito con antenna da 100

MHz

**Tubazione
metallica
(gas)**

**Acquedotto in cemento;
un seconda riflessione è
generata dalla base**

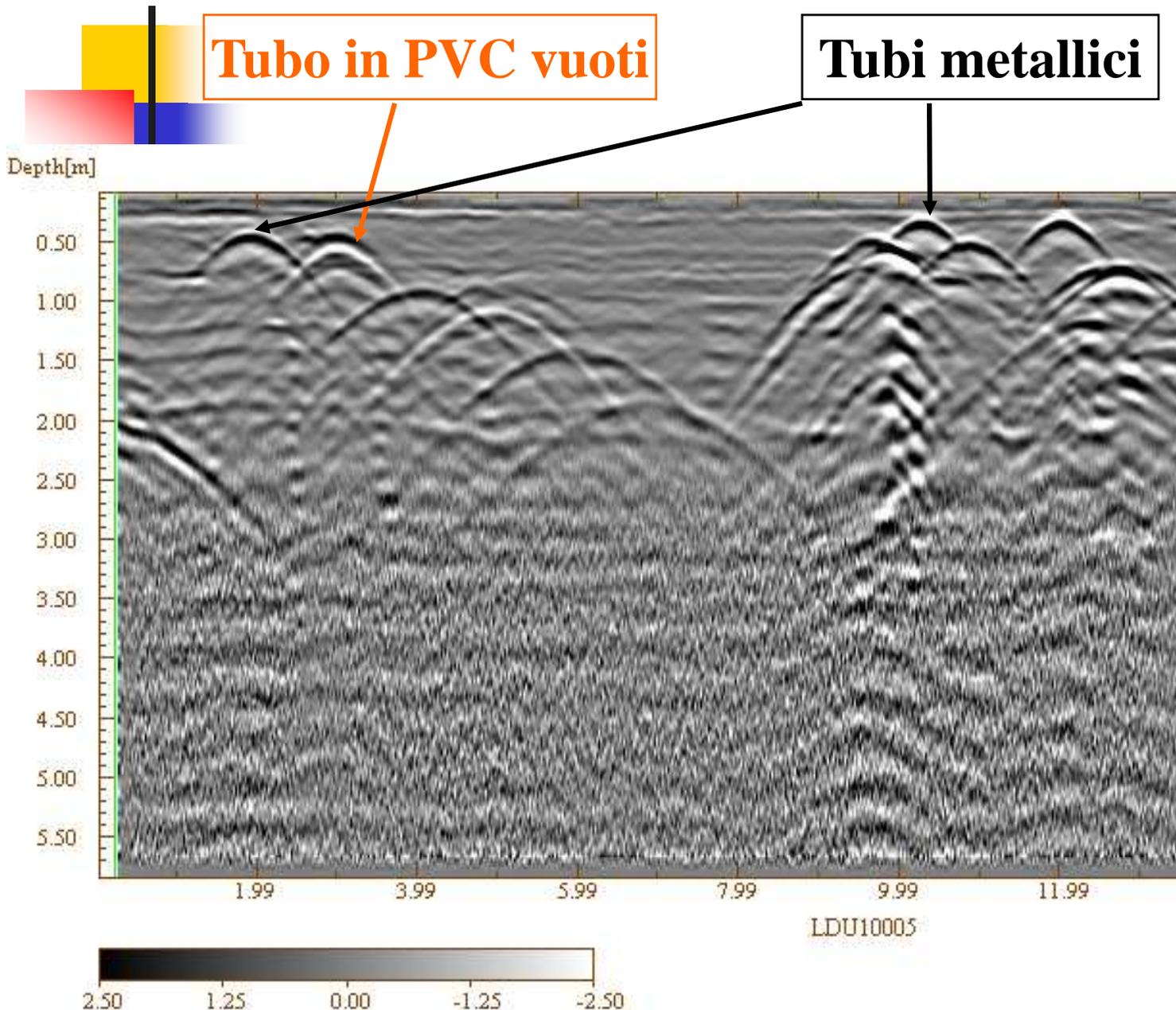


**Il ritardo tra le due
riflessioni è funzione del
diametro della tubazione**

**La fase del secondo
impulso è invertita**

**Permittività dielettrica
elevata (acqua)**

GPR: criteri per l'individuazione di anomalie nella sezione radar – tipo condutture (tubi)



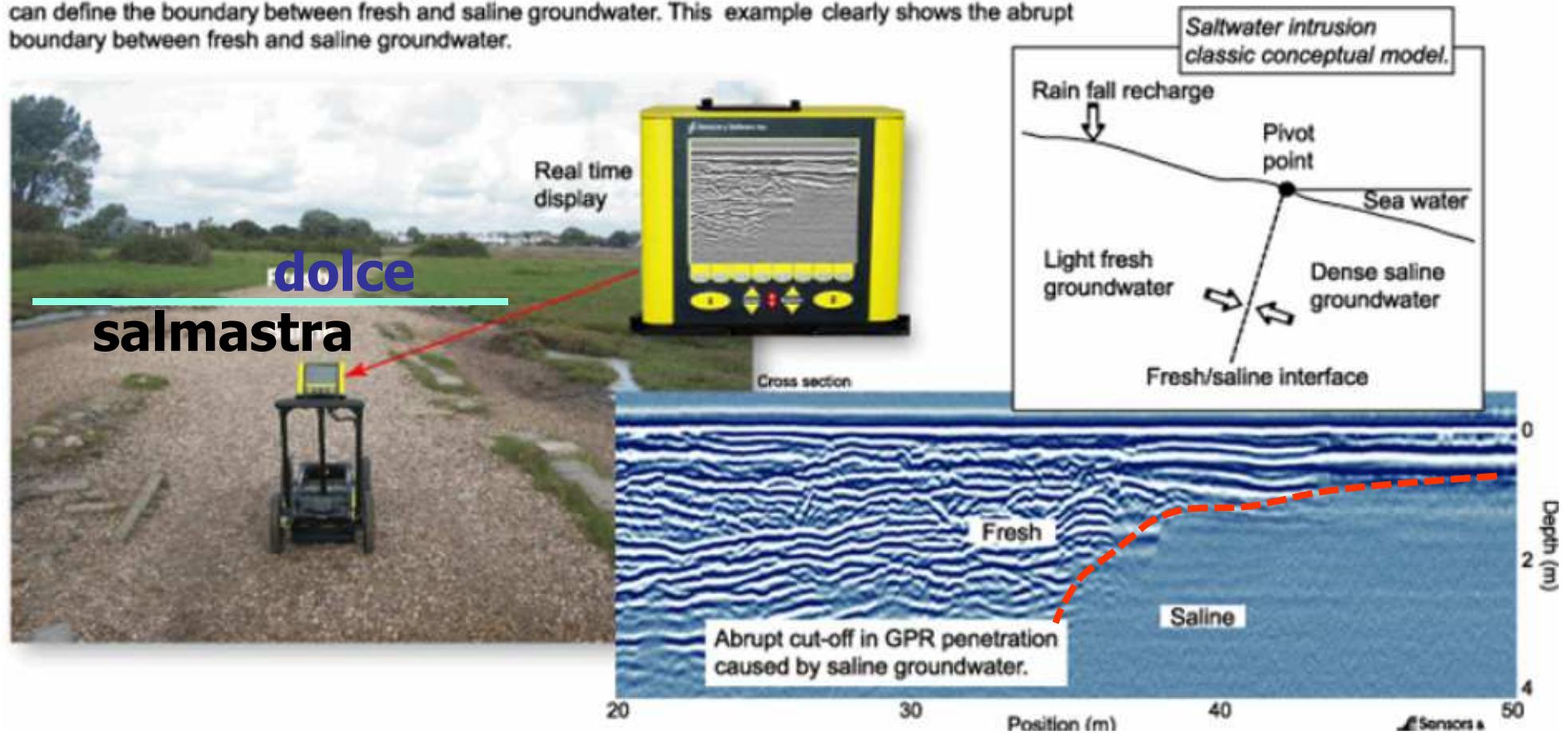
Quando la permittività dielettrica relativa di un oggetto è inferiore a quella del mezzo che lo circonda (es. cavità o tubazione vuota), non si produce inversione di fase dell'onda riflessa.

Al contrario, per oggetti metallici si produce inversione di fase

GPR: 400 MHz, monostatico

Applicazione: interfaccia acqua dolce acqua salmastra vicino alla linea di costa

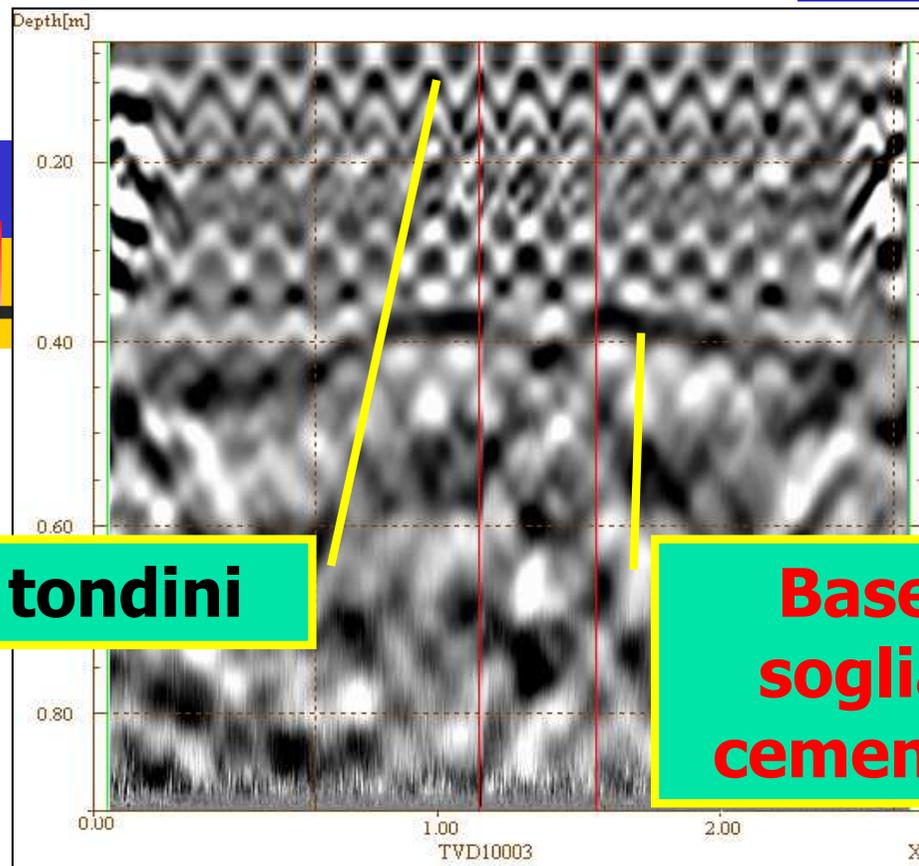
In coastal areas, the supply of fresh groundwater can be disrupted by the influx of saltwater into shallow aquifers. GPR is highly sensitive to the presence of saline water. Reflection GPR in coastal areas often can define the boundary between fresh and saline groundwater. This example clearly shows the abrupt boundary between fresh and saline groundwater.



GPR: criteri per l'individuazione di anomalie nella sezione radar – tipo condutture (tubi)

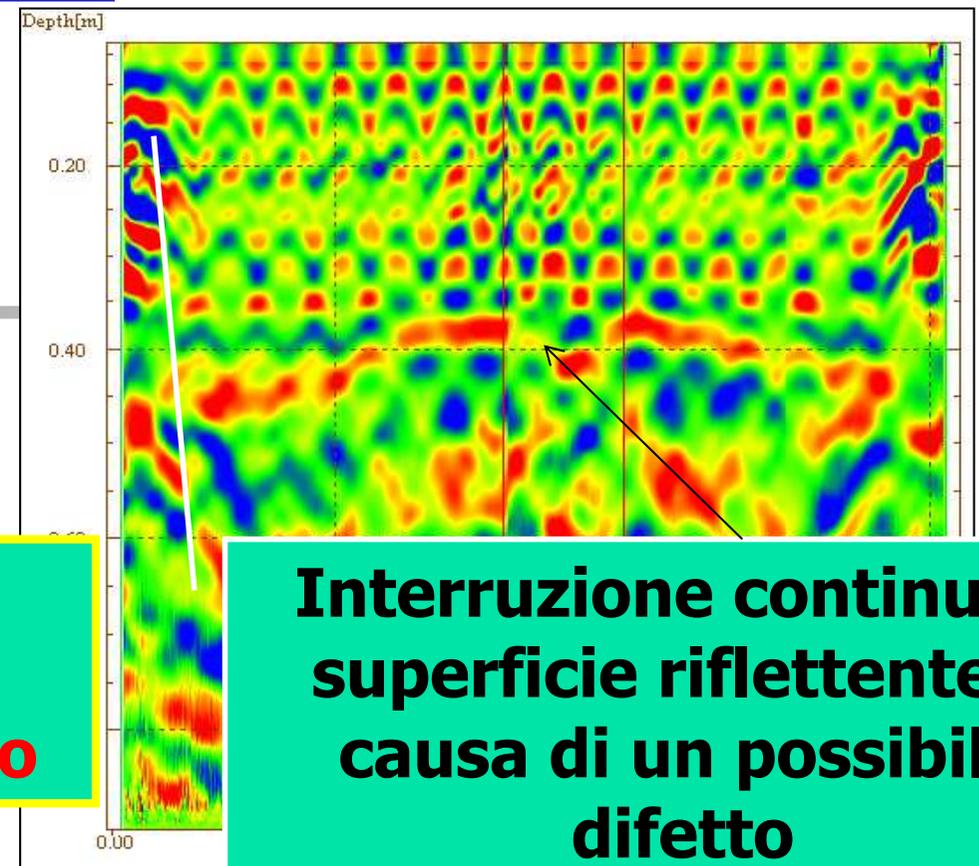
Indagini GPR con antenna ad alta frequenza per applicazioni strutturali

Risultati



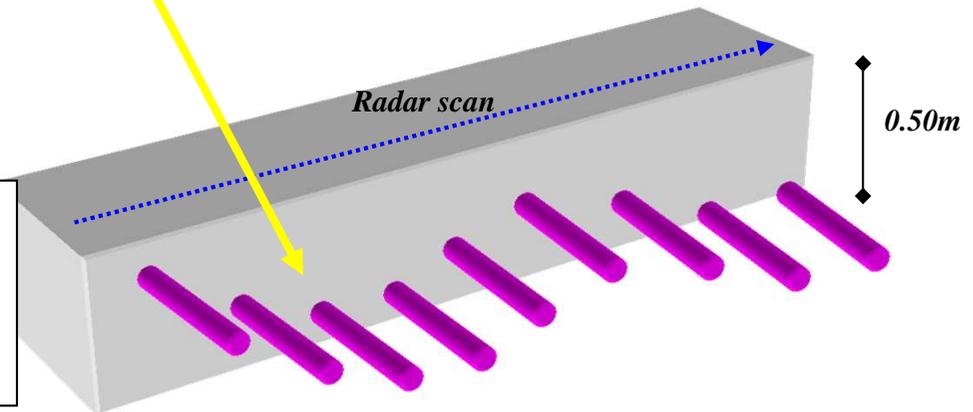
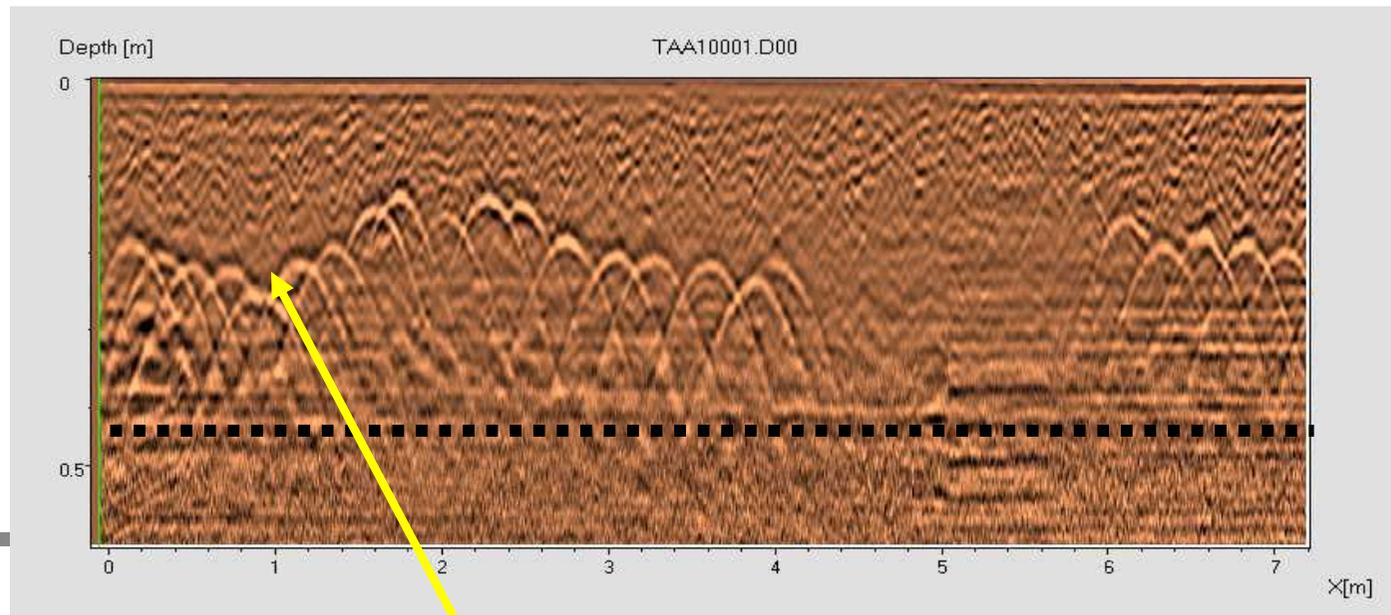
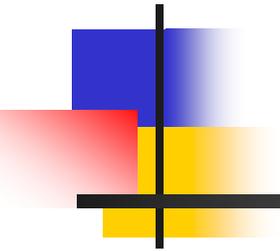
tondini

**Base
soglia
cemento**



**Interruzione continuità
superficie riflettente a
causa di un possibile
difetto**

GPR: criteri per l'individuazione di anomalie nella sezione radar – sottoservizi a profondità diverse (tubi)

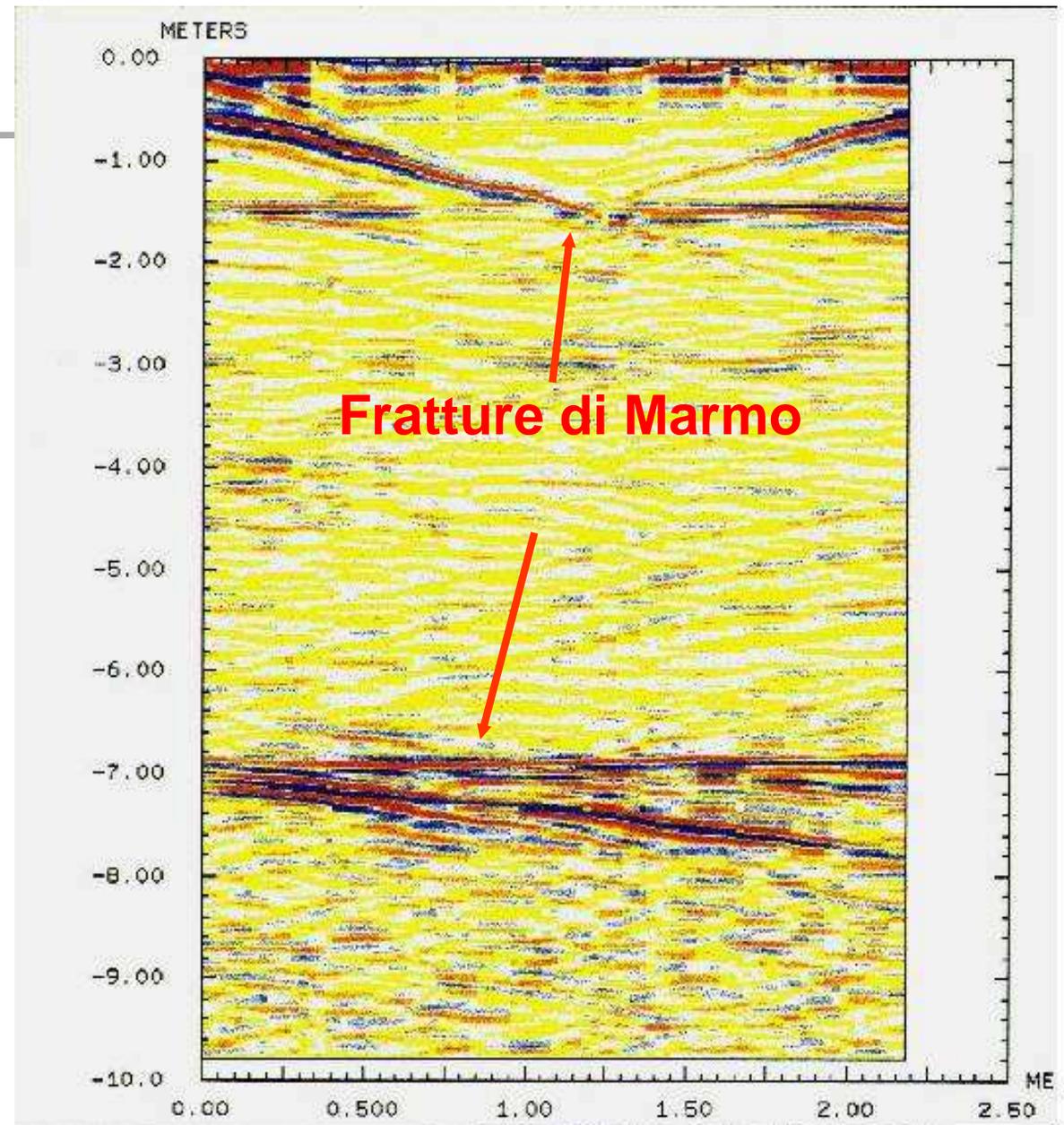
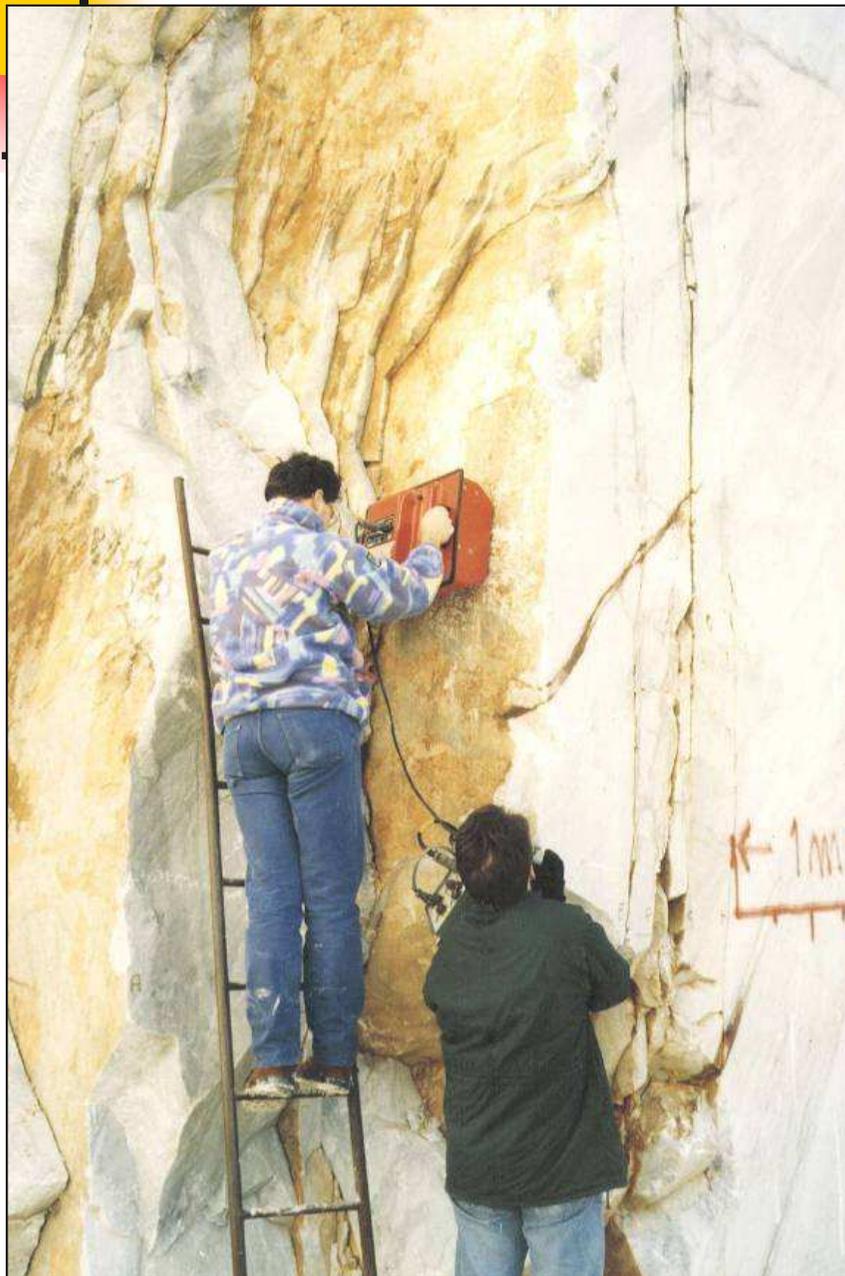


**pavimentazione in cemento
armato**

**Mappa radar a 2GHz acquisito lungo la giunzione di
due slab di cemento; ferri a diversa profondità**

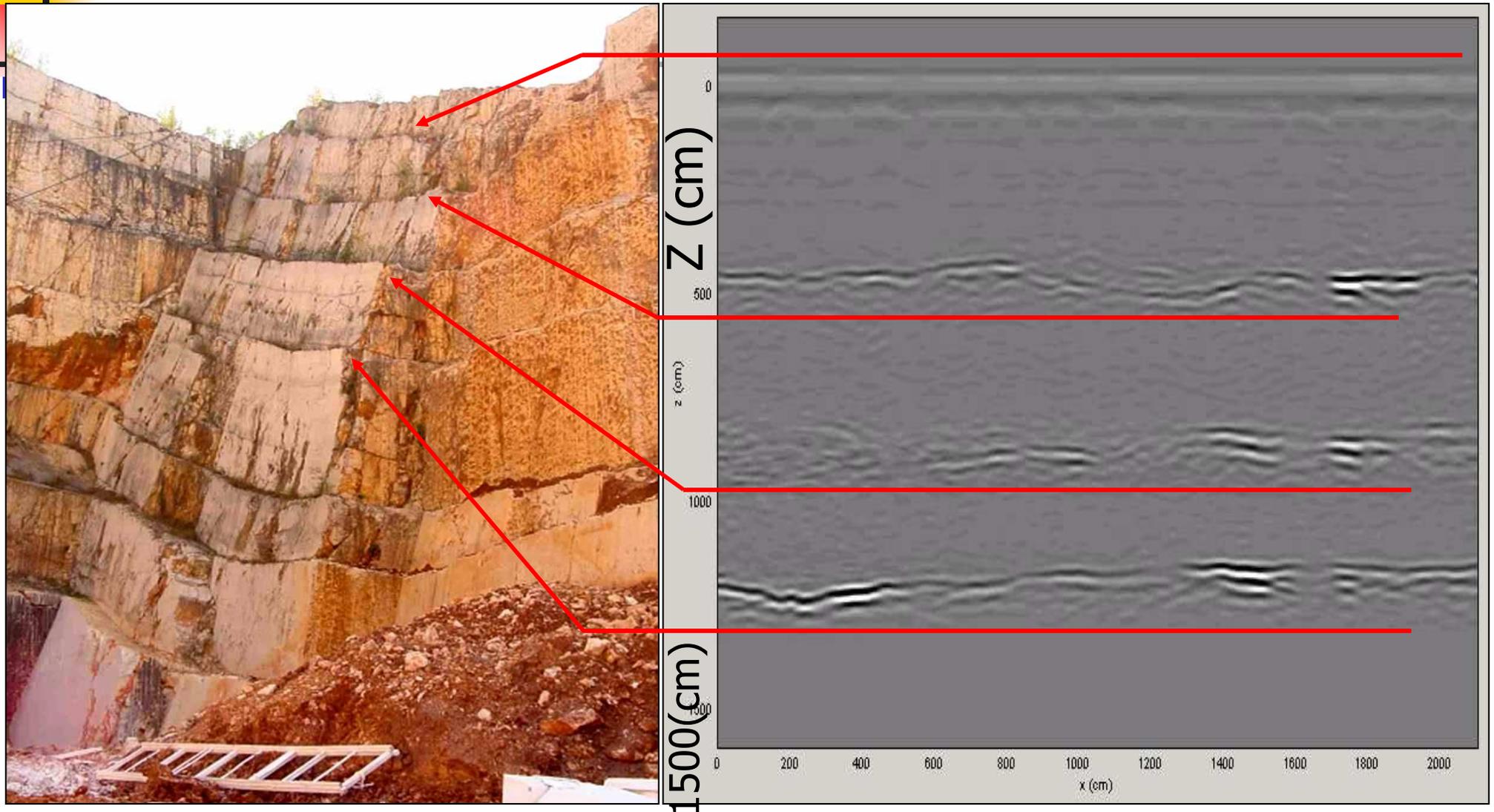
GPR: 200 MHz

Applicazione: individuazione **Fratture nei calcari (cave)**



GPR: 100 MHz

Applicazione: individuazione **Fratture nei calcari (cave)**

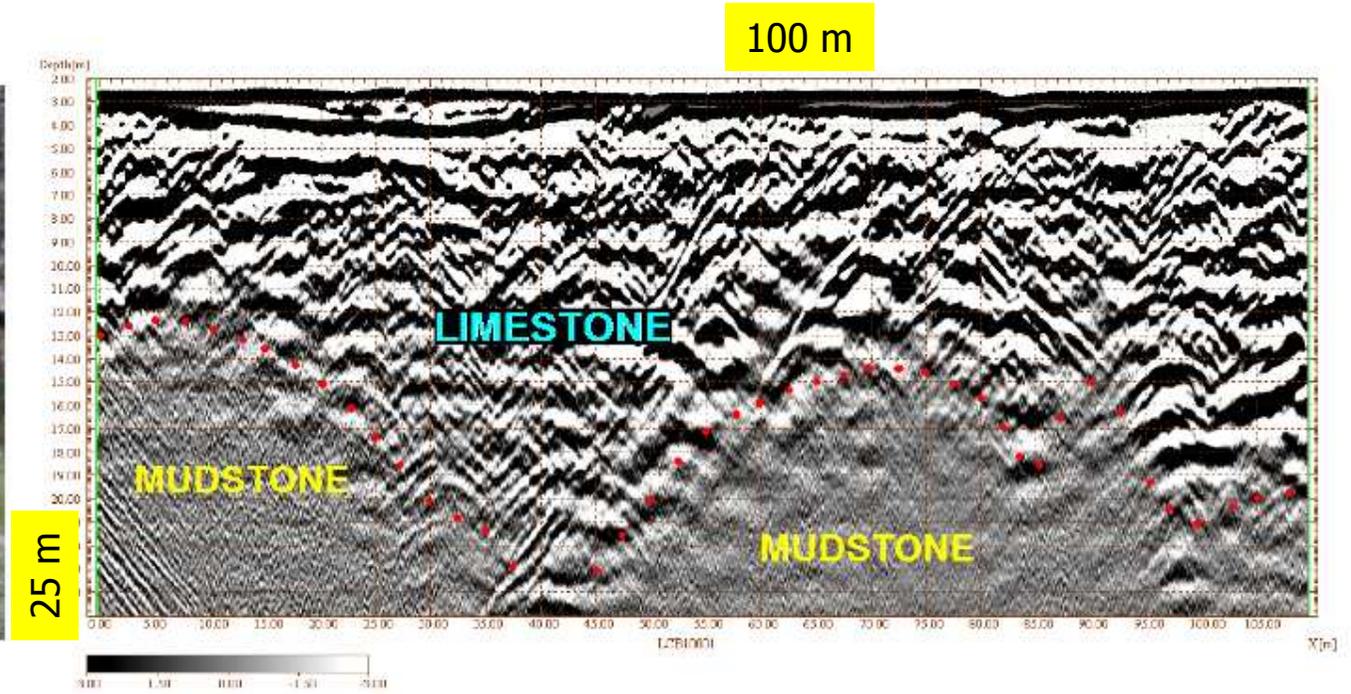


GPR: a bassa frequenza (25 MHz) – modello IDS, Pisa

Applicazione: **Cava di calcare (Toscana)**



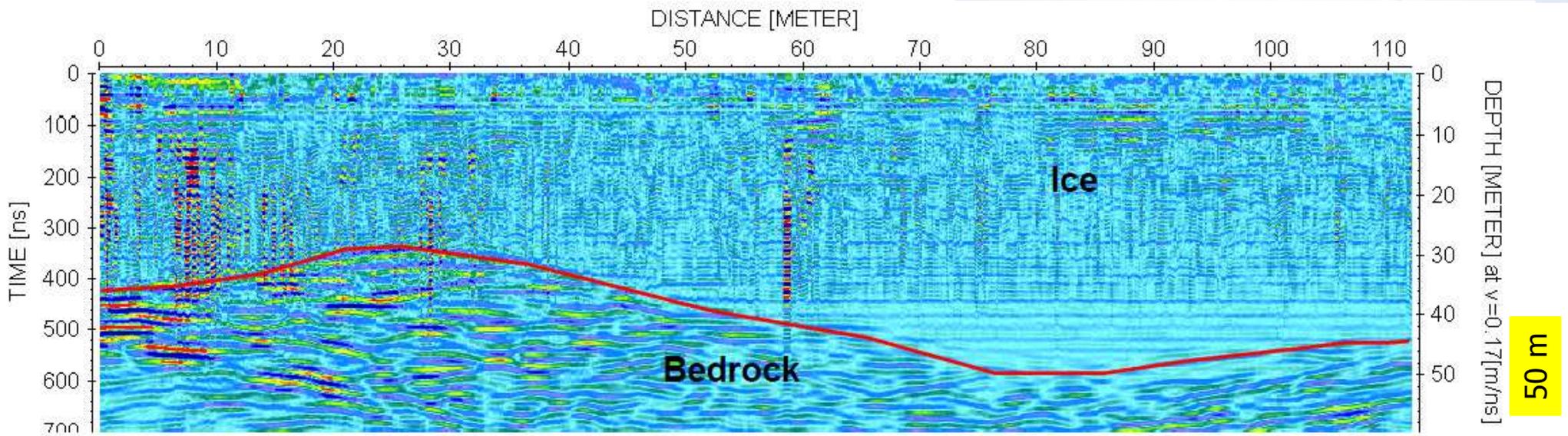
RIS Configuration with 25 MHz
Unshielded Antenna- Acquisition Phase



25 MHz Unshielded Antenna Results

GPR: a bassa frequenza (25 MHz) – modello IDS, Pisa

Applicazione: studio dei ghiacciai

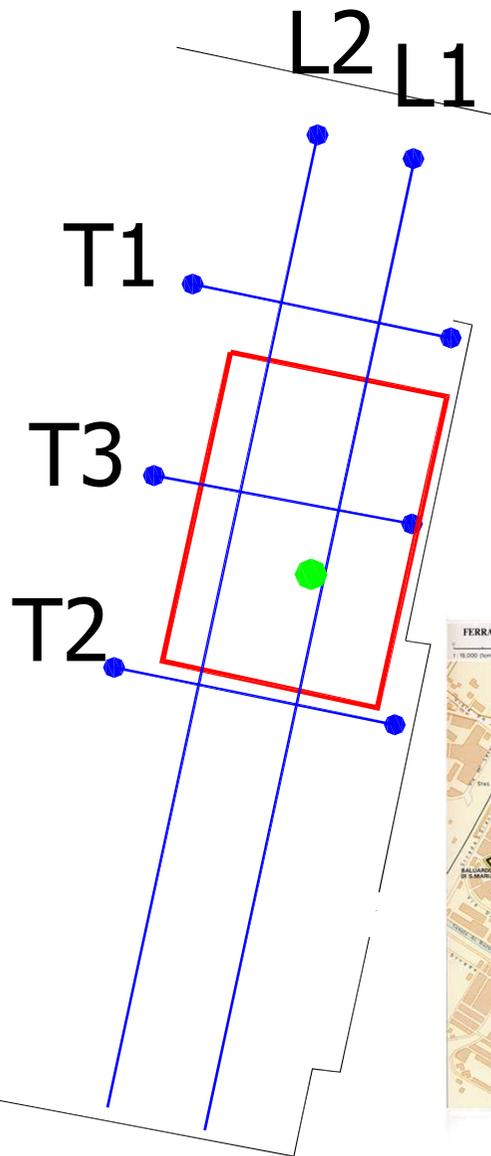


RIS Configuration with 25 MHz Unshielded Antenna- Acquisition Phase

Indagine nel cortile del Liceo Ariosto (Ferrara)

Ubicazione profili dell'indagine geofisica
Metodi: tomografia della resistività elettrica (ERT)
Georadar (GPR)

GPR



Profilo di ERT-GPR



Area rilevata con il GPR

T1

Profilo trasversale

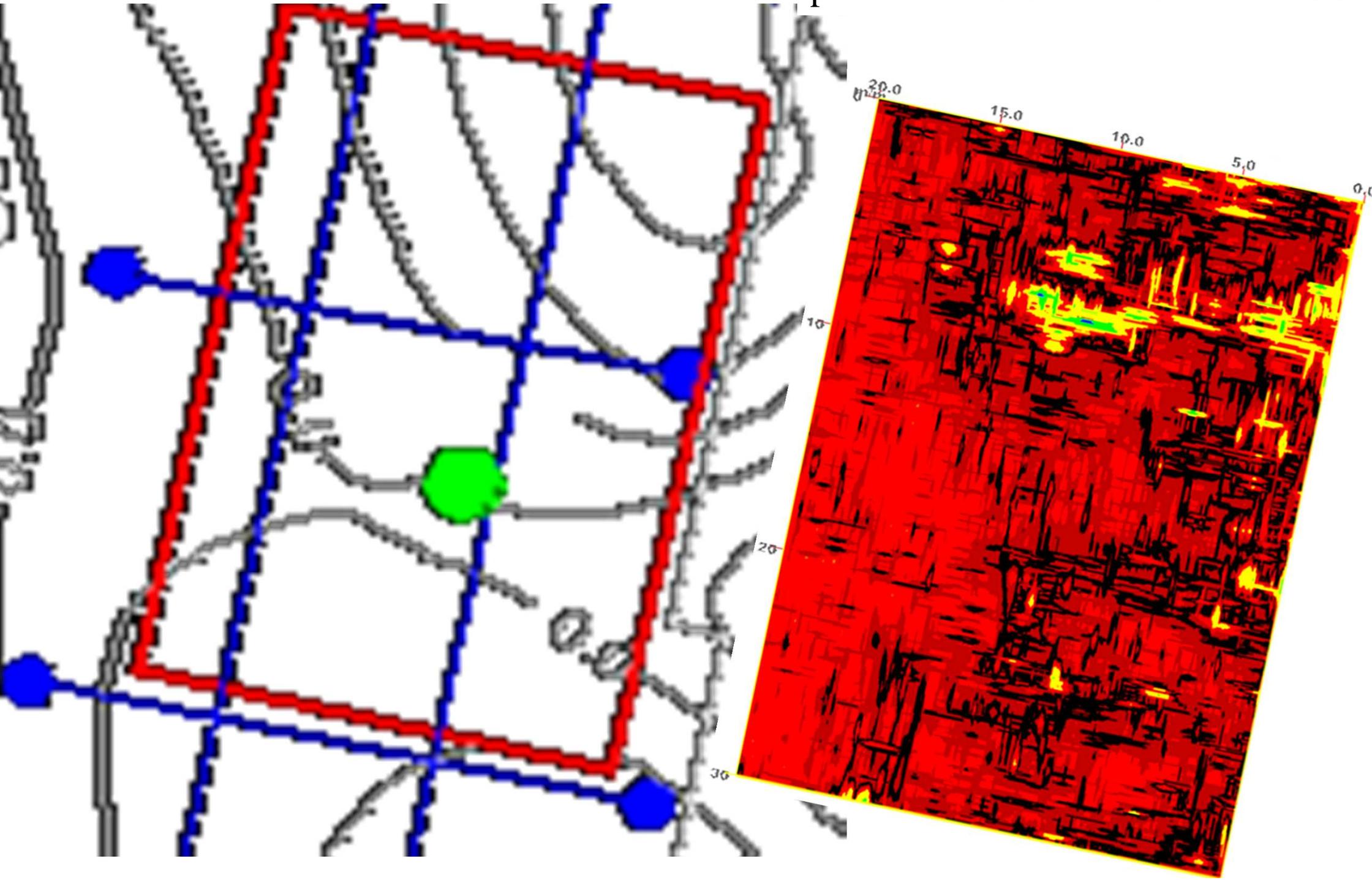
L1

Profilo longitudinale

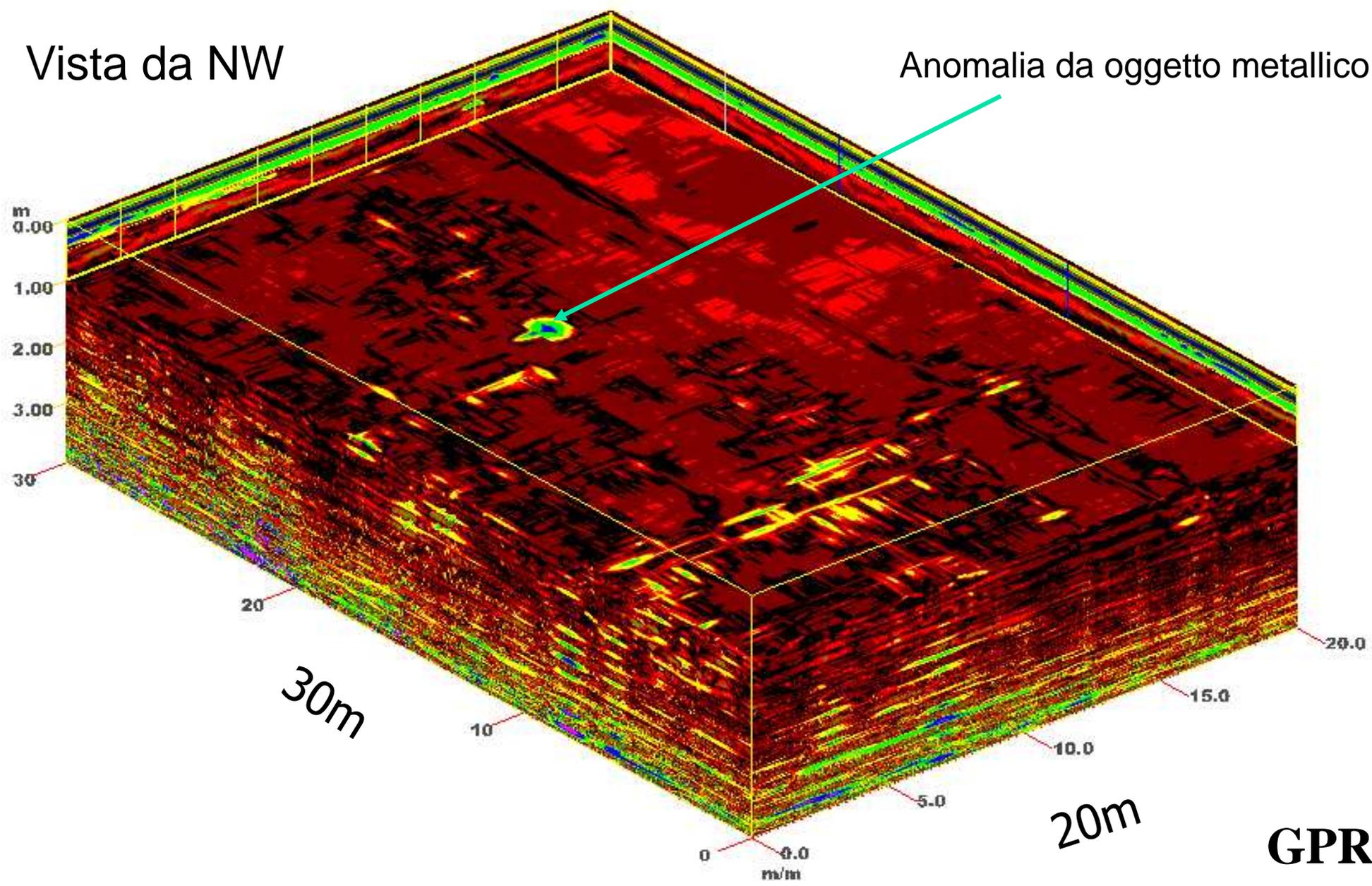


GPR/3D

C-scan slice : prof. 60 cm
permittività dielettrica stimata : 10.5

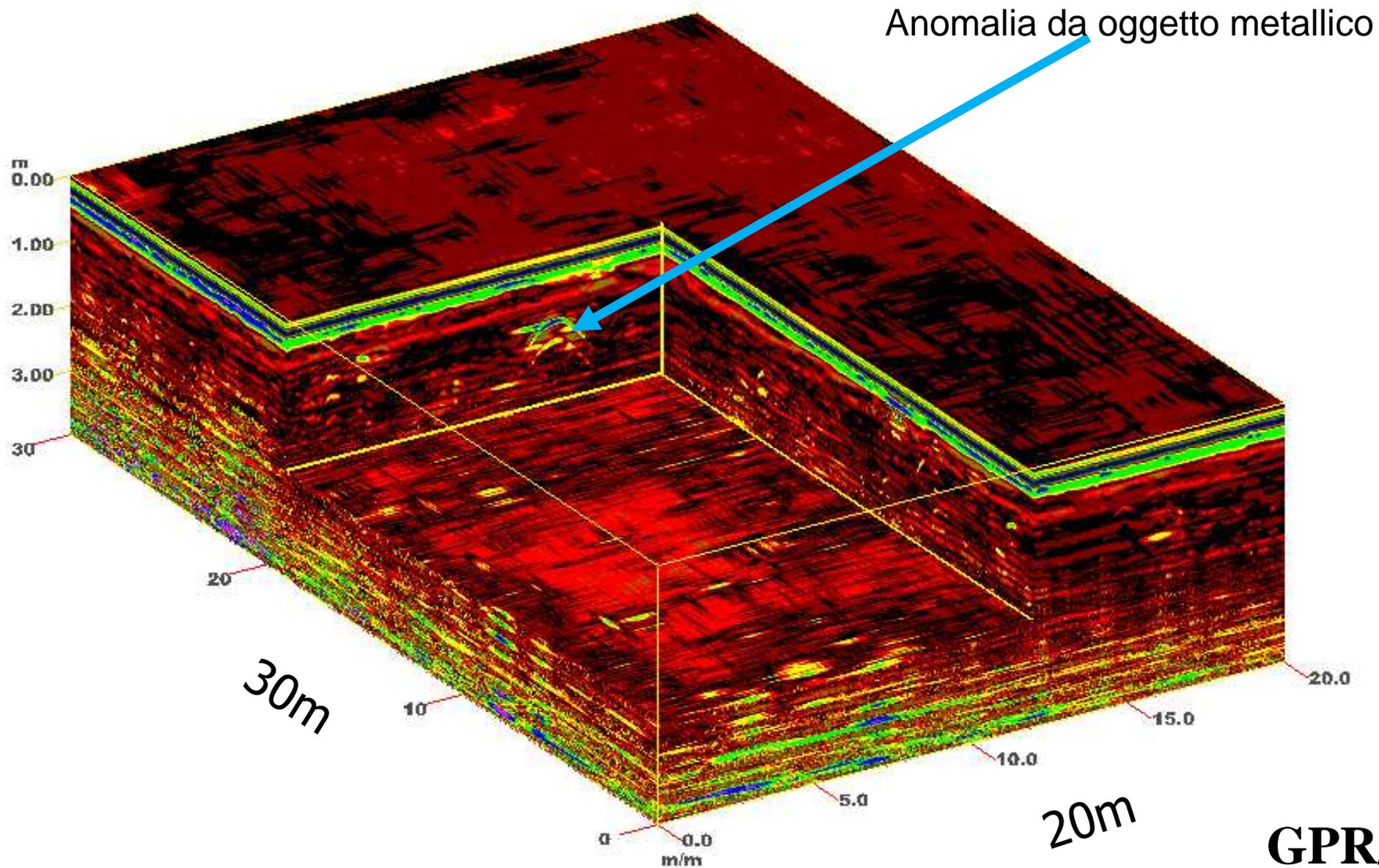


Indagine nel cortile del Liceo Ariosto (Ferrara): Tipo rappresentazione: C-SCAN



Indagine nel cortile del Liceo Ariosto (Ferrara): Tipo rappresentazione: volume 3D con tagli

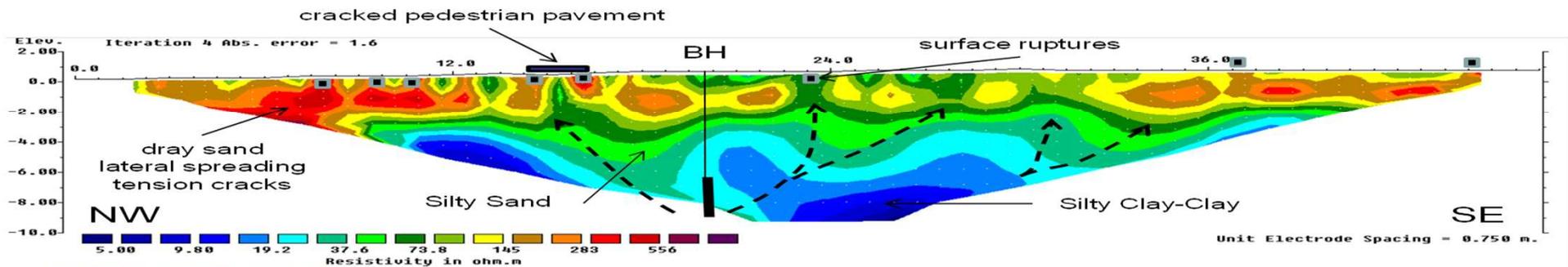
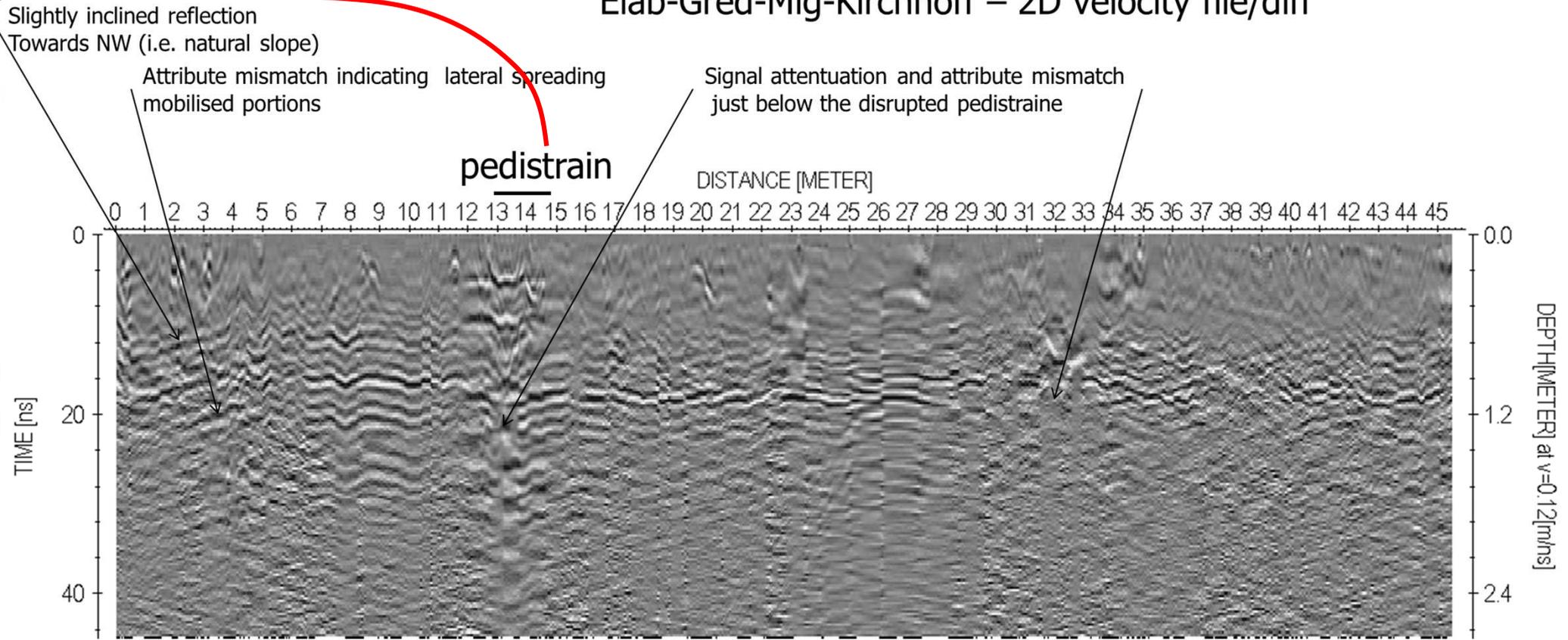
Vista da NW con ritaglio a $X = 19$ m e $Y = 12$ m



GPR/3D

GPR-ERT: Studio dei siti interessati dal fenomeno della liquefazione (Emilia, 2012, loc. San Carlo, Terra del Reno, 20 km a SW di Ferrara (400 MHz))

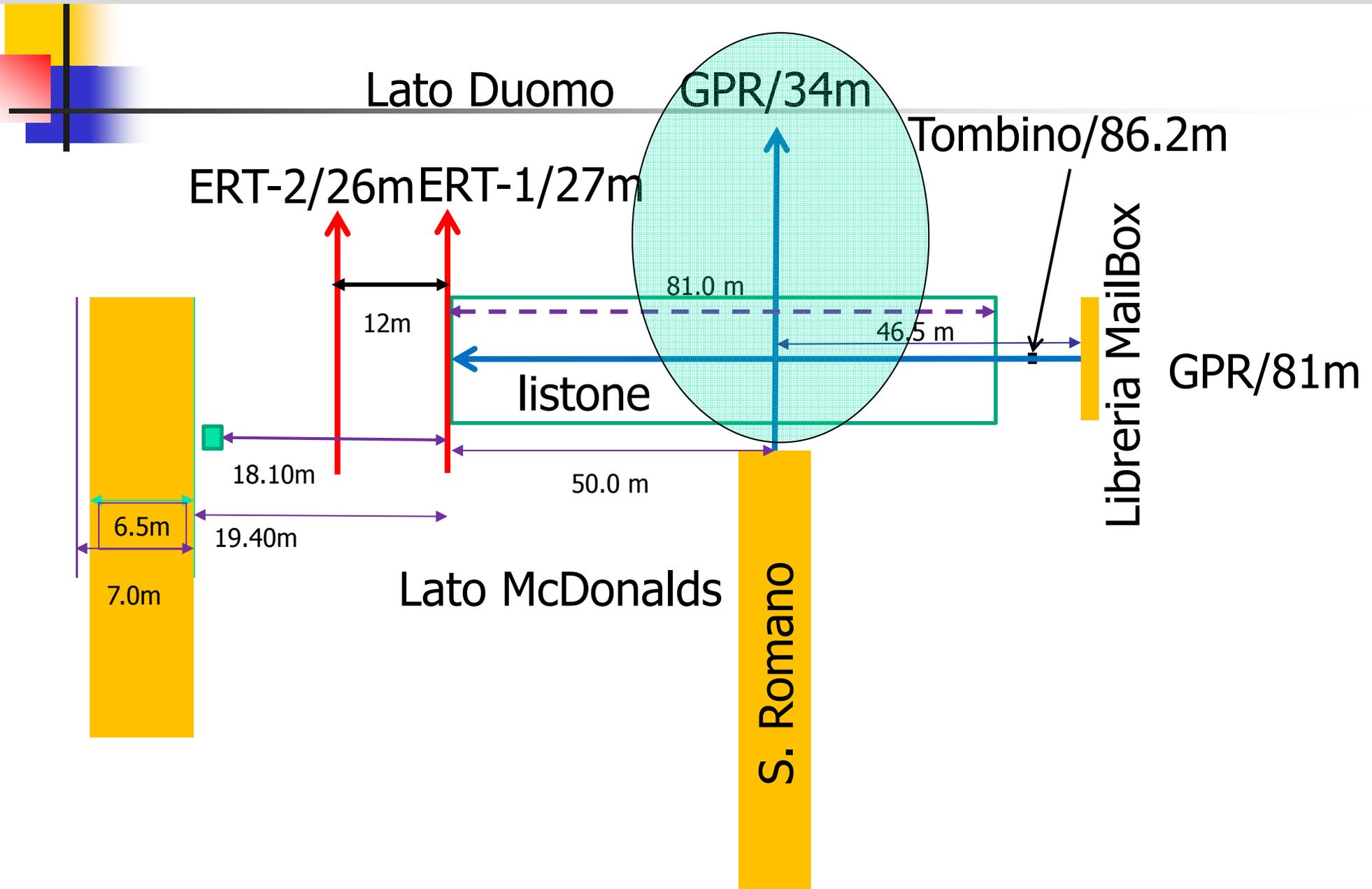
Elab-Gred-Mig-Kirchhoff – 2D velocity file/diff



GPR: 400 MHz (monostatica)

Applicazione: archeologia urbana, centro di Ferrara

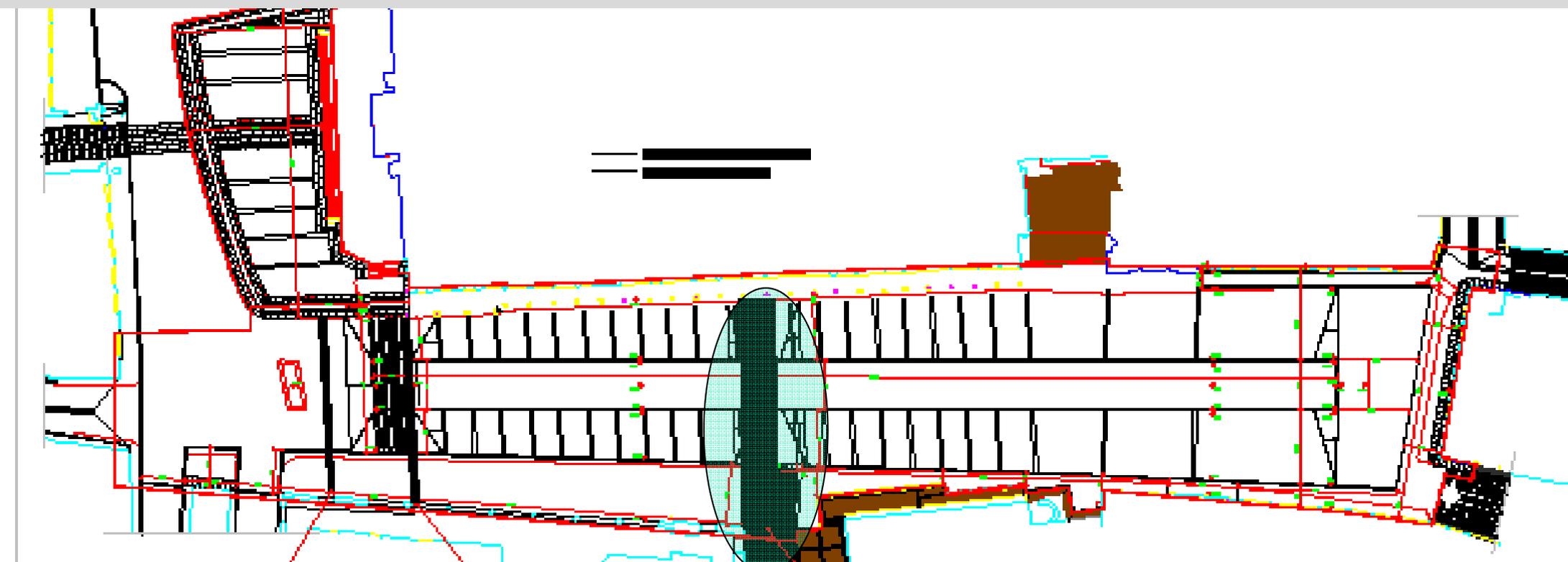
Piazza Trento Trieste



GPR: 400 MHz (monostatica)

Applicazione: archeologia urbana, centro di Ferrara

Piazza Trento Trieste



profilo ERT-2

profilo ERT-1

profilo GPR

10 m



profilo geoelettrico 2D (ERT).
ERT-1: 27m e ERT-2: 26m. Zero lato McDonalds



profilo georadar 2D (GPR/400 MHz)
GPR: 34 m. zero via San Romano

GPR: 400 MHz (monostatica) P. Trento Trieste – sezione GPR processata

Sud/San Roman

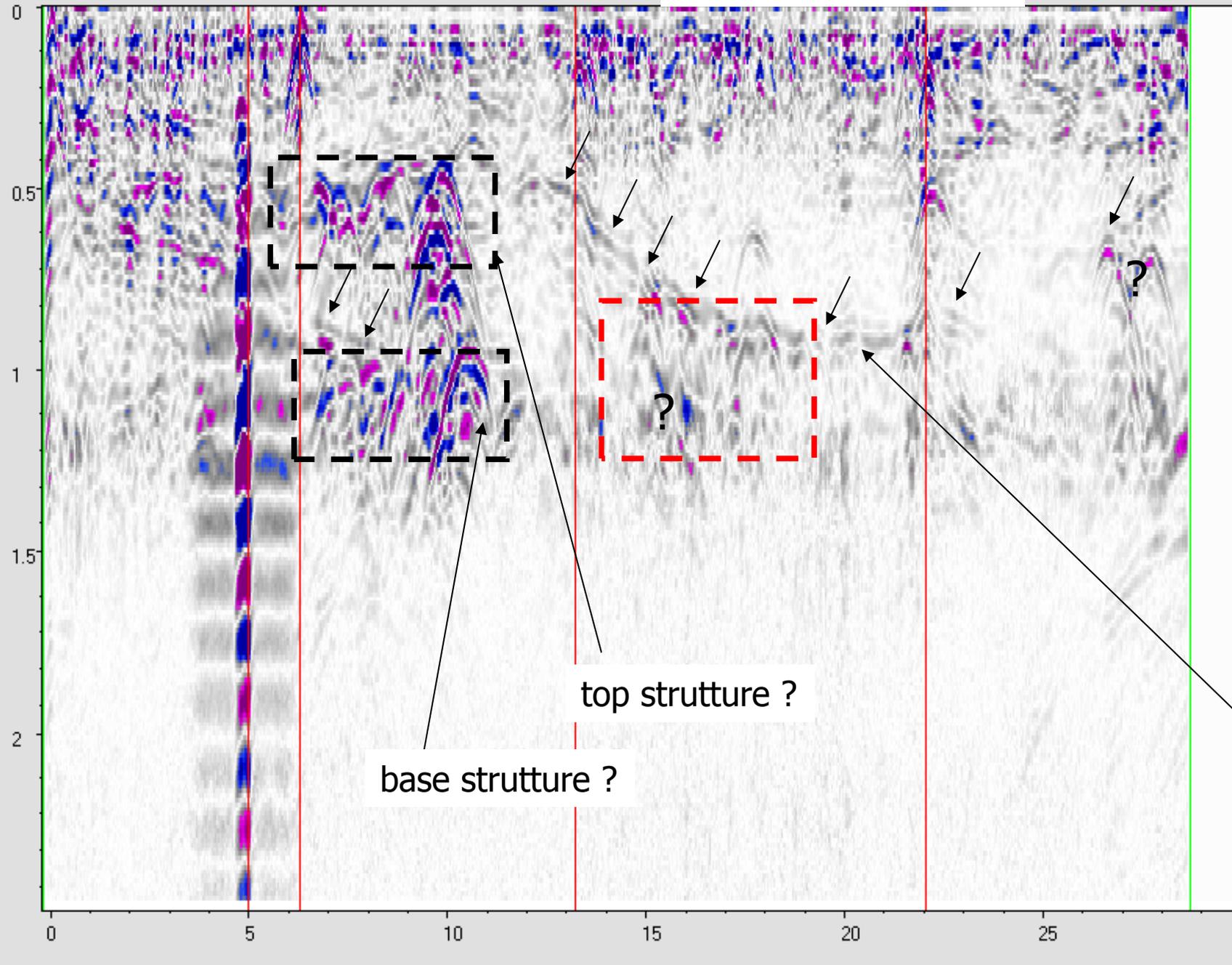
Nord/lato opposto

Depth [m]

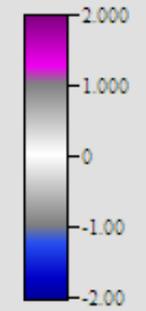
Tombino

TID100

Larghezza: 16 m circa



Move start time
0.000000
Linear gain
Smoothed gain
Vertical bandpass filter (TD)
Horizontal bandpass filter (TD)

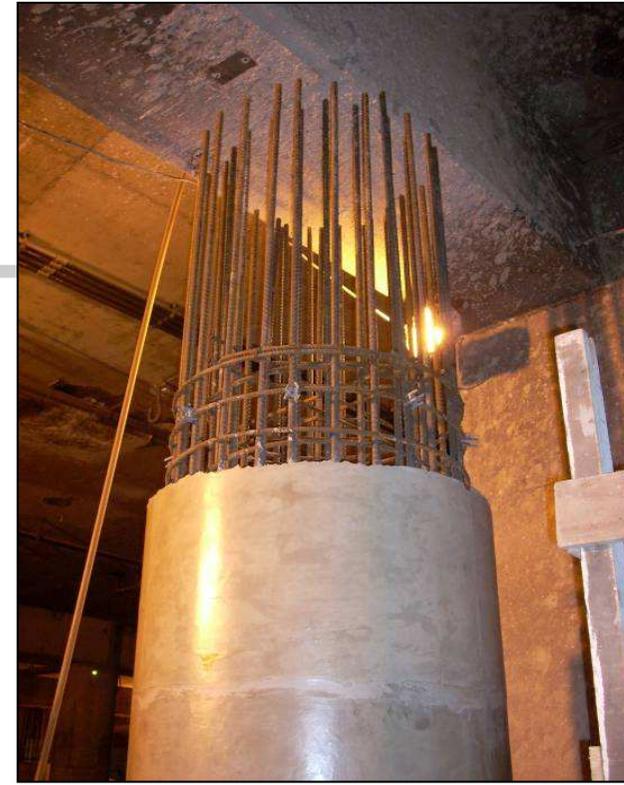


Profilo lungo
Piazza.mis
11/04/2014

Superficie riflettente
fondo canale?

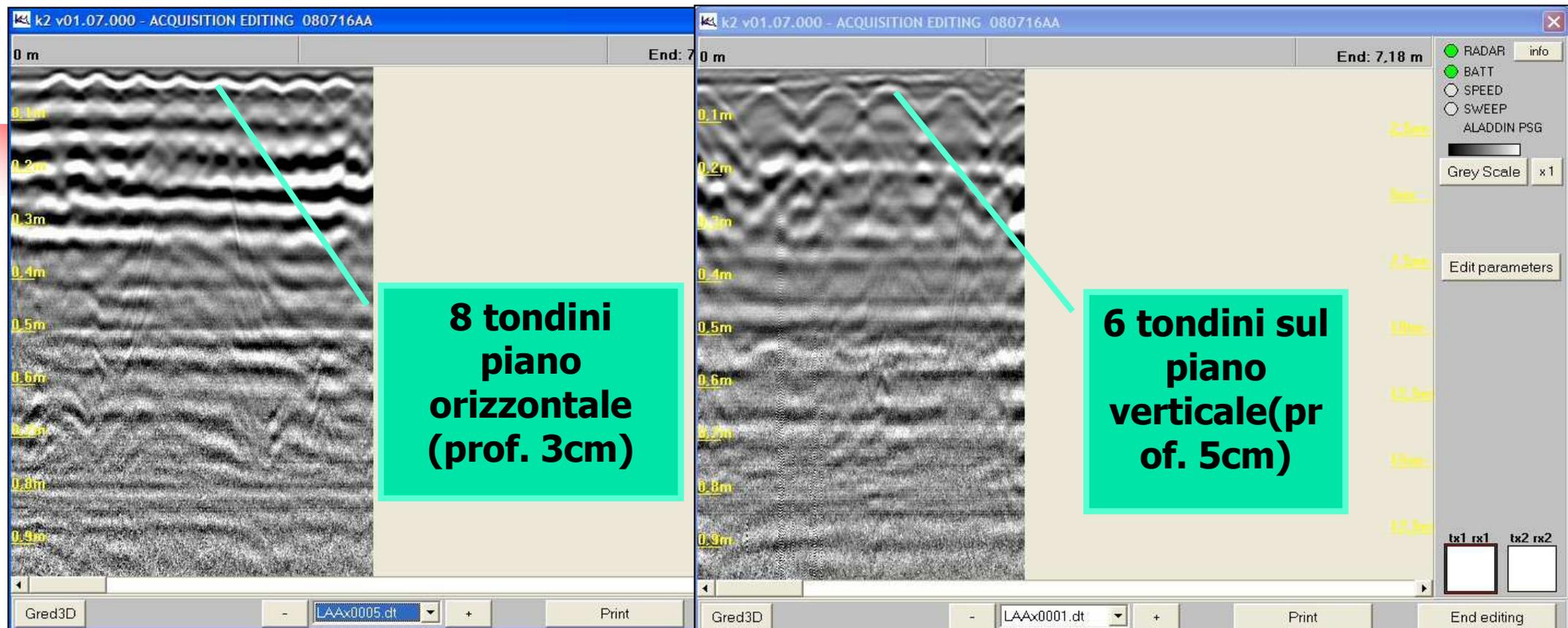
GPR: 2 GHz (monostatica)

Applicazione: strutturali – controllo pilastri



GPR: 2 GHz (monostatica)

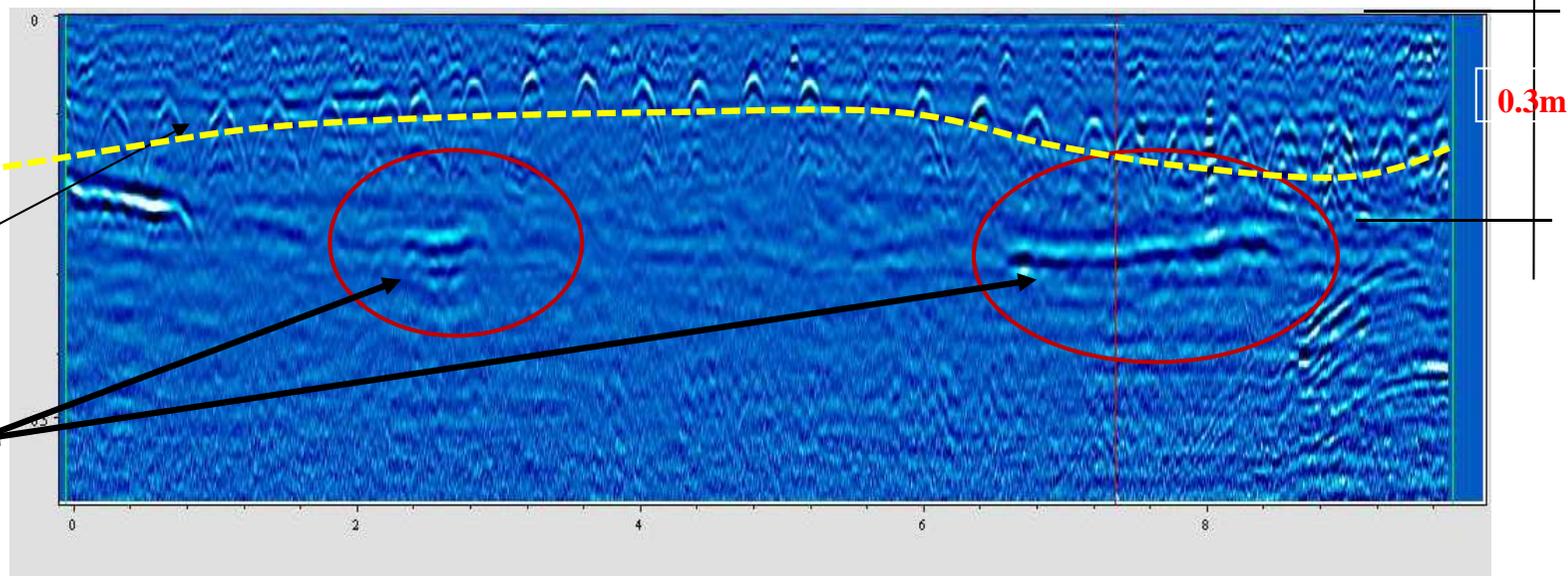
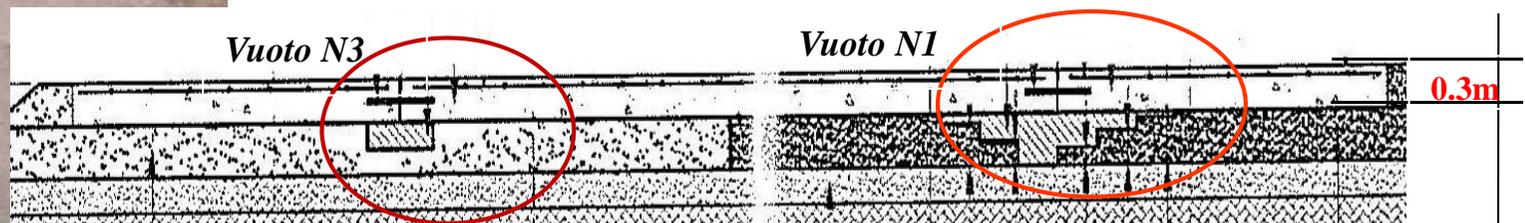
Applicazione: strutturali – controllo armatura dei pilastri (numero e interdistanza)



Interdistanza tra i tondini: 20-25cm

GPR: 2 GHz (monostatica)

Applicazione: strutturali – controllo armatura e difetti sotto pavimentazione tipo vuoti)



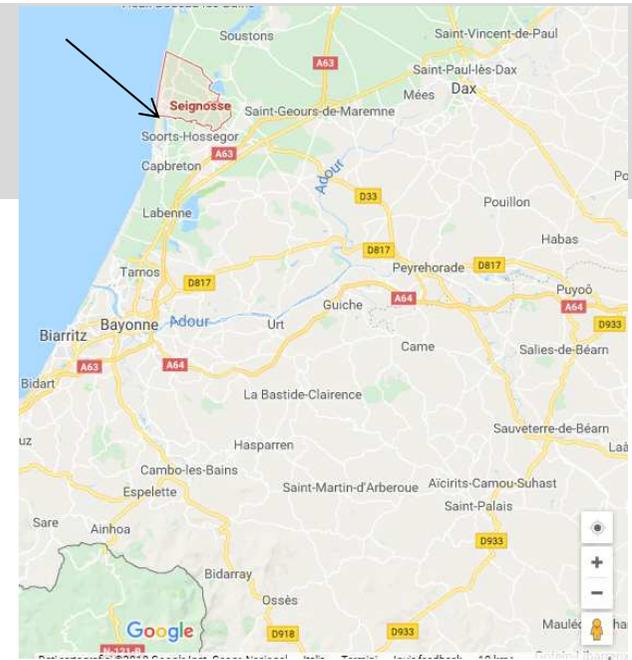
Base cemento armato

tondini

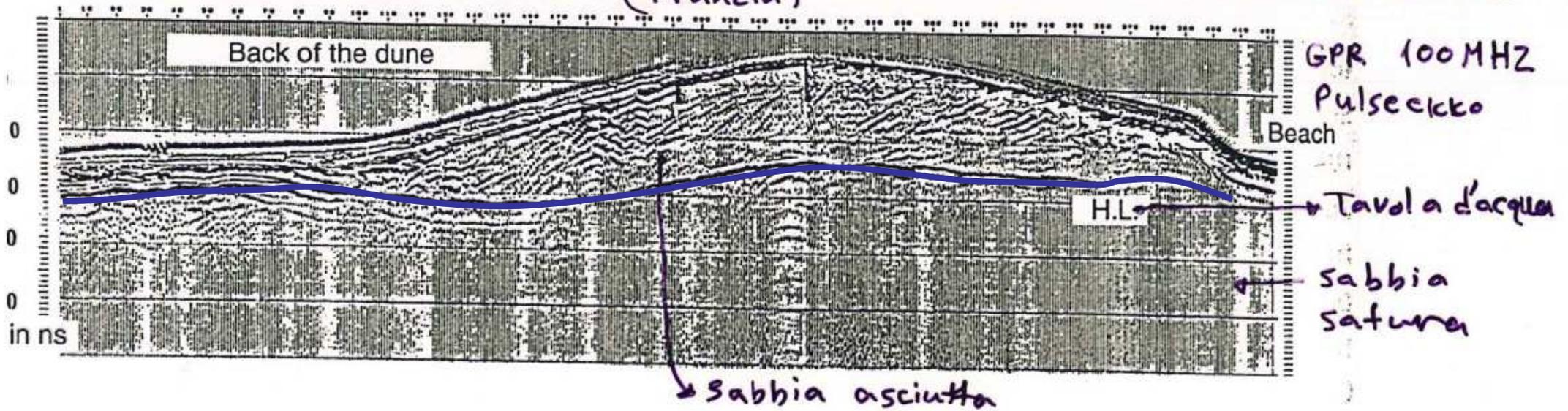
vuoto

GPR: 100 MHz (monostatica)

Applicazione: dune (acqua salata)

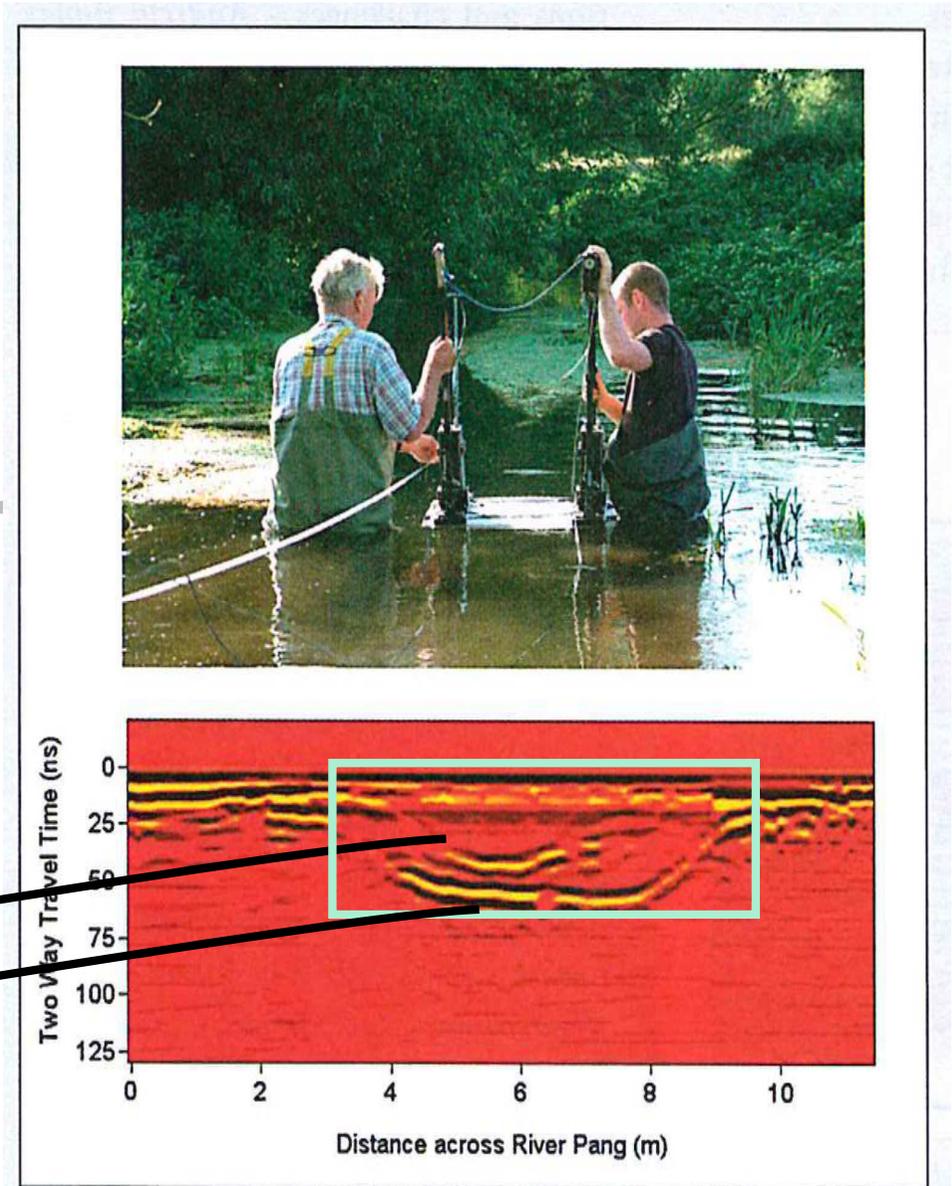


— Applicazione GPR: rilievo struttura interna delle dune costiere (Francia)



GPR: 100 MHz (bistatica)

Applicazione: Idrogeologia (Londra) – **in acqua dolce**



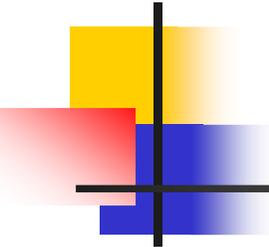
Letto del fiume

Letto dei sedimenti

GPR: parametri di acquisizione: terminologia

- Tipo antenna: monostatica – modello GSSI (USA)
- Frequenza antenna Tx: 500 MHz
- Modalità acquisizione dati: continua
- Tempo massimo acquisizione tracce singole (SCAN): 100 ns
- Campionamento temporale: sps (512)
- Funzione di amplificazione: 5 poli
- Frequenza ripetizione segnale: 64 KHz
- Filtro HP (verticale): 62.5 MHz, Filtro LP (verticale) 1000 MHz
- Numero SANS per secondo: 32 (determina la risoluzione laterale) è importante per non cadere nel problema dell'aliasing spaziale
- Filtro orizzontale: ogni 4 scans
- Profondità massima di illuminazione
- (considerando un valore di $\epsilon_r = 9$) è 4-5 m circa

Metodi Elettromagnetici
Esempio guidato di processing
del data set acquisito sotto mura est di
Ferrara
(zona del Baluardo di San Tommaso)
GPR utilizzato: IDS (Pisa)
Frequenza: 400 MHz
Monostatica - schermata
Fine parte 03



Metodi sismici
Sismica a rifrazione
Onde superficiali
Concetti sismica a riflessione