



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**APPLICAZIONI DI TOMOGRAFIE ELETTRICHE DI
RESISTIVITÀ E TECNICHE DI POLARIZZAZIONE INDOTTA
PER IL MONITORAGGIO DI BONIFICHE AMBIENTALI**

**ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND INDUCED
POLARIZATION TECHNIQUES FOR MONITORING IN SITU
FAST-ACTING GROUNDWATER REMEDIATION**

Relatore: Prof. Giorgio Cassiani

Correlatore: Prof. Jacopo Boaga

Laureando: Federico Bertini

Matricola: 1132633

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Indice:

Lista delle figure	4
Lista delle tabelle	6
Introduzione.....	7
1. Descrizione sito e inquadramento geologico	8
2. Teoria e principi fisici dell'indagine geofisica	17
2.1 Scopi e vantaggi dell'indagine geofisica.....	17
2.2 Il metodo geoelettrico	21
2.3 Tomografia di resistività elettrica (ERT)	28
2.4 L'inversione del dato ERT	31
2.5 Approccio al time - lapse dei dati ERT	35
2.6 Polarizzazione indotta	36
3. Cenni sulla bonifica e sulla chimica dei contaminanti	46
3.1 Stato del sito	46
3.2 Natura chimica dei contaminanti e pericolosità	48
3.2 Bonifica del sito	49
4. Campionamento dati ed elaborazioni.....	57
4.1 Campagna d'indagine	57
4.2 Software per l'elaborazione dati	62
4.3 Risultati del monitoraggio geofisico	63
5. Conclusioni.....	74
6. Bibliografia.....	76

Lista delle figure:

Fig. 1 - Localizzazione del sito [Google Maps].....	9
Fig. 2 - Evoluzione del sito negli anni (1989, 2005, 2011, 2016) [Comune di Bologna].....	9
Fig. 3 - Foto del sito nel febbraio 2018.....	10
Fig. 4 - Contenitore del materiale prelevato tra i 0 e i 5 m.d.p.c. [Regenesis].	12
Fig. 5 - Contenitore del materiale prelevato tra i 5 e i 10 m.d.p.c. [Regenesis]. ..	12
Fig. 6 - Contenitore del materiale prelevato tra i 10 e i 15 m.d.p.c. [Regenesis].	13
Fig. 7 - Contenitore del materiale prelevato tra i 15 e i 20 m.d.p.c. [Regenesis].	13
Fig. 8 - Ricostruzione tridimensionale della colonna stratigrafica.	14
Fig. 9 - Ritaglio del foglio 221 con cerchiata l'area del sito interessato.....	16
Fig. 10 - Principio di misura della resistività elettrica tramite uno stendimento composto da quattro elettrodi [Busato L. et al. 2016].....	24
Fig. 11 - Principali schemi di acquisizione usati in geoelettrica [Binley & Kemna 2005].....	26
Fig. 12 - Georesistivimetro utilizzato per eseguire la tomografia elettrica.....	28
Fig. 13 - Come si produce una pseudosezione – dispositivo Dipolo-dipolo [Santarato et al. 2015].	29
Fig. 14 - Meccanismi principali della polarizzazione indotta [Santarato et al. 2015].....	39
Fig. 15 - Misura della polarizzazione indotta dal dominio del tempo [Binley & Kemna 2005].	40
Fig. 16 - Rappresentazione volume di sottosuolo polarizzabile e circuito elettrico equivalente.	43
Fig. 17 - Dettaglio del rapporto istruttorio presentato al comune di Bologna..	47

Fig. 18 - Struttura degli eteni clorurati descritti.....	48
Fig. 19 - Prove test in laboratorio con test in colonna.	51
Fig. 20 - Fasi della dechlorinazione riduttiva.....	52
Fig. 21 - Perforazione nel sito dei pozzetti [Regenesis].....	55
Fig. 22 - Impianto sul posto per la preparazione della miscela.....	56
Fig. 23 - Localizzazione dei trattamenti eseguiti all'interno del plume dalla Regenesis [Regenesis].....	56
Fig. 24 - Strumenti utilizzati per l'acquisizione dei dati.	58
Fig. 25 - Diverse tipologie di terreno dove sono stati infissi gli elettrodi	60
Fig. 26 - Posizione nel sito dello stendimento sulla linea L2.....	61
Fig. 27 – Posizione delle 3 linee nel sito	61
Fig. 28 – Posizione di alcuni pozzetti prossimali alla linea L2.....	64
Fig. 29 - Sezioni di tomografia di resistività elettrica (ERT) della linea L1 a 72 elettrodi.....	66
Fig. 30 - Sezioni di tomografia di resistività elettrica (ERT) della linea L2 a 72 elettrodi.....	67
Fig. 31 - Sezioni in time-lapse riferite alla linea L2... ..	69
Fig. 32 - Elaborazioni dei dati eseguite dal professor Flores-Orozco.....	70
Fig. 33 - Modifiche apportate con analisi visuale, eliminando valori anomali....	72
Fig. 34 - Elaborazione con Res2dinv per la tomografia elettrica.....	72
Fig. 35 - Elaborazione con ProfileR e Surfer per la tomografia elettrica... ..	72
Fig. 36 - Elaborazione con ProfileR e Surfer per la tomografia elettrica utilizzando la scala cromatica delle precedenti sezioni.....	73
Fig. 37 - Elaborazione con Res2dinv per la polarizzazione indotta.....	73

Lista delle tabelle:

Tabella 1 – Estratto delle tabelle contenute all'interno del D. Lgs. 152 / 2006, Parte IV, Titolo V, Allegato 5.....	49
--	----

Introduzione:

Il lavoro di Tesi svolto concerne l'applicazione di tecniche non invasive di prospezione geofisica per il monitoraggio di una innovativa tecnica di bonifica di un sito inquinato. L'obiettivo è capire se tramite le diverse tecniche di indagine geofisiche, si possano avere informazioni soddisfacenti nel monitoraggio di un tale trattamento di bonifica. Il lavoro ha previsto la rielaborazione di dati precedentemente raccolti nel 2016 e l'elaborazione di nuovi dati acquisiti nel 2017 e 2018. I principali temi trattati si concentrano nell'applicazione di tomografie di resistività elettriche e analisi con la tecnica della polarizzazione indotta, al fine di poter monitorare nel tempo l'efficacia dell'intervento di bonifica e poter determinare le differenze tra le diverse tecniche.

Si sono applicate tecniche di tomografia di resistività elettrica e sono stati acquisiti nuovi dati, sia di tomografia di resistività elettrica sia di polarizzazione indotta nel dominio del tempo e della frequenza. Per quest'ultime ci si è avvalsi della collaborazione del Prof. Adrian Flores-Orozco dell'Università di Vienna, che ha eseguito delle misure di polarizzazione indotta nel campo della polarizzazione indotta spettrale (SIP).

Nella prima parte dell'elaborato si descrive l'inquadramento geologico del sito in esame, vengono poi descritte le tecniche geofisiche applicate e la teoria. Nella terza parte viene illustrata la natura degli inquinanti e le modalità con cui è stata eseguita la bonifica ed infine vengono presentati i capitoli con le elaborazioni dei dati, i confronti e le conclusioni dedotte.

1. Descrizione sito e inquadramento geologico

Il lavoro discusso in questo testo si basa sulle indagini geofisiche tramite tomografia elettrica e di polarizzazione indotta che sono state eseguite in un unico sito inquinato locato nell'area urbana della città di Bologna (vedi *Figg. 1-3*). Più precisamente, l'area interessata è un terreno di proprietà della R. F. I. S.p.A. - Rete Ferroviaria Italiana, posizionato a nord ovest rispetto alla stazione ferroviaria di Bologna Centrale e si affaccia a Via de' Caracci. Questa zona negli ultimi anni è stata ed è tuttora soggetta da una evidente attività di recupero e ripristino del vecchio scalo ferroviario. Infatti, nell'area sono presenti numerose attività cantieristiche dedicate a costruzioni di diverse destinazioni d'uso, con lo scopo comune di riqualificare il quartiere. Questo punto trova conferma attraverso una rapida osservazione delle immagini dell'area negli ultimi dieci anni, dove le linee ferroviarie originariamente adibite a vie di transito secondarie per il deposito dei materiali rotabili, ormai in disuso, sono state rimosse per far spazio alla nuova area che verrà, probabilmente, recuperata completamente nel giro dei prossimi anni. Questo grande impegno del comune di Bologna lo si può osservare anche in *Fig. 2*, dove è presente una serie di foto storiche che evidenziano l'evoluzione dell'area nel giro di trent'anni circa.

L'interesse generale che ha portato le diverse aziende a discutere della bonifica, risiede sulla presenza nelle acque sotterranee di una concentrazione di composti organico-clorurati maggiore di circa 10 volte le concentrazioni soglia contaminazione (CSC) indicate dalla legislazione, che però risultano comunque troppo basse per essere trattate facilmente con i classici sistemi di bonifica.

Per rimuovere il contaminante è stato scelto di applicare una nuova strategia, inserendo il carbone attivo direttamente nell'acquifero. Questa soluzione dovrebbe poter raggiungere gli obiettivi di bonifica impiegando tempi minori rispetto a soluzioni convenzionali.



Fig. 1 - Localizzazione del sito [Google Maps].

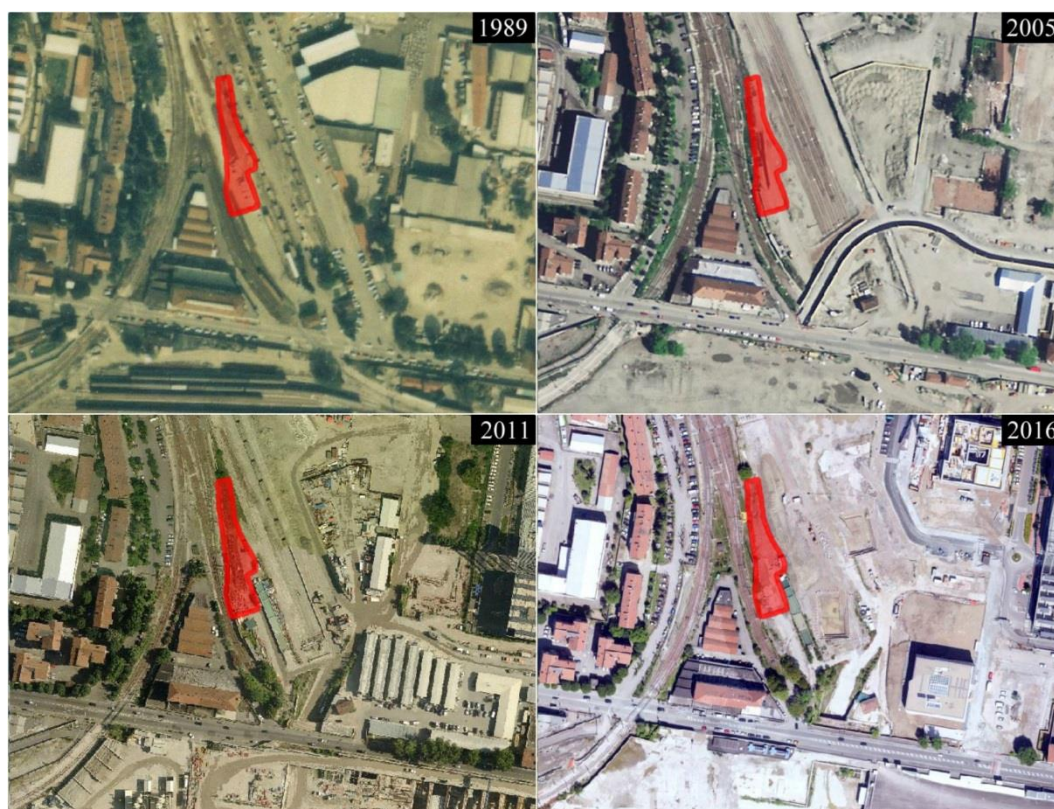


Fig. 2 - Evoluzione del sito negli anni (1989, 2005, 2011, 2016) [Comune di Bologna].

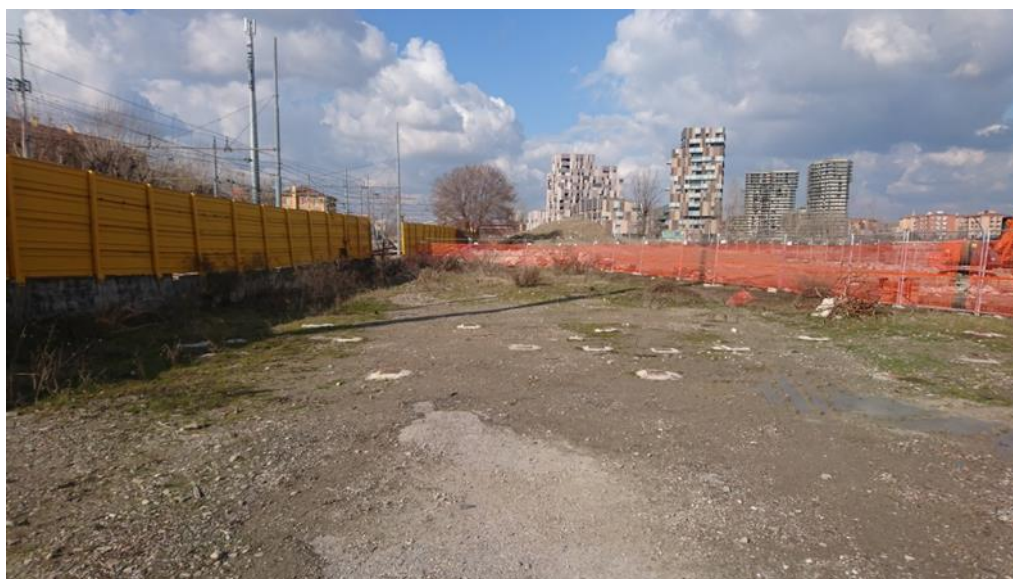


Fig. 3 - Foto del sito nel febbraio 2018

L'inquadramento geologico dell'area si riferisce in prima approssimazione ad una stratigrafia al di sotto del piano campagna contenente un classico esempio di terreno di origine alluvionale, con forte alternanza ed eterogeneità delle granulometrie al suo interno, che vanno da argille limose a sabbie e ghiaie. Il sottosuolo del sito in esame ha all'interno una serie di falde freatiche sovrapposte. Si ha la conoscenza di due falde: l'acquifero superficiale, che ha una soggiacenza a circa 4 metri di profondità dal piano campagna e dovrebbe estendersi fino a 11 metri di profondità e l'acquifero intermedio, che dovrebbe stare al di sotto di un orizzonte impermeabile ad una profondità compresa tra i 16 e i 20 metri dal piano campagna. Dovrebbe esserci un terzo acquifero profondo al di sotto dei primi due, ma non si hanno molte informazioni, questo dettaglio è da prendere puramente come indicativo. Ai fini del recupero dell'area, la contaminazione individuata è concentrata all'interno dei primi due acquiferi ed ha interessato anche l'orizzonte argilloso che si trova all'interno.

L'interpretazione geologica che viene fornita dall'azienda esecutrice dei lavori è stata concepita in seguito a numerosi sondaggi geognostici svolti prima della messa in posto dei pozzi per le iniezioni durante la bonifica.

Dalle carote prelevate si identificano almeno cinque orizzonti ben definiti:

- tra lo 0 e l'1 m di profondità dal piano campagna si trova un suolo estremamente alterato, interessato dalle attività antropiche avvenute al di sopra. Al suo interno sono presenti numerosi scarti come metalli, bulloni, lamiere, plastica e pezzi di vetro. (vedi *Fig. 4*).
- tra l'1 e i 4 m di profondità si evidenzia un corpo argilloso avente una bassa conducibilità idraulica, il quale costituisce un orizzonte di separazione tra il piano campagna e il primo acquifero interessato dalla bonifica. (vedi *Fig. 4*).
- tra i 4 e gli 11 m di profondità si presenta il primo acquifero trattato durante le attività di bonifica nel sito. Questo orizzonte è caratterizzato da una sabbia medio-fine contenente una frazione limosa. Questo dettaglio si rispecchia sulla conducibilità idraulica fornita dalla ditta, compresa tra i valori di $k = 1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (vedi *Fig. 5*).
- tra gli 11 ed i 16 m di profondità dal piano campagna si posiziona un corpo a bassa permeabilità, si tratta di una argilla molto fine. Esso funge da acquicludo/acquitardo che separa il primo acquifero dal secondo acquifero. (vedi *Figg. 6-7*).
- tra i 16 ed i 20 m di profondità dal piano topografico si trova invece il secondo acquifero, composto da una litologia sabbiosa con presenza di ghiaia. Quest'ultimo elemento trova conferma anche nella conducibilità idraulica fornita dalla ditta, in quanto è leggermente maggiore rispetto all'acquifero precedentemente descritto; compresa tra i valori di $k = 7 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. (vedi *Fig.7*)

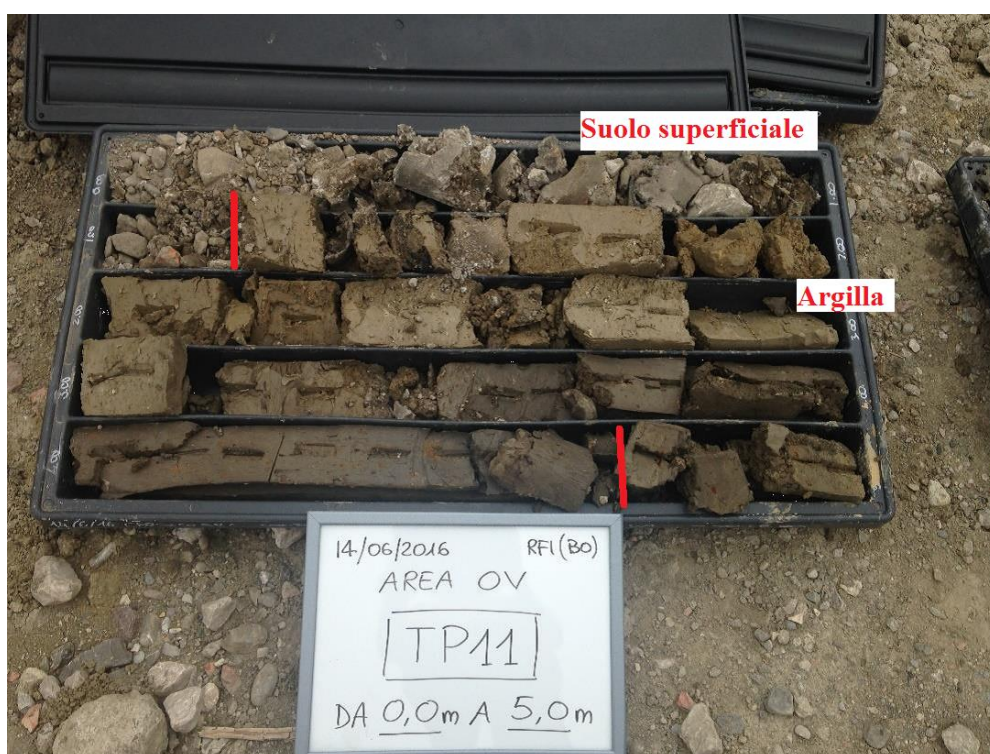


Fig. 4 - In questa foto è presente il contenitore del materiale prelevato tra i 0 e i 5 m.d.p.c. [Regenesis].



Fig. 5 - In questa foto è presente il contenitore del materiale prelevato tra i 5 e i 10 m.d.p.c. [Regenesis].



Fig. 6 - In questa foto è presente il contenitore del materiale prelevato tra i 10 e i 15 m.d.p.c. [Regenesis].



Fig. 7 - In questa foto è presente il contenitore del materiale prelevato tra i 15 e i 20 m.d.p.c. [Regenesis].

Da quello che risulta, quindi, il sito contiene una successione di litologie in cui si alternano orizzonti caratterizzati in prevalenza da sabbie, presenti dove si trovano gli acquiferi, ad orizzonti caratterizzati dalla presenza di una componente predominante di limo ed argilla. Materiale più grossolano, appartenente alla classe delle ghiaie, si trova solamente in piccoli orizzonti nella porzione più profonda all'interno del secondo acquifero (vedi Fig. 8).

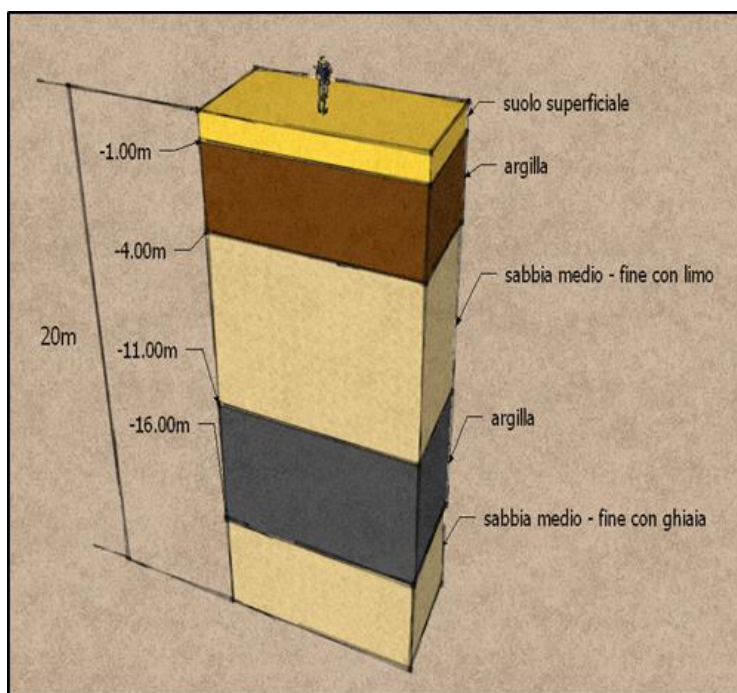


Fig. 8 - Ricostruzione tridimensionale della colonna stratigrafica.

Consultando il sito dell'ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale), troviamo riferimenti legati a quest'area all'interno della carta CARG 221 – Bologna (vedi Fig. 9), dove l'area è rappresentata nella zona Sud-Ovest. Osservando gli elementi che sono riportati sulla carta geologica, l'area in esame è indicata come affiorante del Subsistema di Ravenna, che è identificato nella carta e nelle relative note illustrative allegate con la sigla AES8. La descrizione indicata all'interno delle note illustrative confermano la stratigrafia osservata dalle diverse carote campionate nel sito. Questa unità è una suddivisione di rango inferiore

rispetto all'unità a più grande scala, che viene identificata come Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), alla quale appartiene gran parte dell'area compresa in questa carta geologica. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore ha un'età compresa tra il Pleistocene medio e l'Olocene, quindi circa da 400.000 anni sino ad arrivare ai giorni nostri. A questa unità superiore appartengono sedimenti di origine continentale che appoggiano in discordanza su depositi marini più antichi. I sedimenti che caratterizzano l'unità ghiaie, sabbie, limi ed argille derivati da canali e da terrazzi fluviali e presenta stratificazioni tipiche da conoide alluvionale e da piana alluvionale.

Inoltre, il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è parzialmente suddivisa in vari subsintemi quali l'AES8 (quello di nostro interesse), l'AES7, l'AES6 e l'AES5. Ogni subsintema è limitato in affioramento da una scarpata di terrazzo alluvionale, lateralmente correlata a paleosuoli sviluppati al letto di depositi di terrazzo.

Dal punto di vista geologico l'intero volume del sub - sintema di Ravenna (AES8) ha età compresa tra il Pleistocene superiore e l'attuale Olocene, ovvero un'età massima di circa 12.000 anni, datata su base radiometrica, con il tetto che coincide con il piano campagna ed è infatti l'elemento più sommitale (e recente) dell'intero Sintema. La sua base è posta in prossimità di una superficie di discontinuità, lacuna stratigrafica che viene descritta nelle note illustrative di un'altra carta geologica d'Italia, più precisamente nel foglio 223 - Ravenna. Al tetto è presente un suolo pedogenizzato di spessore compreso tra 0,5 e 1,5 metri, che coincide con il piano campagna. Come già indicato, la sua origine è strettamente legata all'ambiente fluviale: i sedimenti sono distribuiti nella pianura bolognese nella forma di terrazzi fluviali e di rotte fluviali, per cui si identificano depositi sabbioso-limosi di canale, sedimenti di piana esondabile. Sono indicati pochi corpi ghiaiosi, rari e concentrati solamente alla base dell'unità.

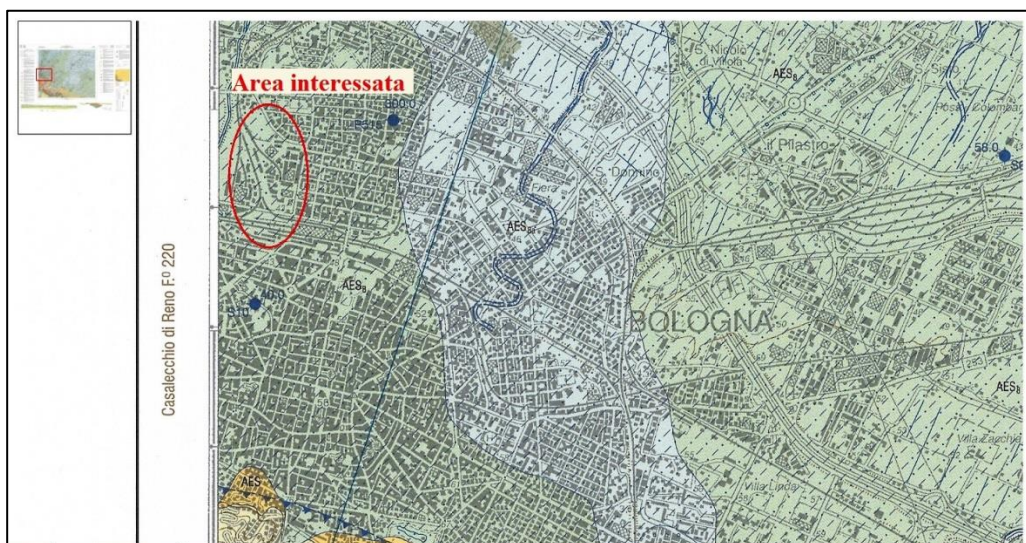


Fig. 9 - Ritaglio del foglio 221 con cerchiata l'area del sito interessato.

2. Teoria e principi fisici dell'indagine geofisica

2.1 Scopi e vantaggi dell'indagine geofisica

La geofisica è uno strumento multidisciplinare che si può applicare a numerose problematiche di natura geologica e geologico-tecnica. Le indagini geofisiche infatti risultano utili in ambiti molto diversi che vanno dal settore minerario, al settore ingegneristico sino ad arrivare al settore delle problematiche ambientali. Nella progettazione di un piano di indagine geognostica, uno dei più grandi problemi riscontrati frequentemente è la dipendenza dalle numerose indagini dirette al fine di poter eseguire la caratterizzazione di suolo e sottosuolo del sito in studio. Le indagini geologiche dirette prevedono l'estrazione di porzioni di terreno dal sottosuolo tramite carotaggi per poter analizzare nel dettaglio la tipologia di suolo in questione. L'utilizzo di carotaggi permette un'investigazione del suolo tramite un carotatore di qualche decimetro di diametro. Sebbene queste tecniche rimangono fondamentali per la caratterizzazione geologica di un sito, per la qualità e la precisione del dato campionato, è anche vero che hanno dei limiti considerevoli. Il campionamento con indagini dirette permette una ricostruzione stratigrafica e dà la possibilità di valutare ed identificare determinati parametri fisici e geotecnici dei materiali attraverso prove in sito e in laboratorio.

Come si può intuire, l'analisi tramite carotaggio è limitata alla dimensione del carotatore e sono spesso necessari più carotaggi per poter essere rappresentativa dell'intero sito in studio con sufficiente dettaglio. Inoltre, molto spesso nemmeno il numero di punti di perforazione prestabilito risulta sufficiente per avere una chiara idea della distribuzione dei materiali nel volume investigato, per cui tutte le proprietà fisiche e geotecniche che caratterizzano l'intero dominio del sito da investigare dipendono da questi pochi punti. Ci si pone quindi il problema di quanto rappresentativi siano i parametri determinati da una singola carota nei confronti dell'intera area del sito. Altro fattore da tenere in considerazione sono i costi piuttosto elevati di questo tipo di indagini. Tramite le investigazioni indirette di tipo geofisico, si può cercare di risolvere in parte il problema del numero di campionamento dei dati. Infatti, contrariamente alle indagini dirette, esse si

possono eseguire a costi contenuti e in tempi relativamente minori visto che consistono nell'investigazione di un dominio di sottosuolo senza effettuare misure invasive, come scavi o carotaggi, ed hanno il vantaggio di non essere soggette alla problematica del numero di campioni di dati acquisiti, perché in genere ogni tecnica geofisica di cui ci si può avvalere ha la potenzialità di avere una ampia copertura spaziale dell'indagine, a seconda delle esigenze, e di fornire una vasta densità di informazioni per il dominio investigato. Sono dunque un valido strumento che se affiancato alle indagini dirette possono aiutare un geologo nella caratterizzazione ottimale di un determinato sito. Per il loro utilizzo è necessaria una conoscenza dei principi fisici su cui si basano, al fine di poterne capire eventuali limiti e cercare di scegliere la migliore tecnica per la tipologia di problematica che si dovrà affrontare. I costi di queste indagini sono sostanzialmente relativi all'acquisto iniziale della strumentistica necessaria per poter operare, dopo di che, generalmente risultano molto economiche le misurazioni e la manutenzione necessaria.

Esistono tecniche di indagine sia da pozzo che da superficie, che spesso possono essere eseguite con la stessa strumentazione, ma in seguito verranno trattate maggiormente le tecniche di indagine di superficie. Solitamente le strumentazioni geofisiche che lavorano in superficie o comunque ai bordi del dominio geologico hanno la limitazione di investigare il sottosuolo solamente da un unico punto di vista. Possono fornire misure che hanno una buona risoluzione, anche se, con l'aumentare della distanza dalla fonte del segnale la risoluzione diminuisce per attenuazione naturale. Proprio per questo motivo si sono sviluppate le applicazioni di indagini geofisiche da pozzo, le quali possono offrire più informazioni e maggiore risoluzione, ma hanno lo svantaggio di essere più costose perché richiedono l'esecuzione di perforazioni nel sito. Generalmente le investigazioni di superficie sono le più semplici in termini di realizzazione e hanno numerosi campi di applicazione, oltre al campo geologico-ingegneristico, sono infatti ottimi strumenti per applicazioni ambientali ed in particolare nello studio di corpi idrici ed acque sotterranee o in altri settori come ad esempio nel campo minerario, in quello archeologico o nel campo agronomo-forestale.

Va detto che anche la geofisica possiede dei limiti e delle problematiche che devono essere tenute in considerazione. Una delle principali problematiche è la profondità di investigazione che varia in base alle caratteristiche del terreno da indagare e a seconda della tecnica geofisica che si decide di utilizzare. Le proprietà dei corpi solidi che costituiscono il sottosuolo sono sempre da considerare anisotrope, perché il terreno stesso è un mezzo eterogeneo. Le risoluzioni di molte strumentazioni geofisiche sono in grado di fornire informazioni a diverse scale, in base al problema richiesto da risolvere o interpretare. Generalmente la maggior parte dei progetti di investigazioni tramite metodi geofisici nel campo applicato si limitano a profondità massime di 20-30m, raramente si va oltre.

Altra problematica di primaria importanza è la rappresentatività del dato ottenuto, infatti qualsiasi indagine non mostrerà mai la reale immagine delle caratteristiche del sottosuolo, ma si limiterà ad una rappresentazione della distribuzione nel piano (o spazio) del valore assoluto che può ottenere una determinata grandezza fisica. Questa distribuzione può essere interpretata e associata ad una facies geologica dopo il processo di inversione del dato.

Un'altra grande distinzione all'interno delle tecniche è a seconda che siano queste attive o passive. Le tecniche geofisiche di tipo attivo sono dotate di un emettitore di segnale diretto all'interno del dominio da investigare, mentre le tecniche geofisiche di tipo passivo registrano e usano un segnale che viene generato esternamente e non prodotto dalla strumentazione.

Il procedimento di un'indagine geofisica si compone di tre fasi: inizialmente si eseguono misure sul sito da esaminare, dopo di che da queste misure si ricavano i parametri fisici attraverso grandezze registrate sul campo ed infine si passa all'interpretazione dei parametri al fine di definire le caratteristiche di un corpo nel sottosuolo.

Ogni strumento è dotato di un sensore o di una antenna per la misura di una quantità geofisica G , che è la risposta diretta di un parametro fisico P identificata per un punto infinitesimo all'interno del dominio dopo che è soggetto da un determinato segnale F .

$$G=G(P,F)$$

Il dato viene registrato dallo strumento, per cui viene estratto ed elaborato in differente maniera sulla base della natura della grandezza fisica misurata e alle rispettive leggi. Ogni dataset contiene errori detti sistematici dovuti a difetti più o meno prevedibili del funzionamento della strumentazione. Questi errori possono essere corretti, ma risulta difficile rimuoverli totalmente.

Un concetto da tenere sempre in considerazione quando si utilizzano metodi di indagine indiretta è che non esiste una relazione univoca tra il dato campionato e il modello ottenuto al termine. Infatti, è fondamentale che inizialmente non si assuma una immagine relativa al dato grezzo di campagna come immagine rappresentativa della geologia del dominio investigato, ma anzi è necessario che venga associata solo in un momento successivo. Infatti la risposta al segnale geofisico ottenuta sul campo, deve essere confrontata con un modello diretto, simulando la risposta di un modello concettuale fornito dalle conoscenze geologiche di cui si dispone a priori, riguardanti il sito o mediante una modellazione inversa attraverso la quale si punta a convertire il dato di campagna in una sezione reale, questo può avvenire mediante il confronto del dato con un modello sintetico attraverso una procedura iterativa, in modo da ottenere un modello che rispecchi l'andamento del dato misurato pesando l'errore che affligge ogni misura.

Il risultato di quest'elaborazione del dato grezzo, di campagna, è una rappresentazione grafica che mostra la distribuzione di un certo parametro allo scopo di risolvere la questione iniziale che ha portato a progettare l'indagine geofisica.

2.2 Il metodo geoelettrico

L'indagine mediante metodi elettrici applicata al campo geologico deve la sua nascita grazie al contributo che storicamente è stato fornito da numerosi scienziati in diversi campi. Tra i più importanti sicuramente risulta il contributo dato dal fisico e matematico tedesco Georg Ohm (Erlangen, 16 marzo 1789 – Monaco di Baviera, 6 luglio 1854) nello studio del passaggio di corrente attraverso i materiali solidi tramite i suoi esperimenti. Nel 1827 pubblicò un importante trattato fisico-matematico nel quale descrisse il risultato dei suoi studi con le sue considerazioni che sono identificate oggi nella legge che porta il suo nome. Il suo esperimento consisteva nell'applicare alle estremità di un campione di materiale solido, di dimensioni geometriche definite, una differenza di potenziale tramite la connessione di una batteria. Questa legge afferma che la corrente elettrica in grado di attraversare un corpo solido possiede una intensità I che dipende linearmente dalla differenza di potenziale ΔV applicata al mezzo, moltiplicata per la resistenza elettrica, ovvero R .

$$\Delta V = I \cdot R \quad (Eq.1)$$

Il parametro fisico della resistenza R dipende direttamente dalla geometria del materiale e la sua unità di misura indicata dal sistema internazionale (SI) prende il nome di Ohm.

$$R = [\Omega] = (\rho \cdot l) / S \quad (Eq.2)$$

La dipendenza dalla resistenza però non è utile per la geofisica, perché la dipendenza dalla geometria del materiale e quindi dalle proprietà del conduttore è un fattore limitante quando si ha a che fare con corpi conduttori tridimensionali delle indagini geologiche, come i suoli ad esempio. Infatti è preferibile utilizzare un diverso parametro elettrico, ovvero la resistività elettrica indicata con la lettera greca ρ . La ρ in geofisica è un parametro molto comodo poiché è un parametro

indipendente dalla geometria del mezzo ed è legato solamente alla composizione naturale del materiale.

Considerando un volume solido di lunghezza L , una sezione di area A ed una resistenza elettrica R è possibile ricavare la resistività ρ tramite la seguente equazione:

$$\rho = [\Omega \cdot m] = (R \cdot A)/L = 1/\sigma \quad (Eq.3)$$

La resistività elettrica, a differenza della resistenza elettrica, è una proprietà intrinseca del materiale ed è la misura della capacità di un materiale solido ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche al suo interno. Da questa definizione è intuibile che questo parametro è perfettamente il reciproco della conduttività elettrica (σ), misurata in Siemens·m⁻¹, e consiste nell'attitudine di un determinato materiale a farsi attraversare dalle cariche elettriche. Per questo motivo i materiali considerati resistivi possiedono una bassa conducibilità e viceversa [Binley and Kemna 2005].

Se ora si considera l'immissione di corrente tramite l'uso di un singolo elettrodo inserito in un terreno solido con caratteristiche fisiche omogenee ed isotrope, si può vedere che l'elettrodo funge da sorgente puntiforme di linee di corrente, le quali escono per distribuirsi nello spazio in maniera uniforme.

Se si considera ora due superfici equipotenziali di raggi r e $r + dr$ rispetto al punto di sorgente delle linee di corrente, in esse si identifica una porzione infinitesima di spazio interpretabile come un cilindro di materiale che viene interessato da una differenza di potenziale pari a:

$$dV = -\rho \cdot \frac{I}{4\pi r^2} dr$$

(Eq.4)

L'intensità di corrente che scorre in un piccolo arco di circonferenza diminuisce all'aumentare della distanza dal centro, quindi dall'elettrodo, questo perché le linee di corrente si distribuiscono nello spazio secondo la superficie di una sfera.

Il potenziale elettrico in un secondo punto generico posizionato ad una distanza generica r_i è calcolato tramite integrazione della precedente equazione tra r_i e ∞ :

$$dV = \int_{r_i}^{\infty} \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{4\pi r_i}$$

(Eq.5)

Questa formulazione vale per una geometria sferica nello spazio, ma se l'elettrodo viene infisso sulla superficie del terreno omogeneo, la distribuzione delle superfici equipotenziali al suo interno risulta come delle semisfere, quindi va considerato solo mezzo volume, per cui la precedente formulazione assumerà la seguente espressione:

$$dV = \frac{\rho I}{2\pi r_i}$$

(Eq.6)

I metodi elettrici utilizzano sorgenti artificiali di corrente per produrre un campo di potenziale elettrico all'interno del terreno [Binley and Kemna]. Attualmente, nella pratica dei metodi geoelettrici è molto diffuso l'utilizzo di strumentazioni che richiedono una configurazione con 4 elettrodi: 2 che immettono corrente nel terreno chiamati energizzanti e 2 che misurano la differenza di potenziale detti potenziometrici (vedi Fig.10). Il vantaggio di questa accortezza sta nella possibilità di poter utilizzare due elettrodi per formare un circuito elettrico con il suolo insieme ad una sorgente di forza elettromotrice, mentre i restanti due elettrodi hanno la funzione di misurare con un circuito separato la differenza di potenziale. In questo modo si hanno due dispositivi diversi dove l'amperometro e voltmetro sono divisi. Infatti, nella geoelettrica il circuito elettrico risente di una resistenza dovuta al terreno e di due resistenze dette "di contatto" tra gli elettrodi e il terreno. Il passaggio di corrente tra il metallo dell'elettrodo e il suolo, comporta un consumo di energia a causa della resistenza di contatto e risulterebbe molto problematico se si utilizzasse solamente un unico circuito di due elettrodi, poiché influenzerebbe il segnale in maniera significativa.

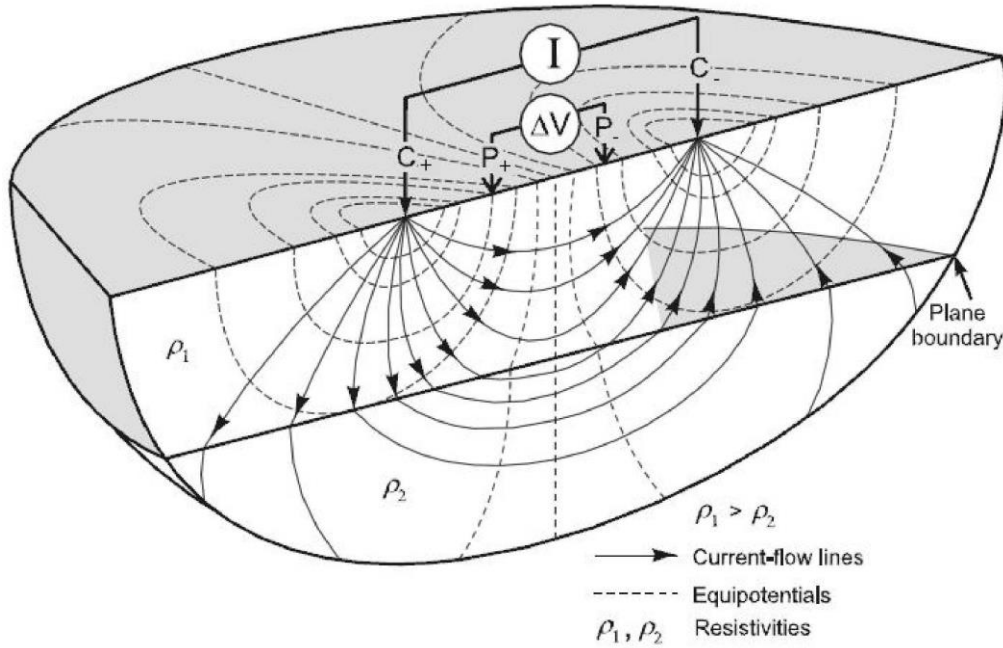


Fig. 10 - Principio di misura della resistività elettrica tramite uno stendimento composto da quattro elettrodi [Busato L. et al. 2016].

Generalmente i due elettrodi energizzanti sono chiamati con le lettere A e B mentre i due elettrodi potenziometrici sono indicati con le lettere M e N. Ammettendo che gli elettrodi energizzanti A e B, sono posizionati rispettivamente ad una distanza r_1 e r_2 dall'elettrodo potenziometrico M e ammettendo che le sorgenti abbiano intensità di corrente rispettivamente $+I$ e $-I$, il potenziale in M sarà individuato come somma dei potenziali dovuti rispettivamente all'elettrodo A ed all'elettrodo B.

$$V_M = V_{MA} + V_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi r_1} - \frac{\rho I}{2\pi r_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

(Eq.7)

Con lo stesso procedimento, si considera il potenziale elettrico nel punto dove è locato l'elettrodo potenziometrico N e si ottiene che anch'esso risente della distribuzione delle linee equipotenziali del campo elettrico tra i due elettrodi energizzanti A e B, se chiamiamo infatti le distanze tra A e B con N,

rispettivamente r'_1 e r'_2 otterremo analogamente a quanto visto nella precedente equazione:

$$V_N = V_{NA} + V_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi r'_1} - \frac{\rho I}{2\pi r'_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right)$$

(Eq.8)

Nella configurazione a quadripolo si va a misurare la differenza di potenziale tra i due elettrodi potenziometrici M e N, ne consegue che il ΔV sarà dato da:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

(Eq.9)

Ne consegue che, la differenza di potenziale misurata dagli elettrodi MN è funzione della geometria del quadripolo, cioè delle distanze dei due elettrodi di corrente rispetto agli elettrodi di potenziale. Ricavando le resistività è possibile ottenere il parametro k , ovvero la costante geometrica:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} = \frac{\Delta V}{I} \cdot k; \quad k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

(Eq.10)

Esistono diverse configurazioni geometriche per svolgere indagini geofisiche tramite l'uso dei quattro elettrodi e per ogni configurazione corrisponde una determinata geometria e quindi una diversa costante geometrica k per ogni tipologia di disposizione del quadripolo. Ad ogni configurazione corrisponde non solo la distribuzione spaziale degli elettrodi ma anche determinate capacità tecniche di iniezione delle linee di corrente nel suolo, ovvero la risoluzione del dato che si ottiene in campagna.

Tra le configurazioni di maggiore rilevanza e più utilizzate nella pratica delle indagini geoelettriche (vedi Fig. 11), ricordiamo:

- la configurazione Wenner, che possiede quattro elettrodi sulla stessa linea dove gli elettrodi potenziometrici MN sono interni agli elettrodi di corrente

AB e la distanza tra gli elettrodi è mantenuta fissa. Se chiamiamo a l'interdistanza tra gli elettrodi, otterremo una costante geometrica che vale, $k=2\pi a$. Le indagini effettuate mediante questa configurazione hanno la caratteristica di avere una buona penetrazione del segnale elettrico, una buona risoluzione verticale, ma una scarsa risoluzione orizzontale;

- la configurazione dipolo-dipolo, che possiede i quattro elettrodi allineati lungo lo stendimento, dove la coppia di elettrodi energizzanti AB sta ad un estremo dello stendimento e la coppia di elettrodi potenziometrici MN è posizionata in maniera speculare in direzione opposta. La distanza AB e MN è la medesima ed è chiamata a , mentre la distanza BM è solitamente un multiplo intero della distanza di ciascun dipolo, quindi chiamata na . La costante geometrica avrà un valore di $k=2\pi an(n+1)(n+2)$. Le indagini effettuate mediante questa configurazione hanno la caratteristica di avere una modesta penetrazione e quindi una bassa risoluzione verticale, ma una buona risoluzione orizzontale.
- la configurazione Schlumberger possiede quattro elettrodi allineati tra loro, ma gli elettrodi potenziali MN, che sono interni, hanno una interdistanza molto più piccola rispetto alla distanza tra gli elettrodi energizzanti esterni AB. Se chiamiamo a la distanza tra MN e sapendo che le distanze tra AM e BN sono uguali tra loro e multiple di a per un valore n , otteniamo una costante geometrica che vale $k=2\pi n(n+1)a$. Le indagini effettuate mediante questa configurazione hanno caratteristiche intermedie tra Wenner e dipolo-dipolo;

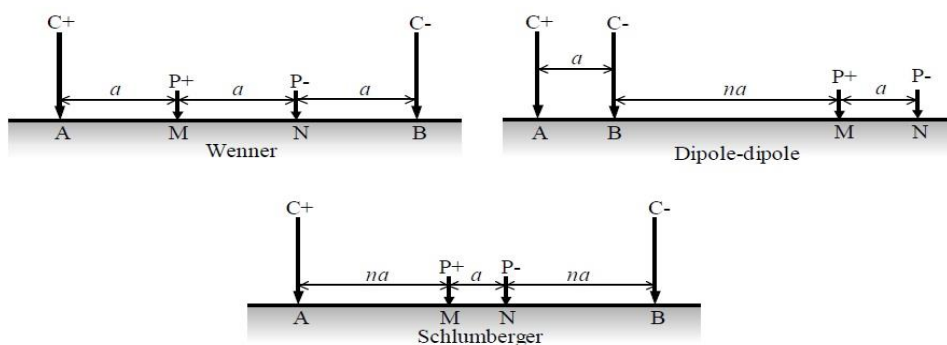


Fig. 11- Principali schemi di acquisizione usati in geoelettrica [Binley & Kemna 2005].

Il movimento delle cariche elettriche è permesso tramite l'esistenza di tre percorsi differenti: la conduzione elettronica, la conduzione dielettrica e il contatto elettrolitico. La conduzione elettronica è il classico passaggio di elettroni che interessa i materiali metallici, la conduzione dielettrica corrisponde ad un flusso lento di cariche sulla superficie ed è tipica dei materiali isolanti, mentre la conduzione tramite contatto elettrolitico interessa scambi di elettroni in soluzioni che contengono ioni e risultano legati alla loro concentrazione e mobilità. All'interno delle rocce la corrente elettrica viene regolata soprattutto dalla presenza di acqua e dalle sue caratteristiche da solvente, quindi la presenza di soluti al suo interno incide fortemente sulla distribuzione delle cariche elettriche. Per questo motivo la strumentazione per indagini elettrica trova numerosi impieghi in campo idrogeologico. La presenza di acqua controlla molto il flusso di corrente nel sottosuolo, tenendo conto che le acque sotterranee sono tendenzialmente ricche in sali. I minerali e rocce non sono mezzi isotropi e la resistività elettrica non fa eccezione in questo campo. I range di valori ottenibili sono molto vari, ma per i terreni non si raggiungono mai resistenze che superino l'ordine dei $1000 \Omega \cdot m$, con valori medi che per un terreno insaturo sono compresi tra $30 - 100 \Omega \cdot m$ mentre per un terreno saturo si parla di $15 - 30 \Omega \cdot m$ [Binley & Kemna 2005].

Esistono in bibliografia numerose tabelle che raccolgono queste informazioni, ma risulta essenziale tenere in considerazione che la saturazione incide fortemente sulla resistività elettrica del materiale poroso.

La resistività di un corpo geologico dipende in primo luogo dalle sue caratteristiche tessiturali: forma, dimensione dei grani, porosità e suo grado di saturazione, soluzione contenuta nella sua porosità ed eventuale presenza di elettroliti nel solvente. La presenza di acqua condiziona fortemente il segnale elettrico, così come il grado di saturazione del materiale, l'eventuale presenza di soluto e la concentrazione di esso. Da questo comportamento si fondano diverse relazioni petrofisiche, come ad esempio la più nota indicata da Archie (1942),

dove viene correlata la conducibilità elettrica al grado di saturazione del mezzo geologico ed applicata nel campo delle indagini petrolifere per determinare la presenza di olio o acqua.

2.3 Tomografia di resistività elettrica (ERT)

Un'importante innovazione si è avuta negli anni Ottanta del secolo scorso con l'introduzione, grazie alla diffusione della microelettronica, dei georesistivimetri multielettrodo (vedi Fig. 12) i quali, mediante un numero elevato di elettrodi disposti sul terreno e tutti simultaneamente collegati allo strumento, permettono l'acquisizione automatizzata della resistività apparente da ogni quaterna possibile di elettrodi, secondo lo schema Wenner, Schlumberger o dipolo-dipolo. Così facendo si ottiene una notevole quantità di dati e l'inversione risulta più precisa ed affidabile.



Fig. 12 - Georesistivometro utilizzato per eseguire la tomografia elettrica, si tratta di un Syscal Pro della IRIS Instruments di proprietà del dipartimento di Geoscienze di Padova.

In campagna si ottengono, quindi, l'evoluzione verticale e laterale della resistività apparente. Si parla di resistività apparente perché nella misura geofisica sul terreno, non si verificano generalmente le condizioni di omogeneità ed isotropia

del mezzo, infatti il sottosuolo risulta essere eterogeneo e anisotropo dal punto di vista elettrico, sarà poi il processo di inversione a consentire di passare dalle misure di resistività apparente ad un modello di resistività. Se quindi i dati, cioè le resistività apparenti, sono stati acquisiti lungo il profilo, come avviene nella maggior parte dei casi, è uso rappresentarli in forma di “pseudosezioni” (vedi Fig.13). Le pseudosezioni sono la rappresentazione del dato grezzo raccolto dalla tomografia elettrica che permettono la ricostruzione di una curva di resistività elettrica apparente bidimensionale. Si tratta di un grafico che ha per ascissa la distanza lungo il profilo e per ordinata un parametro associato all’apertura del quadripolo, cioè alla sua profondità di indagine. Le diverse configurazioni dei quattro elettrodi che vengono utilizzati corrispondono a diverse posizioni degli elettrodi coinvolti e di conseguenza a diverse lunghezze e profondità di indagine [Santarato et al. 2015].

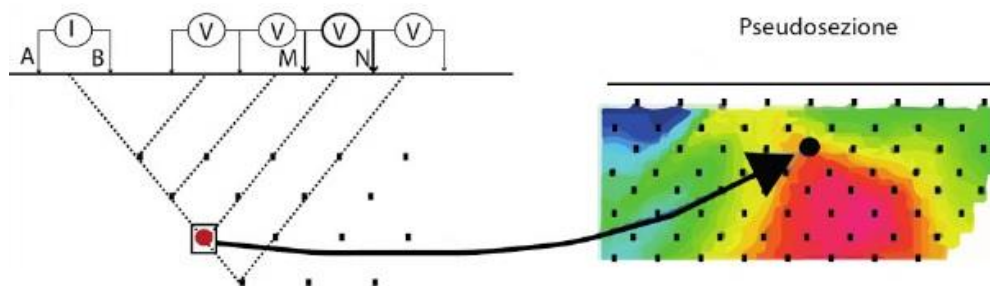


Fig. 13 - Come si produce una pseudosezione – dispositivo Dipolo-dipolo [Santarato et al. 2015].

La tomografia di resistività elettrica vede dunque una limitazione nella massima profondità di indagine raggiungibile, che sostanzialmente corrisponde nella porzione centrale dello stendimento dove la distanza in superficie tra il primo elettrodo e l’ultimo è massima. Generalmente il valore di questa profondità massima raggiungibile è di circa un quarto o un quinto della lunghezza totale dello stendimento, anche se c’è sempre una dipendenza dal contesto ambientale in termini di struttura della resistività. Inoltre va tenuto in considerazione che esiste una perdita di risoluzione all’aumentare della profondità di indagine e nella

vicinanza agli elettrodi si ha la densità massima di informazioni. Attraverso questo genere di misure generalmente si può arrivare a profondità di 100-150m, difficilmente si può andare oltre anche a causa dei problemi logistici e pratici nel poter disporre di uno stendimento molto prolungato.

I dati raccolti tramite una tomografia di resistività elettrica sono sempre afflitti da errori casuali e sistematici. L'errore casuale viene notevolmente ridotto solamente attraverso lo stacking di dati ottenuti dalla ripetizione di una stessa misura a cicli ripetuti cambiando la polarità nell'iniezione di corrente. Per la determinazione di un errore sistematico è necessaria un'ulteriore analisi, sfruttando il principio di reciprocità, per cui, per ogni quadripolo, le coppie di elettrodi di potenziale e di corrente risultano interscambiabili. Infatti, le due misure relative a una configurazione diretta R_{di} e alla sua reciproca R_{ri} , ottenute scambiando la coppia di elettrodi energizzanti con la coppia di elettrodi potenziometrici, dovrebbero fornire le stesse informazioni, ma questo abitualmente non accade perché una o entrambe le misure sono affette da errore sistematico chiamato errore di reciprocità, tipicamente dovuto al contatto non ottimale tra elettrodo e terreno. Attraverso l'analisi dei reciproci viene calcolato l'errore di reciprocità: questo porta, stabilendo una soglia di errore variabile dall'operatore, ad escludere dall'analisi i dati fortemente influenzati dall'errore sistematico.

$$\text{Errore di reciprocità} = \varepsilon_i = \frac{|R_{ri} - R_{di}|}{\frac{R_{ri} + R_{di}}{2}}$$

(Eq.11)

Ricapitolando, la pseudosezione di resistività elettrica ottenuta dalle misure ERT è semplicemente la rappresentazione grafica dei dati grezzi misurati dallo strumento di acquisizione (chiamato georesistivimetro), trasformati in resistività apparenti e posizionati in modo convenzionale in relazione al dipolo considerato. È un'immagine in base alla quale si possono fare osservazioni esclusivamente a riguardo della qualità dei dati, per verificare la presenza di dati fortemente anomali, che dovrebbero sparire con l'analisi dei reciproci.

Per fare il procedimento di controllo dei dati reciproci nel nostro lavoro è stato utilizzato il software Process.

L'interpretazione dei dati ERT può avvenire unicamente attraverso un processo di inversione del dato.

2.4 L'inversione del dato ERT

Il processo di inversione del dato ERT è il passaggio necessario per procedere da una pseudosezione ad una rappresentazione della distribuzione spaziale di resistività il più possibile vicina a quella reale del sistema investigato.

L'obiettivo di questa elaborazione del dato è derivare la distribuzione delle proprietà elettriche all'interno del sottosuolo da un insieme di misurazioni effettuate sul contorno del dominio investigato. Secondo i principi descritti precedentemente, la soluzione al problema può essere matematicamente determinata, attraverso la soluzione numerica alle differenze finite o elementi finiti dell'equazione differenziale di flusso di corrente continua attraverso un mezzo, date le opportune condizioni iniziali e al contorno.

La soluzione al problema inverso prevede che stabilito un insieme di dati, la distribuzione delle proprietà elettriche del modello deve essere coerente con le resistenze effettivamente misurate e deve tenere conto che ogni misura è caratterizzata da una certa percentuale di errore.

Per eseguire il processo di inversione dei dati attraverso una soluzione numerica è fondamentale la formulazione di un modello diretto della distribuzione di resistività in 2D che consiste nella stima dei risultati delle misure, dato un modello in cui la distribuzione delle proprietà elettriche è nota. Per una certa distribuzione di resistività ρ o conduttività σ elettrica, è possibile determinare le differenze di potenziale elettrico attraverso la modellazione diretta, per un problema bidimensionale, risolvendo la seguente equazione differenziale, in cui v è la trasformata di Fourier della variazione di potenziale e λ rappresenta la variabile della trasformata di Fourier nella terza dimensione

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(\sigma \frac{\delta v}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\sigma \frac{\delta v}{\delta z} \right) - \lambda^2 \sigma v = -I \delta(x) \delta(z)$$

(eq. 12)

La risoluzione del modello diretto considerando una distribuzione bidimensionale della resistività richiede un procedimento numerico attraverso il metodo delle differenze finite o il metodo degli elementi finiti. Nelle nostre analisi è stato adottato il metodo degli elementi finiti. Il metodo numerico è basato sulla discretizzazione di un dominio, che approssima l'area in esame, attraverso una griglia costituita da un certo numero di nodi e di elementi, chiamata mesh. La soluzione numerica all'equazione differenziale viene quindi ricercata per ogni centroide di elemento, nel metodo degli elementi finiti, e rappresenta la differenza di potenziale elettrico in quel punto [Binley e Kemna, 2005].

La risoluzione del problema inverso si punta a calcolare la reale distribuzione di resistività a partire dal dataset di misure. Come per la modellazione diretta è attraverso il processo numerico che viene ricercato il modello coerente con i dati reali, considerando l'errore di cui sono affette le misure. Il procedimento numerico per il processo di inversione richiede tre elementi: un modello diretto, una funzione obiettivo e un algoritmo per andare a definire la distribuzione ottimale del parametro. La soluzione analitica al problema viene risolta discretizzando la stessa regione in un numero M di elementi, dove ad ognuno o a gruppi di essi viene assegnato un parametro m^* in forma vettoriale, che rappresenta la distribuzione delle proprietà elettriche da determinare:

$$m_M^* = \sigma_M^*, (j = 1, \dots, M)$$

(eq. 13)

Il modello diretto contiene la distribuzione del parametro fisico, determinato a priori sulle osservazioni dell'utente, ed è espresso come la soluzione all'equazione differenziale (eq.12), precedentemente illustrata. Nel processo di inversione si intende determinare il miglior set di vettori m^* (eq. 13) che meglio fitta con i dati utilizzati nel modello diretto (eq. 12), ottenuti dalle misure sul campo. Si assume quindi una funzione obiettivo che deve essere minimizzata utilizzando il misfit dei dati (eq.14):

$$\psi_d = \sum_{i=0}^n \left(\frac{F_i(m) - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2 = ||W_d(F(m) - d_i)||^2$$

(eq. 14)

Dove ψ_d rappresenta la funzione obiettivo, n è il numero delle misure considerate, $F_i(m)$ è l'insieme delle misure di resistenza calcolate, d_i è l'insieme delle resistenze misurate, ε_i sono gli errori contenuti nelle misure, W_d rappresenta l'espressione matriciale degli errori. La ricerca del minimo della funzione obiettivo rappresenta una regressione ai minimi quadrati dello scarto tra dato calcolato e dato misurato pesato sull'errore di misura, e può condurre a determinare il miglior set di parametri "m*", nella determinazione di distribuzioni di resistività, questo è un processo che viene eseguito in modo iterativo [Busato L. et al. 2016].

Considerando unicamente il misfit dei dati però si riscontra un problema nel fatto che si dispone di un sistema che è contemporaneamente sovradeterminato in alcune porzioni del dominio e sottodeterminato in altre. In altre parole la soluzione è molto sensibile agli errori nei dati e può portare a distribuzioni di resistività irrealistiche, questo rende necessario vincolare. Si introduce quindi una funzione penalità alla funzione obiettivo in modo che l'inversione non conduca a risultati che sono ritenuti non accettabili. Questa operazione è definita regolarizzazione. L'inversione viene quindi eseguita minimizzando la funzione (ψ) come espresso nell'equazione seguente.

$$Min\psi = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left(\frac{F_i(m) - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2 + \alpha F(\sigma)$$

(eq. 15)

Si osserva come la funzione obiettivo abbia una prima parte relativa ai dati, più precisamente alla somma dei quadrati degli scarti ciascuno pesato sul proprio errore responsabile del fitting dei dati, e una seconda parte che limita l'oscillazione della funzione. Questo tipo di regolarizzazione viene detto tipo Tikhonov. Comunemente all'interno dei codici di inversione, per dati di tipo geoelettrico, la funzione di regolarizzazione è una funzione di lisciatura ed il processo è definito di inversione alla Occam. La funzione di lisciatura limita

l'oscillazione della funzione obiettivo nel processo di fitting dei dati. La relativa importanza della lisciatura rispetto al fitting dei dati è sostanziale e dipende unicamente dall'imposizione del parametro α che dal punto di vista fisico è opportuno scegliere con un certo criterio, in funzione principalmente della qualità dei dati. A questo scopo la stima degli errori sistematici e casuali è fondamentale. Il processo iterativo di ricerca del minimo della funzione obiettivo partirà quindi considerando degli scarti molto grandi e contemporaneamente un modello molto liscio. Questa configurazione impone un valore alto del parametro α , questo indica che si dà più peso alla lisciatura che al fitting del dato. Col procedere dell'analisi il valore dello scarto cala e contemporaneamente aumenta il peso che si dà alla lisciatura, ciò equivale a liberare i gradi di libertà del sistema. Il processo continua fin quando non si ottiene il modello di resistività più liscio compatibile con l'errore dei dati. Eseguire un'inversione alla Occam significa quindi determinare il miglior set di resistività tale da onorare i dati ed avere contemporaneamente una struttura spaziale liscia. Rendere la funzione più scabra e quindi dare minor peso alla lisciatura significherebbe andare a fittare valori di resistività molto alti e molto bassi che rappresentano puri artefatti del processo di inversione, in quanto solitamente non si dispone delle informazioni necessarie per fare raggiungere al modello un tale livello di dettaglio [Binley & Kemna 2005].

Le inversioni dei dati geoelettrici possono essere svolte attraverso diversi software, nel caso preso in analisi, l'inversione è stata operata tramite il software ProfileR.

Con l'avvio del processo iterativo il valore del parametro α , viene modificato continuamente fino a che non viene raggiunto un risultato con un numero basso di iterazioni. Ad ogni step viene calcolato il valore di α e del data-misfit. Il processo si considera concluso quando il data-misfit, che corrisponde alla somma del quadrato degli scarti pesato sull'errore della misura e normalizzato rispetto al numero delle variabili, converge ad un valore desiderato (pari ad 1).

Quando si esegue un'inversione di dati di natura geoelettrica, è necessario tenere in considerazione che il risultato ottenuto non è univoco in relazione alla distribuzione di dati analizzata, in quanto l'inversione consiste in un confronto tra i

dati di campagna con un modello concettuale prefissato, dove si modificano determinati parametri per raggiungere l'obiettivo finale. Diversi modelli possono quindi soddisfare il fitting con i dati sperimentali. Infine bisogna ricordare che la risoluzione delle tomografie ottenute è sempre influenzata dallo schema di acquisizione adottato, dalle caratteristiche geometriche e elettriche del sito e dal rapporto segnale/rumore che viene generato [Cassiani et al. 2007].

2.5 Approccio al time - lapse dei dati ERT

La soluzione di un problema di inversione di una tomografia elettrica consiste nel produrre una distribuzione di resistività che rappresenta il dominio indagato al momento della misurazione. Ma la tomografia di resistività elettrica può essere in grado anche di mostrare le variazioni di resistività elettrica nel tempo, rispetto ad una condizione di fondo o background. Questo approccio è chiamato inversione time-lapse ed è stata sviluppata da Daily et al. [1992] [Busato L. et al. 2016].

È basata sulla seguente equazione:

$$R_{TL} = \frac{R_t}{R_0} R_{hom}$$

(Eq.16)

dove R_{TL} è il rapporto di resistenza, R_t è il valore della resistenza data di un quadripolo al tempo t di acquisizione, R_0 è la resistenza del medesimo punto ad un tempo precedente zero e R_{hom} è la resistenza risultante da un modello di distribuzione di resistività omogenea. Se la resistività omogenea del modello è pari a $100 \Omega m$, e l'equazione descritta è calcolata per ciascuna misurazione appartenente a un set comune, ovvero da misurazioni effettuate solo dagli stessi quadripoli aventi il medesimo livello di errore, il nuovo set di dati risultante verrà invertito e ciascuna delle misurazioni rappresenterà le variazioni in termini di resistività tra l'acquisizione dello sfondo ($t_0 = 0$) e l'acquisizione corrente (t),

esprimendo il risultato espresso come rapporto di resistività percentuale. Questo parametro mostrerà un aumento della resistività se i valori saranno superiori al 100%, mentre indicherà una diminuzione della resistività se i valori saranno inferiori al 100%. Ne consegue che un rapporto di resistività pari al 100% non indica variazioni di resistività.. La rappresentazione di questa grandezza fisica come variazione temporale è un metodo di rapida applicazione che permette di rimuovere le variazioni di resistenza dovute dalla geologia del sottosuolo, come si osserva nelle sezioni con valori assoluti. Le tomografie in time-lapse offrono il vantaggio di poter monitorare la variazione di un parametro fisico rendendolo indipendente dall'influenza delle strutture che si trovano nell'intorno e all'interno, in quanto quest'ultime sono sempre costanti e fisse nel tempo nella quale si effettua il confronto nel tempo. La possibilità di poter confrontare dataset di uno stesso profilo nel tempo è stato un punto fondamentale nello studio e monitoraggio di diversi esperimenti che hanno interessato le acque sotterranee perché risulta molto semplice da svolgere sul campo e non troppo dispendiosa da svolgere ed applicare.

L'interpretazione dei risultati in time-lapse permette di comprendere meglio i comportamenti in sistemi molto eterogenei, come risulterà in seguito la situazione di questo sito durante l'elaborazione dei dati.

2.6 Polarizzazione indotta

Il fenomeno della polarizzazione indotta (IP) è stato scoperto nei primissimi decenni del 1900 da Conrad Schlumberger. Dai suoi studi notò che in determinate situazioni dell'esplorazione mineraria, con il metodo geoelettrico, la differenza di potenziale all'interruzione della corrente misurata agli elettrodi M e N tornava a zero con un ritardo maggiore rispetto al normale. Grazie a questa osservazione si posero le basi per l'esplorazione di giacimenti minerari, ma si dovrà aspettare qualche decennio per una diffusione vera e propria della tecnica. Infatti, durante queste fasi iniziali nello sviluppo della tecnica della polarizzazione indotta, l'uso quantitativo del metodo è stato ostacolato da limitazioni strumentali e

computazionali. Successivamente, con l'avanzamento della strumentazione multicanale, con una migliore precisione di misura e la disponibilità di potenti computer per risolvere numerosi problemi numerici, la polarizzazione indotta ha iniziato a svilupparsi in uno strumento di esplorazione quantitativa [Kemna et al. 2012].

Dagli anni '50, il metodo IP diviene ampiamente riconosciuto, soprattutto per quanto riguarda la prospezione di mineralizzazione di solfuri e ossidi. Nel corso degli anni, la polarizzazione indotta è stata usata sempre di più per applicazioni ambientali e per l'industria petrolifera. Dal 1990 in particolare, c'è stata una nuova e crescente evoluzione della strumentazione di laboratorio; le innovazioni, dal punto di vista tecnologico e d'interpretazione delle misure, che hanno reso possibile l'uso della polarizzazione indotta per quanto riguarda la caratterizzazione idrogeologica della parte più superficiale del terreno, l'individuazione ed il monitoraggio di contaminazioni. Oggi il metodo della polarizzazione indotta viene applicato soprattutto in campi d'indagine geologico-ambientale e al controllo dei terreni inquinati, mentre il campo dell'esplorazione mineraria è diventato di interesse secondario.

La polarizzazione indotta comprende un insieme di fenomeni transitori che avvengono nel terreno quando viene sottoposto ad un campo elettrico applicato tramite un dispositivo quadripolare ABMN classico, quindi con AB elettrodi energizzanti e con MN elettrodi potenziometrici. Energizzando il terreno per un certo tempo e misurando la differenza di potenziale agli elettrodi potenziometrici, si osserverà che, se una qualsiasi formazione nel sottosuolo investita dalla corrente si polarizza, nel momento in cui si interrompe la corrente, la differenza di potenziale misurata agli MN non cade istantaneamente a zero ma anzi, si scarica in un certo tempo [Santarato et al. 2015].

Il comportamento del terreno è quindi simile a quello di una distribuzione di condensatori che si caricano o scaricano attraverso delle resistenze e il tempo richiesto per ripristinare le condizioni di equilibrio sono funzione del grado di polarizzabilità del terreno. I maggiori fattori che determinano la PI sono la composizione mineralogica, la tessitura del terreno, la percentuale d'acqua

contenuta e la composizione chimica dell'acqua interstiziale [Santarato et al. 2015].

Esistono due principali meccanismi che causano la polarizzazione indotta e sono la polarizzazione di elettrodo e la polarizzazione di membrana (vedi *Fig. 14*). La polarizzazione di elettrodo (chiamata anche metallica) avviene se c'è presenza di minerali metallici come ossidi o solfuri. Al passaggio di corrente gli ioni si addensano sull'interfaccia del granulo conduttore, per assorbire o cedere elettroni al granulo. Si crea così un ostacolo al flusso di corrente in quanto si avrà un addensarsi di cationi e anioni a monte e a valle del granulo e si creerà un doppio strato elettrico. Si realizza dunque una resistenza addizionale transitoria chiamata "sovratensione" o "overvoltage", che provoca una variazione continua della differenza di potenziale misurata agli elettrodi potenziometrici durante il passaggio della corrente. Una volta cessata l'iniezione di corrente i due doppi strati si neutralizzano, ma mantengono per un certo tempo un flusso di corrente misurabile dal voltmetro e rappresentabile come curva di scarica. La polarizzazione di membrana invece, avviene quando nel terreno c'è la presenza di particelle di minerali silicatici fibrosi o lamellari sulle pareti dei pori nel caso sia presente un fluido interstiziale. Per la polarizzazione di membrana è quindi necessaria la presenza di minerali carichi negativamente sulla superficie dei pori, così che possano attrarre cationi e formare un doppio strato elettrico diffuso (detto adsorbimento cationico o "cation exchange capacity" CEC). Le particelle di argilla e i fillosilicati in generale, sono i minerali dove si realizza meglio questa situazione, per via della loro struttura elementare tetraedrica, dove gli ossigeni carichi negativamente attirano i cationi presenti nel fluido. L'addensamento di cationi determina una parziale ostruzione dei pori e nel momento del passaggio della corrente immessa dagli elettrodi energizzanti il passaggio ne risulta ostacolato. Al cessare della corrente esterna le nubi ioniche si neutralizzano per diffusione, mantenendo una corrente transitoria dello stesso segno di quella applicata. Quello che si viene a creare è molto simile a quello che si produce per la polarizzazione di elettrodo e dà luogo ad una curva di scarica (generalmente di ampiezza minore).

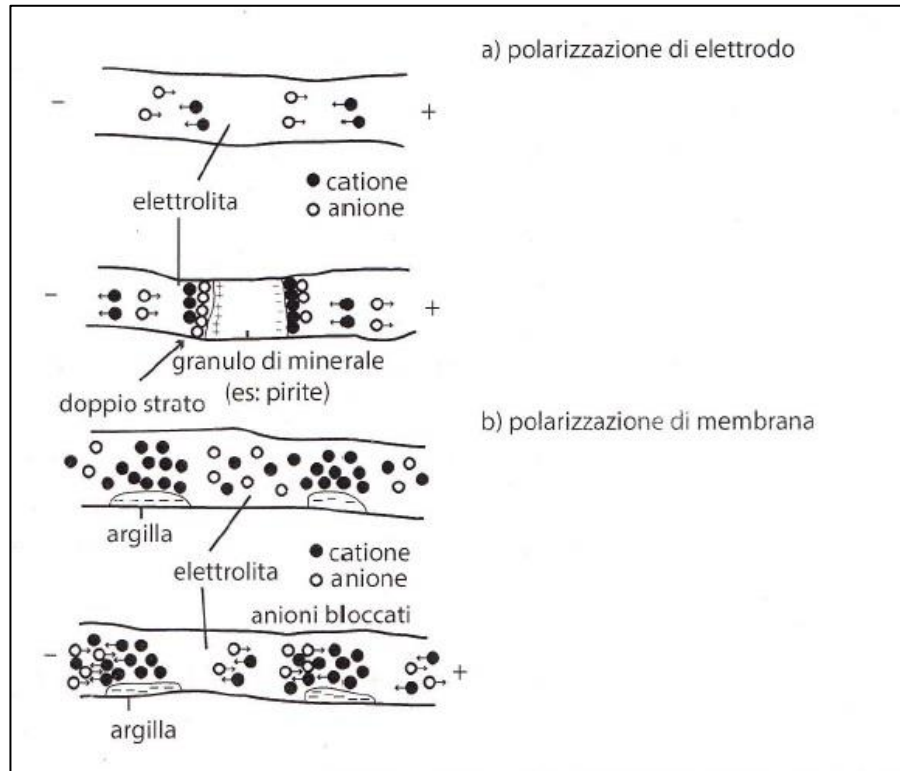


Fig. 14 - Meccanismi principali della polarizzazione indotta [Santarato et al. 2015].

La polarizzazione di membrana è influenzata dal contenuto salino dell'elettrolita, e l'estensione della nube cationica ha una distanza caratteristica detta distanza di interfaccia d_{int} ed è funzione della permittività elettrica del fluido ϵ , della concentrazione normale dell'elettrolita v , della valenza n , della carica elementare e , della costante di Boltzman k e della temperatura assoluta T , come si vede nella seguente equazione:

$$d_{int} = \frac{\epsilon k T}{2e \sqrt{n v}}$$

(Eq.17)

Nei sedimenti sciolti esiste una percentuale ottimale dei minerali di argilla per la polarizzazione di membrana ed è compresa su una quota del 3-8%, dunque i sedimenti sciolti con maggiori capacità polarizzabili sono le sabbie limoso-argillose [Santarato et al. 2015].

Esistono differenti metodi per misurare la polarizzazione indotta: la si può fare nel dominio del tempo o nel dominio della frequenza. Nel dominio del tempo viene misurato il decadimento del potenziale creatosi al momento in cui viene interrotta la corrente.

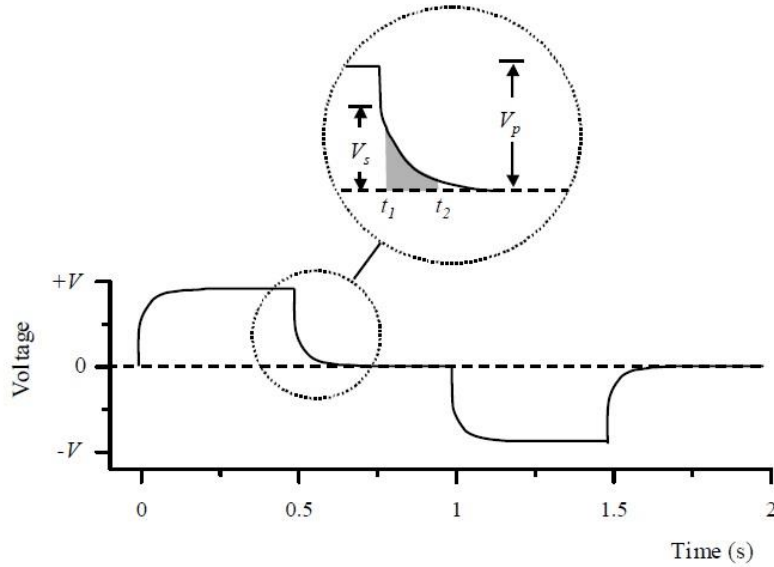


Fig. 15 - Misura della polarizzazione indotta dal dominio del tempo, nel dettaglio è possibile notare la curva di scarica [Binley & Kemna 2005].

Come è riportato in *Fig. 15*, l'andamento della curva di scarica è quello che ci interessa, in particolare il parametro misurato in questo modo è la caricabilità M . La diminuzione graduale (piuttosto che brusca) della tensione misurata è una funzione complessa della polarizzazione della carica elettrica all'interfaccia fluido-grano e della conduzione all'interno del fluido dei pori e lungo i bordi dei grani. Seigel (1959) ha definito la caricabilità apparente come:

$$M_a = \frac{V_s}{V_p}$$

(Eq.18)

dove V_s è la tensione secondaria, ovvero la tensione immediatamente dopo lo spegnimento della corrente, mentre V_p è la tensione primaria.

La tensione secondaria però risulta difficile da misurare con precisione sul campo e, di conseguenza, la si va a calcolare tramite l'utilizzo di un integrale, come viene descritta dalla seguente formula:

$$M_a = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt$$

(Eq.19)

dove M_a è la caricabilità apparente ed è indice di quanto è “caricabile” il mezzo investigato, V_p è il voltaggio iniziale e $V(t)$ è la differenza di potenziale di scarica, mentre t_1 e t_2 sono l'intervallo di tempo sulla curva di scarica (vedi Fig. 15). Dal momento che $V(t)$ è molto più piccolo di V_p si esprime questo parametro in millivolt su Volt (mV/V). L'intervallo di tempo può essere compreso tra 0.1 e 10s.

Nel dominio della frequenze invece, non viene più usata una corrente pulsata, ma si utilizzerà una gamma di correnti a diverse frequenze iniettate nel terreno, che vanno solitamente da 0,1 Hz a 10 Hz e vengono misurate l'ampiezza e la fase della risposta in termini di potenziale. Generalmente si usa un'onda quadra per energizzare il terreno e l'effetto di carica porterà a tensioni agli elettrodi di potenziale con ampiezza diversa al variare del periodo dell'onda, ovviamente a patto che si mantengano invariate le ampiezze del segnale agli elettrodi energizzanti. Vengono utilizzate due diverse frequenze di investigazione, una più bassa e una più alta. Alla frequenza più alta la differenza di potenziale misurata agli elettrodi potenziometrici rimarrà più bassa, perché c'è meno tempo per l'innescio della sovratensione o “overvoltage”. Quindi, in sostanza, si avrà una resistività apparente variabile al variare della frequenza.

In questo caso il parametro misurato è il *Frequency Effect* (FE) o “effetto frequenza”, così espresso:

$$FE = \frac{\rho_a(f_2) - \rho_a(f_1)}{\rho_a(f_1)}$$

(Eq.20)

Dove $\rho_a(f_2)$ sta ad indicare la resistività apparente ottenuta dall'utilizzo di un'alta frequenza, mentre $\rho_a(f_1)$ indica la resistività apparente derivante dall'uso di una

bassa frequenza. Questo parametro è spesso indicato come valore percentuale ed in quel caso prende il nome di *Percent Frequency Effect* (PFE) o “effetto frequenza percentuale”, e si esprime semplicemente in questo modo:

$$PFE = \frac{\rho_a(f_2) - \rho_a(f_1)}{\rho_a(f_1)} \cdot 100$$

(Eq.21)

Altro parametro d'interesse per questo metodo è il *Metal Factor* (MF) suggerito da Marshall and Madden nel 1959 che si esprime circa con gli stessi parametri nella seguente formula:

$$MF = \frac{2\pi \cdot 10^5 FE}{\rho_a(f_2)}$$

(Eq.22)

Questi due parametri forniscono una misura dell'intensità della polarizzazione.

Sempre rimanendo nel dominio della frequenza esiste una tecnica chiamata polarizzazione indotta spettrale (SIP). Nel metodo SIP i parametri fondamentali di interesse sono resistività ρ e fase ϕ , ed essi variano in funzione della frequenza. Applicando la corrente a diverse frequenze di iniezione, si ottiene uno spettro di impedenze [Binley & Kemna 2005]. La loro misurazione può fornire importanti informazioni riguardanti le caratteristiche mineralogiche e strutturali del suolo, come la dimensione e la saturazione dei pori o il contenuto di argilla.

Per capire meglio il funzionamento, sostituendo una struttura rocciosa porosa, composta da zone di minerali metallici o zone argillose, con un circuito elettrico equivalente, come illustrato in *Fig. 16*, può fornire un esempio del comportamento che avviene sia per la polarizzazione di tipo di elettrodo, che per la polarizzazione di tipo di membrana. Il comportamento del poro con all'interno solamente il fluido avrà un comportamento puramente ohmico e la resistenza alla conduzione elettrolitica, dovuta a questo, è indicata come R_o . La sezione parallela avrà anch'essa una resistenza (indicata come $R1$) puramente resistiva legata al percorso, ma subirà anche un effetto di capacitanza e/o impedenza dovuto al granulo, che rappresenta la resistenza della soluzione nei passaggi dei pori contenenti argilla o minerali metallici (Zm).

L'impedenza Z_m rappresenta presumibilmente una carenza o eccesso di ioni in prossimità di particelle di argilla nel caso della polarizzazione della membrana, o un'interfaccia metallico-ionica per la polarizzazione degli elettrodi. Nelle prime descrizioni del circuito, Z_m era conosciuto come impedenza di Warburg [Telford et al. 1990]. Se nel circuito viene immessa una corrente sinusoidale a frequenza variabile, si otterrà un'impedenza variabile con la frequenza.

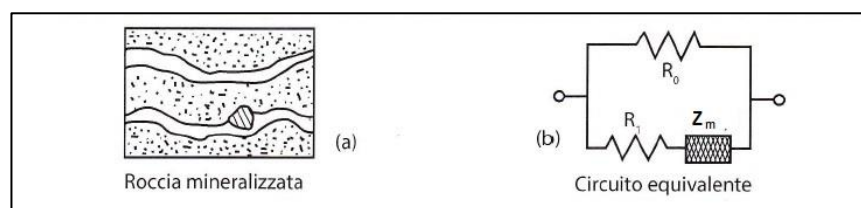


Fig. 16 - L'immagine rappresenta: in (a) un volume di sottosuolo polarizzabile e in (b) un circuito elettrico equivalente.

Per investigare questi effetti, alcuni ricercatori hanno condotto misurazioni di laboratorio SIP su campioni di terreno contaminati artificialmente o su roccia e hanno dimostrato che la risposta SIP del suolo e delle rocce è sensibile ai cambiamenti nelle proprietà delle superfici dei grani (dimensione e forma dei grani, spazio tra le particelle di terreno) corrispondentemente a contaminanti organici e inorganici.

La tecnica SIP, negli ultimi anni, è stata utilizzata per determinare la conducibilità idraulica sia in laboratorio che in campo; infatti sono stati stabiliti dei collegamenti tra SIP e le proprietà meccaniche dei terreni e delle rocce, nonché quelle idrauliche in ambiente saturo ed insaturo. Un utilizzo interessante di questo metodo risiede, infine, nella comprensione dei meccanismi di contaminazione organica dei suoli e delle falde acquifere. Questa applicazione ha subito di recente un'accelerazione con l'uso delle misurazioni SIP in laboratorio. Infatti è stato dimostrato che queste misure sono in grado di valutare, su campioni, le attività microbiche e quindi di rilevare la contaminazione organica. In generale si è visto che un aumento dell'attività biologica di microbi corrisponde a livelli più elevati di materia organica negli acquiferi [Kemna et al. 2012].

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, va detto che la caricabilità apparente misurata dipenderà dalla finestra temporale utilizzata (quindi l'intervallo $t_1 - t_2$), il PFE dipenderà dalle due frequenze di iniezione selezionate e l'angolo di fase dell'impedenza dipenderà dalla frequenza di iniezione. Inoltre, tutte queste proprietà misurate saranno una funzione della conduttività del fluido nei pori e della polarizzazione della superficie del grano. In tal modo, un sondaggio IP può essere utilizzato per fornire informazioni sulla conduttività dello spazio dei pori (ad es. Composizione chimica dei fluidi nei dei pori), come in un'indagine di resistività convenzionale, insieme a informazioni sulla chimica della superficie del grano [Binley & Kemna 2005].

Inoltre, benché esista anche la possibilità dell'utilizzo di misurazioni condotte nel dominio della frequenza, la maggior parte delle misure condotte sul campo della tecnica della polarizzazione indotta, sono effettuate con misure nel dominio del tempo, anche perché la maggior parte dei georesistivimetri multielettrodi commerciali non sono in grado di acquisire informazioni nel dominio della frequenza, ma solo nel dominio del tempo e quindi misurano un numero di punti su una curva di decadimento, determinando il solo parametro della caricabilità. Alcuni degli strumenti moderni digitalizzano il segnale a frequenze di campionamento relativamente elevate e consentono l'analisi di Fourier nel dominio della frequenza. In tal modo, gli strumenti nel dominio del tempo possono anche fornire una misura dell'IP in termini di resistività complessa, sebbene l'intervallo di frequenza sarà limitato dalla frequenza di campionamento dello strumento [Binley & Kemna 2005].

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati in polarizzazione indotta sul campo, l'approccio è molto simile a quello dei metodi tomografici di resistività. Per migliorare la qualità delle acquisizioni per l'IP, sarebbe ideale che gli elettrodi potenziali fossero non polarizzabili (elettrodi che non mantengono alcuna carica) in modo che tutto il segnale osservato provenga dal terreno stesso, anche se l'utilizzo degli elettrodi convenzionali classici ha dato comunque esiti positivi con un certo successo. Per evitare effetti di accoppiamento elettromagnetico, il cavo utilizzato per l'iniezione di corrente dovrebbe essere corto e isolato dai cavi

collegati agli elettrodi potenziali (per quanto possibile). Gli array in configurazione dipolo-dipolo per le indagini sulla superficie del suolo sono spesso preferibili, perché producono effetti di accoppiamento minimi e garantiscono condizioni operative più sicure (in particolare per i lunghi transiti di rilevamento). Per i rilevamenti IP, le correnti di iniezione spesso devono essere più elevate di quelle utilizzate per la resistività a corrente continua per garantire buoni rapporti segnale-rumore. Questo è particolarmente importante quando si utilizza una configurazione di elettrodi dipolo-dipolo [Binley & Kemna 2005].

3. Cenni sulla bonifica e sulla chimica dei contaminanti

3.1 Stato del sito

Secondo le indagini dell'agenzia regionale ARPAE (Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna), nell'area ferroviaria del comune di Bologna è stata identificata una contaminazione. Infatti, nella zona ferroviaria e più precisamente in zona “Via de' Caracci”, a causa di lavori di ampliamento dell'area dovuti all'alta velocità ferroviaria, è stato aperto un procedimento nel 2004 da parte del comune di Bologna durante i lavori di cantierizzazione. La contaminazione principale è stata causata dalle attività di manutenzione e di lavaggio materiale rotabile con l'utilizzo di solventi alogenati, dispersi dalla superficie e concentrati nei primi orizzonti del suolo all'interno di una falda freatica e di una confinata. Per bonificare tale sito, è stato eseguito uno studio di fattibilità che prevede per la matrice acque, l'applicazione di una tecnica di biorisanamento attraverso la dealogenazione anaerobica [ARPAE (2015) Catasto dei siti contaminati]. Un nuovo procedimento viene avviato nel 2011 al momento della cantierizzazione per la realizzazione della Nuova Stazione Centrale. La contaminazione principale che è stata diagnosticata, è stata causata probabilmente dalle medesime sorgenti che hanno interessato l'area della stazione Alta Velocità ed in particolare la falda confinata. La posizione del plume rende sicuramente difficile individuare una soluzione efficace in quanto si pone in un'area complicata sotto numerosi aspetti. Essa infatti si distribuisce al di sotto delle linee ferroviarie che costituiscono un principale nodo per il trasporto nazionale, impossibile da interrompere. Ad essa si deve aggiungere anche la difficoltà di accesso per le operazioni tramite gli strumenti e macchinari necessari allo scopo. Inoltre c'è anche da considerare il fattore temporale nell'evoluzione del plume, sia dal punto di vista della natura del contaminante (composti organici subiscono naturale riduzione nel tempo) che da quello della sua mobilità. Come si può osservare nella *Fig. 17* presa dall'allegato al rapporto istruttorio dalla caratterizzazione redatto nel 2004, la contaminazione viene delimitata in una posizione leggermente più arretrata verso sud, rispetto al punto dove è stato

eseguito il trattamento. Questo trattamento di bonifica eseguito nel 2016 è di fatto un test realizzato su una piccola superficie dell'area del sito inquinato. Lo scopo del lavoro stava nel constatare se mediante nuove miscele preparate in collaborazione con l'Università di Roma, si potevano ottenere risultati soddisfacenti per la riduzione delle concentrazioni di questi inquinanti.

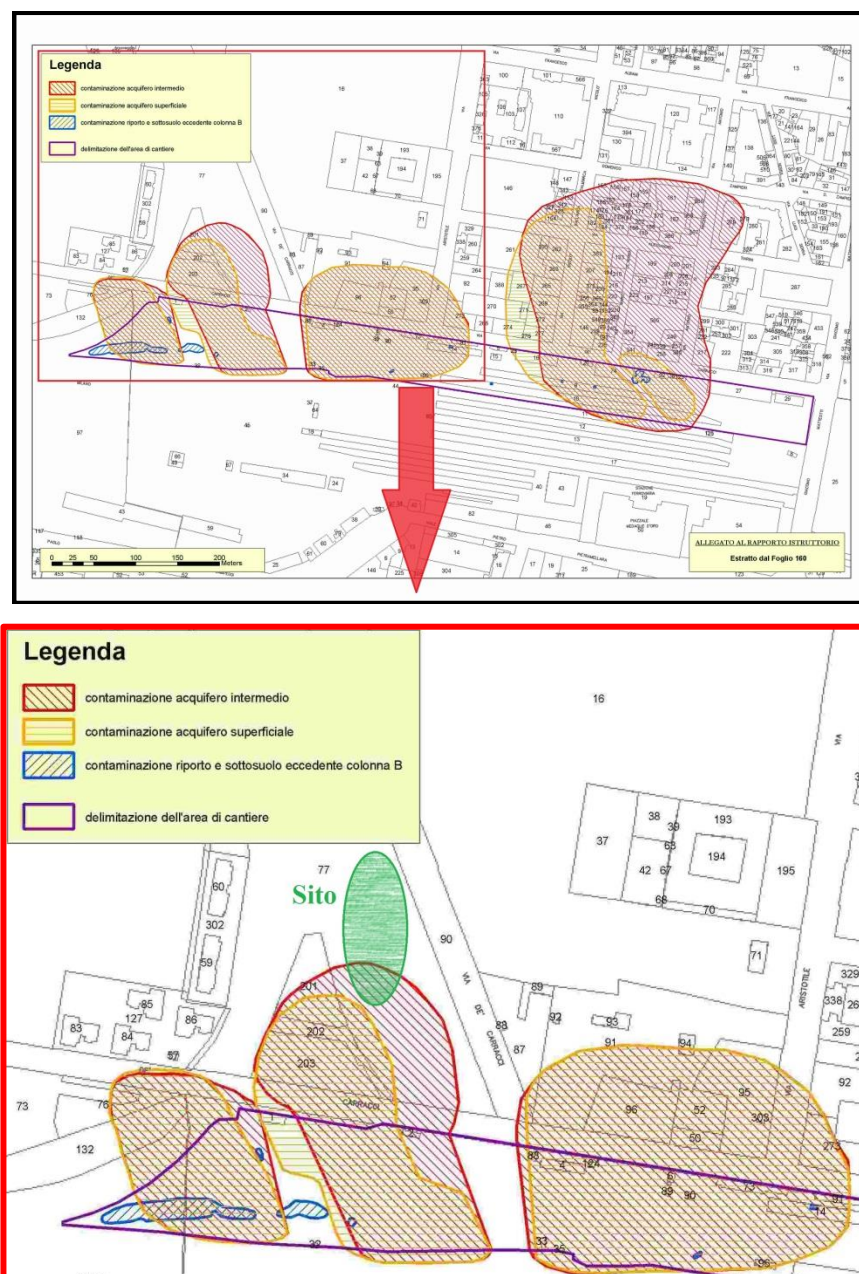


Fig. 17 - Dettaglio del rapporto istruttorio presentato al comune di Bologna.

3.2 Natura chimica dei contaminanti e pericolosità

Come già detto, all'interno della falda acquifera è stata rilevata da molto tempo la presenza di determinati composti organici clorurati. Per la precisione le due sostanze identificate durante le indagini e oggetto di trattamento per la prova di bonifica attuata erano il tetracloroetilene, chiamato anche come percloroetilene (PCE) e il tricloroetilene (TCE) come illustrato in *Fig. 18*.



Fig. 18 - Struttura degli eteni clorurati descritti.

Entrambe le sostanze sono caratterizzate da un diene alla base, ovvero due atomi di carbonio uniti in un doppio legame e possiedono rispettivamente quattro e tre atomi di cloro. Alle condizioni ambientali standard, entrambe le sostanze si presentano in forma liquida, con una densità maggiore di quella dell'acqua e con una limitata solubilità in essa. Solitamente costituiscono fasi separate o immiscibili (fase densa non acquosa, o DNAPL). Quando c'è dispersione in falda di queste sostanze, queste tendono a migrare verticalmente ed accumularsi sul fondo nel momento in cui incontrano degli orizzonti impermeabili e quindi sul letto dell'acquifero.

Come detto in precedenza e come si trova descritto nel catasto dei siti inquinati dell'ARPAE, queste sostanze erano e sono piuttosto utilizzate come solventi nello sgrassaggio dei metalli e nell'industria chimica. Dal punto di vista della salute sono sostanze tossiche e la loro pericolosità è legata principalmente all'ingestione e all'inalazione, di cui esiste anche un rischio reale perché entrambe risultano essere sostanze volatili. I principali problemi che possono creare alla salute umana nel breve periodo sono legati soprattutto al sistema nervoso centrale, al fegato e ai reni. In riferimento a quanto stabilito dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca

sul Cancro (ARIC), queste sostanze sono indicate come potenzialmente dannose all'interno del gruppo 2° [Marin 2017].

Dal punto di vista ambientale non sono sostanze che dovrebbero essere presenti in natura, in quanto di produzione antropica. La massima concentrazione limite ammessa nelle matrici ambientali è indicata all'interno del D. Lgs. 152 / 2006, Parte IV, Titolo V, Allegato 5 nella tabella 1 per suolo e sottosuolo e tabella 2 per acque sotterranee.

Sostanza	Valori limite		
	Acque sotterranee (µg/L)	Terreni (mg/kg)	
		A ¹	B ²
Tetracloroetilene (PCE)	1,1	0,5	20
Tricloroetilene (TCE)	1,5	1	10
Dicloro etilene (DC)	0,05	0,1	1
Cloruro di vinile (CV)	0,5	0,01	0,1
¹ A= siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale			
² B= siti ad uso commerciale e industriale			

Tabella 1- Estratto delle tabelle contenute all'interno del D. Lgs. 152 / 2006, Parte IV, Titolo V, Allegato 5

I valori che presenta la contaminazione del sito risultano di almeno dieci volte superiori rispetto alle massime concentrazioni ammesse per legge dalle CSC. Questo significa che erano presenti più di 15 µg/L di TCE e 11 µg/L di PCE nelle acque nel sito, con punte massime indicate dall'azienda esecutrice dei lavori di 100 µg/L [Marin 2017].

3.2 Bonifica del sito

La contaminazione presente all'interno del sito bolognese, nonostante si trovasse a concentrazioni maggiori di dieci volte le rispettive CSC (concentrazioni soglia di contaminazione) indicate dalla legislazione (vedi *Tabella 1*), purtroppo non risultavano sufficienti per fornire una buona resa con i trattamenti classici come il

pump and treat e non vi erano presenti nemmeno le condizioni per rendere efficiente la bioattenuazione. In questo contesto la volontà delle diverse aziende è stata quella di provare a sfruttare la biodegradazione dei composti organici, utilizzando quindi un processo di attenuazione naturale, cercando di portare il sistema alle condizioni più favorevoli per ottimizzare al meglio il lavoro dei microrganismi interessati ai processi di biodegradazione. Infatti, i solventi clorurati come il percloroetene (PCE) e il tricloroetene (TCE) sono sostanze biodegradabili per natura se vi è la presenza di determinati microorganismi all'interno del suolo superficiale e la tecnica tramite la biodegradazione è considerata, in genere, il processo migliore per la riduzione di questo tipo di sostanze nelle acque.

La velocità delle reazioni dipendono sempre dalle condizioni nell'intorno, cinetiche e redox. PCE e TCE tendono ad opporre resistenza alla sostituzione in ambiente aerobio, mentre esiste la possibilità di sostituire i gruppi alogenati in condizioni anaerobiche, degradati tramite il cometabolismo dei batteri che sfruttano queste reazioni per ottenere energia [Marin 2017].

Il fenomeno prende il nome di dechlorinazione riduttiva (vedi *Fig.20*) prevedendo l'impiego di PCE e TCE come accettori di elettroni in ambiente anaerobio e consiste in una serie di reazioni dove viene sostituito un atomo di cloro con un atomo di idrogeno (vedi *Fig. 18*), portando il PCE in TCE, poi in di-cloroetilene (DCE), successivamente in cloruro di vinile (VC) ed infine in etene. L'intera reazione ha però l'effetto di creare un aumento nel tempo di cloro nel sistema, ma soprattutto alla formazione e concentrazione di sostanze come il cloruro di vinile, che sono anche più pericolose per la salute umana rispetto ad alcune delle forme precedenti. Per questo è fondamentale assicurarsi che tutta la catena di reazioni raggiunga la conclusione, verificando il tasso e resa delle reazioni. Per assicurarsi ciò, sono state prima effettuate delle prove in laboratorio che servivano a dimostrare l'efficacia dell'approccio (vedi *Fig. 19*).



Fig. 19 - Prove test in laboratorio con test in colonna.

Esiste una grande varietà di microorganismi che intervengono e spesso non esiste un'unica specie in grado di compiere l'intera catena di reazione, ma ognuna si concentra su una o due reazioni. Tra i microorganismi che si distinguono all'interno del processo della decolorinazione riduttiva sono sicuramente quelli appartenenti al genere "*Dehalcoccoides*", i quali danno un grande contributo nella trasformazione tetracloroetene (PCE) in etene. Dal momento che la normativa vigente non consente l'introduzione di microorganismi nelle acque sotterranee è stato importante effettuare una verifica della presenza all'interno del suolo di questi microorganismi, prima di procedere con questo tipo di trattamento.

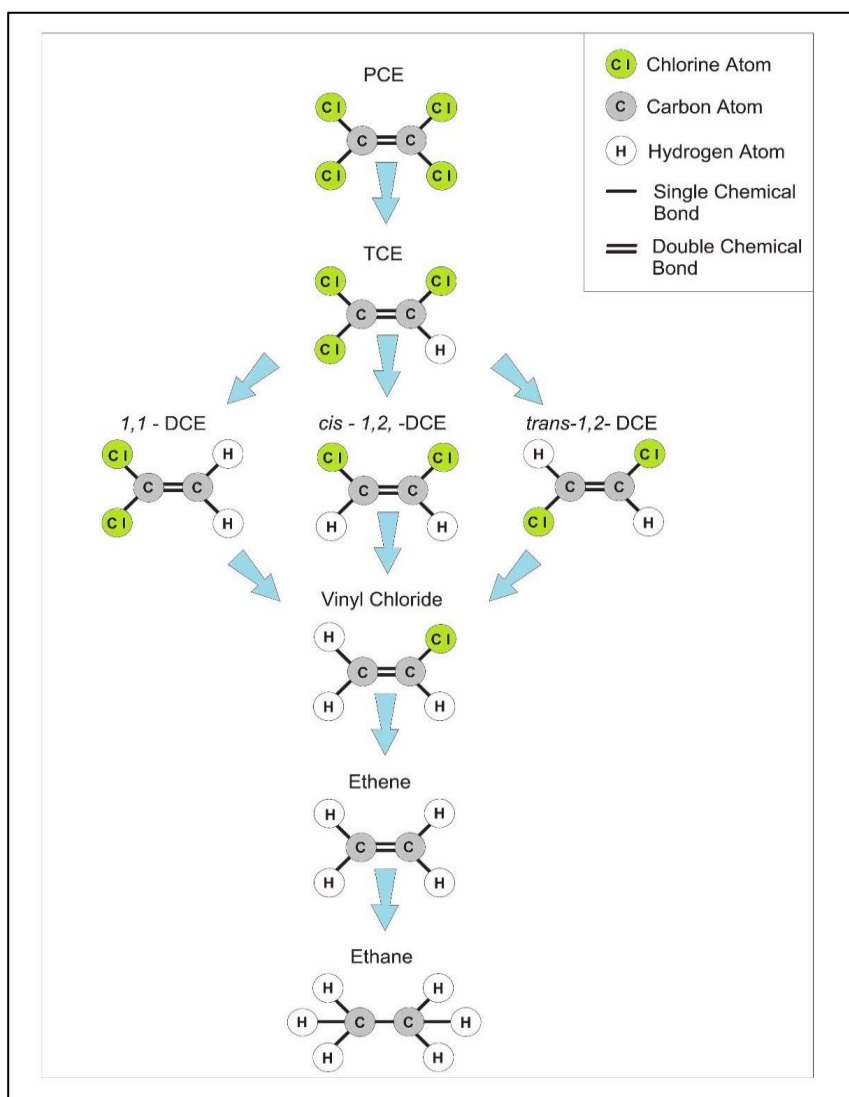


Fig. 20 - Fasi della dechlorinazione riduttiva, dove un atomo di cloro viene progressivamente sostituito da uno di idrogeno

Il progetto della bonifica è stato dunque basato sul trattamento in situ del plume di contaminazione attraverso una combinazione di adsorbimento dei composti clorurati unito alla tecnica di riduzione biologica degli stessi, senza l'estrazione di acqua dalla falda.

Per svolgere questo lavoro la compagnia che aveva in carico la bonifica, intendeva sfruttare un prodotto specifico sperimentale, che è stato possibile produrre grazie alla partecipazione al progetto del dipartimento di chimica dell'Università La Sapienza di Roma. Questa situazione ha fatto sì che risulti la

prima applicazione in Europa di un trattamento di questo genere nei confronti di solventi organici clorurati in acquifero. L'intervento ha previsto l'iniezione nel terreno di una miscela sperimentale di carboni attivi in soluzione.

L'azienda che ha prodotto questa miscela in collaborazione con l'Università La Sapienza di Roma è la Regenesi, che è un'azienda specializzata nel trattamento di siti contaminati, la quale ha varie sedi in Europa, di cui una in Italia (Torino) e oltre ad aver prodotto la soluzione per il recupero del sito, si è anche occupata dell'iniezione di questa soluzione nelle acque sotterranee.

Delle sostanze iniettate per favorire l'attenuazione naturale, sono sostanzialmente due gli elementi fondamentali che hanno caratterizzato questa tipologia di bonifica.

In primo luogo l'utilizzo del carbone attivo colloidale, identificato con il suo nome commerciale PlumeStop®, che ha servito da agente adsorbente ponendosi in prima linea nel trattamento della contaminazione. Si tratta fondamentalmente di particelle di carbone dalle dimensioni estremamente piccole, dal diametro inferiore di 2.5µm, al fine di andare in sospensione in una soluzione acquosa. La sostanza è stata costruita appositamente per questo utilizzo e si prevede che sia temporaneamente mobile all'interno del suolo. La sospensione si presenta con un colorazione nera.

Il secondo elemento di primaria importanza è stato l'utilizzo degli ammendanti zuccherini, che sono sostanze donatrici di elettroni necessarie per sostenere la crescita della carica microbica nel suolo, per ridurre le condizioni di Redox e attivare condizioni anaerobiche e quindi per accelerare il processo di bioattenuazione. È stato poi aggiunto un mix di più sostanze, principalmente acido lattico e glicerolo.

Come indicato, il carbone ha avuto un ruolo molto importante per il trattamento e la sua struttura estremamente fine gli dovrebbe aver permesso di infiltrarsi all'interno della porosità aderendo poi alle particelle solide come un microfilm, senza compromettere il flusso della falda. Le ridotte dimensioni gli forniscono una superficie specifica elevata per operare sui contaminanti adsorbendoli. Il processo ha lo scopo di estrarre direttamente i contaminanti PCE e TCE dalla fase acquosa

e renderli disponibili ai microorganismi che colonizzano il “PlumeStop®”, i quali nutrendosi dei contaminati permetteranno la bioattenuazione. Il carbone ha infatti anche lo scopo di offrire una superficie utile alla colonizzazione dei microorganismi. Col tempo, mentre la biodegradazione procede, si rigenerano gli spazi di adsorbimento consentendo ai carboni attivi di assorbire più contaminati continuando a catturare e a favorire la distruzione della contaminazione, incentivando la sua retrodiffusione dal suolo. Questo ciclo innesca nell’acqua un movimento del contaminante dalla fase acquosa al carbone, fondamentale per una buona riuscita della bonifica. Infatti, un contaminante all’interno dell’acquifero si concentra preferibilmente nella zona a maggiore conducibilità idraulica, ma progressivamente con l’instaurarsi di diversi fenomeni tende ad accumularsi in parte anche nelle zone a minore permeabilità per diffusione chimica (differenza di gradiente di concentrazione in soluzione) [Marin 2017]. Queste masse sono pericolose in quanto, seppur lentamente, possono uscire dall’acquitardo e/o acquiclude che li contiene e la miscela iniettata non viene mai inserita all’interno degli orizzonti a minore conducibilità idraulica, come ad esempio nello strato argilloso che intercorre tra i due acquiferi (colonna stratigrafica, 11 -16m, vedi *Fig.8*). Quindi proprio grazie a questo effetto di retrodiffusione i PCE e TCE presenti all’interno degli strati meno permeabili, tendono nel tempo a muoversi dall’orizzonte argilloso verso i due acquiferi per andare incontro alla bioattenuazione prevista dal trattamento. In una limitata area nel sito vengono predisposti 13 pozzi ciechi di lunghezza massima 20 metri, dotati di valvole per l’iniezione della soluzione solamente all’interno degli acquiferi e quindi tra 4 - 11m e 16 - 20m. La miscela viene direttamente immessa all’interno dell’acquifero tramite iniezioni a basse pressioni dalle 13 postazioni di iniezione multilivello predisposte nel sito (vedi *Figg. 21-22*), in modo che possa distribuirsi con un flusso dispersivo, iniettando 4 m³ di miscela per pozzetto.



Fig. 21 - Perforazione nel sito dei pozzetti che serviranno per le iniezioni [Regenesi].

L'iniezione a basse pressioni sono state necessarie per non indurre fratturazioni, le quali avrebbero potuto costituire vie di fuga per la soluzione e per ricoprire uniformemente la maggior parte della matrice suolo. Secondo l'azienda, il risanamento iniziale delle acque sotterranee dovrebbe avvenire nel giro di pochi giorni e nell'arco di pochi mesi questo trattamento dovrebbe essere in grado di rimuovere i contaminanti dalle acque di falda e degradarli. Non sono disponibili informazioni dal produttore sulla degradabilità del prodotto nel tempo. Questo test è stato eseguito in altre 3 aree al di fuori di quella presa in studio, intervenendo sempre sullo stesso plume (vedi Fig. 23).

Stando ai rapporti della Regenesi, i dati attualmente disponibili evidenziano una rapida riduzione delle concentrazioni dei composti clorurati all'interno delle aree di trattamento. Nella maggior parte dei piezometri le concentrazioni di tutti i composti clorurati hanno raggiunto gli obiettivi stringenti come le CSC ed in molti casi sono al di sotto dei limiti di rilevabilità. L'azienda si attende che queste concentrazioni si manterranno basse senza effetti di rebound grazie alla continua rigenerazione del carbone attivo determinata proprio dal processo di biodegradazione. Inoltre, grazie alla capacità di autorigenerazione della biomatrice, non si ritiene necessario riapplicare il prodotto [Regenesi].



Fig. 22 - Impianto sul posto per la preparazione della miscela.



Fig. 23 - Localizzazione dei trattamenti eseguiti all'interno del plume dalla Regenesis, l'intervento di nostro interesse è solamente quello localizzato in alto a sinistra. [Regenes].

4. Campionamento dati ed elaborazioni

4.1 Campagna d'indagine

Per ogni tipologia di indagine geofisica, un elemento fondamentale del lavoro risiede nella decisione della scelta della tecnologia da utilizzare per far fronte al problema da risolvere. In questo caso, considerata la tipologia dell'intervento, ovvero l'immissione di una soluzione acquosa all'interno dell'acquifero, andava scelta una tipologia di indagine adatta ad investigare anche al di sotto della tavola d'acqua.

Per questo motivo, anche nelle precedenti misurazioni eseguite nel sito, i metodi elettrici sono stati valutati come i più idonei; nello specifico la tomografia elettrica (già utilizzata in lavori precedenti a questo) e la polarizzazione indotta.

Al fine dello svolgimento di questo lavoro è stato quindi necessario utilizzare dati provenienti da campionamenti precedenti affiancandoli con dati raccolti attraverso nuove misurazioni effettuate sul sito. I dati presi in considerazione sono stati quelli campionati durante le analisi del 2016, periodo nel quale è stata attuata la bonifica, a cui poi si sono aggiunte le misurazioni del 2017 e del 2018. La gran parte dei dati è stata campionata tramite lo strumento disponibile nel Dipartimento di Geoscienze, ovvero un Syscal Pro 72 della IRIS Instrument, che è un georesistivimetro classico in grado di svolgere tomografie elettriche e campionare dati di polarizzazione indotta nel dominio del tempo. Questo strumento è in grado di lavorare fino a 72 canali, ovvero capace di utilizzare 3 stendimenti da 24 elettrodi simultaneamente. Solamente per una misurazione (ad ottobre del 2017) è stato utilizzato uno strumento diverso, ovvero MPT DAS-1, di proprietà dell'Università di Vienna, in grado di effettuare misure sia di tomografia elettrica sia di polarizzazione indotta nel dominio del tempo e della frequenza. Per eseguire questa tipologia di misurazioni i georesistivimetri vengono connessi ad una batteria esterna da 12 Volt per mantenere costanti le loro potenzialità (vedi Fig. 24).



Fig. 24 - Strumenti utilizzati per l'acquisizione dei dati.

Il contatto dello strumento col suolo avviene utilizzando particolari cavi che tramite dei morsetti si collegano a degli elettrodi di acciaio infissi nel terreno. Come già accennato nelle pagine precedenti, il tipo di configurazione scelta per tutte le misure effettuate è stata la dipolo-dipolo, utile per la buona risoluzione orizzontale che è in grado di fornire. I dati acquisiti nella campagna 2016 sono dati finalizzati alla sola misura della tomografia di resistività elettrica e sono stati campionati con una configurazione dipolo-dipolo a skip 4, ovvero uno schema di combinazione di quattro elettrodi AB energizzanti e MN potenziometrici dove ogni coppia di elettrodi è distanziata da altri quattro elettrodi (ad esempio 1-6 e 9-14). Ogni dataset include 5179 combinazioni di quadripoli, i quali contengono sia le misure dirette che le misure reciproche. Il tempo di acquisizione per ogni misura è stato di circa 30 minuti. Le linee sono state collocate in base alla posizione dei pozzetti e tenendo conto dell'area disponibile.

Ogni stendimento riferito ai dati del 2016 contiene 72 elettrodi con spaziatura di 1 metro, per un totale di 71 metri di stendimento. In principio il progetto prevedeva di indagare su 3 linee parallele distanziate tra loro di 3.75 m, dove la linea L1 è la più a Ovest, la linea L2 è quella in centro e la linea L3 è posizionata ad Est (vedi *Figg. 26-27*). La linea L3 però, è stata sin da subito la più problematica delle 3 ed è stata modificata in corso d'opera portandola ad una stendimento comprensivo di soli 48 elettrodi. Nel corso delle elaborazioni questa linea è risultata troppo problematica e non informativa perciò è stata scartata.

Nelle misurazioni effettuate nell'ottobre del 2017 e nel febbraio del 2018 ci si è voluti concentrare solamente sulla linea L2, considerata maggiormente informativa rispetto alla L1. Queste misurazioni volevano focalizzarsi principalmente sull'analisi tramite il metodo della polarizzazione indotta, ma sono stati raccolti dati anche per la tomografia elettrica. Le due misurazioni effettuate hanno previsto l'utilizzo di stendimenti da 64 elettrodi anziché da 72. Questo accorgimento è nato da una limitazione tecnica dello strumento MPT DAS-1, il quale poteva contare solo una serie limitata di elettrodi da utilizzare. Per dare continuità al lavoro nella misurazione effettuata a febbraio, si è voluto mantenere uno stendimento di soli 64 elettrodi, rendendo così confrontabili le due misure.

Per quanto riguarda lo stendimento sulla linea L2 si è cercato di servirsi degli elettrodi infissi usati e lasciati già dalle indagini svolte negli anni precedenti, così da avere la certezza di essere esattamente sovrapposti alla linea L2 precedente. Non sempre è stato possibile trovare l'elettrodo, in alcuni casi sono stati rimossi, quindi si è dovuto posizionarne alcuni provvisori nei punti mancanti (sempre mantenendo la spaziatura di 1m). Dal momento che sono stati usati solo 64 elettrodi il primo elettrodo è stato posizionato saltando le prime 4 posizioni utilizzate nelle misurazioni del 2016.

La superficie del piano di campagna sotto lo stendimento è molto eterogenea: nei primi 10 metri si trova uno strato di cemento, si prosegue poi con 30 metri di terreno non vegetato e nel resto dello stendimento si trova un manto erboso (vedi *Fig. 25*). Il suolo superficiale è un terreno di riporto, con all'interno molti frammenti metallici, come bulloni, chiodi e pezzi di lamiera.



Fig. 25 - Diverse tipologie di terreno dove sono stati infissi gli elettrodi, rispettivamente cemento, terreno di riporto e terreno con copertura vegetale.

Le misure eseguite per la polarizzazione indotta hanno richiesto tempi maggiori rispetto a quelli utilizzati per le indagini di sole tomografie di resistività elettrica eseguite nel 2016. Questo perché, durante la misurazione, va dato tempo allo strumento di determinare l'effetto di caricabilità o di differenza di fase creato dal passaggio di corrente. La misura eseguita nel dominio della frequenza è durata circa 3 ore, mentre l'acquisizione in dominio del tempo è stata effettuata in circa 1 ora. Purtroppo le misurazioni in dominio del tempo hanno avuto dei problemi: per delle complicazioni tecniche legate allo strumento, si è dovuta utilizzare solamente la batteria interna che ha però una autonomia inferiore. Questo ha influenzato il tempo di acquisizione e per precauzione si è preferito campionare con un tempo di 500 millisecondi (per una tomografia di resistività in genere si campiona a 250 millisecondi).



Fig. 26 - Posizione nel sito dello stendimento sulla linea L2.



Fig. 27 - Posizionamento delle 3 linee nel sito.

4.2 Software per l'elaborazione dati

Per quanto riguarda la fase di elaborazione dati sono stati utilizzati vari software tenendo conto della tipologia del dato. Per trattare i dataset di tomografia elettrica, nella fase di prima pulizia del dato si è usato “Process”, che si tratta di un programma eseguibile. Grazie a questo software si è potuto lavorare sulle informazioni raccolte dallo strumento IRIS Syscal Pro. Questo eseguibile ha il compito principale di effettuare un controllo dei reciproci, per questo viene chiesto all'operatore quanto deve essere l'errore di reciprocità da tenere (ϵ_i). “Process” inoltre dà la possibilità di effettuare le classiche operazioni di pulizia del dato togliendo le misure con voltaggi troppo bassi e le misure dette “duplicati”. Queste ultime, sono misure come dice il termine “doppie” e sono presenti perché il Syscal ed altri strumenti simili, hanno molti canali di acquisizione e quindi campionano contemporaneamente tante differenze di potenziale. Per ottimizzare la sequenza di acquisizione, all'inizio della misura, gli vengono forniti dei valori anche doppi per forzare lo strumento ad utilizzare tutti i canali, aumentando così la velocità di acquisizione (ad es. in alcune situazioni lo strumento utilizzerebbe 7/8 canali invece di 10, in questo modo lo si forza ad usarli tutti). Per quanto riguarda l'inversione del dato pulito invece, si è utilizzato sempre un software sviluppato e distribuito liberamente dal Prof. Andrew Binley della Lancaster University (UK), ovvero “ProfileR”. Al programma viene fornito: il dataset, l'errore dei dati (parametro che influenza la soluzione finale e che viene assunto pari a quello utilizzato per filtrare i dati di partenza attraverso l'analisi dei reciproci) ed un unico valore di resistività che costituisce una condizione iniziale di distribuzione omogenea del parametro.

Questo programma ha permesso di passare dalle resistività apparenti registrate dal Syscal in campagna, all'interpretazione delle resistività reali in forma di coordinate nello spazio. Infine, i risultati sono stati inseriti e rielaborati da un programma grafico (Surfer, Golden Software) eseguendo un'interpolazione di tipo kriging che ha reso possibile la visualizzazione grafica dei dati in forma di sezioni di resistività elettrica.

Per quanto riguarda i dati in polarizzazione indotta invece si è utilizzato il programma “Res2dinv” che è un software sviluppato dalla “Geotomo Software” di natura commerciale. Questo programma non dava le stesse capacità di interagire all’interno dei passaggi per l’elaborazione dei dati che davano invece i precedenti software utilizzati per la tomografia elettrica. I dati invece raccolti con lo strumento MPT DAS-1, sono stati elaborati completamente dal professor Adrian Flores-Orozco, perché non c’era la disponibilità di utilizzare software idonei al trattamento di dati di quello strumento e per la polarizzazione indotta nel dominio della frequenza.

4.3 Risultati del monitoraggio geofisico

I risultati del monitoraggio che seguiranno saranno relativi ai dati del sito provenienti dalle misurazioni del 2016 fino alle ultime di febbraio 2018.

Verranno mostrate sia le sezioni degli assoluti relative alla linea L1 che alla linea L2 e poi ci si concentrerà maggiormente su quest’ultima (la linea L3 è stata scartata, come precedentemente descritto).

Le elaborazioni sono state fatte tenendo in considerazione la soglia di errore ottimale per ogni linea, affinché il numero di iterazioni non risultasse troppo elevato. Per quanto riguarda i dati relativi alla campagna di indagine del 2016, le linee L1 sono state valutate idonee ad una soglia di errore dell’11%, mentre per i dati relativi alle linee L2 è stato adottato un errore del 6%. Per i dati campionati nel 2018 è stato usato un errore del 10%.

La prima assunzione che si può trarre dall’analisi qualitativa dei due stendimenti di elettrodi è un generale trend di aumento di resistenza elettrica avvenuta nel tempo. La risoluzione orizzontale è garantita dalla scelta della sequenza dipolo – dipolo.

Come indicato in *Fig. 28* le dimensioni dello stendimento sono tali per cui la risoluzione verticale ottenuta sia adeguata per osservare nel completo il comportamento dell’acquifero più vicino al piano campagna (sia nelle misurazioni

a 72 elettrodi che in quelle a 64). Le quantità di soluzione acquosa inserite sono puntuali e hanno interessato un ordine di volume limitato.

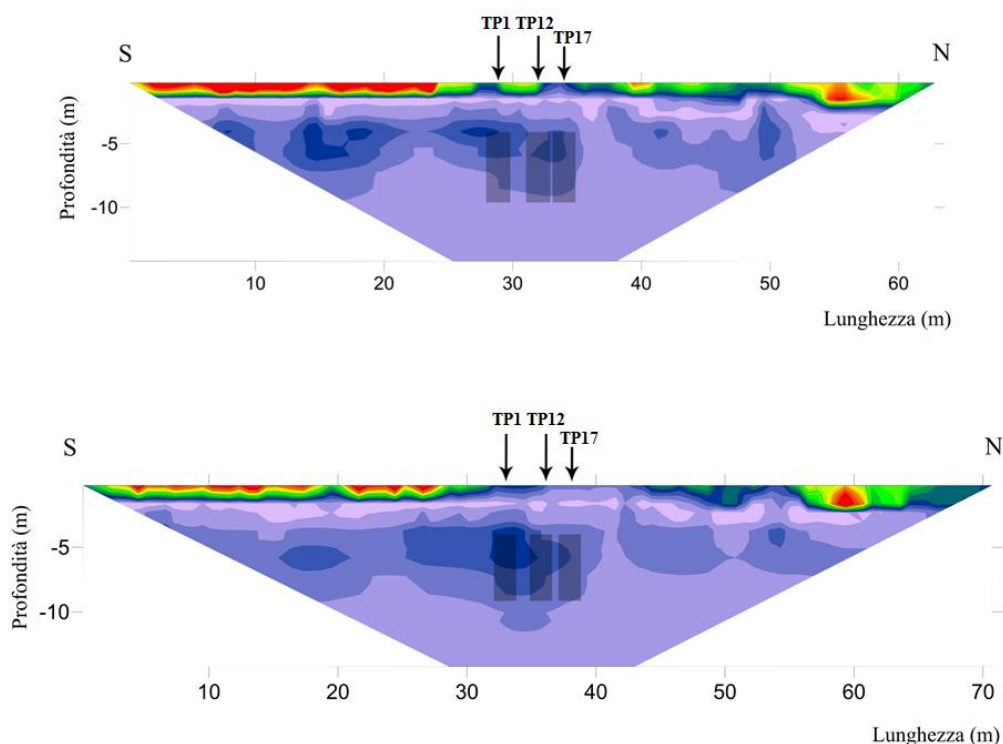


Fig. 28 - Posizione di alcuni pozzetti prossimi alla linea L2 di 64 elettrodi (sopra) e 72 (sotto).

Nei profili (vedi *Figg. 29-30*) si può notare come le resistività nella parte superficiale siano particolarmente elevate, mentre al di sotto dei primi 2 m, le resistività variano su un range compreso tra i 0 e i 100 Ωm circa. Attorno ai 3 m di profondità esiste invece un orizzonte estremamente conduttivo. Infatti, corrisponde ad un terreno argilloso più superficiale tendenzialmente più conduttivo rispetto al sottostante orizzonte sabbioso, anche se non è da escludere che il segnale potrebbe risentire del materiale metallico e/o ferroso presente al suo interno. Rimanendo in superficie si nota che la zona Nord è più resistiva ed è probabile che in questo punto in superficie ci siano delle sabbie-ghiaie che rendono problematico il passaggio della corrente. Risulta invece ben marcato il

passaggio alle sabbie intorno ai 4 metri di profondità (in particolare nella linea L2).

Le iniezioni nel terreno della soluzione per la bonifica sono iniziate il 26 luglio e si sono concluse il 2 agosto. Le date precedenti, ovvero il 12 aprile e il 18 luglio, non dovrebbero essere influenzate dalla sostanza iniettata. Va precisato però che nel 2015 è stato effettuato un piccolo test di prova con la soluzione da alcuni pozzetti, quindi anche le date precedenti al 26 luglio, seppur in minima parte, potrebbero essere leggermente influenzate dalla sostanza. Se assumiamo comunque le date del 12 aprile e del 18 luglio come date di base, possiamo dire che le sabbie del primo acquifero si attestano ad una resistività variabile intorno ai 20-30 Ωm con alcuni picchi fino a 50 Ωm . Questi ultimi, potrebbero essere legati a porzioni più ricche in sabbia (visto il grado di eterogeneità presente nel sito) oppure anomalie legate al test del 2015.

Andando più in profondità si osservano orizzonti a resistività minori, ma va tenuto conto che la risoluzione viene ridotta andando in profondità. La sezione raggiunge una profondità massima di 15 m. Questa profondità di indagine è stata scelta tenendo conto della lunghezza dello stendimento di elettrodi (circa un quarto).

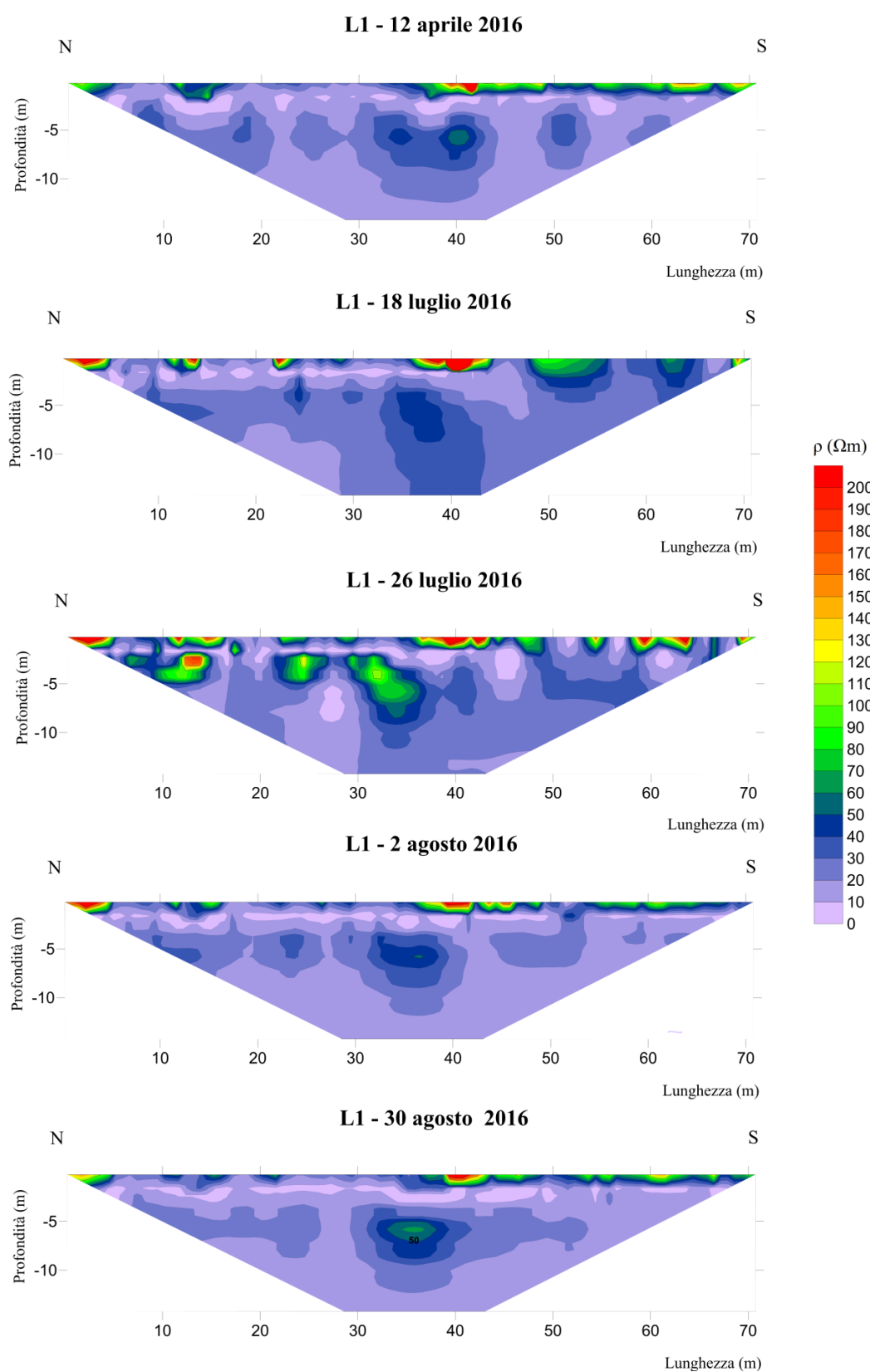


Fig. 29 - Sezioni di tomografia di resistività elettrica (ERT) della linea L1 a 72 elettrodi.

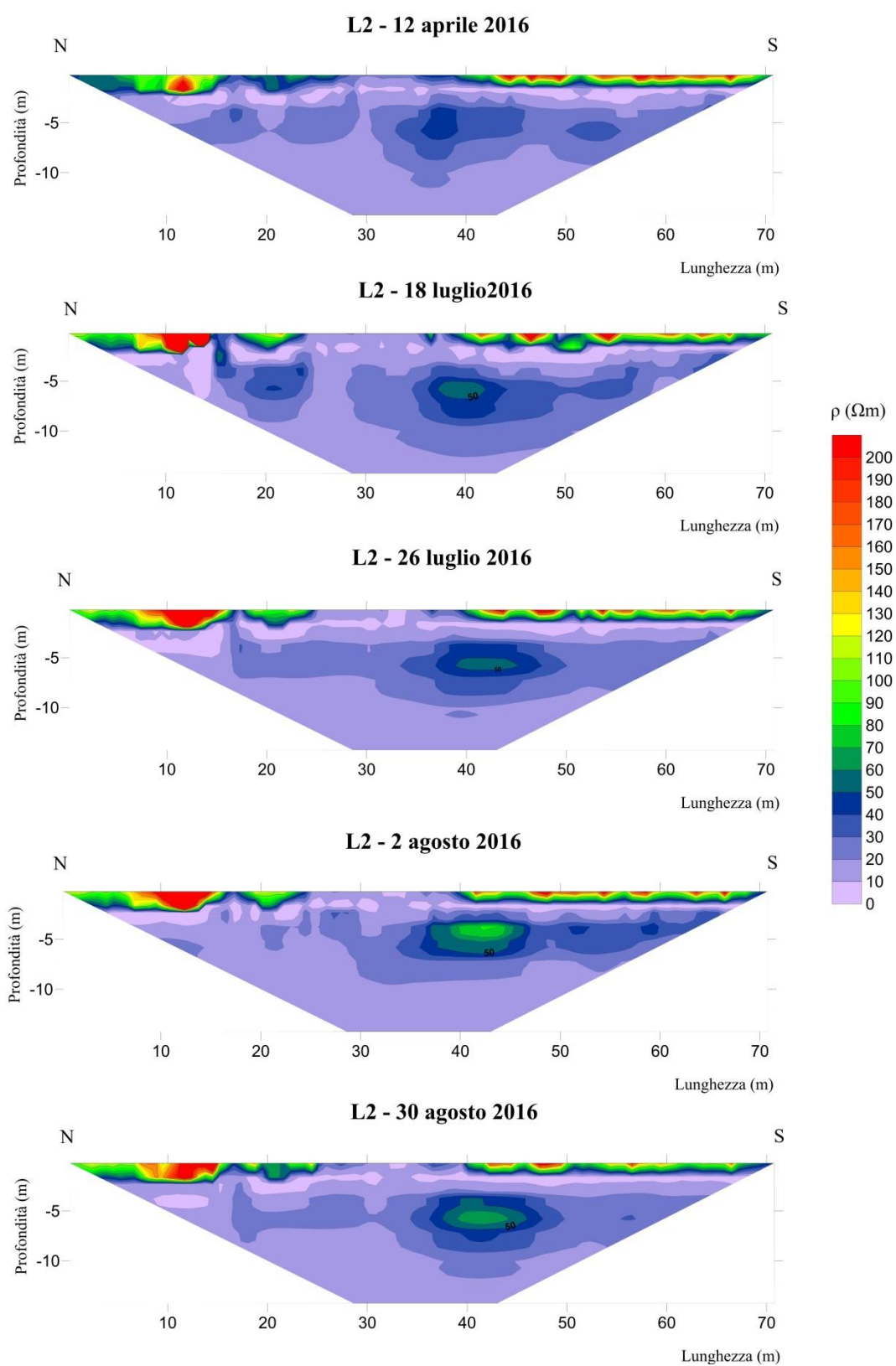


Fig. 30 - Sezioni di tomografia di resistività elettrica (ERT) della linea L2 a 72 elettrodi.

Come si vede in *Fig. 31*, per dare migliore visibilità delle variazioni durante il tempo è stata fatta una variazione time-lapse tra i vari dataset. Queste sezioni non rappresentano il valore assoluto della resistività (come le precedenti), ma solamente la variazione percentuale di un tempo rispetto al suo tempo antecedente.

Per fare questo è stato necessario ricercare all'interno delle 5 sezioni di valori assoluti i quadripoli comuni, creare un modello diretto omogeneo a 100 Ωm e mettere a confronto le varie sezioni con un programma eseguibile chiamato "Ratio_protocol". Inoltre, è stato deciso di mantenere come termine di background una delle due misurazioni pre-iniezioni e valutare la variazione nei confronti di questa sezione. Nello specifico si è scelto come dataset di riferimento il 12 aprile del 2016.

Si è valutato di analizzare in questa modalità solamente le sezioni della linea L2 essenzialmente per due motivi: innanzitutto perché risultavano le sezioni maggiormente informative nei valori assoluti di resistività e anche perché, dopo la scrematura, sono apparse quelle con più quadripoli in comune.

Considerato che dopo la scrematura si è ridotto il numero dei quadripoli, alcuni di essi sono risultati problematici, probabilmente per problemi di contatto, è stato quindi necessario rimuovere ulteriori quadripoli legati ad alcuni elettrodi malfunzionanti nella zona Nord (zona più complessa).

Quello che si osserva è che nella zona dei pozzetti è presente un aumento della resistività elettrica con variazioni tra il 20 e il 40%.

Tra i 2 e i 4 metri di profondità è presente un trend costante di diminuzione della resistività, che può essere associato al fatto che nel momento dell'iniezione della miscela nell'acquifero, dalle autobotti percolava una notevole quantità di acqua portando ad un aumento di conducibilità dei primi metri all'interno del terreno.

La situazione tende a ritornare alle condizioni iniziali nel confronto con l'ultima data di indagine (30 agosto 2016) a iniezioni concluse.

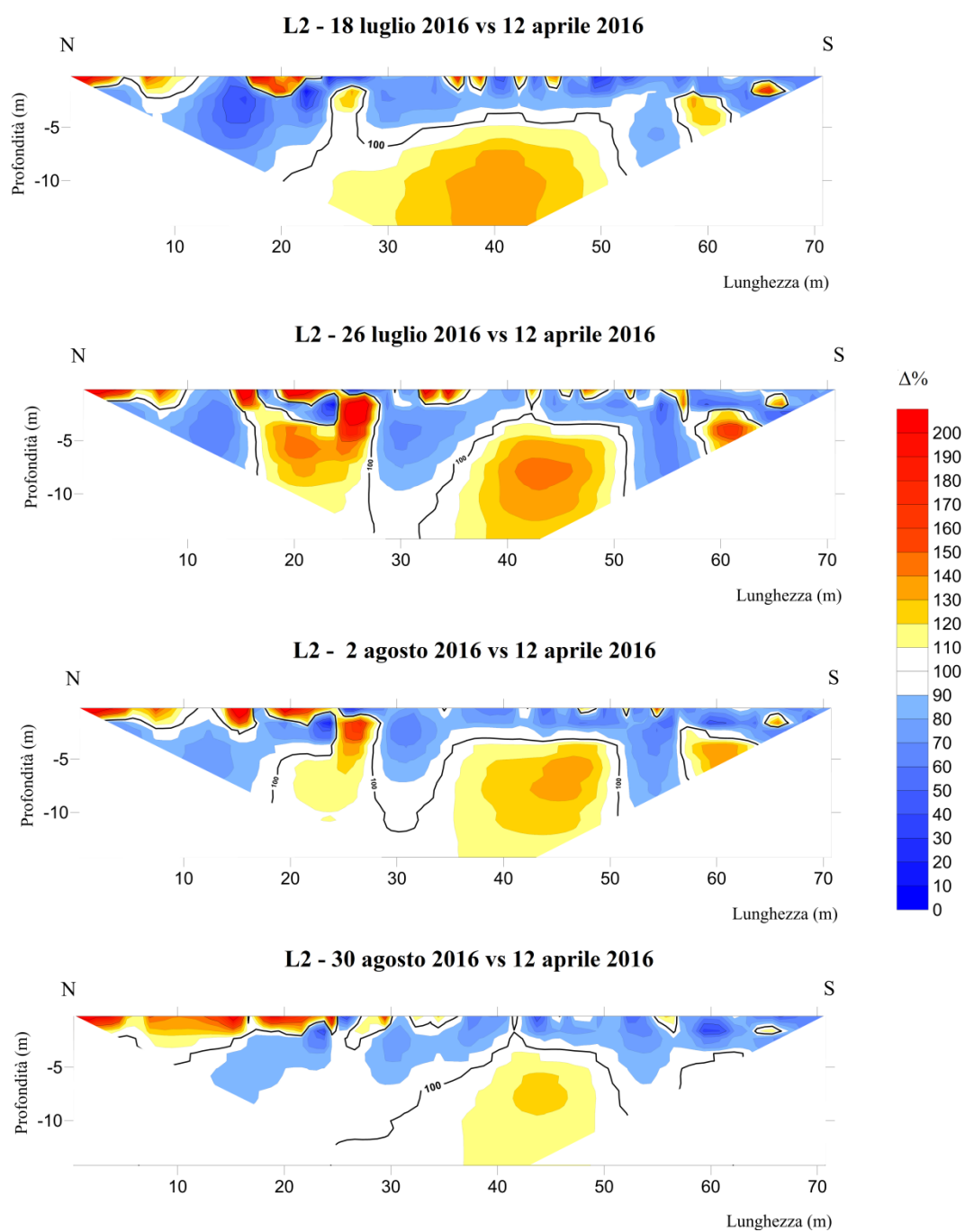


Fig. 31 - Sezioni in time-lapse riferite alla linea L2.

Per quanto riguarda le indagini successive al 2016, si è voluto concentrarsi maggiormente sulla linea centrale L2 e soprattutto valutare se la polarizzazione indotta potesse risultare più o meno efficace delle sole tomografie di resistività elettrica (ERT). Le misure si sono concentrate in due date (3 ottobre 2017 e 14 febbraio 2018) e sono state eseguite con strumenti diversi per poter valutare meglio le differenze nell'uso delle tecniche.

Per quanto riguarda le misure campionate dallo strumento MPT DAS-1 il 3 ottobre 2017, sono state sia di tomografia elettrica che di polarizzazione indotta nel dominio della frequenza, in particolare campionate con il metodo della polarizzazione indotta spettrale (SIP) con frequenza di iniezione di 0.5 Hz (vedi Fig. 32). Come già detto in precedenza, questi dati sono stati campionati e sviluppati interamente dal professor Flores-Orzoco che gentilmente ci ha offerto in analisi per questo lavoro.

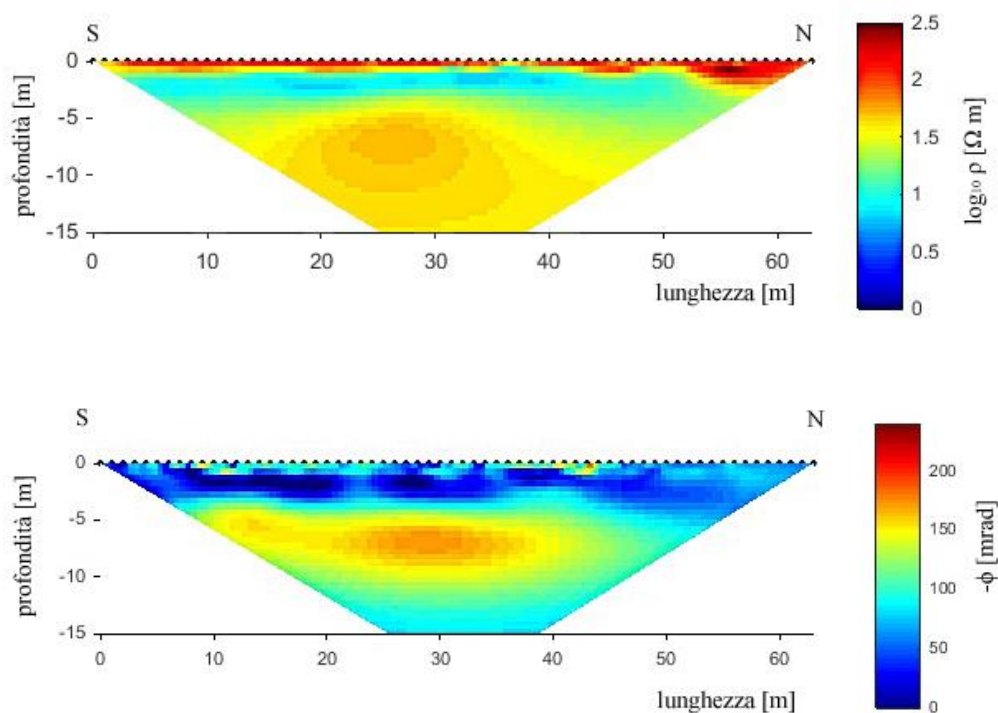


Fig. 32 - Elaborazioni dei dati eseguite dal professor Flores-Orozco, l'immagine in alto rappresenta la tomografia elettrica, mentre quella in basso rappresenta la differenza di fase per la polarizzazione indotta spettrale a frequenza 0.5 Hz.

La tomografia elettrica evidenzia un primo strato di circa 1m particolarmente resistivo e individua l'orizzonte delle argille fino a 4m particolarmente conduttivo. Si nota poi l'aumento di resistività al passaggio con le sabbie con un picco resistivo tra i 5 e i 7 m di profondità. Nell'elaborazione in polarizzazione indotta, invece, si vede un'anomalia di fase che potrebbe essere dovuta all'attività batterica promossa dai carboni attivi della miscela.

Per quanto riguarda l'indagine effettuata il 14 febbraio 2018, si è campionato sempre con lo strumento IRIS Syscal pro 72 del dipartimento di Geoscienze. I dati relativi a questo campionamento sono stati analizzati sia in funzione delle ERT che della polarizzazione indotta nel dominio del tempo. Per la polarizzazione indotta è stato necessario usare il software "Res2dinv". Per ottimizzare l'elaborazione con Res2dinv è stata fatta un'analisi visuale della qualità dei dati di resistività apparente della pseudosezione e sono stati modificati alcuni punti (vedi *Fig. 33*).

Al fine di valutare l'attendibilità delle elaborazioni di questo nuovo programma, sono state confrontate le elaborazioni per la tomografia elettrica utilizzando i due diversi programmi (ProfileR e Res2dinv) ed i risultati sono stati abbastanza soddisfacenti (vedi *Figg. 34-35*). Questo dovrebbe dare più credito alle elaborazioni fatte dal programma anche in polarizzazione indotta. Dalle immagini di tomografia elettrica si notano all'incirca gli stessi elementi che si notavano nelle indagini del 2016. Si osservano con un buon dettaglio le sabbie del primo acquifero e notano forti analogie con le immagini riferite alla fase di pre-iniezione di aprile 2016.

Per quanto riguarda le immagini derivate dalla polarizzazione indotta nel dominio nel tempo, si nota soprattutto una grande anomalia di caricabilità verso Sud tra i 4 e i 6 m di profondità nella zona di iniezione (vedi *Fig. 37*).

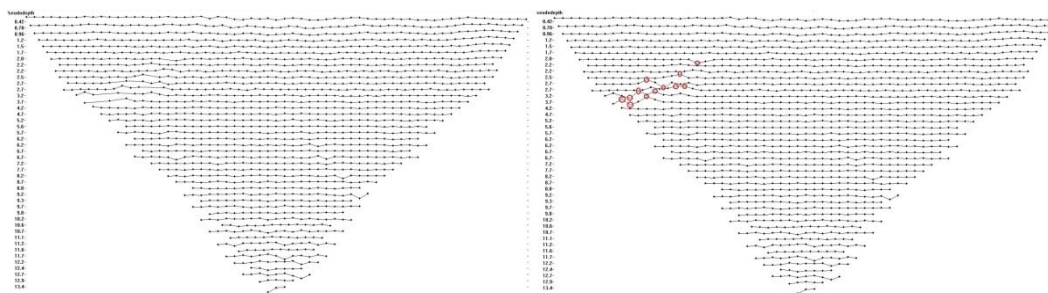


Fig. 33 - Modifiche apportate con l'analisi visuale, eliminando i valori anomali.

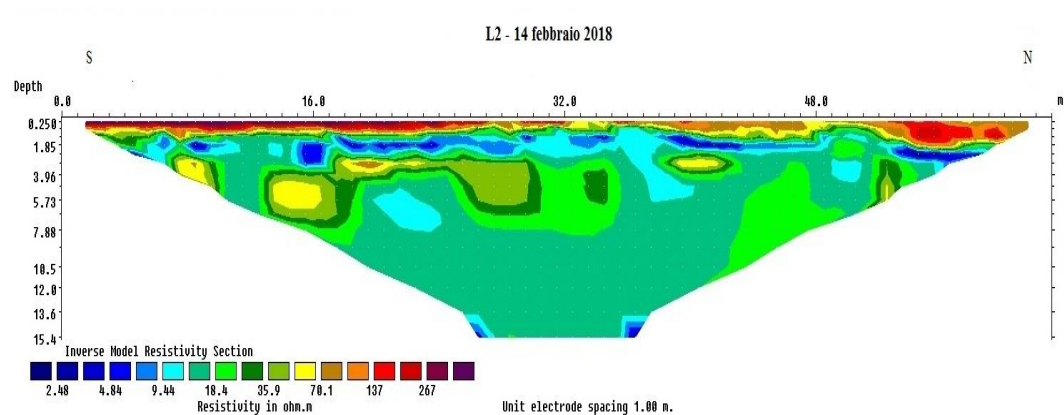


Fig. 34 - Elaborazione con Res2dinv per la tomografia elettrica.

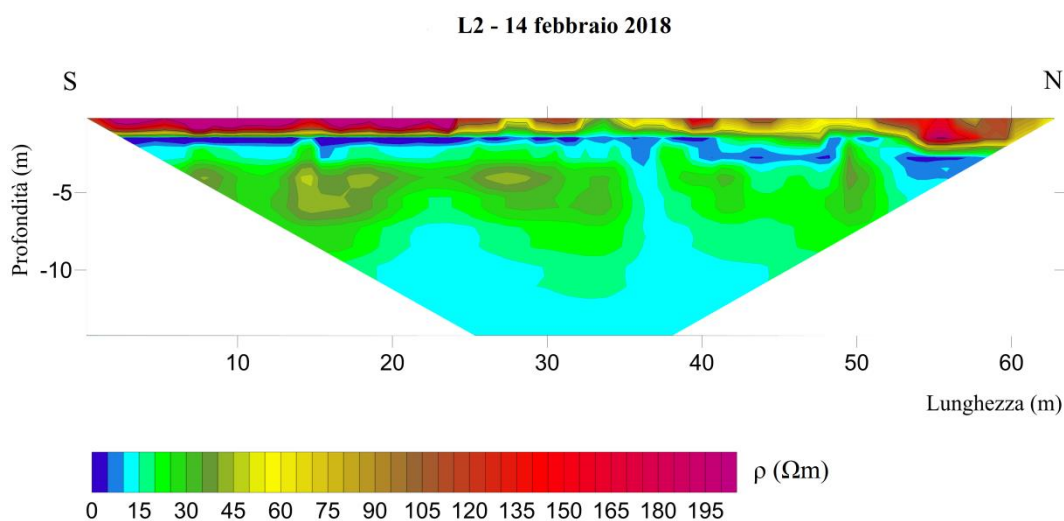


Fig. 35 - Elaborazione con ProfileR e Surfer per la tomografia elettrica.

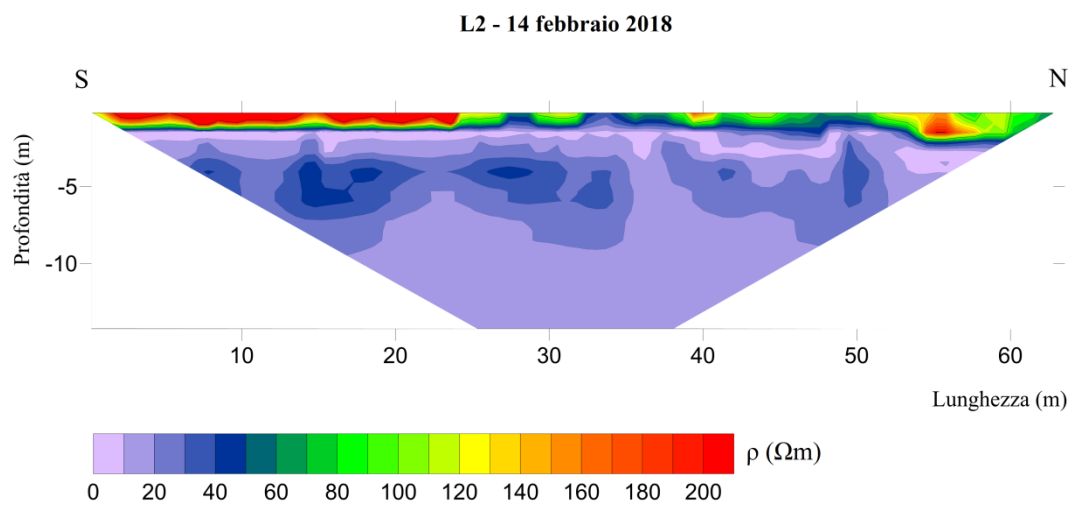


Fig. 36 - Elaborazione con ProfileR e Surfer per la tomografia elettrica utilizzando la scala cromatica delle precedenti sezioni.

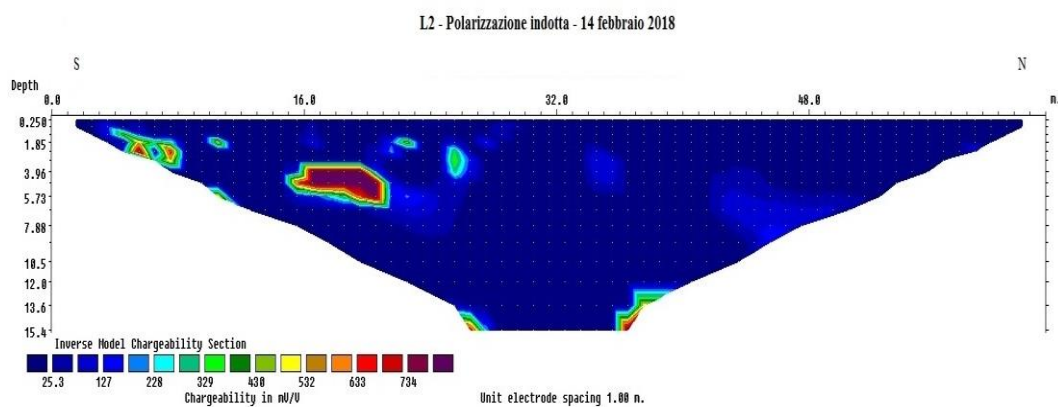


Fig. 37 - Elaborazione con Res2dinv per la polarizzazione indotta.

5. Conclusioni

Dall'analisi dei dati svolta è possibile notare come, dalle indagini tramite tomografia di resistività elettrica, sia osservabile un'anomalia resistiva all'interno dell'acquifero superficiale posizionata in prossimità dei pozzetti di iniezione della miscela di trattamento in situ. Il corpo sabbioso che caratterizza l'acquifero superficiale del sito di misura presenta una resistività compresa tra valori di 20-30 Ωm . In prossimità dei pozzi di iniezione della miscela i valori nel tempo passano a valori di 40-60 Ωm . La tomografia di resistività elettrica condotta ha dimostrato una buona risoluzione per il monitoraggio delle varie fasi di iniezione della miscela. Si nota infatti un evidente aumento di resistività nella zona dei pozzi durante la fase di iniezione compresa tra le date del 26 luglio e del 02 agosto 2016, con una condizione che poi torna ad una lenta normalizzazione verso valori di pre-trattamento (osservabile bene anche dai time-lapse in *Fig.31*) e rimarcata nell'indagine del 14 febbraio 2018.

La variazione di valori di resistività in prossimità della zona trattata dimostra come il monitoraggio geofisico sia effettivamente in grado di visualizzare e quantificare l'area di interesse trattata. L'aumento di resistività può essere ricondotto alla sostituzione dell'acqua di falda con la miscela iniettata che plausibilmente risulti meno conduttiva all'acqua di falda. Le tomografie rivelano anche come lentamente nel tempo si ritorni a condizioni normali, probabilmente perché la falda al termine del trattamento tende a riomogenizzarsi cancellando l'anomalia resistiva (vedi *Figg. 30-31-36*).

La tomografia elettrica si dimostra comunque uno strumento molto valido non solo per l'osservazione della stratigrafia del sottosuolo in termini statici, ma anche per il monitoraggio dello stato della falda in termini dinamici, come osservabile nel sito di Bologna.

La tecnica della polarizzazione indotta si è rivelata invece meno risolutiva in termini di inquadramento della la stratigrafia del sistema, anche se sembra individuare con maggiore dettaglio le anomalie presenti all'interno dell'acquifero

dovute alla iniezione di miscela. In particolare, questa tecnica pare più efficace a notare le anomalie legate all'attività batterica e ai carboni attivi depositati ed è possibile notarlo sia tramite la caricabilità nel dominio del tempo che soprattutto dalla polarizzazione indotta spettrale. Dalle analisi svolte si è notato infatti come la zona interessata delle differenze di fase, compresa soprattutto tra i 4 e i 9 metri di profondità, coincida esattamente con la parte di acquifero interessato dal trattamento di bonifica.

In conclusione si può affermare che, in maniera differente, le tecniche utilizzate hanno dato buoni risultati nel monitoraggio dell'attività di iniezione in situ studiate. Da questo lavoro si può quindi dedurre che per interventi simili futuri, l'utilizzo della geofisica nella fasi pre, durante e post trattamento possa fornire un utile strumento per il monitoraggio della attività di bonifica.

6. Bibliografia

A.P.A.T. (2008) *Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai contaminanti*, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

ARPA Emilia – Romagna (2015) *Catasto dei siti contaminati*.

BINLEY A. (2003) *Manuale per l'uso del software ProfilerR version 2.5*, University of Lancaster, doi: www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/freeware.htm.

BINLEY A. & KEMNA A. (2005) *Electrical Methods. Hydrogeophysics*, Ed. Springer.

BUSATO L. (2016) *Non-invasive monitoring and numerical modelling of the soil-plant continuum*, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova.

CASSIANI G., DEIANA R., KEMNA A., VILLA A., BRUNO V. EBAGLIANI A. (2007) *An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse geophysical monitoring*, Near Surface Geophysics.

Comune di Bologna, Area Urbanistica e Edilizia, <http://dru.iperbole.bologna.it/cartografia/contenuto?filter=Archivio%20cartografico>.

Comune di Bologna, Area Urbanistica, Ambiente e Mobilità (2005), www.atticomune.bologna.it/atti.

GEOTOMO SOFTWARE (2017) *RES2DINVx64 ver. 4.07 with multi-core and 64-bit support*, www.geotomosoft.com

KEMNA A., BINLEY A., CASSIANI G., FLORES OROZCO A. (2012) *An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications*,

<http://nsg.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=65626>.

MARIN M. (2017) *Monitoraggio geofisico di tecniche di bonifica di siti contaminati*, Tesi Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Università degli Studi di Padova.

MARTELLI L., AMOROSI A., SEVERI P. (2009) *Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 221 Bologna*, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Regenesis© (2016) *PlumeStop Technical Bulletin*, www.regenesis.com.

1.1 Distribution through a permeable medium.

2.1 Sorption of contaminants from solution: terms & principles.

2.2 Sorption of contaminants from solution – column study.

2.4 Regeneration of sorptive capacity.

Regenesis©, *Trattamento di un plume esteso all'interno di un'area metropolitana*, www.regenesis.com.

SANTARATO G., ABU ZEID N., BIGNARDI S. (2015) *Lezioni di geofisica applicata*, libreriauniversitaria.it.

TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.

WIEDEMEIER T. H. E., SWANSON M. A., MOUTOUX D. E., GORDON E. K., WILSON J. T., WILSON B. H., KAMPBELL D. H., HAAS P. E., ROSS N., HANSEN M., CHAPPELLE F. H. (1998) *Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water*. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development