



*Progetto:*

Tech-Levee-Watch  
Integrated technologies for diagnostic and monitoring of levees and  
flood prevention

*Titolo:*

**Rilievo geofisico dello stato di consistenza di rilevati arginali in  
località Mazzorno Sinistro (RO)**

*Autori:*

Università di Parma  
M.P Caporicci, R. Francese

*Data:*

Maggio, 2018



## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. UBICAZIONE INDAGINI.....</b>	<b>3</b>
2.1 UBICAZIONE TOMOGRAFIE DI RESISTIVITÀ ELETTRICA .....	3
2.2 LINEE DI ACQUISIZIONE FDEM .....	5
2.3 MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DATI .....	6
<b>3. STRUMENTAZIONE .....</b>	<b>6</b>
3.1 INDAGINI GEOELETTRICHE .....	6
3.2 INDAGINI ELETTROMAGNETICHE .....	7
<b>4. ELABORAZIONE DEI DATI .....</b>	<b>8</b>
4.1 ERT .....	8
4.2 FDEM.....	8
<b>5. RISULTATI E NOTE INTERPRETATIVE .....</b>	<b>8</b>
5.1 ERT 1 PROFILO LONGITUDINALE SOMMITÀ ARGINE .....	8
5.2 ERT 2 PROFILO LONGITUDINALE BASE ARGINE .....	9
5.3 ERT 3 PROFILO TRASVERSALE .....	10
5.4 FDEM.....	11
<b>APPENDICE 1: METODI DI INDAGINE .....</b>	<b>14</b>
TOMOGRAFIA ELETTRICA DI RESISTIVITÀ.....	14
INDUZIONE ELETTROMAGNETICA NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA (FDEM FREQUENCY-DOMAIN ELECTROMAGNETIC) .....	14

### **ALLEGATO 1 Foto**

### **ALLEGATO 2 Risultati FDEM**

## **1. PREMESSA**

Nell'ambito del progetto CARIPLO, nel mese di Marzo 2018, è stata eseguita un'indagine geofisica con tecniche elettriche ed elettromagnetiche lungo un tratto dell'argine sinistro del fiume Po in località Mazzorno Sinistro, frazione del Comune di Adria (RO).

Nello specifico sono stati realizzati n. 4 stendimenti di tomografia di resistività (ERT) dei quali tre disposti longitudinalmente rispetto all'argine, lungo la base e il coronamento, e uno disposto trasversalmente. Sono poi state acquisite una serie di linee ad induzione elettromagnetica (FDEM) lungo banche e sommità arginale.

L'ubicazione è stata concordata con l'ufficio operativo di Rovigo dell'Agenzia Interregionale per il fiume Po e riguarda due zone soggette a fontanazzi durante gli eventi di piena. Nel caso di Mazzorno Sinistro i fontanazzi hanno arrecato danni ad alcune abitazioni private, gli edifici hanno subito delle lesioni per cedimento indotto dalle infiltrazioni di acqua al di sotto delle fondazioni (Figura 1).



**Figura 1. Cedimento di parte dell'edificio ubicato alla base dell'argine.**

Scopo specifico dell'indagine è quello di ricostruire l'assetto stratigrafico dell'argine e del sottosuolo alla base dello stesso al fine di fornire un contributo per l'individuazione di aree nel sottosuolo suscettibili ad eventuali fenomeni del sifonamento. Le indagini geoelettriche ed elettromagnetiche in tal senso risultano particolarmente utili in quanto la resistività/conducibilità di un terreno può considerarsi, in prima approssimazione, proporzionale alla tessitura e quindi alla permeabilità del sedime.

## **2. UBICAZIONE INDAGINI**

### **2.1 UBICAZIONE TOMOGRAFIE DI RESISTIVITÀ ELETTRICA**

La scelta dell'ubicazione e la lunghezza dei profili è stata effettuata in base a considerazioni geologico-logistiche. La distanza elettrodica di 5 m è stata scelta per raggiungere una profondità significativa per lo

scopo dell'indagine, circa 15-20 m dal piano di indagine, in modo tale da riuscire ad investigare il corpo arginale e parte del sottosuolo posto al di sotto dell'argine stesso.

Per gli stendimenti longitudinali gli elettrodi sono stati disposti in ordine da NE a SW, mentre per lo stendimento trasversale gli elettrodi sono disposti da N- NW a S-SE.

Nello specifico sono state eseguite le seguenti indagini (Figura 2):

- due profili geoelettrici lungo il coronamento arginale con 48 elettrodi con una sequenza di *roll along* di 24 elettrodi spaziatati di 5 m per una lunghezza complessiva di 350 m (ERT1 + ERT1 roll24);
- un profilo lungo la base dell'argine realizzato anche questo con 48 elettrodi spaziatati di 5 m per una lunghezza complessiva di 235 m (ERT2);
- un profilo ortogonale all'argine realizzato all'altezza della progressiva 65 m del profilo longitudinale posto sulla sommità dell'argine. Lo stendimento è stato realizzato con 48 elettrodi spaziatati di 5 m con lunghezza complessiva di 240 m (ERT3).

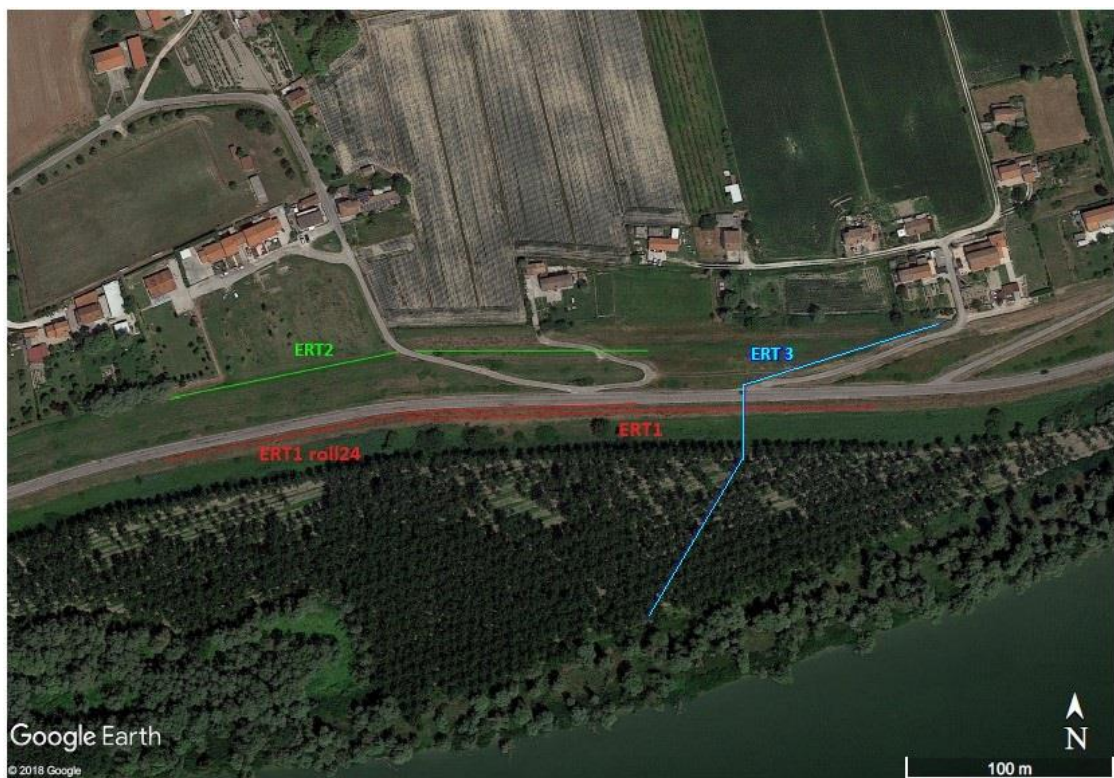


Figura 2. Ubicazione delle Tomografie di Resistività Elettrica (ERT). Immagine tratta da Google Earth, 2018.

## **2.2 LINEE DI ACQUISIZIONE FDEM**

Quasi in concomitanza con le misure ERT sono state effettuate misure elettromagnetiche FDEM mediante l'utilizzo di strumentazione Dualem 642, che consente di effettuare simultaneamente misure con diverse spaziature. Lo strumento si compone di 6 bobine riceventi poste con diverse geometrie e distanze (6m, 4m, 2m) dalla bobina trasmittente.

Trascinando lo strumento con un fuoristrada, sono state percorse la seconda banca e la base dell'argine da ovest verso est, la prima banca (la più bassa) e la sommità dell'argine da est verso ovest, in base alle condizioni di percorribilità (Figura 3).



**Figura 3. Ubicazione acquisizione FDEM. Immagine tratta da Google Earth, 2018.**

## **2.3 MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DATI**

Sono stati realizzati n. 4 profili di resistività con tomografia elettrica a 48 elettrodi, aventi tutti interasse tra gli elettrodi di 5 m.

La configurazione elettrodica utilizzata per l'acquisizione è la Wenner in quanto consente una buona discriminazione delle variazioni verticali di resistività. La profondità di investigazione che è possibile raggiungere con il dispositivo Wenner è pari a circa 1/6 della lunghezza totale dello stendimento ed è risultata adeguata per lo scopo dell'indagine.

Per quanto riguarda i dati elettromagnetici, per investigare l'intero corpo arginale alto 8 m e parte della base è stato necessario utilizzare tutti e tre i componenti tubolari del Dualem, in modo tale da generare un campo elettromagnetico esteso anche al di sotto dell'argine e avere una capacità di esplorazione del sottosuolo simultanea a 1, 2, 3, 6 e 10 m dal p.c.

La bobina trasmittente lavora a 9KHz e le 3 coppie di bobine riceventi (Rx) sono spaziate di 2, 4 e 6 m rispettivamente dalla trasmittente (Tx).

Usando questa configurazione lo strumento è in grado di effettuare 6 misure ogni secondo. Per l'acquisizione dei dati lo strumento è stato trascinato mediante un fuoristrada lungo parte della prima e della seconda banca, lungo base argine ed infine in sommità arginale.

Per prevenire una influenza sulle misure elettromagnetiche da parte di oggetti metallici lo strumento è stato montato su appositi carrelli completamente amagnetici e privi di parti metalliche.

Inoltre, è stato necessario utilizzare un'asta di traino, lunga circa 6.5 m per evitare che le parti metalliche del mezzo di trasporto (che aveva comunque la carrozzeria in alluminio) interferissero sul campo misurato dai sensori.

## **3. STRUMENTAZIONE**

### **3.1 INDAGINI GEOELETTRICHE**

La strumentazione impiegata per l'esecuzione dei profili ERT consiste in un georesistivimetro IRIS Syscal R1 a 48 elettrodi e 2 canali simultanei di lettura della differenza di potenziale (Figura 4).

Questo georesistivimetro integra un'unità di energizzazione (capace di una tensione massima di 600 V), una matrice di commutazione per l'indirizzamento dei quadrupoli elettrodici e canali di lettura multipli per la misura delle tensioni e delle correnti.

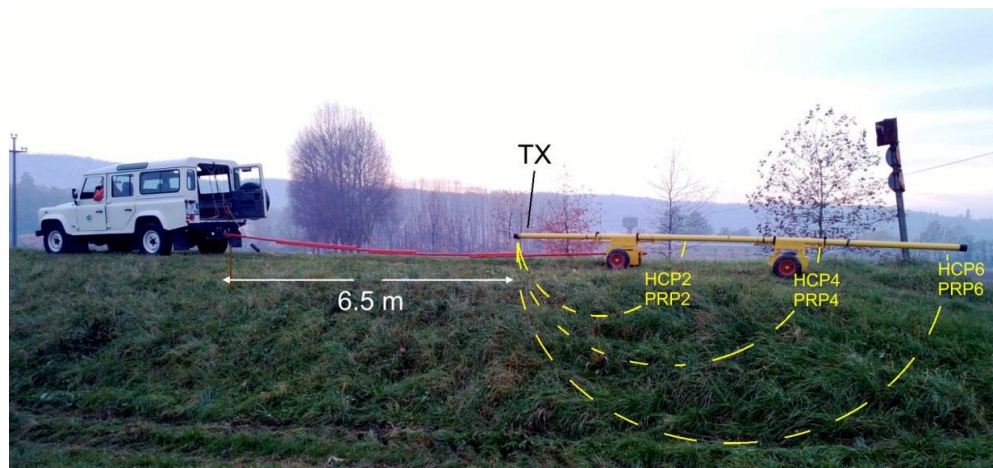


**Figura 4.** Georesistivimetro IRIS Syscal R1.

### **3.2 INDAGINI ELETTROMAGNETICHE**

Per l'acquisizione di dati elettromagnetici è stato utilizzato il DualEM (Figura 5), uno strumento modulare che consente di effettuare misure EM FDEM fino a circa 9 metri di profondità dal p.c.

I sensori sono contenuti all'interno di una struttura tubolare al cui interno sono collocate una bobina trasmittente (Tx) e 6 bobine riceventi (Rx). La Tx è collocata in uno degli estremi ed è posta in modo orizzontale, le bobine riceventi sono disposte in coppia a una distanza di 2, 4 e 6 metri dalla bobina trasmittente. Per ogni coppia un ricevitore è posizionato in modo parallelo alla Tx e uno in modo perpendicolare al trasmettitore. Essendo uno strumento modulare si possono scegliere diverse configurazioni tra corta, media o lunga in funzione della profondità di esplorazione, quindi si ha la possibilità di utilizzare fino ad un massimo di tre coppie di ricevitori posti a distanza e disposizione dipolare variabile rispetto al trasmettitore.



**Figura 5.** DUALEM: bobine riceventi con geometria orizzontale complanare (HCP) e geometria perpendicolare (PRP) poste a diverse distanze.

## **4. ELABORAZIONE DEI DATI**

### **4.1 ERT**

L'elaborazione delle tomografie elettriche è stata effettuata con software dedicato (ERTLAB3D) che permette di invertire le pseudosezioni, costruite sulla base dei valori di resistività apparente misurati, in sezioni riportanti i valori di resistività reale dei diversi materiali presenti nel sottosuolo.

L'elaborazione si sviluppa partendo dalla valutazione statistica della congruenza delle singole misure tramite verifica dello scostamento medio rispetto alle misure più prossime. Il software permette di evidenziare ed eliminare le misure ritenute fuori media che invaliderebbero l'elaborazione finale.

Nell'indagine in oggetto questa procedura ha riguardato un numero estremamente esiguo di dati incongrui, pertanto rimossi, dando indicazione di buona qualità dei dati acquisiti.

Nella fase successiva l'elaborazione ha richiesto l'applicazione di parametri di inversione, ottimizzazione e *smoothing* specifici per la situazione geofisica/geologica riscontrata.

Sono state quindi ottenute le sezioni tomografiche rappresentanti la distribuzione della resistività reale nel terreno. Con una appropriata scala cromatica, sono stati evidenziati i principali cambiamenti di resistività reale.

Va ricordato che le sezioni interpretative mostrano una suddivisione elettro-stratigrafica ricostruita sul differente comportamento elettrico dei materiali investigati. È quindi possibile che il passaggio da una unità elettro-stratigrafica all'altra non corrisponda necessariamente ad un passaggio litologico netto.

### **4.2 FDEM**

I dati acquisiti sono stati invertiti mediante uno specifico *software* (EM4SOIL), usando un algoritmo di inversione smooth ed un modello di partenza omogeneo con conducibilità di 30 mS/m.

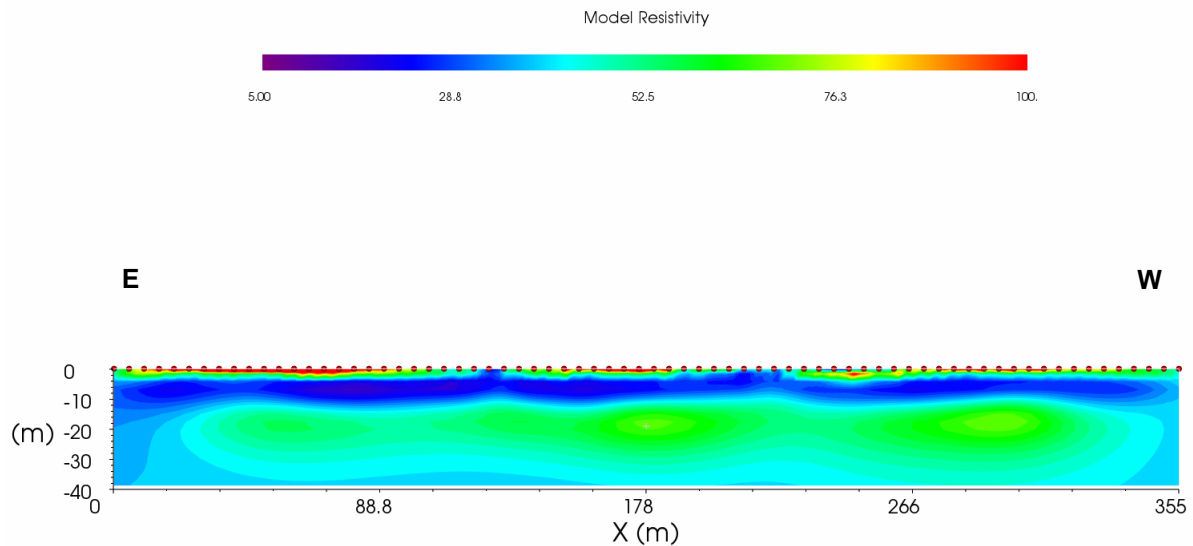
## **5. RISULTATI E NOTE INTERPRETATIVE**

### **5.1 ERT 1 PROFILO LONGITUDINALE SOMMITÀ ARGINE**

La tomografia mette chiaramente in evidenza la struttura del rilevato dell'argine (circa 8 m metri di altezza). Nello specifico, il terreno costituente l'argine mostra valori di resistività relativamente bassi e compresi tra i 15  $\Omega \cdot m$  e i 20  $\Omega \cdot m$  tipici di materiali prevalentemente coesivi (limi e limi argillosi).

Al di sotto dei terreni coesivi, quindi oltre gli 8 metri di profondità, si osserva un aumento dei valori di resistività fino a valori di 70-80  $\Omega \cdot m$ , caratteristici di terreni granulari fini (sabbie e sabbie limose).

Gli alti valori di resistività tra i 100-150  $\Omega \cdot m$  in alto a sinistra sono dovuti probabilmente alla presenza di materiali di riporto grossolani.



**Figura 6. Tomografia ERT 1, scala di resistività espressa in  $\Omega \cdot m$ .**

## **5.2 ERT 2 PROFILO LONGITUDINALE BASE ARGINE**

Il profilo in oggetto è stato realizzato longitudinalmente al rilevato arginale in corrispondenza della base (Figura 7). L'elaborazione mostra chiaramente una zona con alti valori di resistività prossimi ai  $90 \Omega \cdot m$  confermando la presenza di terreni granulari e permeabili alla base dell'argine.

Come indicato in precedenza la geometria dell'unità elettro-stratigrafica individuata non sono da considerarsi come veri e propri passaggi litologici, infatti in questo caso la bombatura del corpo sabbioso al centro della sezione è un artefatto tipico della configurazione Wenner, nella realtà il contatto è grosso modo piano-parallelo. Il risultato dell'inversione conferma comunque la presenza di un corpo a maggiore permeabilità posto a base dell'argine.

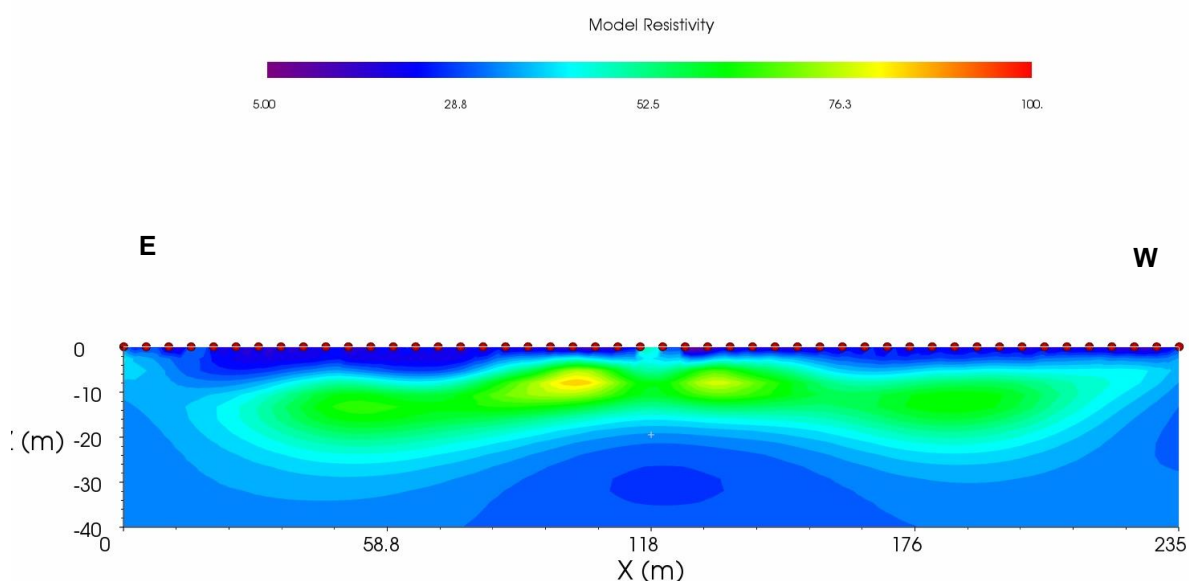


Figura 7. Tomografia ERT 2, scala di resistività espressa in  $\Omega \cdot m$ .

### 5.3 ERT 3 PROFILO TRASVERSALE

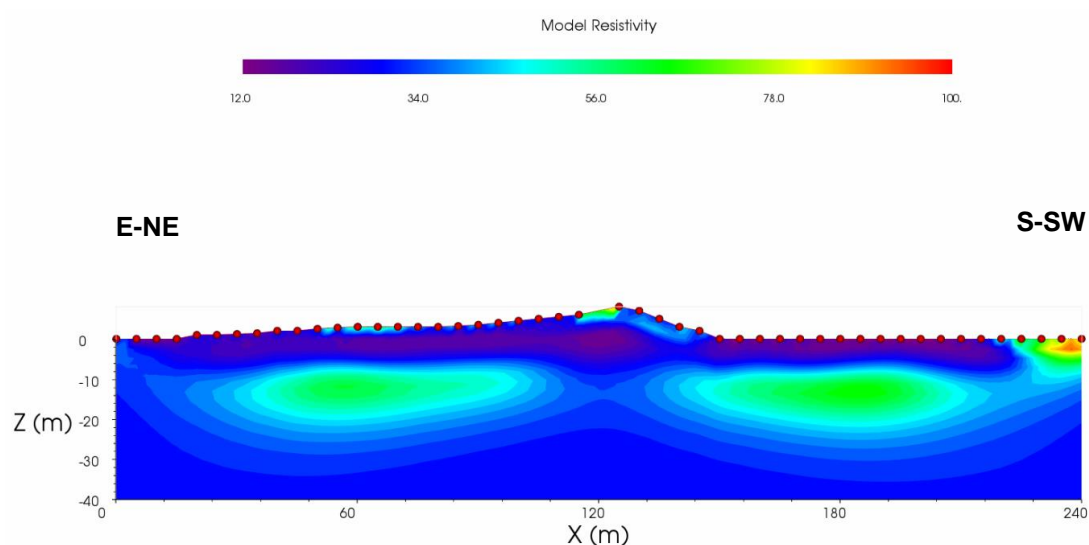
Il profilo in oggetto è stato realizzato ortogonalmente al profilo ERT 1 in corrispondenza della progressiva 65 m (Figura 8). La relativa tomografia evidenzia con maggior dettaglio la struttura dell'argine.

In particolare si osserva, nel rilevato, la presenza di terreni caratterizzati da valori di resistività di 50-60  $\Omega \cdot m$  tipici di miscele di materiali coesivi come limo e argilla.

Procedendo in profondità si osserva un livello caratterizzato da valori di resistività molto bassi, 15-20  $\Omega \cdot m$ , tipici di terreni argillosi, fino alla profondità di 8 m rispetto alla quota del culmine del rilevato.

Al di sotto dei 9 metri di profondità si osservano valori di resistività più alti, intorno a 70-80  $\Omega \cdot m$ , caratteristici di terreni prevalentemente granulari.

La lente di materiale granulare fine, posta a base argine è probabilmente continua lungo tutto il profilo ERT, ma, per effetto dell'utilizzo della configurazione elettroica Wenner, la parte centrale non è ben descritta nella sezione di inversione. L'integrazione delle misure Wenner con misure polo-dipolo avrebbe consentito di ottenere una maggiore risoluzione.



**Figura 8. Tomografia ERT 3, scala di resistività espressa in  $\Omega\cdot m$ .**

#### **5.4 FDEM**

Per quanto riguarda i dati acquisiti mediante metodo elettromagnetico (Allegato 2) si osservano valori di resistività nel complesso bassi e di circa  $10\text{-}15 \Omega\cdot m$  in corrispondenza del corpo arginale, costituito prevalentemente da terreni coesivi. In profondità si può osservare un aumento dei valori di resistività che nei profili acquisiti lungo la base e la banca più bassa raggiungono i  $70\text{-}80 \Omega\cdot m$  indicando la presenza di depositi granulari.

Il risultato delle inversioni dei profili FDEM mostra, quindi, valori di resistività elettrica del tutto confrontabili con i risultati dei profili ERT descritti in precedenza.

In particolare dal confronto tra i dati ERT e FDEM acquisiti alla base dell'argine (Figura 9) si vede molto bene il livello di terreni granulari. Nel dato FDEM il valore assoluto della resistività appare più alto rispetto al dato ERT e questo dipende dalla scelta della resistività nel modello iniziale.

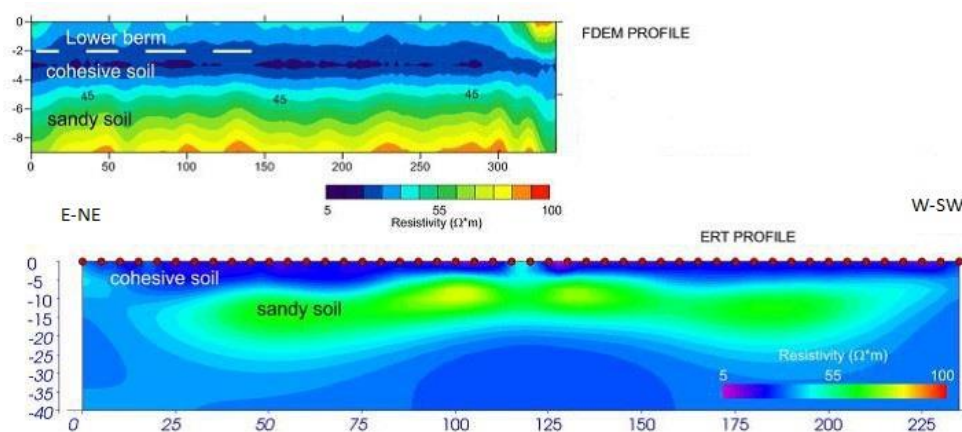


Figura 9. Confronto dati FDEM (profilo in alto) e ERT (in basso) acquisiti in corrispondenza della prima banca dell'argine.

Il risultato dell'inversione del profilo FDEM lungo la sommità arginale (Allegato 2) mostra un forte resistivo superficiale nella parte superiore dell'argine, risultato confermato anche dalla tomografia elettrica ERT 3 dove si nota una risalita dei valori di resistività nella parte sommitale dell'argine con valori superiori a  $50 \Omega \cdot m$ .

L'indagine eseguita con il metodo ERT e con il metodo FDEM ha consentito di definire le caratteristiche geofisiche del primo sottosuolo sino ad una profondità superiore ai 30 m dal piano di misura.

I risultati hanno evidenziato le caratteristiche stratigrafiche del sedime ed anche la struttura interna dell'argine.

I valori di resistività bassi individuati per il corpo arginale indicano la presenza di materiali con valori  $15-20 \Omega \cdot m$ , tipici di limi argillosi ed argille limose.

Al di sotto degli 8 m, quindi della base del rilevato arginale, i valori di resistività risalgono indicando la presenza di terreni sabbiosi fini e limo-sabbiosi aventi una distribuzione spaziale abbastanza continua lungo il tratto investigato. La chiusura a lente del livello resistivo nelle tomografie elettriche dipende dall'assenza di punti-misura al di sotto dei due estremi della stesa. Nella tomografia acquisita in *roll-along* lo strato resistivo non si chiude, come pure confermato dalle tomografie dinamiche FDEM.

Tali terreni sono correlabili con materiali sabbiosi con scarsa o assente matrice fine e potrebbero anche essere ascrivibili alla presenza di un paleoalveo al di sotto del corpo arginale che consente la filtrazione di acqua e la formazione di fontanazzi lato campagna durante gli eventi di piena.



**Figure 10 Palealveo. Foto Google Earth**

In Figura 10 sono visibili zone in cui il terreno mostra una diversa tessitura, soprattutto nella parte Nord. La linea rossa tratteggiata indica la probabile forma del paleoalveo che presumibilmente si estende anche al di sotto della base del rilevato arginale.

## **APPENDICE 1: METODI DI INDAGINE**

### **TOMOGRAFIA ELETTRICA DI RESISTIVITÀ**

La prospezione geoelettrica è un metodo di indagine geofisico che consente l'individuazione delle variazioni di resistività elettrica nel sottosuolo in funzione delle caratteristiche fisiche dei materiali attraversati, permettendo la definizione di unità elettro-stratigrafiche.

Il parametro resistività elettrica permette di discriminare le litologie presenti nel sottosuolo poiché dipende dalla porosità e dalla tessitura del terreno attraversato, oltre che dal grado di saturazione dei pori, dalla salinità del fluido presente nei pori e dalla temperatura.

L'indagine è realizzata disponendo secondo geometrie predefinite una serie di picchetti di acciaio infissi nel terreno e collegati tra loro con un cavo multi-elettrodico, a sua volta collegato allo strumento di acquisizione.

La corrente elettrica viene inviata nel mezzo da indagare tramite una coppia di elettrodi e la variazione di potenziale elettrico indotto viene misurato su tutte le altre coppie disponibili utilizzando una geometria del quadripolo che dipende dalla configurazione prescelta.

Si passa poi ad una seconda coppia di trasmissione e così via fino a raggiungere il numero massimo di misure disponibili. Un voltmetro collegato agli elettrodi di misura consente la determinazione della differenza di potenziale agli elettrodi. Misurando il potenziale si è in grado di determinare la resistività elettrica apparente del mezzo attraversato dal campo elettrico indotto.

La successiva elaborazione tomografica mediante software appositi consente stimare la distribuzione della resistività reale nel terreno tramite algoritmi di calcolo capaci di invertire i dati e minimizzare le differenze tra i modelli elaborati e i dati di partenza.

Di seguito si riportano a titolo orientativo alcuni valori medi più frequenti della resistività dei terreni sciolti da cui si evince come all'aumentare della granulometrica si abbia anche un aumento della resistività:

Sabbie e ghiaie asciutte non argillose >300

Sabbie e ghiaie non argillosi in falda 100-500

Limi sabbiosi in falda 30-100

Limi argillosi 20-50

Argille alluvionali o lacustri 5-20

Argille marine 1-10

### **INDUZIONE ELETTROMAGNETICA NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA (FDEM FREQUENCY-DOMAIN ELECTROMAGNETIC)**

Le esplorazioni elettromagnetiche sono finalizzate all'individuazione di zone caratterizzate da valori anomali di conduttività elettrica. Il metodo si basa sulle misurazioni di una o più componenti del campo elettromagnetico indotto nel terreno da un campo primario. Il campo primario, generato da una sorgente naturale o da una corrente alternata artificiale, si propaga nel terreno sottostante inducendo delle correnti

nel semispazio conduttore. A loro volta, le correnti così prodotte generano un campo secondario che distorce il campo primario e che, differendo in intensità, fase e direzione da quest'ultimo, indica la presenza di conduttori nel sottosuolo.

Il metodo elettromagnetico FDEM consiste nell'inviare nel sottosuolo attraverso una bobina trasmittente (Tx) un campo elettromagnetico primario, che induce una circolazione di corrente. Tale circolazione di corrente genera nel semispazio investigato un campo elettromagnetico, detto "secondario", la cui intensità è proporzionale alla conduttività elettrica del mezzo attraversato. Dal campo totale misurato alla bobina ricevente (Rx) si può ottenere il campo secondario dovuto alla variazione di corrente indotta.

A parità di campo elettromagnetico primario indotto nel sottosuolo, l'intensità del campo secondario sarà tanto più elevata quanto più alta sarà la conduttività del mezzo attraversato.

Del campo secondario sono considerate le componenti in quadratura e in fase rispetto al campo elettromagnetico trasmesso. La componente in quadratura fornisce una misura della conduttività apparente del terreno, mentre la componente in fase è sensibile agli oggetti metallici sotterranei.

La profondità di penetrazione del segnale dipende da vari fattori tra cui la conduttività del terreno, la distanza tra le bobine, la direzione del campo primario (direzione del dipolo trasmettitore) e la sua frequenza.

## **ALLEGATO 1**

### **Foto**

## ERT 1 sommità arginale



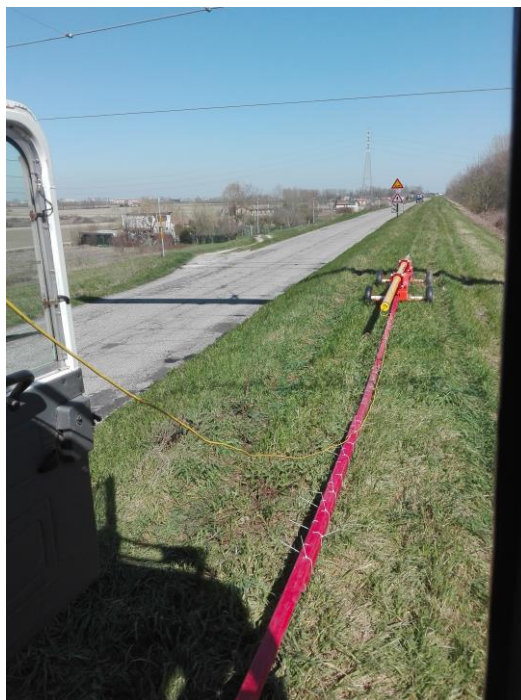
## ERT 2 base argine



### ERT 3 profilo trasversale

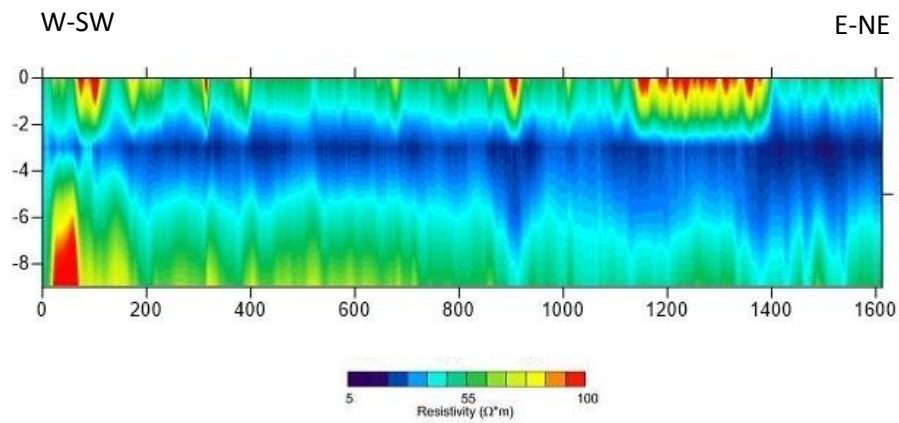


## Misure Dualem

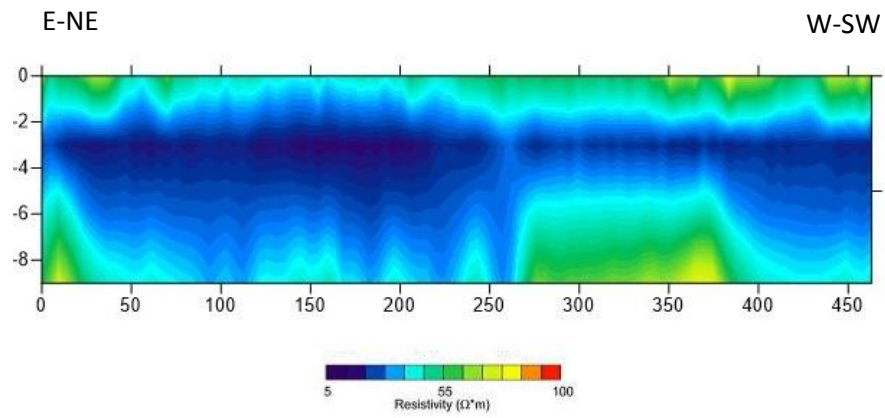


## **ALLEGATO 2**

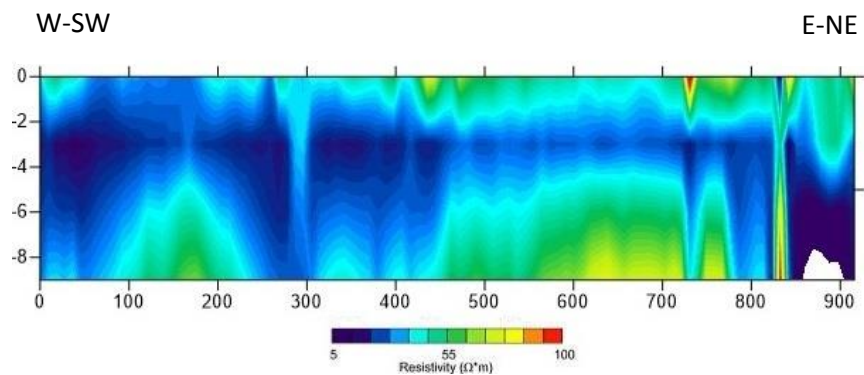
### **Risultati FDEM**



**Figura 1. Profilo FDEM 101. Acquisizione lungo la seconda banca dell'argine.**



**Figura 2. Profilo FDEM 102. Acquisizione lungo la banca più bassa dell'argine (prima banca).**



**Figur 3. Profilo FDEM 103. Acquisizione lungo parte della base e parte della prima banca dell'argine.**

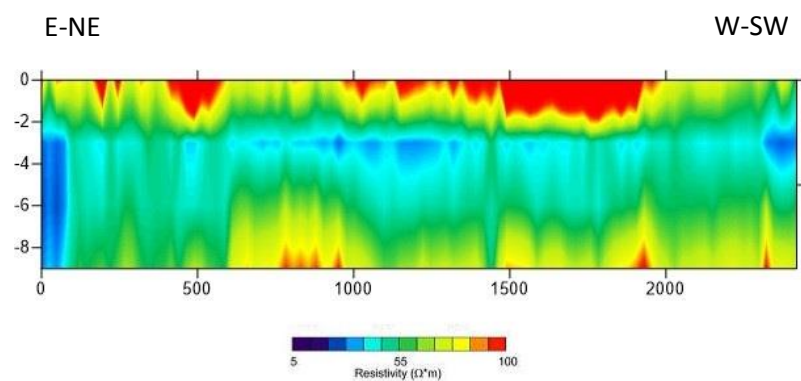


Figura 4. Profilo FDEM 104. Acquisizione lungo la sommità dell'argine.

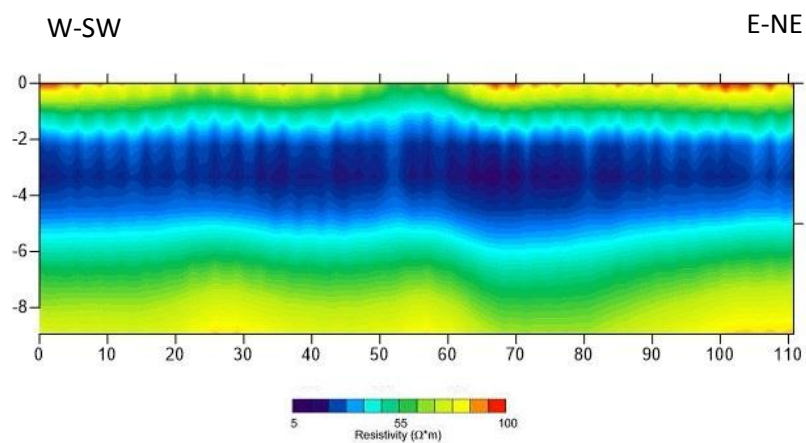


Figura 5. Profilo FDEM 105. Acquisizione lungo la banca più bassa dell'argine (prima banca).

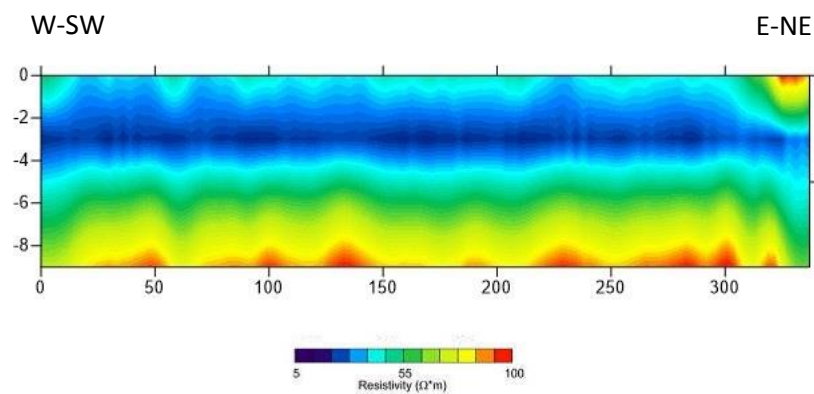


Figura 6. Profilo FDEM 106. Acquisizione lungo la banca più bassa dell'argine (prima banca).