



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI
RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Dip. di GEOSCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per
l'Ambiente e il Territorio

Tomografie elettriche in time-lapse per lo studio
dell'attività di suzione di un apparato radicale

Relatore

Prof. Jacopo Boaga

Correlatore

Dott. Alberto Carrera

Laureanda

Giorgia Alberti

Matricola n.1211081

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Un sorriso vale molto e non costa nulla.

A.A.

Sommario

ABSTRACT	1
RIASSUNTO.....	3
1. INTRODUZIONE	5
2. METODI GEOELETTRICI.....	13
2.1. IL SUOLO	14
2.2. BASI FISICHE.....	16
2.3. TIPI DI ARRAY	20
2.4. TOMOGRAFIA ELETTRICA DI RESISTIVITÀ	23
2.5. INVERSIONE DEL DATO	25
3. SCOPO DELLO STUDIO	31
4. MATERIALI E METODI	33
4.1. INSTALLAZIONE	33
4.2. ELABORAZIONE DATI	37
5. RISULTATI	41
5.1. CONTENITORE 5 SKIP ZERO.....	43
5.2. CONTENITORE 6 SKIP ZERO.....	47
6. DISCUSSIONE.....	51
6.1. CONTENITORE 5	51
6.2. CONTENITORE 6	53
6.3. CONSIDERAZIONI GENERALI.....	55
7. CONCLUSIONI	59
8. BIBLIOGRAFIA	61

Abstract

The interactions between soil, plants, and the atmosphere control several fundamental environmental processes, the understanding of which plays a key role in environmental protection and in the perspective of climate change.

In this context, geophysical techniques succeed in investigating subsurface characteristics in a non-invasive manner, thus returning areal information that allows us to overcome the limitations of classical surveys.

In this study, the geoelectric method of electrical resistivity tomography (ERT) is used for three-dimensional, time-lapse investigation of root suction activity.

This technique uses the electrical properties of resistivity to determine various subsurface characteristics, including mineral composition, water content and salinity.

Riassunto

Gli scambi tra suolo, piante e atmosfera controllano una serie di processi ambientali chiave la cui comprensione svolge un ruolo fondamentale non solo per la tutela dell'ambiente, ma anche nella prospettiva della lotta ai cambiamenti climatici.

In questo contesto le tecniche geofisiche riescono ad indagare le caratteristiche del sottosuolo in maniera non invasiva, restituendo un'informazione areale, superando i limiti delle indagini classiche.

In questo progetto di tesi è stato utilizzato il metodo geoelettrico della tomografia elettrica di resistività (ERT) per l'indagine tridimensionale ed in modalità time-lapse dell'attività di suzione radicale.

Questa tecnica sfrutta le proprietà elettriche della resistività per determinare varie caratteristiche del sottosuolo, tra cui la composizione minerale, il contenuto idrico e la salinità.

1. Introduzione

La geofisica corrisponde all'applicazione delle Leggi della Fisica alle indagini della Terra, della Luna e dei Pianeti. In particolare, lo studio della sola sfera terrestre tramite metodi che indagano l'interno della Terra a partire dalla sua superficie prende il nome di geofisica della Terra solida, mentre lo studio degli oceani e dell'atmosfera riguarda la geofisica della Terra fluida¹. Nella geofisica della Terra solida ricadono sia indagini di profondità per ricostruire e studiare la struttura interna del pianeta sia indagini più superficiali relative alla struttura e composizione della crosta terrestre. Le tecniche geofisiche usate per esplorare le caratteristiche fisiche dell'immediato sottosuolo ad una profondità in genere non superiore a qualche centinaio di metri, eccetto che per la ricerca di idrocarburi ed altri minerali o risorse, rientrano nel campo della geofisica applicata. Questo tipo di indagini superficiali, che saranno trattate in questo lavoro di tesi, sono estremamente trasversali ed occupano diversi campi di ricerca¹.

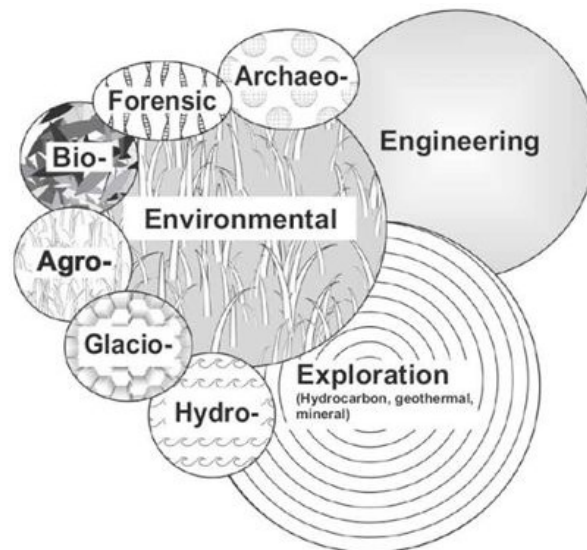


Figura 1: Inter-relazioni tra le varie sub-discipline della geofisica applicata [Reynolds 2011]

Nelle ultime decadi questa disciplina ha avuto un'espansione esponenziale soprattutto per quanto riguarda l'ambiente, la bonifica e il ripristino di siti contaminati, contribuendo alla nascita di molte sub-discipline (*Figura 1*) tra cui l'Idrogeofisica, l'Agrogeofisica e la Biogeofisica, più generalmente raggruppate sotto il nome di Geofisica Ambientale.

Le tecniche geofisiche ambientali permettono studi interdisciplinari, molto importanti per definire aspetti complessi di diverse variabili ambientali finora studiate individualmente.

Questa espansione si deve principalmente ai vantaggi dell'utilizzo dei metodi geofisici che, essendo non distruttivi, minimizzano l'impatto ambientale e forniscono un'informazione areale, in modo rapido e più economico rispetto a tecniche standard di campionamento o carotaggio, le quali in modo invasivo forniscono un'informazione puntuale¹.

Metodi classici, come i carotaggi, infatti, hanno sicuramente il vantaggio di restituire un'informazione certa, ma quest'ultima è una rappresentazione puntiforme che non riflette tutte le possibili informazioni del contorno. Questi metodi sono in aggiunta distruttivi e inducono una perturbazione del suolo, delle piante ed organismi che vi risiedono².

Inoltre, i campionamenti diretti possono interferire con lo stato naturale del sistema e possono influenzare gli stessi processi monitorati, quindi potenzialmente alterare i risultati sperimentali ottenuti³.

I metodi geofisici rispondono alle proprietà fisiche del sottosuolo che a loro volta dipendono dal tipo di roccia, dalla presenza di cavità e d'acqua.

Possono essere classificati in due tipologie:

- › I metodi passivi che rilevano le variazioni delle proprietà del sottosuolo attraverso campi naturali terrestri come i campi gravitazionali e magnetici;
- › I metodi attivi che necessitano di segnali generati artificialmente che vengono influenzati dalle proprietà del sottosuolo durante il loro percorso e di conseguenza modificati. I segnali di ritorno alterati vengono registrati da rilevatori specifici ed interpretati¹.

Ogni metodo geofisico è strettamente relazionato ad una proprietà specifica del sottosuolo. Quindi, è necessario in primo luogo stabilire le caratteristiche da analizzare con la metodologia più appropriata.

Tra le tecniche di indagine geofisica più utilizzate per quanto riguarda le indagini ambientali vi sono i metodi elettrici. Questo perché le proprietà elettriche del sottosuolo sono spesso ben correlate con le proprietà fisiche e chimiche delle diverse litologie (porosità e contenuto di argille) e dei fluidi che occupano i loro pori (ad esempio saturazione, salinità o presenza di inquinanti)¹.

Inoltre, i metodi elettrici utilizzano concetti teorici relativamente semplici e le tecniche di misurazione sul campo sono versatili a diverse scale. Questa peculiarità consente indagini che spaziano da decine di centimetri a centinaia di metri con l'utilizzo di strumenti ad un costo relativamente basso. In aggiunta i software di elaborazione dati sono ampiamente diffusi, spesso gratuiti e a libera disposizione⁴.

La branca della geofisica applicata che utilizza metodi geofisici per caratterizzare modelli o processi nel suolo di interesse per la gestione agronomica prende il nome di agrogeofisica; essa raggruppa la parte dell'idrogeofisica per le applicazioni agricole e la parte del rilevamento e mappatura digitale del suolo⁵.

L'agrofisica mira a comprendere come le diverse variabili ambientali, il contenuto idrico del suolo, la composizione del terreno e la salinità influenzano la produttività delle coltivazioni³.

Negli ultimi due decenni la tecnica di tomografia elettrica di resistività (ERT) è stata utilizzata nella determinazione dei processi di trasporto e delle variazioni quantitative dell'acqua sub-superficiale. Inoltre, studi recenti hanno dimostrato, che questa tecnica geofisica apre prospettive interessanti nella determinazione tridimensionale della variazione del contenuto idrico del suolo².

Le variazioni spazio-temporali del contenuto idrico nel suolo sono state a lungo studiate anche in agricoltura, (eco)idrologia ed ecologia. Tali variazioni sono infatti essenziali per una migliore comprensione dei processi idrologici e della gestione delle risorse idriche in termini di:

- › Distribuzione fra acque superficiali e sotterranee;
- › Captazione della fonte idrica da parte delle piante;
- › Presenza in soluzione di nutrienti e contaminanti;
- › Datazione dell'acqua tra le diverse componenti idrologiche⁶.

In aggiunta il suolo, la vegetazione e l'atmosfera formano fra loro interazioni complesse che agiscono su una vasta scala temporale e spaziale. Gli scambi di energia e massa tra i compartimenti sono continui ed eterogenei e ciò rende la loro quantificazione particolarmente impegnativa. Questi scambi tra suolo, piante e atmosfera controllano una serie di processi ambientali chiave la cui comprensione svolge un ruolo fondamentale non solo per la tutela dell'ambiente, ma anche nella prospettiva della lotta ai cambiamenti climatici⁷.

Uno degli scambi cardine nel quale la vegetazione ha un impatto principale riguarda il ciclo dell'acqua e il contenuto idrico del suolo attraverso due attività fondamentali: l'assorbimento radicale e la traspirazione.

Il trasporto all'interno della pianta dalle radici alle foglie avviene grazie alla formazione di un gradiente di potenziale idrico (Ψ). La gran parte dell'acqua utilizzata dalle piante viene infatti persa per traspirazione fogliare, processo sostenuto dall'energia radiante solare assorbita dalle foglie.

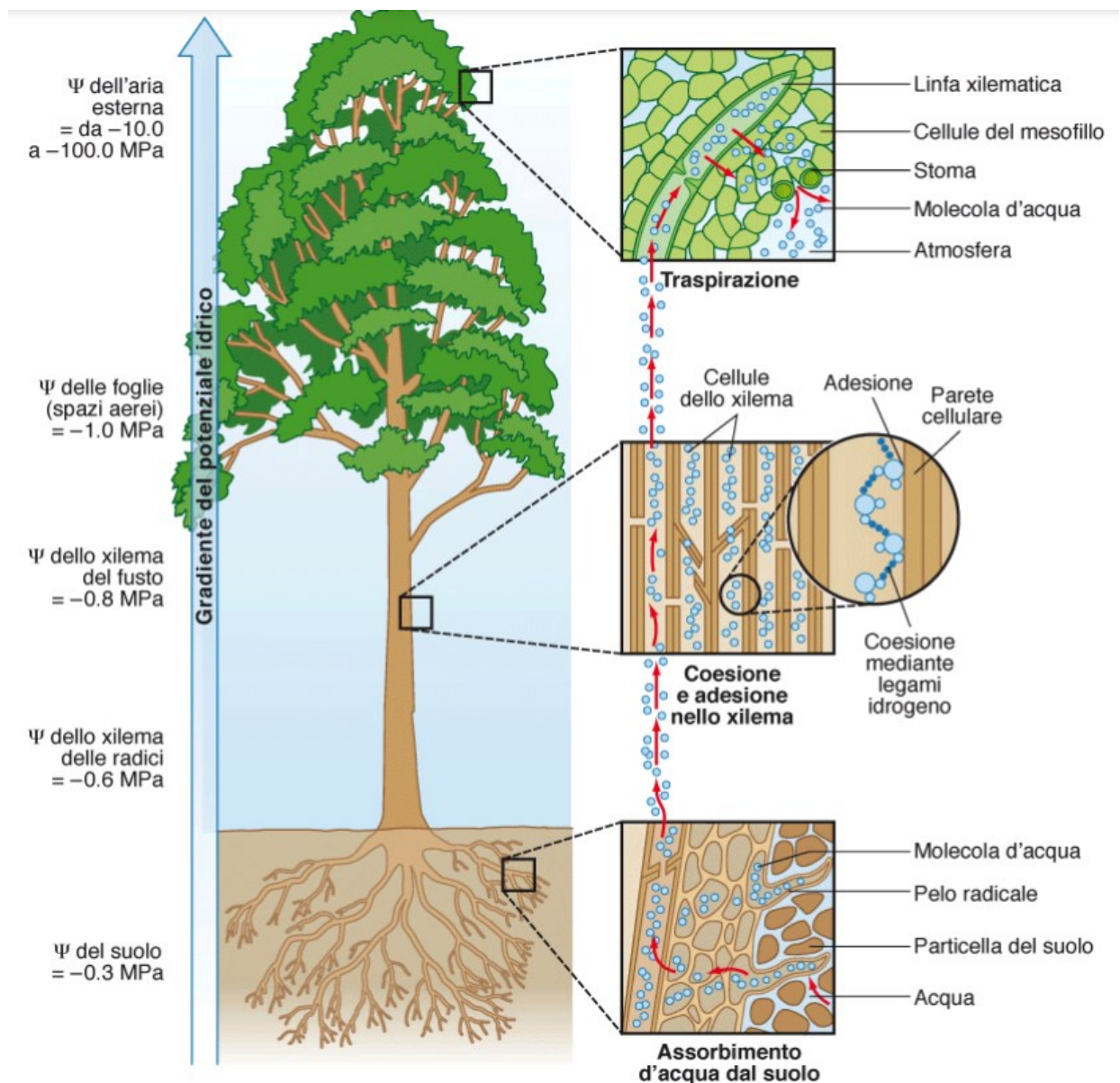


Figura 2: Schema del movimento dell'acqua nel continuum suolo-pianta-atmosfera (SPAC) [Rascio 2012]

La continua perdita di acqua dalle foglie genera potenziali idrici negativi che creano un gradiente di potenziale ($\Delta\Psi$) permettendo il trasporto passivo dell'acqua dal terreno alle foglie (*Figura 2*)⁸.

È importante sottolineare che il processo di evapotraspirazione invece, definisce la somma delle perdite di umidità per evaporazione dal terreno e dalle superfici idriche e per traspirazione delle piante⁹.

La regione del suolo occupata attivamente dall'apparato radicale viene definita rizosfera e oltre ad essere caratterizzata da intensi scambi è anche in grado di ospitare un'elevata biodiversità con intensa attività microbica e fungina⁹.

La rizosfera presenta una struttura ed una fisiologia specie specifica che ne determina forma e caratteristiche. Numerosi studi, inoltre, hanno evidenziato che l'apparato radicale di una pianta non è ugualmente permeabile all'acqua in tutti i suoi punti. In particolare, la zona pilifera è quella maggiormente coinvolta nell'assorbimento. Questa zona è ricca di peli radicali ovvero lunghe estroflessioni (circa 2-10 *mm*) che ampliano notevolmente la superficie e l'interfaccia della radice con il suolo⁸.

Va precisato tuttavia, che l'assorbimento di acqua da parte delle radici è influenzato non soltanto dalla presenza e densità dei peli radicali, ma anche dalla superficie totale del sistema radicale e la sua struttura e velocità di accrescimento⁸. I meccanismi che governano il flusso d'acqua nelle zone radicali sono in aggiunta controllati dalle caratteristiche fisiche del suolo, dalla specie vegetale e da fattori meteorologici⁷.

Questi aspetti evidenziano come la caratterizzazione in situ degli apparati radicali sia un problema complesso ed impegnativo data l'inaccessibilità della rizosfera,

dalla sua fragilità e complessità. In questo contesto i metodi elettrici possono superare i limiti delle indagini invasive e restituire informazioni attendibili³.

In questa tesi è stato effettuato uno studio dell'apparato radicale in particolare per quanto riguarda l'attività di suzione e il conseguente scambio in massa dell'acqua tra suolo e atmosfera tramite traspirazione. Questo studio non invasivo con il metodo geofisico di tomografia elettrica di resistività (ERT) vuole analizzare qualitativamente il cambiamento del contenuto idrico del suolo nella rizosfera dovuto all'attività di assorbimento radicale in diversi momenti successivi ad un'irrigazione.

2. Metodi geoelettrici

I metodi geoelettrici che utilizzano sorgenti attive come la resistività in corrente continua (DC) e la polarizzazione indotta (IP) sono probabilmente le tecniche geofisiche sotto superficiali più utilizzate, in particolare per le indagini ambientali.

Nella maggior parte delle indagini vengono utilizzati metodi elettrici di resistività in corrente continua (DC). Sebbene meno comuni, i metodi di polarizzazione indotta (IP) permettono di studiare le caratteristiche capacitive dei materiali del sottosuolo che possono fornire ulteriori informazioni sulla natura fisica ed elettrochimica di quest'ultimi. L'IP è effettivamente un'estensione della tecnica della resistività DC, sebbene le misurazioni siano più impegnative e più laboriose¹⁰.

La sorgente per il metodo di resistività evita l'effetto di polarizzazione utilizzando un flusso di corrente con segnale alternato. L'onda di corrente generata da questo segnale viene chiamata onda quadra ed è rappresentata in *Figura 3*⁴.

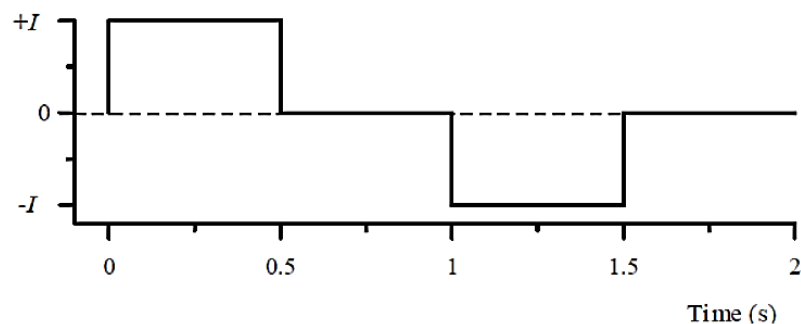


Figura 3: Rappresentazione della corrente alternata in onda quadra [Binley and Kemna, 2006]

I metodi geoelettrici possono ulteriormente essere suddivisi in base alla modalità di applicazione, che può essere da superficie oppure in pozzo. Spesso un'applicazione in pozzo possiede la stessa strumentazione che viene utilizzata da superficie, ma garantisce una profondità maggiore d'indagine¹.

Verrà in seguito descritta l'applicazione da superficie, ma data la geometria dell'indagine di questo studio alcuni elettrodi sono stati interrati e posizionati verticalmente (simulando idealmente dei pozzi).

2.1. Il Suolo

Il suolo può essere definito come un corpo naturale costituito da strati composti da materiali minerali, da materiale organico, da aria e acqua. Esso è il prodotto finale dell'influenza combinata del clima, della topografia, degli organismi (flora e fauna) sul materiale madre (rocce) nel corso del tempo. Come risultato il suolo differisce dal suo materiale madre e nelle caratteristiche chimico-fisiche e biologiche¹¹.

Il suolo è costituito da tre fasi: solida, liquida e gassosa. Le percentuali delle tre fasi sono molto variabili in funzione della porosità e delle condizioni istantanee di disponibilità idrica, che condizionano il rapporto fra fase liquida e gassosa all'interno dei pori. La fase liquida è rappresentata da una soluzione detta *circolante* costituita da acqua, sali minerali disciolti e sostanza organica solubile¹¹.

La percentuale di fase liquida presente in un suolo, il cui massimo corrisponde alla porosità, è molto variabile in funzione degli apporti idrici meteorici, irrigui e di falda, del drenaggio e dell'assorbimento di acqua da parte della vegetazione.

La componente minerale della fase solida è costituita da particelle di diverse dimensioni che derivano dai processi di pedogenesi (origine e formazione di nuovi strati di suolo). A queste dimensioni corrispondono caratteristiche mineralogiche, fisiche e chimiche diverse, che determinano molte proprietà del suolo¹¹.

Il termine terreno ha invece diverse accezioni secondo la disciplina di riferimento. Nella letteratura agronomica indica in maniera generale un substrato di crescita per le piante e comprende un'ampia gamma di mezzi di crescita, dai suoli in situ (terreni agrari) ai substrati posti in contenitori. I due concetti sono diversi soprattutto per la scienza del suolo, ma il termine terreno in diversi casi è usato in maniera generica come sinonimo di suolo¹¹.

Il suolo ed i terreni agrari consentono quindi, a seconda delle loro caratteristiche, il passaggio di acqua dalla superficie alla falda. Essendo l'acqua ricca di sali disciolti (ioni) essa permette il passaggio di corrente elettrica.

Il meccanismo di conduzione elettrica tipico del suolo è difatti quello elettrolitico e di conseguenza la resistività del terreno dipende principalmente dall'acqua contenuta nei pori della matrice¹.

La resistività elettrica è un parametro in grado di assumere un vastissimo intervallo di valori per le varie litologie a seconda delle condizioni di struttura e tessitura in cui la componente minerale rocciosa si dispone, come mostrato in *Figura 4*.

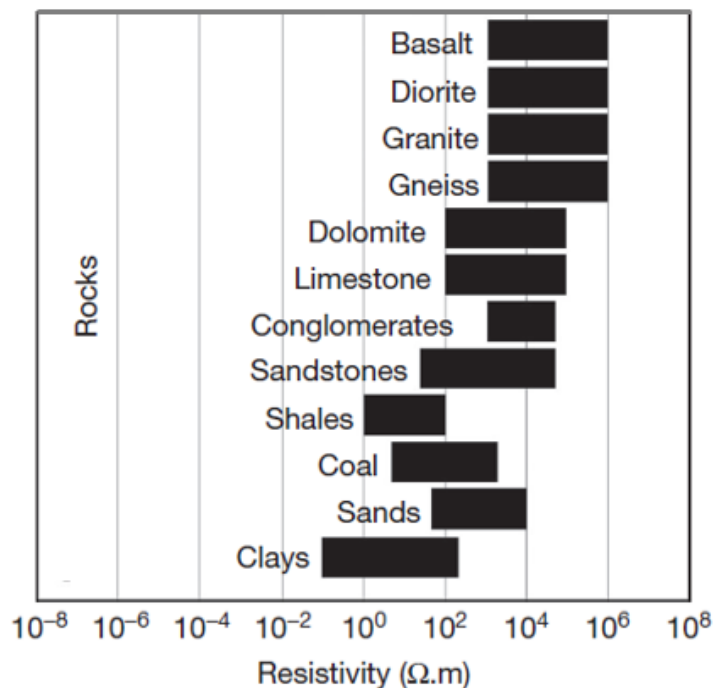


Figura 4: Resistività dei principali geo-materiali [Binley 2015]

Per questo motivo l'utilizzo della resistività permette una caratterizzazione dei suoli molto accurata⁴.

Come altre proprietà fisiche la resistività elettrica dipende dalla temperatura e in piccola misura anche dalla frequenza della sollecitazione (frequenza del campo elettrico applicato).

Valgono infine i principi di disomogeneità e anisotropia cioè la resistività è in grado di cambiare con continuità nello spazio e dipendere dalla direzione nella quale viene misurata. Viceversa, accade in un materiale omogeneo e isotropo le cui proprietà non variano nello spazio e non dipendono dalla direzione di applicazione¹².

2.2. Basi Fisiche

Se in un conduttore di lunghezza l viene iniettata una corrente elettrica I , il materiale del conduttore opporrà una resistenza alla corrente causando un calo di potenziale o differenza di potenziale AV tra le estremità opposte (Figura 5)¹.

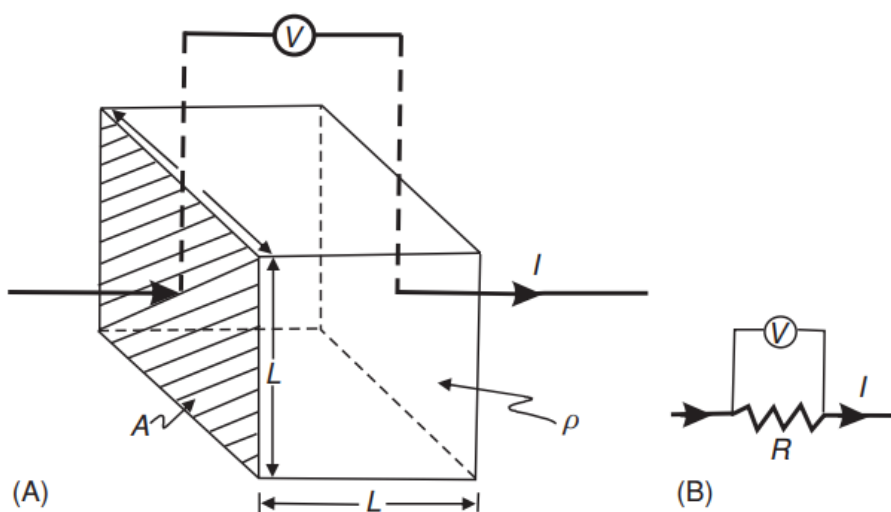


Figura 5: A) Rappresentazione di un conduttore; B) Circuito elettrico equivalente [Reynolds 2011]

La resistenza elettrica R è proporzionale alla lunghezza del conduttore (l) e inversamente proporzionale alla sezione (A).

Secondo la Legge di Ohm la resistenza R corrisponde al rapporto fra la differenza di potenziale ΔV (Volt) e l'intensità di corrente I (Ampere) secondo l'equazione 1:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad [eq. 1]$$

La resistenza elettrica, misurata in Ohm (Ω), è quindi un parametro che dipende dalla geometria del conduttore. Questa dipendenza limita l'utilizzo della resistenza come parametro geofisico.

Nel campo della Geofisica applicata, infatti, si utilizza un altro parametro elettrico che risulta essere indipendente dalla geometria: la resistività ρ , una proprietà intrinseca di ciascun tipo di materiale come mostrato in *Figura 4*.

La resistività ρ rappresenta la costante di proporzionalità fra resistenza R e fattore geometrico A/l , espressa in Ωm e corrisponde alla capacità di ciascun materiale di opporre resistenza al flusso di corrente elettrica:

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad [eq. 2]$$

Il reciproco della resistività è rappresentato dalla conducibilità ovvero la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare da cariche elettriche, misurata in Siemens/metri (S/m).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [eq. 3]$$

Come già introdotto nel paragrafo precedente il terreno è costituito da materiale eterogeneo poroso dove può circolare acqua. Attraverso modelli petrofisici è

possibile relazionare la risposta geofisica (in questo caso resistività) con parametri del terreno come il contenuto idrico.

Uno dei modelli possibili è dato dalla formula di Archie che permette di calcolare la resistività del suolo, considerando la porosità del materiale (φ), la frazione contenente acqua (s) e la resistività di quest'ultima (ρ_w):

$$\rho = a\varphi^{-m} \cdot s^{-n} \cdot \rho_w \quad [eq.4]$$

Nella formula i coefficienti a , m ed n sono costanti rispettivamente relativi alla litologia, al tasso di cementificazione del terreno e ad un coefficiente empirico.

Considerando per il momento la superficie terrestre come materiale a resistività idealmente uniforme ovvero come un mezzo omogeneo e isotropo.

L'immissione di corrente (I) tramite un singolo elettrodo sulla superficie del terreno con resistività uniforme crea linee di corrente uniformi dal punto di sorgente e delle linee perpendicolari ad esse chiamate equipotenziali (Figura 6)¹³.

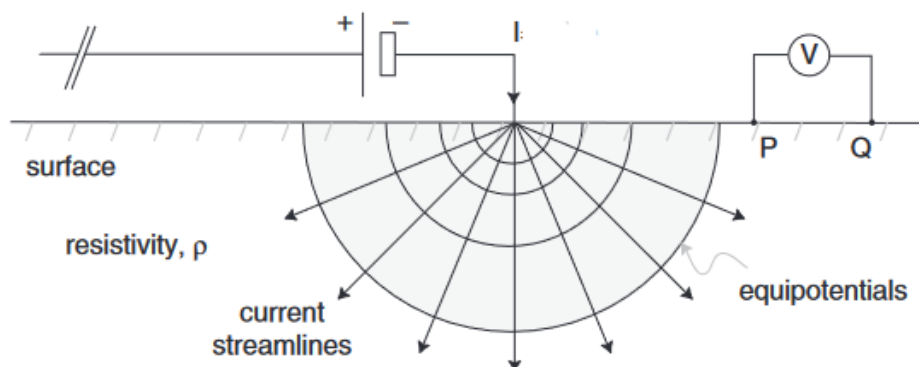


Figura 6: Iniezione di corrente elettrica in un terreno con resistività uniforme [Everett 2013]

La differenza di potenziale V fra i punti P e Q sulla superficie può essere espressa tramite un gradiente di potenziale, negativo in quanto diminuisce in direzione del flusso di corrente:

$$-\frac{\delta V}{\delta x} \quad [eq.5]$$

La densità di corrente (J) e la resistività del materiale influiscono sul gradiente secondo la seguente formula:

$$-\frac{\delta V}{\delta x} = \rho \cdot J \quad [eq. 6]$$

Dove J è la corrente I divisa per l'area in cui essa si distribuisce, essendo l'aria un materiale altamente resistivo possiamo considerare solo l'emisfera della superficie del terreno: $2\pi r^2$

$$J = \frac{I}{2\pi r} \quad [eq. 7]$$

Si può affermare che la densità di corrente diminuisce con l'aumento della distanza dal punto di sorgente (r). Sostituendo il termine dell'*equazione 7* nella formula dell'*equazione 6* si ottiene:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho \cdot \frac{I}{2\pi r} \quad [eq. 8]$$

Quindi è possibile calcolare il voltaggio V ad una distanza r da un singolo punto di sorgente con la seguente equazione:

$$Vr = \int \delta V = - \int \rho \cdot \frac{I \cdot \delta r}{2\pi r} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad [eq. 9]$$

In realtà, in campo ambientale è impossibile il verificarsi di tale situazione. Non esiste un terreno in grado di rispondere all'immissione di corrente con un percorso di resistività uniforme.

L'approccio generale delle tecniche geofisiche di resistività prevede quindi l'iniezione di corrente tra due elettrodi che fungono da sorgente e la misurazione della differenza di potenziale tra altri due elettrodi, ricavando un valore di resistenza secondo l'*equazione 1*.

Dato che il terreno possiede proprietà eterogenee e anisotrope dei diversi materiali e fasi che lo compongono, nonché dalla loro disposizione e struttura, i valori misurati sul campo prendono il nome di *resistività apparente*³.

Prendendo in riferimento l'equazione 2 e sostituendo il termine A/l con l'espressione fattore geometrico K si ottiene:

$$\rho_a = R \cdot K \quad [eq. 10]$$

La *resistività apparente* ρ_a è il valore ottenuto come prodotto della misura di resistenza (R) e il fattore geometrico (K) data una disposizione nota degli elettrodi sul terreno.

L'obiettivo delle indagini geoelettriche è di ottenere un modello della resistività reale del sottosuolo partendo dalla misura della resistività apparente. Questo è possibile tramite un processo che in geofisica viene chiamato *inversione del dato*.

È molto importante distinguere che la resistività apparente non è una proprietà fisica del sottosuolo, a differenza della "vera" resistività. Di conseguenza, tutti i dati di resistività su campo riguardano la resistività apparente, mentre i dati ottenuti a valle del processo di inversione saranno resistività reali.

2.3. Tipi di Array

Il termine quadripolo viene utilizzato per definire una combinazione semplice di quattro elettrodi, composti dalla coppia di elettrodi di iniezione della corrente e dalla coppia degli elettrodi di ricezione della differenza di potenziale¹⁰.

Data l'importanza proporzionale del fattore geometrico nella misura della resistività apparente definire posizione e geometria fra elettrodi è fondamentale.

In geofisica le diverse configurazioni dei quadripoli prendono il nome di array, i principali tipi di array sono: Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo¹⁰. Come è possibile osservare dalla *Figura 7* le etichette A-B, M-N sono solitamente usate per indicare rispettivamente la coppia di elettrodi di iniezione di corrente e la coppia di elettrodi di potenziale.

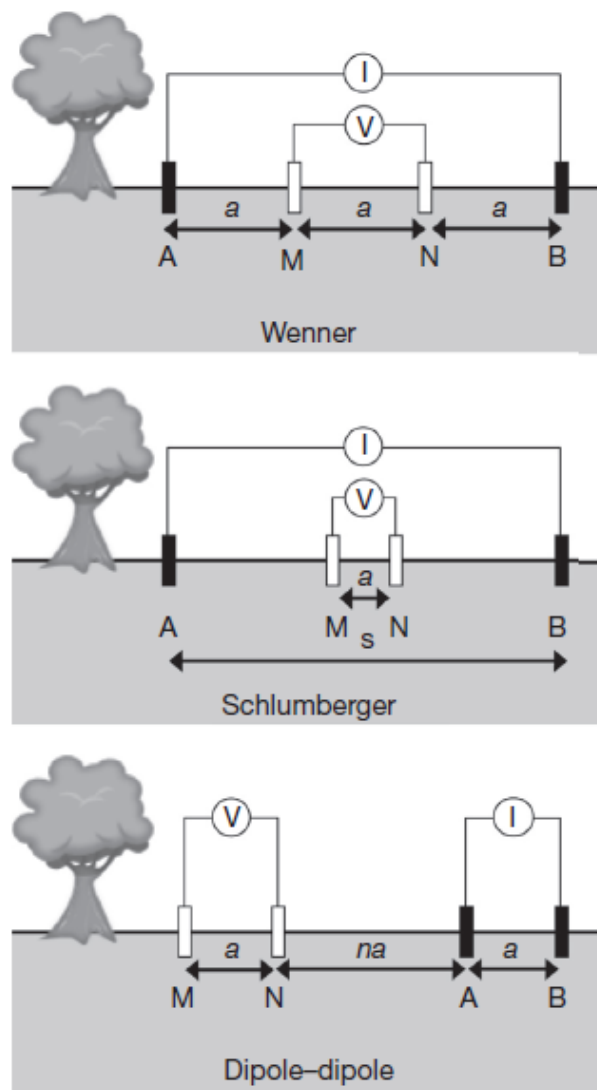


Figura 7: Illustrazione dei principali tipi di array [Binley 2015]

Nella disposizione *Wenner*, gli elettrodi AM, MN, NB sono equidistanti fra loro (a) e la coppia di misura del potenziale si trova all'interno della coppia di elettrodi di iniezione; l'array *Schlumberger* presenta lo stesso assetto con elettrodi interni di potenziale ed elettrodi esterni di iniezione della corrente, ma questi ultimi distanziati (s) rispetto agli elettrodi di misura ravvicinati (a); nella configurazione *dipolo-dipolo* gli elettrodi dei dipoli sono posti alla stessa distanza fra loro (a) mentre le coppie di iniezione e di potenziale si trovano ad una distanza multipla di a (na).

Ogni configurazione possiede un proprio fattore geometrico K , che attribuisce ai quadripoli capacità di risoluzione laterale e profondità di investigazione differenti¹⁴.

Queste capacità dipendono dalla diversa disposizione delle linee di corrente o campo elettrico che attraversano il sottosuolo dagli elettrodi di iniezione AB agli elettrodi di potenziale MN come mostrato in *Figura 8*¹⁰.

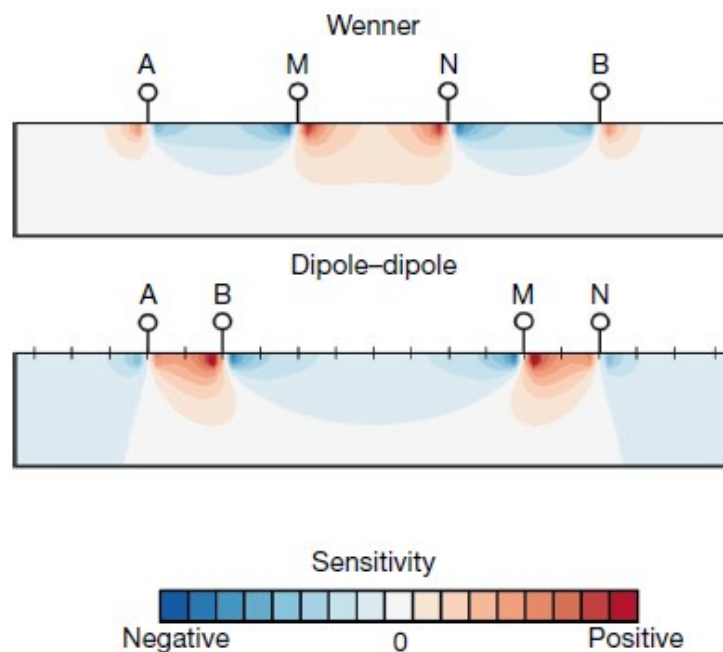


Figura 8: Visuale dei campi elettrici nel sottosuolo al variare dell'array [Binley 2015]

La scelta del tipo di array dipende da una serie di fattori:

- › Dall'obiettivo di investigazione;
- › Dalla scelta della potenza/frequenza del segnale elettrico previsto¹⁴;
- › Dai vincoli segnale-rumore che dipendono dalle proprietà geoelettriche del sottosuolo e dalla strumentazione disponibile;
- › Da vincoli temporali o fisici del sito d'indagine¹⁰.

2.4. Tomografia elettrica di resistività

La tomografia elettrica di resistività utilizza il principio dei quadripoli sfruttando il loro stendimento multiplo. In questo modo è possibile, aumentando il numero dei quadripoli e modificando la loro distribuzione spaziale, ottenere misurazioni bidimensionali e tridimensionali¹.

Questa evoluzione è iniziata negli anni Ottanta con l'introduzione, grazie all'avanzamento della microelettronica, di georesistivimetri multi-elettrodo. Questi strumenti permettono di acquisire in modo automatico la resistività apparente risultante da ogni quaterna possibile di elettrodi nello stendimento¹⁵.

Un ulteriore sviluppo negli ultimi decenni della tecnologia informatica, di nuovi software di elaborazione dati e di tecniche di calcolo numerico avanzato hanno permesso acquisizioni tridimensionali¹⁶.

La misura di resistività avviene utilizzando un resistivimetro, che commuta automaticamente la corrente agli elettrodi di iniezione e agli elettrodi di potenziale secondo la sequenza prescelta.

Questo strumento, anche detto georesistivimetro, invia la corrente ad ogni elettrodo, misurando e memorizzando il potenziale risultante per ciascun quadrupolo. Gli elettrodi sono collegati allo strumento tramite uno o più cavi.

I dati grezzi di resistività apparente raccolti sul campo dallo strumento possono essere rappresentati da una pseudosezione, un grafico con la pseudoprofondità di indagine in ordinata e la lunghezza dello stendimento in ascissa. Ogni punto della pseudosezione rappresenta un valore di resistività apparente in funzione della posizione del quadrupolo come mostrato in *Figura 9*¹.

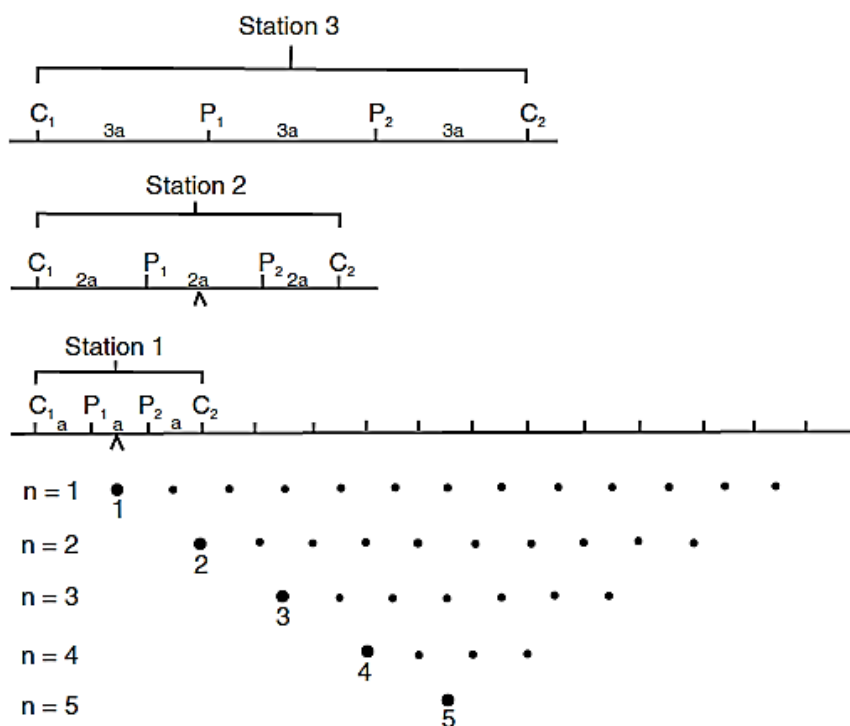


Figura 9: Concetto di pseudosezione [Reynolds 2011]

Come si può osservare maggiore è la separazione tra gli elettrodi, più profondo sarà il livello di rilevamento e maggiore sarà la profondità del valore ρa investigato. Solitamente si utilizza rappresentare le differenze di resistività apparente con una diversa scala cromatica¹.

Le pseudosezioni sono rappresentazioni utili, tuttavia, la distribuzione di resistività apparenti non corrispondono alla distribuzione di resistività reale, che si ottiene solamente tramite un appropriato processo di inversione del dato.

2.5. Inversione del dato

Il dato misurato deve essere sottoposto ad inversione in modo da sostituire alle resistività apparenti la reale distribuzione dei valori della resistività reale del suolo¹⁵. I modelli diretti calcolano i valori di resistività a partire da una nota struttura geoelettrica del sottosuolo. Nei modelli inversi la struttura geoelettrica del sottosuolo viene determinata noto un insieme di misure di resistività. Questo può essere schematizzato come in *Figura 10*¹⁷.

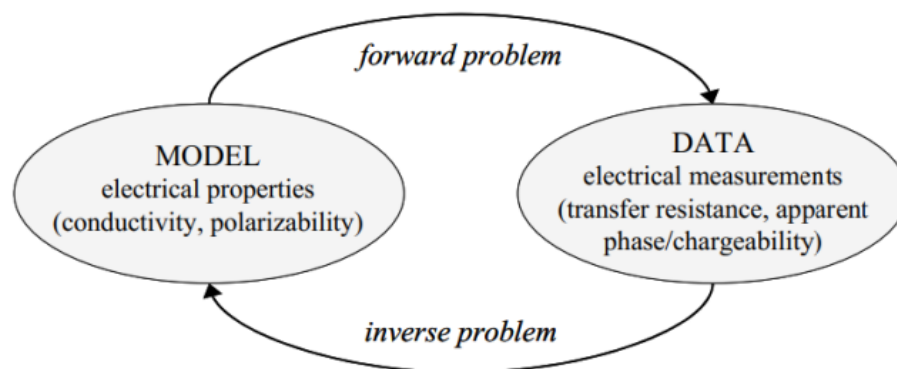


Figura 10: Modello diretto e modello inverso [Binley 2015]

Il problema diretto, dato un modello di sottosuolo, restituisce sempre uno e un solo insieme di dati. Il problema inverso ricostruisce un modello significativo a partire dai dati raccolti su campo. Il processo di inversione utilizza una modellizzazione allo scopo di invertire i dati di resistività apparente in resistività reale per ottenere un modello di suolo.

Esistono diverse strategie per conseguire un'inversione, basate sul confronto tra dati simulati e dati misurati, uno di questi è l'approccio iterativo strettamente legato alla regressione non lineare¹⁵.

Si procede suddividendo il suolo investigato secondo una griglia (mesh) di celle, nel caso di misure lungo un profilo (2D), o parallelepipedi nel caso di misure su un'area (3D) come mostrato in *Figura 11*. Le celle hanno dimensioni laterali pari a metà del passo di campionamento, in quanto questo è il potere risolutivo superficiale, e dimensioni crescenti all'esterno, per permettere di calcolare il potenziale elettrico "all'infinito". La dimensione verticale delle celle corrisponde alla profondità d'indagine del quadripolo più corto utilizzato vicino alla superficie, e cresce logaritmicamente verso il basso per tener conto della progressiva perdita di risoluzione con la profondità¹⁵.

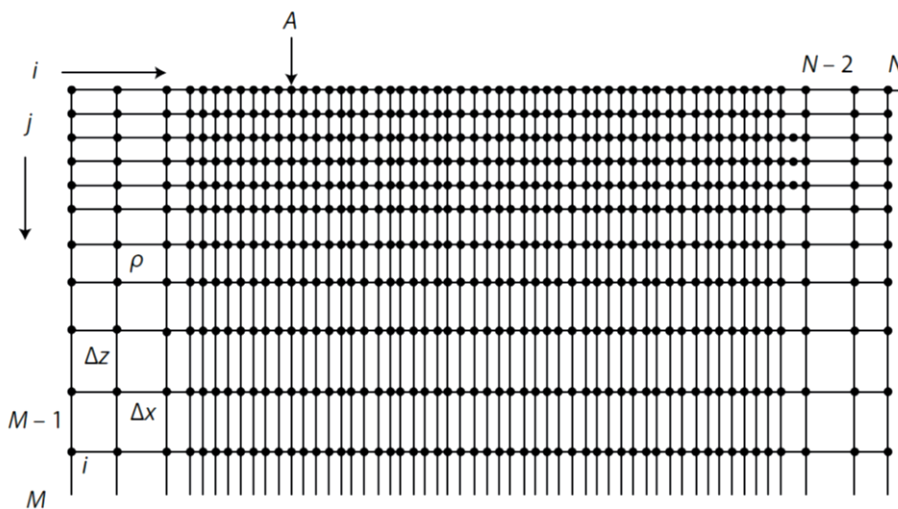


Figura 11: Esempio di griglia 2D per il calcolo di resistività [Santarato 2015]

A ogni cella viene attribuito un valore iniziale di resistività: si crea cioè un modello iniziale(diretto). Questo modello iniziale è necessario in quanto essendo il problema di natura non lineare esso deve essere linearizzato, con la conseguenza che non si stimeranno i valori dei parametri (cioè le resistività reali di ciascuna cella), ma le loro variazioni rispetto ai valori iniziali assegnati¹⁵.

Un algoritmo di calcolo diretto agli elementi finiti o alle differenze finite calcola le resistività apparenti in tutti i punti nei quali esse sono state misurate. A questo punto inizia il ciclo iterativo del processo di inversione ovvero la minimizzazione della funzione quadro linearizzata che porta a stimare un primo insieme di variazioni dei parametri (le resistività reali nelle singole celle). Queste variazioni saranno sommate algebricamente ai valori iniziali e si procederà a calcolare un secondo insieme di resistività apparenti. Se ne minimizzerà la differenza con quelle misurate, trovando un secondo insieme di variazioni. L'inversione terminerà quando gli incrementi stimati diventano trascurabilmente piccoli¹⁵.

Per ottenere un modello dettagliato e sufficientemente esteso da coprire il reale volume di sottosuolo coinvolto da tutte le misure, il numero di celle per il calcolo diretto agli elementi finiti o differenze finite può essere anche molto superiore al numero di dati sperimentali di resistività apparente. Il problema dell'inversione tomografica dei dati geoelettrici può dunque essere sottodeterminato. Il problema inverso è mal posto, nel senso di Tikhonov, in quanto molte celle vengono coinvolte solo marginalmente dalle misure, in particolare quelle di "chiusura/confine" del modello, cioè quelle che simulano l'infinito laterale e in profondità¹⁵.

Occorre quindi ricorrere alla regolarizzazione di Tikhonov, introducendo una funzione di stabilizzazione. Nella tomografia della resistività elettrica la funzione stabilizzatrice normalmente usata è quella della minima rugosità (minimum roughness), che significa imporre a celle vicine di non poter assumere valori di resistività arbitrariamente diversi, con la conseguenza che il modello finale stimato risulterà "liscio" (smooth). Il passaggio tra corpi geologici a resistività diverse avverrà quindi gradualmente anche qualora in natura il salto di resistività sia netto¹⁵.

Questo approccio è talmente efficiente che riesce a stimare la distribuzione delle resistività reali anche partendo da un modello iniziale omogeneo, cioè attribuendo a tutte le celle lo stesso valore, di norma il valor medio di tutte le resistività apparenti¹⁵.

Questo approccio viene anche definito come “inversione di Occam”, questo metodo di inversione consente di usare come modello iniziale un modello a informazione “minima”, cioè un semispazio omogeneo¹⁵

Ciò significa che il risultato che si ottiene non dipende dalla scelta iniziale, in quanto arbitraria, di un modello iniziale già strutturato, ma soltanto dai dati. Il modello finale stimato è quello a struttura minima rispetto all’insieme dei dati e cioè che esso è il processo iterativo di tutti i modelli più strutturati che abbiano uno scostamento tra l’insieme delle resistività apparenti misurate e di quelle calcolate all’ultima iterazione minore o uguale a quello ottenuto¹⁵.

Per risolvere l’inversione di dati idrogeofisici o agrogeofisici molti studi hanno adottato un’implementazione al processo di regolarizzazione del modello tramite l’inserimento del vincolo dell’errore dei reciproci, come ad esempio in Beff et al., 2013².

Le misurazioni reciproche si ottengono invertendo i dipoli di iniezione e potenziale nei quadripoli rispetto alla misura normale (diretta). A livello teorico la misura reciproca dei quadripoli riporta lo stesso valore, nelle misure pratiche invece questo non accade a causa di vari fattori come, ad esempio, il contatto non ottimale fra elettrodo e suolo.

Avendo a disposizione misure dirette e reciproche oltre alla regolarizzazione dell’inversione è possibile calcolare il loro errore percentuale ed impostando una soglia filtrare le misure che la superano ottenendo un database più preciso¹⁷.

Alla fine del processo di inversione si ottiene un modello della distribuzione spaziale delle resistività reali che viene rappresentato graficamente come tomografia elettrica di resistività.

Per le acquisizioni in time-lapse ci sono ulteriori difficoltà nell'osservare piccole variazioni di stato rispetto alla situazione, agli errori e al rumore di fondo. È possibile invertire i singoli dataset per ogni time-laps rapportando la resistenza misurata allo stesso quadripolo in tempi diversi rispetto al tempo zero per diminuire il segnale/rumore. Ogni misurazione successiva alla prima può quindi essere computata come differenza rispetto a quest'ultima, in questo modo l'inversione ad ogni intervallo successivo al primo calcolerà solamente le differenze fra resistività e modello¹⁸.

3. Scopo dello Studio

In questo progetto di Tesi è stata impiegata la tomografia elettrica di resistività in tridimensione e time-lapse per lo studio dell'attività di suzione degli apparati radicali di *Populus nigra* (Pioppo) e *Alnus incana* (Ontano). L'esperimento è stato eseguito simulando condizioni naturali all'interno di contenitori in PVC, ai quali sono stati applicati esternamente ed in superficie gli elettrodi necessari allo studio. Per l'elaborazione dati è stato utilizzato il software ResIPy operante in ambiente Python.

Questo elaborato ha come obiettivo la caratterizzazione qualitativa, in modo non invasivo, della zona radicale, soprattutto in termini di capacità di assorbimento. Le due specie dimostrano strutture radicali, velocità di crescita e capacità di assorbimento differenti.

In questo lavoro sono stati analizzati i dati ERT raccolti dalla Dott.ssa Sartori, nell'ambito del proprio elaborato riguardo alla misura diretta e analisi sperimentale della dimensione e biomassa degli apparati radicali delle due specie sopracitate, che avevano presentato problemi tecnici e non avevano prodotto risultati.

Grazie a questo precedente sarà possibile valutare l'aderenza dei dati geofisici di questo progetto ai dati diretti e reali ottenuti con metodi classici¹⁹.

Lo studio mira a dimostrare anche l'affidabilità e la precisione della tecnica ERT nelle indagini agrogeofisiche, nonché la sua possibile applicazione ad altre specie e ambiti.

4. Materiali e Metodi

4.1. Installazione

I contenitori dell'esperimento, con diametro di 70 cm, altezza 87 cm e capacità complessiva di 300 l sono stati riempiti con due differenti materiali, sabbia e una mistura di sabbia e ghiaia, con le seguenti modalità: 57 cm di mistura e 17 cm di sabbia raggiungendo un'altezza complessiva di 79 cm (comprensiva di uno strato di corazzamento).

Prima del riempimento stratificato dei contenitori sono stati inseriti gli elettrodi in fori appositamente realizzati fissandoli all'interno con delle rondelle. Gli elettrodi sono stati disposti ricreando un parallelepipedo secondo il seguente schema:

- › 16 sul terreno in superficie;
- › 32 lungo la superficie laterale del contenitore, suddivisi in 4 linee, ogni elettrodo laterale dista in verticale 9 cm dal successivo;
- › La prima fila è stata collocata a 9 cm dal fondo del bidone;
- › L'ultima fila di elettrodi dista 15 cm dalla sommità⁴⁹.

È stata poi assegnata una numerazione agli elettrodi da 1 a 48 per ciascun contenitore come mostrato in vista planare dall'alto in *Figura 12* e in tridimensione in *Figura 13*.

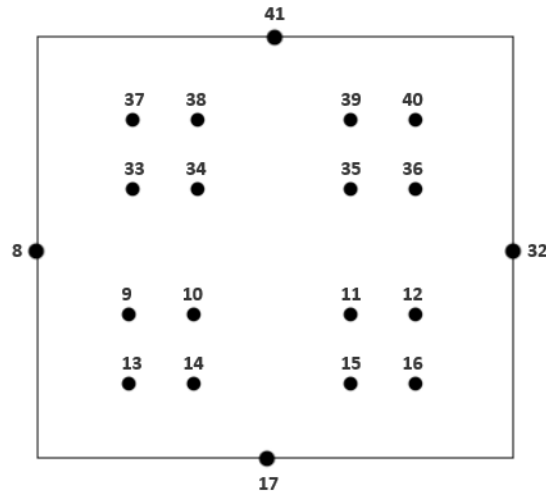


Figura 12: Vista dall'alto della configurazione degli elettrodi

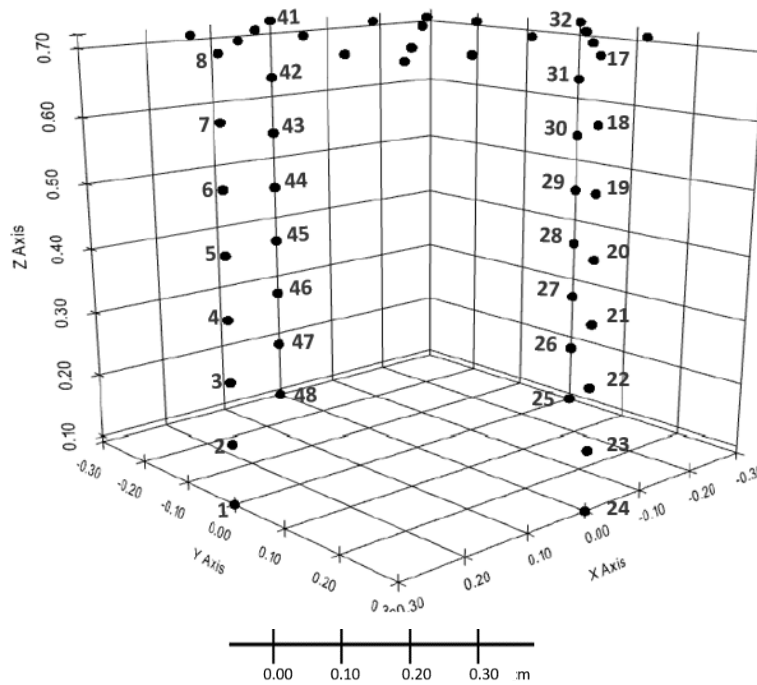


Figura 13: Vista tridimensionale della configurazione degli elettrodi

Successivamente all'installazione degli elettrodi e alla stratificazione del riempimento dei contenitori, nel mese di luglio 2021, sono state piantate tre piante di Pioppo nel contenitore 5 e tre piante di Ontano nel contenitore 6.

Inoltre, dal mese di giugno al mese di agosto 2021, sono stati eseguiti dei fori a profondità progressivamente maggiore dai 40 cm dal fondo ai 25 cm per far defluire

l'acqua di irrigazione in eccesso simulando un livello di falda all'interno del contenitore¹⁹.

Purtroppo, alla data dell'esperimento, nel mese di settembre, solamente due piante di Pioppo nel contenitore 5 e due piante di Ontano nel contenitore 6 sono sopravvissute.

Lo strumento adottato per lo studio è il georesistivimetro MAE x 612-em che necessita di una batteria da 12 V e 60 Ah per l'alimentazione e possiede fino a 96 canali all'interno dei quali inserire i connettori. Gli elettrodi sono costituiti da bulloni e sono collegati all'estremità opposta ai connettori mediante cavi di rame, rivestiti da una guaina in plastica, ai quali sono saldati.

In questo esperimento sono state usate 2 boxes da 24 canali ciascuna: una per gli elettrodi numerati dall'1 al 24 e una per quelli numerati dal 25 al 48.

Una volta terminati i collegamenti necessari sono state controllate le resistenze di contatto e sono stati impostati i parametri strumentali della configurazione di elettrodi adottata: voltaggio massimo 400 V, potenziale minimo 50 mV, numero di iterazioni 3 (ogni dato acquisito è il risultato della media di 3 iterazioni, riducendo così la possibile quota dell'errore di misura).

In *Figura 14* viene mostrata l'installazione dello strumento con i relativi collegamenti agli elettrodi¹⁹.

Il primo test è stato effettuato in condizioni secche, l'irrigazione è stata interrotta qualche giorno prima in modo che il terreno si asciugasse il più possibile. La prima misura, timestep zero, è stata effettuata quindi senza irrigare, dopodiché sono stati versati dieci litri d'acqua. Sono state successivamente prese sei misure ad intervalli di un'ora e mezza ed un'ultima misura a ventiquattr'ore dall'irrigazione iniziale¹⁹.



Figura 14: Installazione georesistivimetro per la misura ERT. Foto della Dott.ssa Sartori.

In aggiunta come è possibile osservare nella *Figura 14*, è stata utilizzata una lampada da 1250 W per cercare di stimolare la traspirazione vegetale.

4.2. Elaborazione dati

Per l'elaborazione dati è stato utilizzato il software ResIPy operante in ambiente Python tramite l'interfaccia di Jupyter notebook. Jupyter è un'applicazione web che permette la scrittura e l'immediata esecuzione di codici attraverso il linguaggio di programmazione Python, rappresentando i risultati ottenuti sullo stesso foglio di lavoro.

Precedentemente alle acquisizioni dati è stata eseguita una modellizzazione sintetica, simulando i valori di resistività congrui al terreno impostato e alla possibile presenza d'acqua. Questo per stabilire una geometria degli elettrodi il più ottimale possibile con lo scopo dello studio.

Per quanto riguarda l'acquisizione dati le sequenze con array dipolo-dipolo adottate, entrambe con acquisizioni dirette e reciproche dei quadripoli di misura, sono state:

- › Skip zero da 2195 misure
- › Skip quattro da 2207 misure

Durante il controllo dei dati è stato riscontrato che una delle due sequenze di acquisizione invertiva il dipolo di potenziale ($MN \rightarrow NM$), misurando così valori con ugual modulo ma segno opposto. Una volta corretto l'errore di acquisizione è stato possibile procedere con l'elaborazione dei dati.

Innanzitutto, le resistività apparenti "grezze" raccolte dallo strumento sono state filtrate secondo i seguenti parametri:

- › Rimozione delle misure ottenute da un mancato accoppiamento degli elettrodi;

- › Rimozione delle misure reciproche con variazione maggiore del 20%;
- › Rimozione dei valori di resistività negativi.

L'errore delle misure reciproche adottato per il filtraggio è stato posto pari al 20% dopo diversi tentativi. Questa soglia restituisce un database sufficientemente corretto e corposo per effettuare un processo di inversione congruo.

Su questa soglia, più alta rispetto al 5% (solitamente imposto su dataset di laboratorio) ha pesato il fattore geometrico complesso dell'esperimento che causa condizioni forzanti di accoppiamento tra dipoli all'interno degli array (ad esempio tra dipoli opposti sia per profondità che per lato).

Per poter procedere con l'inversione è stata costruita una "mesh" (maglia) ad elementi finiti ricalcante la geometria di acquisizione. Questa, mostrata in *Figura 15*, servirà come dominio matematico per risolvere il problema inverso nella fase successiva di inversione.

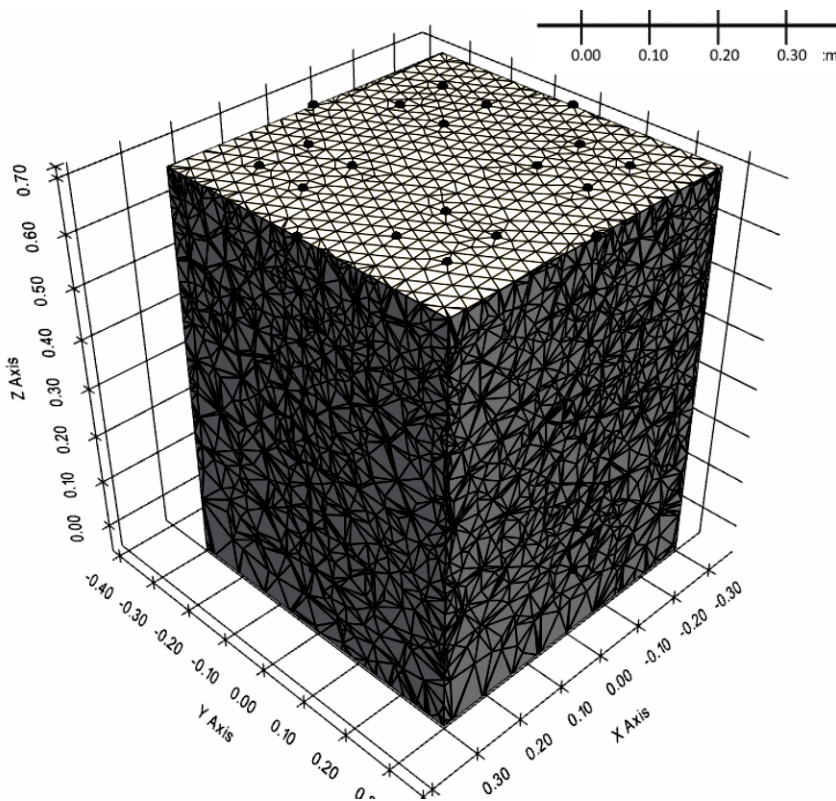


Figura 15: Visualizzazione della "mesh" creata con il software ResIPy

Il processo di inversione utilizza una funzione matematico-statistica (regressione) minimizzando la differenza tra i dati teorici ed i dati sperimentali. Questa differenza viene indicata come RMS (radice quadrata media) e la fase iterativa prosegue fino ad una differenza trascurabile fra il modello diretto ed inverso, restituendo dei valori di resistività reale come spiegato precedentemente. Come regolazione della funzione iterativa di inversione è stato utilizzato come vincolo l'errore percentuale delle misure reciproche (20%).

Il modello finale che si ottiene dal processo di inversione è una tomografia elettrica di resistività reale, che può essere rappresentata in Ohm/m ma anche come differenza percentuale delle resistività fra time-lapse, mostrando più dettagliatamente le variazioni nei diversi momenti.

5. Risultati

L'elaborazione dei dataset di entrambi i contenitori per singola sequenza di acquisizione (skip), tramite regressione lineare multipla delle resistività operata tramite software ResIPy, ha portato ai seguenti risultati:

- › Per il contenitore 5 skip zero è stato ottenuto $R^2=0,96$ e per lo skip quattro $R^2=0,79$. Nelle immagini a seguire si mostra l'elaborazione grafica.

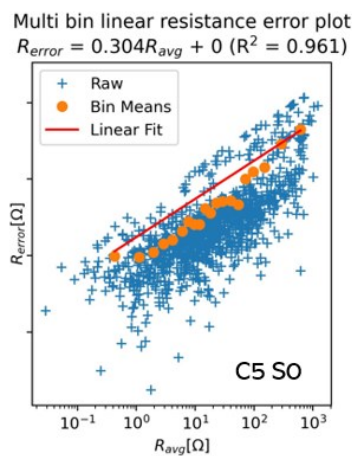


Figura 16: Regressione dataset C5 S0

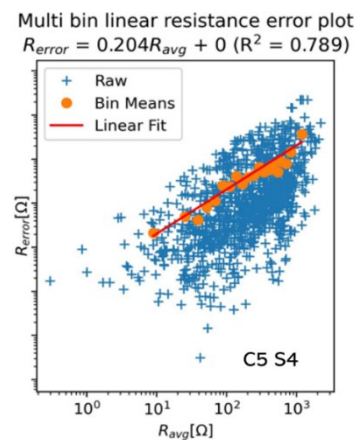


Figura 17: Regressione dataset C5 S4

- › Per il contenitore 6, è stato ottenuto un valore R^2 pari a 0,91 per lo skip zero e 0,87 per lo skip quattro (Figura 18 e 19).

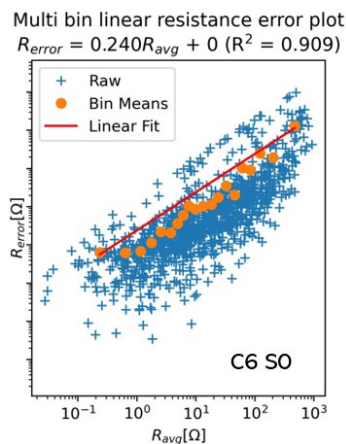


Figura 18: Regressione dataset C6 S0

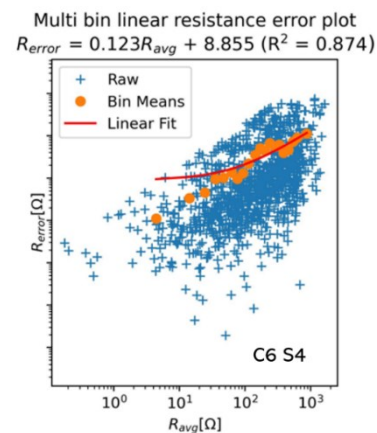


Figura 19: Regressione dataset C6 S4

I dataset di entrambi i contenitori con l'acquisizione skip zero risultano più accurati ($R^2 \geq 0,9$) e successivamente al filtraggio delle misure reciproche con soglia del 20%, il loro processo di inversione (eseguito dal software ResIPy) ha evidenziato meno iterazioni per minimizzare il misfit (RMS). Questo si può notare dalla rappresentazione grafica dei processi di inversione per tutte le acquisizioni effettuate, *Figure 20-23*.

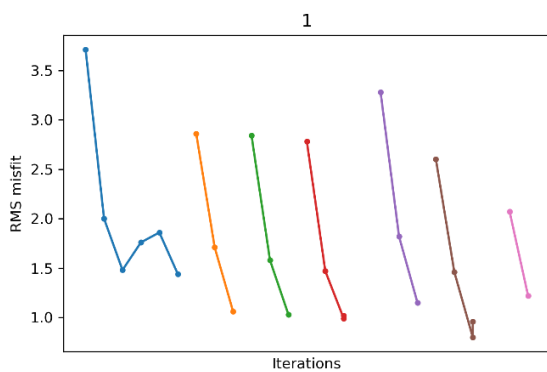


Figura 20: Iterazioni per il processo di inversione di C5 S0

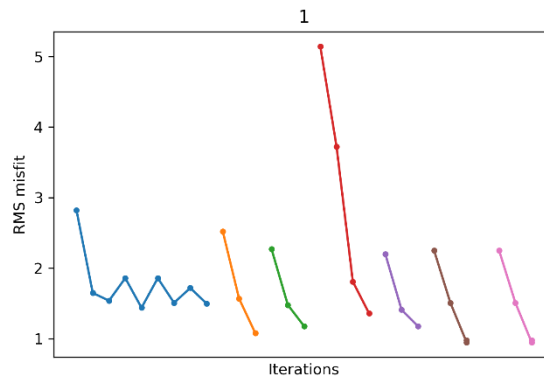


Figura 21: Iterazioni per il processo di inversione C5 S4

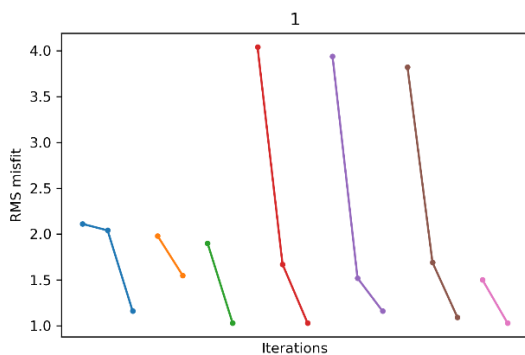


Figura 22: Iterazioni per il processo di inversione di C6 S0

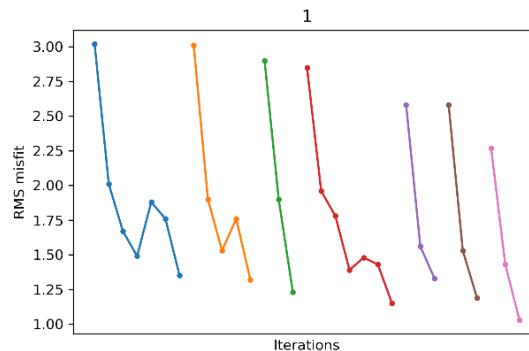


Figura 23: Iterazioni per il processo di inversione di C6 S4

Prendendo in considerazione questi aspetti si è tralasciato lo studio del modello inverso ottenuto con la sequenza di acquisizione skip quattro, non ritenendolo affidabile. Con i dataset delle sequenze skip zero utilizzate, dopo il filtraggio e l'inversione dati sono state ottenute le tomografie di resistività elettriche che verranno discusse di seguito.

5.1. Contenitore 5 skip zero

Nella *Figura 24* sono rappresentate delle sezioni perpendicolari delle tomografie elettriche di resistività relative ai dataset del contenitore 5 skip zero, per singolo timestep, in ordine temporale:

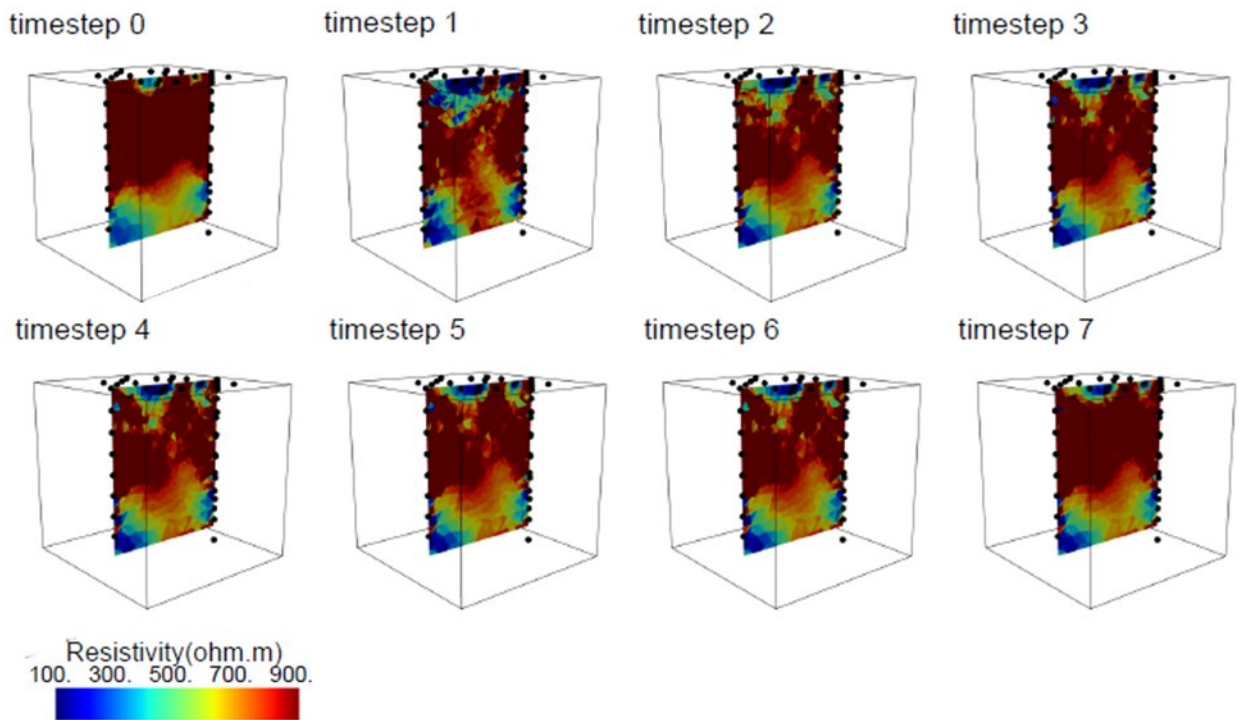


Figura 24: Sezioni delle tomografie elettriche di resistività Ohm/m del contenitore 5 skip zero

Dall'osservazione della *Figura 24* si notano, nelle varie tomografie dei diversi timestep, alcuni valori minori di resistività sulla superficie e sul fondo del contenitore rispetto ai valori di resistività più elevati al centro.

L'elevata resistività che si osserva al centro del contenitore collima con il suo contenuto di sabbia e ghiaia, materiale resistivo; mentre la minore resistività alla base è riconducibile alla presenza di uno strato di terreno saturo.

Questo è plausibile poiché la variazione di resistività osservata al fondo si attesta ad una profondità circa pari all'altezza dei fori effettuati sul contenitore per il

deflusso dell'acqua. La minore resistività della sommità è invece dovuta alla presenza della rizosfera delle piante di Pioppo.

Il timestep zero corrisponde al primo test ovvero in condizioni di assenza di irrigazione, la corrispondente tomografia restituisce un pattern di resistività in linea con le condizioni sature ed insature note della caratterizzazione del contenitore.

Osservando la tomografia del timestep uno, ad irrigazione avvenuta, è visibile una riduzione superficiale ed interna delle resistività del terreno ovvero un aumento della conducibilità che rispecchia il versamento dei 10 litri d'acqua (sostanza conduttiva).

Le tomografie ai timestep successivi, ciascuno a 1,5 ore dall'irrigazione, mostrano una diminuzione della conducibilità dello strato superficiale del terreno. Questa variazione nella zona radicale delle piante è dovuta all'attività di suzione; il continuo prelievo di acqua dal terreno per traspirazione, grazie al gradiente del potenziale idrico suolo-atmosfera, rende l'ambiente progressivamente meno conduttivo. La diminuzione di conducibilità nella parte centrale è invece riconducibile al percolamento dell'acqua verso il fondo. Abbastanza trascurabile è la quota di evaporazione dalla superficie (i test sono stati effettuati a settembre).

È da sottolineare come una sola sezione non rifletta la situazione generale dell'intero volume del terreno. La fascia più conduttiva che si osserva al centro del contenitore può essere provocata dallo scorrimento preferenziale di una certa quantità d'acqua dato il materiale grossolano del terreno.

Nella tomografia corrispondente al timestep sette ovvero dopo 24h dall'irrigazione, si osserva una similarità del pattern resistivo rispetto allo stato iniziale, ma con il raggiungimento di una conducibilità maggiore nelle zone radicali. Ciò conferma

l'avvenuto assorbimento radicale di acqua dal terreno circostante e il nuovo grado di umidità raggiunto dalle rizosfere delle piante di Pioppo.

Indagando alcune sezioni parallele alla superficie si possono apprezzare qualitativamente le variazioni di resistività imputabili all'azione di suzione degli apparati radicali. Per queste tomografie è stata scelta la rappresentazione secondo differenze percentuali delle resistività normalizzate rispetto al timestep zero. Le variazioni percentuali, quindi, indicano il graduale ritorno alle condizioni insature in assenza di irrigazione.

Nella *Figura 25* sono riportate le sezioni a profondità 0, 10 e 20 cm delle tomografie dei singoli timestep.

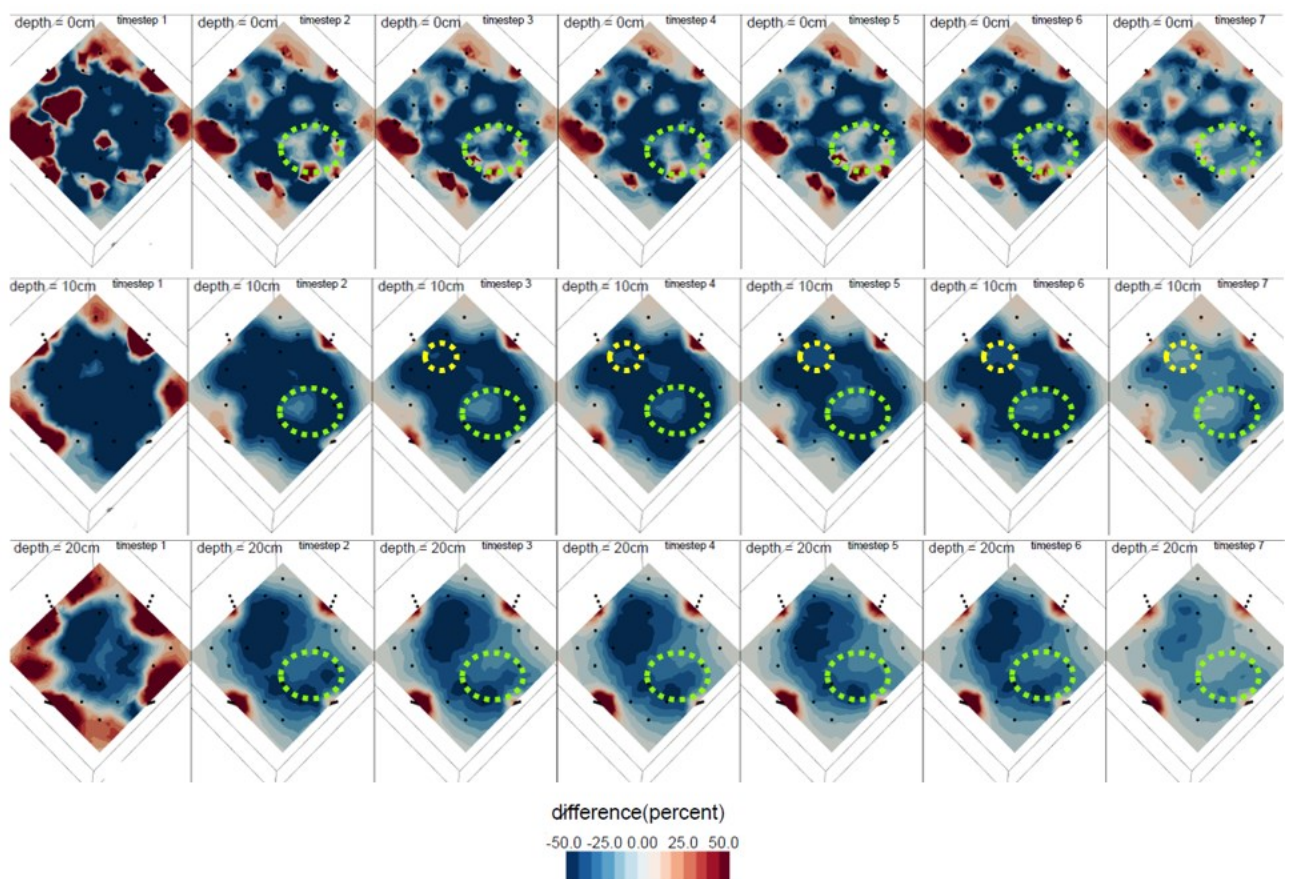


Figura 25: Differenze percentuali delle tomografie del contenitore 5 a profondità di 0, 10 e 20 cm

In corrispondenza del cerchio verde tratteggiato nelle tomografie della *Figura 25*, si nota in maniera più evidente a profondità pari a 10 cm la zona di assorbimento radicale di una delle due piante di Pioppo. Indicato con un cerchio più piccolo di colore giallo l'assorbimento probabile dovuto alla seconda pianta di Pioppo.

È stata infine effettuata un'elaborazione grafica tridimensionale delle differenze percentuali di resistività mantenendo il riferimento al timestep zero. Dalla *Figura 26* si può notare come una zona saturata superficiale (volume isoresistivo) va riducendosi per evapotraspirazione nelle 24 ore oggetto di studio.

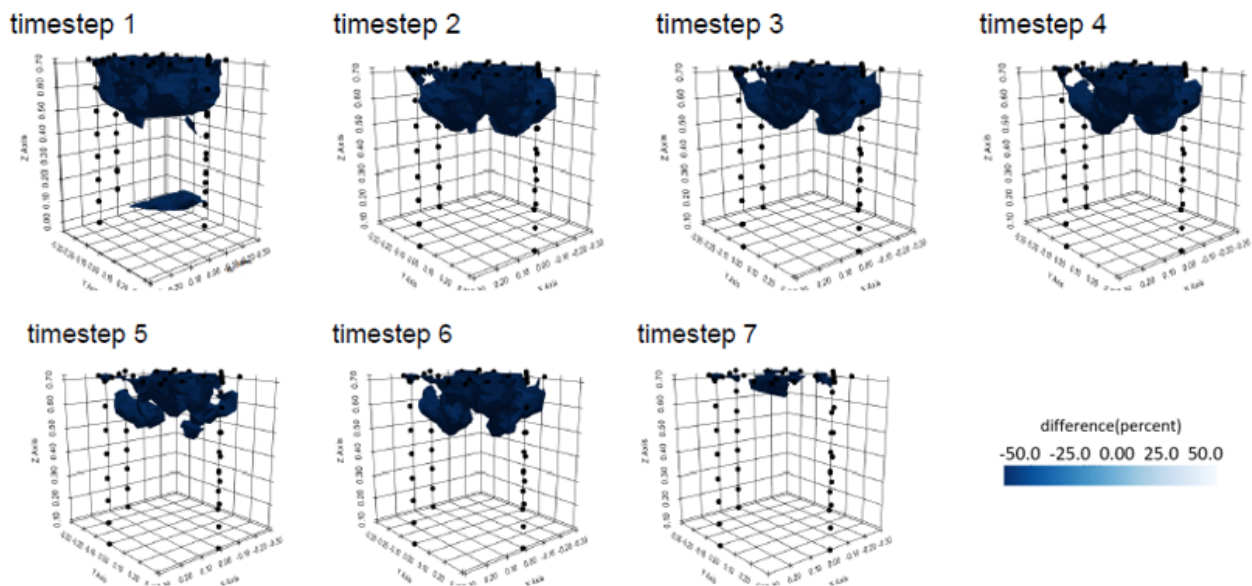


Figura 26: Differenze percentuali di resistività di un volume isoresistivo per singolo timestep

5.2. Contenitore 6 skip zero

Per quanto riguarda le tomografie del contenitore 6 con sequenza skip zero sono stati ottenuti risultati analoghi. Le sezioni delle tomografie elettriche di resistività dei vari timestep sono mostrate in *Figura 27*.

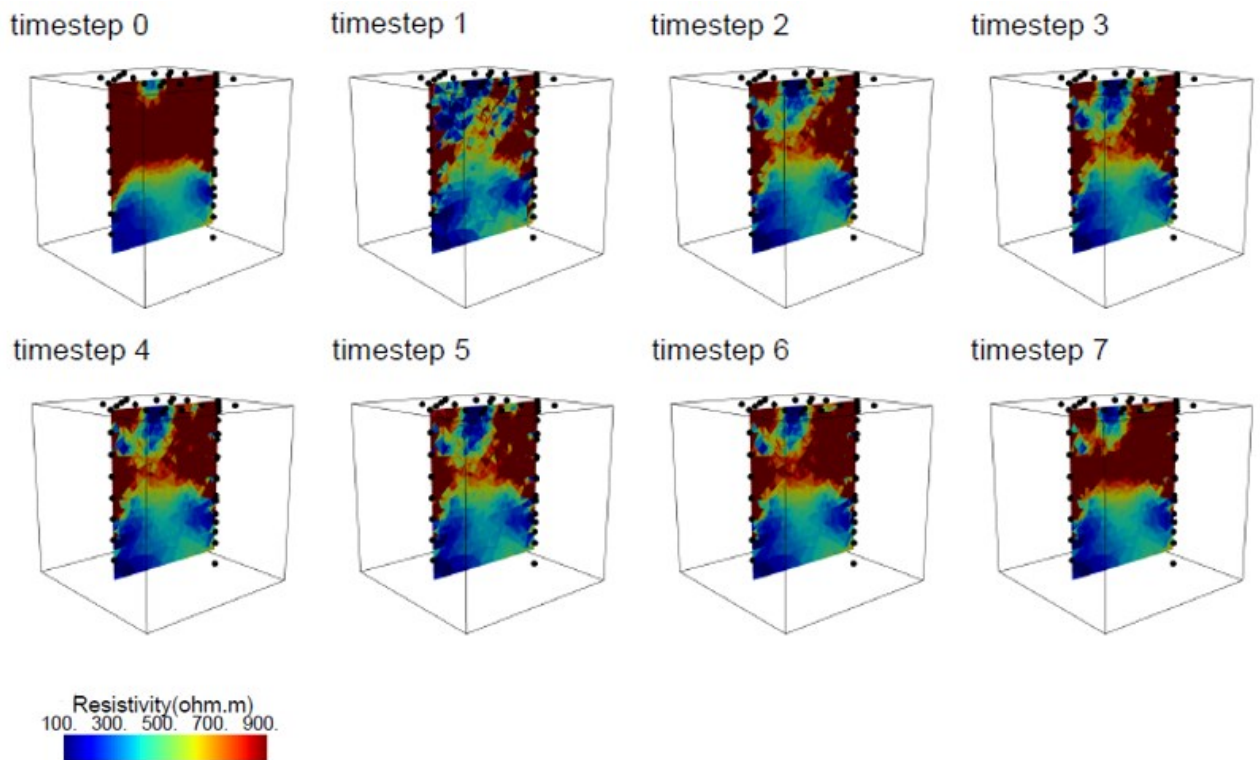


Figura 27: Sezioni delle tomografie elettriche di resistività Ohm/m del contenitore 5 skip zero

La tomografia dei vari timestep riflette le condizioni sature e insature del terreno. Si possono osservare resistività minori nelle ultime decine di centimetri al fondo mentre sulla superficie l'area conduttiva rappresenta la rizosfera delle piante di Ontano (in questa sezione si osserva prevalentemente la pianta n.2).

Al timestep uno la sezione tomografica denota una situazione coerente con il versamento d'acqua che porta ad una forte diminuzione della resistività nella parte superiore e mediana del contenitore.

Proseguendo con i vari timestep si osserva come il pattern di resistività subisca modificazioni soprattutto nella zona mediana, dove la resistività torna ad aumentare indicando una diminuzione d'acqua. Questa variazione graduale è dovuta sia alla capacità di suzione degli apparati radicali delle piante di Ontano che grazie alla traspirazione sottraggono parte del volume d'acqua presente nel terreno sia alla percolazione gravitazionale d'acqua verso il fondo.

Infine a 24 ore di distanza la sezione tomografica del timestep sette è paragonabile alla situazione di partenza (timesteo zero) con un pattern di resistività suddiviso in zona satura al fondo, zona conduttiva radicale e zona insatura resistiva a livello mediano.

Osservando le differenze percentuali delle resistività normalizzate rispetto al timestep zero; da una sezione parallela alla superficie a profondità di 0, 10 e 20 cm, si notano due aree distinte come indicato da alcuni cerchi verdi in *Figura 28*.

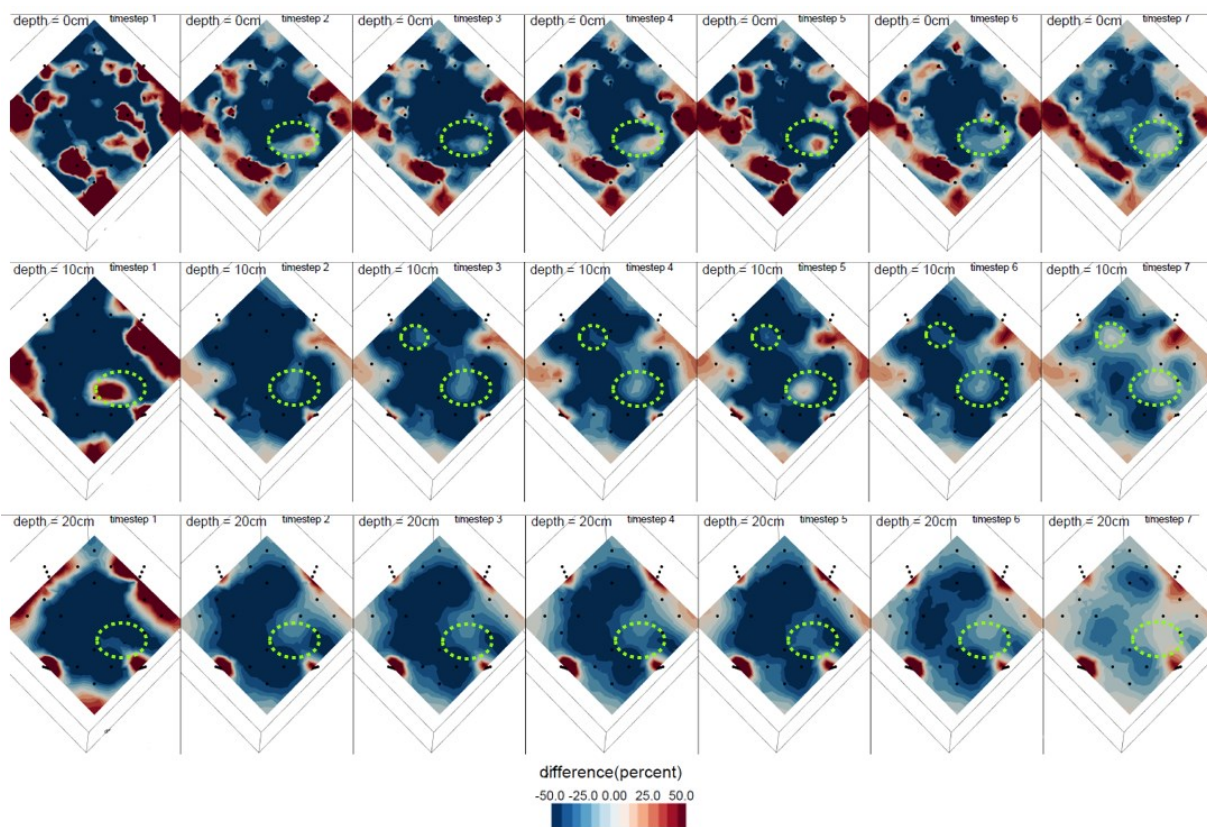


Figura 28: Differenze percentuali delle tomografie del contenitore 5 a profondità di 0, 10 e 20 cm

Le aree di colore blu progressivamente più chiaro indicano un aumento della resistività che è possibile valutare come presenza di attività radicale delle piante di Ontano del contenitore 6. Questo fenomeno di suzione e prelievo di acqua con conseguente riduzione della conducibilità del suolo è stato osservato molto bene a profondità di 10 cm e, anche se con meno nitidezza, alle altre profondità.

Infine, è stata effettuata un'elaborazione grafica tridimensionale delle differenze percentuali di resistività mantenendo il riferimento al timestep zero mostrata in *Figura 29*. Si nota come un volume isoresistivo riconducibile ad una zona saturata va riducendosi nelle 24 ore oggetto di studio.

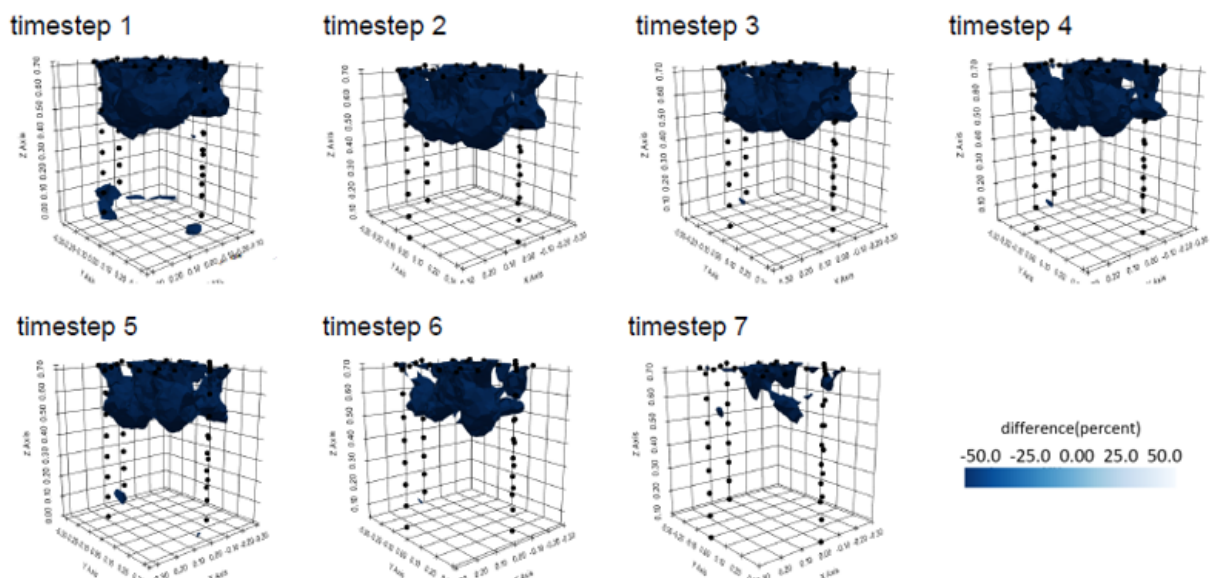


Figura 29: Differenze percentuali di resistività di un volume isoresistivo per singolo timestep

6. Discussione

Grazie al metodo diretto¹⁹ è possibile confrontare i risultati ottenuti dalle indagini ERT con la posizione e il dimensionamento delle piante cresciute nei due contenitori.

6.1. Contenitore 5

Le due piante di Pioppo sopravvissute del contenitore 5 (*Figura 30 e 31¹⁹*) hanno avuto una crescita stentata, producendo radici molto fini, sviluppate verticalmente e poco ramificate. Questo sviluppo verticale rispecchia la tipica morfologia della rizosfera delle piante di Pioppo determinata da una crescita dell'apparato radicale detto fittonante.



Figura 30: Pianta di Pioppo n.1 contenitore 5



Figura 31: Pianta di Pioppo n.2 contenitore 5

Queste caratteristiche collimano bene con i dati geofisici ottenuti che mostrano nelle tomografie delle *Figure 24 e 25* un'attività radicale collocata a non più di 15-20 cm dalla superficie.

Le dimensioni dell'apparato radicale della pianta n.2 giustificano l'attività di suzione più marcata (cerchio verde) della *Figura 25*; mentre è consono ipotizzare che la debole differenza di resistività osservata, indicata con il cerchio giallo in *Figura 25* sia dovuta al minor potere di suzione della pianta n.1, data la sottodimensione della rizosfera.

Inoltre, grazie alle fotografie¹⁹ dell'installazione è stato possibile collegare il numero e la geometria degli elettrodi alla posizione delle piante nel contenitore, ottenendo una sovrapposizione veritiera delle condizioni reali con quanto riscontrato nelle tomografie elettriche di resistività (*Figura 32*).



Figura 32: Collocazione delle piante di Pioppo n.1 e 2 nel contenitore 5¹⁹

6.2. Contenitore 6

Analogamente l'eradicazione¹⁹ delle piante di Ontano del contenitore 6 ha permesso di valutare la grandezza e l'estensione del loro apparato radicale. Le piante di Ontano hanno una morfologia e fisiologia radicale diversa, definita fascicolata ramificata, che porta la rizosfera ad espandersi tipicamente più lateralmente e superficialmente.



Figura 33: Pianta di Ontano n.1
contenitore 6



Figura 34: Pianta di Ontano n.2
contenitore 6

Anche le piante non hanno avuto un accrescimento importante attestandosi ad una profondità di circa 10 cm per la pianta n.1 e 20 cm per la pianta n.2.

Anche in questo caso tali osservazioni dirette coincidono con i risultati delle analisi non invasive ERT. Sono infatti state individuate due aree con attività di assorbimento radicale nella *Figura 28*, una più debole che rispecchia l'apparato della pianta n.1 ed una più marcata appartenente alla pianta più sviluppata n.2.

Questi risultati possono essere confermati anche dal confronto con la posizione effettiva delle piante di Ontano all'interno del contenitore 6 rispetto alla geometria degli elettrodi come mostrato in *Figura 35*.



Figura 35: Collocazione delle piante di Ontano n.1 e 2 del contenitore 6¹⁹

6.3. Considerazioni generali

I risultati dello studio dell'attività di suzione degli apparati radicali delle piante hanno avuto esito positivo, tuttavia, alcune considerazioni in merito sono rilevanti.

Innanzitutto, per quanto riguarda l'installazione è importante evidenziare come la stessa struttura del terreno grossolano composto dallo strato di corazzamento e da sabbia e ghiaia, abbia portato ad interferenze superficiali che si sono riscontrate nelle sezioni parallele al terreno a profondità 0 cm.

Questo non ha permesso una visione nitida delle differenze di resistività di superficie dovute al materiale grossolano rispetto alle differenze dovute ad un cambiamento del contenuto idrico, inficiando l'individuazione con certezza della quota di variazione di resistività dovuta al contributo dell'apparato radicale.

Per semplicità si mostra in *Figura 36* solo la sezione superficiale del contenitore 5 e 6, skip zero al timestep uno.

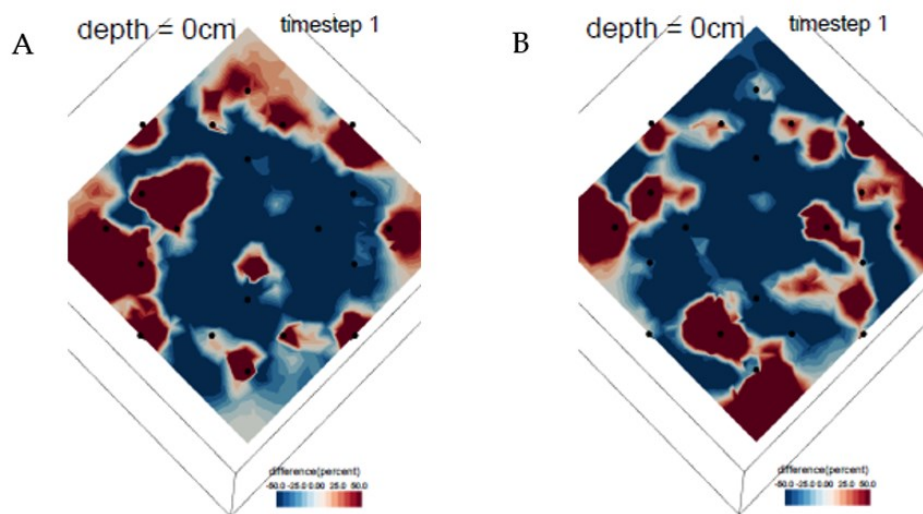


Figura 36: A) Sezione a profondità di 0 cm del C5 S0 timestep 1
B) Sezione a profondità di 0 cm del C6 S0 timestep 1

Successivamente, è da sottolineare come il dominio d'investigazione limitato, rappresentato dai confini fisici dei contenitori in PVC, abbia portato nell'elaborazione dati ad un dominio geometrico forzante di accoppiamento degli array dipolo-dipolo. Questo ha provocato un filtraggio dati accettabile ma comunque importante (soglia delle misure reciproche 20%).

In secondo luogo, le caratteristiche fisiche dell'installazione all'interno di contenitori in PVC hanno avuto conseguenze dirette nella visualizzazione dei risultati. Come si può notare nelle tomografie di questo studio, in corrispondenza della disposizione degli elettrodi laterali sono visibili alcune anomalie. Queste, nell'immediato intorno dell'inserimento degli elettrodi, sono causate dall'infiltrazione d'aria dall'esterno, mostrano coerentemente la maggiore resistività di quest'ultima rispetto al contorno.

Queste anomalie, sottolineo, non hanno inficiato i risultati dello studio ma la loro visualizzazione ne è stata leggermente compromessa. Nella *Figura 37* che riporta le sezioni a diversa profondità del contenitore 6 skip zero queste anomalie, più evidenti a 20 cm di profondità, sono state segnalate con alcune frecce rosse.

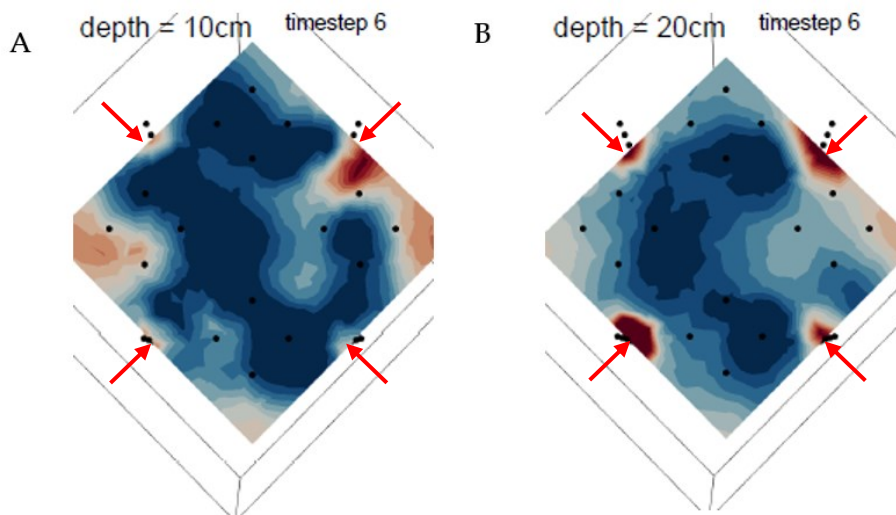


Figura 37: Esempio di anomalie resistive dovute alla presenza d'aria in corrispondenza del posizionamento degli elettrodi. A) Profondità 10 cm C6 S0; B) Profondità 20 cm C6 S0

Per quanto riguarda l'aspetto vegetale, l'aver effettuato lo studio con piante poco sviluppate ha influito sulla visualizzazione evidente dell'attività di suzione delle piante più piccole.

In particolare, la pianta di Pioppo n.1 del contenitore 5 anche se trapiantata con il proprio apparato radicale ha sostituito, un mese prima delle acquisizioni ERT, un'altra pianta che era deceduta. Il tempo che la pianta n.1 ha avuto a disposizione per l'adattamento ed il recupero dalla piantumazione è stato troppo breve per permettere uno sviluppo ed un'attività di suzione marcata.

La pianta di Pioppo n.2 come si può osservare in *Figura 25* è stata piantumata a partire da talea quindi pur avendo avuto più tempo (a partire dal mese di giugno

fino a settembre) ed avendo raggiunto una maggiore lunghezza, non ha sviluppato un apparato radicale denso o esteso con una forte presenza di peli radicali.

Diversamente è accaduto con le piante di Ontano del contenitore 6, queste sono state piantate con un apparato radicale già parzialmente sviluppato che ha permesso loro di non subire troppi stress e produrre un apparato più strutturato, fitto. Di conseguenza, la suzione della rizosfera delle piante di Ontano è stata più apprezzabile con la tecnica ERT.

In ultima analisi sono dovute alcune osservazioni alle condizioni meteorologiche. Come descritto nella parte introduttiva di questo elaborato, l'attività di suzione della rizosfera dipende dal gradiente del potenziale idrico fra suolo ed atmosfera e da altre variabili. Un elevato irraggiamento ed una ridotta umidità atmosferica, nonché un'elevata attività fotosintetica aumentano la quantità del flusso di traspirazione.

Avendo effettuato le prove nel mese di settembre da un lato non si sono create le condizioni ottimali per il processo di traspirazione, dall'altro si è ridotta la possibile distorsione dei risultati dovuta alla quota dell'evaporazione del terreno.

7. Conclusioni

Questo studio ha conseguito con successo l'obiettivo della caratterizzazione qualitativa in modo non invasivo della rizosfera in termini di capacità di suzione e ha confermato l'attendibilità delle indagini ERT in time-lapse per l'individuazione dell'attività di assorbimento radicale, confrontando con successo i risultati ottenuti con il metodo diretto.

Per studi futuri con installazione fuori terra sarebbe auspicabile l'utilizzo di contenitori di maggior volume per ridurre le condizioni di accoppiamento forzante fra gli elettrodi. Potrebbe essere utile in aggiunta isolare l'intorno dell'inserimento degli elettrodi impedendo l'infiltrazione d'aria dall'esterno.

Per la scelta vegetale sarebbe consigliabile l'utilizzo di piante già sviluppate, non trapiantate con talea. In alternativa sarebbe utile garantire alla vegetazione un lasso di tempo maggiore per l'adattamento al nuovo posizionamento e per lo sviluppo in sede di un apparato radicale maggiormente strutturato, fitto con elevata densità di peli radicali.

In ultima analisi, da un punto di vista microclimatico e fisiologico, sarebbe più opportuno effettuare lo studio in un periodo primaverile con intensa attività di fotosintesi e sviluppo vegetale, con irraggiamento sostenuto, ma non troppo intenso che porterebbe ad elevate perdite d'acqua per evaporazione superficiale (come il periodo estivo).

A Zita e Alberto i miei ricordi più belli...

...a Gianluca, Antonella, Andrea e Marco il mio presente più certo...

...dedico questo elaborato ed i miei anni di studio.

Ringrazio Daniela, Margherita, Mara e Marsel per il sostegno e supporto.

8. Bibliografia

1. Reynolds, J. M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. (John Wiley & Sons, 2011).
2. Beff, L., Günther, T., Vandoorne, B., Couvreur, V. & Javaux, M. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **17**, 595–609 (2013).
3. Ehosioke, S. *et al.* Sensing the electrical properties of roots: A review. *Vadose zone j.* **19**, (2020).
4. Binley, A. *Treatise on Geophysics*. (Elsevier, 2015).
5. Garré, S., Hyndman, D., Mary, B. & Werban, U. Geophysics conquering new territories: The rise of “agrogeophysics”. *Vadose Zone Journal* **20**, e20115 (2021).
6. Luo, Z. *et al.* Widespread root-zone water bypass for various climates and species: Implications for the ecohydrological separation understanding. *Agricultural and Forest Meteorology* **324**, 109107 (2022).
7. Cassiani, G., Boaga, J., Vanella, D., Perri, M. T. & Consoli, S. Monitoring and modelling of soil–plant interactions: the joint use of ERT, sap flow and eddy covariance data to characterize the volume of an orange tree root zone. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 2213–2225 (2015).
8. Rascio, N. & *et al.* *Elementi di Fisiologia Vegetale*. (2012).
9. M. Smith, T. & Smith, R. L. *Elementi di Ecologia*. (Pearson, 2017).
10. Binley, A. Tools and Techniques: Electrical Methods. in *Treatise on Geophysics* 233–259 (Elsevier, 2015).
11. Ceccon, P., Fagnano, M., Grignani, C., Monti, M. & Orlandini, S. *Agronomia*. (EdiSES).
12. Norinelli, A. *Elementi di Geofisica Applicata*. (Patron Editore, 1996).
13. Everett, M. E. *Near-Surface Applied Geophysics*. (Cambridge University Press, 2013).

14. Daily, W., Ramirez, A., Binley, A. & LaBrecque, D. Electrical resistance tomography – Theory and practice. in *Near-Surface Geophysics* (Society of Exploration Geophysicists, 2005).
15. Santarato, G., Nasser, A. Z. & Bignardi, S. *Lezioni di Geofisica Applicata*. (Libreria Universitaria Editore, 2015).
16. Zhou, B. *Electrical Resistivity Tomography: A Subsurface-Imaging Technique. Applied Geophysics with Case Studies on Environmental, Exploration and Engineering Geophysics* (IntechOpen, 2018).
17. Binley, A. & Kemna, A. DC Resistivity and Induced Polarization Methods. in *Hydrogeophysics* (eds. Rubin, Y. & Hubbard, S. S.) 129–156 (Springer Netherlands, 2005).
18. Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N. & Binley, A. M. A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* **59**, 244–259 (2006).
19. Sartori, S. *Analisi sperimentale e analitica degli apparati radicali degli alberi ripariali Populus nigra e Alnus incana*. (Università di Trento, 2020).