

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

*DISTART*

**TESI DI LAUREA**

in

Elementi di Infrastrutture Idrauliche L

**GEORADAR: APPLICAZIONI INGEGNERISTICHE FINALIZZATE ALLA DIFESA  
IDRAULICA DEL TERRITORIO**

**CANDIDATO:**

Monica Di Prinzio

**RELATORE:**

Prof. Ing. Attilio Castellarin

**CORRELATORI:**

Dott. Ing. Piero Puppini

Dott. Marco Bittelli

Anno Accademico 2007/2008

Sessione III

## ***Ringraziamenti***

Giunta al termine di questo lavoro desidero ringraziare ed esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e hanno permesso e incoraggiato il mio lavoro per la stesura di questa tesi.

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Attilio Castellarin per avermi dato l'opportunità di preparare questa tesi, un po' fuori dai canoni di Ingegneria. È stata un'esperienza sicuramente formativa da un punto di vista didattico, ma soprattutto gratificante dal punto di vista umano per la disponibilità e la collaborazione dimostrata.

Inoltre, ringrazio sentitamente il Dott. Marco Bittelli e la Prof.ssa Paola Rossi Pisa per la fiducia accordata nell'affidarmi uno strumento di tale valore, una fiducia del tutto inaspettata, in una realtà Universitaria in cui generalmente viene concessa poca affidabilità agli Studenti.

Un doveroso ringraziamento lo rivolgo al Dott. Ing. Piero Puppini e al Geom. Marco Fornasari del Consorzio della Bonifica Renana che da subito hanno mostrato un vivo interesse per questo lavoro, mettendo a disposizione la loro esperienza e la loro conoscenza del territorio.

Ringrazio ancora l'Arch. Camilla Colla e la Dott.ssa Federica Boschi per i preziosi suggerimenti e chiarimenti.

Ma il ringraziamento più sentito va a tutti i Sig. Volontari dell'Associazione PROMETEO - Associazione Volontari di Protezione Civile di Baricella: Rubbini Guerrino, Toschi Dante, Bedinelli Luigi, Cecio Michele, Ferrarato Dario, Maccaferri Giancarlo, Marchi Mauro, Mandini Angiolino e Varotti Vittoriano e i Sig. Volontari dell'Associazione PEGASO - Associazione Volontari di Protezione Civile di Malalbergo: Bettoli Francesco, Gasparini Giorgio, Gurioli Livio e Tosi Roberto, che si sono dimostrati sempre disponibili e entusiasti di collaborare alle mie attività di campo.

Infine un grazie ai miei fedeli collaboratori e amici, Angelo Alfano, Guido Marinelli e Camilla Peruzzi Garritano che non hanno mai esitato ad offrirmi il loro sostegno morale, ma soprattutto fisico.

# Indice

<i>Introduzione</i> .....	<b>1</b>
<b><i>Capitolo 1 – Ground Penetrating Radar</i></b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduzione .....	3
1.2 Principi di base .....	4
1.3 Origini della tecnica di misura .....	5
1.4 Strumentazione .....	6
1.5 Acquisizione dei dati .....	8
1.6 Parametri significativi in un'indagine GPR .....	10
1.6.1 Conduttività e permittività dielettrica .....	10
1.6.2 Leggi fondamentali .....	12
1.6.3 Velocità di propagazione e profondità di investigazione .....	14
1.6.4 Risoluzione .....	17
1.6.5 Rilevabilità di un oggetto .....	18
1.7 Proprietà dielettriche di terre e rocce .....	19
1.8 Perdite totali durante la propagazione del segnale .....	23
1.9 Rappresentazione ed interpretazione delle sezioni GPR .....	24
<b><i>Capitolo 2 – Raccolta, analisi ed elaborazione dei dati</i></b> .....	<b>28</b>
2.1 Introduzione .....	28
2.2 Interpretazione ed elaborazione dei dati .....	32
2.3 Static correction .....	35
2.4 Filtri 1D .....	37
2.4.1 Declipping .....	37
2.4.2 Subtract Mean (Dewow) .....	38
2.4.3 Manual Gain .....	39
2.4.4 Band Pass filtering (Butterworth) .....	40
2.5 Filtri 2D .....	41
2.5.1 Background removal .....	41
2.5.2 Running average .....	42
2.6 Migration .....	43
<b><i>Capitolo 3 – Applicazioni del GPR a problemi di Ingegneria Civile ed Ambientale</i></b> .....	<b>44</b>
3.1 GPR: campi di applicazione .....	44
3.2 Esempi di applicazioni in campo ingegneristico, ambientale e geologico .....	47
3.2.1 Indagine per la localizzazione di cavità nel sottosuolo .....	47
3.2.2 Individuazione di reti tecnologiche .....	48
3.2.3 Localizzazione di serbatoi di stoccaggio interrati .....	49
3.2.4 Individuazione di forme di origine carsica .....	50
3.2.5 Indagine su interfaccia bedrock .....	52
3.2.6 Indagini su paleocanali, giunture e faglie di piccola scala .....	54
3.2.7 Determinazione della stratigrafia di depositi di materiale di scarto da un'ex fornace .....	54
3.3 Esempi di applicazioni in campo idrologico-idraulico .....	55
3.3.1 Indagini finalizzate al ripristino di un canale idroelettrico .....	56
3.3.2 Erosione interna di una diga .....	58

3.3.3 Monitoraggio di argini in terra .....	59
3.3.4 Individuazione della superficie piezometrica.....	60
<b><i>Capitolo 4 – Problemi di dissesto arginale, cause principali e possibili impieghi del GPR.....</i></b>	<b>61</b>
4.1 Introduzione .....	61
4.2 Argini .....	62
4.3 Cause generali di dissesto arginale .....	63
4.4 Fattori che contribuiscono alla degradazione degli argini .....	66
4.5 Animali coinvolti .....	68
4.6 Condizioni ambientali che incentivano l’attività degli animali .....	70
4.7 Caratteristiche delle tane .....	70
4.8 Quadro riassuntivo .....	71
<b><i>Capitolo 5 – Evento di piena del 20 Maggio 2008 del Torrente Samoggia .....</i></b>	<b>73</b>
5.1 Introduzione .....	73
5.2 Descrizione dell’evento di piena.....	73
5.3 Geologia e geotecnica .....	78
5.4 Esito delle indagini geognostiche.....	80
5.5 Conclusioni .....	83
5.6 Discussione .....	83
<b><i>Capitolo 6 – Applicazioni del GPR al monitoraggio delle arginature ....</i></b>	<b>85</b>
6.1 Introduzione .....	85
6.2 Applicazione del Ground Penetrating Radar per l’individuazione di cavità e vuoti all’interno di manufatti arginali (2002).....	86
6.3 Uso del GPR per il rilevamento di disomogeneità su argini del Fiume Reno (2008).....	94
6.4 Quadro riassuntivo dello stato dell’arte .....	103
<b><i>Capitolo 7 – Indagini sperimentali .....</i></b>	<b>105</b>
7.1 Premessa: quadro informativo.....	105
7.2 Inquadramento geografico .....	106
7.3 Metodologia .....	108
7.4 Descrizione dell’indagine nel sito 1 – Canale Lorgana .....	109
7.5 Descrizione dell’indagine nel sito 2 – Canale Travallino .....	111
7.6 Risultati .....	113
7.6 Discussione .....	126
<b><i>Discussione e sviluppi futuri.....</i></b>	<b>129</b>
<b><i>Bibliografia .....</i></b>	<b>132</b>
<b><i>Software utilizzati .....</i></b>	<b>134</b>



## *Introduzione*

L'oggetto di questo lavoro di tesi è la verifica dell'applicabilità e dell'efficacia del Georadar per il monitoraggio dello stato di salute dei manufatti arginali, mettendo in luce i limiti e le potenzialità di questa tecnica rispetto alle condizioni ambientali nelle quali ci si trova ad operare e al grado di risoluzione richiesto dal problema. In particolare, sono state effettuate delle prove di campo in cui si è voluto accertare la capacità del Georadar nell'identificazione di cavità realizzate da animali negli argini.

Nel campo della ricerca, le applicazioni del Georadar nell'ambito del monitoraggio dello stato di salute di opere di difesa idraulica del territorio, sono al momento molto sporadiche. Tuttavia, dalle poche pubblicazioni disponibili, è stato possibile ottenere alcune informazioni utili per le nostre applicazioni.

Il monitoraggio dei manufatti arginali avviene, ad oggi, mediante ispezioni visive da parte dei tecnici degli enti di ambito. Questo modo di procedere non risulta però sempre efficace.

Per questo motivo appare evidente come la possibilità di disporre di una tecnica non invasiva, come il Georadar, per pervenire ad una dettagliata conoscenza dell'effettivo stato di salute strutturale di un rilevato arginale, rivesta un grande interesse pratico-applicativo.

La conoscenza della posizione di zone disomogenee all'interno degli argini può di sicuro diminuire l'insorgere di problemi legati all'instabilità di tali opere in occasione degli eventi di piena e quindi mitigare la probabilità di pericolo e rischio idraulico per la popolazione e per le strutture. Ciò diventa ancora più rilevante essendo tali opere spesso in esercizio da lungo tempo (anche più di un secolo) e poste in località densamente popolate, soggette inoltre a periodiche ed intense piene.

La struttura del presente elaborato di tesi ripercorre le varie fasi di lavoro affrontate durante questo studio.

La tesi è suddivisa in due parti, una prima più generale (Capitoli 1, 2 e 3), frutto di una ricerca bibliografica, sulla teoria e le applicazioni del Georadar in campo Ingegneristico Civile ed Ambientale ed una seconda (Capitoli 4, 5, 6 e 7) più

specifica, relativa alle capacità di indagine nel contesto del monitoraggio strutturale dei rilevati arginali

Nel Capitolo 1 si riportano alcune informazioni di carattere teorico su questa tecnica di indagine basata sull'invio di impulsi elettromagnetici ad elevata frequenza. Nel Capitolo successivo si affronta l'argomento della raccolta, analisi ed elaborazione dei dati e viene descritto il funzionamento di alcuni metodi per il filtraggio dei dati. Nel Capitolo 3 si fa una panoramica sulle applicazioni più consolidate del Georadar nel campo dell'Ingegneria Civile ed Ambientale e vengono evidenziati alcuni dei vantaggi di questa tecnica.

La seconda parte è, invece, strutturata nel seguente modo. Il Capitolo 4 è stato dedicato alla descrizione delle cause principali di dissesto arginale, tra le quali, la presenza di cavità realizzate da animali scavatori, viene identificata come una possibile causa di fenomeni di instabilità arginale. Nel Capitolo successivo si riporta in dettaglio la descrizione degli effetti al suolo di un evento di piena nel territorio emiliano, durante il quale la presenza di cavità, scoperte solo dopo il dissesto arginale mediante metodi di indagine distruttivi, è stata ritenuta una causa concomitante dell'innescò di alcuni sifonamenti. Nel Capitolo 6 viene documentato lo stato dell'arte relativamente all'oggetto del lavoro di Tesi, ovvero, riportando le pubblicazioni su questo argomento che hanno costituito il punto di partenza di questo studio. Il Capitolo 7 riporta alcuni dei risultati delle applicazioni di campo effettuate e una discussione sulle difficoltà e i vantaggi di questa tecnica di rilievo con riferimento al monitoraggio dei rilevati arginali.

Infine nel Capitolo conclusivo vengono ripresi sinteticamente i punti trattati all'interno della Tesi.

# Capitolo 1

## Ground Penetrating Radar

### 1.1 Introduzione

La possibilità di rilevare oggetti situati nel sottosuolo ha da sempre affascinato l'uomo. Un obiettivo molto attraente per il mondo della ricerca è quello di mettere a punto una tecnica esplorativa non invasiva, capace di restituire immagini del terreno e della sua composizione al di sotto della superficie topografica, caratterizzate da un buon grado di risoluzione.

Per questo motivo la comunità scientifica mostra un notevole interesse nella ricerca e nell'innovazione di tecniche geofisiche per l'esplorazione del sottosuolo. In genere si ricorre all'utilizzo simultaneo di diverse tecniche di indagine, e poi si confrontano ed integrano i dati ricavati da indagini dirette ed indirette<sup>1</sup>, tuttavia non sempre questo modo di procedere risulta conveniente.

In particolar modo, risulta molto utile in fase di progetto preliminare di molte opere civili e per il monitoraggio dello stato di salute di opere di difesa idraulica, disporre di tecnologie di indagine *non invasive*, tali da non degradare l'integrità di un'opera o di un terreno durante l'esecuzione del rilievo.

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.

Il GPR sfrutta il fenomeno della riflessione di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza generati ed inviati nel sottosuolo, permettendo di misurare le discontinuità dielettriche di substrati geo-pedologici. Queste differenze sono spesso associate a cambiamenti nel contenuto di acqua, alle caratteristiche granulometriche, litologiche, di porosità e di addensamento.

Originariamente progettato con l'idea di investigare la porzione più superficiale del suolo (30-40 cm), sotto determinate condizioni, ha mostrato di possedere tutti i

---

<sup>1</sup> **Metodi diretti e indiretti:** si indicano come indagini dirette quelle in cui le informazioni vengono ricavate direttamente dal campione prelevato in sito, mentre per indagini indirette quelle in cui l'informazione viene dedotta mediante la misura di proprietà fisiche correlate con essa).

requisiti per essere considerato un valido strumento di investigazione anche per profondità maggiori.

Uno dei maggiori vantaggi del GPR è che si riescono ad ottenere delle registrazioni in continuo, non limitate ad un punto, bensì relative ad un'area.

Si riassumono alcuni dei vantaggi per cui il GPR riscuote un grande successo:

- tipologia di indagine non distruttiva e non invasiva;
- velocità di esecuzione;
- numerosi campi di applicazione (ingegneria, geologia, archeologia, agronomia, ambiente, ecc.);
- versatilità della tecnologia, le antenne possono essere disegnate e costruite per avere specifiche caratteristiche operative quali la frequenza e la forma geometrica del campo elettromagnetico;
- estrema variabilità nella forma e dimensione dell'oggetto da indagare;
- ampio intervallo di investigazione (da pochi cm a decine di metri);
- economicità dei costi;
- restituzione di immagini 3D.

Lo svantaggio maggiore è che la tecnologia GPR risulta generalmente molto legata al tipo di applicazione da attuare e alle caratteristiche del mezzo da indagare.

## **1.2 Principi di base**

Le indagini geofisiche si possono suddividere in *indagini passive*, in cui si raccolgono informazioni su fenomeni già esistenti, e *indagini attive* in cui si analizzano le risposte a fenomeni indotti.

Le indagini radar sono del tipo attivo e consistono nella *misura del tempo di propagazione*, di una pulsazione elettromagnetica inviata nel terreno, attraverso cui si può determinare la distanza della sorgente riflettente. Detta pulsazione deve essere abbastanza breve e allo stesso tempo, la velocità nel mezzo deve essere all'incirca costante, per consentire delle misurazioni adeguate.

La misura dei tempi è dell'ordine di grandezza dei nanosecondi ( $10^{-9}$  s), in quanto la profondità da investigare è limitata.

È una tecnica molto simile alla sismica a riflessione, la differenza è che la propagazione del segnale dipende dalle *proprietà dielettriche* del terreno e non dal peso specifico. Le suddette proprietà sono controllate in primo luogo dal contenuto d'acqua, infatti si ha che una variazione in contenuto d'acqua causa la riflessione di parte del segnale.

### **1.3 Origini della tecnica di misura**

Il primo uso di segnali elettromagnetici per determinare la presenza di oggetti metallici sepolti è generalmente attribuito a Hülsmeier nel 1904, ma la prima descrizione del loro utilizzo per la localizzazione di oggetti sepolti apparve 6 anni più tardi in un brevetto tedesco a nome di Leimbach e Löwy. La loro tecnica consisteva nel seppellire una serie di antenne a dipolo all'interno di pozzi verticali e nel confrontare la magnitudo dei segnali ricevuti tenendo conto che il terreno assorbe la radiazione proporzionalmente alla propria conduttività. Dalla misura si otteneva un'immagine grezza della porzione di terreno all'interno dell'area investigata.

Questi autori inoltre descrivono una tecnica alternativa che prevede l'utilizzo di un'antenna per rilevare le riflessioni di una superficie di contatto nel sottosuolo, per esempio una superficie di falda o un deposito di minerali.

Un altro possibile utilizzo di questa strumentazione fu quello di indicare la profondità a cui l'oggetto è sepolto, attraverso un'analisi dell'interferenza registrata tra l'onda riflessa e quella che fuoriesce attraverso l'antenna dalla superficie del terreno.

Il lavoro di Hülsmeier nel 1926 sembra essere il primo utilizzo di tecniche ad impulso per determinare la struttura di oggetti sepolti. Egli notò che qualsiasi variazione dielettrica, non necessariamente riguardante la conduttività, produce delle riflessioni e che questa tecnica di così semplice realizzazione, si dimostra più vantaggiosa rispetto alla sismica.

La tecnica ad impulsi fu sviluppata a partire dagli anni '30 come mezzo di indagine profonda, per esempio per falde acquifere, depositi di sali o rocce e anche in ambienti glaciali.

All'inizio degli anni '70, quando l'attenzione di molti era incentrata sulle indagini sulla Luna, ci fu un rinnovato interesse per questo argomento. Per queste tipo di applicazioni il GPR sembrava avere un vantaggio notevole rispetto alle indagini di tipo sismico. Infatti si ha la possibilità di usare trasduttori telecomandati posti ad una certa distanza dall'oggetto da investigare, a differenza delle tecniche di tipo sismico che richiedono necessariamente la presenza di un operatore in contatto col terreno, per essere eseguite.

Dagli anni '70 ad oggi il campo di applicazione del GPR è stato notevolmente ampliato, trovando largo impiego nei più svariati settori, dall'ingegneria all'agronomia, dalla geologia all'archeologia [1].

Nell'ultimo decennio, l'implementazione di potenti software per l'acquisizione, l'analisi e la restituzione dei radargrammi e un miglioramento nell'elettronica utilizzata per la generazione e la modulazione degli impulsi elettromagnetici, hanno incentivato la notevole diffusione di questa tecnica.

Infatti la maggiore limitazione consisteva proprio nel grande numero di dati e radargrammi che si ottenevano quando venivano fatte campagne di misura su aree relativamente estese, e della difficoltà in fase di acquisizione e analisi dei dati.

In seguito allo sviluppo di tecnologie informatiche con sempre maggiore capacità di memoria e velocità di calcolo, parallelamente allo sviluppo di più avanzate tecniche di programmazione ed elaborazione dei dati, oggi è possibile acquisire, analizzare e restituire in forma grafica grandi quantità di dati, sottoposti a svariate analisi ed elaborazioni dell'informazione elettromagnetica.

#### **1.4 Strumentazione**

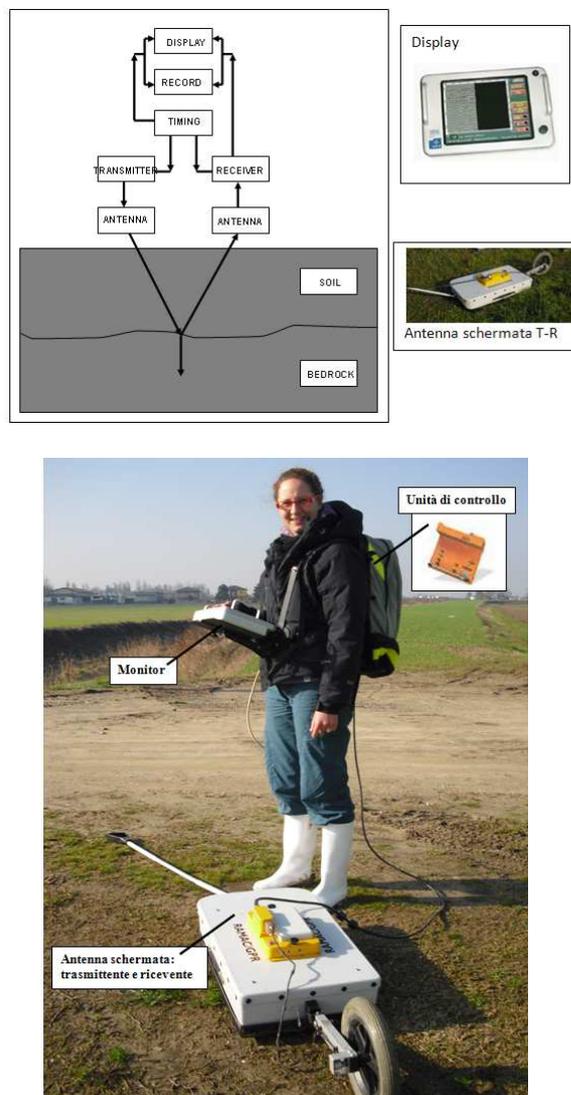
Il sistema GeoRadar è composto da alcuni componenti principali (Figura 1.1):

- un sistema trasmittente;
- un sistema ricevente;
- un sistema di lettura dell'onda;
- un sistema di restituzione grafica.

Il sistema può essere assemblato in diversi modi, questo consente una facile adattabilità in molte applicazioni.

Il sistema trasmittente produce e trasmette l'impulso che si irradia nel terreno, finché non incontra un ostacolo e subisce una riflessione. Il sistema ricevente capta l'onda riflessa, amplifica il segnale e dopo averlo elaborato mediante il sistema di lettura dell'onda, lo trasmette al display.

La maggior parte dei sistemi GPR sono dotati di un sistema ricevente e trasmittente adatti a lavorare con diverse frequenze semplicemente cambiando il tipo di antenna. Generalmente l'utilizzo di un sistema in cui l'apparato ricevente e quello trasmittente sono incorporati in un unico blocco è vantaggioso da un punto di vista pratico, ma può essere la causa di generazione di un segnale di rumore, se le due antenne non sono opportunamente schermate [4].



*Figura 1.1: Componenti principali sistema Georadar.*

Le *antenne* sono dei trasduttori che convertono corrente elettrica in onde elettromagnetiche che si propagano nel mezzo e viceversa convertono l'onda elettromagnetica in impulsi elettrici.

In base al *principio di reciprocità* le antenne possono essere intercambiabili, ovvero possono assolvere entrambe le funzioni di ricezione e trasmissione. Ciò vale per le antenne che lavorano in aria, cioè ben al di sopra del piano campagna. In pratica non possono essere più intercambiate quando sono poste a contatto con il terreno a causa dello sviluppo di un fenomeno per cui il segnale subisce una forte attenuazione in prossimità della superficie del terreno [1].

Generalmente le antenne sono progettate per lavorare nella banda di frequenza che va da 10 MHz a 5 GHz, a seconda della profondità e della risoluzione che si vuole raggiungere. La scelta di questo intervallo non è casuale, bensì si ha che un'onda elettromagnetica centrata su queste frequenze offre una discreta penetrazione nel terreno, ma soprattutto la *velocità di fase* si mantiene costante anche in ambienti poco conduttivi (Figura 1.2) [4]. Se la velocità dell'onda non si mantenesse costante, sarebbe impossibile compiere una lettura corretta delle sezioni GeoRadar.

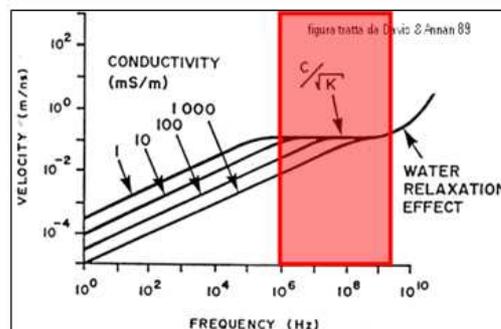
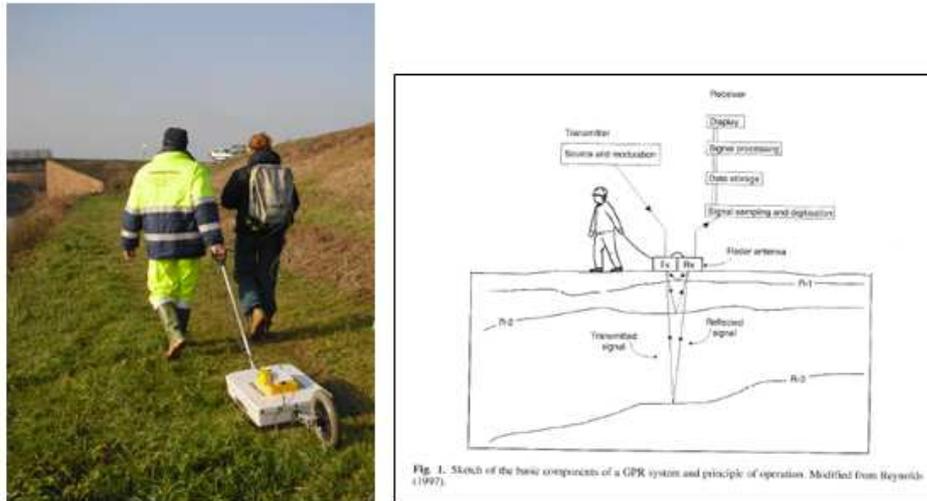


Figura 1.2: Curva di dispersione [1].

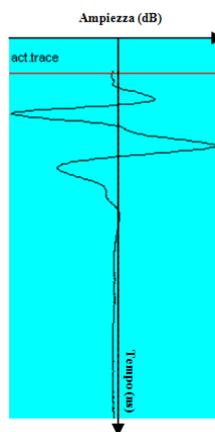
## 1.5 Acquisizione dei dati

Il sistema GPR trasmette impulsi elettromagnetici di una determinata frequenza tramite un trasduttore (*antenna*); l'impulso si propaga verticalmente nel terreno con una certa velocità caratteristica propria del terreno. Quando l'onda emessa intercetta un oggetto con proprietà dielettriche diverse, una parte dell'energia viene riflessa e captata da un'antenna ricevente, la restante parte dell'onda continua il suo viaggio verso le zone più profonde (Figura 1.3).



**Figura 1.3: Schema di funzionamento.**

Nella Figura 1.4 è rappresentato l'andamento del segnale ricevuto relativo ad un punto. Il primo impulso distinguibile, ovvero di una certa ampiezza (dB), è determinato dalla superficie del terreno su cui poggia l'antenna, gli impulsi successivi sono legati alle anisotropie esistenti nel sottosuolo; quella di maggiore ampiezza è il riflesso provocato da una forte anisotropia.



**Figura 1.4: Andamento delle riflessioni di un impulso radar in un punto.**

Accostando opportunamente tali onde si ottengono delle *sezioni tempo* (Figura 1.5), in funzione della velocità di percorso del segnale. La scala orizzontale è funzione della *velocità di avanzamento* dell'antenna al di sopra del mezzo investigato, mentre l'asse verticale rappresenta la direzione di penetrazione degli impulsi. Tale distanza è espressa sottoforma di *ritardo tra l'impulso emesso e quello riflesso* ed è quindi pari a due volte la distanza antenna-target (tempi doppi

- two-way travel time). Il valore del ritardo viene convertito in valore metrico tramite la conoscenza della *velocità di propagazione del segnale nel mezzo* (Tabella 1.1)[5].

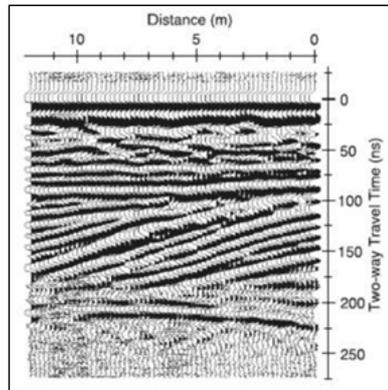


Figura 1.5: Sezione GPR (distanza – tempo doppio) [1].

## 1.6 Parametri significativi in un'indagine GPR

### 1.6.1 Conduttività e permittività dielettrica

La propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo viene governata da due fondamentali caratteristiche dielettriche: la *conduttività* e la *permittività*.

La *conduttività elettrica*  $\sigma$  rappresenta la capacità del flusso elettrico di attraversare un mezzo. Il suo inverso è la resistività, secondo la seguente relazione:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.1)$$

dove  $\sigma$  = conduttività ( $1/\Omega\text{m}$ , S/m) e  $\rho$  = resistività ( $\Omega\text{m}$ ).

L'applicabilità del GPR è legata alla conduttività di un mezzo:

- *alta conduttività* ( $\sigma \geq 10^{-2}$  S/m): il mezzo da investigare non risulta adatto ad un indagine GPR. Per esempio acqua salata, argilla bagnata.

- *media conduttività* ( $10^{-7} \leq \sigma \leq 10^{-2}$  S/m). Per esempio acqua pura, argilla asciutta, sabbia.

- *bassa conduttività* ( $\sigma \leq 10^{-7}$  S/m): condizioni ottime per l'applicazione del GPR. Per esempio aria, asfalto, cemento.

Da studi effettuati sull'argomento risulta che i fattori che influenzano in maniera preponderante la conduttività di uno strato di terreno sono: porosità, saturazione, concentrazione di sali disciolti, composizione mineralogica dell'argilla e grado di dispersione dei solfati, presenza di alcuni minerali conduttivi [2].

L'altro parametro importante è la *permettività elettrica* di un mezzo; esprime la capacità di un materiale di immagazzinare energia elettromagnetica in seguito alla propagazione di onde elettromagnetiche.

Nell'ambito delle misurazioni GeoRadar, la *conduttività* e la *permettività dielettrica* sono due variabili complesse caratterizzate da una componente reale ( $\sigma_r$  e  $\epsilon_r$ ) e da una componente immaginaria ( $\sigma_i$  e  $\epsilon_i$ ).

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_r + i \sigma_i \\ \epsilon &= \epsilon_r + i \epsilon_i\end{aligned}\quad (1.2)$$

Nella pratica si fa riferimento alla *permettività dielettrica relativa*  $\epsilon_{rel}$  o *costante dielettrica del mezzo*; essa è definita come il rapporto tra la capacità di un dielettrico,  $\epsilon$ , e quella che si ha nel vuoto,  $\epsilon_0$ .

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

dove  $\epsilon$  = permettività del materiale (F/m).

La componente reale ( $\epsilon_r$ ) descrive l'energia contenuta nel materiale dielettrico ad una determinata frequenza e temperatura, mentre la componente immaginaria ( $\epsilon_i$ ) descrive la dissipazione di energia del sistema, sia per fenomeni di rilassamento dielettrico, sia conduttivi.

La permettività dielettrica, quando  $\sigma$  è piccola, è definita come:

$$\epsilon = \epsilon_r - i \left( \epsilon_{rel} + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \quad (1.4)$$

dove  $\epsilon_0$  è la permettività dielettrica nel vuoto ( $\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m),  $\epsilon_{rel}$  (F/m) è la parte immaginaria dovuta a fenomeni di rilassamento,  $\sigma$  è la conducibilità elettrica (dS/m),  $\omega$  è la frequenza angolare ( $2\pi f$ ), dove  $f$  è la frequenza (Hz) e  $i = \sqrt{-1}$  è il numero immaginario.

L'equazione (1.4) descrive i due processi principali che determinano le perdite di energia in un materiale poroso, come il suolo: il rilassamento e la conducibilità elettrica.

Il primo è dovuto al tempo richiesto dal dipolo dell'acqua per orientarsi rispetto al campo elettromagnetico applicato, che risulta in un assorbimento di energia da parte del dipolo. Il secondo è dovuto ai vari fenomeni conduttivi che derivano dalla presenza di cariche elettriche, per esempio quello dovuto alla presenza di elettroliti nella soluzione circolante e sulle superfici del suolo.

La permittività dielettrica di un mezzo poroso può essere descritta come la sommatoria della permittività dielettrica delle varie fasi che compongono il mezzo stesso:

$$\epsilon^\alpha = \theta_l \epsilon_l^\alpha + \theta_a \epsilon_a^\alpha + \theta_s \epsilon_s^\alpha \quad (1.5)$$

dove  $\epsilon_l$ ,  $\epsilon_a$ , e  $\epsilon_s$  sono le permittività dielettriche dell'acqua liquida, dell'aria e della fase solida,  $\alpha$  è un parametro geometrico (generalmente uguale a 0.5) che dipende dal posizionamento delle particelle minerali e  $\theta_l$ ,  $\theta_a$ , e  $\theta_s$  sono le frazioni volumetriche delle rispettive fasi. Questa descrizione del sistema viene definita *modello dielettrico misto*.

L'acqua liquida è una delle fasi che ha la più alta permittività dielettrica (circa 80) (Tabella 1.1), infatti contribuisce molto alla permittività dielettrica del suolo nel suo insieme (bulk dielectric permectivity). Questa particolare proprietà fa sì che il contenuto idrico del suolo possa essere efficacemente misurato con il GeoRadar, ma allo stesso tempo deve essere anche considerato con grande attenzione quando si fanno prospezioni per determinare, ad esempio, la profondità di oggetti sepolti, in quanto può interferire considerevolmente sulla propagazione del segnale.

### 1.6.2 Leggi fondamentali

Dal punto di vista meccanico, la *velocità*  $v$  (m/s) di un'onda elettromagnetica che attraversa un mezzo di lunghezza  $L$  (m), è descritta da:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (1.6)$$

dove  $t$  è il tempo in secondi (s). La distanza percorsa è pari a due volte la distanza che realmente separa lo strumento dall'oggetto da investigare, visto che l'onda percorre un'andata ed un ritorno dopo essere stata riflessa.

Da un punto di vista elettrodinamico, la *velocità*  $v$  di un'onda elettromagnetica è descritta dalla seguente legge:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1.7)$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto  $3 \cdot 10^8$  m/s;  $\mu = \mu_r \mu_0$  è la permeabilità magnetica del mezzo ( $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am);  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  è la permittività dielettrica del mezzo ( $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m). Per la maggior parte dei suoli, ad esclusione di quelli in cui vi sono depositi di metalli o minerali magnetici,  $\mu$  è uguale ad 1, quindi l'equazione può essere scritta:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.8)$$

L'altra legge di riferimento è quella che descrive l'*attenuazione* del segnale:

$$\alpha = \frac{\sigma Z_0}{2 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.9)$$

$\sigma$  è la conduttività dielettrica del mezzo e  $Z_0$  è l'impedenza dell'onda nel vuoto ( $Z_0 = 377 \Omega$ ) [9].

Come è facile notare dalle suddette equazioni, la permittività dielettrica relativa del mezzo  $\epsilon_r$  regola la velocità del segnale, mentre la conduttività  $\sigma$  ne regola l'attenuazione.

Mezzi molto conduttivi, quali per esempio i metalli o materiali ad elevato contenuto di acqua, assorbono il segnale al punto tale da non consentirne la riflessione. Inoltre detta conduttività deve essere misurata alla frequenza dell'antenna in uso, giacché la stessa aumenta con la frequenza, accade che con antenne di maggiore frequenza, a parità di materiale, si ha maggiore attenuazione  $\alpha$ .

La relazione tra la velocità dell'onda e le proprietà dielettriche del materiale è fondamentale per l'uso del GPR; la velocità di propagazione del segnale è diversa per materiali che hanno proprietà elettriche diverse, un'onda che attraversa due materiali dalle proprietà elettriche diverse, percorrendo la stessa distanza, arriverà in istanti diversi.

Si riportano in tabella valori di letteratura della permittività dielettrica, della conduttività, della velocità e dell'attenuazione, riferiti ai materiali più comuni:

<i>Material</i>	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
Aria	1	0	0.3	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	0.002
Acqua comune	80	0.5	0.033	0.1
Acqua marina	80	0.003	0.01	0.001
Sabbia asciutta	3 – 5	0.01	0.15	0.01
Sabbia satura	20 – 30	0.1 – 1	0.06	0.03 – 0.3
Calcere	4 – 8	0.5 – 2	0.12	0.4 – 1
Scisto	5 – 15	1 – 100	0.09	1 – 100
Silt	5 – 30	1 – 100	0.07	1 – 100
Argilla	5 – 40	2 – 1000	0.06	1 – 300
Granito	4 – 6	0.01 – 1	0.13	0.01 – 1
Sale asciutto	5 – 6	0.01 – 1	0.13	0.01 – 1
Ghiaccio	3 – 4	0.01	0.16	0.01
Terreno ghiacciato	3 – 6	-	-	-
Calcestruzzo	4 – 10	-	-	-
Metallo	1 - 2	-	-	-

*Tabella 1.1: Valori di riferimento per terre e rocce più comuni [24].*

### 1.6.3 Velocità di propagazione e profondità di investigazione

La *velocità di propagazione* del segnale non è costante, ma assume dei valori che variano a seconda del mezzo attraversato, in un range compreso tra il limite minimo, cioè quello dell'acqua e il limite massimo quello dell'aria (in realtà è il vuoto, ma per le nostre condizioni assumiamo sia l'aria):

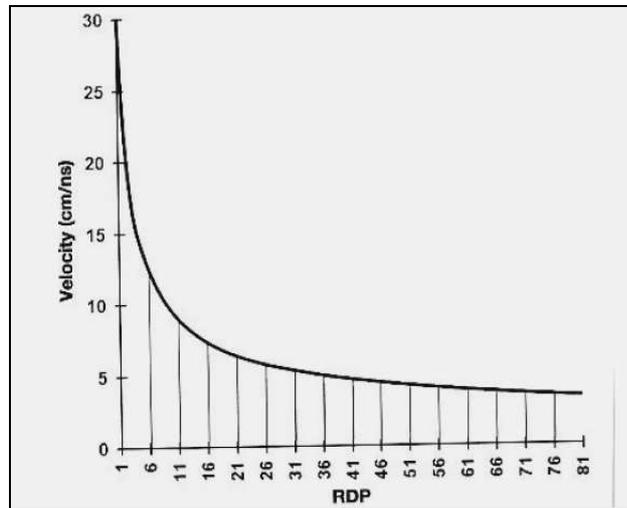
$$0.01 \text{ m/ns} < v < 0.3 \text{ m/ns}$$

In base all'equazione (1.6) la profondità  $L$  è data da:

$$L = v \frac{t}{2} \quad (1.10)$$

Quindi per conoscere la profondità è necessario conoscere la velocità di propagazione che a sua volta dipende dalla permittività dielettrica del mezzo che come già detto, varia con il tipo di materiale e il suo contenuto idrico. La Figura 1.6 mostra la relazione inversa e non lineare, tra la velocità di propagazione

dell'onda (cm/ns) e la permittività dielettrica relativa (RDP); si ha che all'aumentare della permittività dielettrica si ha una diminuzione della velocità.



*Figura 1.6: Velocità di propagazione in funzione della permittività dielettrica [11].*

Nella maggior parte delle applicazioni pratiche la permittività dielettrica del mezzo sarà un'incognita e quindi si dovrà stimare la velocità di propagazione sulla base di misure dirette o tramite metodi basati su misurazioni multiple.

Un metodo semplice e utilizzato per la misura diretta, è quello di inserire un oggetto, per esempio un'asta metallica o un bastone, ad una profondità nota, effettuare una misura con il GeoRadar e quindi calibrare la profondità nota con il tempo di risposta della riflessione, ottenendo così la velocità.



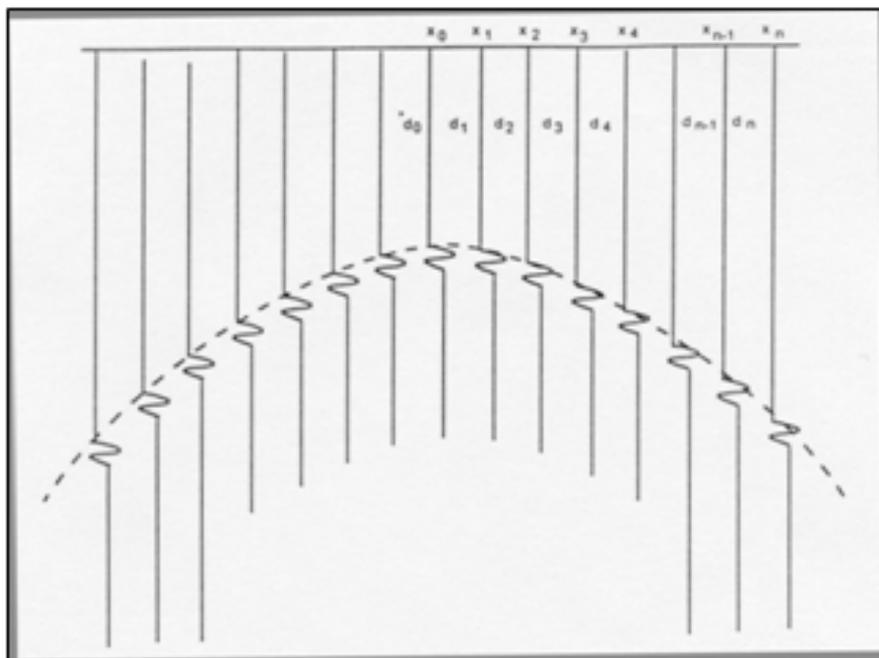
*Figura 1.7: Realizzazione scavo per poi calibrare la velocità di propagazione del segnale.*

Un metodo alternativo è quello di ottenere una riflessione iperbolica dalla misura ed utilizzare la seguente equazione per ottenere la velocità:

$$v = 2 * \sqrt{\frac{x_{n-1}^2 - x_0^2}{t_{n-1}^2 - t_0^2}} \quad (1.11)$$

dove  $x_n$  rappresenta il punto lungo la direzione orizzontale della sezione realizzata e  $t_n$  il rispettivo tempo misurato (Figura 1.8); la seguente equazione viene invece impiegata per risalire alla profondità dell'oggetto:

$$d_0 = v \frac{t_0}{2} \quad (1.12)$$



*Figura 1.8: Funzione di riflessione iperbolica [1].*

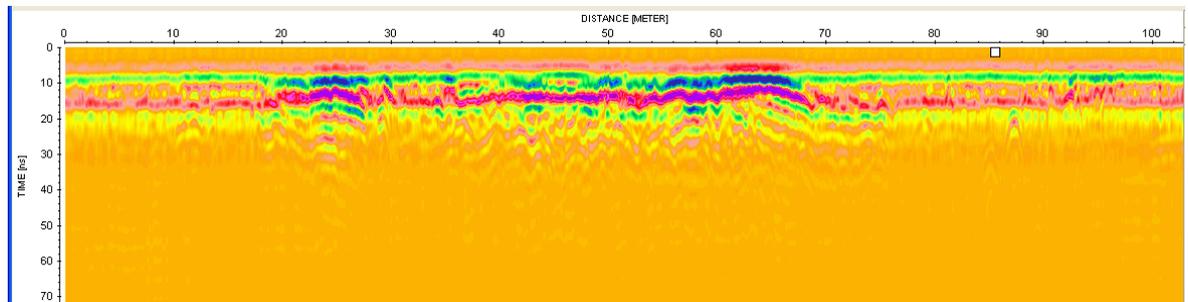
La profondità di penetrazione dell'onda è dipendente dall'attenuazione che subisce l'onda nel mezzo e i fattori che concorrono ad impedire la propagazione del segnale sono i seguenti:

- alta conduttività;
- alto contenuto d'acqua;
- presenza di minerali argillosi;
- frequenza dell'onda elettromagnetica;
- presenza di centri di riflessione e dispersione;
- angolo di apertura dell'antenna;

Per quanto emerge da studi condotti su questo argomento, la profondità di penetrazione può variare all'interno di un range molto ampio, tra 0.40 m e 30 m. In particolare si ha che nel caso di un mezzo altamente conduttivo la profondità sarà bassa, dell'ordine di 1 m; in casi eccezionali di un mezzo poco conduttivo come un terreno ghiacciato, si può arrivare a valori di profondità anche di 80 m [2].

#### 1.6.4 Risoluzione

Il *radargramma* è l'immagine generata a seguito della misura del GeoRadar (Figura 1.9).



*Figura 1.9: Radargramma.*

La *risoluzione verticale* di un radargramma è la distanza tra una riflessione e la successiva lungo la stessa traccia, ovvero rappresenta la distanza necessaria per distinguere due oggetti vicini. Si fa riferimento però alla regola di Niyquist, secondo la quale detta distanza,  $X$ , è in condizioni ideali pari ad un quarto della lunghezza d'onda  $\lambda$ , in condizioni reali deve essere almeno maggiore di mezza lunghezza d'onda:

$$X = \frac{\lambda}{4} \text{ in condizioni ideali} \quad (1.13)$$

$$X > \frac{\lambda}{2} \text{ in condizioni reali} \quad (1.14)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.15)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda (m) e  $f$  è la frequenza dell'onda (MHz).

La frequenza dell'antenna in un'applicazione è scelta in modo da ottenere un buon compromesso tra alta risoluzione e profondità di investigazione. Frequenze alte

permettono di avere delle alte risoluzioni, ma ridotta profondità di investigazione [3].

In linea generale, si può pensare di usare una frequenza bassa del segnale per ottenere delle buone prospezioni anche in materiali molto attenuanti (umidi), ma se si vuole raggiungere un buon livello di risoluzione per poter discriminare i vari dettagli del target, è preferibile l'utilizzo di segnali ad alta frequenza.

In un'indagine GPR ci sono 3 modi per aumentare la risoluzione:

- usare un'antenna con frequenza maggiore;
- diminuire la finestra temporale, cioè ampliare l'asse verticale;
- diminuire l'intervallo di campionamento, cioè ampliare l'asse orizzontale [2].

Dalle suddette considerazioni avremo che per un'ipotetica velocità  $v = 0.1$  m/ns si avranno le seguenti risoluzioni massime:

- $X > 1.00$  m con antenna da 50 Mhz;
- $X > 0.50$  m con antenna da 100 MHz;
- $X > 0.20$  m con antenna da 250 MHz;
- $X > 0.10$  m con antenna da 500 MHz;
- $X > 0.06$  m con antenna da 800 MHz.

La *risoluzione orizzontale o planimetrica* è importante quando si vuole localizzare un oggetto e quando si ha la necessità di distinguere tra più di un oggetto alla stessa profondità. In generale è definita dalle caratteristiche dell'antenna, per ottenere una risoluzione planimetrica accettabile è necessario lavorare con antenne ad alto guadagno. La risoluzione orizzontale è maggiore per corpi che mostrano un'attenuazione alta (compatibilmente con la possibilità di distinguere gli oggetti).

### **1.6.5 Rilevabilità di un oggetto**

La *rilevabilità* di un oggetto esprime la possibilità di rilevare qualcosa attraverso le onde elettromagnetiche; questo concetto quindi gioca un ruolo fondamentale nell'uso del GPR e erroneamente viene talvolta confuso con la risoluzione.

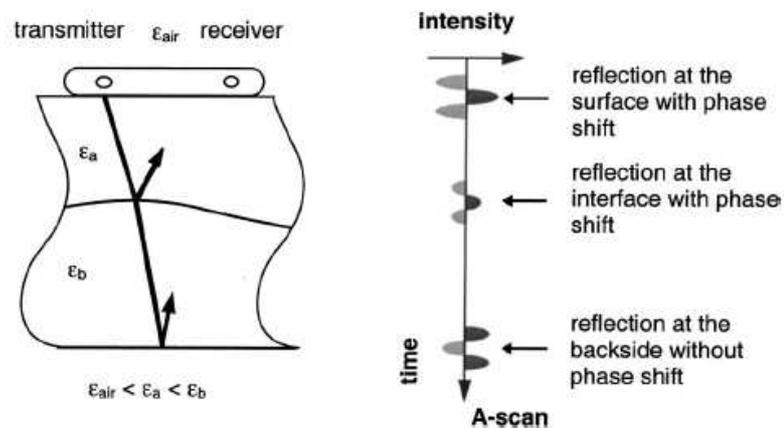
Un oggetto rilevabile produce la riflessione del segnale elettromagnetico incidente. Questa capacità dipende da cambiamenti nell'impedenza elettrica del terreno ed in particolare dalla differenza di valori della costante dielettrica tra il mezzo ospitante e l'oggetto ospitato. L'ampiezza del segnale riflesso è espressa dal coefficiente di *riflessione di Fresnel*:

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}})}{(\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})} \quad (1.16)$$

dove  $\epsilon_{r1}$  e  $\epsilon_{r2}$  sono le costanti dielettriche rispettivamente del terreno e dell'oggetto ospitato. Il coefficiente di riflessione assume valore positivo quando  $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ , come ad esempio si ha una cavità all'interno di un dielettrico.

La riflettività di un segnale dipende dal contrasto tra le permittività dielettriche sulle facce opposte di un'interfaccia.

Inoltre l'effetto che subisce l'onda riflessa cambia a seconda della permittività dielettrica dei due materiali che si interfacciano (Figura 1.10 ).

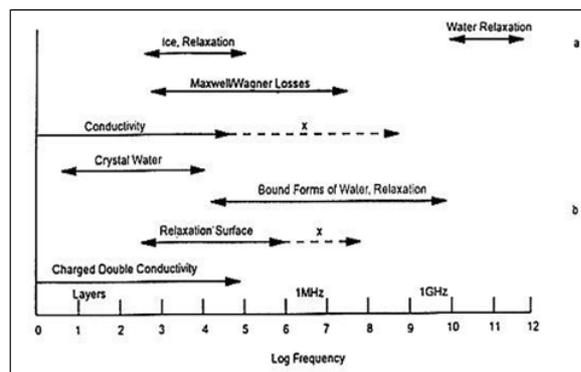


*Figura 1.10: Principio di riflessione per il GPR. La riflessione all'interfaccia tra due materiali diversi in cui quello inferiore ha una permittività dielettrica minore risulta in un cambiamento di fase del segnale riflesso, mentre se ha una permittività maggiore non si ha cambiamento di fase [1].*

## 1.7 Proprietà dielettriche di terre e rocce

Un significativo numero di ricercatori ha investigato a lungo sulle proprietà dielettriche delle terre e delle rocce. Studi hanno dimostrato sperimentalmente che per la maggior parte dei materiali che costituiscono la parte più superficiale della crosta terrestre (all'incirca 100 m di spessore), l'attenuazione della radiazione elettromagnetica aumenta con la frequenza e che ad una certa frequenza i materiali saturi mostrano un'attenuazione maggiore rispetto a quelli asciutti. Questo effetto è molto importante per poter valutare preliminarmente l'efficienza di un'indagine GPR.

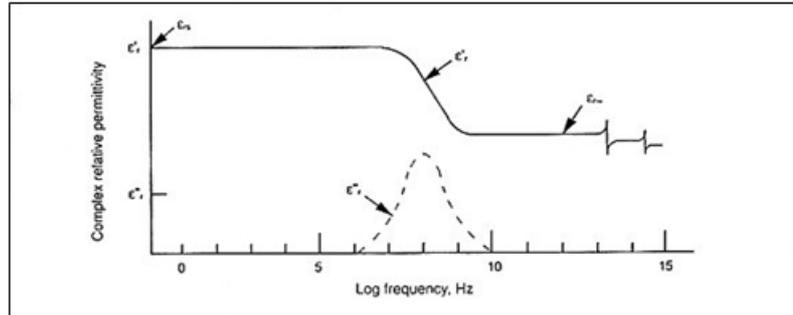
Il comportamento elettromagnetico dei materiali naturali o artificiali è in genere molto complesso da descrivere, infatti non esiste nessuna legge semplice che descrive tale comportamento. Tuttavia si può affermare con certezza che i materiali eterogenei contenenti acqua, per esempio terreni bagnati o organici, sono influenzati in maniera predominante dalla conduttività. Le loro caratteristiche elettromagnetiche sono controllate a scala microscopica (atomica, molecolare e granulare). La Figura 1.11 riassume in modo schematico le perdite che avvengono nei sistemi eterogenei contenenti acqua. Possono essere distinte diverse regioni: alle frequenze più basse, gli effetti sono molto intrecciati ed è quasi impossibile interpretarli in maniera corretta; in corrispondenza delle microonde ( $10^9$ - $10^{10}$ ), la situazione è più semplice, l'unico fenomeno importante è quello del rilassamento dovuto alla perdita di polarità dell'acqua libera. Nella regione intermedia ( $10^7$ - $10^9$ ) giocano un ruolo importante i fenomeni legati alla conduttività.



**Figura 1.11: Origine delle perdite dielettriche in materiali eterogenei contenenti acqua (De Loor)[1].**

Gli effetti che si verificano sono diversi e localizzati in corrispondenza di frequenze diverse, per questo motivo si può dire di avere una dipendenza delle proprietà dielettriche dalla frequenza.

La seguente figura invece illustra i cambiamenti nella permittività dielettrica che hanno luogo all'interno di un ampio intervallo di frequenza. Si nota che la permittività relativa, effettivamente, rimane costante a basse ed alte frequenze. Tuttavia si ha una regione di transizione in corrispondenza dei valori intermedi di frequenza dove le proprietà dielettriche subiscono un netto cambiamento.



*Figura 1.12: Cambiamenti nella permittività in funzione della frequenza [1].*

Questo fenomeno è collegato all'effetto di disturbo subito dalle molecole polari in seguito all'applicazione di un certo campo elettrico costante; ogni molecola risente dell'effetto di una forza che agisce per orientare il momento polare caratteristico della molecola parallelamente al campo elettrico applicato. Questa forza è contrastata dalla forza termodinamica. Se viene introdotto un altro campo elettrico, le molecole si orienteranno in maniera oscillatoria intorno ad un asse che si trova nel centro. La risposta delle molecole non è istantanea a causa dell'inerzia. Inoltre la polarizzazione prodotta dall'applicazione di un certo campo elettrico è strettamente correlata alla mobilità termica delle molecole, quindi risulta fortemente dipendente dalla temperatura.

La determinazione delle proprietà dielettriche di un mezzo rimane comunque largamente sperimentale. Le rocce e le terre sono materiali complessi composti da molti minerali di diversa natura e in proporzioni molto varie. Di conseguenza le loro caratteristiche dielettriche possono variare di molto anche per materiali nominalmente simili.

Per esempio nel caso di un qualsiasi mezzo saturo di acqua (si ricorda che l'acqua ha una permittività relativa pari a circa 80), anche un piccolo contenuto di acqua può causare un incremento significativo della permittività relativa del materiale. Un esempio dell'effetto del contenuto d'acqua sulla permittività relativa delle rocce è riportato nella seguente figura.

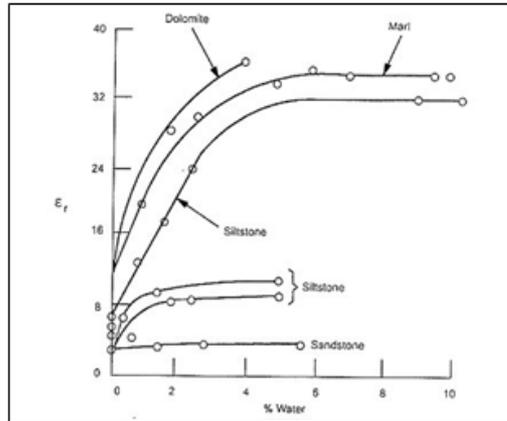


Figura 1.13: Effetto del contenuto d'acqua sulla permittività relativa di alcune rocce [1].

L'influenza del contenuto d'acqua sulle proprietà dielettriche dei materiali naturali è molto ben documentata in letteratura.

Di seguito si riporta una tabella che mostra alcuni valori ottenuti sperimentalmente per la conduttività e la permittività relativa di vari materiali in condizioni di saturazione e non saturazione misurate alla frequenza di 100 MHz.

Materiale		Conduttività $\sigma$ (S/m)	Permittività Relativa $\epsilon_r$
Asfalto	asciutto	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	2-4
	bagnato	$10^{-3}$ - $10^{-1}$	6-12
Argilla	asciutta	$10^{-1}$ -1	2-6
	bagnata	$10^{-1}$ -1	5-40
Cemento	asciutto	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	4-10
	bagnato	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	10-20
Sabbia	asciutta	$10^{-7}$ - $10^{-3}$	2-6
	bagnata	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	10-30

Tabella 1.2: Conduttività e permittività relativa in condizioni asciutte e bagnate [24].

Come già detto, la velocità di propagazione è principalmente governata dalla permittività relativa di un materiale che dipende a sua volta dal contenuto di acqua. Per basse frequenze, l'acqua ha una permittività relativa di circa 80, mentre la maggior parte dei minerali che costituiscono i terreni o altri tipi di materiali artificiali, in condizioni di insaturazione hanno una  $\epsilon_r$  compresa nell'intervallo tra 2-9.

Sebbene la descrizione del fenomeno non è del tutto esaustiva, vista la complessità dello stesso, risulta comunque sufficiente per spiegare la dipendenza delle proprietà dielettriche dei materiali dalla frequenza. Ciò implica che ci sarà qualche piccola variazione nella velocità di propagazione con la frequenza. I materiali che mostrano questo fenomeno sono detti *dispersivi*.

### 1.8 Perdite totali durante la propagazione del segnale

L'impulso che viene generato dal sistema trasmettitore subisce una serie di perdite di energia durante il percorso trasmettitore-ricevitore. Le perdite totali sono date da:

$$P_T = P_a + P_d + P_{am} + P_{ma} + P_{ad} + P_{at} + P_r \quad (1.17)$$

dove  $P_T$  sono le perdite totali (dB),  $P_a$  sono le perdite dovute all'inefficienza dell'antenna,  $P_d$  sono le perdite da dissonanza tra le due antenne (quella trasmittente e quella ricevente),  $P_{am}$  sono le perdite di trasmissione che si verificano all'interfaccia aria-materiale,  $P_{ma}$  sono le perdite di riflessione che si verificano all'interfaccia materiale-aria,  $P_{ad}$  sono le perdite di dispersione dell'antenna nel mezzo,  $P_{at}$  sono le perdite di attenuazione del segnale nel materiale e  $P_r$  sono le perdite di dispersione dovute agli oggetti. Generalmente i termini che vengono influenzati dal materiale/oggetto dell'analisi sono gli ultimi tre termini,  $P_{ad}$ ,  $P_{at}$  e  $P_r$ .

Nel nostro caso le perdite (dB) sono considerate in termini di voltaggio. Le potenzialità di rilevamento (in inglese *detectability*) di un radar, in cui indichiamo con  $V_r$  il picco nel valore di voltaggio del segnale riflesso, quando il valore di picco del segnale trasmesso è  $V_t$ , si ottiene nel seguente modo:

$$D = 20 \log \left( \frac{V_t}{V_r} \right) \quad (1.18)$$

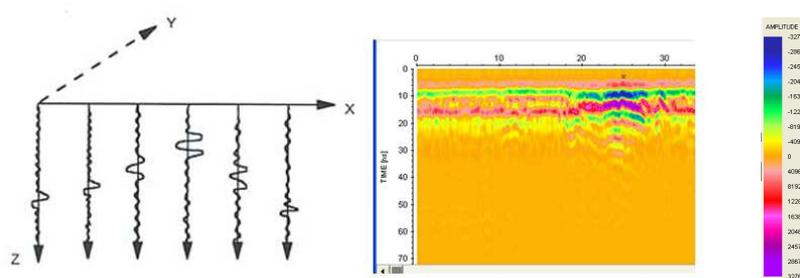
Le perdite di dispersione dell'antenna nel mezzo  $P_{ad}$  sono inversamente proporzionali alla quarta potenza della distanza dell'antenna dall'oggetto riflettente e sono influenzate dalla forma geometrica dell'oggetto. Le perdite di attenuazione  $P_{at}$  del segnale nel materiale dipendono dalla permittività dielettrica e dalla conducibilità elettrica del materiale stesso. Infine le perdite di dispersione dovute agli oggetti  $P_r$  dipendono dalla discontinuità dielettrica dei materiali

all'interfaccia tra gli stessi ed in particolare dall'impedenza caratteristica dei due o più materiali.

Le dimensioni dell'oggetto influenzano le perdite di dispersione e possono generare una struttura di risonanza che aumenta l'impedenza del segnale e quindi diminuisce le perdite di dispersione. Le differenze di permittività dielettrica hanno un effetto molto importante sulla qualità del segnale riflesso. In particolare quando la permittività dielettrica dell'oggetto è minore di quella del materiale nel quale è inserito, ad esempio un vuoto all'interno di un terreno, l'interfaccia non produce un'inversione di fase del segnale. Al contrario quando la permittività dielettrica dell'oggetto è maggiore di quella del materiale nel quale è inserito, ad esempio un corpo idrico all'interno di un terreno, oppure un oggetto metallico, si ha un'inversione di fase dell'onda riflessa. Questa caratteristica può essere sfruttata per identificare materiali conduttivi da materiali non conduttivi.

## 1.9 Rappresentazione ed interpretazione delle sezioni GPR

Una sezione si effettua ripetendo il ciclo di trasmissione e ricezione innumerevoli volte spostando progressivamente l'antenna lungo una direzione prefissata. Si ottiene così un'immagine detta *radargramma*.



**Figura 1.14:** Schematizzazione di una sezione e output del programma di elaborazione con scala cromatica dell'Ampiezza del segnale.

Il programma di elaborazione provvede ad accostare opportunamente le tracce dei segnali ricevuti. I segnali appaiono in varie tonalità di colori (o di grigi), in funzione della loro intensità.

Per effettuare un profilo esistono due differenti tecniche operative: la metodologia in *dominio di tempo* e quella in *dominio di spazio*. Esse differiscono tra loro per la

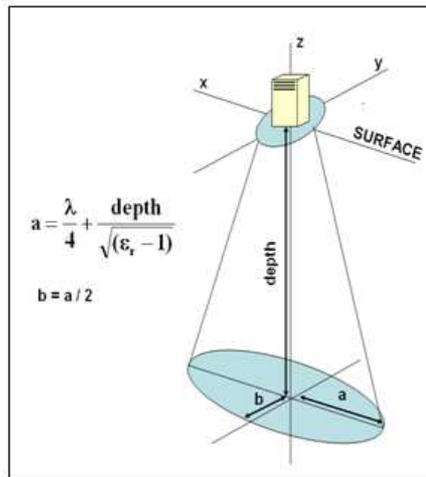
modalità con cui viene effettuata la ripetizione del ciclo trasmissione/ricezione dell'impulso radar.

Nei profili in dominio di tempo, gli impulsi radar vengono emessi ad intervalli di tempo costanti. L'operatore deve in questo caso muovere l'antenna sulla superficie da investigare lungo una determinata direzione, mantenendo una velocità costante. Soltanto così, sarà possibile in fase di interpretazione, associare la posizione di un riflettore individuato sulla sezione GPR alla reale posizione nel terreno.

Nelle sezioni GPR in dominio di spazio, l'intervallo tra gli impulsi è regolato in funzione della posizione. I georadar in grado di operare in dominio di spazio si avvalgono di un trasduttore di posizione, mediante il quale il sistema tiene conto dello spazio percorso dall'antenna. L'emissione degli impulsi radar viene effettuata ogni qualvolta il sistema rileva che l'antenna, spinta dall'operatore, ha percorso una determinata lunghezza. In questo modo l'operatore può spostare l'antenna più o meno velocemente, fermarsi e ripartire senza che ciò si ripercuota sull'accuratezza della sezione.

Una sezione GPR esprime l'intensità degli impulsi riflessi dal substrato in funzione del tempo di arrivo e della posizione sulla superficie. Come si è già detto, la sezione è di fatto il risultato della giustapposizione di molteplici cicli di trasmissione/ricezione degli impulsi radar.

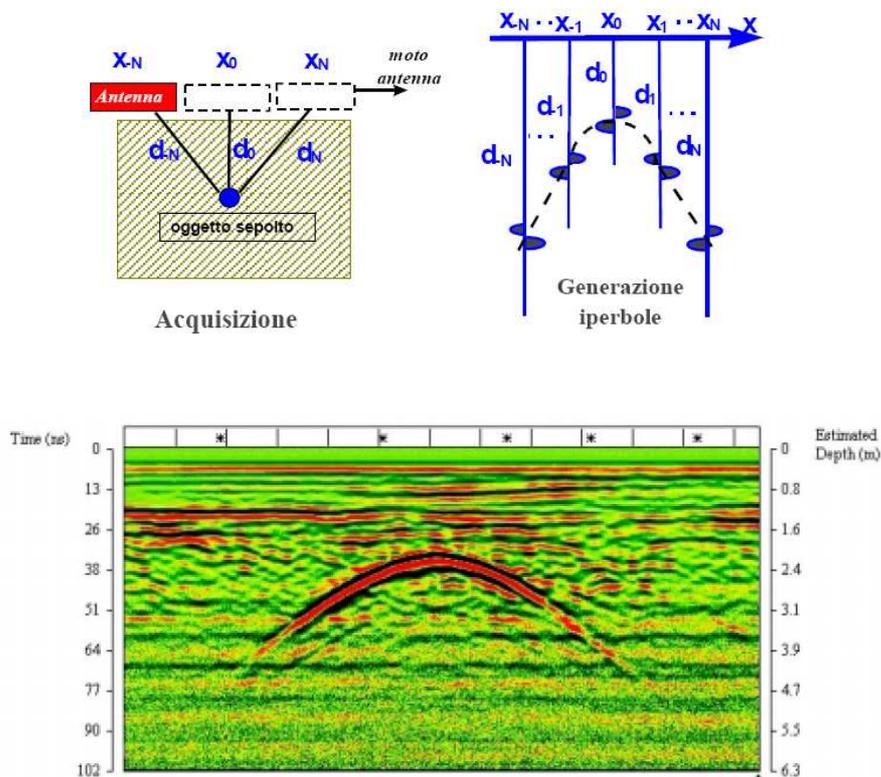
L'interpretazione delle forme risultanti dalle diverse colorazioni delle sezioni GPR è un'operazione piuttosto complessa che deve tener conto sia delle diverse velocità di propagazione dei diversi materiali attraversati, sia della geometria del *cono d'indagine* o *cono d'emissione* delle onde elettromagnetiche inviate nel terreno. La geometria di tale cono è assimilabile ad un tronco di cono che si apre verso il basso (Figura 1.15).



**Figura 1.15: Footprint dell'antenna e cono d'indagine.**

Di conseguenza le radiazioni possono intercettare anche bersagli che non sono posti esattamente lungo la verticale; i loro riflessi giungeranno con un maggiore ritardo, a fronte di un tragitto più lungo, e appariranno più profondi.

Un esempio tipico di tale effetto è la forma ad *iperbole* mostrata in corrispondenza di piccoli riflettori (ad esempio tubi tagliati trasversalmente, ciottoli, cavità di piccolo diametro, cunicoli, ecc.), i cui rami discendenti e ascendenti sono i riflessi registrati prima e dopo il passaggio dell'antenna sulla verticale del bersaglio.



**Figura 1.16:** Esempio di sezione GPR per la localizzazione di sottoservizi. Al centro dell'immagine è ben visibile l'anomalia ad iperbole determinata dall'attraversamento di una tubazione che corre in direzione perpendicolare alla sezione [26].

I corpi estesi lateralmente, come oggetti di grande dimensione, stratificazione o fratture, risentono in maniera minore dell'effetto del cono di trasmissione e mostrano nei profili una forma più prossima a quella reale.

È dunque possibile con una certa esperienza fornire un'interpretazione sufficientemente precisa delle anomalie radar individuate dalla sola osservazione delle sezioni. L'interpretazione di anomalie di forma complessa o la determinazione esatta della profondità degli obiettivi richiedono un approccio diverso che sarà approfondito successivamente.

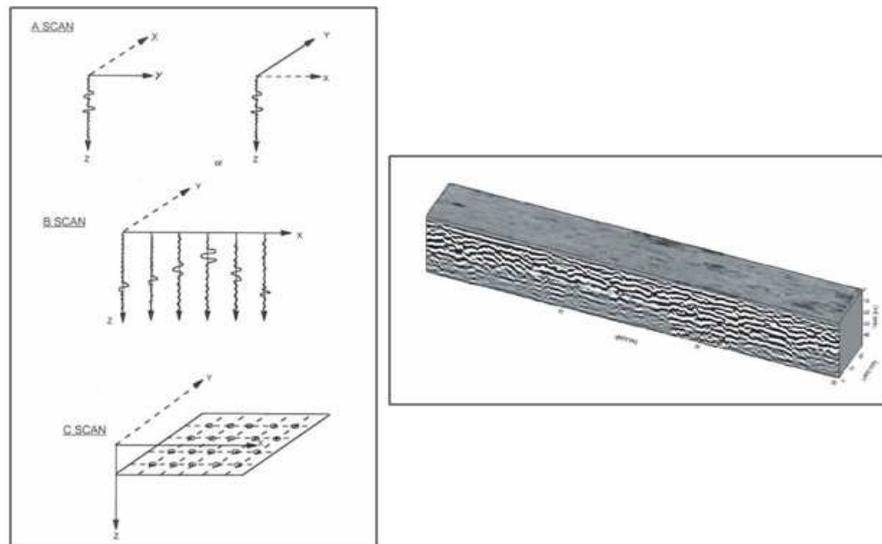
## Capitolo 2

### *Raccolta, analisi ed elaborazione dei dati*

#### 2.1 Introduzione

Il dato ottenuto a seguito di una misura GPR, come già detto, è restituito sottoforma di un *radargramma*.

I radargrammi sono classificati in A-scan, B-scan e C-scan (Figura 2.1).



*Figura 2.1: Classificazione dei radargrammi [1].*

Assemblando le diverse tracce A-scan acquisite durante la prospezione, si ottiene una radargramma di tipo B-scan, rappresentato da un insieme di tracce disposte una accanto all'altra. Quindi le sezioni sono immagini rettangolari in cui in ascissa si ha un certo numero di tracce e in ordinata il tempo. Conoscendo la distanza tra tracce contigue si può parlare di lunghezza del rilievo sull'asse di avanzamento. Un insieme di tracce vengono definite B-scan. Infine assemblando radargrammi di tipo B-scan si ottiene un'immagine 3D chiamata C-scan. L'immagine tridimensionale permette di ottenere una più completa rappresentazione delle anomalie. Un fattore molto importante nella creazione di un'immagine 3D è la necessità di interpolazione tra campioni, tale operazione è

necessaria, ma può portare ad errate interpretazioni dei risultati, se non addirittura alla creazione di anomalie inesistenti. È quindi necessario che questa operazione di analisi dei dati venga fatta con grande attenzione e facendo sempre riferimento alle tracce A e B-scan.

L'informazione base di ogni radargramma è la *traccia singola* (definita anche A-scan).

Lungo il profilo topografico del rilievo radar la misurazione avviene su punti prefissati. Su ciascuno di detti punti si registrano un certo numero di campioni secondo la finestra e l'intervallo di campionamento prefissati. L'insieme di detti campioni riferiti ad un punto sul profilo costituisce una *traccia*, detta anche scansione (scan). Nei sistemi classici la traccia rappresenta un'ampiezza (dB) sull'asse delle x, in funzione del tempo (ns) sull'asse delle y. Il fatto che la variazione di ampiezza sia misurata in funzione del tempo permette che questa misura venga definita nel dominio del tempo. Se al posto del tempo fosse rappresentata la frequenza, allora si parlerebbe di analisi del dominio della frequenza.

In definitiva la traccia rappresenta le variazioni di ampiezza del segnale riflesso, rispetto al tempo percorso dal segnale stesso. Conoscendo la velocità dell'onda nel mezzo, il tempo può quindi essere convertito in una distanza, che nel nostro caso è la profondità.

La Figura 2.2 mostra una traccia (tempo vs ampiezza) e il suo spettro (frequenza vs ampiezza). La trasformazione del dominio del tempo al dominio della frequenza viene fatta tramite la trasformata di Fourier.

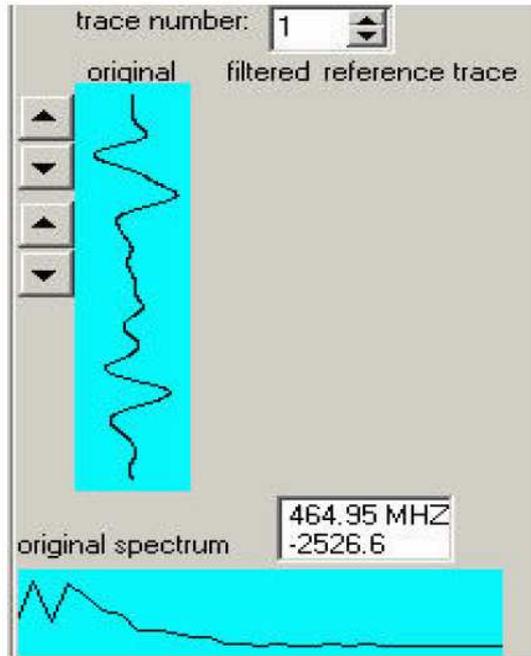
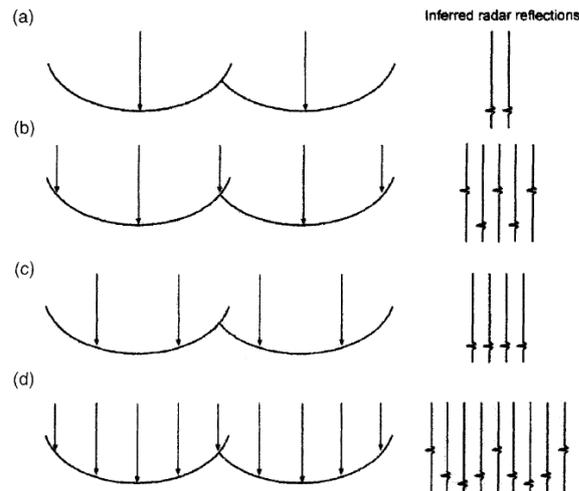


Figura 2.2: Andamento di una traccia, visualizzazione mediante il software.

La distanza tra tracce contigue è prefissata e prende il nome di *spaziatura* (station spacing,  $n_x$ ). Detto valore non è casuale ma in accordo alla regola di Niyquist dipende dalla frequenza delle antenne in uso, oltrechè dalla costante dielettrica del terreno secondo la relazione:

$$n_x = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon}} = \frac{75}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

dove  $n_x$  (m),  $c$  è la velocità della luce nel vuoto  $3 \cdot 10^8$  m/s e  $f$  (MHz). Risulta quindi evidente che se la spaziatura usata è maggiore di  $n_x$  il rilievo non disporrà di dati completi e quindi potrà falsare l'andamento dei riflettori o peggio non evidenziarli (Figura 2.3).



**Figura 2.3: Effetti della variazione nella spaziatura:** (a) una spaziatura eccessiva fallisce nella restituzione dell'immagine; (b) una spaziatura pari ad  $\frac{1}{2}$  della dimensione principale del target genera una sottostima delle dimensioni; (c) la stessa spaziatura, ma con una diversa localizzazione delle tracce non restituisce un'immagine corretta; (d) spaziatura pari ad  $\frac{1}{4}$  della lunghezza del target, la riflessione rappresenta bene la forma intercettata [25].

Su ciascuna traccia si registrano un certo numero di *campioni* (stacks) a seconda della finestra e dell'intervallo di campionamento prefissati. La registrazione del campione consiste nella misura del valore numerico dell'ampiezza del segnale nell'unità di tempo, la quale è determinata dalla frequenza di campionamento prescelta. Detto campione è comunque un valore medio di tante misure, pari al numero di stacks impostato. Tra la misura di un campione e il successivo intercorre un intervallo di tempo detto *intervallo di campionamento* (sample rate) che dipende dalla frequenza di campionamento impostata (per esempio ad una frequenza di campionamento di 1250 MHz corrisponde un intervallo di campionamento di 800 ps). La scelta di detto valore è basilare e deve essere commisurata alla frequenza nominale delle antenne in uso. Infatti si ha che ad un intervallo di campionamento molto grande corrisponde una perdita di dati con inevitabile falsamento dei risultati (Aliasing<sup>2</sup>). Di nuovo si ricorre alla regola di Nyquist ed aggiungendo un fattore di sicurezza di 2, si ottiene che una buona frequenza di campionamento deve essere pari ad almeno 6 volte la frequenza dell'antenna in uso secondo lo schema seguente.

<sup>2</sup> **Aliasing o distorsione da campionamento lento:** in elettronica è il fenomeno per il quale due segnali analogici diversi possono diventare indistinguibili una volta campionati. Costituisce un serio problema che si riflette direttamente sull'uscita del sistema in esame, alterandone la veridicità.

Intervallo di campionamento (ps)	Frequenza di campionamento (MHZ)	Frequenza antenne (MHz)
6667	150	25
3333	300	50
1667	600	100
667	1500	200-250
333	3000	500
208	4800	800
167	6000	1000

*Tabella 2.1: Intervallo e frequenza di campionamento per diverse frequenze.*

La scansione avviene all'interno di una certa finestra di campionamento che è la lunghezza del tempo di misura lungo la verticale espressa in nanosecondi. Tale valore è strettamente connesso al numero di campioni e all'intervallo di campionamento secondo la relazione:

$$n^{\circ} \text{ campioni} = \frac{\text{finestra di campionamento (ns)}}{\text{intervallo di campionamento (ns)}} \quad (2.2)$$

Inoltre dovendo scegliere la finestra di campionamento si potrà utilizzare la seguente relazione:

$$\text{finestra di campionamento} = 1.3 \frac{2p}{v} \quad (2.3)$$

dove  $p$  è la profondità di indagine e  $v$  la velocità nel mezzo.

## 2.2 Interpretazione ed elaborazione dei dati

L'interpretazione delle forme risultanti da un radargramma è un'operazione piuttosto complessa. I fattori da considerare sono molti e di diversa natura, a partire dalla velocità di propagazione del segnale nel terreno, alla geometria del target e del cono d'emissione.

L'immagine di un oggetto generata in un radargramma, non sempre corrisponde con la rappresentazione geometrica dello stesso. Per esempio l'effetto della combinazione di diversi riflettori può generare una forma nell'immagine che non

corrisponde alla realtà, lo stesso accade quando si ha una variazione nella velocità di propagazione del segnale che può causare una dilatazione dell'aspetto dell'oggetto.

È importante anche capire cosa vediamo in una traccia ricevuta.

Ma innanzitutto definiamo alcuni concetti principali che bisogna avere ben chiari prima di iniziare il processing dei dati.

1. *Primo arrivo (livello di base)*: viene selezionato dall'operatore nella fase di elaborazione ed espresso come numero di campione successivo all'arrivo dell'onda diretta.
2. Per *onda diretta* si intende quella tra antenna trasmittente e antenna ricevente. Detta scelta è importante in quanto determina il punto zero nell'asse di profondità.

**Una volta stabilita qual è la porzione di onda che ci interessa, si può procedere con l'elaborazione dei dati.**

Le sezioni radar ottenute alla fine di un'indagine risultano sempre caratterizzate dalla presenza di "rumore" che deve essere rimosso al fine di enfatizzare il più possibile la visibilità degli oggetti investigati.

Il processing dei dati radar è la parte più impegnativa del rilievo GeoRadar.

Vi sono diverse operazioni di elaborazioni che possono essere utilizzate con svariate finalità a seconda del tipo di analisi, dell'obiettivo della prospezione e del tipo di substrato.

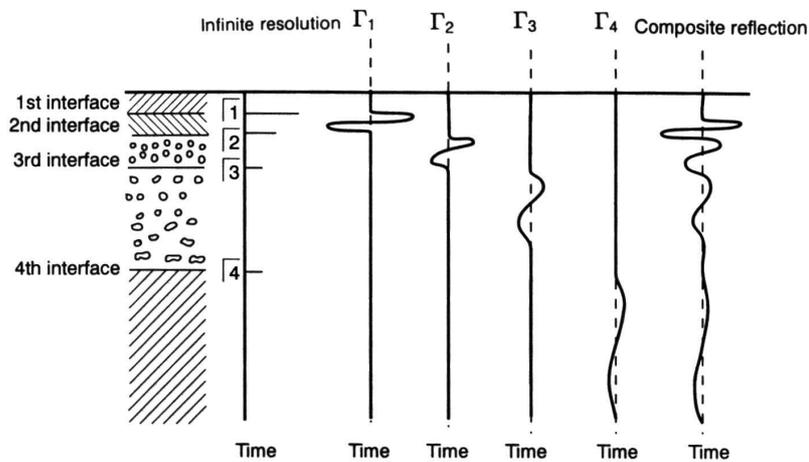
Il *filtraggio* serve per esaltare certe caratteristiche e/o ad eliminare segnali di disturbo. I filtri possono essere classificati in filtri 1D (*temporali*) che agiscono sulla singola traccia e filtri 2D (*spaziali*) che agiscono su più tracce in senso orizzontale. Solitamente i filtri temporali sono d'ausilio per rimuovere segnali provenienti da oggetti piccoli o da disturbi esterni, aventi contenuti di frequenza peculiari ad una o poche tracce. I filtri spaziali vengono usati sull'asse dello spazio e possono essere di tipo *passa basso (low pass)* e *passa alto (high pass)*. Per *passa alto* (o *basso*) si intende un filtro che permette il passaggio solo di frequenze al di sopra (o al di sotto) di una data *frequenza di taglio* e che attenua la restante parte di segnale. Sono dei mezzi utili per migliorare il *clutter* (caos) presente nel segnale; quando è provocato da una frequenza bassa si applica un *passa alto* e viceversa usando un *passo basso*.

Si intende come *filtraggio temporale*, sia nel dominio del tempo sia in quello della frequenza, quello che si effettua lungo l'asse del tempo. È una tecnica di grande ausilio per rimuovere segnali provenienti da oggetti piccoli di non interesse o da disturbi esterni che in genere sono distinguibili in quanto si caratterizzano per un contenuto in frequenza differente dall'insieme dei segnali.

Un *filtraggio spaziale* è in pratica quello che si effettua lungo l'asse dello spazio, detto anche filtraggio 2D. In genere si applica un passa basso per esaltare livelli e quindi segnali coerenti orizzontalmente, mentre si applica un passa alto per esaltare livelli inclinati o segnali di diffrazione.

Un altro problema ricorrente è che quando lo spessore di uno strato è minore di metà della lunghezza d'onda, succede che il segnale riflesso all'interfaccia tra i vari strati risulterà combinato con quelli provenienti da altre interfacce come in Figura 2.4.

In queste circostanze è richiesta l'applicazione di qualche forma di deconvoluzione per poter riconoscere le porzioni di segnale provenienti da ciascun interfaccia. Questo processo è abbastanza complesso e non viene normalmente applicato nei casi applicativi.



**Figura 2.4: Deconvoluzione di una traccia [1].**

Esiste una grande varietà di metodi di processamento dei dati, ma per quanto riguardano le indagini di cui ci occuperemo, sono sconsigliate tecniche eccessivamente sofisticate in quanto troppo onerose da un punto di vista economico e di tempo [5].

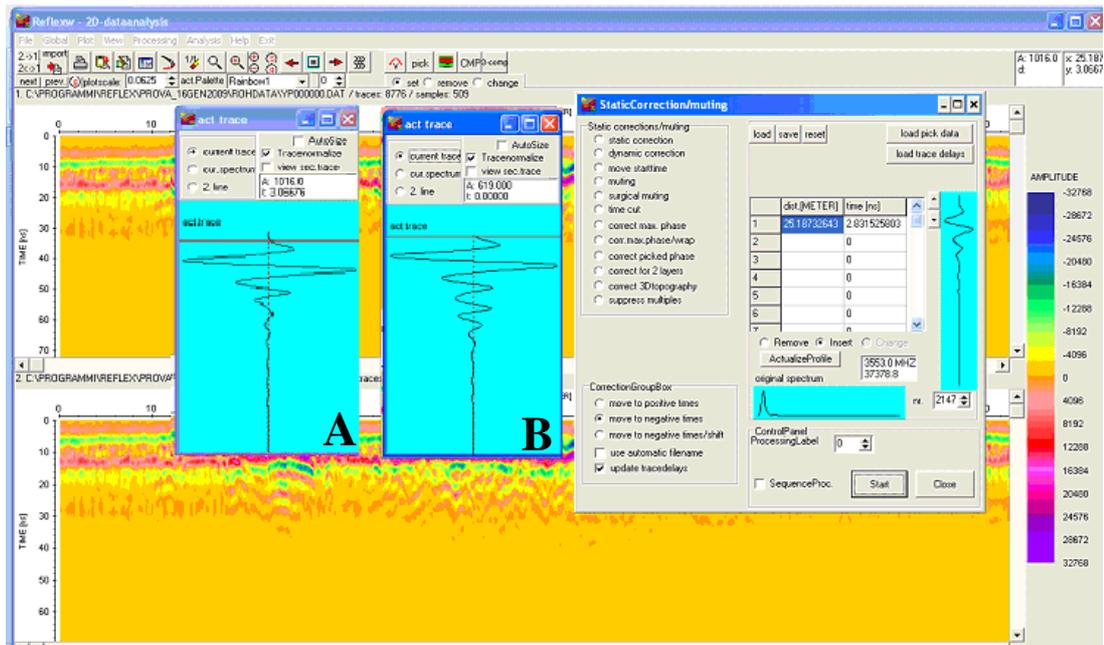
Si riportano alcune operazioni principali: static correction, declipping, subtract mean (dewow), manual gain, band pass filtering, background removal, running average, migration.

### **2.3 Static correction**

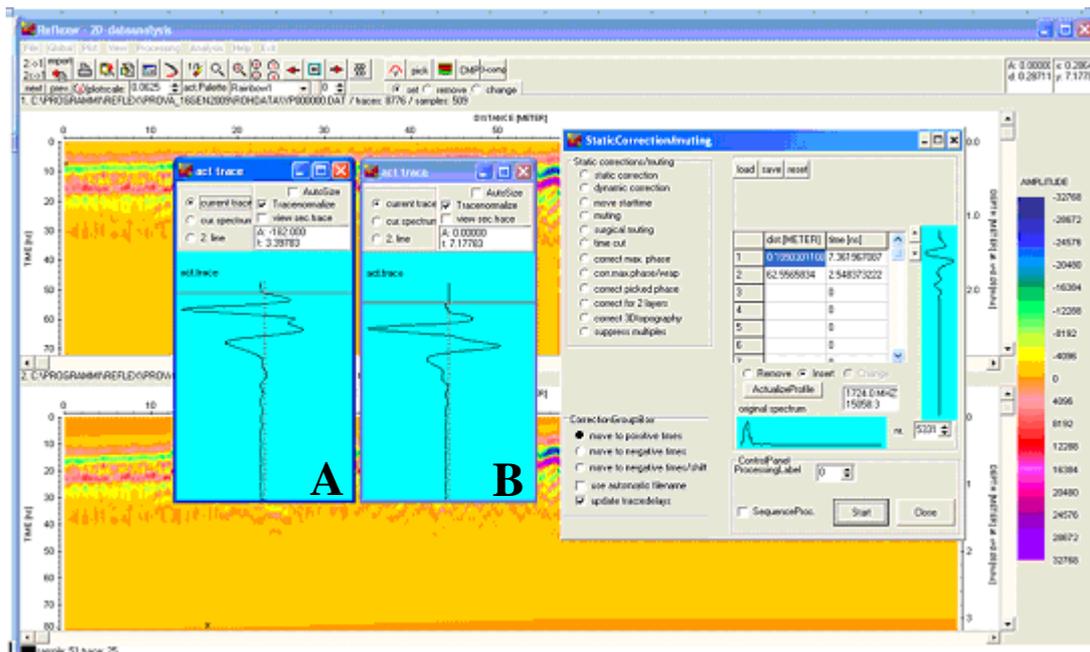
È un filtro che agisce su ogni singola traccia indipendentemente attuando una correzione nella direzione del tempo. Ci sono diverse modalità di utilizzo.

Le opzioni *move to positive times*, *move to negative times* e *move to positive times/shift* controllano la direzione della correzione apportata. Selezionando *move to positive times* le tracce vengono traslate verso il basso (valori di tempo maggiori). Viene utilizzato in gran parte per apportare la correzione topografica. È necessario impostare almeno due valori ai due estremi del radargramma: la distanza sull'asse delle x e il tempo in nanosecondi sull'asse delle y. Per esplicitare la scala delle profondità è necessario conoscere la velocità nel tempo. Quest'operazione deve essere eseguita alla fine del processing.

*Move to negative times* consente invece di traslare le tracce verso l'alto (valori di tempo minori). È possibile utilizzare tale opzione per esempio per eliminare ritardi temporali. Per far ciò bisogna inserire uno o più valori a seconda delle esigenze. Per la scelta dei quali può risultare utile l'uso della *wiggle* (la poligonale che rappresenta l'onda di ritorno) in modo da poter determinare in maniera più accurata i valori voluti. Quello che si ottiene è in pratica uno shift dell'immagine in cui la posizione del primo arrivo (livello di base) viene traslata senza modificare alcun valore sull'asse temporale e si assegna valore 0 in corrispondenza del nuovo livello di base. Selezionando questa opzione alcuni dati vengono persi.



**Figura 2.5: Static Correction.** Ricorrendo all'utilizzo della Wiggle Window (A – B) si determinano i valori da inserire per eseguire la Static Correction. A e B mostrano l'andamento di una traccia prima e dopo una static correction con opzione *move to negative times*.



**Figura 2.6: Static Correction.** Ricorrendo all'utilizzo della Wiggle Window (A – B) si determinano i valori da inserire per eseguire la Static Correction. A e B mostrano l'andamento di una traccia prima e dopo una static correction con opzione *move to positive times*.

Infine selezionando l'opzione *move to negative times/shift* viene preso come primo arrivo il valore maggiore inserito per la correzione. Questa traccia non viene modificata temporalmente, il resto delle tracce vengono traslate in basso proporzionalmente alle differenze dei valori corretti rispetto al livello base. Al

corrispondente intervallo di tempo inserito viene assegnato un valore di Ampiezza (dB) uguale a 0. La forma della correzione è la stessa di *move to negative times*, ma nessun dato viene perso in questo caso. Quest'opzione permette per esempio la compensazione topografica assumendo che si abbia una distribuzione omogenea della velocità. Dopo aver applicato le correzioni si ha che i livelli topografici corrispondono esattamente con la forma delle tracce che si hanno sullo schermo.

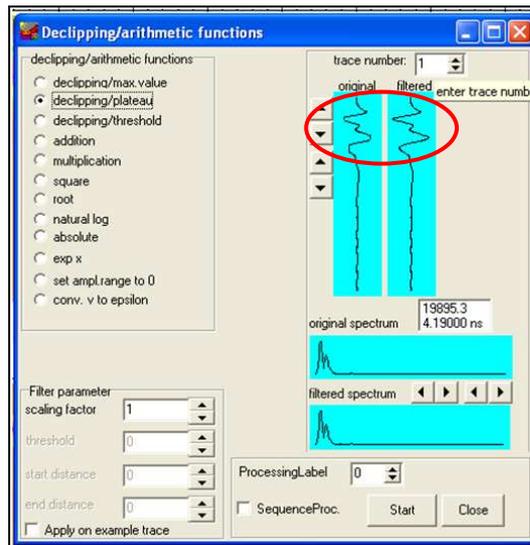
Le quote dei livelli stratigrafici possono essere ricavate dalla coordinata di tempo tenendo presente che tanto più piccola è la coordinata in nanosecondi tanto più elevata sarà la quota del terreno.

## **2.4 Filtri 1D**

### **2.4.1 Declipping**

Questo filtro serve a ricostituire parte di alcune riflessioni che potrebbero essere tagliate a causa ad esempio di una sovrasaturazione dovuta all'uso di un gain eccessivo durante la prospezione. Il declipping (dall'inglese to clip=tagliare) è eseguito ricorrendo ad un polinomio del terzo ordine.

Esistono diversi tipi di declipping che permettono di specificare automaticamente quali dati risultano clippati: *declipping max. value* è utile se i dati clippati assumono sempre il massimo valore all'interno della traccia; *declipping plateau* deve essere usato se i dati clippati hanno una zona piatta cioè la stessa ampiezza di segnale per quella parte (Figura 2.7); l'ultima opzione è *declipping threshold* da usare solo se i dati sono disturbati, in quei casi in cui i dati saltano da ampiezze positive a negative.



*Figura 2.7: Esempio di declipping plateau.*

### 2.4.2 Subtract Mean (Dewow)

Applicando questo filtro viene calcolato un valore medio lineare largo quanto un periodo principale (media mobile) e la media calcolata è sottratta dal punto centrale delle altre tracce. Questo filtro elimina eventuali componenti a bassa frequenza. Inoltre è importante considerare il parametro di finestra di campionamento usato; come regola generale si deve utilizzare un valore di range temporale equivalente ad un periodo intero.

L'effetto è essenzialmente quello di eliminare linee orizzontali.

Nella figura sono riportati due esempi in cui vengono utilizzati valori di timewindow diversi. Si può notare come nel primo l'effetto del filtraggio fa variare di molto la forma dell'onda. Ciò avviene proprio perché è stato inserito una valore basso di tempo in nanosecondi per cui viene calcolata una media all'interno di una finestra molto piccola. Nell'altro caso in cui la finestra temporale è maggiore l'onda rimane praticamente uguale a se stessa.

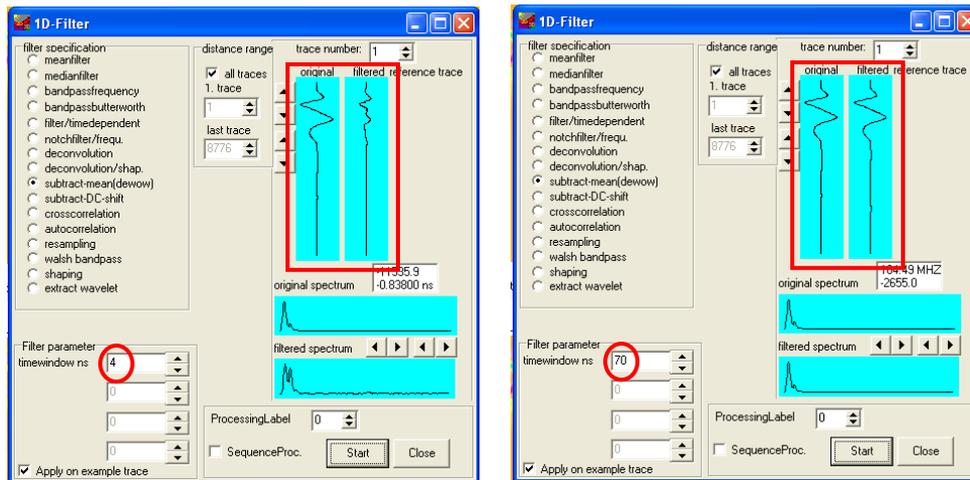


Figura 2.8: Esempi di Subtract Mean (Dewow) con due diverse finestre temporali.

### 2.4.3 Manual Gain

Il cosiddetto *guadagno* (dall'inglese *gain*) viene applicato per equalizzare l'ampiezza del segnale lungo la traccia a causa dell'attenuazione che subisce il segnale con la profondità. Essendo quindi la distanza correlabile con il tempo, il concetto di guadagno variabile nel tempo è facile, ed è come dire guadagno variabile con la profondità.

Non esiste una procedura standard di applicazione del guadagno, in quanto l'attenuazione del segnale è variabile da posto a posto.

La distribuzione sferica dell'energia elettromagnetica sul terreno per unità di area è inversamente proporzionale al quadrato della distanza con un decadimento esponenziale funzione della conduttività del materiale.

Il guadagno sarà via via maggiore a partire dal *time zero*, esso pertanto andrà calibrato così da integrare l'attenuazione del segnale con la profondità ossia col tempo. Vi sono vari tipi di "time gain", tra i più noti sono il SEC ( Spherical and Exponentially compensation) ed il AGC (Automatic Gain Control).

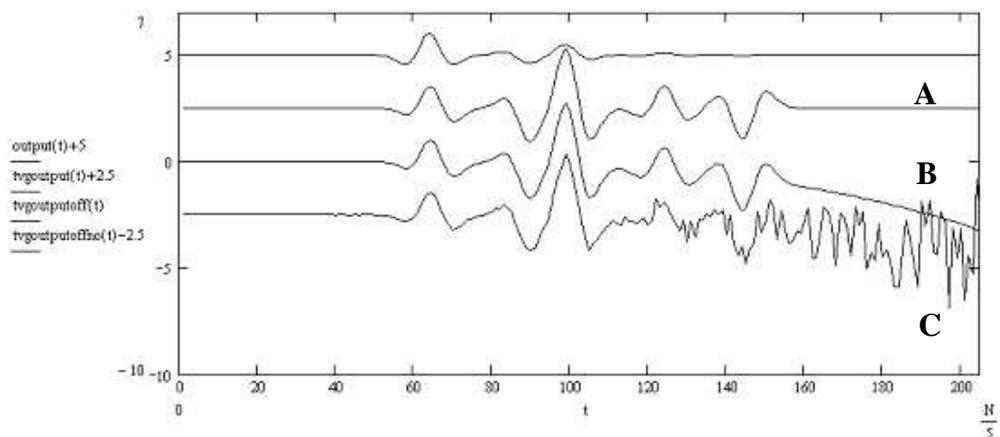
Il SEC applica un'amplificazione lineare nel tempo con in aggiunta un innalzamento esponenziale a compensare la distribuzione sferica e l'attenuazione esponenziale del segnale. Bisogna fornire il dato di tempo o campione di inizio, il valore del gain lineare adimensionale e del gain esponenziale in dB/m, nonché il valore del gain massimo.

L'AGC ha come obiettivo quello di equalizzare le ampiezze lungo la traccia e quindi esaltare tratti di bassa ampiezza contro tratti di ampiezza elevata. Questo

dopo aver calcolato l'ampiezza media lungo tutta la traccia, agisce lungo la stessa per tratti di determinata finestra (scelti dall'operatore), scalando le ampiezze, così da avere la media delle stesse, per quella data finestra, uguale alla media dell'intera traccia; pertanto a piccole finestre corrispondono forti equalizzazioni e a grandi finestre deboli mutamenti. Le informazioni relative ai dati originali vengono perse.

L'applicazione di questo filtro è sottoposta al rispetto di alcune condizioni, onde evitare la generazione di forme artificiali:

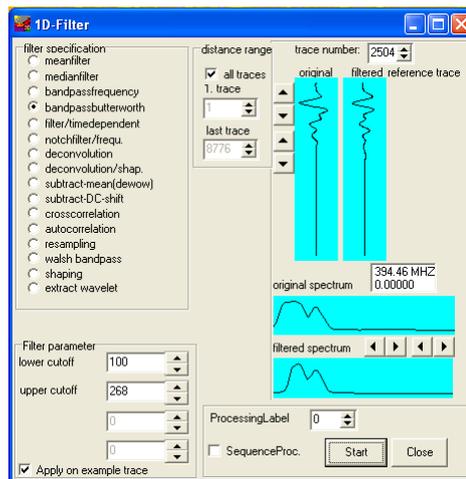
- il valore medio delle ampiezze di ogni traccia sia vicina allo 0, per evitare che un DC offset significativo venga generato per t grandi;
- il rumore per i valori di tempo elevati deve essere ridotto, per evitare che venga incrementato tale rumore.



*Figura 2.9: Effetto del guadagno: in alto l'effetto di un guadagno applicato correttamente (A), poi l'effetto di una piccola dc offset negativa (B) e alla fine l'effetto di entrambi una piccola dc offset negativa e rumore del segnale (C) [1].*

#### 2.4.4 Band Pass filtering (Butterworth)

Questo filtro permette di filtrare una specifica banda di frequenza. I parametri da impostare sono due frequenze: quella più bassa e quella più alta, al di sopra e al di sotto della quale il filtro non agisce, nella restante parte viene assegnato un valore 0. Deve essere utilizzato con attenzione e solo nel caso si sia individuata una banda di frequenza che presenta del rumore e dove il segnale è disturbato. È necessaria una buona conoscenza dello spettro magnetico per poterlo applicare.



*Figura 2.10: Esempio di Bandpass filter – Passa alto e passa basso. Si nota come l’energia al di sopra e al di sotto della frequenza di taglio sono poste uguale a 0.*

## 2.5 Filtri 2D

### 2.5.1 Background removal

Il segnale più intenso ricevuto dal GPR è quello che arriva direttamente dall’antenna trasmittente (onda diretta). L’applicazione di questo filtro è di solito necessaria quando il rumore dello strumento oscura la porzione di segnale desiderata.

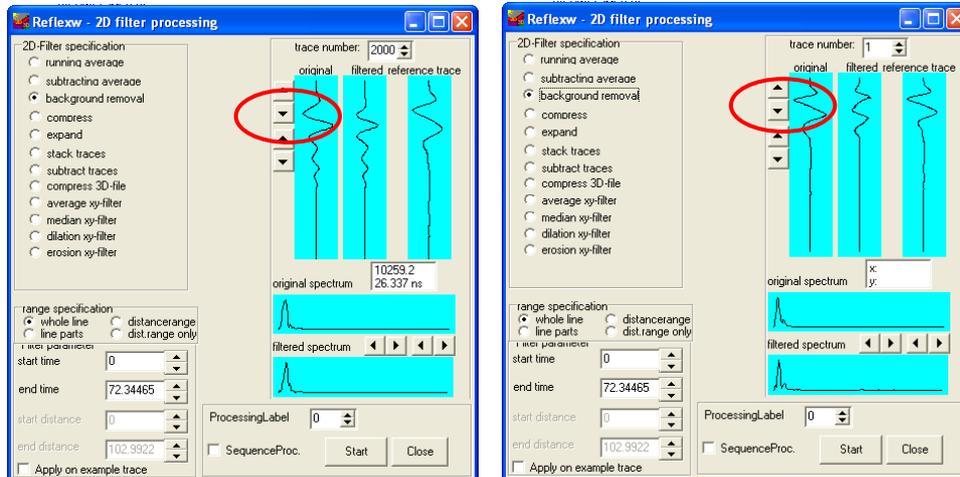
Quello che succede può essere spiegato con un semplice esempio; si immagina di guardare direzione di una fonte di luce molto forte, per esempio il Sole, la forte luminosità impedisce di vedere cosa ci sia all’orizzonte.

Questo filtro agisce su più tracce e serve a rimuovere rumori di origine interna o esterna. È un filtro passa alto che rimuove segnali orizzontali con grandi differenze. Alcuni esempi di rumori sono il “system ringing” (bande orizzontali quasi a monofrequenza) o il “surface scattering”(dovute a riflessioni o diffrazioni di oggetti posti ad esempio al di sopra della superficie). Queste diffrazioni possono creare seri problemi di analisi ed interpretazione dei dati. Il metodo classico di filtraggio è proprio il background removal.

L’essenza di questa tecnica è la sottrazione di una traccia media determinata all’interno di una finestra (start-time e end-time) della traccia acquisita, a tutte le tracce. Ne risulta la rimozione di una componente costante dalla registrazione.

Tanto maggiore è la finestra, tanto più debole sarà l’azione del filtro.

Siccome tende ad attenuare le differenze tra le varie tracce, deve essere usato con molta cautela in quanto può eliminare delle informazioni reali presenti nel sistema e non solo i rumori.

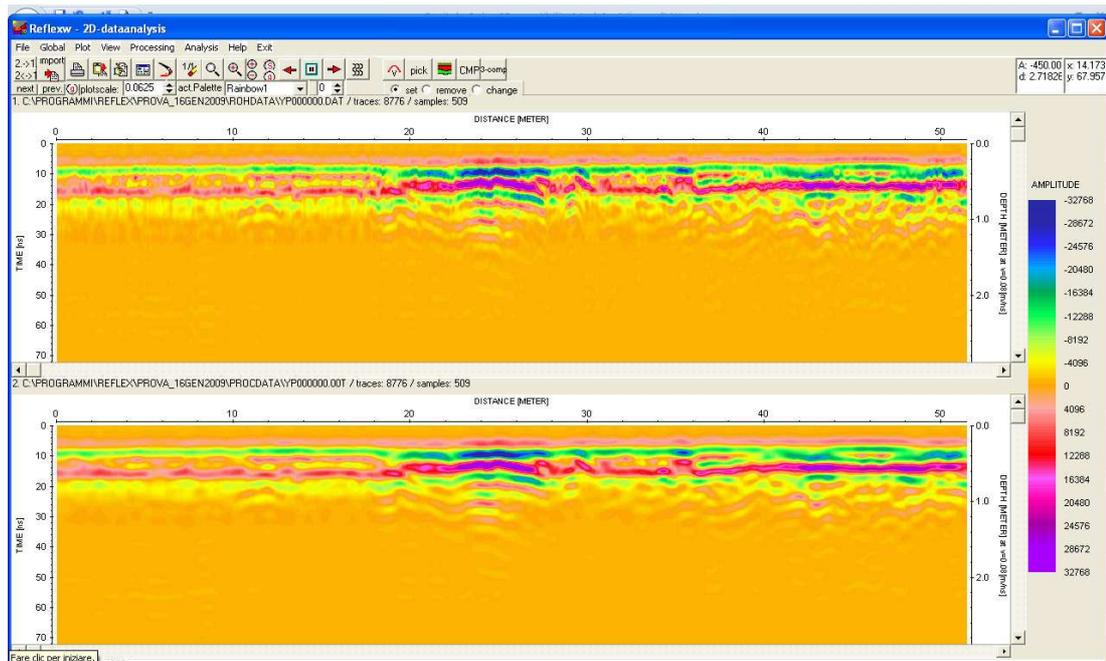


**Figura 2.11:** Due esempi di effetti del Background Removal - Nel primo è evidente l'attenuazione del primo arrivo, nel secondo in cui si ha un'inversione di polarità, cioè ad un picco di energia positiva corrisponde un picco di energia negativa.

## 2.5.2 Running average

Questo filtro applica uno *smoothing* del radargramma, sostituisce ogni traccia con una traccia media mobile calcolata da tutte le tracce all'interno di una finestra specificata e centrata su quella attiva. All'aumentare di tale finestra, aumenta anche l'effetto dello smoothing.

È anche possibile restringere l'intervallo sull'asse temporale (start time-end time). La restante parte rimane inalterata ovvero non viene filtrata. Riduce il rumore di fondo e tende ad esaltare le riflessioni orizzontalmente coerenti. L'effetto è quello enfatizzare energia coerente orizzontalmente.



*Figura 2.12: Esempio dell'applicazione di un Running Average.*

## 2.6 Migration

Il termine “migration” riunisce diversi tipi di operazioni tra le quali la “Kirchhoff migration” o “time migration”. Essenzialmente il termine si riferisce alla contrazione dell’informazione generata dall’oggetto riflettente dalla informazione ottenuta in superficie ovvero dalla riflessione.

Questi filtri vengono usati per riposizionare le iperboli nella giusta posizione. Se sono presenti delle riflessioni ad alta intensità, questo filtro tende a contrarre queste diffrazioni al minimo.

## ***Capitolo 3***

### ***Applicazioni del GPR a problemi di Ingegneria Civile ed Ambientale***

Sono molte le situazioni in cui la caratterizzazione di un terreno può essere efficacemente ottenuta mediante l'utilizzo del GPR.

La misura viene effettuata in maniera continua sullo strato più superficiale del terreno. Dall'elaborazione dell'immagine ottenuta in seguito alla misura, si riesce ad ottenere una rappresentazione 3D del sottosuolo, dalla quale possono essere dedotte un gran numero di informazioni, quali per esempio le caratteristiche geometriche e fisiche dell'oggetto dell'indagine.

La cospicua mole di dati che si ottiene, consente di estrapolare informazioni aggiuntive rispetto a quelle che normalmente si ottengono dai metodi più tradizionali [1].

Con questo non si intende dire che il GPR possa sostituire i metodi di rilievo del sottosuolo più consolidati e affermati, quali realizzazione di pozzi e carotaggi, ma quantomeno consente di realizzare "pozzi intelligenti", permettendo di localizzarli nel punto più idoneo, in cui può essere dedotto il maggior numero di informazioni utili.

Un altro vantaggio è che qualora le informazioni ricavate non fossero sufficienti e chiare, il rilievo può essere ripetuto più volte [6].

#### **3.1 GPR: campi di applicazione**

Un'indagine GPR può essere di grande aiuto per chiunque debba prendere delle decisioni legate alla natura del sottosuolo, alla caratterizzazione interna di strutture o terreni, in tutte quelle circostanze in cui procedere ciecamente alla realizzazione di pozzi o scavi non è di grande vantaggio, anzi può costituire addirittura un danno inutile per l'ambiente e un rischio per la vita umana.

Notevoli sono i progressi e le innovazioni tecniche ottenuti per migliorare la qualità delle indagini GPR, nonostante ciò le esigenze degli utenti richiedono livelli di accuratezza sempre maggiori.

Il GPR trova delle applicazioni ben consolidate in vari campi.

#### Ingegneria civile e ambientale:

- individuazioni e mappatura di reti di sottoservizi (tubi metallici, plastici, cavi elettrici e di fibra ottica, cunicoli, ecc.);
- individuazione e riconoscimento del tipo di armature in calcestruzzo;
- verifica consolidamenti;
- controlli strutturali su manufatti per individuare fratture, superfici di distacco, zone di ammaloramento dei materiali;
- monitoraggio dello stato di conservazione dei rilevati ferroviari;
- indagini non invasive per la valutazione delle condizioni idrauliche e strutturali di opere civili di vario tipo (strade, rilevati, ponti, dighe, murature, condotte e tubazioni, ecc.) (Figure 3.1 e 3.2);
- ricerca e individuazione strutture sepolte per la pianificazione di opere di scavo e di ricostruzione;
- ricerca di oggetti sepolti pericolosi per l'ambiente e la salute pubblica, per esempio serbatoi di stoccaggio di combustibili, bidoni interrati contenenti rifiuti tossici;
- ricerca di siti contaminati;
- misura dello spessore di strati ghiacciati o della neve (necessario nelle regioni del Nord).

#### Geologia:

- individuazione di profili stratigrafici;
- contatti geologici;
- profondità del bedrock;
- individuazione cavità carsiche;
- individuazione profondità della falda acquifera;
- analisi e mappatura di discontinuità in generale (fratture, faglie, giunti, limiti litologici, ecc.).

#### Archeologia:

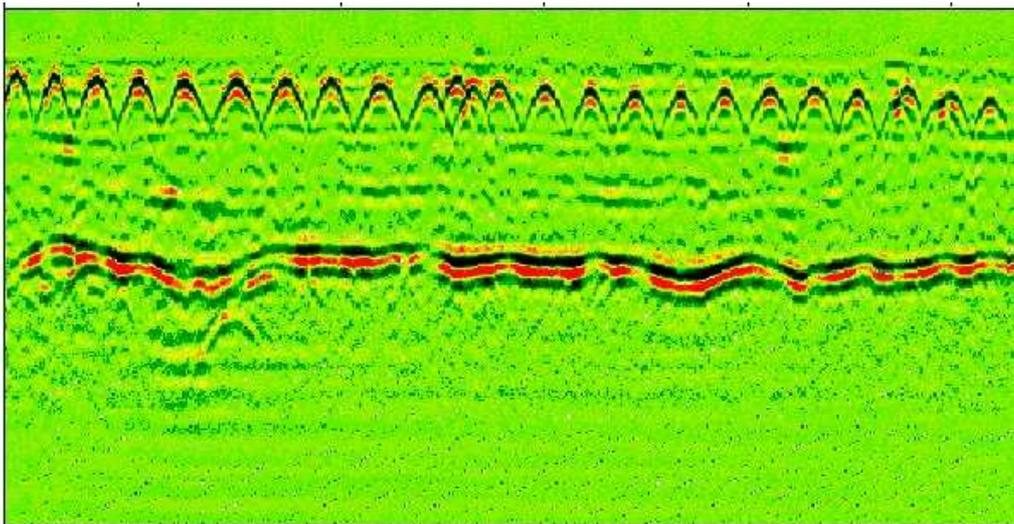
- caratterizzazione stato di salute opere d'arte quali affreschi e strutture architettoniche;
- individuazione strutture sepolte;
- verifica stato di conservazione delle murature.

Inoltre la tecnologia GPR ha trovato una possibilità di impiego anche nel campo delle indagini forensi e militari, per la localizzazione di nascondigli, rifugi sotterranei e di ordigni bellici sepolti [7].

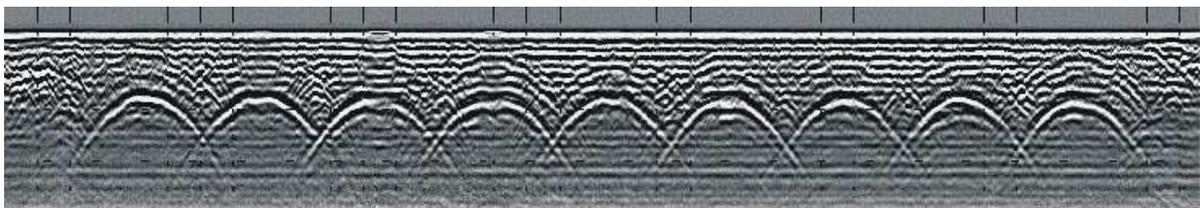
L'essenza della tecnica non differisce molto da quella di un radar convenzionale che lavora in aria, ma affinché un'indagine GeoRadar sia efficacemente impiegata bisogna adoperare i seguenti ulteriori accorgimenti:

- un'adeguata penetrazione del segnale in funzione della profondità da raggiungere;
- forte dispersione del segnale da parte dell'oggetto da investigare;
- un'adeguata ampiezza d'onda in funzione della risoluzione che si vuole ottenere.

In genere si utilizza solo la porzione di segnale che viene riflessa dall'oggetto e torna indietro, in realtà si potrebbero ottenere informazioni utili anche da quella porzione di segnale che procede il suo percorso senza essere riflessa.



*Figura 3.1: Indagine GPR del manto stradale che mostrano i rinforzi metallici e uno strato continuo di materiale alla base [1].*



*Figura 3.2: Indagine radar su un ponte a 9 arcate [1].*

### 3.2 Esempi di applicazioni in campo ingegneristico, ambientale e geologico

Come già detto il GPR presenta un numero cospicuo di vantaggi rispetto ad altre tecniche di indagine geofisiche, soprattutto quando si vogliono realizzare indagini non invasive per non distruggere l'integrità di una struttura.

Può essere usato sia spingendolo a mano, sia trascinato da un veicolo (Figura 3.3). Il rilievo può essere condotto su una linea singola o secondo una maglia. La precisione nel rilevare lo spessore dei vari strati che si può raggiungere è dell'ordine del 3-5% per l'asfalto nuovo e del 5-10% per asfalto già esistente e calcestruzzo e 8-15% per substrati granulosi. Questi risultati possono essere ottenuti solo a seguito di una calibrazione regolare della velocità di propagazione affinché variazioni localizzate nel contenuto di acqua non rendano nulle le misure.



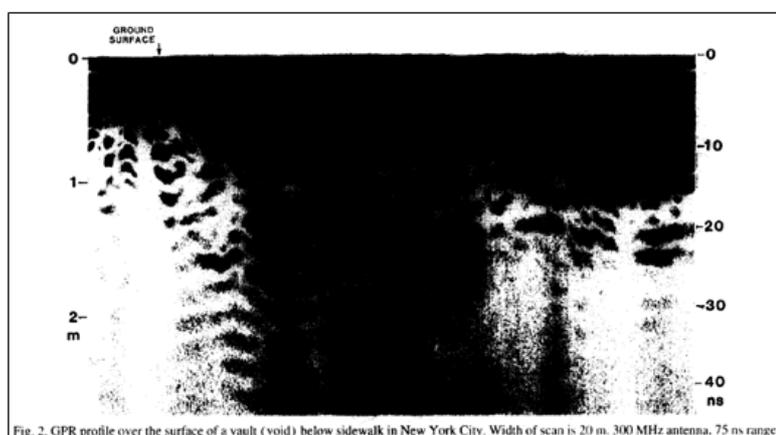
*Figura 3.3: Diverse modalità di esecuzione di un rilievo [1].*

#### 3.2.1 Indagine per la localizzazione di cavità nel sottosuolo

Nelle grandi città lungo la costa orientale degli Stati Uniti, negli ultimi secoli sono stati realizzati numerosi cambiamenti nel livello e nella qualità delle strade. In molte strutture i piani seminterrati nel momento in cui non venivano più usati, venivano abbandonati e inglobati nella realizzazione di strade o di marciapiedi. Occasionalmente veicoli pesanti che attraversano aree in cui sono presenti delle cavità, hanno causato l'infossamento della strada. La localizzazione di queste cavità è sconosciuta, per questo motivo si è reso necessario attuare una campagna di rilievo GPR di una determinata zona, prima di procedere con i lavori, in quelle aree in cui ci sia il sospetto della presenza di tali cavità. La Figura 3.4 mostra un profilo GPR lungo un marciapiede, dove si sospettava la presenza di cavità non

riportate sulla cartografia ufficiale che si estendeva dal palazzo adiacente fino a sotto la strada. L'antenna utilizzata per il rilievo ha una frequenza di 300 MHz.

La traccia multipla più scura nel profilo indica la presenza di un vuoto al di sotto del piano campagna. Tale riflessione mostra come il breve impulso, all'interno dell'ampia cavità, perda molta della propria energia. Infatti succede che se le dimensioni dei vuoti sono multipli della lunghezza d'onda del segnale, l'impulso sarà riflesso molte volte e un segnale di risonanza sarà visibile sulla sezione registrata. La cavità individuata a seguito del rilievo è una di quelle effettivamente rinvenute durante le fasi di scavo [6].



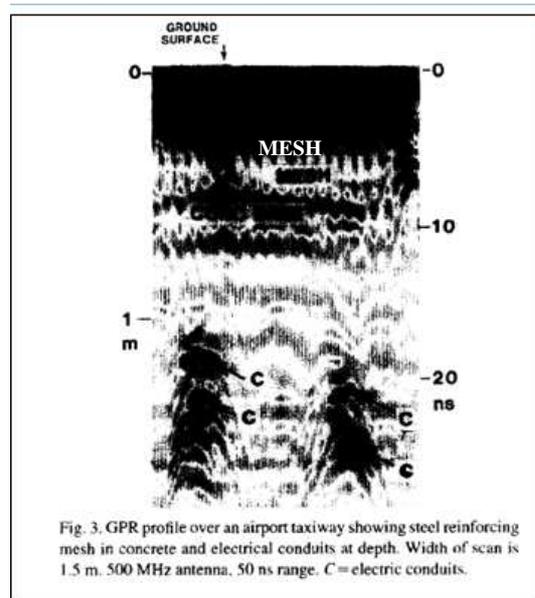
*Figura 3.4: Profilo GPR su un marciapiede al di sopra di una cavità [6].*

### 3.2.2 Individuazione di reti tecnologiche

Dove la localizzazione e la profondità di oggetti sepolti sottoterra non sono note, la tecnica GPR può essere di grande aiuto soprattutto laddove il mezzo ospitante permetta un'adeguata penetrazione del segnale. Risulta particolarmente appropriata in quei siti adiacenti a recinzioni di metallo o elementi metallici di altro genere che possono interferire con altre metodologie di indagine come per esempio la geoelettrica o la magnetometria. In molti complessi industriali, commerciali o residenziali, le mappature delle reti sotterranee (acqua, fognature, elettriche, telefono, internet, tv,...) sono spesso non esistenti o non abbastanza accurate. Quando si ha la necessità di realizzare una nuova linea o di evitare di danneggiare una linea già esistente, tale mancanza porta a provocare danni abbastanza rilevanti, come la rottura di una condotta o di una linea elettrica con la conseguente ricaduta sulla cittadinanza. La seguente figura mostra un profilo GPR fatto su una pista di un aeroporto, dove la localizzazione e la stima della

profondità della linea elettrica doveva essere determinata prima di iniziare i lavori di costruzione in quel sito. L'antenna usata ha una frequenza di 500 MHz [6].

Il rilievo ha anche permesso di determinare la natura del materiale da rinforzo utilizzato in aggiunta al calcestruzzo e lo spessore della lastra. In effetti la grigliatura di rinforzo in acciaio è ben visibile nella sezione ad una profondità di circa 50 cm.

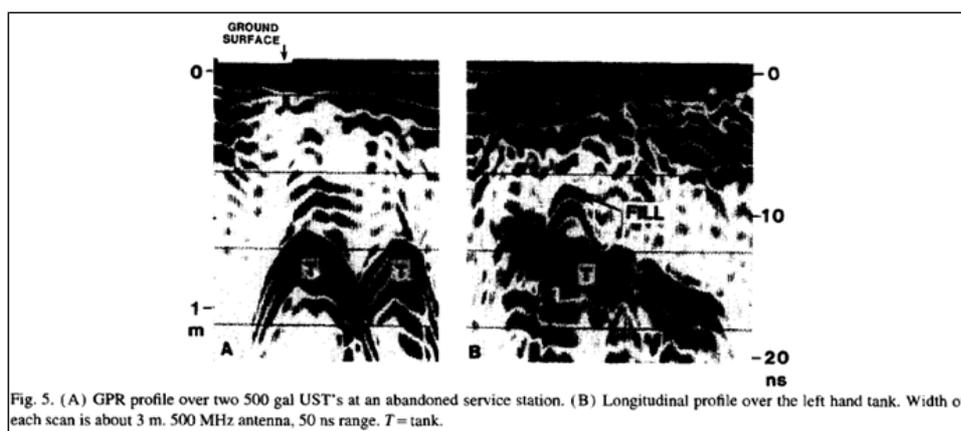


*Figura 3.5: Profilo GPR che mostra la presenza di una griglia di rinforzo (MESH) e di condotti elettrici in profondità (C) [6].*

### **3.2.3 Localizzazione di serbatoi di stoccaggio interrati**

Serbatoi di combustibili interrati sia in uso, sia abbandonati possono causare una grave contaminazione ambientale nel caso di sviluppo di fratture che provocano la fuoriuscita del contenuto e la contaminazione della falda acquifera. Sebbene le attuali normative riguardanti la localizzazione di tali serbatoi è molto rigida, impone infatti una chiara localizzazione e identificazione del sito di ubicazione del serbatoio, molti dei serbatoi realizzati in passato non sono affatto localizzabili, in quanto tutte le indicazioni presenti in superficie sono state perse. Prima di poter effettuare qualsiasi intervento è necessario realizzare una mappatura di tali serbatoi. La pericolosità di tali opere non è da sottovalutare visto che potrebbero essere danneggiati da un eventuale opera di perforazione o di scavo in generale, ancor più pericoloso è il caso in cui il combustibile presente nel serbatoio è volatile e si potrebbero innescare delle esplosioni a seguito delle perforazioni. La seguente figura mostra un profilo GPR in una stazione di benzina abbandonata

nello stato di New York. L'antenna usata ha una frequenza di 80 MHz. La Figura 3.6 A mostra un esempio di profilo GPR di due serbatoi e la Figura 3.6 B il profilo longitudinale realizzato al disopra di un serbatoio. Il GeoRadar può localizzare in maniera molto precisa il centro del serbatoio, infatti si nota il picco dell'iperbole dell'eco e si può anche determinare la lunghezza del serbatoio. L'apparente inclinazione verso il basso del profilo mostrato in figura B è un effetto artificiale causato dalla pendenza del terreno superficiale [6].



*Figura 3.6: Profilo GPR in una stazione di servizio abbandonata [6].*

### 3.2.4 Individuazione di forme di origine carsica

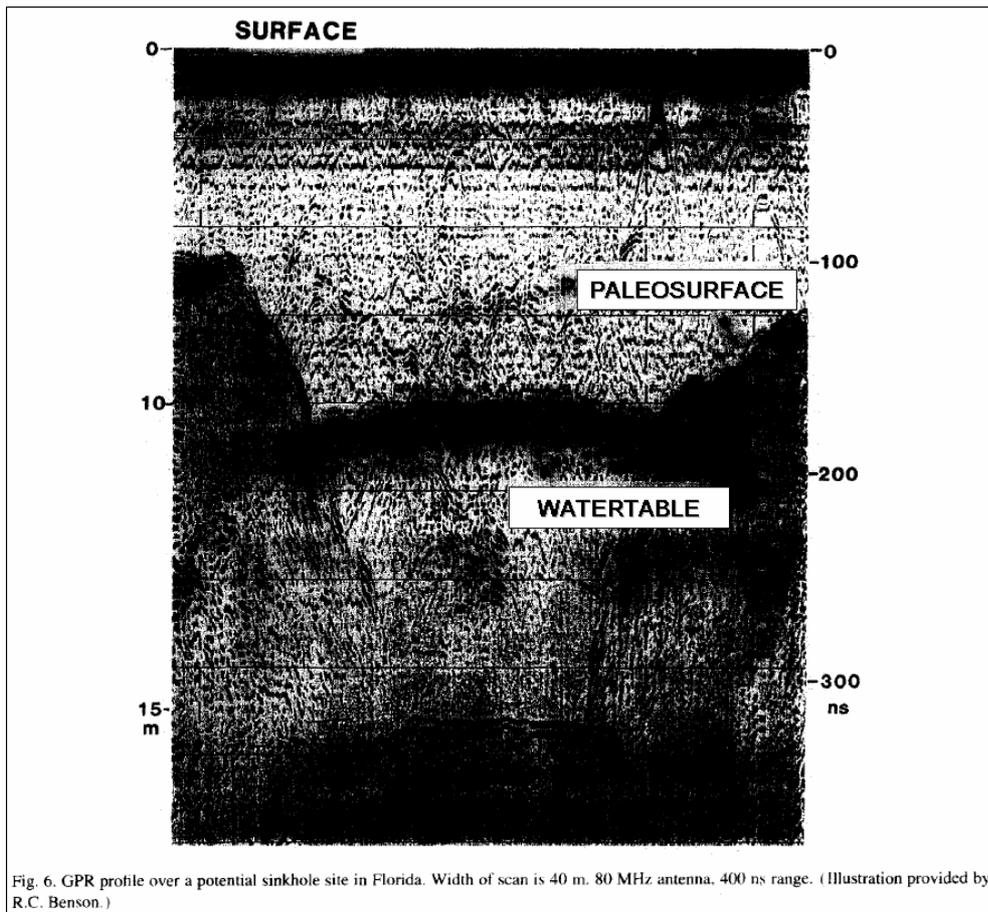
Le regioni umide caratterizzate dalla presenza di rocce composte da carbonati, solfati o cloruri possono essere soggette alla formazione di doline carsiche. La formazione di doline anche di piccole dimensioni può avere un effetto devastante sulle strade e su altre strutture, quando raggiungono la superficie. Da questo motivo scaturisce l'esigenza per gli ingegneri di conoscere le condizioni che si nascondono nel sottosuolo in tutte le regioni sensibili ai fenomeni carsici. Sebbene la maggior parte di queste forme carsiche sono ben note e localizzate, spesso accade che in regioni ricche di carbonati si può avere la formazione di nuove doline, spesso frutto dell'intervento dell'uomo sul regime idrologico di una certa area. Depressioni e cavità formatesi nei carbonati milioni di anni fa, potrebbero trovarsi al di sotto di depositi più recenti. Spesso a seguito delle frequenti fluttuazioni della tavola d'acqua, causate per esempio dall'intensa attività dell'uomo di prelievo dei fluidi dal sottosuolo o da periodi di intensa precipitazione, i sedimenti di età più giovane (localizzati in condizioni normali in

superficie) possono subire uno sprofondamento e causare così lo sviluppo di una cavità o di una depressione.

La seguente figura mostra un profilo GPR realizzato in un sito di potenziale formazione di una forma carsica in Florida. La paleosuperficie è composta da calcare. La sabbia e l'argilla ricoprono l'apertura, rappresentando un sovraccarico. In questo momento l'area al di sopra della cavità risulta stabile, ma anche una piccola alterazione del regime idrologico potrebbe innescare un collasso. La superficie della tavola d'acqua mostra una concavità rivolta verso il basso, anziché essere piatta perché l'antenna è stata trascinata al di sopra di una leggera depressione presente sulla superficie. La riflessione alla profondità di circa 16 m è una multipla dovuta alla presenza della tavola d'acqua.

Le multiple sono disturbi del segnale dovuti ad eventi che subiscono più di un ciclo riflessivo.

Si noti che la scala della profondità è stata modificata per tenere conto dei cambiamenti nei valori di saturazione del substrato. I materiali insaturi al di sopra della tavola d'acqua hanno una velocità di propagazione di circa 7 cm/ns. Al di sotto di quest'interfaccia la velocità dell'impulso è di circa 5 cm/ns , facendo sembrare che la riflessione avvenga molto più lontano [6].



*Figura 3.7: Profili GPR al di sopra di una potenziale dolina[6].*

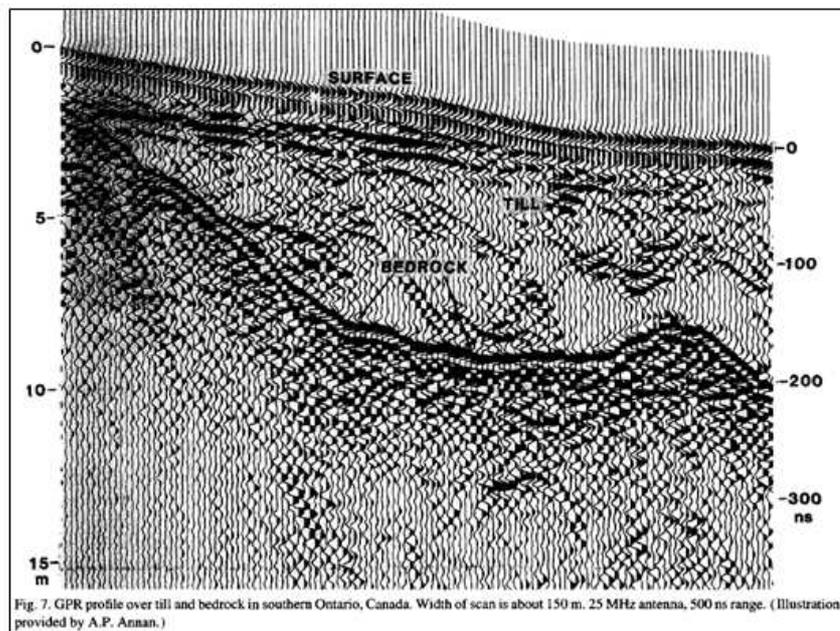
### 3.2.5 Indagine su interfaccia bedrock

Considerando il fatto che molto spesso il contrasto tra permittività dielettrica e conduttività tra il bedrock e i materiali sovrastanti è molto marcato, il GPR può anche essere usato per investigare l'interfaccia tra i due strati.

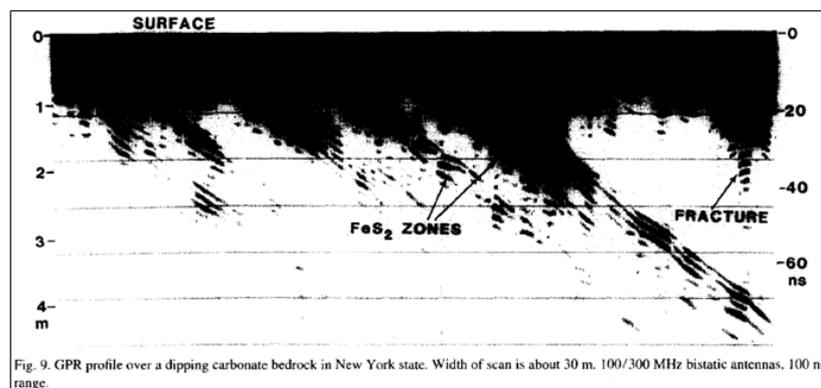
Tale contrasto risulta ancora più evidente se la tavola d'acqua segue la superficie del bedrock. La figura mostra un profilo GPR realizzato in una regione nel sud dell'Ontario. Questo profilo è stato inoltre confrontato con una sezione ottenuta da metodi sismici. L'utilizzo di un'antenna a bassa frequenza (25 MHz) permette una buona capacità di penetrazione anche in terreni ricchi in argilla. Grazie alla potenzialità del GPR di restituire un profilo ad alta risoluzione in continuo, può anche essere efficacemente impiegato come mezzo di ricerca di minerali (depositi di torba, sabbia, ghiaia).

Orizzonti stratigrafici che mascheravano l'andamento delle strutture geologiche sottostanti sono stati investigati con il GPR ottenendo dei buoni risultati. La Figura 3.8 mostra un profilo realizzato su una roccia paleozoica orientata in direzione obliqua rispetto al piano campagna, composta da carbonati e situata in

una regione a sud-est nello stato di New York. Sebbene i carbonati quando presenti in forma pura, mostrano solo una leggera variazione dielettrica con la profondità, l'impulso del GPR avverte abbastanza bene questi cambiamenti della conduttività che si hanno quando c'è un cambiamento nei minerali presenti o nel contenuto di acqua che riempie le loro fratture. Ulteriori indagini effettuate su affioramenti hanno confermato la presenza abbondante di cristalli di pirite nelle rocce. La zona ricca di pirite, quindi altamente conduttiva, fu efficacemente investigata con il GPR e si ottennero sezioni in cui risultava ben evidente la forte pendenza dello strato nel sottosuolo [6].



*Figura 3.8: Profilo GPR per individuazione bedrock [6].*



*Figura 3.9: Profilo GPR di una roccia paleozoica [6].*

### **3.2.6 Indagini su paleocanali, giunture e faglie di piccola scala**

L'utilizzo del GPR è stato anche testato per l'individuazione di strutture geologiche a piccola scala, situate nella parte più superficiale del sottosuolo, in sedimenti non consolidati della piana costiera Atlantica. Obiettivo di questa applicazione è la localizzazione, ai fini di poter realizzare una carta, di paleocanali, giunture e faglie di piccole dimensioni. Queste strutture possono agire come percorsi preferenziali per il flusso orizzontale di fluidi o come condotti verticali tra falde acquifere situate a livelli diversi e trasportare per esempio contaminanti in aree non previste dai modelli convenzionali di diffusione.

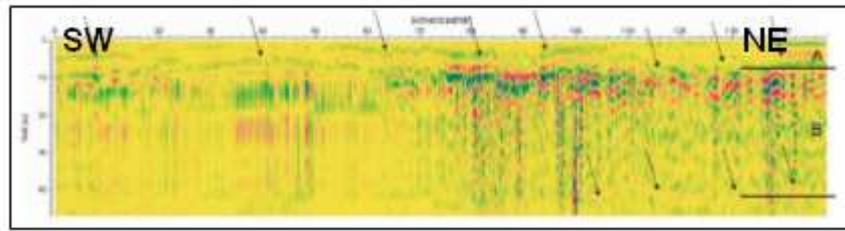
I paleocanali risultano facilmente riconoscibili dai radargrammi in tutte le peculiarità morfologiche (scour surface, migratine point bars, thalweg,...), mentre le giunture e le faglie possono essere chiaramente intercettate solo se orientate nella giusta direzione e dalle caratteristiche del materiale di riempimento. In questo caso è di fondamentale importanza la scala e l'orientazione del rilievo, l'area investigata deve essere tale da poter intercettare e identificare le suddette strutture [8].

### **3.2.7 Determinazione della stratigrafia di depositi di materiale di scarto da un'ex fornace**

L'indagine è stata svolta nel 2006. Il rilievo è stato eseguito secondo uno schema a maglie rettangolari che copriva tutta l'area di interesse. Lo strumento utilizzato per l'indagine è il RAMAC con antenna a 250 MHz. In base all'analisi delle riflessioni ed al tempo di attraversamento dell'onda, si evidenziano due substrati principali nell'intervallo di profondità consentito dalla frequenza dell'antenna utilizzata (un'antenna di frequenza pari a 250 MHz corrisponde ad una profondità di circa 4 m, con variazioni che dipendono dalla permittività dielettrica del materiale che compone il substrato e al contenuto idrico del terreno).

In base ai risultati dell'analisi dirette, ovvero delle trivellazioni, e allo stato idrico del substrato al momento del sondaggio (contenuto d'acqua circa 9%) si è stimato un valore di permittività dielettrica pari a 4. Da questo valore si è quindi calcolata la velocità media di attraversamento dell'onda e quindi la relazione tra tempo e profondità. Si è ottenuto che l'onda abbia percorso 74 cm ogni 10 ns di riflessione.

Dalla Figura 3.10 si evidenzia uno strato superficiale variabile da circa 20 a 90 cm, con spessore che diminuisce progressivamente in direzione NE denominato *strato A* ed uno strato più profondo denominato *strato B* che si trova ad una profondità tra i 280-340 cm. Dalla foto si evidenzia la presenza dei due strati A e B [23].



*Figura 3.10: Profilo GPR della zona interessata e fotografia dello scavo realizzato dopo l'indagine [23].*

### **3.3 Esempi di applicazioni in campo idrologico-idraulico**

Dopo un periodo di esperimenti del *GeoRadar* in campo archeologico e urbanistico, a partire dagli anni '90 è maturato un interesse per l'applicazione di

questa tecnica anche in campo idraulico-idrogeologico, tuttavia sono poche le applicazioni consolidate ad oggi [13].

Ad esempio la disomogeneità all'interno dei corpi arginali costituisce una causa di pericolo e può alterare sensibilmente, aggravandole, le condizioni di rischio idraulico dell'area di pianura presidiata dall'arginatura stessa. Infatti è bene ricordare che tali opere sono spesso in esercizio da lungo tempo (anche più di un secolo) e poste in località densamente popolate, soggette inoltre a periodiche e intense piene.

Con queste premesse appare evidente come la possibilità di impiegare il GeoRadar per pervenire ad una dettagliata conoscenza dell'attuale stato di salute strutturale di un rilevato arginale rivesta un grande interesse pratico-applicativo.

Gli enti regionali preposti al monitoraggio hanno l'esigenza di verificare periodicamente lo stato di salute degli argini. Per far ciò è necessario effettuare un rilevamento lungo le sponde di un fiume o di un canale per centinaia di chilometri per identificare eventuali debolezze. La maneggevolezza dello strumento GPR e la non invasività risultano particolarmente adatte a questo campo di applicazione.

Il problema non appena descritto costituisce l'oggetto principale del presente lavoro di Tesi. Tale problema è affrontato in maniera organica nei Capitoli 4, 5, 6 e 7. Di seguito si riportano alcune applicazioni del GPR, di interesse perchè in campi affini, dell'Ingegneria Civile Ambientale.

### **3.3.1 Indagini finalizzate al ripristino di un canale idroelettrico**

Nel 1989 nel New England, una tempesta mise fuori funzione una trasmissione che controllava il dispositivo di chiusura di un canale idroelettrico lungo 400 m. Il canale si riempì completamente, un tratto di lunghezza pari a 50 m di canale fu distrutta.

Durante i lavori di riparazione e sostituzione della porzione danneggiata, a seguito di una ispezione visiva della struttura, furono individuate molte cavità nelle sezioni adiacenti.

Si procedette iniettando della malta cementizia a bassa pressione per evitare di compromettere ulteriormente la stabilità della struttura.

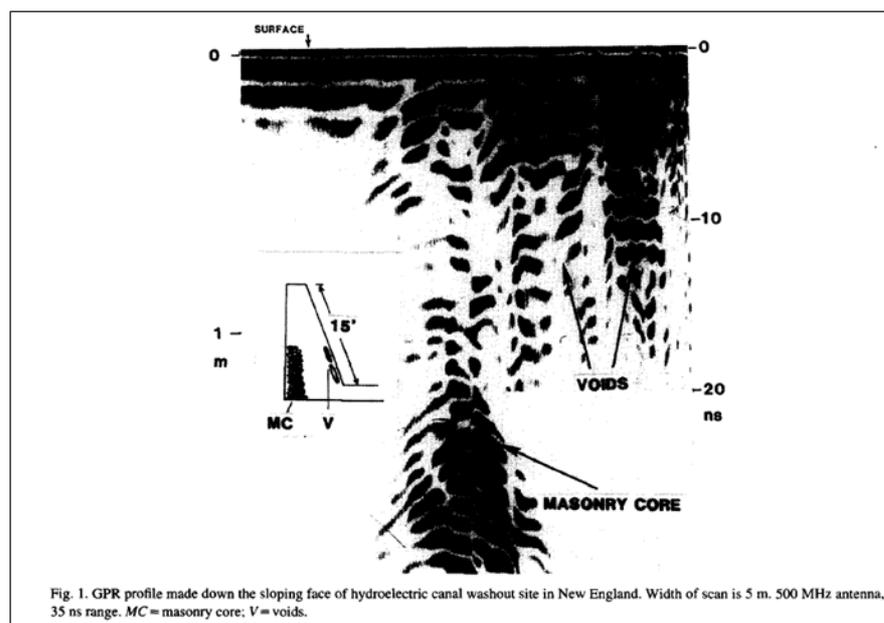
La dimensione dei vuoti era sconosciuta e la loro distribuzione sembrava essere altamente irregolare. Una soluzione convenzionale avrebbe fatto ricorso alla realizzazione di una serie di carotaggi all'interno della struttura per mappare

l'estensione dei vuoti e successivamente operare riempiendo tali cavità con della malta. L'inconveniente di questo approccio era che se le cavità avevano uno sviluppo notevole, l'intera superficie e base dei canali sarebbe stata perforata, così da innescare un ulteriore fenomeno di fuoriuscita dell'acqua.

Si preferì ricorrere all'utilizzo del GPR. L'indagine fu condotta con un'antenna di 500 MHz lungo tutto il tratto di canale interessato dalla rottura in corrispondenza della base del canale. Il rilievo prevedeva uno schema secondo linee parallele al canale stesso a distanza 1.5 m. Un rilievo addizionale, sempre secondo linee parallele al canale, ma con un intervallo di 2 m, fu effettuato per una lunghezza di 15 m a monte e a valle rispetto alla parte danneggiata del canale.

La Figura 3.11 mostra un profilo GPR effettuato sul lato interno del canale, in prossimità della zona di frattura. Il dettaglio mostra l'interno del muro laterale del canale, la sommità del canale è riportata sulla sinistra del profilo.

L'assenza di riflessioni indica che il cemento e il materiale che si trova dietro sono intatti. A metà della sezione si nota una riflessione molto forte causata dalla massicciata posta nel cuore dell'argine ad una profondità di circa 1 m. Sulla destra, vicino alla base del canale, si nota la presenza di segnali di eco multipli, che indicano la presenza di almeno due cavità proprio al di sotto della superficie della struttura del canale. Dai rilievi effettuati mediante carotaggi furono scoperti altri vuoti in una distanza di 10 m dalla zona della frattura [6].



*Figura 3.11: Profilo GPR realizzato sulla parte inclinata del canale idroelettrico [6].*

### **3.3.2 Erosione interna di una diga**

Le prestazioni del GPR sono state verificate anche per investigare il corpo di una diga mediante tomografia in foro e misura delle riflessioni dal piano campagna. La formazione di depressioni al di sopra del corpo della diga o l'aumento della fuga di acqua all'interno delle gallerie di ispezione necessitano di essere monitorate in quanto potrebbero rappresentare un campanello d'allarme che indica un aumento del rischio idraulico per la popolazione.

I metodi convenzionali di indagine geotecniche possono risultare troppo invasivi e addirittura innescare fenomeni ancora più gravi. Le dighe in terra sono spesso costituite da diverse zone di materiali diversi adatti ad assolvere diverse funzioni (Figura 3.12).

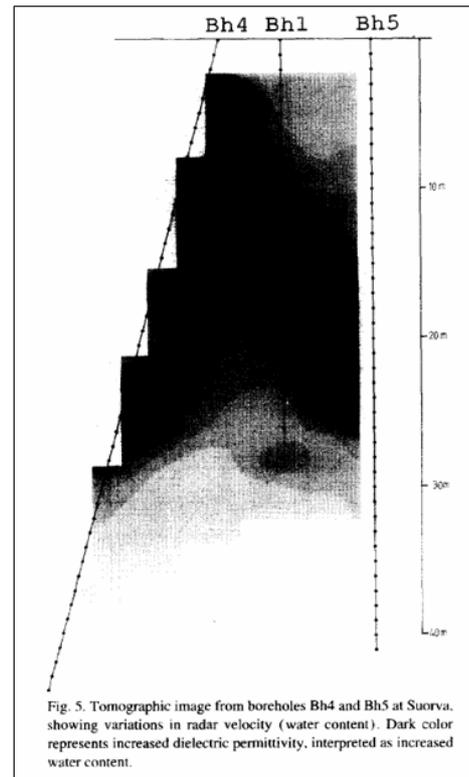
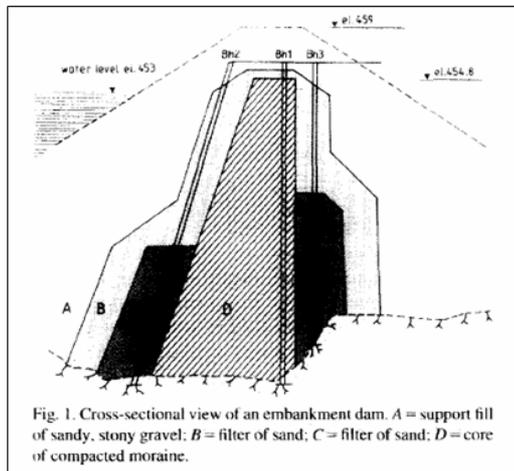
A causa della porosità del suolo, tutte le dighe in terra sono soggette a delle perdite che in condizioni normali non rappresentano un problema. Per permettere che l'acqua in uscita venga drenata esclusivamente dalla parte più esterna del rivestimento, evitando che la parte interna venga coinvolta nella filtrazione, essa viene riempita da materiale molto meno permeabile (argilla, limo...). La parte esterna, invece, è di solito composta da materiale più grossolano (sabbia e ghiaia). A causa della differenza granulometrica tra i materiali, si ha una diminuzione della tensione all'interno dello scheletro e localmente un aumento del gradiente di pressione che può innescare un sifonamento. Lo svilupparsi di tale fenomeno può essere ostacolato dalla messa in opera di un filtro adeguato. Un flusso molto alto attraverso il cuore della struttura può causare un'erosione o dei fenomeni di instabilità su lato verso valle. A loro volta queste erosioni potrebbero innescare altre erosioni tali da mettere in pericolo la stabilità dell'intera opera.

Si rende necessario quindi operare delle indagini volte a quantificare i cambiamenti nello spazio e nel tempo delle caratteristiche interne della struttura.

Il sifonamento è governato da cambiamenti macroscopici nelle tensioni del suolo e delle pressioni interstiziali. L'erosione di singoli grani è legata in maniera predominante al gradiente idraulico e al rapporto tra le dimensioni dei grani e quella dei canali.

I segnali radar non riescono ad avvertire questi cambiamenti, non rilevando le variazioni che sono alla base dell'erosione interna. Nonostante ciò l'effetto di

un'erosione interna influisce anche su altri parametri fisici che il radar può rilevare, come ad esempio cambiamenti nella porosità di una certa struttura [9].



*Figura 3.12: Sezione trasversale della diga e immagine tomografica ottenuta [9].*

### 3.3.3 Monitoraggio di argini in terra

Lo scopo di questo studio è la descrizione della struttura interna di argini in particolare si è indagato quelle porzioni danneggiate da fenomeni di assorbimento dell'acqua da parte dell'argine: tracimazione, sifonamento ed erosione.

L'indagine è stata condotta nel 2000 su un tratto di 17 km lungo gli argini del fiume Odra in prossimità di Wroclaw (Lower Silesia, Poland). Originariamente il fiume era un tipico meandering river, come dimostrano alcuni meandri tuttora esistenti. A partire dal XIII secolo sono stati realizzati argini in terra. Il materiale utilizzato è in generale molto eterogeneo. In totale nell'area di Wroclaw si hanno 120 km di sponde arginate. Nel 1997 si è verificato un evento di piena catastrofico in cui sono stati raggiunti i valori di livello e portata massimi mai registrati fino a quel momento. Ispezioni di campo effettuate dopo la piena hanno mostrato che gli argini furono localmente danneggiati a causa dei fenomeni sopra citati. Si è anche notato che gli argini hanno subito una maggiore distruzione in corrispondenza di punti in cui erano stati effettuati dei lavori di sistemazione di precedenti fratture. Per questo motivo si è avviata un'indagine con l'obiettivo di individuare proprio

tali punti e determinare la litologia e la struttura delle rocce al di sotto dell'argine. È stata utilizzata un'antenna di frequenza 200 MHz. Le diverse varietà litologiche utilizzate per la costruzione dell'argine sono risultate ben visibili dall'analisi dei radargrammi. Inoltre sono state identificate altri punti, all'interno del corpo arginale, interessati da fratture non riconoscibili dall'esterno. I risultati ottenuti sono stati confermati confrontandoli con le informazioni dei carotaggi [12].

### **3.3.4 Individuazione della superficie piezometrica**

Il principio scientifico su cui si basa la tecnologia GPR può essere efficacemente applicata a indagini di individuazione della falda idrica. Un materiale saturo d'acqua, come può essere quello ospitante la falda freatica, presenta una costante dielettrica di gran lunga superiore a quella caratterizzante lo stesso mezzo in condizioni asciutte o comunque non sature. Le onde elettromagnetiche subiscono quindi una forte attenuazione. Solitamente la presenza di acqua nel mezzo da indagare è da impedimento alle indagini GeoRadar, nel caso in cui tale condizione caratterizzi la porzione di materiale sovrastante i bersagli da rilevare. Nel caso in esame al contrario, si sfrutta proprio questo caratteristico comportamento delle onde elettromagnetiche e si individua quindi la profondità alla quale il segnale (visivamente o numericamente) si attenua in quantità significativa. I risultati ottenuti da prove sperimentali effettuate per commissione della Regione Emilia-Romagna nell'anno 2004 in alcune aree campione della pianura emiliana hanno dimostrato l'efficacia del GPR anche in questa applicazione.

Sono state evidenziate delle evidenti differenze di aspetto tra le scansioni effettuate a giugno e le corrispondenti scansioni effettuate a novembre nelle medesime posizioni e con le medesime modalità. Tali differenze sono da ricondurre unicamente alla diversa condizione idrologica, essendo tutte le altre condizioni al contorno le medesime. I dati ottenuti sono poi stati confermati dai dati di un piezometro posto nelle vicinanze. Ciò porta a dire che è possibile estrapolare il dato di profondità della superficie piezometrica anche per zone ove non esiste il dato piezometrico a seguito di una rilievo GeoRadar [10].

## ***Capitolo 4***

### ***Problemi di dissesto arginale, cause principali e possibili impieghi del GPR***

#### **4.1 Introduzione**

Gli argini sono l'opera di difesa dalle inondazioni di gran lunga più usata. Sono stati impiegati fin dai tempi più antichi, e molti argini esistenti hanno una lunga storia, durante la quale hanno subito rifacimenti, innalzamenti e ringrossi.

La manutenzione e la cura degli argini giocano un ruolo fondamentale per la sicurezza e la prevenzione dalle inondazioni. Questa attenzione all'integrità delle difese deve essere posta in atto soprattutto preventivamente; quando il fiume è ai livelli normali.

Tra le indagini per il monitoraggio di argini o di canali, la ricerca delle cavità presenti nel loro interno, costituisce uno dei maggiori problemi da affrontare.

L'individuazione delle cavità, generalmente, avviene ispezionando visivamente il canale, durante i periodi nei quali questo è asciutto. Tuttavia spesso, soprattutto per quel che riguarda i canali artificiali, ciò non è possibile perché sempre più di frequente tali canali non possono essere svuotati per esigenze operative e, di conseguenza, sorge la necessità di sviluppare metodologie per l'indagine in condizione d'esercizio.

Operativamente si tratta di realizzare delle acquisizioni sull'argine del canale, condotte lungo l'alzaia o il fianco asciutto dell'argine stesso, per individuare la presenza dei vuoti. L'utilizzo del Georadar in tali situazioni è di sicuro successo, come dimostrato anche in applicazioni più conosciute quali ad esempio la ricerca delle cavità in campo Archeologico [15]. Tuttavia i fattori che influenzano la performance delle misurazioni sono numerosi e sono legati alle condizioni al contorno del sito.

## 4.2 Argini

Gli argini sono generalmente costituiti da *rilevati impermeabili di terra* disposti lungo i fiumi per proteggere le zone a tergo. Dal punto di vista strutturale sono simili a dighe di terra di modesta altezza. Rispetto a queste, sono però soggetti a condizioni meno gravose, perché mentre le dighe di terra devono trattenere l'acqua per tempi indeterminati, anche per anni di seguito, gli argini sono investiti dall'acqua solo durante il periodo della piena. Peraltro, nei grandi fiumi questo periodo può essere anche assai lungo, potendo durare molti giorni e, in qualche caso, mesi. Nella progettazione degli argini si deve tenere perciò presente questa situazione dinamica, che può variare sensibilmente da caso a caso [18].

Gli argini possono essere disposti *in froldo*, vale a dire proprio al limite dell'*alveo ordinario* (o alveo inciso), oppure a una certa distanza da questo. In questo caso la fascia di terreno compresa tra l'alveo ordinario e l'argine prende il nome di *golena*.

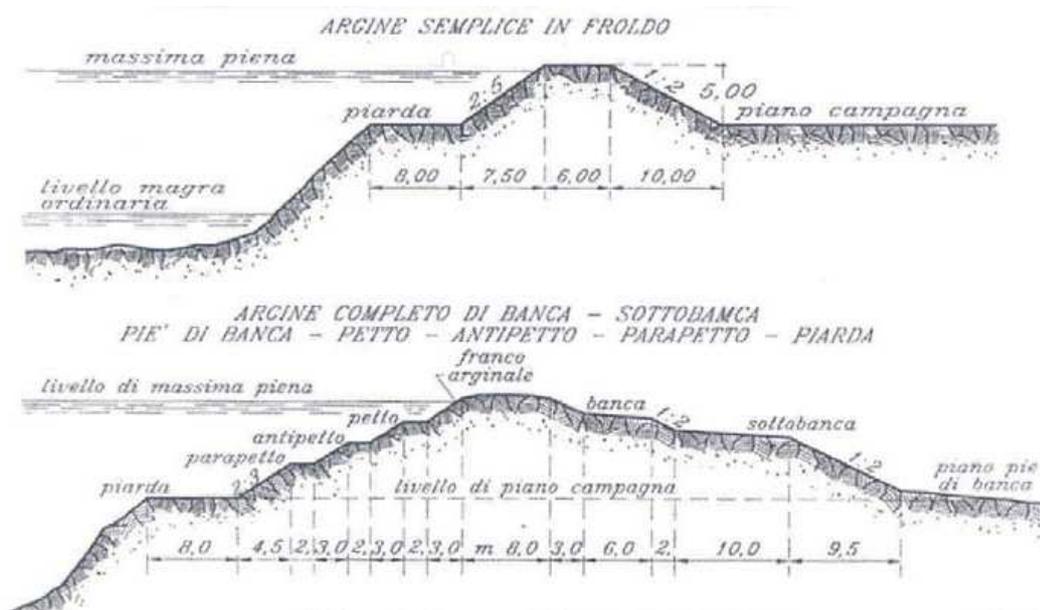


Figura 4.1: Schematizzazione di un argine in froldo e di un argine completo [18].

Il materiale sciolto per la costruzione dei rilevati arginali deve essere sufficientemente impermeabile per impedire il rapido progresso verso valle della linea di saturazione, e dotato di buona resistenza meccanica, per assicurare la

stabilità dei paramenti. Deve inoltre essere dotato di plasticità medio-bassa, per evitare rigonfiamenti e fessurazioni da ritiro al variare dell'umidità.

Gli argini, dopo il vaso d'espansione della golena, sono l'ultima difesa artificiale contro le piene. Perché il loro compito sia efficace, è necessario che venga fatta loro una continua manutenzione e vengano seguite alcune regole fondamentali nella loro costruzione o innalzamento.

### **4.3 Cause generali di dissesto arginale**

Le più comuni cause di dissesto arginale sono: il sormonto, il sifonamento, il franamento, lo sfiancamento e l'erosione. Spesso questi fenomeni possono avvenire contemporaneamente o innescarsi a vicenda. I cedimenti puntuali e i fenomeni di sifonamento possono determinare, a loro volta, cedimenti di portata molto più significativa che possono interessare via via zone più ampie del rilevato, fino a risentirsi addirittura anche in corrispondenza del coronamento dell'argine. Tali cedimenti possono a loro volta comportare fenomeni di sormonto arginale e quindi il successivo dilavamento del rilevato, con l'apertura di una breccia di dimensioni più o meno ampie e il conseguente allagamento delle zone ubicate a tergo [19] (Figura 4.2)..



*Figura 4.2: Cedimento dell'argine del fiume Reno a ridosso della chiavica Portoni corrispondenza del comune di Malalbergo (dicembre 2008).*

#### *Sormonto*

Il sormonto può essere dovuto a diverse cause, tra cui le principali sono superamento della portata di progetto, la sottovalutazione della scabrezza

dell'alveo, assestamento del rilevato, subsidenza del terreno, e può essere anche conseguenza dello sfiancamento o del franamento del rilevato. In molti casi si può riuscire a impedire il sormonto con un intervento tempestivo, sopraelevando l'argine con riporti di terra o sacchetti di sabbia.



Figura 4.3: Esempio di rottura per sormonto [18].

### *Sifonamento*

Prende il nome di *sifonamento* (in inglese *piping*) un pericolosissimo fenomeno erosivo che può verificarsi quando un'opera di materiale sciolto, o fondata su materiale sciolto, presenta un forte dislivello idrico tra monte e valle, come nel caso delle traverse.

Il sifonamento è particolarmente insidioso, perché è dovuto al verificarsi di forti cadenti piezometriche nel moto filtrante. Se si innesca il sifonamento, l'erosione stessa accorcia il percorso del moto filtrante, aumentando le cadenti piezometriche, per cui il fenomeno si intensifica, e può diventare tanto rapido che talvolta poco tempo dopo il manifestarsi dei primi sintomi (ore o anche frazioni di ora) può avvenire il completo collasso delle strutture.

Per comprendere il meccanismo di questo fenomeno, si fa riferimento alla schematizzazione di Terzaghi (1925), confermata dalle esperienze di Herzog (1938).

L'innalzamento del pelo libero prima e il suo successivo abbassamento poi, determinando uno squilibrio tra i carichi idraulici esistenti a monte e a valle dell'argine, danno origine a variazioni nel campo delle pressioni neutre  $u$  e delle tensioni totali  $\sigma_{tot}$  che in talune circostanze possono causare fenomeni localizzati di dissesto e/o di sifonamento. Nel primo caso si assiste a vistosi cedimenti che si sviluppano all'interno del rilevato, nel caso del sifonamento invece, si assiste ad una progressiva asportazione di materiale solido, innescatasi sul lato di valle del paramento o del terreno di fondazione a causa del raggiungimento del valore critico del gradiente idraulico.

Il rischio di sifonamento si manifesta con l'apparire di *fontanazzi*, ossia emergenze d'acqua sul paramento di valle dell'argine o sul terreno a tergo di questo. Se l'acqua esce limpida, vuol dire che il sifonamento non è ancora in atto, se esce torbida si è già innescato. In questi casi il materiale asportato si deposita intorno al fontanazzo, formando le cosiddette *soil boil*. Si può provare ad arrestare il trasporto solido nel fontanazzo, costruendo intorno all'emergenza una *coronella*, ossia circondandolo con sacchetti di sabbia l'emergenza in modo da innalzare il livello idrico, formando una contro-pressione. Una Coronella appena costruita e piena d'acqua è mostrata nella figura [18].



*Figura4.4: Foto di un fontanazzo in cui è stata realizzata una Coronella.*

Il sifonamento può essere favorito da radici di alberi con percorso sub-orizzontale, soprattutto se gli alberi vicini all'argine sono a tergo di esse e se la specie arborea è particolarmente idrofila. Un'altro gravissimo pericolo è costituito dalle tane di animali, che possono divenire una via d'innescio del sifonamento.

### *Franamento*

Il franamento dell'argine può essere dovuto a varie cause che generano l'instabilità dei paramenti. Più a rischio è il paramento di monte, più a lungo immerso in acqua e soggetto talvolta all'erosione al piede. Un esempio di franamento verso monte è rappresentato nella figura [18].

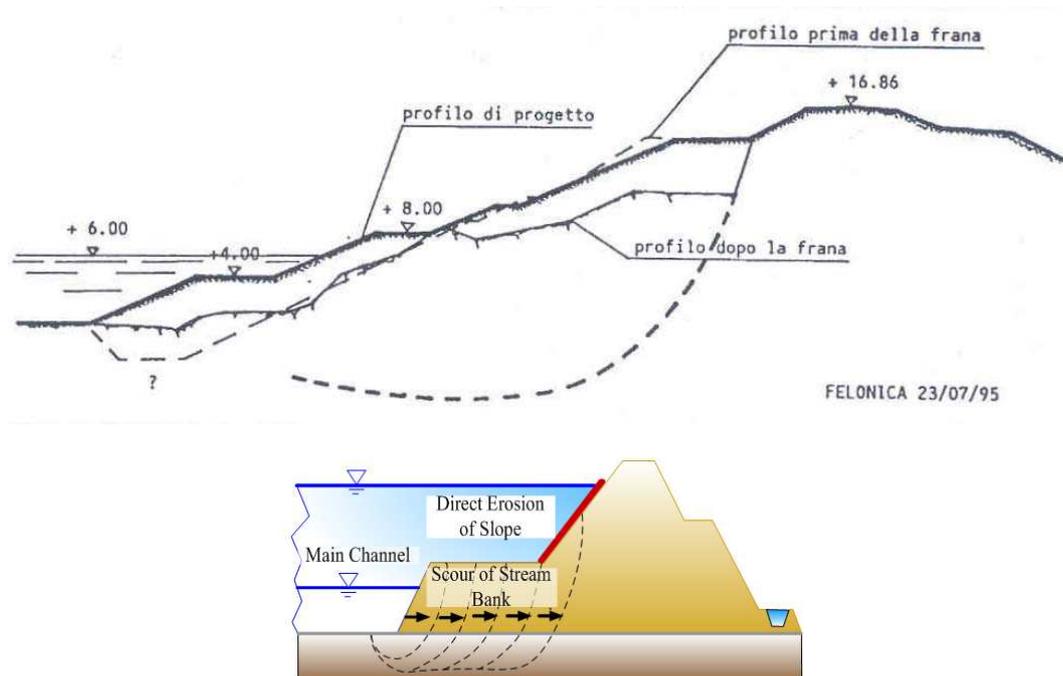


Figura 4.5: Esempio di franamento arginale [18].

### Sfiancamento

Lo sfiancamento si verifica quando nella massa del materiale arginale, saturatosi, si sviluppano pressioni interstiziali. L'innescarsi di una situazione di imminente sfiancamento è segnalata dal fatto che l'argine diventa cedevole al piede (a "porco grasso" o a "ventre di vecchia", secondo una terminologia tradizionale)[ [18].

#### 4.4 Fattori che contribuiscono alla degradazione degli argini

La natura della rottura degli argini è un argomento piuttosto complesso e molto legato alle condizioni locali della struttura. In accordo con informazioni pubblicate sull'argomento è comunque possibile identificare alcuni dei fenomeni principali che comunemente interferiscono con la stabilità dei corpi arginali [16] [17].

Tra i *fattori naturali* che provocano l'erosione e indeboliscono gli argini si hanno:  
 - il perdurare di piogge intense che provoca una notevole erosione a partire dalla testa dell'argine fino alla banchina, favorendo la formazione di scoli sul lato in pendenza soprattutto quando gli argini sono scoperti da vegetazione;

- formazione di turbolenze con un aumento dell'erosione delle sponde, quando i livelli idrometrici e la velocità delle correnti sono elevati;

Altri aspetti che contribuiscono all'indebolimento dei manufatti arginali sono, invece, riconducibili alle attività che gli abitanti (uomini e animali) svolgono in questi siti.

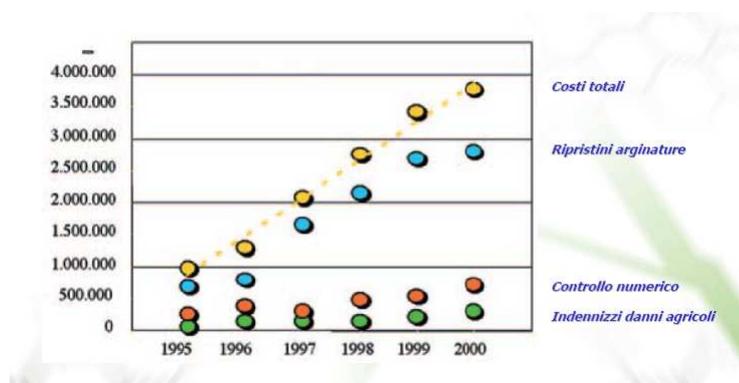
I fattori più comunemente osservati sono i seguenti:

- improprio utilizzo della banchina da parte di agricoltori, allevatori, pescatori e cacciatori;
- inadeguata esecuzione di lavori di manutenzione degli argini (sfalci, ecc.) e lavori pubblici (sottopassaggi reti tecnologiche, ecc.);
- attività incontrollata di animali selvatici: alcuni animali, a causa delle loro abitudini, possono interferire con la struttura degli argini e delle difese spondali dei fiumi e dei canali, in quanto scavano le proprie tane realizzando buchi, cavità, tunnel nei pressi dei corsi d'acqua.

L'attività di questi animali provoca gravi danni a carico delle strutture arginali e delle infrastrutture idrauliche attraverso la creazione di tane e cunicoli che provocano:

- indebolimento degli argini tramite punti di innesco di rotture arginali;
- creazione di fontanazzi o trapelamenti;
- destrutturazione delle sponde di canali e collassi.

Per avere un'idea della gravità del danno causato dagli animali scavatori, si riporta un grafico relativo ai costi dovuti a danni provocati dall'attività delle nutrie (Figura 4.6).



**Figura 4.6:** *Impatto economico dei danni da nutria in Italia (Fonte INFS, Consorzio di Bonifica Polesine Adige Canalbianco di Rovigo, 2004).*

Alla luce di ciò, si ritiene opportuno e utili al fine di ridurre l'insorgere di problemi legati all'instabilità di tali opere, di disporre di una tecnologia adeguata per identificare la presenza di tane o cunicoli all'interno di corpi arginali.

#### 4.5 Animali coinvolti

La caratteristica di alcuni animali che ha un forte impatto sugli argini e sulle sponde, è la loro abitudine di scavare tane profonde e molto articolate nel terreno favorendo la possibilità di collassamento degli argini e delle rive durante le piene. Gli animali coinvolti sono 4 diversi tipi di mammiferi: il *tasso*, la *volpe*, l'*istrice*, il *coniglio selvatico*, la *nutria* e occasionalmente anche il *gambero*.

Questi animali, nonostante la forte antropizzazione della Pianura Padana, hanno trovato una nicchia abitativa nelle golene che permette loro di vivere e riprodursi e, qualche volta a causa delle attività umane, di prosperare.

Infatti la proliferazione di questi animali è spesso riconducibile all'attività venatoria, in particolare al rilascio annuale di specie cacciabili alcuni mesi prima dell'inizio; e alle attività di pastorazione praticata dai pescatori, per cui spesso vengono lasciati residui alimentari sulla banchina che attirano questi animali.



*Figura 4.7: Animali coinvolti dall'alto verso il basso: il tasso, la volpe, l'istrice, il coniglio selvatico, la nutria e il gambero.*

La nutria è l'animale che più comunemente interagisce con i manufatti arginali. Essa appartiene ad una specie alloctona, originaria delle zone subtropicale dell'Argentina e del Brasile meridionale importata in Italia verso la fine degli anni '20 a scopo di allevamento finalizzato alla produzione del "castorino" da parte dell'industria della pellicceria. A partire dagli anni '30 fino agli anni '80 si assiste ad un'ampia diffusione di allevamenti nelle imprese agricole del centro-nord. Infine dagli anni '90 fino ai giorni nostri si sono avute frequenti fughe accidentali e liberazioni indiscriminate, portando alla costituzione di popolazioni naturalizzate in ampie porzioni del territorio nazionale.

Si pensi che una nutria è in grado di rimuovere circa 0.5-1 m<sup>3</sup> di terra all'anno [16].



*Figura 4.8: Cunicolo di ingresso di una tana di nutria - Sponda di un canale artificiale fortemente destrutturata dalla presenza di un complesso sistema di tane.*

Il tasso e la volpe da sempre sono un patrimonio faunistico della pianura. Più recente è l'arrivo del coniglio selvatico e, recentissimo, come già si è avuto modo di anticipare, è l'arrivo della nutria.

Anche la presenza dei cosiddetti gamberi della Louisiana può provocare, attraverso l'intensa e diffusa attività di scavo, notevoli problemi di stabilità delle sponde.



*Figura 4.9: Segno dell'attività di scavo di un gambero.*

#### **4.6 Condizioni ambientali che incentivano l'attività degli animali**

I terreni della Pianura Padana sono di origine alluvionale per cui presentano caratteristiche idrogeologiche molto particolari che rendono i suoli assai malleabili, fragili e deboli in termini di resistenza e struttura, ciò facilita l'attività di scavo degli animali.

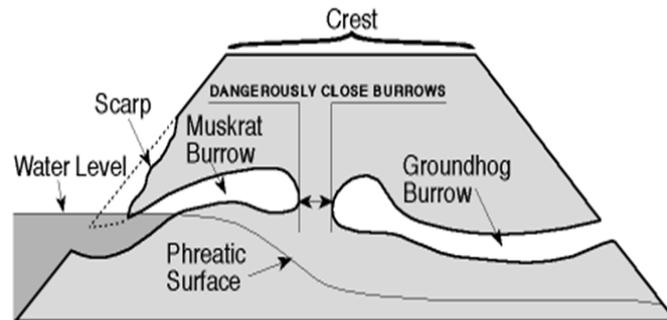
Le tane, sebbene abbiano caratteristiche diverse, necessitano di condizioni ambientali simili e in particolare richiedono luoghi poco disturbati, con un'adeguata copertura di arbusti e piante possibilmente con fitto sottobosco.

La golena, spesso viene intensamente coltivata per cui non costituisce un luogo idoneo alla costruzione di tane con caratteristiche adeguate all'animale, gli argini sono spesso trascurati e coperti da fitti cespugli. Di conseguenza, l'unico ambiente adatto alle loro necessità risultano proprio le difese arginali contro le alluvioni e le sponde del fiume o dei canali di drenaggio della falda freatica affiorante.

#### **4.7 Caratteristiche delle tane**

In genere si tratta di strutture piuttosto complesse ed articolate; per quanto riguarda il coniglio selvatico, esse sono composte da veri e propri labirinti che ospitano colonie molto numerose. Le tane del tasso e della volpe sono piuttosto ampie e profonde. La volpe molto spesso approfitta di tane lasciate da altri animali e, qualche volta, convive con loro; in particolare con il tasso. Le nutrie,

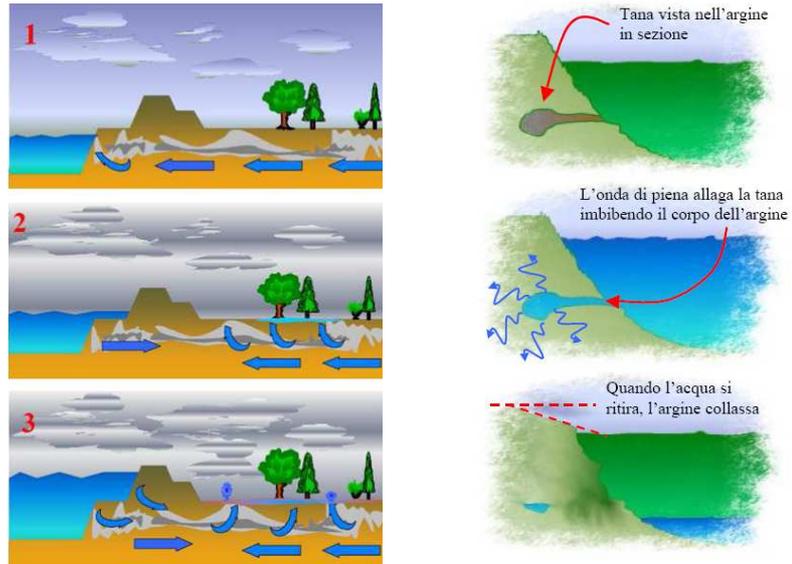
contrariamente a quanto si pensa, non costruiscono tane negli argini perché necessitano della vicinanza dell'acqua. Per cui, le tane delle nutrie saranno quasi sempre costruite a non più di un metro dallo specchio d'acqua o dal canale vicino al quale esse vivono e, in particolare, saranno quasi sempre scavate nella sponda. Il loro impatto sarà principalmente sulle rive e sulle difese spondali immediatamente in prossimità del pelo libero.



**Figura 4.10: Rappresentazione schematica delle tane di nutria e tassi. Fonte NATIONAL DAM SAFETY PROGRAM – USA [19].**

#### 4.8 Quadro riassuntivo

In caso di piena l'acqua del fiume preme sul fondo dell'alveo e sulle sponde, dapprima rallentando e poi invertendo il flusso delle acque della falda freatica che scorre a lato dello stesso e sotto il piano campagna. La falda subirà un innalzamento e in caso di terreno permeabile, risale fino a raggiungere il piano campagna, formando i trapelamenti e fontanazzi. La principale differenza tra i due fenomeni è quella che nel primo caso l'acqua esce attraverso fessurazioni, prevalentemente sul paramento arginale e sul coronamento, mentre il secondo si sviluppa lateralmente all'argine sul piano campagna.



**Figura 4.11:** Schematizzazione dei fenomeni che avvengono in caso di piena e in presenza di una tana.

In entrambe le situazioni, la presenza di vie di fuga preferenziali all'interno del corpo arginale, come proprio possono essere cunicoli scavati da animali, può rappresentare una via d'innescò per questi fenomeni e di conseguenza interferire con la stabilità e l'integrità della struttura stessa.

## *Capitolo 5*

### *Evento di piena del 20 Maggio 2008 del Torrente Samoggia*

#### **5.1 Introduzione**

Il problema della sicurezza degli argini può essere facilmente sottostimato soprattutto se un periodo di secca persiste a lungo. Alcuni eventi di crisi avvenuti nel passato hanno messo in luce come la maggior parte dei problemi collegati con gli argini avvengono in corrispondenza di disomogeneità presenti nel corpo arginale e difficilmente individuabili con le tecniche tradizionali. **É infatti frequente l'innescò di fenomeni di sifonamento e infiltrazione lungo fratture o cavità presenti all'interno di corpi arginali.**

Spesso la scoperta di tali debolezze avviene a posteriori, dopo l'evento di crisi; in fase di risistemazione dell'argine, mediante il ricorso a metodi distruttivi che forniscono informazioni precise, ma puntuali.

Per ovviare a queste situazioni di pericolo gli enti di ambito ritengono molto importante la messa in pratica di un monitoraggio e di manutenzione ordinaria continue delle arginature dei corsi d'acqua maggiori e minori, allo scopo di poter garantire un buon livello di sicurezza idraulica per le popolazioni e le strutture.

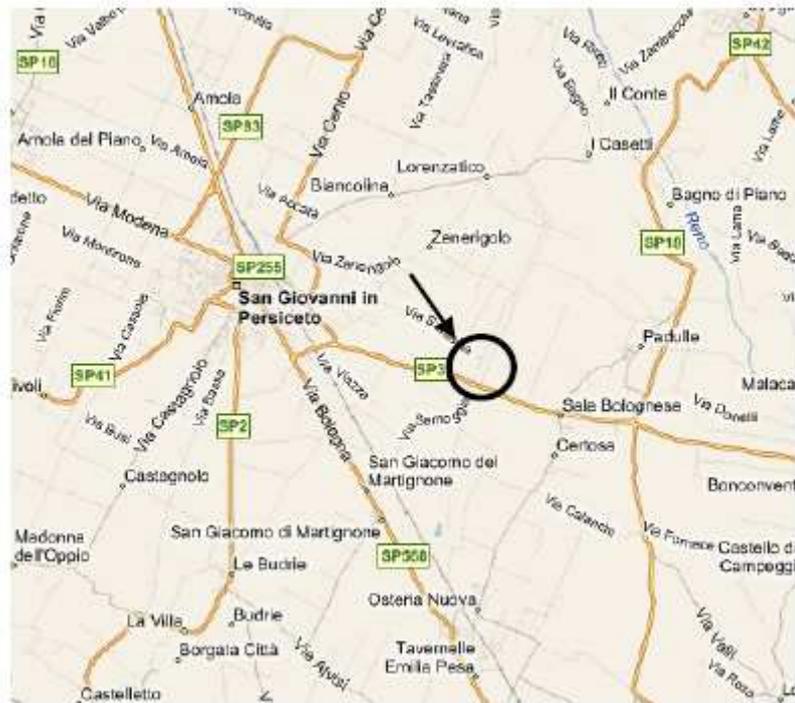
Tuttavia in talune situazioni, come per esempio per le cavità realizzate da animali scavatori, non è sufficiente una semplice ispezione visiva per risalire all'area interessata da tale fenomeno.

La messa a punto di una metodologia non invasiva e adeguata che riesca a fornire informazioni relative alla struttura interna dei manufatti arginali, sarebbe di grande aiuto per affrontare queste situazioni.

#### **5.2 Descrizione dell'evento di piena**

In seguito alle segnalazioni pervenute, in data 20 maggio 2008, al Servizio Tecnico Bacino Reno dai sorveglianti dei tronchi del Bacino del Torrente Samoggia, relative alla presenza di un "fontanazzo" nei pressi dell'arginatura sinistra in località Forcelli, circa 900 metri a valle dell'omonimo ponte (SP n°3

Trasversale di Pianura), i tecnici del Servizio si sono recati in loco, per verificare e quantificare i rischi di danneggiamento dell'arginatura.



*Figura 5.1: Mappa dell'area nei pressi di San Giovanni in Persiceto con localizzazione del sito interessato [20].*

Alle ore 11 circa si è constatato che l'attività di filtrazione, protrattasi già da qualche ora, aveva aumentato il flusso di acqua attraverso il fontanazzo segnalato e nel contempo si erano identificati altri punti di filtrazione alla base dell'arginatura e sulla prima banca.

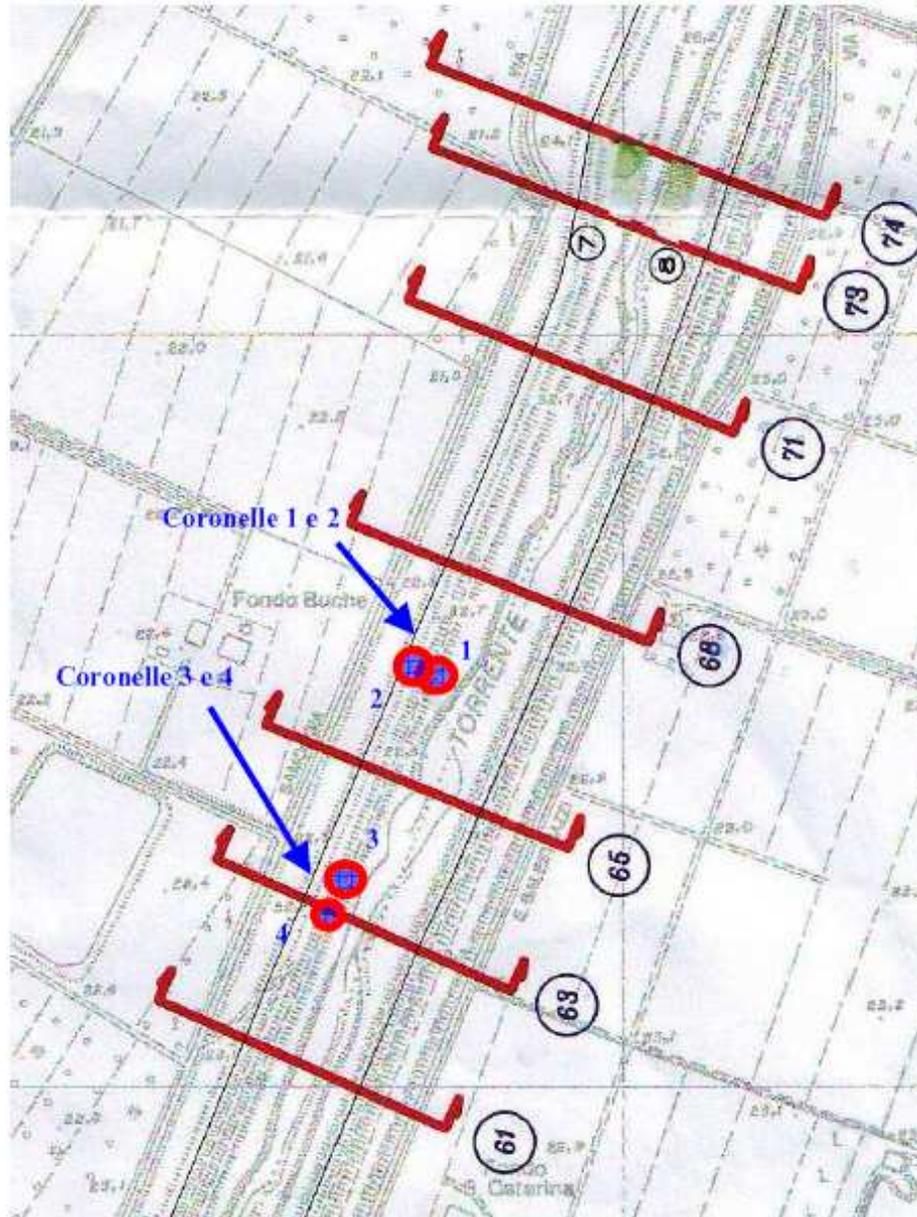


*Figura 5.2: Piena del samoggia – foto scattata dal ponte di Forcelli (al di sotto del quale è posizionato l’omonimo teleidrometro) dell’evento di piena in fase crescente ore 9 circa [20].*



*Figura 5.3: Foto di uno dei fontanazzi identificati lungo le arginature prima di cominciare lo sfalcio manuale [20].*

Nella planimetria seguente vengono posizionati i quattro fontanazzi principali sui quali si è reso necessario l'intervento di contrasto idraulico mediante costruzione di coronelle.



*Figura 5.4: Localizzazione dei quattro fontanazzi principali [21].*

Nell'immagine seguente vengono riportate le coronelle sull'arginatura del Samoggia ripresa dall'alto in occasione delle rotte dell'ottobre 1996 (quando il Torrente raggiunse il massimo livello misurato nella sua storia dall'idrometro di Forcelli).



*Figura 5.5: Foto scattata in occasione delle rotte arginali del Torrente Samoggia nell'Ottobre 1996 [20].*

Tralasciando l'approssimazione della localizzazione dei punti di emergenza dei fontanazzi, si evince che in ogni caso le rotte erano posizionate qualche decina di metri più a valle dei fontanazzi.

**Ciò lascia presupporre che il sifonamento del 20 maggio non sia riconducibile a difetti di riparazione delle arginature distrutte nel '96 e riparate immediatamente dopo dal Servizio Tecnico Bacino Reno.**

Nelle figure seguenti viene schematizzato il probabile flusso all'interno delle arginature, ricostruito approssimativamente in base ai punti di ingresso e di uscita identificati in campagna alla fine dell'onda di piena.

Il percorso lascia intuire che ci fosse comunicazione tra alcune vie di flusso, è ciò è plausibile se si considerano i fenomeni accaduti durante la piena, primo fra tutti lo svuotamento improvviso di una coronella (la n. 1) e l'incremento di flusso della coronella 2 sottostante.

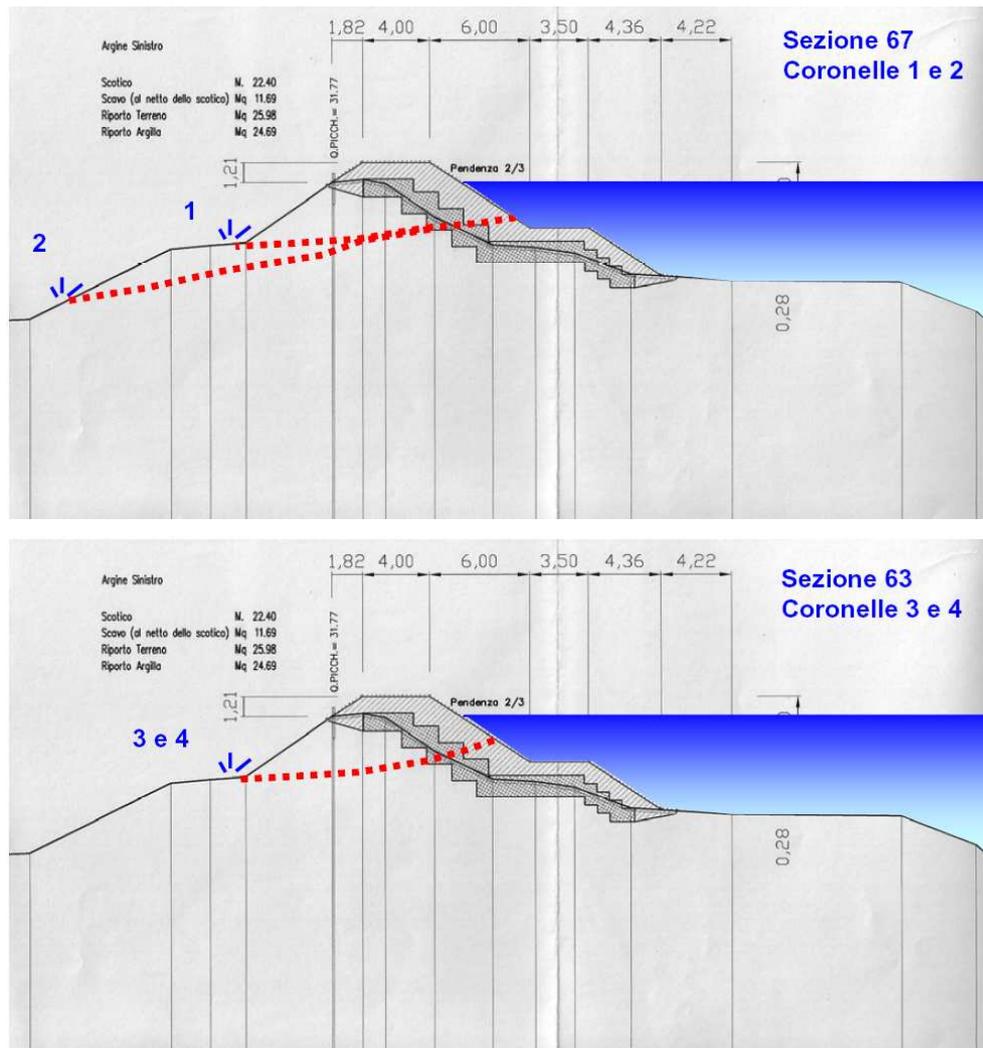


Figura 5.6: Sezioni in corrispondenza dei fontanazzi e ricostruzione dei percorsi dei flussi di acqua [21].

### 5.3 Geologia e geotecnica

Mediante l'utilizzo di dati già in possesso dell'amministrazione è stato possibile osservare la struttura interna dell'argine a breve distanza dal fenomeno di sifonamento.

La sezione denominata 2 (Figura 5.7) è quasi coincidente con le coronelle 1 e 2 delle figure precedenti. Essa illustra un sottosuolo costituito da 3 unità principali: A, S ed I. Le unità sono riconducibili rispettivamente a: Artificiale (A), Superficiale (S) e Impermeabile (I).

Teoricamente, come dimostrato dai test di filtrazione effettuati con un modello ad elementi finiti, la variazione della linea di imbibizione all'interno dell'arginatura,

al passaggio (teorico) dell'onda di piena dell'Ottobre del 1996, non dovrebbe mostrare alcun problema di stabilità o di eccesso di filtrazione (Figura 5.8).

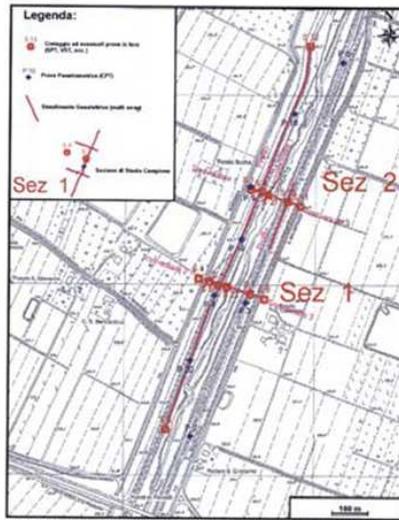


Fig. 52 bis: Ingrandimento del tratto sottoposto ad una più accurata indagine geognostica, (zona che ha presentato i maggiori squilibri durante la piena del '96)

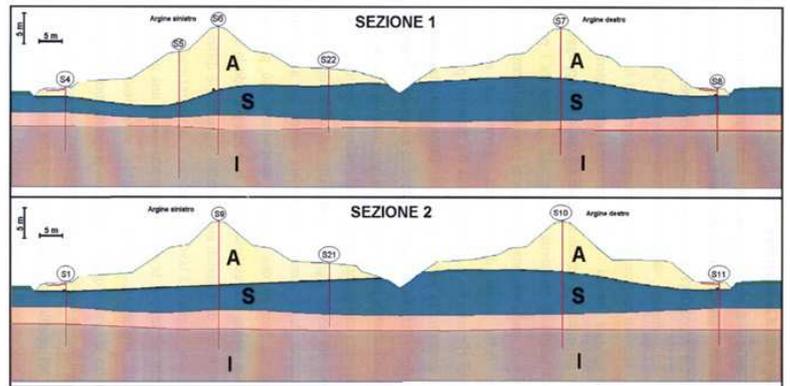


Fig. 56: Schema della suddivisione in unità litotecniche dell'arginatura delle sezioni campione del torrente Samoggia  
 A: (Antropica) terreni appartenenti all'argine artificiale; S: (Superficiale) Terreni appartenenti all'Argine naturale. I: (Impermeabile) terreni appartenenti alle argille di base.

**Figura 5.7: Localizzazione delle indagini geognostiche effettuate nel 1999 a seguito dell'individuazione di tane di animali scavatori - Esito delle indagini - Sezioni geologiche delle arginature. Il caso in esame è riconducibile alla sezione 2 localizzata praticamente a pochi metri di distanza dalle coronelle 1 e 2 [21].**

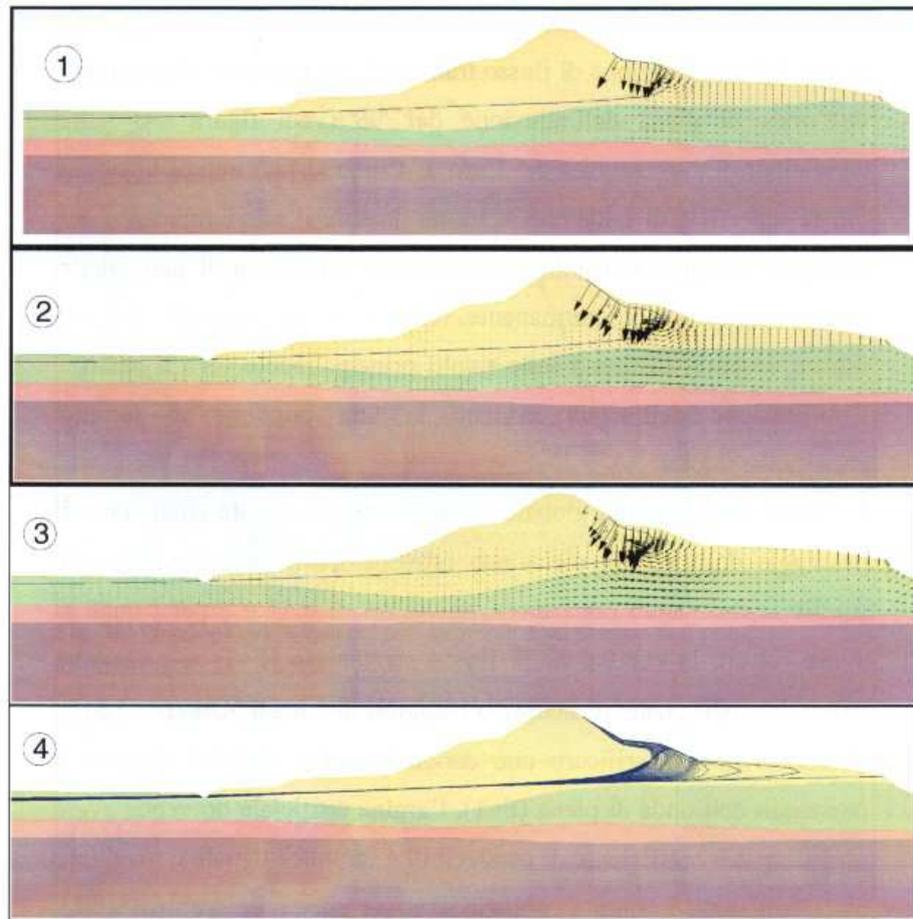


Fig. 72: Superficie dell'acqua e vettori di flusso durante il passaggio dell'onda di piena. 1) Fase di concentrazione ( t = 30 ore). 2) Massima livello di piena (t = 50 ore). 3) Fase di esaurimento ( t = 70 ore). 4) involuppo di tutte le superfici d'acqua.

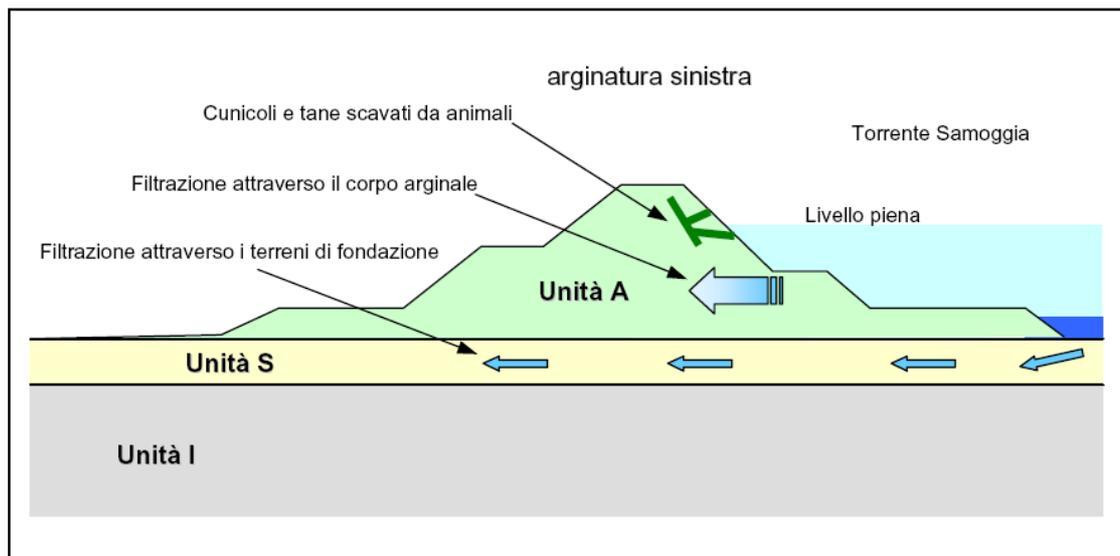
*Figura 5.8: Modellazione dell'arginatura sinistra in prossimità della sezione geologica denominata 1 (più a monte del fenomeno di filtrazione osservato. Il modello illustra la variazione della linea di imbibizione dell'arginatura al passaggio (teorico) dell'onda di piena dell'Ottobre del 1996. L'arginatura non dovrebbe mostrare alcun problema di stabilità o di eccesso di filtrazione [21].*

**Tali test**, effettuati in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università di Bologna, con il supporto di fondi della legge 183/89, **hanno dimostrato che l'unica motivazione che avrebbe potuto giustificare un eccesso di flusso nell'arginatura artificiale (come è infatti accaduto) sarebbe stata la presenza di discontinuità (fori, buchi, tane, ecc).**

#### 5.4 Esito delle indagini geognostiche

Una schematizzazione grafica della suddivisione in unità lito-tecniche viene riportata in figura utilizzando lo stesso schema dell'arginatura sinistra proposto in

precedenza. In tale rappresentazione viene proposto anche uno schema generale di filtrazione dal Torrente Samoggia verso l'esterno dell'argine. Una certa quantità d'acqua filtra costantemente dall'alveo attraverso l'unità S, alimentando così la falda freatica anche in condizioni di magra. In fase di piena, invece, si assiste ad una consistente filtrazione attraverso il corpo arginale (Figura5.9).



*Figura 5.9: Schema della suddivisione in unità lito-tecniche dell'arginatura sinistra del Samoggia (non in scala) [21].*

Quest'ultima costituisce, come già sottolineato, uno dei temi di maggiore interesse della presente indagine. I preoccupanti fenomeni di trasudazione dell'argine, lo sviluppo di fontanazzi e, soprattutto, le rotte del 1996 hanno evidenziato l'esistenza di percorsi preferenziali di filtrazione.



*Figura 5.10: Tane di animali identificate durante i lavori di scavo per il ripristino delle arginature [21].*

Nel corso degli anni 1999-2000 e 2008 l'individuazione di cunicoli e tane di animali all'interno dei corpi arginali (Figura 5.10) ha portato all'identificazione di una delle concause che hanno determinato i problemi di tenuta idraulica di cui sopra. La realizzazione di un modello idrogeologico dell'arginatura, sia pur approssimativo, si è pertanto resa necessaria al fine di stimare l'incidenza di fenomeni locali, quali quelli imputabili ad animali scavatori, rispetto alle problematiche strutturali degli argini.

Al modello geologico interpretativo verranno pertanto accoppiate le informazioni riguardanti la resistenza meccanica dei terreni ricavata sia dalla cpt, sia dai test di laboratorio al fine di ricavarne un modello geotecnico, che non necessariamente ricalca i limiti definiti dal modello geologico del sottosuolo.

## 5.5 Conclusioni

Si può pertanto concludere, alla luce delle considerazioni sopraesposte, che verosimilmente i fenomeni di sifonamento (fontanazzi) che si sono verificati in occasione dell'evento di piena sopradescritto:

- non sono in relazione alla rotta del 1996 poiché sono diversamente localizzati;
- non sono riconducibili a difetti dell'arginatura preesistenti imputabili ad errata realizzazione degli argini (se così fosse stato vi sarebbe stato, molto probabilmente, un cedimento anche in occasione della piena del 1996);
- non sono imputabili alla presenza di materiali eccessivamente permeabili (a meno che le indagini che verranno effettuate dimostrino il contrario, ma è poco probabile considerata la generale omogeneità dell'unità artificiale dell'arginatura).

**E' invece molto probabile che i fenomeni di filtrazione si siano innescati in presenza di discontinuità (tane di animali probabilmente) che hanno accorciato enormemente i percorsi normali di filtrazione all'interno dell'argine, rendendo possibile la saturazione dei livelli più esterni all'arginatura.**

**La presenza di vegetazione sulle parti sommitali dell'arginatura favorisce la creazione di habitat naturali idonei alla vita di animali scavatori (volpi, tassi, istrici, nutrie, ecc.) e andrebbe pertanto limitata il più possibile. Ciò dimostra ancora una volta quanto fondamentale sia la manutenzione ordinaria dei corsi d'acqua [20][21].**

## 5.6 Discussione

Questo caso, documentato da Relazioni Tecniche del personale del Servizio Tecnico Bacino del Reno, non è l'unico episodio di una rottura arginale in cui si è ritenuto che l'incidenza di fenomeni locali, come per esempio quelli imputabili ad animali scavatori, abbia rappresentato una causa concomitante di innesco del cedimento arginale.

Sono molti i casi documentati in cui questo aspetto viene preso in considerazione, come si evince anche da alcuni rapporti del National Dam Safety Program

(NDSP), un programma di monitoraggio di opere di difesa idraulica in atto da oltre 30 anni negli Stati Uniti [NDSP].

Si è ritenuto però più utile, per far capire la reale incidenza di tali fenomeni, riportare la testimonianza di un caso avvenuto nel nostro territorio, documentato da una relazione descrittiva e geologica-geotecnica del Servizio Tecnico Bacino Reno.

In quell'occasione l'identificazione di vie preferenziali di filtrazione è avvenuta solo dopo la rottura, durante gli scavi in fase di riparazione degli argini; infatti prima non vi era alcun sospetto della presenza e della dimensione di tali cavità.

## *Capitolo 6*

### *Applicazioni del GPR al monitoraggio delle arginature*

#### **6.1 Introduzione**

Le indagini e i controlli non distruttivi nel settore civile hanno assunto negli ultimi anni una sempre maggiore rilevanza soprattutto nel controllo delle strutture in cemento armato. Le tecniche di indagine si stanno affinando e sono ora supportate da normative, sia in ambito nazionale che in ambito internazionale [22].

Per quanto riguarda invece, le opere di difesa idraulica del territorio come gli argini e le dighe in terra, ad oggi, il monitoraggio viene effettuato ancora in maniera diretta, mediante ispezioni visive, da tecnici degli enti di ambito. Questo modo di procedere però non è sempre conveniente ed efficace. Infatti le informazioni che si ottengono sono limitate alla porzione esterna dell'opera, non si riescono ad ottenere informazioni dettagliate sullo sviluppo interno di tali disomogeneità. Inoltre, talvolta, si riscontrano delle porzioni di terreno molto disturbate, in zone che esternamente non mostrano alcun segno visibile di una possibile alterazione.

La conoscenza dell'esistenza e della posizione di zone disomogenee all'interno degli argini può sicuramente ridurre l'insorgere di problemi legati all'instabilità di tali opere e quindi mitigare la probabilità di pericolo e rischio idraulico per la popolazione e per le strutture.

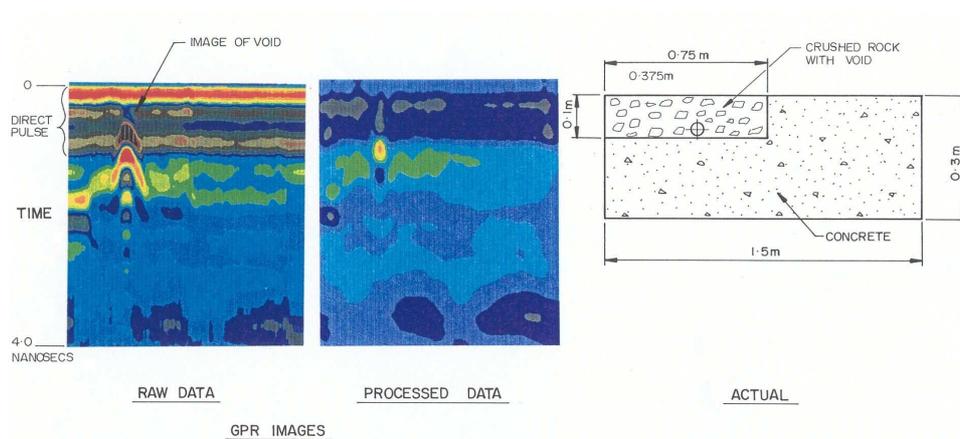
Da ciò nasce l'esigenza di mettere a punto una tecnologia applicabile in questo ambito e tale da restituire informazioni dotate di un certo grado di risoluzione. Il Georadar sembra avere molte caratteristiche idonee a queste applicazioni, sono comunque necessarie ulteriori verifiche per giudicarne l'efficacia.

Le performance del sistema radar per l'individuazione di vuoti nel terreno, sono state testate in laboratorio su modelli fisici, realizzati per rappresentare terreni eterogenei composti da strati di diversi materiali (tipo sabbia, frammenti di rocce, ecc.) in cui vengono interposti cilindri cavi, vuoti o pieni per rappresentare quelle porzioni di terreno interessate da disomogeneità, quali fratture o vuoti di altro

tipo. La figura seguente mostra l'immagine ottenuta in seguito alla scansione su questo modello. Quello che si ottiene, a testimonianza dell'individuazione da parte dello strumento della cavità, è una riflessione iperbolica abbastanza chiara [1].

Nel campo della ricerca, le applicazioni GPR su argini sono ancora molto sporadiche e non ben documentate.

Lo stato dell'arte, al momento, viene documentato mediante le seguenti pubblicazioni, le uniche trovate in fase di ricerca bibliografica.



**Figura 6.1:** Immagine grezza e processata ottenuta dalla scansione al di sopra di una modello contenente un cilindro vuoto all'interno di roccia frantumata – questa è l'immagine che ci aspettiamo di ottenere [1].

## 6.2 Applicazione del Ground Penetrating Radar per l'individuazione di cavità e vuoti all'interno di manufatti arginali (2002)

Lo studio riporta i risultati ottenuti da modelli fisici in laboratorio e da applicazioni in campo.

Sono stati utilizzati una grande varietà di tubazioni cave o non, sepolte all'interno di modelli fisici del terreno. I risultati ottenuti dai rilievi radar sono poi analizzati, le immagini ottenute in seguito alle prospezioni sono discusse, mettendo in evidenza quelle che sono le caratteristiche peculiari di ciascuna condizione di prova. Inoltre è stata eseguita un'applicazione al di sopra di un argine.

## Dispositivo sperimentale

La strumentazione usata per questa ricerca è un sistema RAMAC/GPR, prodotto da MALA Geosciences Co, in Svezia. Viene riportata nella seguente figura, una schematizzazione delle parti fondamentali.

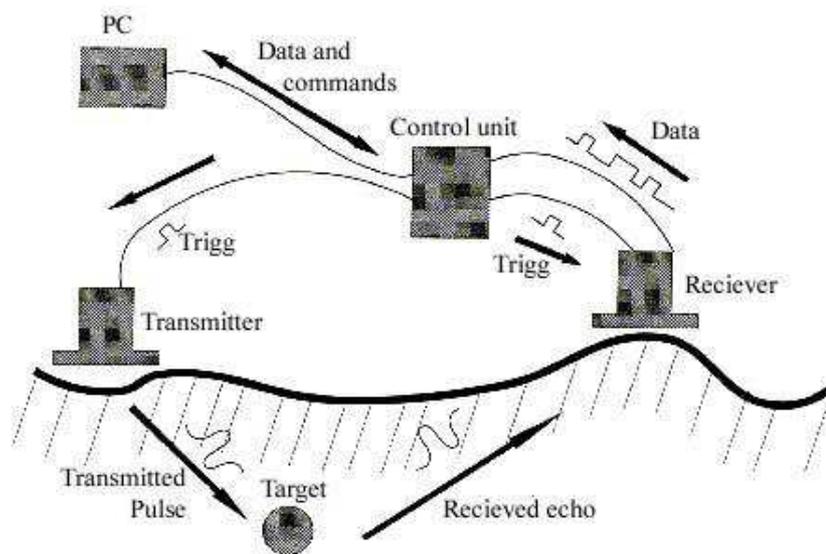


Figura 6.2: Schematizzazione della strumentazione [2].

1. Unità di controllo UC: gestisce l'invio e la ricezione di segnali.
2. Antenne: si tratta di dispositivi schermati e nella parte inferiore sono dotati di una placca che favorisce il trascinamento.
3. Batterie di alimentazione ricaricabili da 12 V per l'unità di controllo e per l'antenna.
4. Cavi di fibra ottica mediante i quali il segnale viene trasferito dall'unità delle antenne, a quella del controllo.
5. Cavi di collegamento tra il PC e l'UC.
6. Trigger box: è dispositivo che si mette in funzione solo quando il segnale raggiunge un certo livello, non lasciando passare quelle porzioni di segnale disturbate.
7. Ruota dotata di odometro: ha due funzioni una è quella di misurare la distanza percorsa e l'altra è quella di dare l'avvio all'antenna emittente quando lo strumento inizia a muoversi.

8. La parte inferiore dell'antenna appoggia su una placca adatta ad essere trascinata a contatto col terreno.
9. Un 'asta metallica fornita di un aggancio per tirare l'antenna.
10. PC adatto a misure di campo che controllo le operazioni del GPR e restituisce i dati in tempo reale.

### **Procedura operativa del test**

Le operazioni eseguite possono essere riassunte come segue:

1. Preparazione della strumentazione.
2. Raccolta dati: informazioni necessarie per stabilire qual è il migliore schema di esecuzione del rilievo e per determinare l'antenna più idonea all'applicazione.
3. Realizzazione di una serie di linee o di una maglia che copra l'oggetto dell'investigazione in modo tale da ridurre al minimo gli errori nel rilievo.
4. Definire il migliore settaggio dei parametri per acquisire delle buone misure in funzione delle condizioni al contorno e del target.
5. Post-Processamento dei dati mediante l'utilizzo del software di analisi.

### **Risultati dei test in laboratorio e discussione**

Il modello fisico è costituito da una parallelepipedo in cemento armato di dimensioni 5x2.5x2.3 m e lo spessore dei lati è di circa 0.1 m. Per il riempimento è stata utilizzata della sabbia fine omogenea ( $G_s^3=2.67$ ).

Affinchè le informazioni ricavate dai test in laboratorio possano essere ritenute affidabili, è necessario che vengano validate da osservazioni in campo.

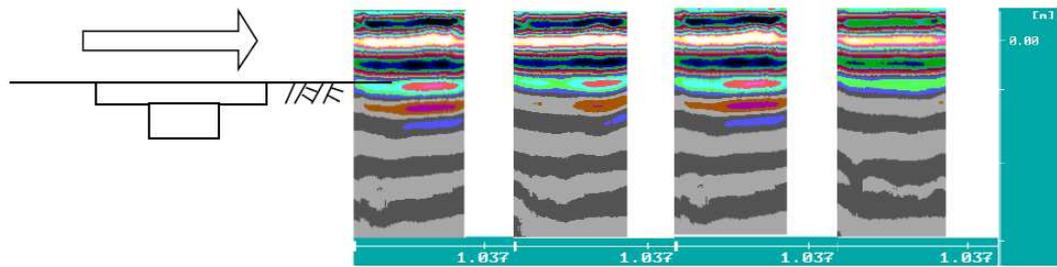
### **Test di rilievo di vuoti al di sotto di una lastra di cemento**

Lo scopo di questo esperimento è quello di ottenere uno schema generale del miglior assemblaggio tra frequenza, intervallo di campionamento, finestra temporale per il GPR relativamente alle correnti applicazioni. I campioni usati per riprodurre i vuoti sono tubi in PVC di dimensioni di 30 cm, 20 cm e 10 cm e sono sepolti ad una profondità di 15 cm.

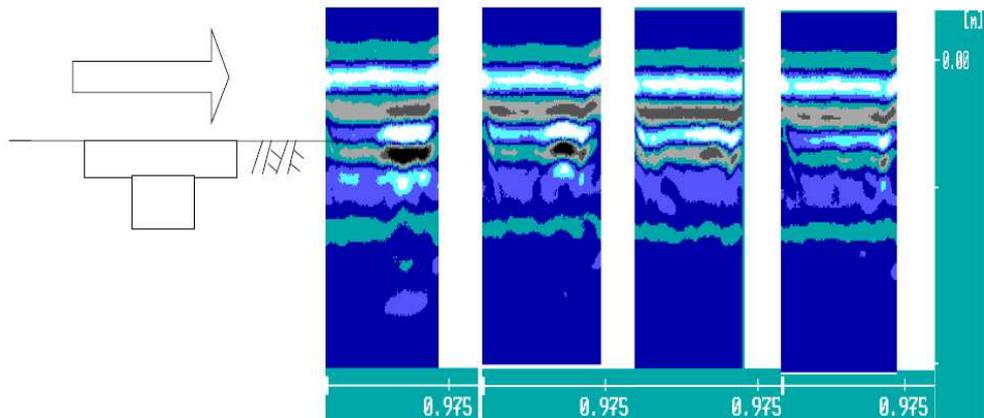
I risultati di questi test sono riportati nelle figure 6.3 e 6.4.

---

<sup>3</sup>  $G_s$  : è una grandezza adimensionale che indica la *gravità specifica* o *densità relativa*, definita come il rapporto tra il peso (o la densità) di un corpo e il peso (o la densità) di un volume di acqua pari al volume del corpo stesso, alla temperatura di 4°C.



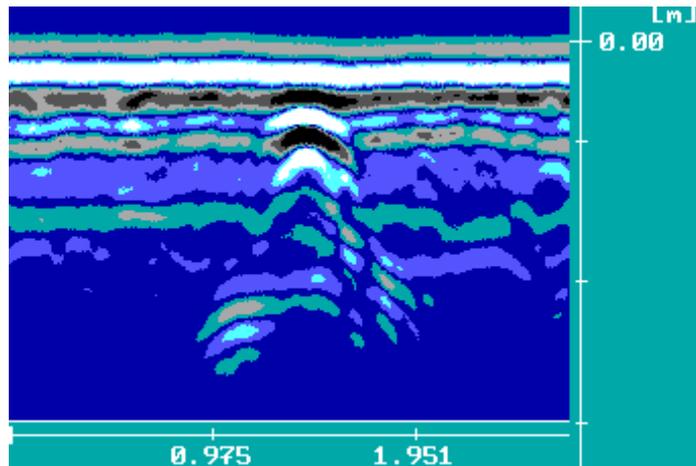
**Figura 6.3:** Immagine di una scansione GPR realizzata con un'antenna di frequenza 500 MHz, time window 28.4 ns, point distance 0.01 m – caso di una lastra di cemento armato posta sopra lo strato di sabbia – da sinistra a destra sono stati usati tubi da 30 cm, 20 cm, 10 cm e nessun tubo [2].



**Figura 6.4:** Immagine di una scansione GPR realizzata con un'antenna di frequenza 800 MHz, time window 28.4 ns, point distance 0.01 m – caso di una lastra di cemento armato posta sopra lo strato di sabbia – da sinistra a destra sono stati usati tubi da 30 cm, 20 cm, 10 cm e nessun tubo [2].

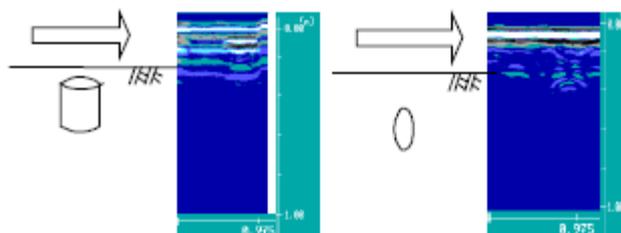
In questi casi si ha che i toni più scuri segnalano le riflessioni minori, il che significa che la differenza tra la costante dielettrica dei mezzi è piccola. Al contrario il colore chiaro, suggerisce delle forti riflessioni e quindi indica che la differenza tra la costante dielettrica dei mezzi è grande, come per esempio accade per i vuoti. Fenomeni di riflessioni multiple e inversione di polarizzazione possono essere osservati dalle immagine seguendo l'asse dei punti che hanno la stessa fase in prossimità delle tubazioni vuote.

La Figura 6.5, invece, mostra una scansione GPR realizzata al di sopra di una cavità vuota di dimensioni circa pari ad 1 m e profondità 0.4 m. Si nota che le modalità di riflessione sono molto simili alle riflessioni dei vuoti ottenute nel modello del laboratorio.



*Figura 6.5: Immagine GPR realizzata al di sopra di un vuoto di forma irregolare [2].*

L'altro esperimento è stato quello di verificare quali differenze ci sono tra una riflessione dovuta ad una discontinuità vuota e una piena poste in un terreno omogeneo. Per far ciò è stato sepolto un sasso di circa 30 cm, e i risultati sono mostrati nella Figura 6.6.



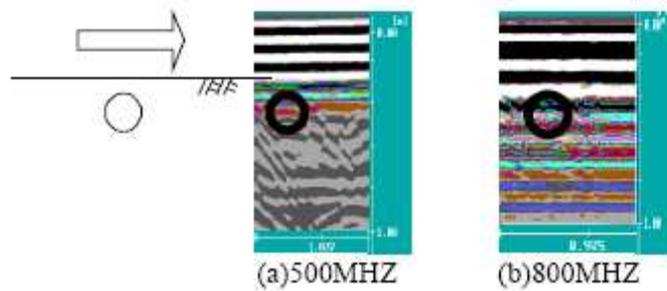
*Figura 6.6: Confronto tra immagine radar ottenuta con un'antenna di frequenza 800 MHz – time window 56.8 ns e point distance 0.01 m – a sinistra tubo vuoto, a destra un sasso di diametro circa pari a 30 cm [2].*

Quello che si nota sono i fenomeni di dislocazione dell'immagine e della formazione dei tipici rami di iperbole in prossimità del sasso. Tuttavia non si hanno segni di riflessioni multiple. Per questo motivo si può dedurre uno dei limiti del GPR, ovvero che non c'è modo per determinare in maniera efficace di quale materiale la cavità è composta. Dalle caratteristiche del segnale si può comunque determinare se l'oggetto rilevato è più o meno duro del materiale che lo circonda.

### **Test di rilievo di tubazioni singole**

In questo esperimento, è stata sepolta una tubazione singola per simulare cavi o reti tecnologiche o altri oggetti aventi la stessa forma.

Nella Figura 6.7 vengono mostrati i risultati ottenuti per 2 diverse frequenze.

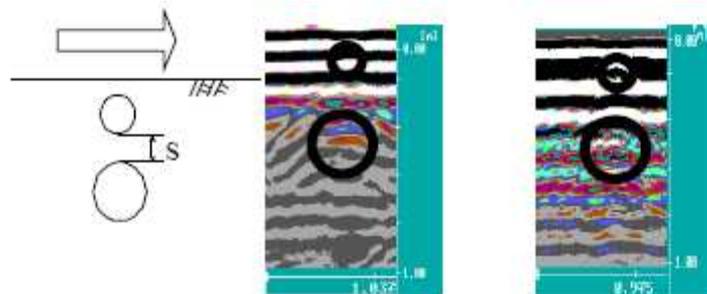


*Figura 6.7: Confronto tra 2 rilievi su tubazioni di diametro pari a 10 cm con diverse frequenze [2].*

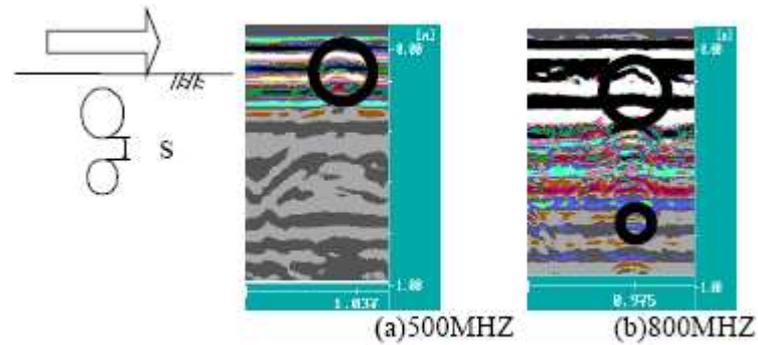
La massima profondità investigabile rispettivamente per una frequenza di 500 MHz e 800 MHz è di 70 cm e 60 cm. Nella figura si nota come sotto le stesse condizioni di parametri, l'antenna da 500 MHz ha un più basso grado di risoluzione, ma una maggiore capacità di penetrazione, rispetto a quella da 800 MHz.

### **Test di rilievo di tubazioni doppie**

Sono state usate due tubazioni in PVC con diversi diametri, profondità di sepoltura e interdistanza. I risultati sono mostrati nelle seguenti figure.



*Figura 6.8: Confronto tra immagini di radar con frequenza diversa  $S=40$  cm,  $D=10$  cm e  $D=30$  cm [2].*



*Figura 6.9: Confronto tra immagini di radar con frequenza diversa  $S=40$  cm,  $D=30$  cm e  $D=10$  cm [2].*

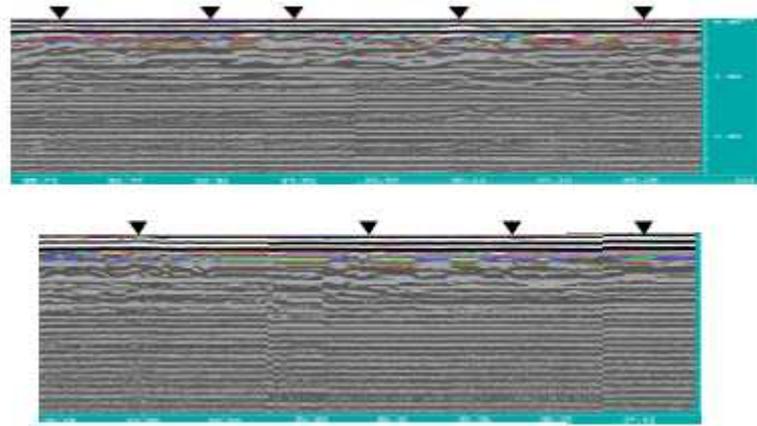
In questo esperimento quando si usa un diametro di circa 30 cm, le 2 tubazioni possono essere chiaramente distinte quando  $S=20$  e 40 cm. Tuttavia quando  $S=60$  cm, la profondità di penetrazione del GPR deve essere incrementata per permettere di rilevare quello che è posto ad una profondità maggiore.

Quello che si evince dagli esperimenti è che non c'è nessun problema per localizzare singole o doppie tubazioni se il loro diametro è compatibile con la frequenza utilizzata. Tuttavia quando la frequenza dell'antenna è pari a 500 MHz solo i livelli più alti sono identificati dalla scansione. L'antenna da 800 MHz funziona meglio per le applicazioni con doppie tubazioni.

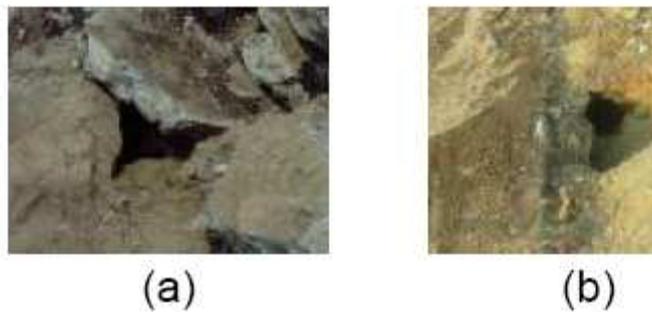
### **Applicazioni in campo**

Per valutare l'efficacia di rilievi dei vuoti in campo su manufatti arginali, è stata effettuata una campagna di misure sugli argini di un fiume, sottoposto a monitoraggio costante, situato a Sud di Taiwan. Sono state realizzate delle tracce longitudinali sul lato inclinato dell'argine, in quanto si ritiene che sia il lato maggiormente sottoposto alla formazione di cavità ad opera di fenomeni piovosi intensi o altro.

I risultati sono illustrati in Figura 6.10, i vuoti intercettati sono indicati con delle frecce. Le foto riportate sono state scattate durante lo scavo. Dai radargrammi, sono evidenti riflessioni multiple dalle caratteristiche abbastanza simili ai risultati ottenuti per il modello di laboratorio.



*Figura 6.10: Immagine ottenuta da scansione sul lato inclinato dell'argine. Le frecce indicano le riflessioni dalle cavità presenti nell'argine [2].*



*Figura 6.11: Foto delle cavità ottenute dopo lo scavo [2].*

## **Conclusioni**

Dallo studio effettuato possono essere dedotte le seguenti informazioni:

1. I risultati ottenuti dai test in laboratorio per tubazioni con diametri di 20 cm e 30 cm sono stati confermati dai risultati ottenuti dalle prove in campo.
2. Si raccomanda di realizzare un rilievo a maglie per ottenere migliori risultati.
3. Il GPR restituisce risultati chiari ed affidabili negli esperimenti in laboratorio per il rilievo di tubazioni singole e doppie, una volta scelti il settaggio e l'antenna ottimali.
4. Le riflessioni multiple nelle immagini radar ottenute dai rilievi in campo e da quelli in laboratorio mostrano delle similitudini. L'applicabilità del GPR per rilevare vuoti nei corpi arginali è ritenuta buona [2].

### **6.3 Uso del GPR per il rilevamento di disomogeneità su argini del Fiume Reno (2008)**

Nell'ambito di questa ricerca è stata testata l'adeguatezza del GPR per il monitoraggio di argini fluviali. L'oggetto principale dello studio è quello di realizzare dei rilievi per determinare la stratigrafia, la presenza di cavità e tane di animali e di reti di servizi o di qualsiasi altra disomogeneità presente nei corpi arginali. Nonostante si ritenga che alcuni di questi aspetti necessitano di ulteriori studi, si ritiene possibile delineare quelle che sono le potenzialità del GPR nell'indagine di manufatti arginali.

#### **Inquadramento geografico e geologico**

L'area di studio appartiene al dominio strutturale della Catena Appenninica, coperta da depositi alluvionali recenti, al di sotto dei quali si hanno degli strati di sedimenti terrigeni del Plio-Pleistocene. Il sollevamento tettonico dell'Appennino è ritenuta la causa principale della migrazione verso Nord del Fiume Pò, avvenuta durante gli ultimi 3000 anni [Bondesan, 2001]. L'evoluzione della zona di studio è stata fortemente influenzata da questo cambiamento, ma anche dagli avvenimenti politici e sociali degli ultimi secoli. Il fiume Reno, essendo uno degli affluenti di destra del Fiume Pò, ha sempre mantenuto una direzione perpendicolare a quella del Pò (SW-NE), inondando nei periodi di piena la pianura alluvionale. Dal medioevo al presente, una serie di opere idrauliche hanno completamente modificato l'andamento naturale di questa area: le acque del Fiume Reno sono state in parte deviate in un alveo abbandonato del Pò. Inoltre sono state anche progettate delle importanti strutture idrauliche per proteggere la pianura dai ricorrenti fenomeni di piena. Tra le opere realizzate ricordiamo il Cavo Napoleonico (completato nel 1965) che viene usato come scolmatore delle piene più intense del Fiume Reno in inverno e in estate come riserva d'acqua per l'irrigazione.

In genere gli argini sono sempre colpiti da problemi di natura diversa, come per esempio la subsidenza, l'erosione, l'attività di animali scavatori e alla base di tutto si ha il frequente ricorso a tecniche costruttive inappropriate durante la storia. I materiali da costruzione venivano, infatti spesso, presi direttamente dal letto del fiume e trasportati e compattati sugli argini con tecniche inadeguate, usando degli

strumenti poveri (cariole e badili). Come risultato si ha che il sistema di difesa idraulica del complesso del fiume Reno non assicura un'adeguata protezione in molti punti.

La metodologia GPR è stata applicata su argini del fiume Reno e su alcuni dei suoi affluenti, compreso il Cavo Napoleonico (Figura 6.12). I test sono stati effettuati in aree ben conosciute con l'obiettivo di verificare delle informazioni già note e di ottenerne in aree di cui non si avevano informazioni.

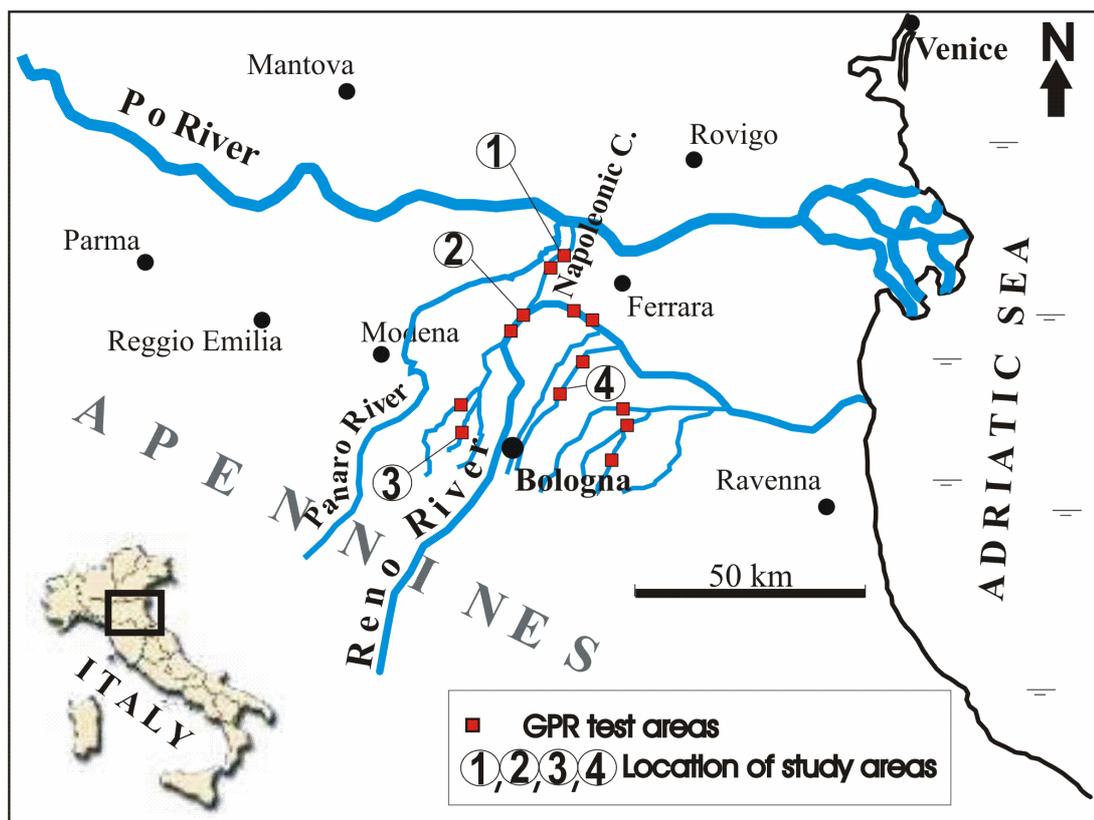


Figura 6.12: Inquadramento geografico dell'area di studio e localizzazione dei rilievi GPR [13].

### Metodologia

La maggior parte delle campagne di rilievo GPR sono state effettuate nell'Ottobre 2007 usando un Georadar RIS-MF (IDS) con un'antenna bistatica di frequenza 100 MHz e un'antenna multifrequenza 200-600 MHz. Sono stati fatti rilievi su più di 15 Km di argini, impiegando all'incirca 10 giorni lavorativi.

Gli argini del Fiume Reno e quelli del Cavo Napoleonico sono alti all'incirca 10 m, mentre quelli degli affluenti sono all'incirca di 5 m. Anche se teoricamente per queste profondità sarebbero raccomandabili delle antenne da 30 MHz [Morris,2005], la scarsa risoluzione che si avrebbe costringe alla scelta di

un'antenna con una frequenza non minore di 100 MHz. Con tale frequenza la misura del minimo target identificabile è ipotizzato all'incirca a 30 cm (vedi Capitolo 1 – Paragrafo 1.6.4).

In ogni test è stata coperta una distanza di circa 1,5 km, sia lungo la sommità dell'argine, sia lungo il primo parapetto, in direzione longitudinale. Per ogni sito, erano disponibili molti dati ottenuti da misure in situ (carotaggi per definire la stratigrafia, prove penetrometriche statiche e dinamiche). Questo tipo di dati sono fondamentali per la calibrazione dello strumento, per esempio per risalire alla costante dielettrica del terreno  $\epsilon_r$ .

In alcuni siti i risultati ottenuti dal GPR sono stati confrontati con quelli ottenuti da altre indagini non invasive, come per esempio la MASW e la tomografia elettrica.

## **Risultati**

Lungo il Cavo Napoleonico sono stati analizzati in dettaglio i dati relativi a 3 sezioni (Figura 6.13). La struttura interna dell'argine viene schematizzata nella Figura 6.13 A, B e C. La sequenza stratigrafica consiste in uno strato artificiale di altezza pari a circa 8 m, costituito prevalentemente da frazioni silteose; uno strato di depositi alluvionali di spessore variabile da 2 a 10 m sempre a prevalenza silteosa; uno strato relativo al paleocanale del Pò costituito da sabbie medie.

Per quanto riguarda la sezione A, il GPR è stato utilizzato per verificare la struttura dell'argine. A causa della presenza del silt, entrambe le antenne da 100 e 200 MHz hanno subito una forte attenuazione del segnale. In ogni caso, quella da 200 MHz ha permesso l'identificazione di una struttura non omogenea (20 m larga e 1,5 m profonda) sul lato inclinato dell'argine (SCAN A Figura 6.13 e 6.14). La forma concava ben riconoscibile può probabilmente rappresentare una zona dell'argine riparata; campionamenti di terreno in situ hanno evidenziato la presenza di materiale da riempimento e altro materiale eterogeneo.

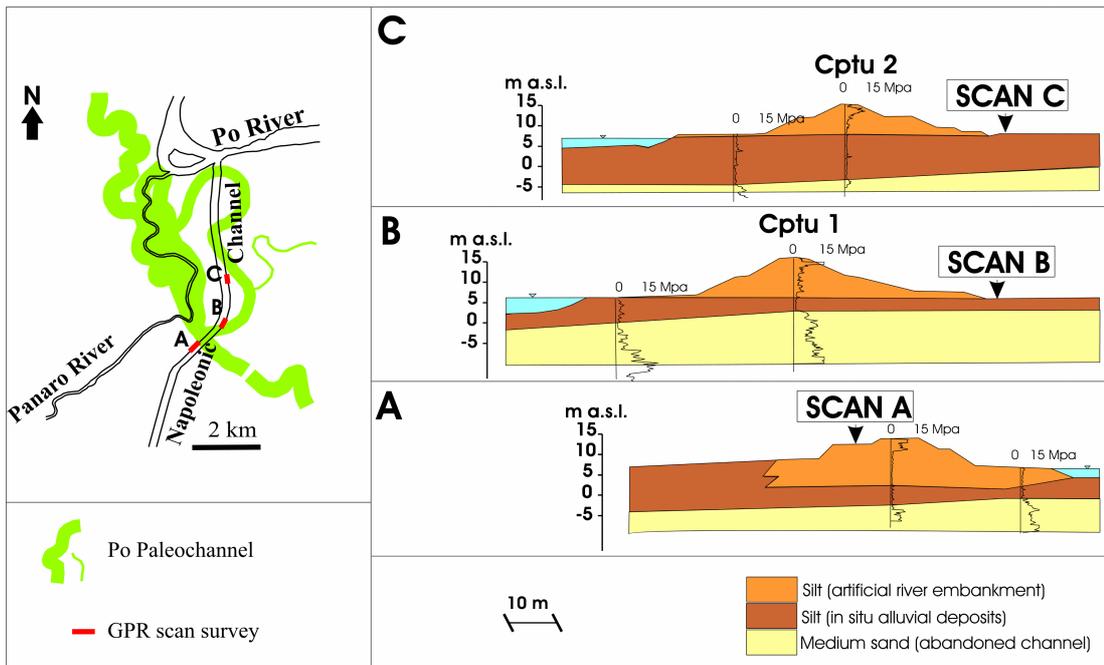


Figura 6.13: Localizzazione dei rilievi GPR lungo il Cavo Napoleonico (sito 1 nella Figura 6.12) e sezione stratigrafica dell'argine ottenuta da misure in situ. SCAN A, B e C: posizione dei rilievi GPR [13].

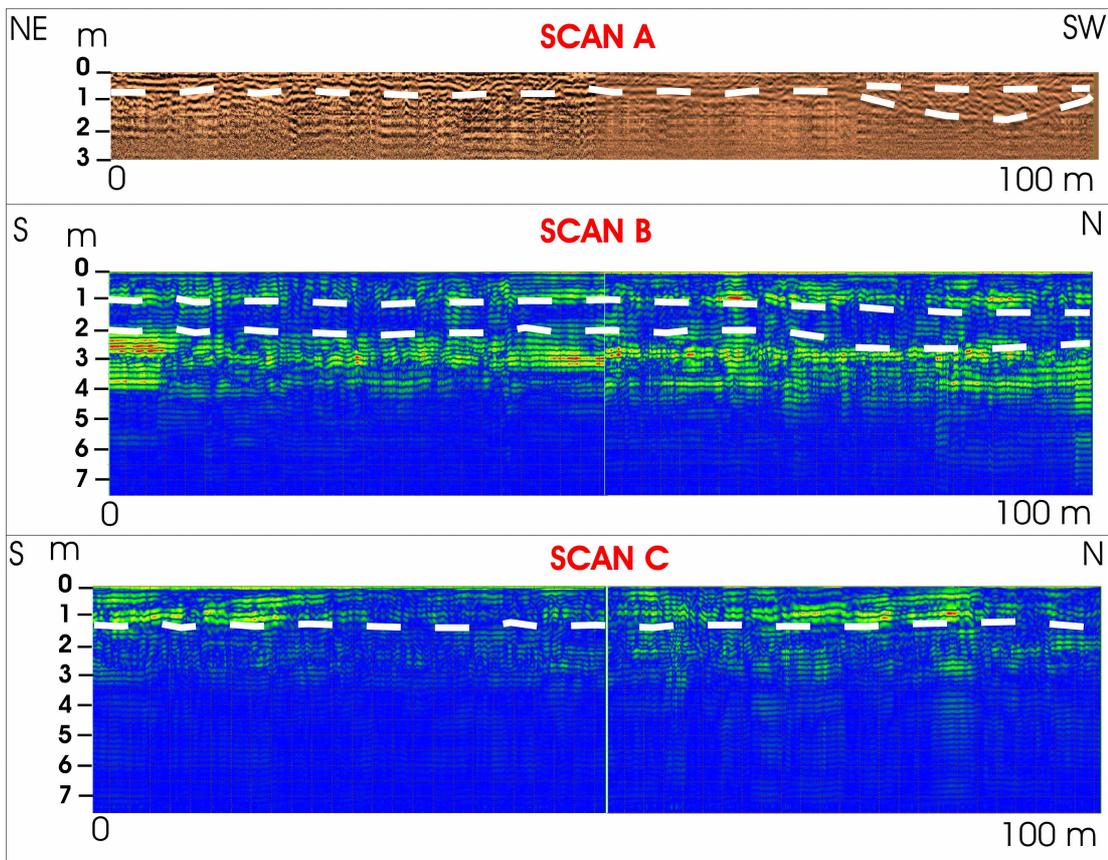
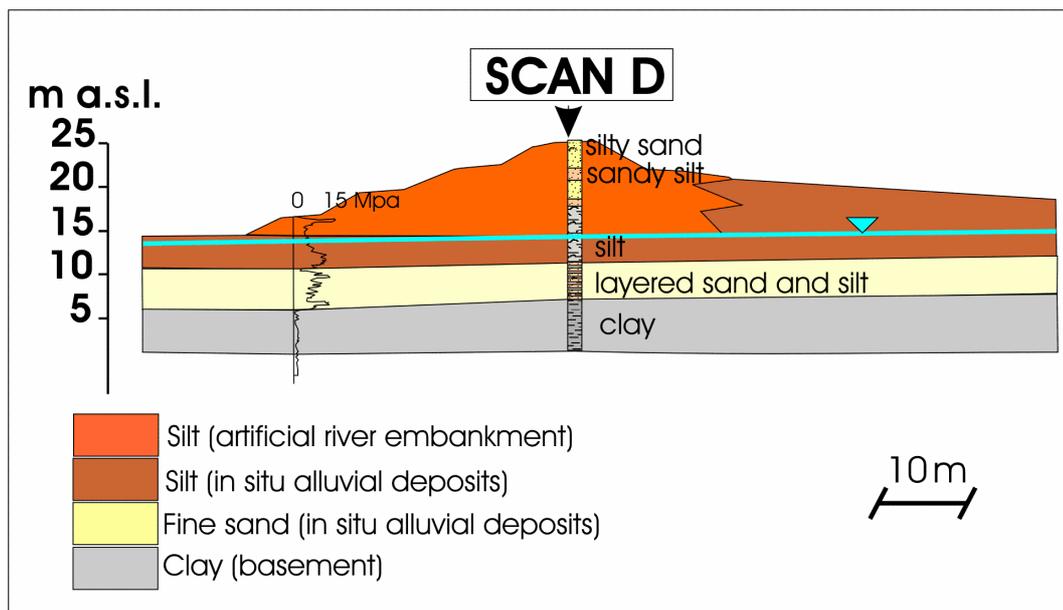


Figura 6.14: Andamento di orizzonti disomogenei indagati col GPR lungo il Cavo Napoleonico (linee tratteggiate bianche) – vedi la Figura 6.12 per la posizione. SCAN A (antenna da 200 MHz): si nota una forma concava relativa alla zona che è stata riparata; SCAN B e C (antenna da 100 MHz): si nota come il contatto tra silt e sabbia a 2 m di profondità scompare nel passaggio dalla SCAN B alla C [13].

Il rilievo GPR è stato effettuato per circa 2 Km tra le sezioni B e C. Nei primi cento metri di rilievo (SCAN B Figura 6.14), è possibile riconoscere chiaramente, ad una profondità di 2 m, uno strato sabbioso. Il segnale diventa molto debole a circa 4 m di profondità a causa della presenza della tavola d'acqua, confermata dai dati dei piezometri situati nelle vicinanze. Questo forte contrasto diviene sempre più discontinuo in direzione Nord e alla fine della linea di indagine, scompare (SCAN C Figura 6.14).

Lungo il Fiume Reno (sito 2 Figura 6.12) è stato effettuato un confronto tra le informazioni ottenute dal GPR con quelle relative ad altre tecniche di indagine geofisiche. Le caratteristiche geotecniche dell'argine sono molto più complesse rispetto al Cavo Napoleonico, stando alle informazioni geotecniche preventivamente ricavate da indagini in situ. In questo caso si ha oltre allo strato di terreno artificiale a prevalenza siltosa, uno strato di depositi alluvionali (silt e sabbia) che ricoprono un basamento argilloso.



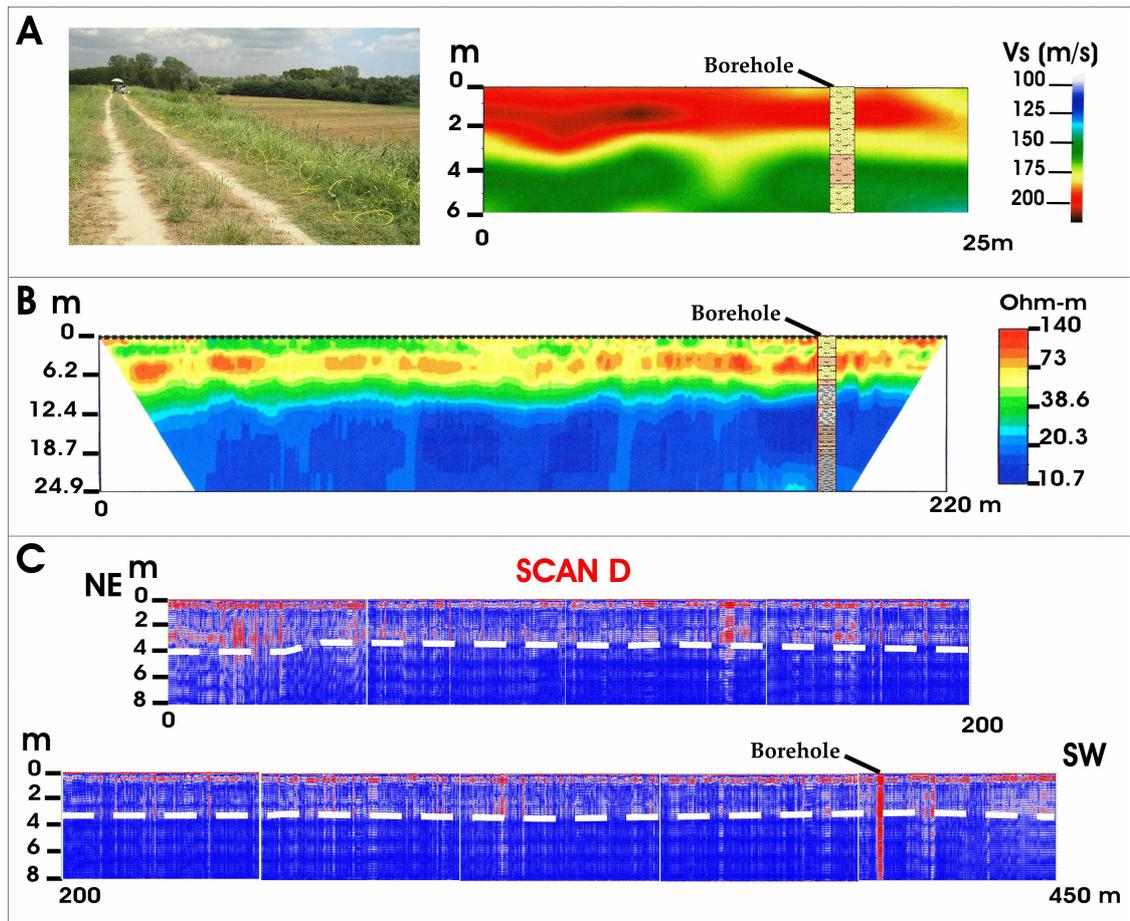
**Figura 6.15:** Sezione schematizzata lungo l'argine sinistro del Reno (sito 2 Figura 6.12) con la posizione del rilievo GPR [13].

Il rilievo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) ha coperto una lunghezza pari a 23 m (interdistanza dei geofoni pari a 1 m) (Figura 6.16 A). Dall'elaborazione si evince una forte attenuazione della Vs alla profondità di 3 m. Ciò conferma, come evidente anche dai dati dei carotaggi, che l'ultimo livello della costruzione sia costituito da sabbia limosa, a differenza del primo strato composto da limo sabbioso. Il rilievo MASW consente di mettere in luce questa

leggera differenza nella litologia e consente di rilevare il livello con una compattazione maggiore, quello che si trova più in superficie e ne conferma la sua continuità laterale.

La tomografia elettrica è stata condotta mantenendo una distanza fissa tra gli elettrodi pari a 2 m, la distanza coperta è pari a 220 m. I risultati ottenuti sono coerenti con i dati dei carotaggi e decisamente più accurati di quelli ottenuti mediante MASW. La profondità di investigazione raggiunta è di circa 20 m, permettendo anche di ottenere informazioni relative alla base dell'argine che si trova all'incirca sugli 11 m.

Il rilievo GPR è stato effettuato per una lunghezza di circa 450 m con un'antenna da 100 MHz (SCAN D Figura 6.16). Nonostante la profondità di investigazione è limitata ai primi 3-4 m, è possibile percepire la differenza situata a circa 3 m di profondità tra i due livelli diversi. Questo contatto è visibile per tutta la lunghezza della scansione: il segnale subisce attenuazioni più o meno accentuate in funzione della propria composizione, del livello di saturazione e del grado di compattazione. In questo caso, il GPR permette di cogliere una differenza nelle proprietà dielettriche, ma è solo grazie all'approccio multidisciplinare adottato che questa proprietà può essere ben determinata.

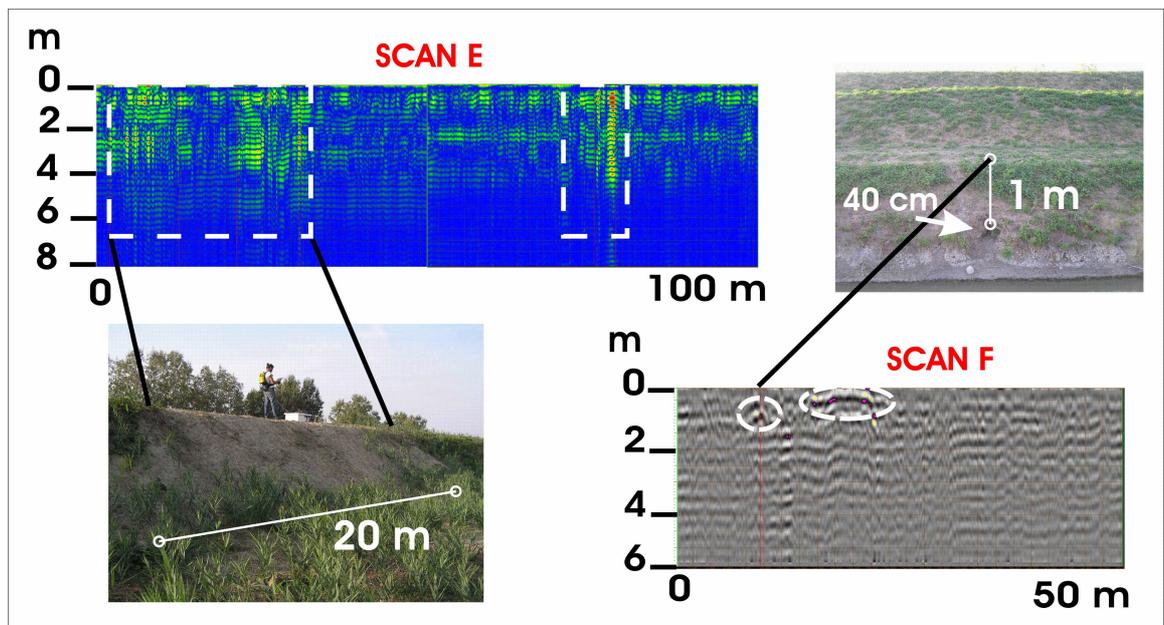


**Figura 6.16: Indagini geofisiche lungo il fiume Reno; A: MASW è in grado di rilevare il grado di compattamento elevato del livello più alto; B: la tomografia elettrica raggiunge facilmente la base dell'argine; C: il GPR con un'antenna da 100 MHz evidenzia la continuità laterale di due livelli diversamente compattati [13].**

Lungo uno degli affluenti del Fiume Reno (sito 3 Figura 6.12), è stata testata la capacità del GPR per identificare porzioni di argine interessate da riparazioni e dall'attività di animali scavatori (SCAN E Figura 6.17). È stato possibile identificare in maniera abbastanza chiara, zone fino alla profondità di 4 m. Queste aree hanno subito dei lavori di rifacimento di recente, dopo una rottura a seguito di una forte piena. In questo caso riflessioni più forti corrispondono a terreni meno compatti.

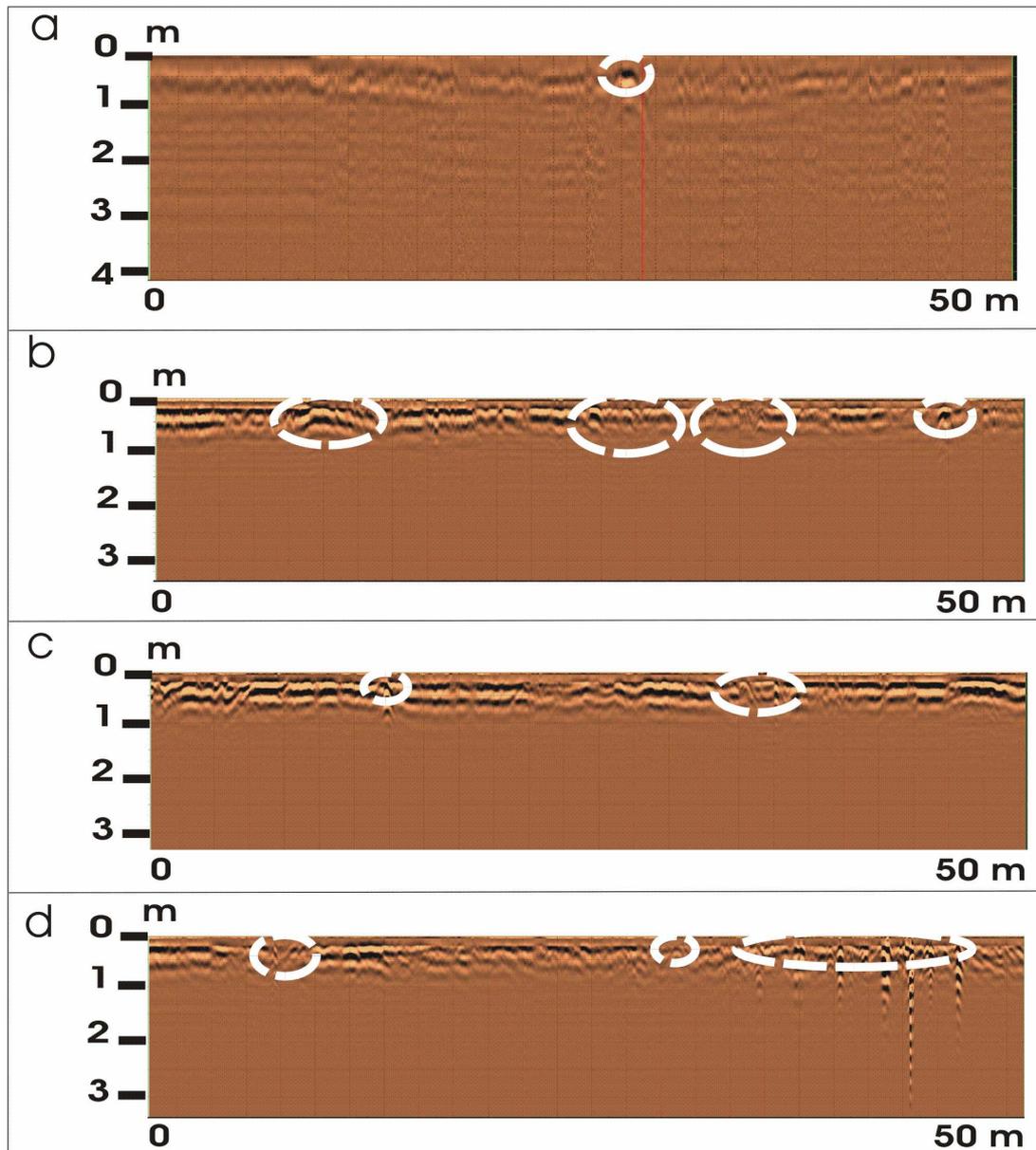
Sono stati effettuati molti test con lo scopo di poter determinare le modalità di sviluppo di queste cavità nei corpi arginali. Lungo gli argini di questo corso d'acqua, è facile notare molte aperture d'accesso delle tane di animali alla base dell'argine stesso, alla profondità di circa 1 m dall'alzaia. Un'antenna da 100 MHz è stata usata per questi rilievi. Lo scopo principale è quello di verificare se, allo stesso modo dell'entrata, sia riconoscibile anche l'andamento delle tane all'interno. In effetti solo la cavità di dimensioni maggiori, pari a circa 40 cm di

diametro è stato rilevata (SCAN F Figura 6.17). In prossimità dell'ingresso, è evidente un'altra zona disomogenea: questa potrebbe essere una porzione della cavità all'interno dell'argine. La difficoltà di rilievo delle altre cavità sono legate alla loro dimensione, che probabilmente sono appena minori della minima dimensione rilevabile con una frequenza di 100 MHz.



*Figura 6.17: Scansione GPR realizzata lungo un affluente del Fiume Reno (sito 3 Figura 6.12) con un'antenna da 100 MHz; SCAN E: rilievo della zona riparata; SCAN F: rilievo di una cavità scavata da animali [13].*

Come già noto, in un suolo omogeneo il GPR è in grado di identificare chiaramente oggetti isolati e localizzati superficialmente con una misura maggiore della massima risoluzione ottenibile con quell'antenna. Infatti è stato possibile identificare condutture poste ad una profondità sconosciuta (Figura 6.18 a) e oggetti aventi un forte contrasto dielettrico. Le numerose anomalie, in cui però non si hanno delle riflessioni multiple (Figura 6.18 b e c), sono state interpretate come corpi isolati non cavi, per esempio sassi posti ad una certa profondità. Piccole anomalie isolate che mostrano delle forti riflessioni in profondità sono probabilmente dovute ad oggetti metallici (Figura 6.18 d).



*Figura 6.18: Rilievo GPR effettuato per identificare oggetti metallici (sito 4 Figura 6.12); A: condotta rilevata con un'antenna da 100 MHz; B e C: blocchi isolati all'interno di materiale da riempimento; D: oggetti metallici [13].*

### **Discussione**

La tecnica MASW e la tomografia elettrica sono metodologie ben note per indagini sugli argini; tuttavia, per un'indagine preliminare di un'area vasta, sarebbe necessario disporre di altri metodi di indagine.

Nel caso del monitoraggio del Fiume Reno (SCAN D), il rilievo GPR ha permesso di verificare la continuità laterale delle informazioni pervenute a mezzo delle indagini puntuali (carotaggi), della tomografia elettrica e della MASW per una lunghezza di circa 500 m.

L'antenna da 100 MHz raggiunge la massima profondità di investigazione di 4 m che permette di ottenere informazioni sulla stratigrafia superficiale e qualche isolata disomogeneità. Per quest'ultima finalità, l'antenna da 200 MHz risulta più idonea (Figura 6.18 d), anche se la profondità di investigazione decresce fino a soli 2 m. A differenza delle disomogeneità presenti nei siti archeologici o urbani, quelle presenti su argini risultano più difficili da essere identificate a causa della frequente presenza di materiale argilloso che attenua molto il segnale.

MASW e la tomografia elettrica hanno richiesto un giorno di acquisizione ognuno, mentre il GPR consente di indagare delle zone molto più estese in poco tempo (circa 3 Km al giorno di rilievi sulla sommità e sul primo parapetto).

L'individuazione delle tane di animali rimane ancora una questione aperta: dei 10 test effettuati al di sopra di cavità note, il GPR ha chiaramente individuato solo una tana. La difficoltà è soprattutto dovuta al fatto che gli animali scavano cavità dalla forma piuttosto complessa, irregolare e a profondità molto variabili. Tutte queste variazioni sono difficilmente identificabili col GPR. Dall'altro lato le aree riparate recentemente sono molto ben riconoscibili perché il nuovo materiale è molto meno compattato rispetto a quello in situ. Le porzioni di argini riparate molti anni fa non sono chiaramente identificabili col GPR perché hanno subito una buona compattazione [13].

#### **6.4 Quadro riassuntivo dello stato dell'arte**

Le informazioni raccolte dagli articoli sopra citati, utili per questo lavoro di tesi, sono riassumibili nei seguenti punti:

1. La riflessione che ci aspettiamo di ottenere in corrispondenza di una cavità è un'iperbole dai toni chiari che testimoniano il forte contrasto dielettrico esistente tra l'aria e il terreno circostante.
2. Non è possibile distinguere il materiale che riempie la cavità; si può soltanto dire se il materiale che riempie la cavità è più o meno compatto di quello che è intorno.
3. Nel caso di 2 cavità poste sulla stessa verticale, il GPR permette di identificarle entrambe, se la frequenza utilizzata è compatibile con la profondità e la dimensione dei vuoti.

4. Il GPR risulta molto efficace quando si vogliono confermare dei dati proveniente da un metodo di campionamento puntuale, come per esempio l'andamento della tavola d'acqua a partire dai dati di un piezometro o la stratigrafia dedotta da un carotaggio.
5. Il vantaggio maggiore è che si riescono a coprire delle grandi distanze in relativamente poco tempo.
6. La difficoltà maggiore delle indagini per l'individuazione delle tane di animali è dovuta alla grande variabilità delle caratteristiche geometriche delle stesse.

## *Capitolo 7*

### *Indagini sperimentali*

#### **7.1 Premessa: quadro informativo**

L'oggetto dello studio è la verifica dell'applicabilità e dell'efficacia del GeoRadar per individuare cavità o tunnel scavati da animali all'interno degli argini.

L'uso di tecniche non invasive, nel monitoraggio dello stato di salute di manufatti arginali, è di primaria importanza per la sicurezza dell'argine stesso. Il metodo GPR, più di ogni altro, permette di investigare vaste aree in un tempo relativamente breve; per quanto riguarda gli argini fluviali permette di indagare anomalie di vario genere che in seguito possono essere analizzate.

Alla luce di queste considerazioni, si intende analizzare soprattutto quelli che sono i limiti e le potenzialità di questa tecnica rispetto alle diverse condizioni ambientali nelle quali si opera e al grado di risoluzione richiesto dal problema.

Altre tecniche non invasive, come ad esempio metodi geofisici, risultano largamente applicate per il monitoraggio arginale e sono in costante sviluppo.

La sismica a rifrazione e la MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), in particolare, sono le tecniche più adatte per indagare aree con caratteristiche geologiche diverse e per la stima di proprietà geotecniche dei materiali; tuttavia sono inefficaci per identificare la presenza di cavità o di tane [14]. La tomografia elettrica fornisce dei buoni risultati con un'alta risoluzione, soprattutto per quanto riguarda la struttura e le condizioni di umidità del terreno; l'inconveniente di queste tecniche è che richiedono un tempo di acquisizione lungo perché lo spazio tra i vari elettrodi dovrebbe essere uguale o minore di 1 m.

Anche le tecniche di Telerilevamento sono da tempo impiegate in molteplici campi del monitoraggio e della diagnostica dei canali [15].

Altri metodi elettromagnetici innovativi come per esempio la GMS (Geophysical Monitoring System), sono stati testati e verificati in Progetti Europei[14].

L'obiettivo a cui ora si tende è quello di migliorare la qualità delle informazioni ottenute, aumentando il grado di risoluzione nelle indagini di tali disomogeneità. Per tale motivo l'attenzione è stata rivolta all'utilizzo di metodi alternativi come il GPR. Dopo un periodo di sperimentazione soprattutto in campo archeologico e

dell’Ingegneria Civile, a partire dagli anni 90 si è mostrato un maggiore interesse nell’utilizzo di tale tecnologia anche in campo geologico, sedimentologico e idraulico.

Per quanto riguarda l’utilizzo del GPR su argini fluviali, ad oggi risultano molto poche le applicazioni realizzate.

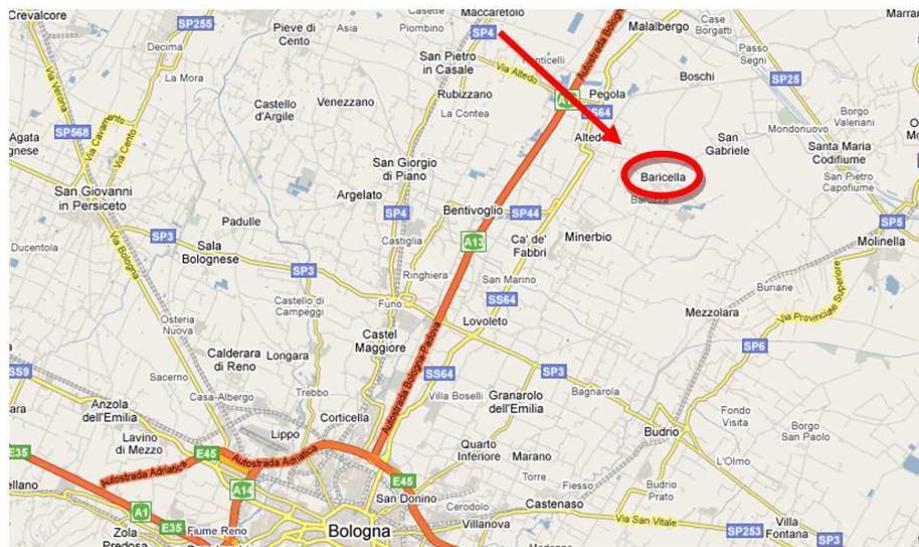
La conoscenza della presenza e della posizione di eventuali zone disomogenee all’interno di argini costituisce un problema rilevante in termini di pericolo e rischio idraulico, soprattutto se tali argini, spesso vecchi e realizzati con materiali scadenti, sono situati in zone densamente popolate che sono soggette a periodiche piene importanti.

Il bisogno di realizzare rilievi lungo centinaia di chilometri di argini fluviali con lo scopo di identificare per prima cosa tali debolezze è innanzitutto un’esigenza per gli enti regionali di ambito.

## 7.2 Inquadramento geografico

Le misure GPR sono state realizzate in diverse aree lungo argini di canali del Comprensorio di pianura del Consorzio della Bonifica Renana, nel Comune di Baricella, Località San Gabriele – Mondonuovo.

I siti in cui sono stati eseguiti i rilievi, sono indicati nelle seguenti figure.



*Figura 7.1: Indicazione del Comune di Baricella, situato a circa 35 km a NE di Bologna.*



Figura7.2: Legenda della carta tecnica del Compensorio di Bonifica Renana.



Figura7.3: Dettaglio della carta tecnica del Compensorio della Bonifica Renana e indicazione dei siti delle indagini.

### 7.3 Metodologia

Lo strumento utilizzato è un RAMAC/GPR, MALA Geosciences Co, prodotto in Svezia, dotato di un'antenna da 250 MHz, appartenente alla Facoltà di Agraria, DISTA (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali).

L'antenna schermata da 250 MHz è un'antenna multiuso, generalmente usata per indagini a medie profondità e medie risoluzioni.

**Dimensioni:** 0.74 x 0.44 x 0.16 m

**Peso:** 7.85 kg

**Applicazioni consigliate:** indagini su reti di sottoservizio, su serbatoi sotterranei e per il rilevamento dei vuoti [7].



*Figura 7.4: Foto dell'antenna da 250 MHz, utilizzata per le nostre indagini.*

I rilievi sono stati effettuati nel periodo di Dicembre 2008 – Febbraio 2009, per un totale di circa 60 ore di lavoro di campo.

In generale un'antenna da 250 MHz in condizioni ideali, terreno poco conduttivo, può raggiungere un valore di penetrazione massima che si aggira attorno ai 3-4 m (Tabella 7.1), nelle condizioni reali, la presenza dell'acqua fa diminuire questo valore. Nelle nostre applicazioni, la profondità massima raggiungibile non supera i 2 m.

<b>Frequenza nominale (MHz)</b>	<b>Risoluzione (m)</b>	<b>Penetrazione massima (m)</b>
50	0.5 – 1.0	25 – 40
100	0.25 – 0.5	15 – 25
200	0.10 – 0.20	6 – 10
500	0.05 – 0.10	3.5 – 6
800	0.03 – 0.06	1.5 – 2.5

*Tabella 7.1: Valori di risoluzione e penetrazione massima per alcuni valori di frequenza.*

Un altro fattore da considerare è che il rapporto tra dimensioni del target e profondità di investigazione deve essere almeno pari ad 1/10.

Nelle nostre applicazioni, al fine di ottenere delle scansioni corrette, sono state realizzate delle scansioni secondo linee parallele in direzione perpendicolare a quella dell'oggetto.

#### **7.4 Descrizione dell'indagine nel sito 1 – Canale Lorgana**

Le misure sono state effettuate in sponda sinistra del canale. Questa scelta è stata dettata dalle buone condizioni operative della stessa per quanto riguarda la pulizia e la praticabilità.



*Figura 7.5: Foto del Canale Lorgana – Sito 1.*

I rilievi sono stati effettuati sulla banchina e sul lato inclinato della sponda.



*Figura 7.6: Scansioni effettuate sulla banchina e sul lato inclinato.*

Il valore della permittività dielettrica relativa del terreno che è in genere un'incognita perché dipende non solo dalla composizione mineralogica del terreno, ma anche dal grado di saturazione al momento della misura, è stato ricavato in maniera diretta (vedi Capitolo 1 – Paragrafo 1.6.3).

La calibrazione è stata effettuata in corrispondenza di una tubazione di scarico posta ad una profondità di circa 70 cm dal piano campagna. Il valore della velocità di propagazione del segnale è di circa 0.08 m/ ns che corrisponde ad un valore di permittività dielettrica relativa  $\epsilon_r$  di circa 14. Questo risultato sembra coerente con i dati presenti in letteratura che danno un intervallo di permittività che va da 5 a 40 per l'argilla (materiale di cui è prevalentemente costituita la sponda del canale in esame).



*Figura7.7: Tubazione di scarico posta ad una profondità di 0.7 m, sfruttata per la calibrazione delle profondità.*

Quest'area è prevalentemente interessata da tane di nutrie, generalmente situate nella sponda, a poca distanza dal pelo libero dell'acqua, e occasionalmente da tane di volpi, che preferibilmente si insediano proprio nell'argine. Le dimensioni sono molto variabili, comunque non più piccole dei 30 cm di diametro. Questa caratteristica sembra compatibile con la risoluzione massima ottenibile con il nostro strumento e per la velocità ottenuta, circa 16 cm.

Le cavità situate sulla sponda sono molto superficiali e l'altezza della sponda non supera mai il metro.

In questo sito abbiamo proceduto con il duplice scopo di verificare se lo strumento fosse adatto a rilevare delle cavità in posizione nota e allo stesso tempo per identificare quelle in posizione non nota.

### **7.5 Descrizione dell'indagine nel sito 2 – Canale Travallino**

Anche in questo caso la scelta del sito è stata imposta da necessità operative; il rilievo è stato effettuato in corrispondenza di zone migliori da un punto di vista della manutenzione della sponda.



*Figura7.8: Foto del Canale Travallino – Sito 2.*

Questo canale non presenta una banchina, perciò il rilievo è stato effettuato sulla sommità della sponda.



*Figura 7.9: Esecuzione del rilievo sulla sommità della sponda.*

Il valore di permittività dielettrica ottenuta per il terreno in questo sito è 21, la velocità è di circa 0.064 m/ns. Anche in questo caso è stata effettuata una calibrazione diretta, sfruttando la riflessione generata da una tubazione di scarico posta ad una profondità nota.

Le difficoltà operative di quest'area sono legate allo stato di cattiva manutenzione dell'argine, con erba e arbusti e all'elevato grado di saturazione del terreno al momento delle indagini.

Le tane presenti in quest'area si ritiene siano di volpe, considerando la loro posizione, nel corpo della sponda, il tipico accumulo del terreno scavato e il loro sviluppo interno molto profondo.

Il diametro esterno della cavità è all'incirca di 40 cm e posta ad una profondità di circa 1,5 m. Questi due dati risultano compatibili con le caratteristiche dell'antenna in uso.

In questo caso è stato innanzitutto verificato se lo strumento riuscisse ad intercettare la cavità e in seguito sono stati realizzati una serie di tracce parallele in modalità meandering (vedi Figura 7.18) al di sopra delle tana per poter ricostruire un modello 3D.



**Figura 7.10:** Tubazione di scarico posta ad una profondità di 1,5 m, sfruttata per la calibrazione. Tana di volpe ad una profondità di circa 1.5 m, si nota il tipico accumulo di terra nei pressi dell'entrata.

## 7.6 Risultati

Il GPR mediante l'invio di onde elettromagnetiche è in grado di individuare l'interfaccia tra materiali aventi proprietà dielettriche diverse. Sapendo che esiste un contrasto dielettrico tra il terreno e l'aria, siamo certi dell'efficacia di questo metodo per individuare delle cavità in terreni sabbiosi-argillosi. Questa proprietà è nota come *rilevabilità* di un oggetto e si valuta mediante il *coefficiente di Fresnel* (vedi Capitolo 1 – Paragrafo 1.6.5).

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}})}{(\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})} \quad (7.1)$$

Dove se indichiamo con  $\epsilon_{r1}$  la permittività del terreno, circa uguale a 14 per il primo sito e a 21 per il sito 2 e con  $\epsilon_{r2}$  quella dell'aria, uguale ad 1, si ottiene un valore positivo.

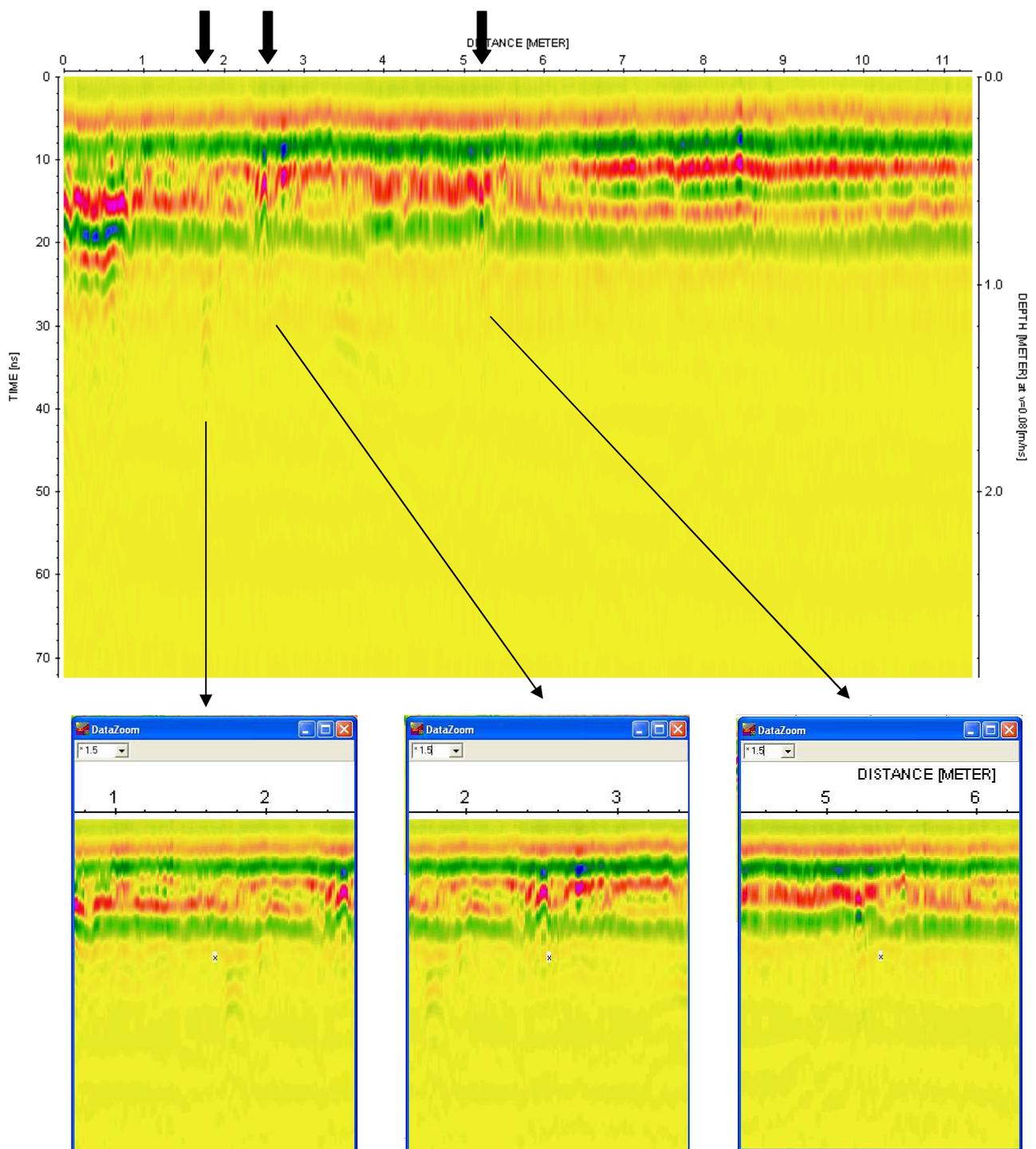
Quando ciò avviene si genera una riflessione con un cambiamento di fase. Inoltre il segnale durante il suo percorso di propagazione risente anche di una diminuzione nell'ampiezza a causa della perdita di energia.

In definitiva, quello che ci aspettiamo di ottenere a seguito di una scansione al di sopra di una cavità, è la formazione di un'iperbole di diffrazione (vedi Capitolo 6 – Paragrafo 6.1) e di una serie di multiple di energia sempre minore dovute a ripetuti cicli di riflessione nella cavità (le multiple sono segnali generati quando l'onda che viaggia in un mezzo caratterizzato da una bassa permittività dielettrica per cui subisce diversi cicli di riflessione). Inoltre sappiamo che la forma delle

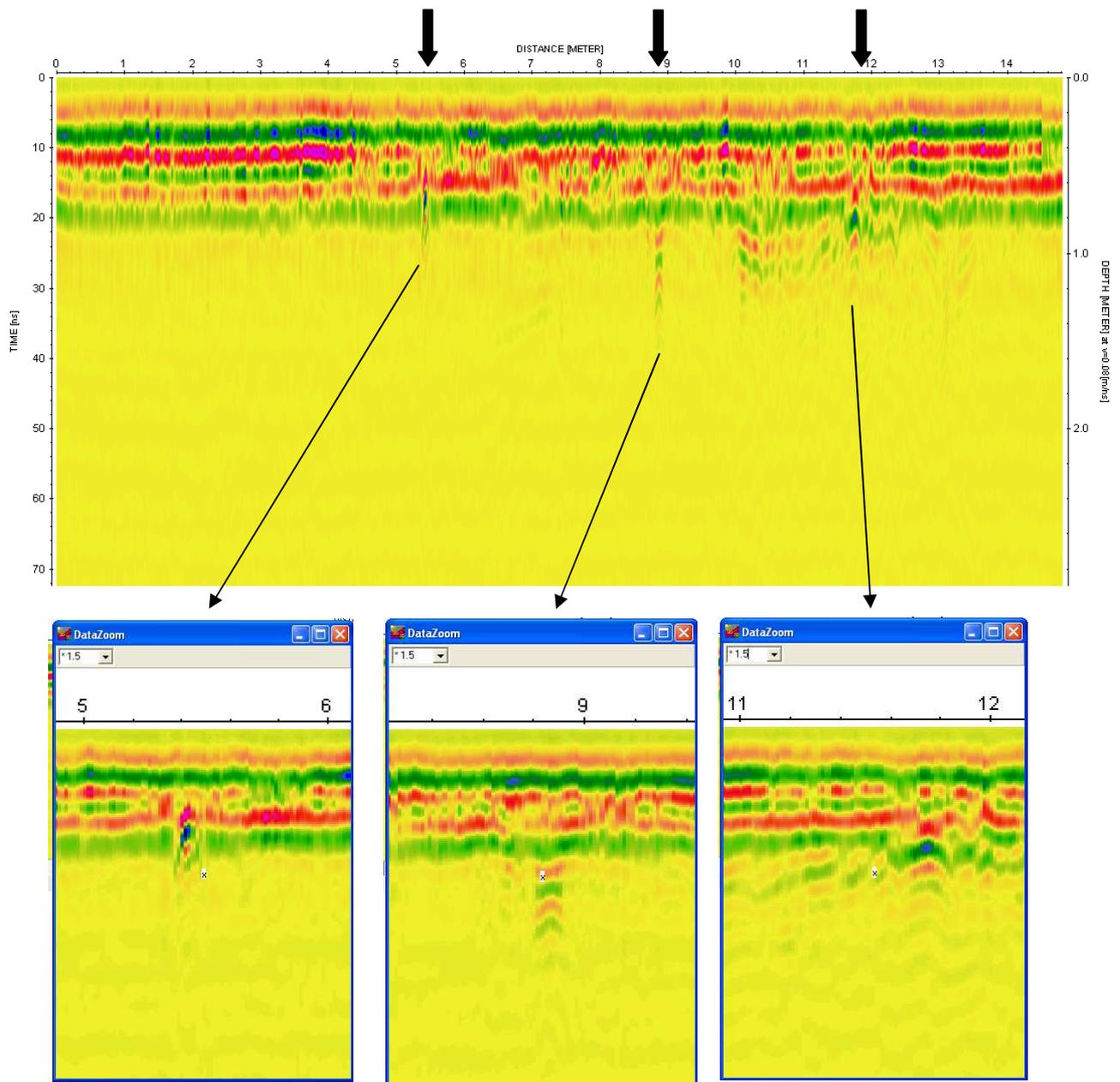
iperboli cambia in funzione del materiale attraversato dal segnale, della geometria del target e della frequenza dell'antenna (per noi non varia).

Per quanto riguarda il modello 3D (Figura 7.20) una chiara interpretazione può essere ottenuta dall'analisi delle time slices (Figura 7.21) ottenute in istanti di tempo diversi (profondità diverse). A partire da tali sezioni si ottengono delle informazioni relative alla conformazione delle cavità all'interno del volume scansionato.

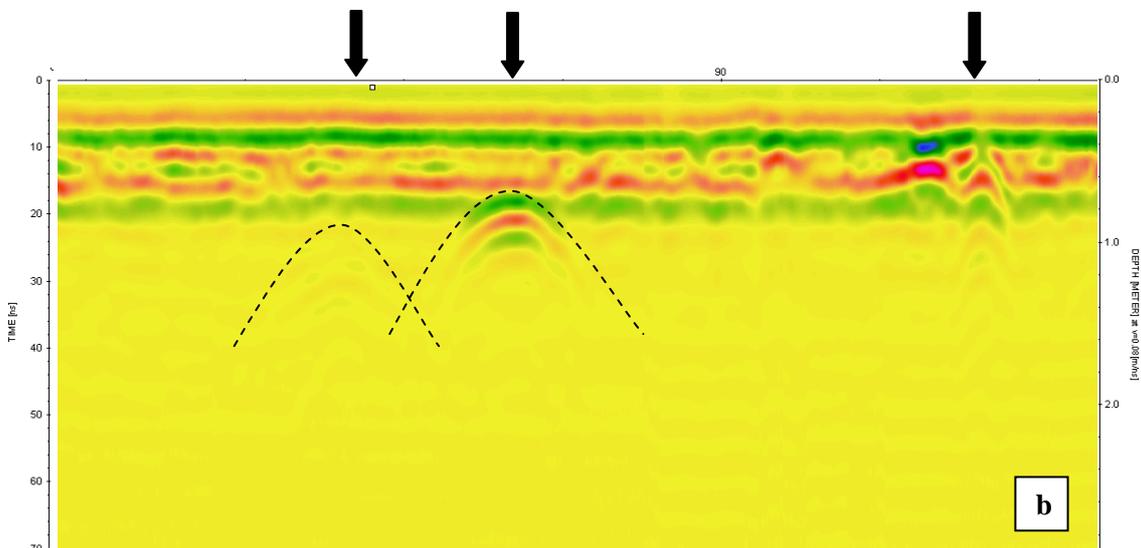
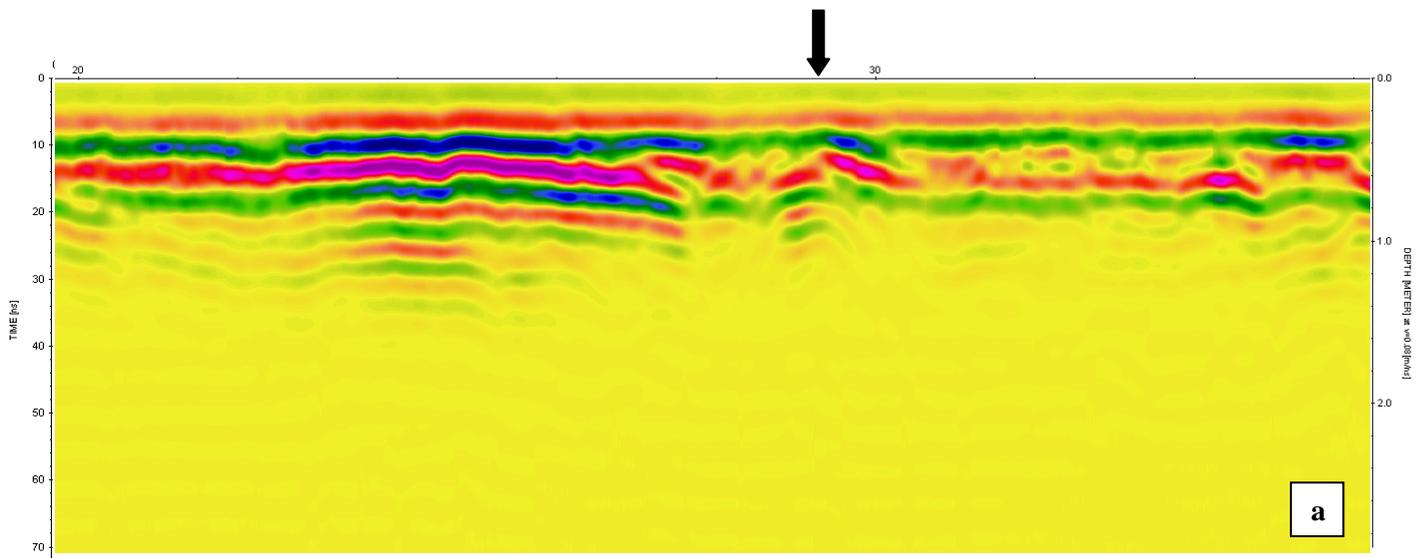
Vengono riportati di seguito alcuni dei risultati, ottenuti dalle nostre scansioni, analizzati mediante il software REFLEXW 5.0 per il processing, GPR PROCESSES per la realizzazione delle slices e SURFER 8.0 per l'interpolazione dei dati.



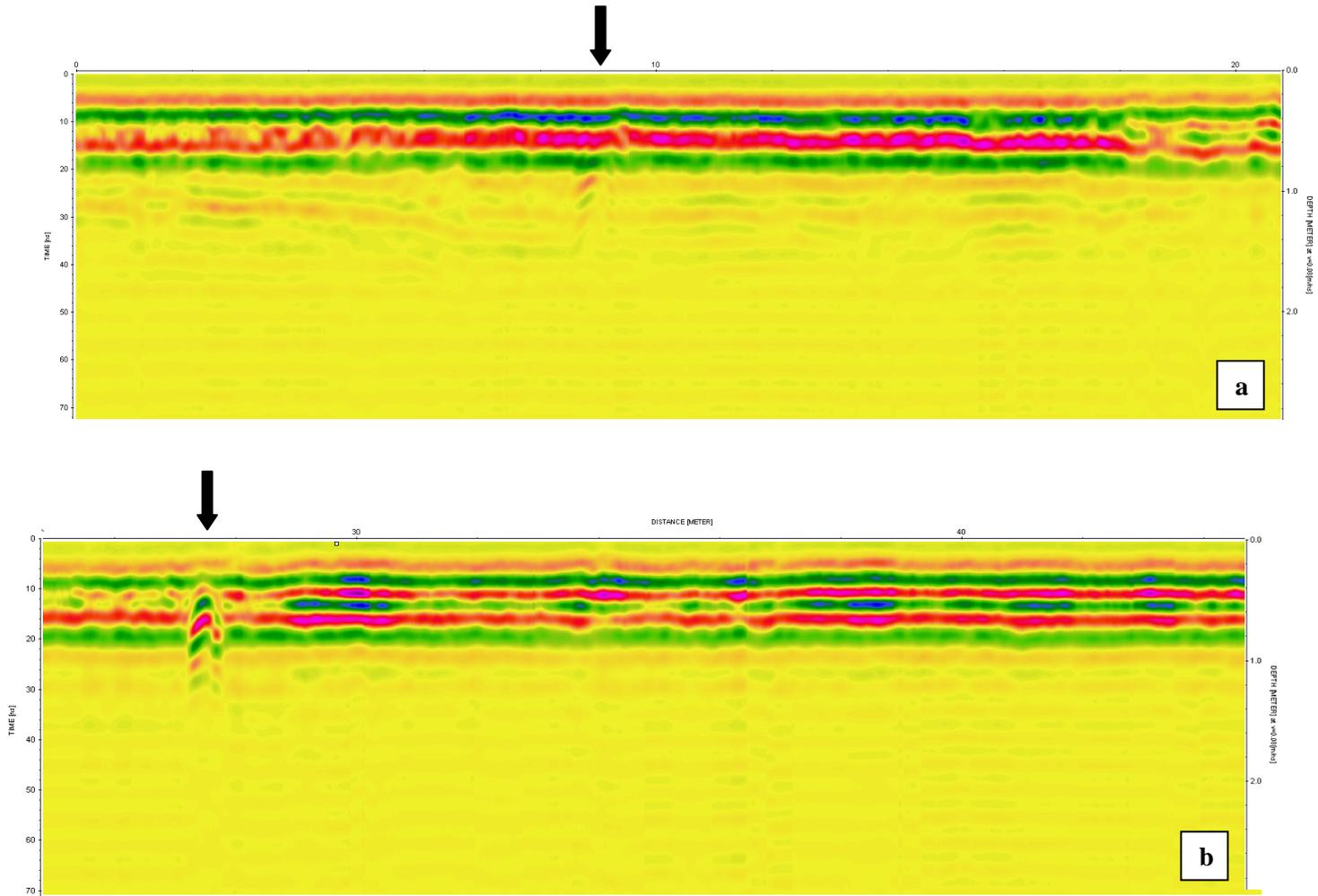
*Figura 7.11: Scansione GPR nel sito 1 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori.*



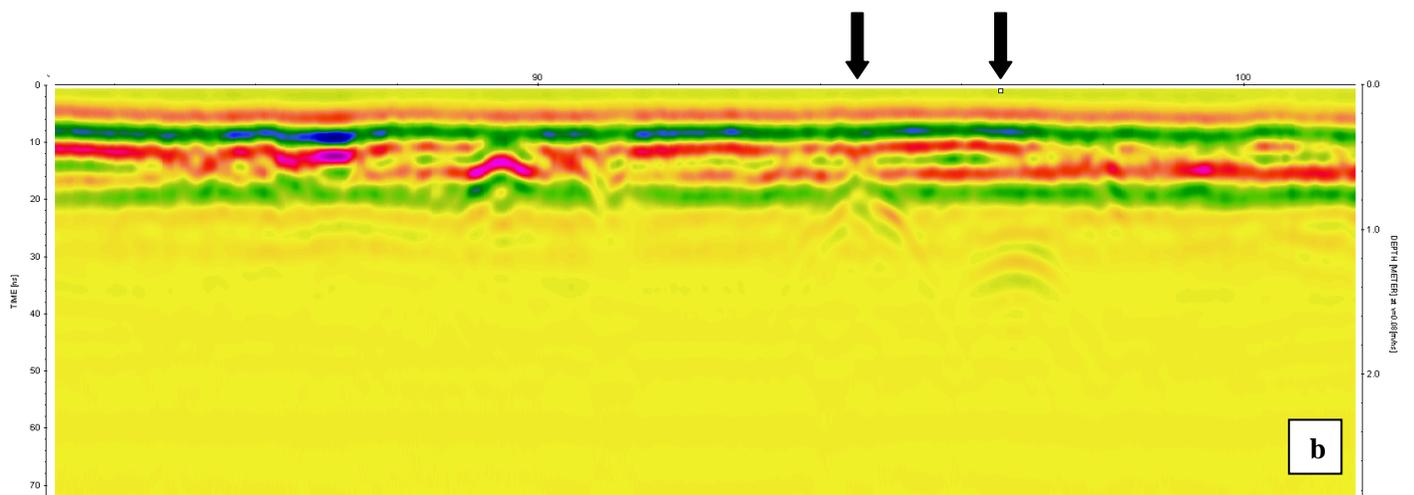
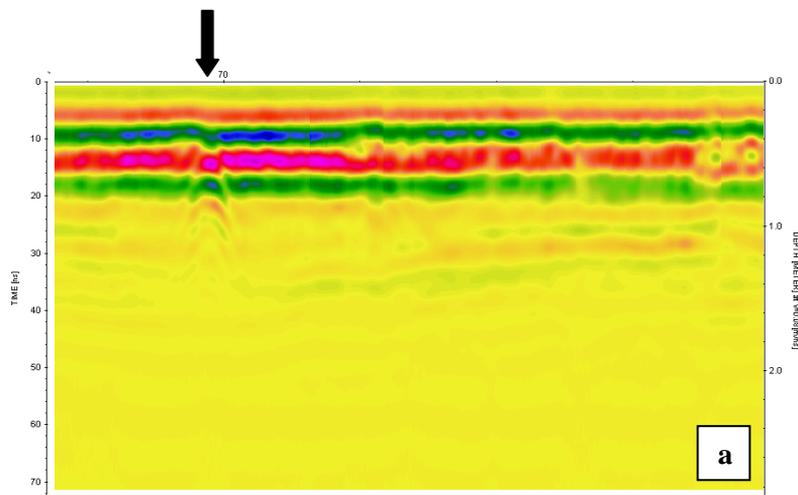
*Figura 7.12: Foto delle misure effettuate sulla banchina e di una delle tane rilevate durante il rilievo; Scansione GPR nel sito 1 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori.*



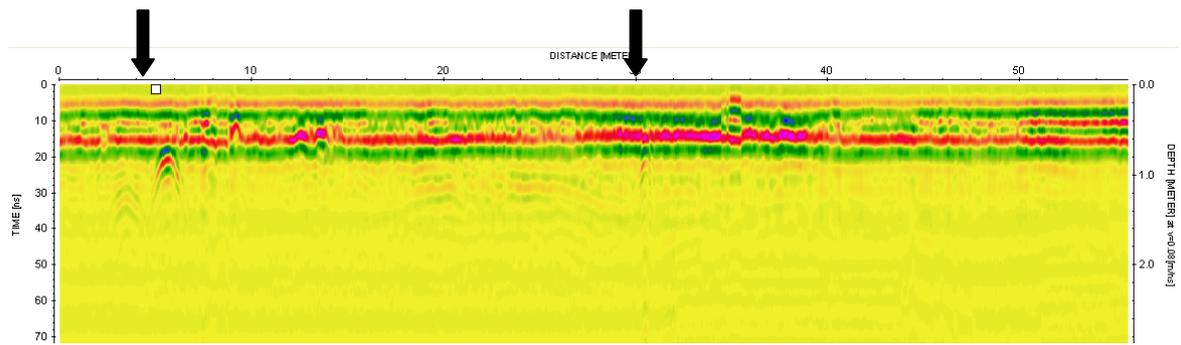
**Figura 7.13 a e b:** a) Scansione GPR nel sito 1 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori; b) Le iperboli indicate con la linea tratteggiata sono delle riflessioni ottenute da tubazioni di scarico (riportata nella foto sottostante) e utilizzate per la calibrazione.



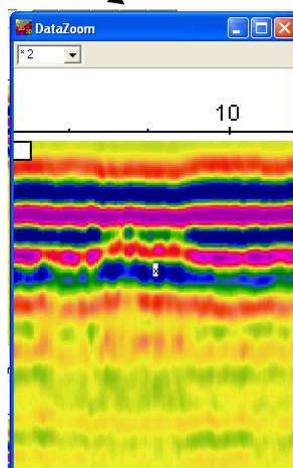
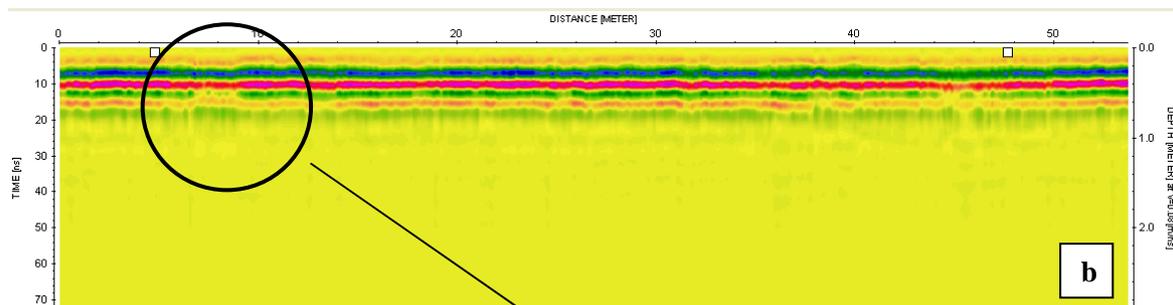
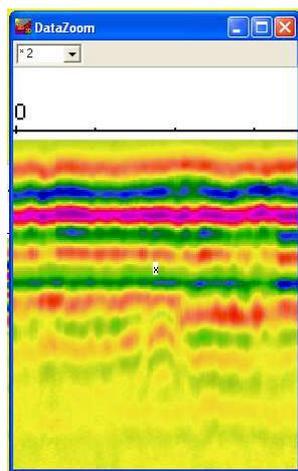
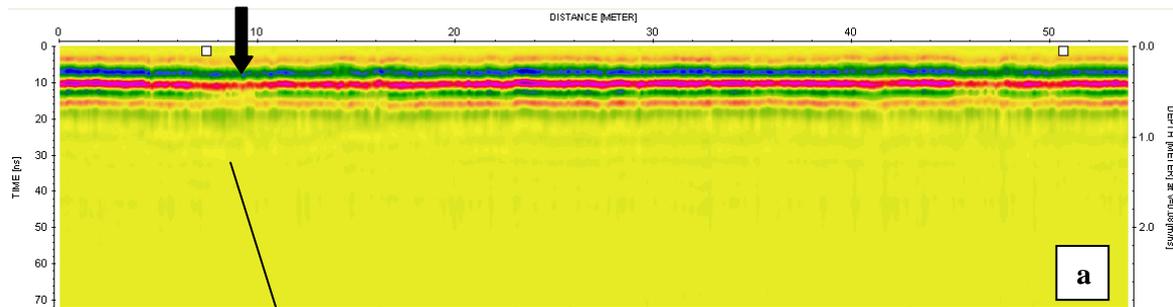
*Figura 7.14 a e b: Scansione GPR nel sito 1 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori. Foto di una misura durante la quale viene rilevata la presenza di una tana, testimoniata dal percorso realizzato dall'animale per raggiungere l'acqua.*



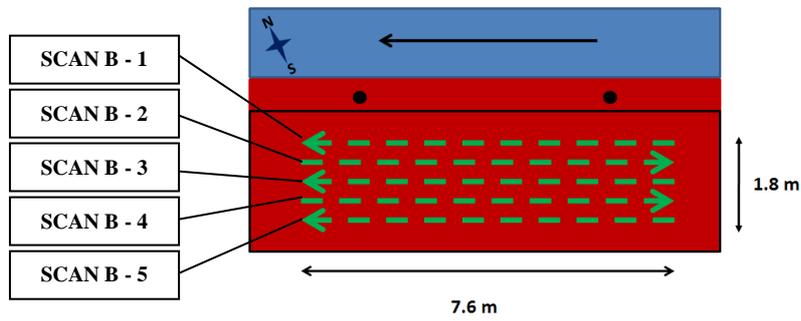
*Figura 7.15 a e b: Foto del rilievo in banchina; Scansione GPR nel sito 1 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori.*



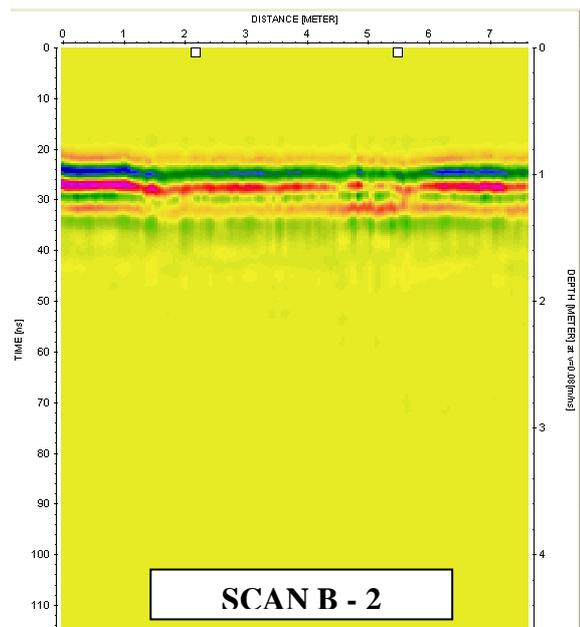
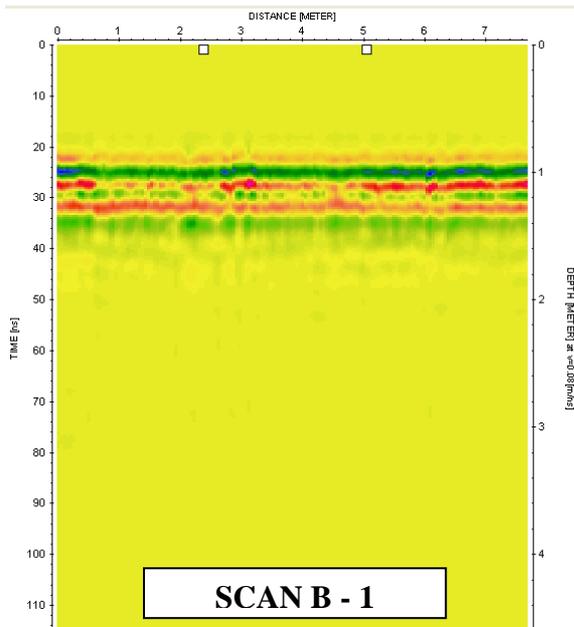
*Figura 7.16: Scansione GPR nel sito 1 – La freccia a sinistra indica le riflessioni dovute alla presenza del collettore, quella a destra una cavità, in questo caso è evidente la presenza di una multipla.*

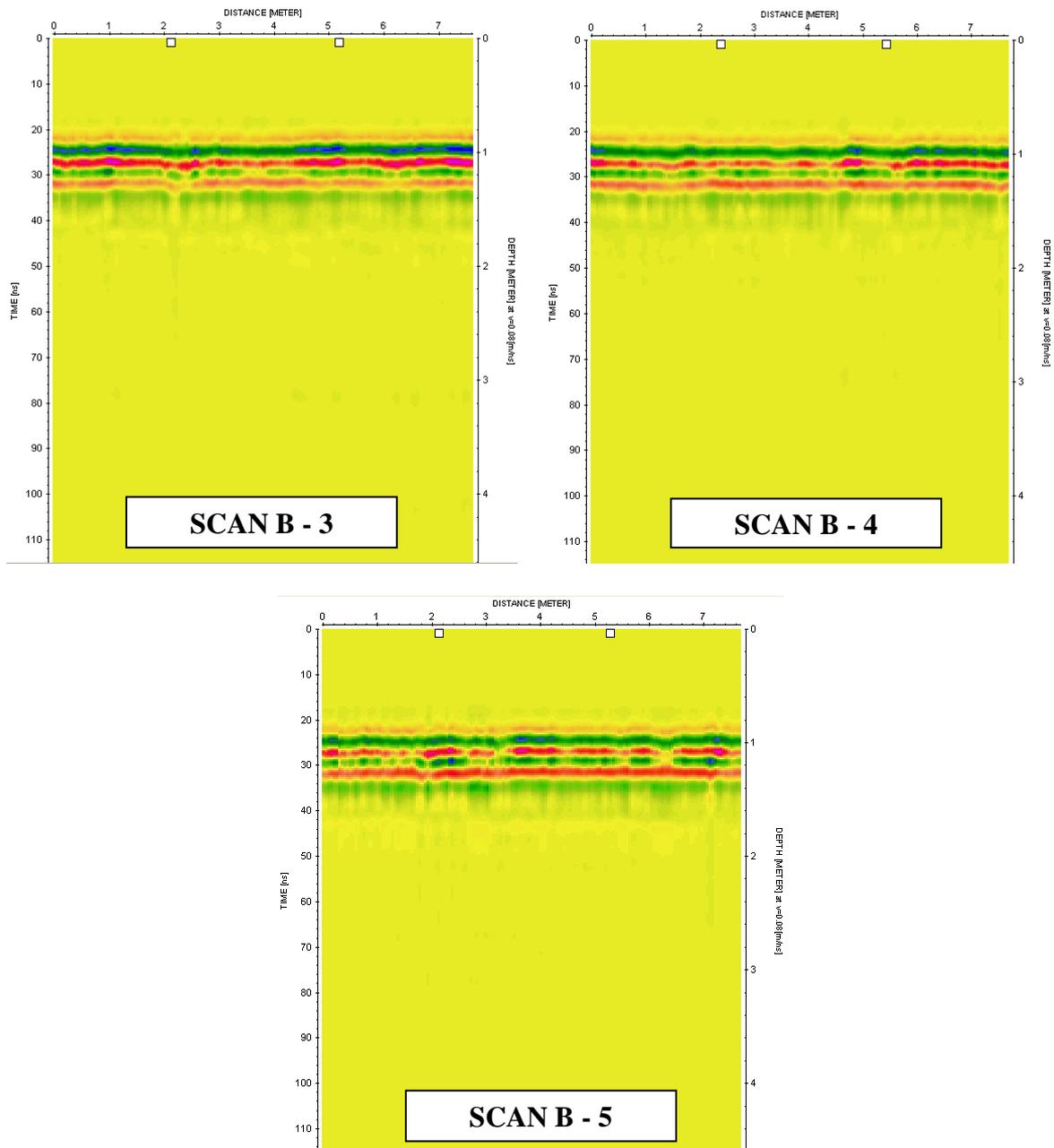


**Figura 7.17 a e b:** Foto e Scansione GPR nel sito 2 – Rilevamento cavità realizzate da animali scavatori. a) Il radargramma grezzo non mostra evidenze di una possibile cavità. Nella finestra viene mostrato un dettaglio in cui è stato applicato un guadagno lineare che mette alla luce una riflessione iperbolica attribuibile ad una cavità. b) In questo caso anche dopo il processamento non si evidenzia nessun segno particolare. L'unica evidenza riscontrata è la presenza di un'interruzione all'interno di uno strato continuo.

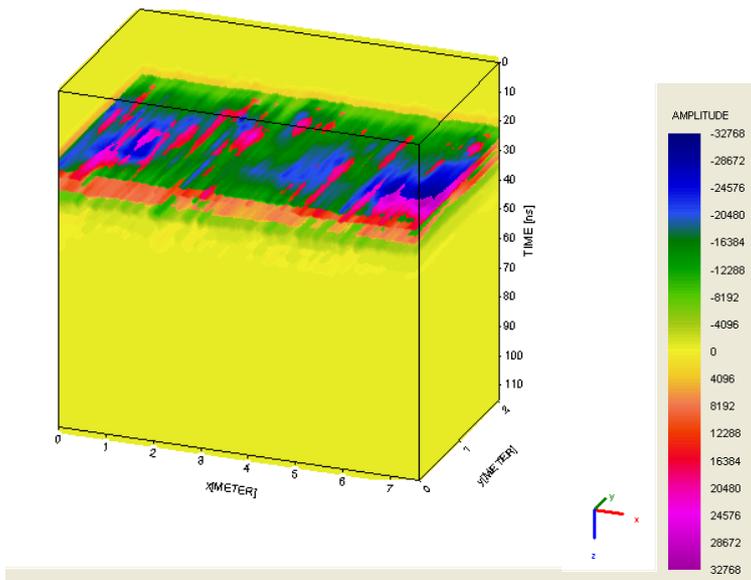


*Figura 7.18: Foto del rilievo in fase esecuzione in cui vengono indicate con le frecce in rosso le due cavità (Sito 2). Immagine del rilievo effettuato in modalità meandering, mantenendo un'interdistanza tra le linee di 0.45 m.*

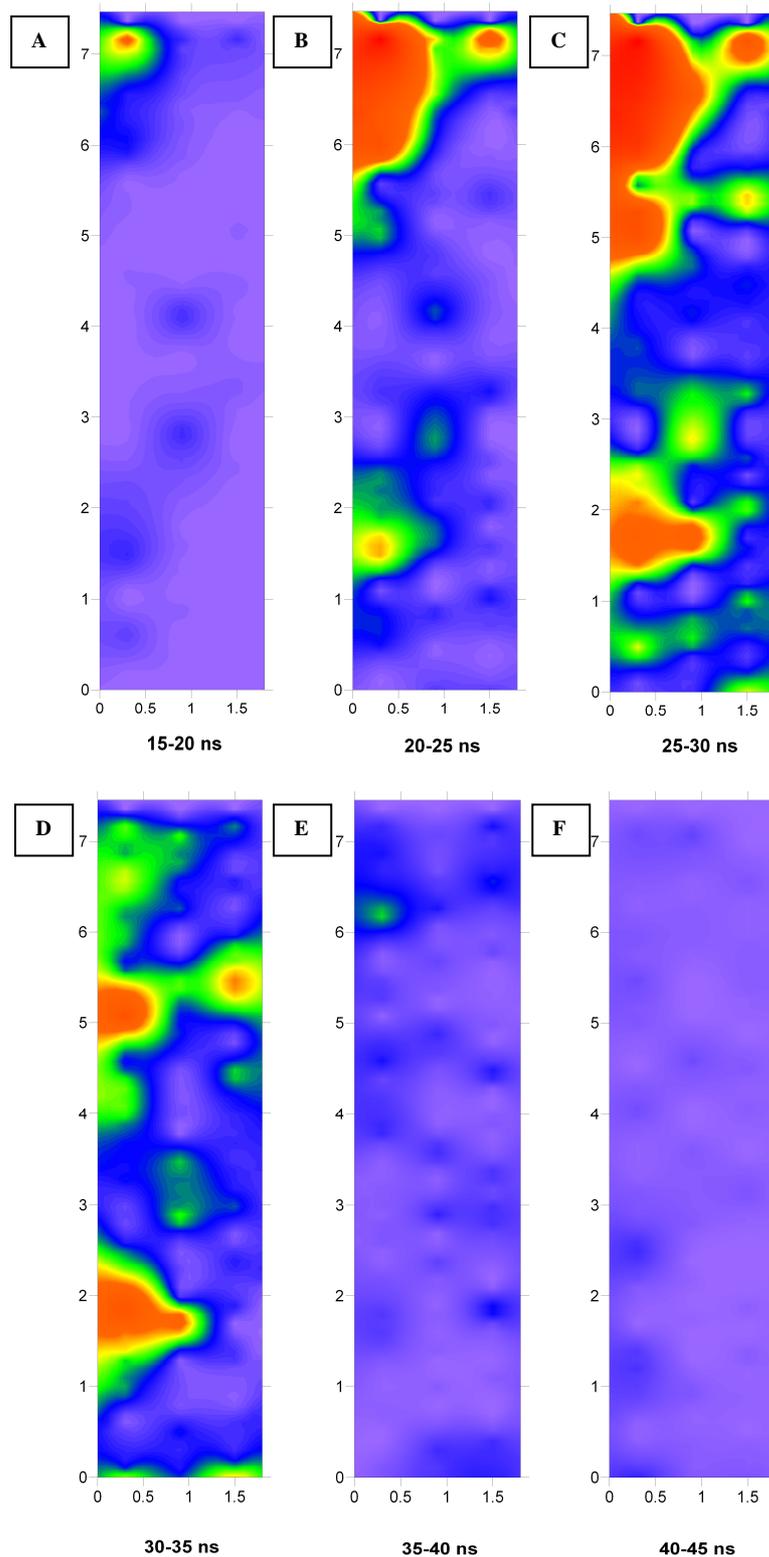




*Figura 7.19: 5 Scansioni GPR nel sito2: rilievo in modalit  meandering.*



*Figura 7.20: Modello 3D ottenuto interpolando le 5 scansioni.*



**Figura 7.21:** Time slices ottenute dai rilievi nel sito 2 – Rilievo realizzato secondo linee parallele in modalità meandering. In ascissa è riportata la distanza  $y$  e in ordinata la distanza  $x$  (vedi 3D – Figura 7.20). Le figure sono ordinate secondo profondità crescenti. Da queste sezioni si può ipotizzare la conformazione delle cavità all'interno del volume scansionato: le cavità investigate risultano ad una profondità di  $0.64 \div 1.2$  m, mentre a profondità maggiori e minori il segnale si annulla. Dalla figura C risulta evidente che la tana non è rettilinea, bensì si suddivide in due cavità minori. La velocità di propagazione in questo sito è di  $0.064$  m/ns. A) Profondità da  $0.48 \div 0.64$  m; B) Profondità da  $0.64 \div 0.8$  m; C) Profondità di  $0.8 \div 0.96$  m; D) Profondità di  $0.96 \div 1.12$  m; E) Profondità di  $1.12 \div 1.28$  m; F) Profondità di  $1.28 \div 1.44$  m.

## 7.7 Discussione

Il GPR si dimostra un metodo con buone potenzialità per il rilevamento delle cavità realizzate da animali nei pressi di corsi d'acqua o all'interno di manufatti arginali. Occorre però disporre dell'antenna dotata di parametri caratteristici in grado di garantire una sufficiente qualità del segnale al ricevitore.

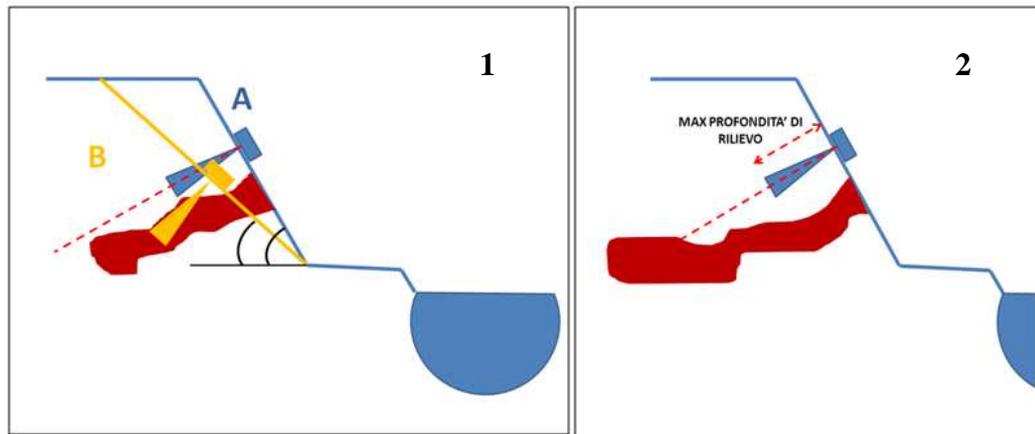
Durante i rilevamenti si sono riscontrati alcuni fattori che hanno interferito con l'indagine.

Uno dei fattori principali è legato alle condizioni meteorologiche. Il perdurare di piogge intense ha reso il terreno molto umido, infatti come già evidenziato, la presenza di acqua attenua l'energia e diminuisce sensibilmente la profondità di investigazione e la qualità dei dati raccolti. Perciò si raccomanda di programmare misure in periodi tendenzialmente poco piovosi, per ottenere i risultati più soddisfacenti.

L'altro fattore che ha influenzato sulle performance delle indagini è la presenza di materiale argilloso. Purtroppo questo non è un fattore controllabile, visto che molto spesso gli argini sono costituiti da una frazione argillosa significativa. Essendo l'argilla un terreno molto conduttivo ed essendo la conduttività direttamente proporzionale all'attenuazione del segnale, si verifica anche in questo caso una perdita di qualità della misura (vedi Capitolo 1 – Paragrafo 1.6.2). Infine affinché si possano realizzare delle buone scansioni GPR è necessario che gli argini siano mantenuti costantemente puliti. La presenza di vegetazione non solo contribuisce ad attenuare l'energia del segnale, ma soprattutto impedisce il corretto funzionamento del ruotino al quale è collegato l'odometro. Come effetto di ciò si ha un errore nella scala orizzontale delle scansioni.

Le scansioni effettuate sul lato inclinato della sponda non hanno restituito dei buoni risultati. Le ipotesi per spiegare ciò sono due:

- Vista la forte pendenza della sponda, il raggio d'emissione dell'antenna non ha intercettato la cavità (Figura 7.18 - 1);
- La geometria della tana è tale per cui, anche se essa interseca l'asse del cono d'emissione dell'antenna, la profondità di intersezione tra le due è maggiore della massima distanza di rilevamento dello strumento (Figura 7.18 - 2).



**Figura 7.18:** Schematizzazione delle probabili cause della non riuscita delle scansioni sul lato inclinato della sponda.

D'altra parte si riportano alcuni grandi vantaggi di questa tecnica:

- la facilità di esecuzione della misura;
- la caratteristica di realizzare dei rilievi senza alterare il normale esercizio del corso d'acqua;
- la possibilità di vedere in tempo reale i dati e quindi notare le eventuali disomogeneità rilevate. Nel nostro caso, sono state identificate delle tane non note (Figura 7.19). Tuttavia ciò non è sempre facile, è necessario avere una grande esperienza e saper interpretare in maniera corretta le informazioni ottenute;



**Figura 7.19:** Caso di rilevamento di una tana in posizione non nota.

- dal modello in 3D si possono ottenere delle ottime informazioni sulla conformazione interna della cavità indagata.

In conclusione, l'idea di utilizzare il GPR per effettuare delle scansioni in continuo lungo chilometri di argini sembra un obiettivo ancora troppo ambizioso. Si ritiene molto più sensata un'applicazione localizzata in siti in cui sia stata preventivamente individuata la presenza di una disomogeneità a piccola scala, come può essere una tana di qualche animale, e della quale si vogliono ottenere delle informazioni più dettagliate relativamente al suo sviluppo all'interno dell'opera.

## *Discussione e sviluppi futuri*

Il dominio spaziale investigabile con il GPR interessa una piccolissima porzione della crosta terrestre che, però, riveste un ruolo di primaria importanza per il nostro pianeta. La civiltà umana e tutta la vita sulla Terra sono fortemente dipendenti da questo sottile, ma ricco strato di terreno, dal quale ci aspettiamo di essere provvisti di cibo, oggi e nel prossimo futuro. L'uomo è abituato a pretendere molto da tale strato, depositando al suo interno scorie derivanti dalle proprie attività, sfruttandolo per filtrare l'acqua potabile e come supporto per le proprie opere civili.

La conoscenza delle proprietà chimico-fisiche del suolo può essere ottenuta mediante metodi di indagine diretta, i quali restituiscono informazioni puntuali del terreno esaminato, ma essi non sono sempre esaurienti nel caso in cui si vogliono investigare aspetti relativi al suolo nella sua continuità. Il Ground Penetrating Radar, invece, è una recente tecnologia di indagine indiretta del suolo e sottosuolo che consente di ottenere un'immagine del terreno nella sua continuità.

La fase di raccolta dati, lo schema del rilievo e l'oggetto da investigare sono le componenti più importanti per la riuscita di un'indagine. Prima di intraprendere una campagna di misura GPR è necessario avere le idee chiare sulle dimensioni dell'area da investigare, sulla natura dell'oggetto, la profondità e il livello di risoluzione da ottenere, nonché sulla condizione del suolo che è un fattore determinante nella riuscita della misura.

Vantaggi dei recenti sistemi GPR sono la praticità del sistema ad operare nelle più svariate ed estreme condizioni e la possibilità di vedere in tempo reale la registrazione sul display portatile, consentendo una valutazione preliminare della qualità delle registrazioni in campo. Tuttavia per interpretare in maniera corretta i dati in campo è necessario avere una notevole esperienza. È sempre possibile inoltre georeferenziare i dati raccolti, esistono infatti dei GPR dotati di un sistema GPS incorporato (Global Positioning System) che può registrare in maniera continua le coordinate dei punti del rilievo.

L'oggetto di questo lavoro è la verifica dell'applicabilità e dell'efficacia del GPR per identificare la presenza di cavità scavate da animali all'interno di manufatti arginali. In particolare, sono stati messi in luce soprattutto i limiti e le potenzialità di questa tecnica rispetto alle diverse condizioni ambientali nelle quali ci si trova ad operare e al grado di risoluzione del problema.

Alcune campagne di misura sono state effettuate sugli argini dei Canali del Comprensorio di Pianura della Bonifica Renana, nel Comune di Baricella.

Si è deciso di procedere concentrando le misure in siti in cui era ben nota la presenza di alcune tane.

Lo strumento utilizzato è un RAMAC/GPR, MALA Geosciences Co, prodotto in Svezia, dotato di un'antenna da 250 MHz, preso in prestito dalla Facoltà di Agraria, DISTA (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali).

Durante i rilevamenti si sono riscontrati i seguenti fattori che hanno compromesso, in parte, la qualità dei dati raccolti:

- l'alto contenuto idrico del terreno dovuto alle abbondanti piogge del periodo;
- la presenza di materiale argilloso altamente conduttivo;
- le cattive condizioni di manutenzione degli argini;
- la grande variabilità della forma, dimensione e posizione delle tane.

I rilievi sul lato inclinato della sponda non hanno restituito dei buoni risultati; si ritiene più appropriato eseguire delle scansioni sulla testa dell'argine.

D'altra parte si riportano alcuni grandi vantaggi di questa tecnica:

- la facilità di esecuzione della misura;
- la caratteristica di realizzare dei rilievi senza alterare il normale esercizio del corso d'acqua;
- la possibilità di vedere in tempo reale i dati e quindi notare le eventuali disomogeneità rilevate;
- informazioni molto dettagliate sulla conformazione interna della cavità indagata possono essere ottenute da una modellazione in 3D.

Alla luce di queste considerazioni si ritiene il GPR un metodo con buone potenzialità per il rilevamento delle cavità realizzate da animali nei pressi di corsi d'acqua o all'interno di manufatti arginali. Occorre però disporre dell'antenna dotata di parametri caratteristici in grado di garantire una sufficiente qualità del segnale al ricevitore.

Il Georadar è finora l'unico metodo geofisico, non invasivo, che può efficacemente essere impiegato per questo tipo di applicazioni. Tuttavia sono necessari altri test per poter dare un giudizio definitivo sulle potenzialità di questo strumento nel monitoraggio strutturale dei rilevati arginali.

## ***Bibliografia***

- [1] **Daniels, D. J.:** *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, IET.
- [2] **Ni, Sheng.Huoo, Chen, Ching-Kuan and Lin, Hong-Ming** (2002): *Application of Ground Penetrating Radar on the void-detection in levee* (Proceeding of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference).
- [3] **Beres, M. Jr and Haeni, F.P.** (1991): *Application of Ground Penetrating Radar Methods in Hydrogeologic Studies* (Ground Water, Vol. 29, n. 3, PP 375-386).
- [4] **Davis, J.L. and Annan, A.P.:** *Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy* (Geophysical Prospecting, Vol. 37, n. 5, PP 531-551).
- [5] [www.gpradar.it](http://www.gpradar.it)
- [6] **Mellet, J. S.** (1995): *GPR applications in engineering, environmental management and geology* (Applied Geophysics, Vol. 33, PP 157 - 166).
- [7] [www.malags.com](http://www.malags.com)
- [8] **Wyatt and Temples** (1996): *Ground Penetrating Radar detection of small-scale channels, joints and faults in the unconsolidated sediments of the Atlantic Coastal Plain* (Environmental Geology, Vol. 27, n. 3, PP 219-225).
- [9] **Carlsten S., Johansson S., Wörman A.** (1994): *Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams* (Applied Geophysics, Vol. 33, PP 157 - 166).
- [10] *Indagini GPR per l'individuazione della superficie piezometrica in alcune aree campione della pianura emiliana. Standardizzazione della metodologia per la pianificazione di un utilizzo a scala più vasta.* Regione Emilia-Romagna.
- [11] **Conyers L. B.** (2004): *Ground-penetrating radar system technology for Archeology*. Altamira Press, Walnut Creek, California.

[12] **Szynkiewicz A.** (2000): *GPR monitoring of earthen flood banks/levees*. Proceeding SPIE, Vol. 4084, 85.

[13] **Biavati G., Ghirotti M., Mazzini E., Mori G., Todini E.**(2008): *The use of GPR for the detection of non-homogeneities in the Reno River embankments (North-Eastern Italy).*, in: , 4th Canadian Conference on Geohazards: from Causes to Management, ALLISTON, ONTARIO, Canadian Geotechnical Society, 2008, pp. 1 - 9 (atti di: 4th Canadian Conference on Geohazards: from Causes to Management, Université Laval, Québec, Canada, 20-24 Mai 2008) [atti di convegno-relazione].

[14] **Morris, M.** (2005): *Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty*, Project IMPACT, Final Technical Report.

[15] **Gianinetto M., Lualdi M., Lechi, G.** (2001): *Indagini non distruttive per la diagnostica delle vie d'acqua in esercizio. possibili sviluppi sperimentali con tecniche di Telerilevamento da aereo e Georadar*. International Conference "Water and Irrigation Development". 25-27 September 2001, Cremona, Italy.

[16] **Md. Nazrul Islam:** *Embankment erosion control: Towards cheap and simple practical solutions for Bangladesh*. Coastal Embankment Rehabilitation Project - South Khulshi, Chittagong, Bangladesh.

[17] [www.fema.gov/hazards/damsafety](http://www.fema.gov/hazards/damsafety)

[18] **Adami A.** (1997): *Criteri generali di progetto di un argine*. La difesa idraulica del territorio, a cura di U. Maione e A. Brath, Editoriale Bios, Cosenza, PP 99-106.

[19] **Covelli C., Cozzolino L., Pianese D.** (2006): *Sulle cause idrauliche di innesco dei fenomeni di instabilità dei rilevati arginali*, XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA 2006.

[20] **Mazzini E., Simoni G.**,(2008): *Relazione Descrittiva: Evento di Piena del 20 maggio 2008 del Torrente Samoggia*. Regione Emilia-Romagna - Servizio Tecnico Bacino Reno.

[21] **Mazzini E., Simoni G.**,(2008): *Relazione Geologica e Geotecnica: Evento di Piena del 20 maggio 2008 del Torrente Samoggia*. Regione Emilia-Romagna - Servizio Tecnico Bacino Reno.

[22] [www.drcitalia.com](http://www.drcitalia.com)

[23] **Vianello G., Gaspari N., Gherardi M., Piana S., Rossi Pisa P., Simoni A., Bittelli M., Ventura F., Veronesi F., Antisari L.V., Zamboni N.** (2006): *Interventi per il ripristino ambientale dell'area Ex Fornace di Via Fiesso, Castenaso, BO. Caratterizzazione preliminare agli interventi di bonifica*. Centro Sperimentale per lo Studio e l'Analisi del Suolo (CSSAS), DISTA, Università di Bologna.

[24] **Bittelli M.**, *Appunti di Fisica del Suolo*.

[25] **Jol H. M. & Bristow C. S.** (2003): *GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide*. Geological Society. London, Special Publications, 211, PP 9-27.

[26] [www.georadar.it](http://www.georadar.it)

### **Software utilizzati:**

**Reflexw 5.0** Sandmeier Scientific Software 2007.

**GPR Process** Lawrence B. Conyers e Jeffrey Lucius.

**Surfer Ver. 8.**

