UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof. Fabrizio Nestola

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

# APPLICAZIONE DI TOMOGRAFIE ELETTRICHE DI RESISTIVITÀ E GEORADAR INTEGRATE A DATI GEOCHIMICI PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN SITO CONTAMINATO

- **UN CASO DI STUDIO PRESSO LA LAVANDERIA A SECCO DI NISSE IN OSBY, SVEZIA**

# ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND GEORADAR TECHIQUES INTEGRATED TO GEOCHEMICAL DATA FOR THE CHARACTERIZATION OF A CONTAMINATED SITE

- **A STUDY CASE AT NISSE DRYING-CLEANING FACILITY IN OSBY, SWEDEN**

*Relatore: Prof. Jacopo Boaga*

*Correlatore: Prof. Matteo Rossi*

*Laureando: Francesco Daniele*

*Matricola: 1242591*

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

# Abstract

Subsoil contamination is a widespread problem and actions must be taken to prevent its spread to groundwater and the soils of contaminated sites. In Sweden, the region of this study, more than 80,000 sites have been classified as potentially contaminated, so there is a growing demand for accurate and efficient methods for site characterization and remediation.

The work presented in this thesis concerns the Nisse drying-cleaning facility located near Osby, which is one of the most contaminated sites in Sweden today. During the 1950s and 1960s, the facility released chemicals along with the wash water until it reached sediments near the Helgeå River. The activity caused contamination with the chlorinated scrubbing chemical perchlorethylene (PCE) and its products, which managed to penetrate the subsoil passing through the most superficial layers made up of post-glacial fluvial and morainic deposits (sand and / or silt with gravel and stones) up to a compact layer characterized by a sandy and / or silty sediment rich in clay (kaolin).

Faced with this situation, the Swedish geological association SGU launched geological and geochemical investigations in the area of interest in 2006, commissioning the environmental company WSP to produce a project that aims to develop remediation techniques suitable for stopping contamination. Investigations are continuing and will be completed in the near future.

This thesis presents the geophysical investigations of Electric Resistivity Tomography (ERT) and GeoRadar (GPR) that were applied at the site in question in August 2021, in order to obtain a characterization of the subsoil of the site. The data was modeled using ResIpy software for ERT, and Geolitix for GPR. The geological structure and any signs of the presence of contamination have been interpreted through the integration and comparison with the existing survey documentation provided by the WSP report from previous years.

The geophysical results obtained proved to be consistent with the stratigraphic surveys for the recognition of the geology of the subsoil present in the site in

question. It is a heterogeneous alternation of sands, silt, clay, gravel and stones, the origin of which is believed to be linked to post-glacial fluvial and / or morainic deposits.

Regarding the presence of contaminants with geophysics alone, univocal results cannot be obtained. From the comparison of geophysical surveys and the total values obtained from geochemical techniques such as MIP and groundwater sampling, there is no clear evidence of the presence of contaminants on the ERT and GPR sections. The comparison between the geochemical results alone, on the other hand, is safer to understand their distribution in soils and groundwater.

However, a common anomaly in some geophysical sections was related to the presence of an underground pipeline, which is thought to be one of the possible sources of pollution.

He hopes that the results obtained from the geophysical surveys can be taken into consideration in the remediation project of the Swedish environmental company WSP as useful information for the characterization of the site, in order to facilitate the search for the most suitable intervention technique.

# Sommario

La contaminazione del sottosuolo è un problema diffuso e devono essere intraprese azioni per prevenirne la diffusione nelle acque sotterranee e nei suoli dei siti contaminati. In Svezia, regione del presente studio, più di 80.000 siti sono stati classificati potenzialmente contaminati, per cui c'è una richiesta sempre più sentita di metodi accurati ed efficienti per la caratterizzazione e la bonifica di sito. Il lavoro presentato in questa tesi riguarda l'ex impianto di lavaggio a secco di Nisse situato nei pressi di Osby, che costituisce al giorno d'oggi uno dei siti più contaminati in Svezia. Durante gli anni 1950 e 1960, l'ex lavaggio a secco di Nisses ha rilasciato sostanze chimiche insieme all'acqua di lavaggio, fino a raggiungere i sedimenti in prossimità del fiume Helge å. L'attività ha provocato una contaminazione con la sostanza chimica di lavaggio clorurata percloroetilene (PCE) e i suoi prodotti, che sono riusciti a penetrare il sottosuolo passando per gli strati più superficiali costituiti da depositi fluviali e morenici post-glaciali (sabbia e/o silt con ghiaia e pietre) fino ad arrivare ad uno strato compatto caratterizzato da un sedimento sabbioso e/o siltoso ricco di argilla (caolino).

Di fronte a tale situazione, l'associazione geologica svedese SGU ha avviato nel 2006 delle indagini geologiche e geochimiche nella zona d'interesse incaricando la società ambientale WSP di produrre un progetto che punti a sviluppare tecniche di bonifica adatte a fermare la contaminazione. Le indagini proseguono e saranno completate nel prossimo futuro.

In questa tesi vengono presentate le indagini geofisiche di Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) e di GeoRadar (GPR) che son state applicate nel sito in esame nell'Agosto del 2021, al fine di ottenere una caratterizzazione del sottosuolo del sito. I dati son stati modellati usando i software ResIpy per la ERT, e Geolitix per il GPR. La struttura geologica ed eventuali segnali della presenza di contaminazione son stati interpretati tramite l'integrazione e il confronto con l'esistente documentazione dei sondaggi fornita dal rapporto della ditta WSP degli anni precedenti.

I risultati geofisici ottenuti si son dimostrati consistenti con i sondaggi stratigrafici per il riconoscimento della geologia del sottosuolo presente nel sito in esame. Si tratta di una eterogenea alternanza di sabbie, silt, argilla, ghiaia e pietre, la cui origine si ritiene legata a depositi fluviali e/o morenici post-glaciali.

Per quanto riguarda la presenza di contaminanti con la sola geofisica non si possono ottenere risultati univoci. Dal confronto di sondaggi geofisici e i valori totali ricavati da tecniche geochimiche quali MIP e campionamento delle acque sotterranee, non è si rileva una chiara evidenza della presenza dei contaminanti sulle sezioni ERT e GPR. La comparazione tra i soli risultati geochimici è invece più sicura per comprendere la loro distribuzione nei suoli e nelle acque sotterranee.
Tuttavia, una comune anomalia in alcune sezioni geofisiche è stata riferita alla presenza di una tubazione sotterranea di scarico, che si pensa essere una delle possibili sorgenti dell'inquinamento.

Si augura che i risultati ottenuti dalle indagini geofisiche possano essere presi in considerazione nel progetto di bonifica della società ambientale svedese WSP come utili informazioni per la caratterizzazione del sito, al fine di facilitare la ricerca della più adatta tecnica una tecnica d'intervento.

# Indice:

*Lista delle figure* ..... *7*

*Lista delle tabelle* ..... *14*

*1. Introduzione* ..... *15*

*1.1 L'industria chimica e la contaminazione in Svezia* ..... 15

*1.2 Domande di ricerca ed obiettivi* ..... 17

*1.3 Quadro generale* ..... 19

*2. Inquadramento del sito* ..... *21*

*2.1 Inquadramento geografico e storia delle attività* ..... 21

*2.2 Inquadramento geologico* ..... 25

*2.2.1 Depositi quaternari* ..... 25

*2.2.2 Bedrock* ..... 27

*2.2.3 Evidenze stratigrafiche* ..... 29

*2.3 Inquadramento idrogeologico* ..... 35

*3. Contaminanti* ..... *38*

*3.1 Dense Non-aqueous Phase Liquids (DNAPLs)* ..... 38

*3.2 Pericolosità e valori guida dei contaminanti* ..... 41

*3.3 Accenni sulla caratterizzazione e sulla bonifica di un sito per i DNAPLs* ..... 44

*4.1 Tomografia di Resistività Elettrica* ..... 49

*4.1.1 Principi fisici di base* ..... 49

*4.1.3 Processing* ..... 67

*4.2.1 Principi fondamentali*

*4.2.2 Acquisizione dei dati* ..... 87

*4.3.3 Processing* ..... 94

*4.4 MIP (Membrane Interface Probe)* ..... 97

*4.5 Metodi per il campionamento delle acque sotterranee* ..... 99

*5. Acquisizione sul campo ed elaborazione dati* ..... *102*

*5.1 Indagine ERT* ..... 102

*5.1.1 Processing* ..... 106

*5.2 Indagine GPR* ..... 110

*6 Risultati* ..... *117*

*6.1 Visualizzazione ed interpretazione dei profili geofisici* ..... 118
*6.2 Caratteristiche degli strati e proprietà elettriche* ..... 120
*6.2.1 Materiale di riempimento e materia organica* ..... 120
*6.2.2 Sabbia siltosa, sabbia ghiaiosa, sabbia ghiaiosa e siltosa o silt ghiaioso e sabbioso (con pietre)* ..... 122
*6.2.3 Argilla (caolino)* ..... 123
*6.3 Distribuzione dei contaminanti* ..... 124
*6.3.1 Visualizzazione dei risultati MIP* ..... 125
*6.3.2 Visualizzazione dei risultati dei metodi di campionamento acque sotterranee* ..... 127
*6.4 L'anomalia osservata alla progressiva 30 metri* ..... 128
*7. Discussione e considerazioni finali* ..... *134*
*Bibliografia* ..... *139*
*Ringraziamenti* ..... *143*
*Appendici* ..... *144*

**Lista delle figure:**

**Figura 1.0:** Distribuzione dei contaminanti più comuni tra i siti contaminati in Svezia (immagine tratta da Wei H., 2018) ..... **17**
**Figura 2.0:** A) Mappa nazionale della Svezia con un'evidenziazione sulla posizione della lavanderia a Sibbarp 3401 (Google Maps). B) Ortofoto dell'area di studio di Sibbarp 3401, dove è indicata la struttura di lavaggio a secco di Nisse tramite un puntatore rosso come l'immagine A (Google Earth). ..... **21**
**Figura 2.1:** a) Mappa schematica del sito; le linee nere indicano due sezioni geologiche presenti nel rapporto svedese della WSP (Torin L. et al., 2021); la linea verde tratteggiata corrisponde alla traccia di un ipotetico oleodotto; quelle in viola a due ex fosse. b) Mappa schematica della struttura; i rettangoli verdi indicano le tre macchine di lavaggio all'interno dell'edificio, quello grigio a delle taniche di liquido chimico e quelli rosa a delle caldaie. (Torin L. et al., 2021). ... **22**
**Figura 2.2:** Mappa generale della distribuzione complessiva dei sondaggi nel sito di Sibbarp, includente le linee orizzontali delle indagini geofisiche (tratta e modificata da Torin L. et al., 2021). ..... **23**
**Figura 2.3:** Foto panoramica dell'edificio realizzata da un drone; in lontananza è possibile intravedere il fiume Helge (Torin L. et al., 2021). ..... **24**
**Figura 2.4:** Documentazione fotografica effettuata nel 2020 da alcune angolazioni rispetto all'edificio (Torin L. et al., 2021). ..... **25**
**Figura 2.5:** Mappa in scala 1: 5000 e leggenda dei depositi quaternari sulla lavanderia di Nisse, mappata da SGU, che mostra la distribuzione superficiale dei diversi tipi di suolo; la struttura del sito di Sibbarp è evidenziata da un rettangolo nero tratteggiato (modificata da SGU. (b), 2012); ..... **26**
**Figura 2.6:** Mappa e leggenda del bedrock a scala 1:50000; la struttura del sito di Sibbarp è evidenziata da un rettangolo nero tratteggiato (modificata e tratta da SGU. (a), 2012); ..... **28**
**Figura 2.7:** Sketch di due sondaggi stratigrafici compiuti nel sito visibili in Figura 2.3. ..... **30**

**Figura 2.8:** Sezione e corrispettiva legenda geologica riferite al profilo 1 di Figura 2.1. ed estratte dal rapporto svedese della WSP (Torin L. et al., 2021). ... **32**

**Figura 2.9:** Pozzi d'interesse di cui è stato possibile estrarre le informazioni relativamente alla profondità della tavola d'acqua dai dati più recenti dell'anno più recente (2019) forniti da parte della società Golder. (ortofoto modificata ed elaborata con QGIS). ..... **35**

**Figura 2.10:** Linee di elevazione della tavola d'acqua e valori della profondità della tavola d'acqua inerenti ai pozzi d'interesse. Le frecce blu rappresentano l'ipotetica direzione del flusso delle acque sotterranee (ortofoto modificata ed elaborata con QGIS). ..... **36**

**Figura 3.0:** Sketch di una zona satura contaminata da DNAPL e dalle tre fasi (solido, acqua, aria). Il contaminante può essere presente in una o in tutte e tre le fasi (immagine tratta da Huling, S. G. & Weaver, J. W. 1991). ..... **40**

**Figura 3.1:** Schema concettuale di come gli idrocarburi clorurati possono svilupparsi nel terreno. La freccia nera indica la direzione del di flusso delle acque sotterranee. ..... **41**

**Figura 3.2:** Schema della dealogenizzazione riduttiva di solventi clorurati; in rosso sono cerchiati i prodotti cancerogeni (Vanzetti C. et al., 2016). ..... **42**

**Figura 3.3:** Descrizione schematica del documento IDSS di come «attaccare» le aree contaminate da solventi clorurati DNAPLs (immagine tratta e modificata da ITRC., 2011)…….**45**

**Figura 4.0:** Parallelepipedo di lunghezza L e area A attraversato da una corrente I. (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017). ..... **50**

**Figura 4.1:** Intervalli tipici di resistività per vari materiali geologici. La conducibilità (in tal caso mS/m) è il reciproco di resistività (Palacky, 1987). ..... **51**

**Figura 4.2:** Tre tipi di strutture che coinvolgono due materiali a resistività diversa (ρ1 e ρ2). Si può effettuare il calcolo del coefficiente di anisotropia dato dal rapporto tra la resistività massima e quella minima e si osserva così che la struttura laminare (B) avrà un alto coefficiente di anisotropia. (immagine tratta da Borriello A., 2016/2018) ..... **52**

**Figura 4.3:** Il flusso di corrente rappresentato dalle linee radiali perpendicolari alle superfici equipotenziali semisferiche (immagine tratta da Telford W.M. et al., 2010). ..... **56**
**Figura 4.4:** Schema a 4 elettrodi con distinzione tra elettrodi di corrente (C1 e C2) e di potenziale (P1 e P2) (Immagine tratta da Telford W.M. et al., 2010). .... **57**
**Figura 4.5:** Schema 3D di un sistema d'acquisizione a 4 elettrodi in un mezzo disomogeneo. $C_+$ e $C_-$ rappresentano gli elettrodi di corrente, $P_+$ e $P_-$ quelli di potenziale, $\rho_1$ è la resistività dello strato superiore, e $\rho_2$ quella dello strato inferiore, con $\rho_1 > \rho_2$. Sia le linee di corrente che di potenziale son rappresentate (Immagine presa da Busato L., 2016). ..... **59**
**Figura 4.6:** Distorsione del flusso di corrente in corrispondenza di una discontinuità planare quando $\rho_1 < \rho_2$ (immagine tratta e modificata da Peruzzo L., 2014/2015)..... **60**
**Figura 4.7:** Esempio di strumentazione che può essere usata per l'acquisizione (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017). ..... **62**
**Figura 4.8:** Schema degli elementi principali per l'acquisizione ERT (Immagine modificata e tratta da Borriello A., 2016/2017). ..... **62**
**Figura 4.9:** Sketch dei tre array di elettrodi più comunemente usati: Wenner, Dipolo-dipolo Schlumberger (immagine tratta da Binley e Kemna, 2005). ..... **64**
**Figura 4.10:** Configurazione degli elettrodi per array a gradienti multipli. C1 e C2 sono gli elettrodi di corrente. P1 e P2 sono il potenziale elettrodi posti ad una distanza a (immagine tratta da Wei H., 2018). ..... **65**
**Figura 4.11:** Sezione di indagine 2-D che mostra tre combinazioni di quadrupolo di elettrodi che seguono l'array Wenner e che son connessi al georestivimetro (Terrameter LS) tramite un cavo a più uscite. Per quadripoli con maggiori spaziature interne corrispondono dati di resistività apparente (puntini rossi) a maggiori profondità (immagine tratta e modificata da Lumetzberger M., 2014). **66**
**Figura 4.12:** Sketch del funzionamento del modello diretto (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017). ..... **69**
**Figura 4.13:** Sketch del funzionamento del modello inverso (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017). ..... **71**

**Figura 4.14:** Esempio delle componenti trasversali del campo magnetico (TM) ed elettrico (TE) rispetto ad una qualsiasi direzione di propagazione delle onde EM (linea tratteggiata) per un'interfaccia planare tra due differenti mezzi (immagine modificata da Annan A.P., 2009). ..... **81**
**Figura 4.15:** Relazione tra frequenza (Hz), attenuazione α [dB/m] e conduttività elettrica σ [mS/m]. ..... **84**
**Figura 4.16:** Impulsi con mezza ampiezza W per un certo periodo T. a) Impulsi chiaramente separabili quando T>>W; b) Sovrapposizione degli impulsi quando T≈ W; c) Impulsi coincidenti e non distinguibili quando T<<W (immagine tratta da Annan A.P., 2009) ..... **85**
**Figura 4.17:** La risoluzione per il GeoRadar (GPR) si divide in due parti: la risoluzione longitudinale (o d'intervallo) e risoluzione laterale (o angolare) (immagine tratta da Annan A.P., 2009) ..... **86**
**Figura 4.18:** Esempio schematico di radargramma: $n_x$ corrisponde alla posizione di ogni singola traccia (immagine tratta da Cerilli S., Sebastiani P., 2014) ..... **88**
**Figura 4.19:** Diagramma di blocco rappresentante i principali componenti per l'acquisizione dei dati GPR (modificato da Annan A.P., 2009). ..... **89**
**Figura 4.20:** Antenna GPR rinchiusa all'interno di una protezione ("shield") per ridurre l'interazione dei segnali con l'aria. Tali segnali potrebbero derivare dal sistema GPR stesso o da sorgenti esterne (Annan A.P., 2009). ..... **89**
**Figura 4.21:** Funzionamento di un'antenna monostatica: la medesima antenna prima immette nel terreno un'onda elettromagnetica e poi ne registra l'eco (immagine tratta da Angelino A. et al., 2011). ..... **90**
**Figura 4.22:** Un'antenna trasmette l'onda elettromagnetica EM nel terreno e successivamente un'altra antenna riceve il segnale riflesso (immagine tratta da Angelino A. et al., 2011). ..... **91**
**Figura 4.23:** Illustrazione schematica dell'acquisizione Common-offset lungo una linea (immagine tratta da Annan A.P., 2009). ..... **93**
**Figura 4.24:** Schema di acquisizione secondo la modalità WARR. ..... **93**
**Figura 4.25:** Schema di acquisizione secondo la modalità Common Mid Point (CMP). ..... **93**

**Figura 4.26:** Tipiche modalità di acquisizione GPR in foro (immagine tratta da Busato L., 2014/2015) ..... **94**
**Figura 4.27:** Esempio di "ringing" estratto da una sezione GPR a 170 MHz di una delle linee eseguite sul sito di Sibbarp. ..... **96**
**Figura 4.28:** Rappresentazione schematica degli elementi principali della sonda MIP per l'acquisizione della conduttività del suolo (E.P.A., 2021). ..... **98**
**Figura 4.29:** Diversi approcci di pozzi multilivello: a sinistra il metodo dei pozzi a grappolo; in centro i pozzi a nido e a destra i sistemi multilivello (MLS) (Gargini A., 2015). ..... **100**
**Figura 4.30:** Parti del tubo delle acque sotterranee, filtro a sabbia e guarnizione attorno al tubo con liquami di bentonite nel caso di una falda fortemente contaminata (immagine tratta e modificata da SFG., 2020) ..... **101**
**Figura 5.0:** Ortofoto del sito d'interesse con rappresentati le cinque linee ERT eseguite sul campo. La freccia indica la direzione con cui era stata fatta la misura. ..... **102**
**Figura 5.1:** Terrameter LS ES1 e relè 0-64. Le line rosse rappresentano I cavi multi-elettrodo (ABEM 2013). ..... **103**
**Figura 5.2:** Vernice spray color verde sulla sommità di un paletto usata per indicare la linea di un profilo ERT……...**101**
**Figura 5.3:** a) Sketch della separazione minima degli elettrodi per la misura a gradiente multiplo (A, B = elettrodo di corrente, M, N = elettrodo di potenziale); b) schema realizzato sul campo: dei cavi separati per la misura della trasmissione di corrente e di potenziale (immagine tratta da Dahlin T. & Leroux V., 2012). . **105**
**Figura 5.4:** Panoramica della strumentazione utilizzata sul campo. Il georesistivimetro ABEM Terrameter LS 2 e la batteria son indicate con delle frecce. ..... **106**
**Figura 5.5:** A sinistra: cavi multicanale, uno per la trasmissione di corrente, l'altro per la misura di potenziale; a destra, picchetto e morsetto. ..... **106**
**Figura 5.6:** Layout generale dell'interfaccia utente grafica GUI con (1) schede diverse per ogni fase di elaborazione, (2) Opzioni per tipo di rilevamento e di

modellazione inversa, (3) importazione dati e controllo IP, (4) grafico in pseudo-sezione dei dati importati (immagine tratta da Balcnhy G., 2020). ..... **107**
**Figura 5.7:** Filtraggio manuale interattivo. (a) Pseudo sezione con punti dati indesiderati selezionati (barrata in rosso), (b) Pseudo sezione con punti dati rimossi (immagine tratta da Blanchy G.,2020). ..... **109**
**Figura 5.8:** Sezione ottenuta nella fase di post-processing (Gitlab, 2022). ..... **110**
**Figura 5.9:** Mappa generale delle linee GPR compiute sul campo. ..... **111**
**Figura 5.10:** Immagine dell'acquisizione GPR in atto. Si evidenzia in particolare la presenza dell'erba alta che ha reso maggiormente difficile il trascinamento dello strumento. ..... **112**
**Figura 5.11:** Strumento CrossOver 1760 e suoi principali componenti utilizzati per l'acquisizione dei dati GPR sul campo (immagine tratta da Geo-matching, 2022)..... **113**
**Figura 5.12:** Schermata della fase di "positioning" dei dati GPS e loro modo di visualizzazione (Geolitix, 2020). ..... **114**
**Figura 5.13:** Esempio della schermata per la fase di processing con inquadrati gli step eseguiti per questo lavoro. (Geolitix,2020). ..... **116**
**Figura 6.0:** Sezioni finali ERT e GPR sovrapposte della linea 1,3 e 4 confrontate ed interpretate con i risultati schematizzati dei sondaggi stratigrafici. ..... **119**
**Figura 6.1:** Mappa areale dei risultati dei dati MIP assieme alle linee dei profili geofisici eseguiti sul campo. Le cifre corrispondono alla nomenclatura delle medesime linee. In particolare, quelle incorniciate si riferiscono alle aree con i più alti valori totali calcolati per tutte le profondità (immagine modificata e tratta da Torin L. et al, 2021). ..... **125**
**Figura 6.2:** Mappa areale dei risultati dei dati del campionamento delle acque sotterranee assieme alle linee dei profili geofisici eseguiti sul campo. Le cifre in blu corrispondono ai valori delle concentrazioni totali [μg/l] dei contaminanti calcolate per tutte le profondità a cui si trova il filtro (immagine modificata e tratta da Torin L., 2021). ..... **127**

**Figura 6.3:** Localizzazione dei punti della strana anomalia a circa 30 m da Sud della linea 2 e 3 GPR in corrispondenza dell'ipotetica pipeline (linea nera tratteggiata). ..... **129**
**Figura 6.4:** Mappa della localizzazione dei punti inerenti all'anomalia vista nelle tre sezioni iniziali e relativa sezioni della linea 2 e 3 GPR a 170 MHz con ingrandite le iperboli di riflessioni per indicare la possibile presenza della conduttura. ..... **130**
**Figura 6.5:** Mappa con localizzazione del punto dell'attenuazione visibile lungo la linea 0004 della griglia GPR ottenuta tramite il software Geolitix (Geolitix, 2020). ..... **131**
**Figura 6.6:** Sezioni GPR 170 MHz della linea 0004: in alto senza l'applicazione della trasformata di Hilbert; in basso con la sua applicazione (tratta e modificata da Geolitix, 2020). ..... **132**
**Figura 6.7:** Sezione e mappa delle linee 0002 e 0003 con indicato il punto in cui risulterebbe la stessa attenuazione delle linee a griglia GPR (tratta e modificata da Geolitix 2020). ..... **133**

**Lista delle tabelle:**

**Tabella 2.0:** Tabella della descrizione dei simboli usati dalla società svedese WSP per i suoli. ..... **31**
**Tabella 3.0:** Alcuni dei parametri chimici e fisici dei quattro composti di idrocarburi clorurati prevalenti (tratta e modificata da Huling e Weaver,1991)... **38**
**Tabella 3.1:** La classificazione del cancro del PCE e dei suoi prodotti di degradazione (IARC, 2015). La classificazione raggruppa i significati: 1 – Cancerogeno per l'uomo, 2A – Probabilmente cancerogeno per l'uomo, 2B – Possibilmente cancerogeno per l'uomo, 3 -Non classificabile come alla sua cancerogenicità per l'uomo (IARC., 2015)..... **43**
**Tabella 3.2:** Valori guida per i contaminanti d'interesse a seconda della tipologia dell'uso del suolo (modificata con excel e tratta da Naturvårdsverket., 2016)..... **44**

# 1. Introduzione

## *1.1 L'industria chimica e la contaminazione in Svezia*

L'industria chimica appartiene a molte attività economiche, dall'agricoltura, costruzioni e il settore tessile al campo delle industrie di alta tecnologia come l'ambito automobilistico, aerospaziale e dell'elettronica.
La produzione di sostanze chimiche nell'EU e nell'intero globo sta incrementando notevolmente. Basti pensare che i prodotti venduti son raddoppiati negli ultimi anni con un valore complessivo delle vendite aumentato di circa l'80% (Milieu Ltd Ö., 2017).
Tale evoluzione sta diventando, però, un'arma a doppio taglio. Da una parte, può migliorare il settore dell'ingegneria chimica così come permettere una grande e rapida crescita dell'economia. Dall'altra, potrebbe risultare un rischio sia per la salute degli esseri umani che per gli animali in quanto potenzialmente esposti a un grande numero di sostante chimiche diffuse nell'ambiente attraverso l'aria, il suolo e l'acqua (Wei H., 2018). Non si è certi se ad es. la sostanza chimica è legata al suolo o se il flusso delle acque sotterranee influenzi la sua mobilità chimica (Wei H., 2018). Inoltre, tali sostanze possono essere tossiche e possono essere in grado di contaminare forniture di acque potabili diventando un rischio per ingestione o inalazione nel caso di una loro volatilizzazione. I rischi all'esposizione umana son sito-specifici, difficili da generalizzare ad un livello nazionale e i potenziali effetti potrebbero essere acuti o cronici (E.P.A. (b), 2021).
A tal proposito, risulta sempre più richiesto un modo per minimizzare il rischio all'esposizione nei confronti di queste sostanze chimiche. Una soluzione potrebbe essere un miglioramento della loro conoscenza tramite una caratterizzazione dei siti contaminati che fornisca delle informazioni sullo stato ambientale delle matrici coinvolte (suolo, sottosuolo e acque sotterranee) in maniera tale da intervenire con un'analisi di rischio sanitaria-ambientale e, se necessario, con delle successive tecniche di bonifica il più efficienti possibili. Oppure, si potrebbe promuovere lo sviluppo di sostanze chimiche non tossiche. Ad esempio, la Svezia

si stava impegnando per raggiungere un ambiente "non tossico" entro il 2020. Il servizio geologico svedese (SGU) svolge un ruolo attivo negli sforzi per raggiungere questo obiettivo di qualità ambientale attraverso la sua responsabilità per l'attuazione di indagini e misure nelle aree contaminate.
Secondo un inventario compiuto dal governo e il supporto EPA (Environmental Protection Agency) svedese riguardo ad operazioni (come ad es. industrie chimiche, lavanderie, miniere ecc..) che potrebbero aver causato la contaminazione di alcuni siti in Svezia, sarebbero state identificate circa 80.000 aree potenzialmente contaminate di cui si ritiene che 1.200 di queste son state classificate di rischio 1 il che potrebbero costituire un rischio molto alto per la salute umana o per l'ambiente e 8.000 di classe 2, ossia di alto rischio per la salute umana e l'ambiente. Queste due classi hanno la priorità di ricevere un finanziamento dall'EPA svedese per essere indagate e, se necessario, bonificate (E.P.A. (d), 2021). Il lavoro per indagare e bonificare le aree contaminate è stato intensificato, ma il ritmo della decontaminazione deve aumentare ulteriormente (SGU., 2020). Le tecniche più comuni che potrebbero essere applicate in un futuro son probabilmente lo scavo e lo smaltimento anche se dipendono dal tipo e dalle caratteristiche dell'inquinante con cui si ha che fare (SGI., 2020).
Tra tutti i tipi di contaminanti trovati nei siti contaminati in Svezia, la contaminazione primaria è costituita da metalli pesanti con una proporzione del 45%, seguiti da alogenati idrocarburi (30%), idrocarburi policiclici aromatici (IPA) (10%) e olio (10%) (*Figura 1.0*).

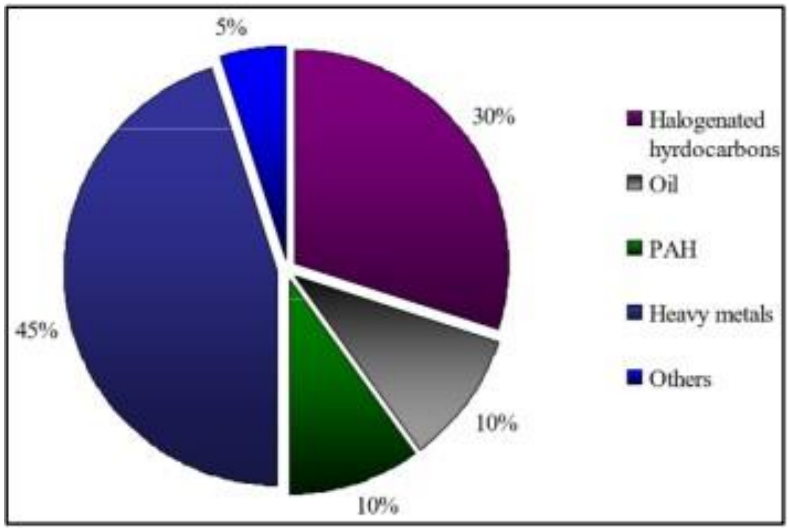



*Figura 1.0: Distribuzione dei contaminanti più comuni tra i siti contaminati in Svezia (immagine tratta da Wei H., 2018)*

Negli ultimi anni, l'attenzione è cascata sugli idrocarburi alifatici alogenati, in particolare sui solventi clorurati. Quanto accade solitamente è che il Percloroetilene (PCE) e il Tricloroetene (TCE) si facciano trovare assieme con i loro prodotti di degradazione (Dicloretene, DCE, e Cloruro di vinile, VC) (vedi paragrafo 3.2).

L'applicazione di PCE e TCE ha compiuto dei salti da gigante nei settori del lavaggio a secco, lavaggio metalli e sgrassaggio a vapore con rispettivamente l'80%, 15% e 4% dell'occupazione nell'intera produzione negli anni '50 (Wei H., 2018).

Queste sostanze son specialmente di notevole utilizzo nel settore del lavaggio a secco in quanto son molto efficaci nella rimozione delle macchie con un livello di esposizione minimizzato per gli esseri umani ma non significa che non necessitano della dovuta attenzione.

## *1.2 Domande di ricerca ed obiettivi*

Il presente lavoro vuole contribuire ad un progetto iniziale che l'autorità geologica svedese (SGU) fece avviare sulla base di un gran numero d'indagini eseguite dal 2006 per la caratterizzazione di un sito inquinato presso la struttura per il lavaggio

a secco di Nisse in Osby (Svezia).
Il progetto mira, in particolare, a raccogliere informazioni sia sulla geologia del sottosuolo che sulla distribuzione del contaminante PCE e dei suoi prodotti nel medesimo sottosuolo considerando e valutando dei dati provenienti da indagini geognostiche e geochimiche svolte negli anni 2018 e 2019 dalla Golder, un membro della società WSP a cui era stato commissionato l'incarico di iniziare il progetto. Nello specifico, le prime riguardano sondaggi compiuti con alcune tecniche di perforazione come quella a rotazione del *Roto – Sonic Drilling* mentre le seconde si riferiscono ai metodi campionamenti delle acque sotterranee e alla tecnologia MIP (Membrane Interface Probe).

Secondo quanto riporterebbe il rapporto redatto dalla società ambientale WSP (Torin L. et al., 2021), incaricata dall'indagine geologica svedese SGU per realizzare il progetto sul caso del lavaggio a secco di Nisse, è stato confermato appunto un certo inquinamento da parte di solventi clorurati nei suoli e nelle acque sotterranee sia vicino alla struttura che in prossimità del fiume Helge.
A fronte di questa situazione si vuole perfezionare la conoscenza della contaminazione in modo da sviluppare un modello concettuale affidabile sullo stato ambientale del sottosuolo e successivamente compiere un eventuale intervento di bonifica il più pertinente possibile al tipo di contaminante in questione.

A tal proposito, avere a disposizione delle informazioni sulle caratteristiche geologiche degli strati del sottosuolo coinvolti dalla contaminazione può risultare utile ai fini di una caratterizzazione ottimale del sito. A parte i sondaggi geognostici, anche i metodi geofisici potrebbero essere un valido strumento per ottenere delle precise indicazioni sulla stratigrafia del sottosuolo.
In questo lavoro si vuol proporre in particolare due di quest'ultimi, la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) e il GeoRadar (GPR). A differenza delle indagini dirette, queste possiedono il vantaggio di essere eseguite a costi contenuti e in tempi relativamente bassi oltre a non dipendere dalla quantità di dati sui campioni acquisiti perché son in grado di avere un'ampia copertura spaziale e di fornire,

quindi, moltissime informazioni sul dominio investigato (Bertini F., 2017/2018). Inoltre, essi consentono la "ricostruzione" di quella che viene chiamata *imaging* del sottosuolo tramite le osservazioni delle variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche del medesimo sottosuolo. Nello specifico, grazie all'utilizzo di potenti software (ResIpy per la ERT e Geolitix per il GPR), è stato possibile effettuare il "*data processing"* al fine di elaborare e confrontare tra di loro delle sezioni ERT e GPR di alcuni profili eseguiti sul campo. In questo modo si è potuto interpretare principalmente la stratigrafia del sottosuolo in riferimento ai valori di resistività, per il metodo ERT, e all'andamento delle iperboli di riflessione, per la tecnica GPR. Solo secondariamente si è cercato di intravedere qualche eventuale segno della contaminazione confrontando i risultati geofisici con quelli geochimici. L'intento è cercar di fornire ulteriori informazioni al progetto della società WSP al fine che possa considerarle come un riferimento utile per capire quale possa essere in un futuro la strategia più conveniente per evitare che i contaminanti si diffondano nelle aree circostanti del comune di Osby.

### *1.3 Quadro generale*

Un quadro generale di questo lavoro di tesi è il seguente: il capitolo 2 introduce un inquadramento geografico, geologico e idrogeologico del sito nonché una breve storia delle attività svolte in esso per evidenziare le possibili cause della contaminazione; il capitolo 3 si riferisce ai contaminanti, alle loro proprietà (chimiche, fisiche e pericolosità) e ad una breve discussione sul concetto di caratterizzazione del sito e sulle tecniche di bonifica possibilmente adatte a loro; il capitolo 4 riguarda una descrizione dettagliata dei metodi per le misurazioni eseguite sul campo in cui si è tenuto conto dei principi fondamentali che stanno alla base dei metodi stessi oltre alle teorie e procedure inerenti all'acquisizione, elaborazione e trattamento dei dati; il capitolo 5 mostra com'è stata compiuta l'acquisizione dei dati sul campo e presenta i principali software che hanno consentito di ottenere i risultati finali; il capitolo 6 contiene la visualizzazione ed interpretazione dei risultati; infine, il capitolo 7 è riferito alla discussione e alle

considerazioni finali del lavoro includendo delle osservazioni su come la geofisica possa servire per delle misure di intervento in relazione alle condizioni del sito in questione da compiere in un futuro progetto di lavoro.

# 2. Inquadramento del sito

## *2.1 Inquadramento geografico e storia delle attività*

L'ex tintoria di Nisse è situata a Sibbarp 3401 nella parte meridionale della Svezia, nei pressi di Osby, cittadina nonché capoluogo della contea della Scania. Sia la mappa panoramica che l'ortofoto dell'area di studio specifica (rettangolo rosso tratteggiato) sono visualizzati nella *Figura 2.0* sottostante.

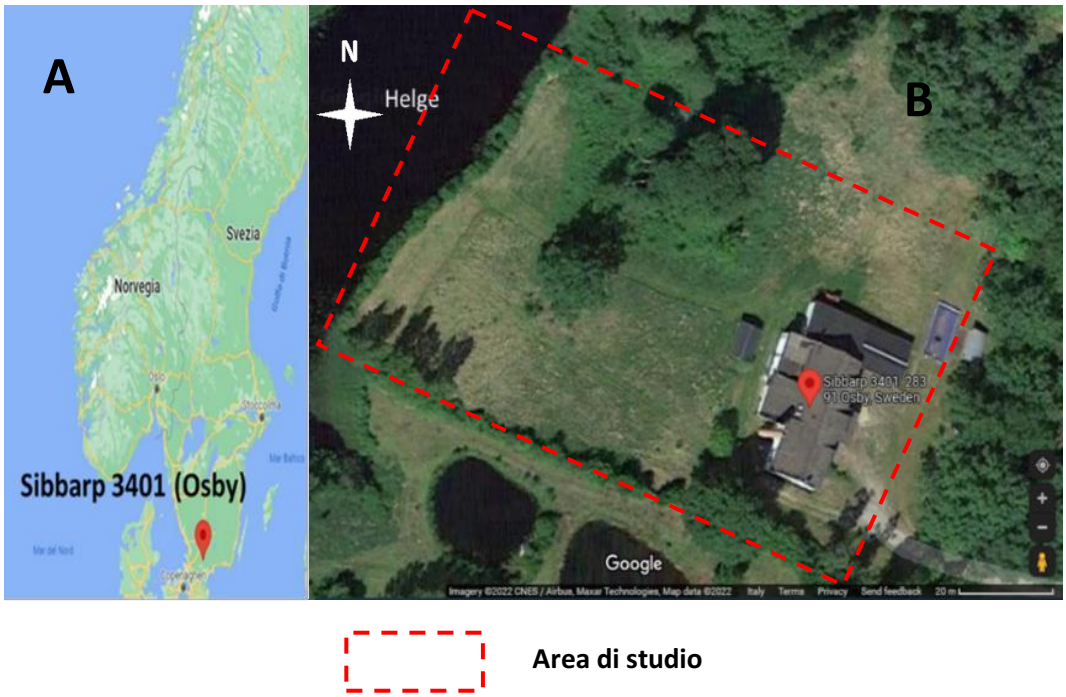



*Figura 2.0: A) Mappa nazionale della Svezia con un'evidenziazione sulla posizione della lavanderia a Sibbarp 3401 (Google Maps). B) Ortofoto dell'area di studio di Sibbarp 3401, dove è indicata la struttura di lavaggio a secco di Nisse tramite un puntatore rosso come nell'immagine A e l'area di studio con un rettangolo rosso tratteggiato (Google Earth).*

L'edificio all'interno della proprietà è stato costruito a metà degli anni '40 come una fabbrica di amido. L'attività di lavaggio a secco è iniziata nel 1954-55 e inizialmente usava solo tricloroetilene (TCE), ma in seguito passò al solo utilizzare percloroetilene (PCE), il solvente più diffuso impiegato nell'industria del lavaggio a secco. Il lavaggio a secco è cessato nel 2001. Durante l'intera operazione non è stata effettuata alcuna depurazione dell'acqua di processo.

Le acque reflue sono state inizialmente deviate tramite una conduttura a terra che usciva a circa 25 m dall'edificio prima di aprirsi in un fosso aperto che andava al fiume Helge (*Figura 2.1 (a))*. Inoltre, in *Figura 2.1(b)* è possibile notare una mappa schematica dell'edificio assieme ad un ex pollaio, includente anche le tre macchine di lavaggio (Torin L. et al., 2021).

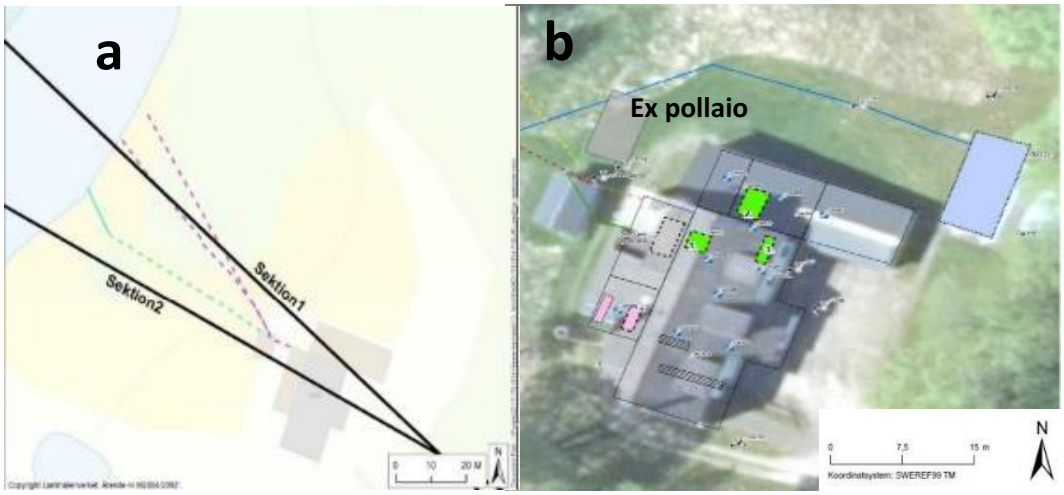



*Figura 2.1: a) Mappa schematica del sito; le linee nere indicano due sezioni geologiche presenti nel rapporto svedese della WSP (Torin L. et al., 2021); la linea verde tratteggiata corrisponde alla traccia di un ipotetico oleodotto; quelle in viola a due ex fosse. b) Mappa schematica della struttura; i rettangoli verdi indicano le tre macchine di lavaggio all'interno dell'edificio, quello grigio a dei barili di liquido chimico e quelli rosa a delle caldaie (Torin L. et al., 2021).*

Secondo un ultimo studio eseguito all'interno dell'edificio si è constatata la presenza di alcuni barili con circa 200 litri di liquido chimico inizialmente presente in essi e poi usati per riempire direttamente la macchina per il lavaggio a secco. All'inizio del 1970 si verificò la rottura di uno dei barili con la conseguenza di un rilascio soprattutto della sostanza chimica percloroetilene PCE ma anche dei suoi prodotti assieme all'acqua di lavaggio fino al fiume Helge å. L'inquinamento si è successivamente diffuso andando nel suolo sottostante e nelle acque sotterranee per finire a penetrare nelle fessure del substrato roccioso, anche se di quest'ultima parte non si ha alcuna certezza (Torin L. et al., 2021).
A tal punto, per capire la situazione della contaminazione nonché la geologia dell'area interessata dalla stessa contaminazione, dal 2006 incominciarono una serie di sondaggi. In particolare, in *Figura 2.2* si riporta la mappa complessiva di

tutti i sondaggi eseguiti negli anni 2018-2019 presente nel rapporto della WSP del 2021 (Torin L. et al., 2021) riguardanti il campionamento dei suoli (punti gialli), delle acque sotterranee (punti verdi), dei MIP (Membrane Interface Probe) (punti verde-acqua) e dei PID (Photoionization detector) (punti gialli come per i suoli) assieme alle linee delle indagini geofisiche.

Da tener presente che le strisce viola si riferiscono a delle sezioni geologiche contenute nel medesimo rapporto (Torin L. et al., 2021).

Per i sondaggi, i risultati erano stati conclusi e forniti dalla società Golder nel 2020. Proprio in quest'anno venne incaricata l'organizzazione WSP dalla SGU per trovare delle misure richieste nonché sviluppare un possibile piano d'azione il più efficiente possibile per la condizione che si era creata nel sito in questione.

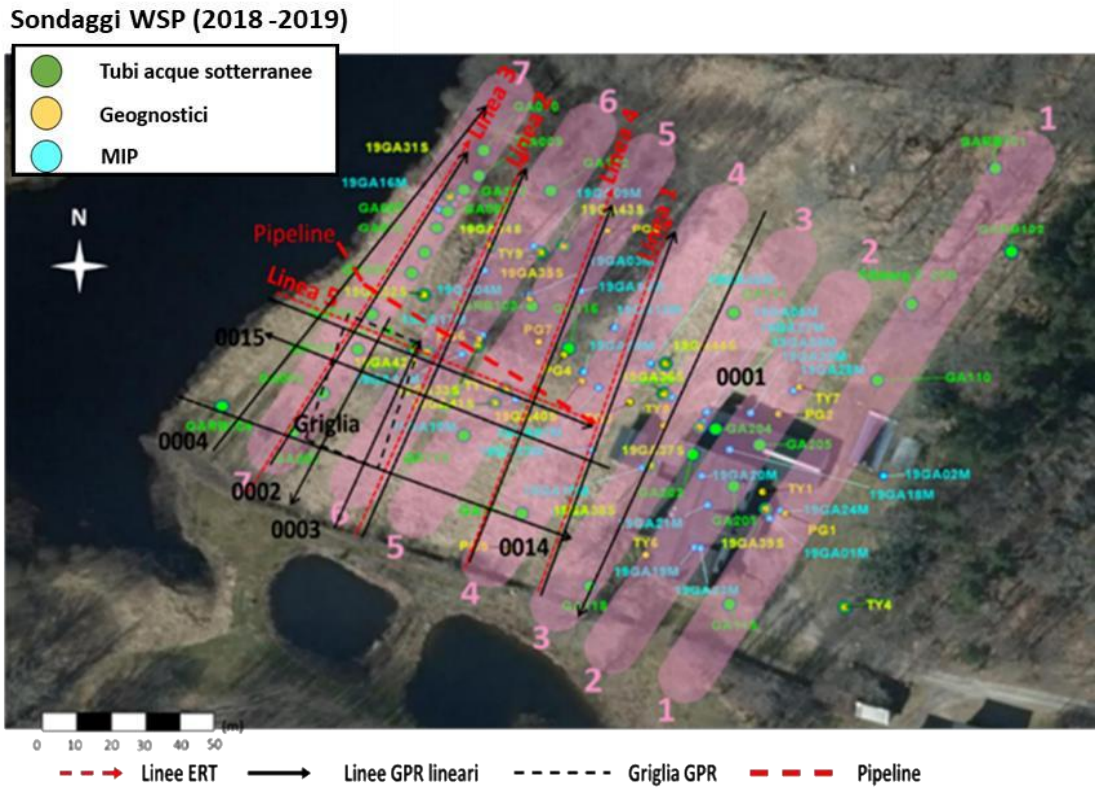



*Figura 2.2: Mappa generale della distribuzione complessiva dei sondaggi nel sito di Sibbarp, includente le linee orizzontali delle indagini geofisiche (tratta e modificata da Torin L. et al., 2021).*

Si tiene a precisare, inoltre, che in questa tesi non tutti i sondaggi son stati presi in considerazione. La selezione è stata effettuata fondamentalmente in base a quale sonda fosse più in prossimità del profilo dell'indagine geofisica d'interesse sia per quanto riguarda l'interpretazione della litologia degli strati che per l'individuazione dei contaminanti.

Qui sotto vengono riportate una foto panoramica dell'edificio (*Figura 2.3*) e di alcune aree del sito scattate nel 2020 (*Figura 2.4*), la cui planimetria della documentazione fotografica è stata possibile trarla dal solito rapporto della WSP (Torin L. et al., 2021) (visibile nell'**appendice A**). Da tener in considerazione che quelle all'interno dell'edificio (numero 6) e quelle ad est dell'edificio (numero 3 e 5) non son state d'interesse in quanto riguardanti un'area non coinvolta dai profili geofisici (vedi *Figura 2.2*).

*Figura 2.3: Foto panoramica dell'edificio realizzata da un drone; in lontananza è possibile intravedere il fiume Helge (Torin L. et al., 2021).*

*Figura 2.4: Documentazione fotografica effettuata nel 2020 da alcune angolazioni rispetto all'edificio (Torin L. et al., 2021).*

## *2.2 Inquadramento geologico*

### *2.2.1 Depositi quaternari*

Il paesaggio svedese è ricco di varietà morfologiche causate da eventi drammatici nella sua storia geologica come terremoti, vulcanismi, glaciazioni. In particolare, il territorio in cui risiederebbe la lavanderia di Nisse sarebbe interessata soprattutto da quest'ultime. Una loro testimonianza la si potrebbe cercare considerando la mappa dei depositi quaternari della zona estratta dal sito

dell'autorità geologica svedese SGU (SGU. (b), 2012) (*Figura 2.5*).

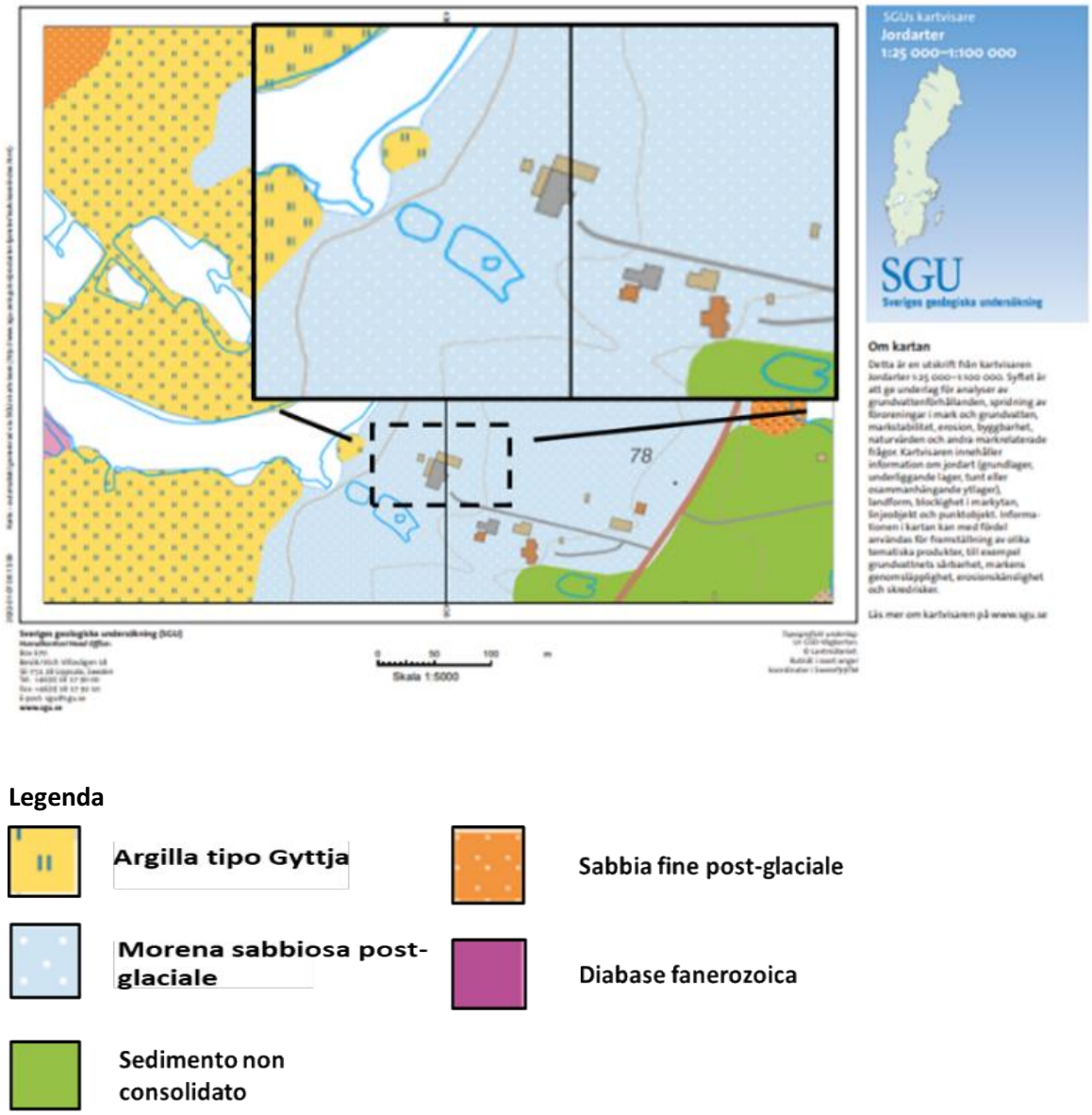



*Figura 2.5: Mappa in scala 1:5000 e leggenda dei depositi quaternari sulla lavanderia di Nisse, mappata da SGU, che mostra la distribuzione superficiale dei diversi tipi di suolo; la struttura del sito di Sibbarp è evidenziata da un rettangolo nero tratteggiato (modificata da SGU. (b), 2012);*

Secondo quanto viene descritto dalla leggenda del sito SGU, l'edificio della lavanderia a secco di Nisse si trova infatti al di sopra di depositi principalmente morenici sabbiosi post-glaciali, di cui il till ne costituisce circa il 75 % (Lumetzberger M., 2014). Considerando l'area circostante, in prossimità del

fiume Helge è possibile trovare un particolare tipo di argilla che prende il nome di *Gyttja* e dei sedimenti di origine fluvio post-glaciale nella parte dell'edificio. Quest'ultimi sono interessanti in quanto deriverebbero dallo scioglimento delle calotte glaciali mentre seguivano le valli rocciose formando così quelli che prendono il nome di "*ice seals"* che fungono da vere e proprie barriere. In particolare, quest'ultime segnano le posizioni di vecchi corsi d'acqua, come ad es. il fiume Helge, e son caratterizzati da un miscuglio di materiale sciolto (sabbia, silt, argilla, ghiaia, pietre, ecc…) trasportato e depositato sul fondo man mano che l'acqua si avvicinava e diminuiva la sua velocità in prossimità del bordo del ghiaccio (SGU., 2021).
Inoltre, si possono trovare anche sedimenti organici in prossimità del fiume Helge.

### *2.2.2 Bedrock*

Anche il substrato roccioso svedese e la sua storia geologica avrebbero ampiamente modellato le condizioni naturali e il paesaggio del territorio interessato dal sito stesso.
Questo sarebbe costituito, in particolare, da tre unità principali risalenti all'orogenesi Sveconorvegese (Mesoproterozoico) e comprendente attualmente la Svezia sud-occidentale e il sud della Norvegia:

- Rocce cristalline precambriane;
- Resti di una copertura rocciosa sedimentaria più giovane;
- I Caledonidi.

Le rocce precambriane fanno parte di un'area rocciosa stabile conosciuta come lo Scudo Baltico (o Scudo Fennoscandico). Si tratta di rocce formatesi durante il periodo Precambriano che risiedono soprattutto nella parte più a Nord della

Svezia.

Le rocce sedimentarie risalgono al Fanerozoico di cui le più giovani son rocce del Terziario formate 55 milioni di anni fa che costituiscono la parte più sud.

Le Caledonidi derivano dall'orogenesi Caledoniana con catene montuose che variano in età dal Precambriano al Siluriano.

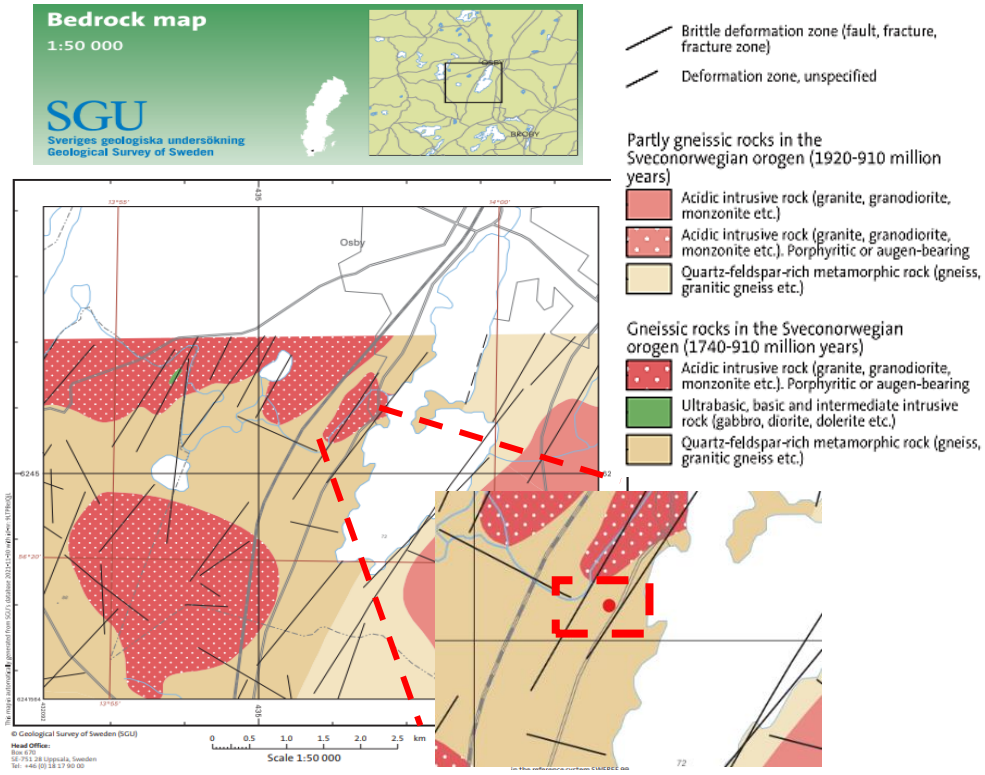



*Figura 2.6: Mappa e leggenda del bedrock a scala 1:50000; la struttura del sito di Sibbarp è evidenziata da un rettangolo tratteggiato e un puntino rosso (modificata e tratta da SGU. (a), 2012);*

Generalmente, le rocce comuni sono granito, granodiorite, arenaria, marmo e gneiss. Come si può vedere nella mappa soprastante, proprio quest'ultima roccia metamorfica ricca in feldspati e quarzo, costituisce il bedrock su cui il sito di Nisse risiede. Tale roccia metamorfica deriva dall'evento orogenetico Sveconorvegese avvenuto tra gli anni 1920 - 910 Ma.

Attorno ad essa è possibile vedere, inoltre, una roccia magmatica acida intrusiva (ad es. granito, granodiorite, monzonite). Come tipo di roccia acida intrusiva, è costituito principalmente da materiali silicei, che tende ad avere un valore di pH

generalmente più basso. Inoltre, il processo di formazione relativamente più lento di questo tipo di roccia ignea ha prodotto tessiture più grossolane come dicchi o *sills* e laccoliti. Da considerare che tali caratteristiche potrebbero costituire delle possibili vie per i contaminanti per penetrare in rocce situate più in profondità (Wei H., 2018).

### *2.2.3 Evidenze stratigrafiche*

Tuttavia, una possibile conferma delle unità stratigrafiche della zona, la si potrebbe trovare nei risultati provenienti dalle tecniche di perforazione (ad esempio il Roto-sonic) che la oramai nota società Golder aveva compiuto negli anni 2018 e 2019 (sondaggi geognostici di *Figura 2.2*).
Da sottolineare fin da subito che alcuni sondaggi hanno dimostrato di non essere stati in grado di andare oltre una profondità di 10 m circa. Questo perché essi incontrerebbero uno strato compatto e duro di sabbia o silt argilloso che secondo la descrizione riportata dai sondaggi corrisponderebbe a caolino.

Si è tenuto conto di alcune interpretazioni dei log stratigrafici dei sondaggi ed un profilo geologico della sezione 1 indicata nella *Figura 2.1* precedente.
Se si considera ad es. uno sketch del sondaggio 19GA31S (*Figura 2.7*) sembrerebbe che siano presenti ben 4 strati indicati secondo la simbologia usata dalla società Golder in Svezia. Oppure è possibile che un'altra plausibile interpretazione sia con soli 3 strati come nel caso del sondaggio 19GA43S. Queste interpretazioni saranno, assieme a quelle degli altri sondaggi, oggetto di discussione nel capitolo 6 per la caratterizzazione dei vari strati in relazione alle loro proprietà elettriche.

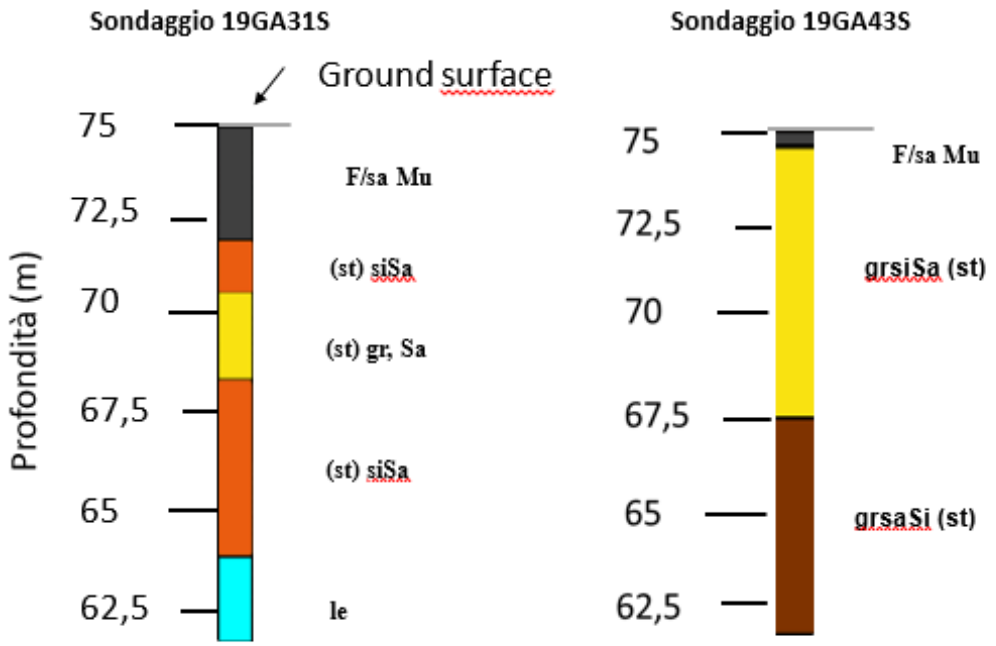



*Figura 2.7: Sketch di due sondaggi stratigrafici compiuti nel sito visibili in Figura 2.2.*

I colori son soggettivi e la simbologia a fianco è stata tratta dalla descrizione dei sondaggi secondo la società Golder e, in seguito, viene riportata una *Tabella 2.0*

per la descrizione della simbologia.

| | |
|---|---|
| F/sa Mu | Calcestruzzo o mattoni/sabbia con materia organica |
| (st) siSa | Sabbia siltosa con pietre |
| (st) gr, Sa | Sabbia ghiaiosa con pietre |
| (st) grsiSa | Sabbia ghiaiosa e siltosa con pietre |
| (st) grsaSi | Silt ghiaioso e siltoso con pietre |
| le | Argilla (Caolino) |

*Tabella 2.0: Tabella della descrizione dei simboli usati dalla società svedese WSP per i suoli.*

La sezione interpretativa 1 e la sua corrispettiva legenda geologica estratte dal rapporto della WSP (Torin L. et al., 2021) son mostrate nella *Figura 2.8* sottostante.

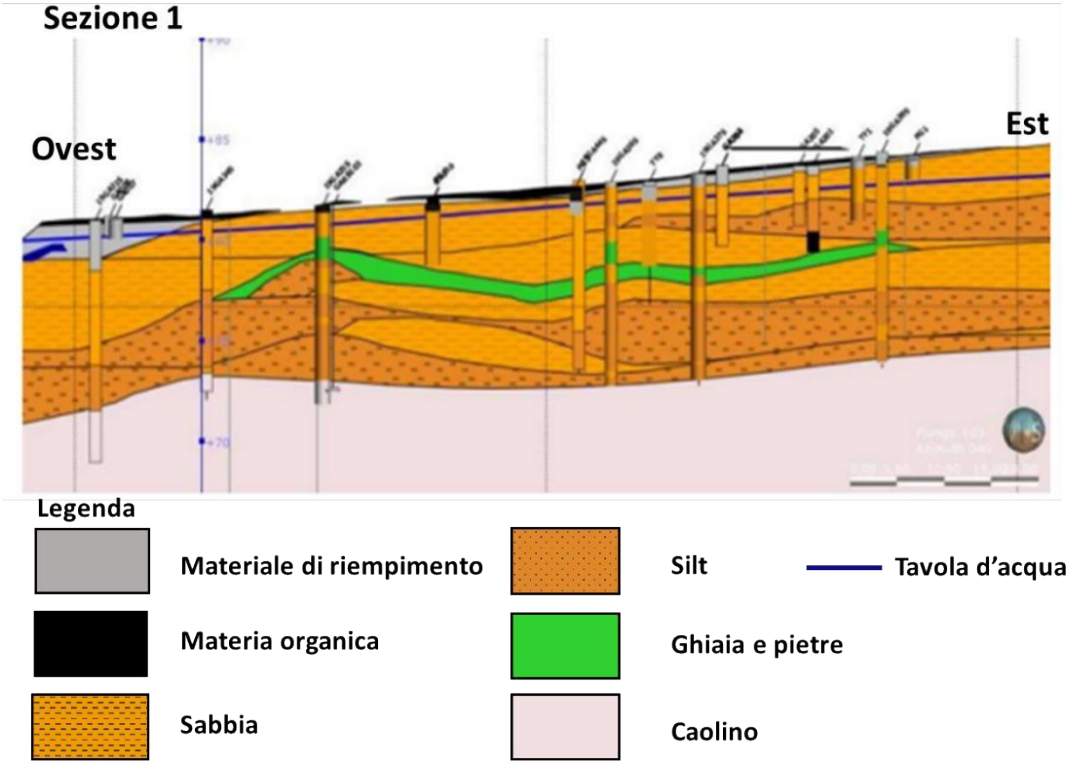



*Figura 2.8: Sezione e corrispettiva legenda geologica riferite al profilo 1 di Figura 2.1. ed estratte dal rapporto svedese della WSP (Torin L. et al., 2021).*

Da quanto mostrerebbero le interpretazioni il sito conterrebbe una successione di litologie in cui si alternano orizzonti caratterizzati in prevalenza da sabbie, silt e argilla con a volte la presenza di ghiaia e pietre e con un soprastante strato di materiale di riempimento e materia organica.
Alla fin fine le interpretazioni dei due sondaggi son molto simili e apparirebbero differenti solo per la mancanza del quarto strato di argilla nel sondaggio 19GA43S. Tuttavia, è molto probabile che si avrebbe avuto dell'argilla anche in quest'ultimo se il sondaggio fosse stato in grado di andare più in profondità.

Da far attenzione che si tratti solamente di un'interpretazione e non si è certi, quindi, che sia esattamente così la disposizione degli strati. Inoltre, si sta considerando solo degli specifici sondaggi e una sezione collocati in determinati punti dell'area del sito. Ciò vuol dire che si sta facendo un'approssimazione di

quella che potrebbe essere la stratigrafia della zona in quanto quest'ultima potrebbe essere diversa in altre posizioni.

Inoltre, in base alla profondità della tavola d'acqua riportata in alcuni sondaggi visibili nella mappa successiva in *Figura 2.9*, è stato possibile suddividere il sottosuolo in una zona insatura vicino alla superficie ed una satura intermedia fino ad una profonda comprendente l'ipotetico caolino. La descrizione presentata per tali zone sarebbe stata tratta dal solito e oramai noto rapporto della WSP (Torin L. et al., 2021) in un modello concettuale del sottosuolo proposto dalla medesima società geologica svedese per la caratterizzazione del sito di Nisse in 3 differenti *aree di proprietà* in riferimento alla sezione interpretativa 1 mostrata in precedenza (vedi **appendice A**).

La zona insatura interesserebbe uno strato superficiale posto tra 0 e 1.5 m di profondità rispetto al piano campagna. Questo è costituito prevalentemente da una sabbia ricca di materia organica e altro materiale di riempimento come calcestruzzo o materiale più grossolano (ad es. ghiaia) che si pensa possa provenire dalla sponda del fiume Helge in quanto usato in passato per scopi di drenaggio o di difesa nel caso di esondazione.

Al di sotto di questa, incomincerebbe ad essere presente un buon contenuto d'acqua. Questa zona sarebbe caratterizzata da due orizzonti di sabbia e silt al di sopra e al di sotto di un possibile strato costituito maggiormente da una sabbia ghiaiosa o semplicemente grossolana. Il tutto sarebbe interessato anche dalla presenza di pietre e avrebbe all'incirca uno spessore a partire dall'1.5 m dell'orizzonte soprastante precedente fino a 9 o 10 m di profondità. In realtà, non si sa con l'esattezza lo spessore degli orizzonti di tale zona perché si tratta di un miscuglio di litologie che non rendono chiari i confini stratigrafici. Se si andasse a vedere la descrizione di ciascun sondaggio, l'altezza in metri di ciascun suolo non è mai la stessa e certe volte si ripete man mano che si scende in profondità.

A maggiori profondità, ovvero sui 10 m, si avrebbe a che fare con una zona satura con la presenza di silt o sabbia assieme ad una componente più fine che

corrisponderebbe al caolino già accennato in precedenza. In particolare, secondo degli esperti della SGU sarebbe stata confermata la presenza di un sedimento dominato da caolino alla profondità di 10 m al sondaggio 19GA31S (vedi sketch in *Figura 2.7*). Si descrive uno strato non omogeneo, fangoso ma con parti permeabili anche se comunque abbastanza denso caratterizzato predominante da argilla e in minor quantità da sabbie o silt. Si pensa che questo strato di sabbia/silt argilloso relativamente compatto costituisca il top del possibile sottostante *bedrock* come mostrerebbe lo schema riportato dal rapporto inerente allo studio per il modello concettuale in aree di proprietà di prima (vedi **appendice A**).

In sintesi, si potrebbe pensare che una stratificazione del genere, in relazione anche alla mappa precedentemente mostrata (*Figura 2.5*), possa indicare una mescolanza tra depositi di origine fluviale e till costituiti predominantemente da sabbia e silt, entrambi post – glaciali, dato che la zona d'interesse era stata soggetta ad importanti periodi di glaciazione.

## *2.3 Inquadramento idrogeologico*

La Figura 2.9 mostra ancora una volta alcuni dei sondaggi eseguiti negli anni precedenti dalla società Golder, di cui si trova gli stessi per il campionamento dei suoli (serie 19GAXXS) oltre a degli altri che si son dimostrati utili per visualizzare le linee di elevazione e i punti delle profondità della tavola d'acqua. Si è visto che i valori si differenziano da sondaggio a sondaggio e questo ha permesso di interpretare la possibile direzione del flusso delle acque sotterranee che è stata indicata con delle frecce blu in (*Figura 2.10*)

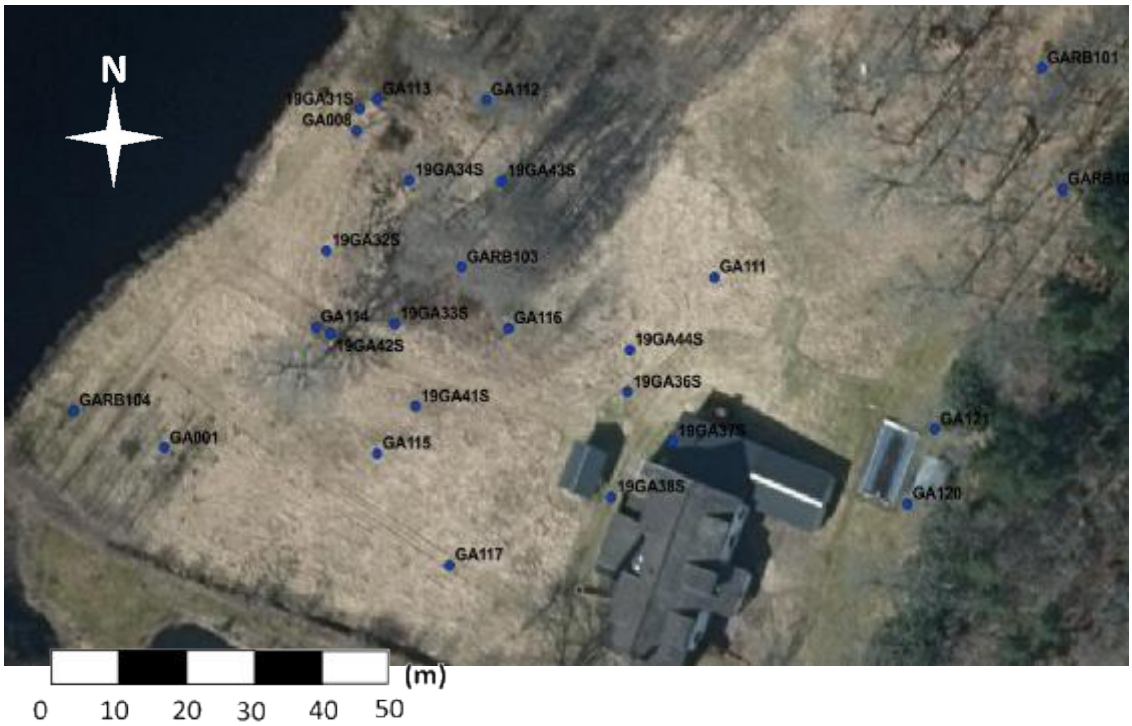



*Figura 2.9: Pozzi d'interesse di cui è stato possibile estrarre le informazioni relativamente alla profondità della tavola d'acqua dai dati dell'anno più recente (2019) forniti da parte della società Golder (ortofoto modificata ed elaborata con QGIS).*

*Figura 2.10: Linee di elevazione della tavola d'acqua e valori della profondità della tavola d'acqua inerenti ai pozzi d'interesse. Le frecce blu rappresentano l'ipotetica direzione del flusso delle acque sotterranee (ortofoto modificata ed elaborata con QGIS).*

Quanto si può intuire dalla *Figura 2.10* soprastante la direzione del flusso andrebbe da est verso ovest, il che concorderebbe con i valori delle linee di elevazione (più elevate in prossimità dell'edificio). Evidenze di questo andamento delle acque sotterranee potrebbe essere verificato considerando anche le profondità riscontrate in alcuni dei pozzi presenti che sembrerebbero diminuire in prossimità del fiume. In linea generale si potrebbe prendere in considerazione come profondità rappresentativa l'1.5 m in corrispondenza dell'edificio. Mentre in prossimità del fiume dalla figura non è proprio così chiaro anche se secondo quanto è scritto nel rapporto della WSP (Torin L. et al., 2021) la profondità raggiunta in prossimità di Helge è intorno a 0.5 m.

Più avanti, nel capitolo 6 inerente alla parte dei risultati sarà possibile vedere in alcune sezioni GPR osservare l'andamento della tavola d'acqua in base al comportamento delle iperboli di riflessione.

In riferimento a tali osservazioni si potrebbe ipotizzare, quindi, che i contaminanti

possano essere stati trasportati dal flusso delle acque sotterranee anche in prossimità del fiume Helge come lo dimostrerebbe la mappa dei risultati ottenuti dai metodi di campionamento delle acque sotterranee (vedi capitolo 6).

# 3. Contaminanti

I solventi clorurati son i responsabili dell'inquinamento nel sito della lavanderia di Nisse in esame oltre che ad esserlo di altri numerosi siti esistenti nel mondo e fanno parte, in questo caso, di quella categoria che va sotto il nome di *Dense Nonaqueous Phase Liquids* (DNAPLs). Numerose variabili influenzano il trasporto e la distribuzione di tali inquinanti nel sottosuolo, il che rende complicata la rintracciabilità dei DNAPLs e, quindi, la caratterizzazione del sito nonché il possibile step successivo della bonifica del sito stesso (Huling, S. G. & Weaver, J. W. 1991).

### *3.1 Dense Non-aqueous Phase Liquids (DNAPLs)*

I solventi clorurati appartengono alla categoria degli idrocarburi alifatici alogenati, ossia quella classe di contaminanti che deriva dalla sostituzione di 1,2,3 o 4 atomi di idrogeno con altrettanti di un alogeno (in questo caso il cloro) e che a sua volta costituiscono il gruppo più frequentemente riconosciuto della classe dei DNAPLs. Si tratta di un gruppo di inquinanti ampiamente utilizzato nelle attività antropiche e in impianti industriali, chimici, metallurgici, tessili e, come nel caso di questa tesi, di pulitura a secco. Son caratterizzati da liquidi più pesanti dell'acqua, leggera solubilità in acqua, e bassa viscosità. La descrizione quantificata di queste menzionate caratteristiche degli idrocarburi clorurati può essere vista nella *Tabella 3.0* sottostante.

| Vapour Compound | Density [kg/m3] | Dynamic Viscosity 20°C [pa•s] | Solubility 25°C [mg/L] | Henry's Constant [pa] | Colour | Molar mass [g/mol] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PCE | 1.625 | 0.89 | 206 | 14 | Colourless | 165.83 |
| TCE | 1.462 | 0.57 | 1280 | 58.7 | Colourless | 131.4 |
| cDCE | 1.248 | 0.467 | 3500 | 200 | Colourless | 96.95 |
| VC | 0.911 | / | 2700 | / | Colourless | 62.5 |

*Tabella 3.0: Alcuni dei parametri chimici e fisici dei quattro composti di idrocarburi clorurati prevalenti (tratta e modificata da Huling e Weaver,1991).*

Sulla base di queste caratteristiche, i quattro composti possono avere differenti comportamenti. Ad esempio, la viscosità dinamica, ossia la resistenza di un liquido a fluire per via della coesione che si creerebbe tra il liquido stesso e il mezzo che interagisce con esso, e la densità, possono condizionare la conduttività idraulica di uno specifico tipo di liquido come si può vedere dalla seguente formula:

$$K = k * \rho * g/\mu$$

Dove $K$ maiuscolo [m/s] si riferisce alla conducibilità idraulica, quella minuscola $k$ [$m^2$] indica la permeabilità intrinseca, $\rho$ [$kg/m^3$] indica la densità di massa del fluido, $g$ [$m/s^2$] la gravità e $\mu$ [Pa•s] sta per la viscosità dinamica.
Tale formula ci permette di capire che i DNAPLs con la loro maggior densità e minor viscosità dinamica rispetto a quella dell'acqua (1.0016 Pa•s a 20 °C), è in grado di essere chimicamente più mobile nel sottosuolo dell'acqua stessa. Questo giustifica la loro attitudine a migrare verticalmente per il sottosuolo fino ad accumularsi sul fondo per l'incontro con degli orizzonti geologici più impermeabili come ad es. l'argilla.
A tal proposito, l'alta mobilità di questi composti rende più difficile prevedere il loro percorso nel sottosuolo. In aggiunta a questa loro caratteristica idrologica, le altre concorrenti fasi presenti (acqua, solido e aria) e le eterogeneità geologiche possono complicare la situazione di contaminazione dei siti contaminati dagli idrocarburi clorurati. Nella *Figura 3.1* sottostante è possibile vedere il sistema a quattro fasi con cui i DNAPLs potrebbero presentarsi nel sottosuolo. In particolare si comprende che i contaminanti possano presentarsi sotto forma di vapore (fase aeriforme), adsorbirsi o ripartirsi sul materiale del suolo o della falda acquifera (fase solida), dissolversi nell'acqua in base alla loro solubilità (fase liquida) e, infine, presentarsi proprio come DNAPLs immiscibili senza alcuna miscela con i mezzi circostanti (fase immiscibile) (Huling, S. G. & Weaver, J. W. 1991).

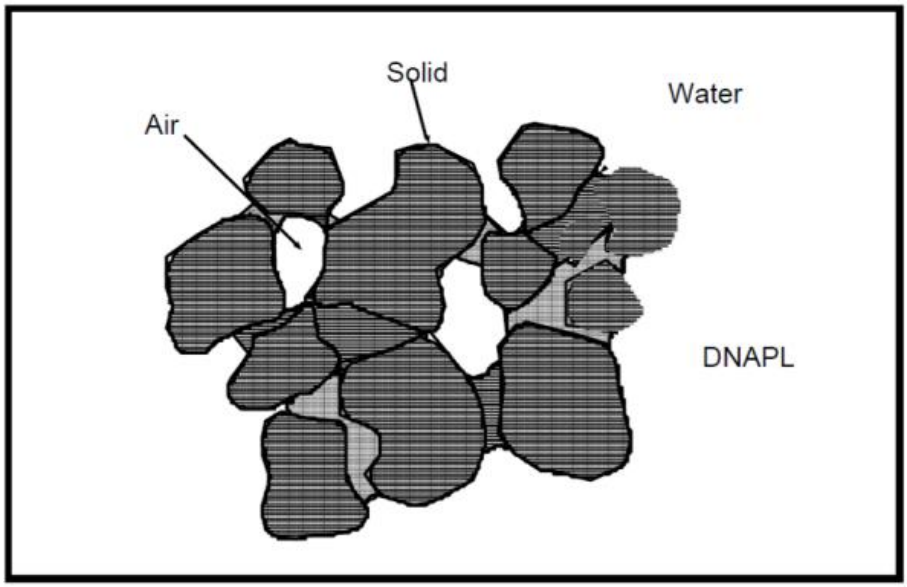



*Figura 3.0: Sketch di una zona satura contaminata da DNAPL e dalle tre fasi (solido, acqua, aria). Il contaminante può essere presente in una o in tutte e tre le fasi (immagine tratta da Huling, S. G. & Weaver, J. W. 1991).*

Come si può vedere dalla figura soprastante i DNAPLs potrebbero apparire appunto con una sola fase o con la combinazione di tutte le quattro fasi.
Da riconoscere che, più il modello sopraindicato dei contaminanti idrocarburi alogenati è complesso, più è credibile che esso possa contribuire a comprendere qual è lo stato ambientale del sito così come la sua futura tecnica d'intervento più appropriata (Wei H., 2018).

Nella *Figura 3.1* viene mostrato il tipico modello del comportamento dei DNAPLs nel sottosuolo. A seguito ad es. di una perdita proveniente da una rottura di un barile presente all'interno di un edificio industriale, può accadere uno sversamento sulla superficie topografica fino a che il contaminante incomincia a percolare nel sottosuolo. Per via della gravità, il contaminante continua a precipitare interagendo sia con la zona instaura che con quella satura fintanto che non incontra uno strato abbastanza impermeabile (ad es. l'acquitardo in *Figura 3.1* costituito da un'argilla o un bedrock con bassa permeabilità). In particolare, nella zona satura, potrebbe succedere che l'inquinante si propaghi e si dissolva secondo la direzione principale di falda con la conseguente formazione di un plume di contaminazione in fase acquosa. Oppure se ad es. l'acquitardo (o

l'acquiclude) impermeabile risulta inclinato, la sostanza potrebbe muoversi lungo di esso causando così un possibile aumento della zona sorgente di contaminazione.

Siccome si tratta di sostanze volatili e di bassa solubilità (ma non nulla), può capitare che avvenga una contaminazione della fase gassosa diventando un pericolo in caso di inalazione e che siano in grado di persistere per un lungo periodo di tempo (decine o addirittura centinaia di anni). Per giunta, può succedere che nella zona insatura si crei il sistema complesso a quattro fasi precedentemente visto in *Figura 3.1*. Se ci si trova, invece, nella zona satura, i DNAPLs son in grado di precipitare anche a profondità elevate data la loro densità più elevata rispetto a quella dell'acqua fino a distribuirsi nelle acque sotterranee divenendo un problema in caso di ingestione di quest'ultime oltre a penetrare nelle fratture del bedrock, se presenti.

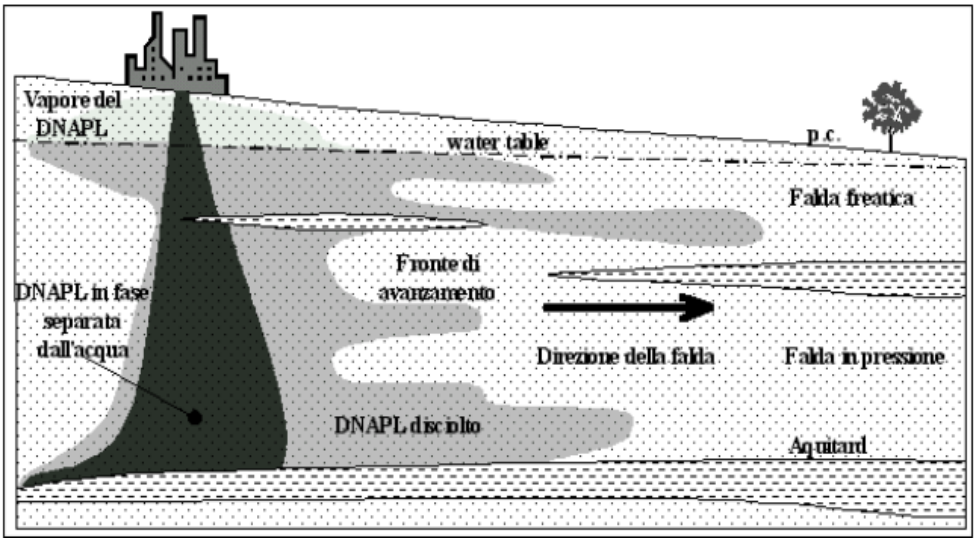



*Figura 3.1: Schema concettuale di come gli idrocarburi clorurati possono svilupparsi nel terreno. La freccia nera indica la direzione del flusso delle acque sotterranee.*

### *3.2 Pericolosità e valori guida dei contaminanti*

La disputa e la ricerca degli effetti sulla salute causati dagli idrocarburi alogenati PCE e i suoi prodotti non sono mai state concluse. Da quanto si è compreso, il

PCE si degrada nei suoi sottoprodotti tossici tricloroetilene (TCE), diclorotene (DCE) e cloruro di vinile (VC) una volta che viene immesso nell'ambiente a causa soprattutto di agenti biologici (Wei H., 2018). Il processo che induce queste trasformazioni viene definito dealogenizzazione riduttiva in quanto il composto organo alogenato viene usato come accettore di elettroni dove un atomo di cloro viene sostituito da uno di idrogeno secondo lo schema della *Figura 3.3* sottostante (Vanzetti C. et al., 2016).

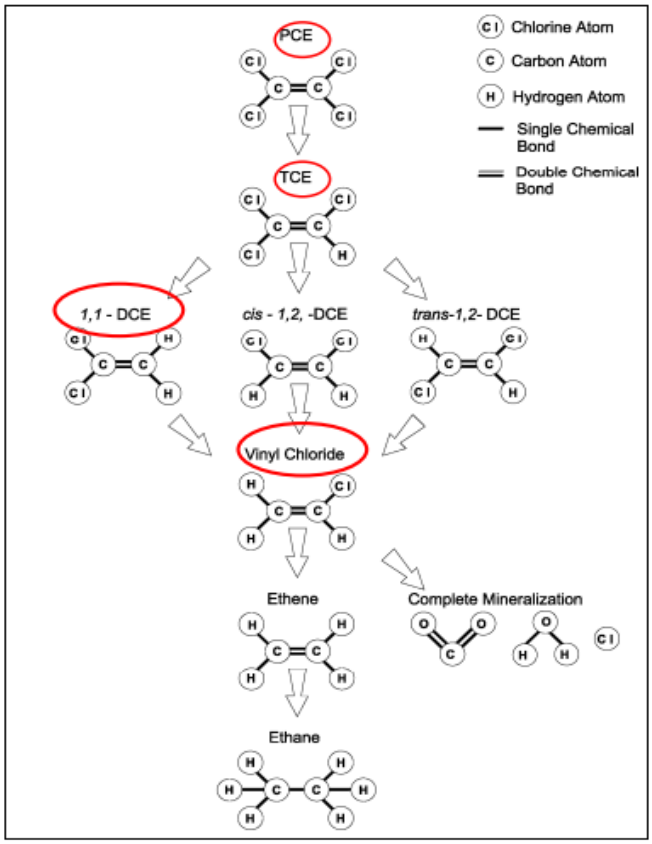



*Figura 3.2: Schema della dealogenizzazione riduttiva di solventi clorurati; in rosso sono cerchiati i prodotti cancerogeni (Vanzetti C. et al., 2016).*

In particolare, in riferimento allo schema mostrato sopra, è possibile eseguire anche una stima dello stato di degradazione grazie al seguente rapporto:

$$\frac{Metaboliti}{Composti\ Parentali} = \frac{[cDCE] + [VC]}{[PCE] + [TCE]}$$

Dove [cDCE], [VC], [PCE] e [TCE] sono concentrazioni in [*µmol/L*]. Un valore di rapporto più alto indicherà un tasso di conversione più elevato dai composti originari (PCE e TCE) ai loro prodotti (cDCE e VC) (Wei H., 2018).

Le concentrazioni di questi inquinanti erano risultate molto elevate in alcuni dei campioni di suolo e acque sotterranee nel sito di Sibbarp. Ciò necessita della dovuta attenzione in quanto, secondo alcuni esperimenti ed indagini effettuate negli USA e nei paesi nordici volte a capire la possibile cancerogenicità dei solventi clorurati, si tratterebbe proprio di sostanze cancerogene (Wei H., 2018). Una conferma la si trova in uno studio sui ratti in cui sarebbe stato dimostrato che provocano tumori ai reni, sangue, testicoli e cervello (Lumetzberger M., 2014).
A tal riguardo, si riporta la *Tabella 3.1* resa disponibile dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) in cui vien mostrata la classificazione basata sul livello di cancerogenicità sui solventi clorurati d'interesse:

| | PCE | TCE | DCE | VC |
|---|---|---|---|---|
| **Cancer Classification group** | 2A | 2A | 3 | 1 |

*Tabella 3.1: La classificazione del cancro del PCE e dei suoi prodotti di degradazione (IARC, 2015). La classificazione raggruppa i significati: 1 – Cancerogeno per l'uomo, 2A – Probabilmente cancerogeno per l'uomo, 2B – Possibilmente cancerogeno per l'uomo, 3 -Non classificabile come alla sua cancerogenicità per l'uomo (IARC., 2015).*

È stato, inoltre, istituito lo standard nazionale di concentrazione per questi idrocarburi alogenati nell'acqua potabile sebbene differisca da paese a paese. Ad esempio, in Svezia, il massimo consentito della concentrazione nelle acque sotterranee per PCE e TCE è 10 µg/l e la concentrazione massima consentita per il Cloruro di Vinile (VC) è 0,5 µg/l, ma nessuno standard è stato impostato per Cis-1,2-Dicloroetene (cDCE). Al contrario, le concentrazioni massime consentite negli altri paesi per PCE, TCE e VC sono 5 µg/l, 5 µg/l, e 2 µg/l rispettivamente (Wei H., 2018; E.P.A., 2009).
Per quanto riguarda i suoli, i limiti vengono stabiliti sulla base di due differenti tipi di uso del suolo: l'uso del suolo sensibile (KM) e quello meno sensibile

(MKM). Nel dettaglio, il primo significa che la qualità del suolo non limita l'uso del suolo. Tutto il gruppo di persone, compresi bambini, adulti e anziani, possono soggiornare nell'area durante l'intero tempo di vita. La maggior parte dei sistemi ecologici nel suolo sono protetti e lo sono anche le acque sotterranee e superficiali. L'uso del suolo sensibile corrisponde generalmente a quello residenziale comprese le abitazioni e i parchi. Per quanto riguarda al secondo, invece, la qualità del suolo limita la scelta dell'uso del suolo (ad esempio industrie, uffici o strade). I gruppi di persone che si presume siano esposte sono le persone che stanno lavorando al sito e anche bambini e anziani che stanno visitando temporaneamente quella zona. Le acque sotterranee fino a una distanza di 200 metri e le acque superficiali sono protette. Generalmente corrisponde ad un uso del suolo meno sensibile quello di tipo commerciale e industriale del suolo (INSURE., 2017).

Nella *Tabella 3.2* sottostante vengono mostrati i limiti dei contaminanti in [mg/kg] in base ai due tipi di uso del suolo appena descritti.

| Tipologia uso del suolo | Percloroetilene (PCE) [mg/kg] | Tricloroetilene (TCE) [mg/kg] | Cis-1,2-Dicloroetilene (cDCE) [mg/kg] | 1,1,1-tricloroetano [mg/kg] | Cloruro di Vinile (VC) [mg/kg] |
|---|---|---|---|---|---|
| **<KM** | **0,4** | **0,2** | | **5** | |
| **>KM<MKM** | **1,2** | **0,6** | | **30** | |
| **>MKM** | | | | | |

*Tabella 3.2: Valori guida per i contaminanti d'interesse a seconda della tipologia dell'uso del suolo (modificata con excel e tratta da EPA (c), 2016).*

Da notare che, come per le acque sotterranee, non viene considerato alcuno standard per il Cis-1,2-Dicloroetene (cDCE) come anche per il Cloruro di Vinile (VC) ma solamente per i suoli.

### *3.3 Accenni sulla caratterizzazione e sulla bonifica di un sito per i DNAPLs*

La caratterizzazione dell'ambiente del sottosuolo in siti contaminanti da DNAPLs, è un processo assai complesso e che può richiedere molto tempo. Le informazioni specifiche associate al volume e ai tempi del rilascio del DNAPLs, sono

generalmente scarse o poco disponibili e l'eterogeneità del sottosuolo contribuisce al percorso migratorio di trasporto complicato e imprevedibile dei DNAPLs nel sottosuolo stesso.
La caratterizzazione del sito in genere implica un significativo investimento nelle analisi delle acque sotterranee. Sebbene l'analisi dell'acqua di falda fornisce informazioni utili sulla distribuzione dei componenti solubili del DNAPL, la presenza di altre fasi del DNAPL stesso potrebbero non essere riconosciute. L'indagine deve essere, quindi, il più dettagliata possibile per ottenere il maggior numero di informazioni sulla distribuzione del DNAPL su tutte le quattro fasi (acquosa, gassosa, solida, immiscibile) presenti nelle matrici ambientali suolo, sottosuolo e acque sotterranee. In breve, i dati raccolti sulle varie fasi devono essere compilati, valutati e utilizzati per aiutare a identificare precisamente dove si trova attualmente il contaminante situato, dove è stato, in quali fasi si verifica e in quale direzione potrebbero migrare le fasi mobili (Huling, S. G. & Weaver, J. W., 1991).

Nel rapporto svedese (Torin L. et al., 2021) viene presentato il documento dell'IDSS (Integrated DNAPL Site Strategy) in cui è proposta una strategia generale adatta per le aree contaminate dai solventi clorurati DNAPLs la quale include l'identificazione di alcuni punti chiave che sarebbero regolarmente valutati, aggiornati e/o migliorati (vedi *Figura 3.3*).

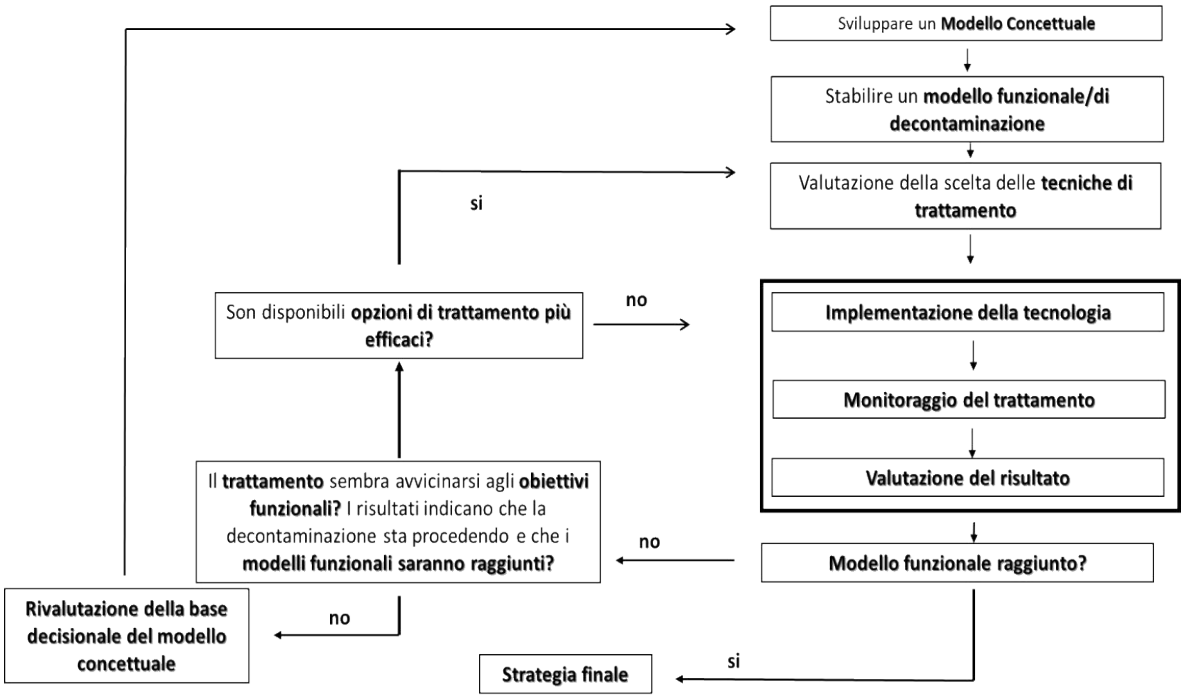



*Figura 3.3: Descrizione schematica del documento IDSS di come «attaccare» le aree contaminate da solventi clorurati DNAPLs (Immagine tratta e modificata da ITRC., 2011).*

Tale schema risalta fondamentalmente cinque parti:

1. Un **modello concettuale**, aggiornato quando le informazioni diventano disponibili e quando è necessario compiere nuove decisioni;
2. **Obiettivi funzionali "SMART" (Specific, Measurable, Achievable, Relevant and Time-bound)** connessi a specifici criteri per il trattamento delle misure (ad es. una tecnologia regolarmente valutata per lo sviluppo e generalmente conveniente);
3. L'applicazione e la selezione di un'appropriata **tecnica di bonifica;**
4. La stabilizzazione di una **strategia di monitoraggio** basata sugli scopi intermedi e finali degli interventi di bonifica;
5. Una **continua valutazione della strategia di bonifica** o del cambiamento di strategia quando gli obiettivi non vengono raggiunti o quando metodi alternativi offrono gli stessi e/o migliori risultati ad un costo più basso oppure in un tempo più corto.

In riferimento al primo punto, per il sito in esame è stato proposto il modello concettuale delle aree di proprietà visibile nell'**appendice A** e già accennato nel capitolo precedente. Questo considererebbe tre aree divise in accordo con la situazione d'inquinamento (fonti, grado, estensione e percorsi di migrazione della contaminazione), la geologia e l'idrogeologia presenti nel sito. Una complessiva visione della condizione della contaminazione sarebbe ottenuta quando ogni modello concettuale per ciascuna area si fonde in un completo modello concettuale. Si tratta di una procedura alquanto complessa in quanto potrebbero esserci delle incertezze generali riferite ad es. alla struttura della zona sorgente (profondità, ampiezza e lunghezza), alla distribuzione del plume del contaminante, alle eterogeneità geologiche oltre all'origine della possibile fuoriuscita del contaminante stesso. Tuttavia, tale metodo semplifica il caso in cui ci si trovasse a "costruire" un unico e grande modello concettuale per l'intera area. Se il modello in ogni proprietà è realizzabile con le misure sui livelli dei contaminanti per i differenti mezzi (suolo, acque sotterrane, aria nei pori, aria indoor, ecc..) e se dovesse succedere che tali misure superino i valori guida mostrati nel paragrafo precedente, allora si procede con un'analisi di rischio sanitaria-ambientale e con una conseguente eventuale valutazione e scelta di appropriate misure di bonifica.

Nel dettaglio, le tecniche di bonifica son sito-specifiche e possono essere scelte in modo più o meno efficace ed efficiente a seconda del tipo di contaminante, della sua posizione, della situazione d'inquinamento (ad es. i livelli d'inquinamento o l'estensione del plume di contaminazione) presenti nelle matrici ambientali (suolo, sottosuolo e acque sotterranee) assieme all'aspetto geologico ed idrogeologico di quest'ultime.

In particolare, la bonifica dei DNAPLs comporta principalmente la rimozione fisica tramite sistemi di pompaggio o trincea-drenaggio. La loro eliminazione all'inizio del processo di bonifica toglierà la principale fonte di contaminanti. Questo passaggio migliorerà sostanzialmente l'efficienza complessiva di recupero delle varie fasi DNAPLs includendo anche una pompa a lungo termine oltre che interventi per il trattamento di componenti solubili. Le tecnologie di bonifica

come l'estrazione sotto vuoto, la biodegradazione, il pompaggio dell'acqua di falda e il lavaggio del suolo sono diretti principalmente agli immobili DNAPLs e alle varie fasi in cui i componenti dei medesimi DNAPLs occorrono. Le barriere fisiche possono essere utilizzate nel tentativo di ridurre al minimo un ulteriore migrazione del DNAPL (Huling, S. G. & Weaver, J. W., 1991).
Da considerare però che in base al comportamento dei DNAPLs di andare ad interessare zone a maggiori profondità (*Figura 3.1*) e di persistere per molto tempo, l'applicazione delle tecniche sopra citate tende a comportare dei costi considerevoli oltre che dei periodi di trattamento assai prolungati.

# 4. Metodi

In questo lavoro, le tecniche geofisiche che son state utilizzate principalmente son quelle della Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) e il Ground Penetration Radar (GPR) e, perciò, saranno descritte con maggior dettaglio. In aggiunta a queste, saranno descritte brevemente anche quelle geochimiche delle sonde ad interfaccia a membrana (MIP) e dei metodi per il campionamento delle acque sotterranee.

## *4.1 Tomografia di Resistività Elettrica*

La Tomografia di Resistività Elettrica*, Electrical Resistivity Tomography (ERT)*, è un metodo geofisico attivo, non invasivo e in corrente continua (DC), in grado di "ricostruire" delle *imaging* 2D o 3D della distribuzione di resistività elettrica della porzione di terreno interessata.
Il vantaggio principale di tale tecnica consiste nell'utilizzo di un gran numero di elettrodi in contemporanea col fine di ottenere più informazioni possibili sulle diverse caratteristiche fisiche del sottosuolo. Ciò ha permesso la sua applicazione in differenti campi d'applicazione come ad es. l'esplorazione geotermica, la prospezione mineraria e petrolifera, i progetti per costruzioni, la prospezione archeologica, l'idrogeologia oltre la mappatura della contaminazione nei siti contaminati.

### *4.1.1 Principi fisici di base*

La ERT, come gli altri metodi geofisici in corrente continua (DC), è basata sulla legge di Ohm:

$$\Delta V = RI \tag{4.1}$$

Dove $\Delta V$ è la differenza di potenziale misurata in Volt [V], $I$ è l'intensità di corrente misurata in Ampere [A] e $R$ è la resistenza del materiale che viene

attraversato dalla corrente, espressa in Ohm [Ω]. Quest'ultimo è un parametro che dipende direttamente dalla geometria del materiale. Se ad es. si applica una differenza di potenziale $\Delta V$ da permettere il flusso di una corrente $I$ attraverso un parallelepipedo con una lunghezza $L$ [m] e sezione di area $A$ [m$^2$] (*Figura 4.0*) si otterrà che:

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{4.2}$$

Dove $\rho$ corrisponde alla *resistività elettrica* con unità di misura [Ω·m] e la resistenza $R$ risulta direttamente proporzionale alla lunghezza del conduttore $L$ e inversamente proporzionale all'area della sezione $A$.

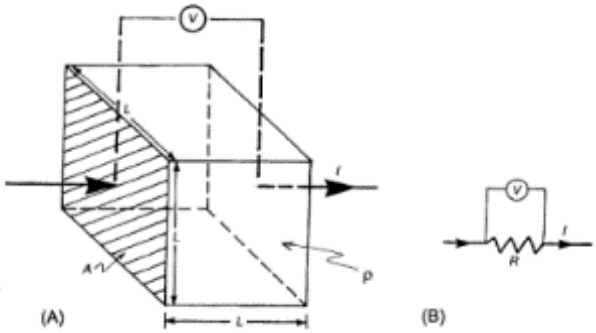



*Figura 4.0: Parallelepipedo di lunghezza L e area A attraversato da una corrente I. (Immagine tratta da Borriello A., 2016/2017).*

Da tenere presente che la resistività elettrica $\rho$ è una proprietà intrinseca del mezzo interessato e, dunque, non dipende dall'intensità di corrente $I$ o dalla configurazione di elettrodi utilizzata (vedi paragrafo 4.1.2) (Busato L., 2016).

Inoltre, dalla combinazione delle equazioni 4.1 e 4.2 si ottiene in forma infinitesimale (Peruzzo L., 2014/2015):

$$\Delta I = \frac{\Delta S}{\Delta L}\frac{-\Delta V}{\rho} \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{-\Delta V}{\Delta L}\frac{1}{\rho} \rightarrow \vec{J} = \frac{\vec{E}}{\rho} \tag{4.3}$$

Ove $\vec{E}$ corrisponde al vettore di intensità di campo elettrico [V/m] e $\vec{J}$ è il vettore d'intensità di corrente [A/m$^2$].
Solitamente l'equazione 4.3 viene scritta nel seguente modo:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{4.4}$$

Dove $\sigma$ è la *conducibilità elettrica* espressa in Siemens su metri [S/m] ed è definita come l'inverso della resistività (Borriello A., 2016/2017):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{4.5}$$

In *Figura 4.1* è possibile osservare che la resistività elettrica $\rho$ e la conduttività $\sigma$ varino con la geologia dei materiali.

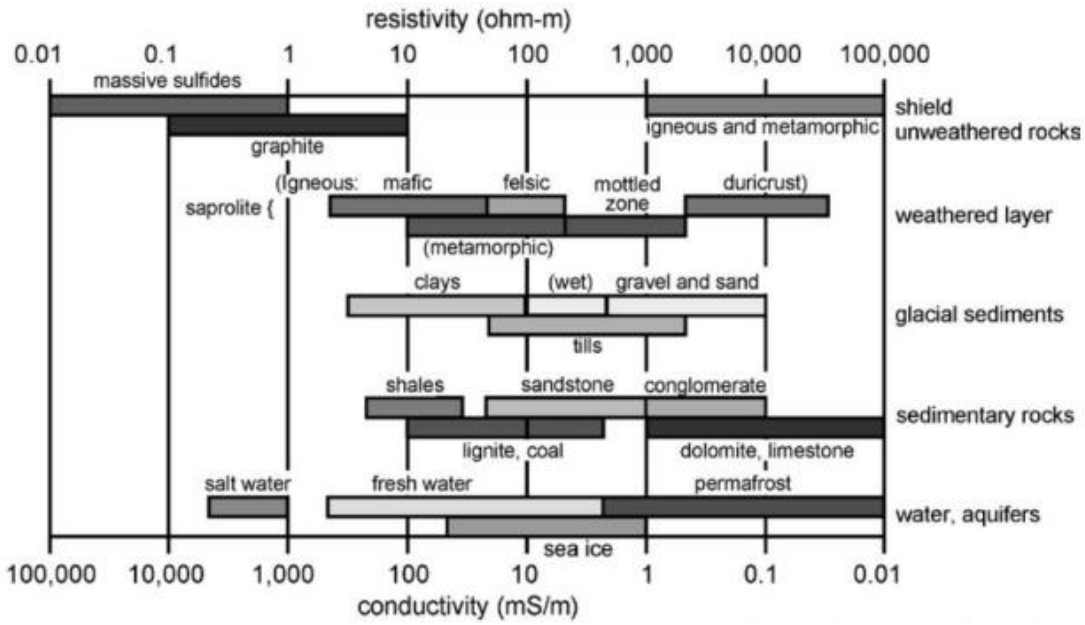



*Figura 4.1: Intervalli tipici di resistività per vari materiali geologici. La conducibilità (in tal caso mS/m) è il reciproco di resistività (Palacky, 1987).*

Le rocce ignee generalmente mostrano i valori di resistività più elevati. Da quelle sedimentarie ci si aspetta dei valori più bassi dovuti alla presenza di una maggior porosità rispetto alle magmatiche. I suoli non consolidati son quelli che possiedono le più basse resistività e, quindi, una più elevata conduttività. Queste differenze nei valori di resistività non sono causate solamente dalla tipologia, dalla forma e dalla dimensione dei grani del materiale ma anche da

un'altra sua importante caratteristica, ovvero il grado di saturazione in acqua.
Si consideri ad es. la legge di Archie per formazioni rocciose parzialmente sature in termini di *resistività elettrica* $\rho$:

$$\rho = F\rho_w = \frac{a}{\phi^m S^n}\rho_w \tag{4.6}$$

Dove per $F$ si intende il *fattore di formazione* che include le costanti empiriche $a$ e $m$, la porosità della roccia $\phi$ e il grado di saturazione in acqua $S$ $(V_w/V_v)$; $\rho_w$ si riferisce alla resistività del fluido che satura i pori (in questo dell'acqua). Come si può vedere, il grado di saturazione in acqua $S$ è inversamente proporzionale al parametro di resistività $\rho$. Ciò significa che all'aumentare di $S$ diminuisce la $\rho$. Lo stesso vale per la porosità $\phi$: in presenza ad es. di un'argilla la resistività risulterà molto più bassa rispetto ad una sabbia.
Anche il tipo di fluido potrebbe avere un impatto molto evidente. Prima si è parlato di acqua ma se fosse aria il suo contenuto nei pori mostrerebbe una più alta resistività.
Un altro fattore è l'anisotropia del materiale. Per es. si faccia riferimento al disegno sottostante (*Figura 4.2*) che mostra tre tipi di strutture che coinvolgono due materiali a resistività diversa (*ρ1 e ρ2*):

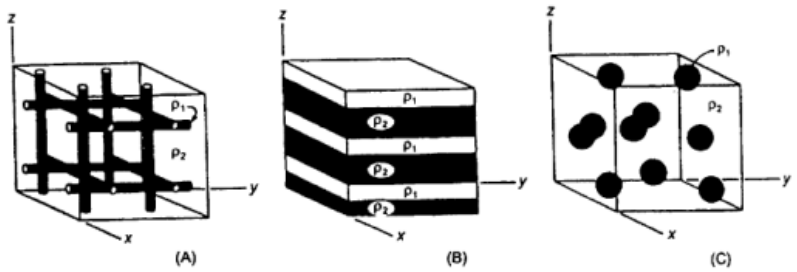



*Figura 4.2: Tre tipi di strutture che coinvolgono due materiali a resistività diversa (ρ1 e ρ2). Si può effettuare il calcolo del coefficiente di anisotropia dato dal rapporto tra la resistività massima e quella minima e si osserva così che la struttura laminare (B) avrà un alto coefficiente di anisotropia. (immagine tratta da Borriello A., 2016/2018)*

Ciò giustifica il fatto che in natura siano presenti mezzi non omogenei e anisotropi.
A tal proposito si introduce il concetto di *resistività apparente* $\rho_a$:

$$\rho_a = \frac{k\Delta V}{I} \tag{4.7}$$

Dove $k$ è un parametro chiamato *fattore geometrico* che dipende dalla scelta dell'*array* utilizzato (vedi paragrafo 4.1.2) e che assume la seguente formula generale:

$$k = 2\pi\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3}\right) - \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4}\right)\right]^{-1} \tag{4.8}$$

Come per la resistività $\rho$, la resistività apparente è espressa in [Ω·m] con la differenza di non essere una proprietà fisica del sottosuolo e di dipendere dal tipo di configurazione elettrodica.
Nel caso in cui il terreno indagato sia omogeneo, la resistività apparente coincide con quella reale, altrimenti è necessario procedere col processo d'inversione dei dati per ottenere la distribuzione di resistività reale (si veda paragrafo 4.1.3) (Borriello A., 2016/2017).

In riferimento all'equazione 4.4 precedentemente dimostrata nel caso di una corrente continua che attraversa un mezzo omogeneo, il campo elettrico è il gradiente del potenziale scalare:

$$E = -\nabla V \tag{4.9}$$

Che sostituendo nella 4.4:

$$J = -\sigma \nabla V \tag{4.10}$$

Che corrisponde alla legge di Ohm (eq. 4.1) in termini di densità di corrente $J$ e di potenziale $V$.

Se si considera il principio di *conservazione della carica elettrica*:

$$div\vec{J} = \nabla \cdot \vec{J} = 0 \tag{4.11}$$

Andando ad inserire la 4.8 nella 4.9, si ottiene l'equazione che governa il flusso di corrente in un mezzo a conduttività elettrica $\sigma$ variabile nello spazio (anisotropa ed eterogenea):

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0 \tag{4.12}$$

Che nel caso di un mezzo 3D può essere riscritta nella segue espressione:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma_x \frac{\partial V}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma_y \frac{\partial V}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma_z \frac{\partial V}{\partial z}\right) = 0$$

Assumendo la condizione di isotropia ed omogeneità risulterà che $\sigma = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, è possibile estrarre la $\sigma$ dalle derivate parziali:

$$\sigma\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right) = 0 \tag{4.13}$$

Che rappresenta l'equazione di base per il calcolo delle soluzioni analitiche dell'equazione di corrente continua. Siccome la soluzione $\sigma = 0$ è di non interesse, la 4.13 è proprio l'*equazione di Laplace*:

$$\nabla^2 V = 0 \tag{4.14}$$

In generale, tale espressione simboleggia quelle che vengono chiamate anche come *equazioni della diffusione*. Per cui è utile sapere della sua validità anche per descrivere la diffusione del calore o il flusso d'acqua in un mezzo poroso (Peruzzo L., 2014/2015).

Per poter proseguire con le successive dimostrazioni su cui si fondano i metodi geoelettrici, è necessario riscrivere l'eq. di Laplace in coordinate sferiche (Peruzzo L., 2014/2015):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial V}{\partial r} = 0 \tag{4.15}$$

Si ribadisce che esistono differenti e parecchie configurazioni di elettrodi utilizzabili sul campo.

Innanzitutto, si considera il caso di un singolo elettrodo posto sulla superficie, intesa come l'origine del sistema di riferimento di coordinate polari ($r$ = 0), che inietta corrente $I$ in un mezzo omogeneo, isotropo e caratterizzato da una resistività elettrica $\rho$.

Si dimostra che in questo caso il potenziale che soddisfa l'equazione 4.15 si può scrivere:

$$V = -\frac{A}{r} + B \tag{4.16}$$

Ove A e B sono costanti determinate dalle seguenti condizioni al contorno che tengono conto prima della distanza $r$ che tende ad infinito (eq. 4.17) e poi della simmetria sferica e della validità della legge di Ohm (eq. 4.18):

$$V(r \to \infty) = 0 \quad \Rightarrow \quad B = 0 \tag{4.17}$$

$$I = 4\pi r^2 J = 4\pi r^2 \sigma E = -4\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} = --4\pi r^2 \sigma \frac{A}{r^2} \tag{4.18}$$

Da cui:

$$A = -\frac{I}{4\pi\sigma} = -\frac{I\rho}{4\pi}$$

Che sostituita nella 4.14:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \tag{4.19}$$

Se l'elettrodo (puntiforme) è posto alla superficie di un semispazio omogeneo la corrente *I* si distribuisce solo su metà volume come mostrato qui sotto (*Figura 4.3*).

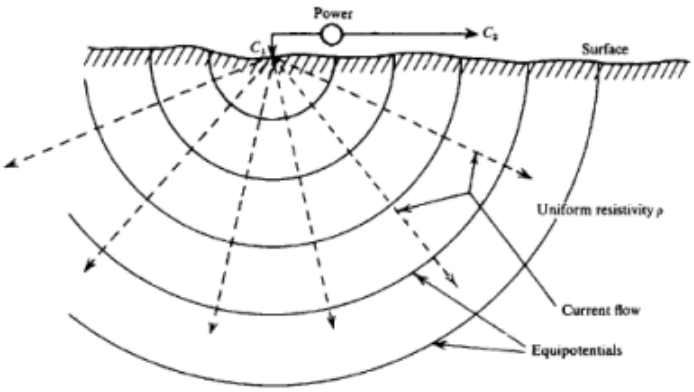



*Figura 4.3: Il flusso di corrente rappresentato dalle linee radiali perpendicolari alle superfici equipotenziali semisferiche (immagine tratta da Telford W.M. et al., 2010).*

Al fluire della corrente *I* secondo la superficie di una semisfera, il potenziale *V* decadrà radialmente con l'aumentare della distanza dall'elettrodo e perpendicolarmente al flusso di corrente.

In questo caso l'eq. 4.19 diventerà:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Che in termini di resistività $\rho$:

$$\rho = \frac{V \cdot (2\pi r)}{I}$$

Tuttavia, la combinazione di elettrodi più comunemente utilizzata nella ERT come nei sondaggi elettrici verticali prevede l'utilizzo di due elettrodi per l'iniezione della corrente *I* e due per la misura della differenza di potenziale *ΔV* (*Figura 4.4*).

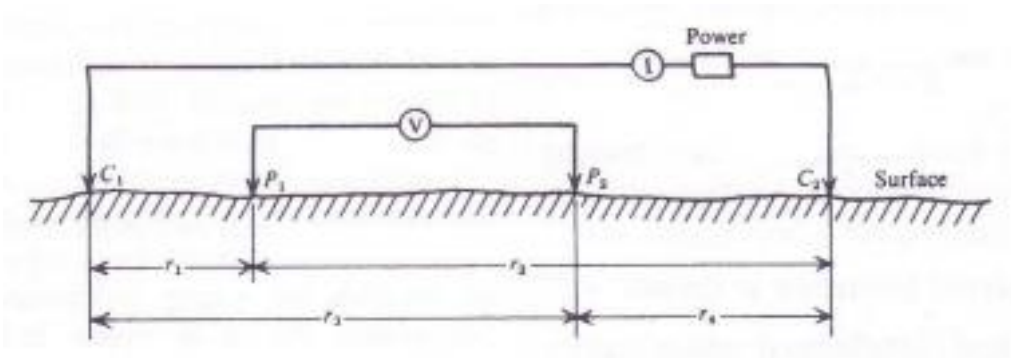



*Figura 4.4: Schema a 4 elettrodi con distinzione tra elettrodi di corrente (C1 e C2) e di potenziale (P1 e P2) (Immagine tratta da Telford W.M. et al., 2010).*

Il vantaggio di questo schema d'acquisizione risiede nel fatto che si possa utilizzare due elettrodi ($C_1$ e $C_2$) per generare un circuito elettrico con il suolo insieme ad una sorgente di forza elettromotrice, mentre i restanti due elettrodi ($P_1$ e $P_2$) hanno la funzione di misurare con un circuito separato la differenza di potenziale *ΔV* (Bertini F., 2017/2018). Questo permette di ottenere una *ΔV* tra gli elettrodi di potenziale non influenzata dalla *resistenza di contatto* che si genererebbe tra gli elettrodi e il terreno. Tale resistenza di contatto è da tener presente in quanto potrebbe causare un consumo d'energia ed ostacolare il passaggio della corrente nel terreno.

Nel caso si utilizzassero solamente due elettrodi di corrente anche per la misura di potenziale si otterrebbe un valore totale di resistenza senza riuscire a distinguere il contributo conferito dalla resistenza del terreno (Peruzzo L., 2014/2015).

Generalmente i due elettrodi di corrente (o energizzanti) $C_1$ e $C_2$ son spesso indicati con le lettere A e B mentre quelli di potenziale $P_1$ e $P_2$ con le lettere M e N.

Considerando che i primi siano collocati ad una distanza $r_1$ e $r_2$ (rivedi *Figura 4.4*) dall'elettrodo di potenziale M e che abbiano un'intensità di corrente rispettivamente $+I$ e $-I$, il medesimo potenziale in M sarà uguale alla somma dei potenziali dovuti ai due elettrodi di corrente A e B (Bertini F., 2017/2018):

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

Tenendo conto dello stesso procedimento e considerando il potenziale elettrico nel punto dove sarebbe localizzato l'elettrodo potenziometrico N, si ottiene che anche quest'ultimo risente di un certo potenziale $V$ derivato dal campo elettrico tra i due elettrodi energizzanti A e B. Se si chiamano le distanze tra A e B con N, rispettivamente $r'1$ e $r'2$ si otterrà analogamente all'equazione precedente (Bertini F., 2017/2018):

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

A questo punto, è possibile calcolare la differenza di potenziale $\Delta V$ tra i due elettrodi potenziometrici M e N:

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

Quanto si deduce è che la differenza di potenziale ottenuta agli elettrodi M ed N dipenda dalla geometria del quadripolo, ovvero dalle distanze che intercorrono tra i due elettrodi di corrente e i due di potenziale.

Esplicitando la resistività elettrica $\rho$, è possibile ricavare il parametro k, ossia la costante geometrica già incontrata in precedenza (Bertini F., 2017/2018):

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

Le equazioni fino adesso descritte son state considerate nel caso di un mezzo omogeneo ma, come già precedentemente accennato, una tale situazione non è realmente presente in natura e il mezzo tende ad essere disomogeneo oltre che eterogeneo.

Se si considera ad es. un dominio d'investigazione costituito da due strati separati da una discontinuità orizzontale e aventi valori di resistività differenti ad una certa profondità, ad es. $\rho_1 > \rho_2$, le linee del flusso di corrente tendono a modificare il loro andamento rispetto a quanto visto invece per il caso di corpo omogeneo (*Figura 4.5*).

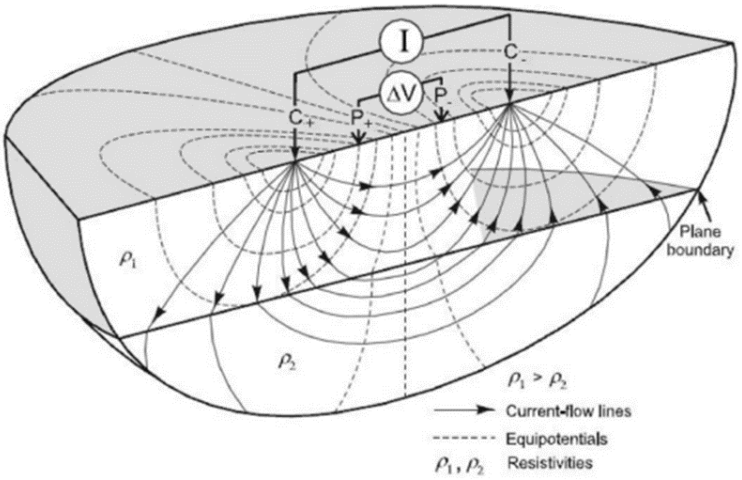



*Figura 4.5: Schema 3D di un sistema d'acquisizione a 4 elettrodi in un mezzo disomogeneo. $C_+$ e $C_-$ rappresentano gli elettrodi di corrente, $P_+$ e $P_-$ quelli di potenziale, $\rho_1$ è la resistività dello strato superiore, e $\rho_2$ quella dello strato inferiore, con $\rho_1 > \rho_2$. Sia le linee di corrente che di potenziale son rappresentate (Immagine presa da Busato L., 2016).*

Nel dettaglio, se consideriamo ad es. il caso opposto in *Figura 4.6* per cui la resistività del primo mezzo $\rho_1$ è inferiore a quella del secondo mezzo $\rho_2$ ($\rho_1 < \rho_2$), la corrente che attraversa il primo strato $J_1$ e che incide sulla discontinuità separante i due mezzi con angolo d'incidenza $\theta_1$ formato rispetto alla normale,

viene rifratta in una corrente $J_2$ secondo un angolo di rifrazione $\theta_2$ ottenuto a sua volta rispetto alla verticale (*Figura 4.6*).

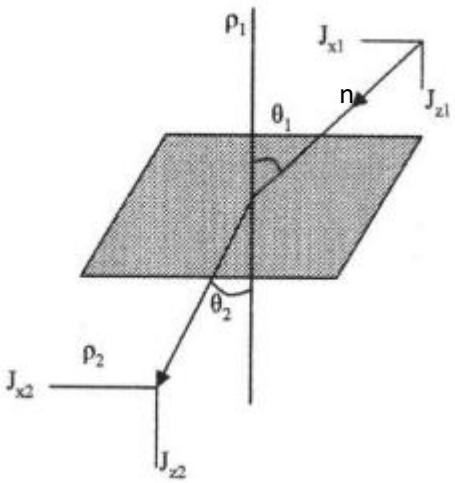



*Figura 4.6: Distorsione del flusso di corrente in corrispondenza di una discontinuità planare quando $\rho_1 < \rho_2$ (immagine tratta e modificata da Peruzzo L., 2014/2015)*

Dove $J_{x1}$ e $J_{z1}$ rappresentano rispettivamente le componenti orizzontali e verticali della corrente $J_1$, mentre $J_{x2}$ e $J_{z2}$ quelle della corrente $J_2$.

Sfruttando la legge di Ohm dell'eq. 4.8 in termini di resistività elettrica $\rho$ e la condizione di equilibrio sulla discontinuità, è possibile scrivere la seguente uguaglianza:

$$J_{x1}\rho_1 = J_{x2}\rho_2$$

Se si considera inoltre che non possano accumularsi cariche sulla superficie, le due componenti normali $J_{z1}$ e $J_{z2}$ devono risultare uguali.

$$J_{z1} = J_{z2}$$

A questo punto, inserendo quest'ultima condizione in quella precedente e dividendo tali due espressioni, si ottiene il seguente risultato:

$$\frac{J_{x1}}{J_{z1}}\rho_1 = \frac{J_{x2}}{J_{z2}}\rho_2 \rightarrow \frac{\sin J_1}{\cos J_1}\rho_1 = \frac{\sin J_2}{\cos J_2}\rho_2 \rightarrow \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

In questa maniera si è ottenuto un legame tra le tangenti degli angoli incidenti e il rapporto delle resistività. Questa uguaglianza prende il nome di *legge delle tangenti* la quale descrive l'atteggiamento del flusso di corrente in presenza di variazioni di resistività. In particolare, se si considera il maggior angolo d'incidenza $\theta_l$ rispetto alla normale $n$, le linee di corrente tenderanno a disporsi e a permanere nelle zone di minor resistività.

Tale principio può essere applicato anche al caso in cui si abbia un maggior numero di strati o altre eterogeneità, mostrando cambiamenti di resistività sia orizzontalmente che verticalmente.

Si ricorda che in presenza di un mezzo disomogeneo le alterazioni di resistività di cui si sta parlando si riferiscono quelle di una *resistività apparente* $\rho_a$ (eq 4.7). Solamente in situazioni di un dominio d'investigazione omogeneo la resistività apparente sarà uguale a quella reale.

### *4.1.2 Acquisizione dei dati*

Per l'acquisizione dei dati in campagna, la Tomografia di Resistività Elettrica prevede l'utilizzo di sistemi a multi-elettrodo (ad es. 48, 72 o 96 elettrodi) posizionati lungo la superficie del terreno con spaziature regolari e connessi ad un georesistivimetro tramite dei cavi multi-canale che son completati da pinze per il collegamento agli elettrodi. Mediante un multiplexer lo strumento gestisce in automatico le singole misure previste dalla sequenza impostata, stabilendo per ciascuna misura quali elettrodi utilizzare per l'iniezione della corrente $I$ e quali per la misurazione della differenza di potenziale $\Delta V$. La corrente $I$ è immessa tramite una batteria e la sua intensità è misurata con un amperometro. Mentre la variazione di potenziale $\Delta V$ è registrata attraverso un voltometro. I dati acquisiti alla fine del processo potranno essere scaricati e visualizzati in un computer portatile (laptop) (*Figura 4.7* e *Figura 4.8*) (Borriello A., 2016/2017).

*Figura 4.7: Esempio di strumentazione che può essere usata per l'acquisizione (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017).*

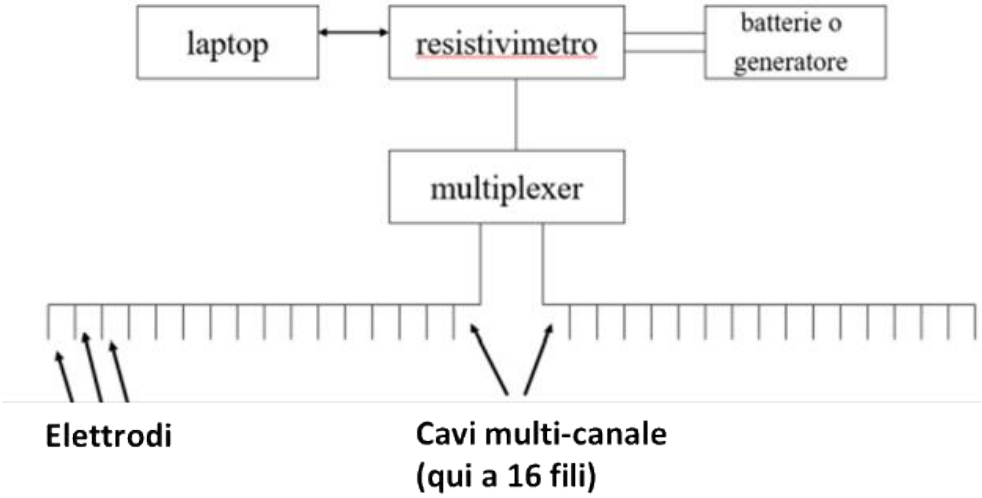



*Figura 4.8: Schema degli elementi principali per l'acquisizione ERT (Immagine modificata e tratta da Borriello A., 2016/2017).*

Le sequenze di misura variano in base al tipo di schema di acquisizione scelto, o anche chiamato col termine *array.*

Un array elettrodico consiste in una configurazione geometrica che descrive le posizioni degli elettrodi di corrente e di potenziale in un quadripolo (Binley, A.M., Kemna, A., 2005).

Esistono diverse tipologie di array con cui è possibile svolgere misure elettriche, ognuna delle quali può avere dei vantaggi come degli svantaggi. In base a questi verrà scelto l'array più adatto per quella specifica applicazione e per quell'intensità di segnale che ci si aspetta (Busato L., 2016). Inoltre, la scelta può dipendere anche da altri fattori come: la profondità d'investigazione, l'obiettivo dello studio, la copertura orizzontale, l'accessibilità al sito e le limitazioni dello strumento (Borriello A., 2016/2017).

Un altro indicatore utile è la *sensitività*, la quale fornisce una misura di come la resistività apparente $\rho_a$ sia appunto sensibile alle variazioni di resistività del sottosuolo (Busato L., 2016). La tecnica utilizzata per questa operazione, è il calcolo eseguito tramite la derivata di Frechét che può essere scritta nella seguente espressione:

$$S = \frac{\partial \log(\rho_a)}{\partial \log(\rho)}$$

A seconda del tipo di configurazione elettrodica si ottengono diverse mappe di sensitività. Generalmente, la sensitività risulta alta vicino agli elettrodi per la maggior densità di corrente e si riduce con la profondità. Alti valori di sensitività rappresentano misure vicine a quelle reali.

Gli array più comunemente utilizzati nella pratica son riportati qui sotto (*Figura 4.8*):

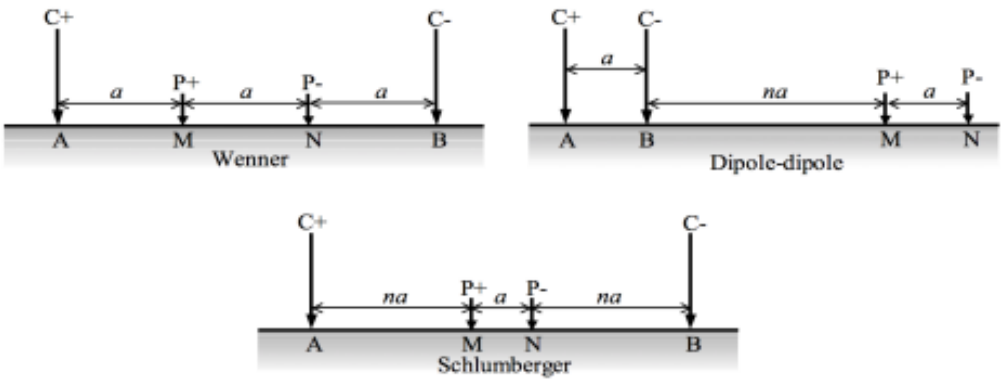



*Figura 4.9: Sketch dei tre array di elettrodi più comunemente usati: Wenner, Dipolo-dipolo Schlumberger (Immagine tratta da Binley e Kemna, 2005).*

La configurazione Wenner consiste in un quadripolo posto sulla stessa linea dove gli elettrodi di potenziale MN sono interni agli elettrodi di corrente AB e la distanza tra gli elettrodi è mantenuta fissa. Se $a$ viene definita come la spaziatura tra gli elettrodi, si otterrà una costante geometrica che vale $k=2\pi a$. Tale configurazione è caratterizzata da piccole profondità d'indagine, una buona risoluzione verticale, ma una scarsa risoluzione orizzontale. Inoltre, possiede una sensitività media sia lateralmente che verticalmente.

Anche per l'array Schlumberger si hanno quattro elettrodi allineati tra di loro con gli elettrodi di potenziale all'interno di quelli corrente. Questa volta però cambia la distanza tra i due elettrodi potenziali MN che diventa molto più piccola rispetto alla distanza degli elettrodi di corrente AB. Sapendo che $a$ corrisponde alla distanza tra MN e che le distanze tra AM e BN son uguali tra loro e multiple di $a$ per un valore $n$, si ottiene una costante geometrica che è pari a $k=2\pi n(n+1)a$. Da riconoscere che tale tipo di configurazione è la più sensibile alle variazioni laterali, per cui è utile per una variabilità verticale nel campo dell'indagine.

Lo stendimento dipolo-dipolo possiede invece quattro elettrodi allineati con la coppia di elettrodi AB che sta ad un estremo dell'array e la coppia di elettrodi di potenziale MN che è posizionata in maniera simmetrica in direzione opposta. In questo caso il valore attribuito alla costante geometrica è di $k=2\pi an(n+1)(n+2)$. Il

grande vantaggio di questa configurazione è la capacità di raggiungere le più elevate profondità d'indagine ed è molto adatto per profili laterali data la sua bassa risoluzione verticale (Bertini F., 2017/2018).

In sintesi, gli array Wenner e Schlumberger hanno segnali relativamente più forti rispetto a quello del dipolo-dipolo dato che gli elettrodi di potenziale son localizzati all'interno di quelli di corrente. In più, se la configurazione dipolo-dipolo è costituita da un'alta spaziatura tra gli elettrodi, la variazione di potenziale potrebbe risultare piuttosto bassa (Busato L., 2016).

In aggiunta a questi tipi di array si riporta anche quello che è stato utilizzato per il presente lavoro, ovvero l'array a gradiente multiplo.
Tale tipo di configurazione di elettrodi si adatta molto bene all'acquisizione dei dati multi-canale. Questa permette di effettuare delle misure simultanee attraverso una serie di coppie di elettrodi di potenziali che vengono spostati progressivamente in posizioni differenti con una stessa distanza *a* all'interno di quelli di corrente che vengono invece mantenuti fissi alle due estremità dello stendimento (*Figura 4.9*) (Dahlin T. & Zhou B., 2006).

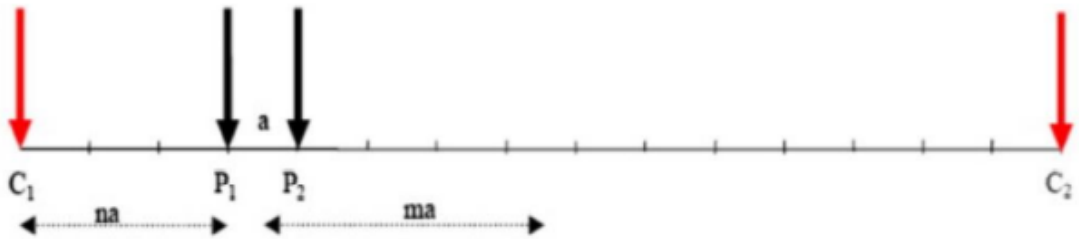



*Figura 4.10: Configurazione degli elettrodi per array a gradienti multipli. C1 e C2 sono gli elettrodi di corrente. P1 e P2 sono il potenziale elettrodi posti ad una distanza a (immagine tratta da Wei H., 2018).*

Grazie alla possibilità di eseguire più misurazioni contemporaneamente in ogni punto di iniezione di corrente è possibile risparmiare tempo durante il lavoro sul campo. Inoltre, rispetto agli array precedenti Wenner e dipolo-dipolo, i risultati derivati dagli array a gradiente multiplo generalmente mostrano un livello di risoluzione relativamente più alto (Wei H., 2018).

Conoscendo le due grandezze elettriche la variazione di potenziale $\Delta V$ e la corrente $I$ e il coefficiente geometrico $k$ corrispondente alla tipologia di array usato (vedi paragrafo precedente) è possibile calcolare i valori di *resistività apparente* $\rho_a$ che caratterizzano il sottosuolo investigato secondo l'equazione 4.7. Tali valori vengono collocati successivamente a pseudo-profondità (o livelli) a seconda della spaziatura degli elettrodi del corrispettivo array, risultando in quella che prende il nome di *pseudosezione*, ossia una rappresentazione grafica in cui la distribuzione dei valori di $\rho_a$ tende ad approssimare quella dei valori di resistività reale del sottosuolo (Perrone A. et al., 2014).
La sua elaborazione può essere rappresentata nella *Figura 4.10* sottostante:

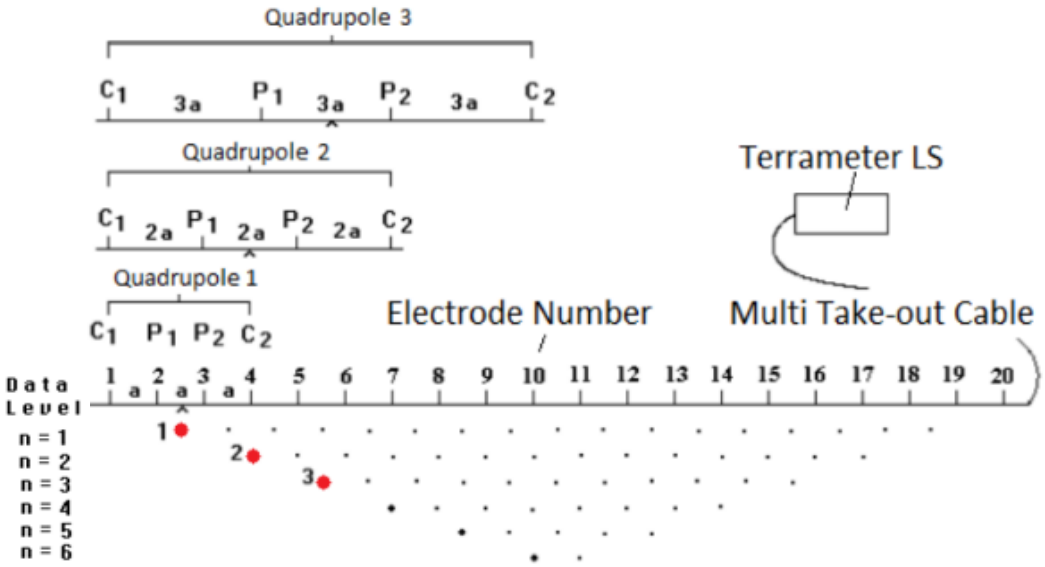



*Figura 4.11: Sezione di indagine 2-D che mostra tre combinazioni di quadripolo di elettrodi che seguono l'array Wenner e che son connessi al georestivimetro (Terrameter LS) tramite un cavo a più uscite. Per quadripoli con maggiori spaziature interne corrispondono dati di resistività apparente (puntini rossi) a maggiori profondità (immagine tratta e modificata da Lumetzberger M., 2014).*

La sequenza di acquisizione per una data apertura di elettrodi del quadripolo utilizzato, avviene secondo quei valori misurati verticalmente nel punto medio

situato in corrispondenza del livello di profondità (pseudo-profondità) relativo alla configurazione degli elettrodi utilizzata. In particolare, si osserva che maggiore è la distanza tra gli elettrodi, maggiore è la profondità a cui viene plottato il punto della misura di resistività apparente e, quindi, il volume della porzione di terreno investigato. Ciò significa che tra il primo e l'ultimo elettrodo si otterrà la profondità massima raggiungibile dall'indagine.
Generalmente il valore di questa profondità massima è di circa un quarto o un quinto della lunghezza totale dello stendimento. Inoltre, è da tener presente che all'aumentare della profondità d'indagine, la risoluzione dell'immagine diventa sempre più scarsa mentre appare migliore in prossimità della superficie, dove la densità d'informazioni risulta maggiore (Bertini F., 2017/2018).

Tuttavia, è da ribadire che la pseudo-sezione di resistività elettrica ottenuta dalle misurazioni ERT si tratti solo di una prima rappresentazione grafica dei dati grezzi provenienti dal georesistivimetro, convertiti in valori di resistività apparente e collocati in accordo al tipo di dipolo considerato. Si può intendere anche come un'immagine su cui è possibile eseguire valutazioni riguardo alla qualità dei dati, in maniera tale da controllare se son presenti dei dati anomali, che dovrebbero essere eliminati col calcolo del cosiddetto errore di reciprocità (vedi paragrafo seguente).
Pertanto, per l'interpretazione dei dati ERT è necessario eseguire un processo d'inversione del dato.

### *4.1.3 Processing*

Per il trattamento e l'interpretazione dei dati "grezzi" ottenuti sul campo, risulta di particolare importanza la soluzione di un problema inverso che cercherà di trasformare la *pseudosezione* in una sezione basata su valori reali di resistività. Esistono diversi software in grado di compiere una tale soluzione e ognuno di loro possiede una procedura o dei codici specifici per ottenerla come ad es. il software *ResIpy* usato per questa tesi (vedi capitolo successivo).

Prima di passare all'inversione è necessario compiere una stima dell'errore dei dati che lo strumento ha misurato durante le operazioni sul campo.
Si tratta di un passaggio fondamentale in quanto potrebbe evitare di avere delle possibili ripetitività o anomalie su misure di dati nella pseudosezione oltre che delle incertezze che potrebbero venir fuori nell'interpretazione delle immagini ERT derivate dal processo d'inversione (Oldenborger, G. A., 2005).
Si tratta di errori che possono derivare da fenomeni fisici come un debole contatto elettrodo-suolo, basso input di voltaggio, elevati fattori geometrici che potrebbero portare a bassi livelli di voltaggio agli elettrodi di potenziale ed altri effetti esterni casuali.
In particolare, esistono sia errori casuali che sistematici. I primi possono essere ridotti attraverso le misurazioni della ripetitività usando parecchi cicli d'iniezione (Busato L., 2016) di corrente mentre i secondi (ad es. una posizione errata degli elettrodi dovuta ad una inaccurata costruzione della stringa dei medesimi elettrodi (Oldenborger, G. A., 2005)) grazie all'applicazione del cosiddetto *principio di reciprocità* (non considerato per tale lavoro) che consiste nel scambiare gli elettrodi di potenziale con quelli di corrente col risultato di ottenere una stessa informazione per le misure relative ad una configurazione diretta $R_{di}$ e ad una sua reciproca $R_{ri}$. Questo però non accade in quanto tali misure son appunto soggette ad un errore sistematico, o di reciprocità che è possibile calcolarlo una volta stabilita una soglia d'errore che corrisponde solitamente al 5 %. Le misure che stanno al di sotto della percentuale di tolleranza vengono mantenute mentre quelle che la superano vengono scartate (Borriello A., 2016/2017; Bertini F., 2017/2018).

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

A questo punto è possibile passare all'*inversione*. Questa è definita come una procedura numerica che permette di produrre un modello finale tenente conto di una distribuzione di resistività che varia nello spazio all'interno del sottosuolo, che sia in grado di fornire a sua volta un fit "accettabile" dei dati misurati e che soddisfi le misurazioni compiute sul contorno del dominio investigato (Daily W. et al., 2005). Tale procedura richiede tre principali elementi: un modello diretto che, data una nota distribuzione 2D o 3D di resistività, stima le misure (o dati "grezzi") provenienti dallo strumento; una funzione obiettivo che indichi i principi su cui si basa il modello; e un algoritmo di ricerca che determina il modo in cui si trova il modello per definire al meglio la distribuzione ottimale della grandezza fisica (resistività elettrica) (Daily W. et al., 2005; Bertini F., 2017/2018).

Per arrivare al modello finale ottimale è possibile procedere in due modi: tramite la *modellazione diretta* e *inversa*.
Anzitutto, bisogna sapere che entrambi si basano sulla seguente espressione:

$$\boldsymbol{d} = g(\boldsymbol{m})$$

Dove per $\boldsymbol{d}$ ci si riferisce ai dati reali (misure effettuate) mentre per $\boldsymbol{m}$ al modello (proprietà elettriche).
La maniera con cui opera il modello diretto può essere schematizzata come mostra la *Figura 4.11* sottostante:

*Figura 4.12: Sketch del funzionamento del modello diretto (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017).*

Dallo schema soprastante, il modello diretto è un modello predittivo, in quanto consente di "predire" i dati calcolati dallo strumento (le resistenze *R*) che

sarebbero misurati teoricamente dato un certo modello (la distribuzione di resistività $\rho$) nel dominio considerato (Borriello A., 2016/2017;). Un tale modello deve esistere ed essere risolto qualora si voglia costruire il successivo modello inverso (K. K. Roy., 2007).

Data una certa distribuzione di conduttività elettrica $\sigma$ di un sistema di riferimento cartesiano x, y e z all'interno di un mezzo isotropo (σ (x,y,z)), è possibile determinare i potenziali elettrici risolvendo la seguente equazione differenziale con le opportune condizioni al contorno (Daily W. et al., 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma\frac{\partial V}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma\frac{\partial V}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma\frac{\partial V}{\partial z}\right)=-I\,\delta(x)\delta(y)\delta(z) \qquad (4.20)$$

Se il problema si considera bidimensionale (σ(x,z)), allora si cerca la soluzione di:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma\frac{\partial v}{\partial z}\right)-\lambda^2\sigma v=-I\delta(x)\delta(z) \qquad (4.21)$$

ove λ è la variabile della trasformata di Fourier in direzione trasversale *y*, e *v* è la corrispondente trasformata di Fourier del potenziale.

Per risolvere tali equazioni differenziali 4.20 e 4.21, son necessarie delle soluzioni numeriche in quanto quelle analitiche non son in grado di farlo. Tra i metodi più utilizzati troviamo quello delle *differenze finite* e degli *elementi finiti*. In entrambi i casi il dominio investigato è discretizzato in una griglia costituita da una serie di punti distinti tra loro (nodi) corrispondenti alle posizioni degli elettrodi in cui è determinata una soluzione algebrica approssimata delle equazioni differenziali (Daily W. et al., 2005).

L'approccio delle differenze finite è il più antico ed è ben conosciuto. In ognuno di questi nodi, ciascuna derivata dell'equazione differenziale che definisce la fenomenologia fisica ($\Delta V$ in questo caso) è approssimata mediante un'espressione algebrica che fa riferimento ad i nodi adiacenti e per ogni cella è presente il parametro fisico ($\rho$ o $\sigma$) (Borriello A., 2016/2017).

Il metodo degli elementi finiti è, invece, un approccio più recente, oggi ben consolidato oltre ad essere quello maggiormente preferito per il fatto che possa apparire più flessibile per la discretizzazione e per una collocazione atipica degli elettrodi (Daily W. et al., 2005). La regione da studiare viene suddivisa in un numero di elementi finiti distribuiti non uniformemente nello spazio, che vengono correlati con i nodi a loro associati. L'idea è di sostituire delle funzioni legate ad uno spazio di parametri fisici infiniti ($\rho$ o $\sigma$), cioè che variano continuamente, con un altro spazio costituito da funzioni più semplici dipendenti da un numero finito di parametri. Ciò porta ad una soluzione finita ed omogenea per il dominio discretizzato (Borriello A., 2016/2017).

Per quanto riguarda al processo inverso, questo è l'opposto di quello diretto (*Figura 4.13*)

*Figura 4.13: Sketch del funzionamento del modello inverso (immagine tratta da Borriello A., 2016/2017).*

Il modello inverso consiste nel calcolo della distribuzione della resistività reale (modello) a partire da un dataset ottenuto con le misure effettivamente acquisite (le resistenze *R*) (Busato L., 2016).
Tuttavia, il modello inverso si basa sugli stessi principi di quello diretto da quando lo scopo è di determinare un modello *m* che riproduca i dati reali *d* entro una soglia d'errore precedentemente stimata, dove

$$m = \{m_j\} = \{\ln \sigma_j\} \qquad (j = 1, \ldots M) \tag{4.22}$$

corrisponde ad un vettore che raffigura la distribuzione delle proprietà elettriche (solitamente la conduttività $\sigma$ o la resistività $\rho$) che dev'essere determinata, discretizzata in un set di elementi o parametri $M$, e

$$d = \{d_i\} = \{-\ln R_i\} \qquad (i = 1, \ldots N) \tag{4.23}$$

è proprio il set di resistenze misurate, con $N$ il numero di misurazioni.
In entrambi i casi si ha a che fare con i logaritmi che son tali da includere un ampio intervallo di valori che descrivono entrambi i parametri. Da notare in particolare che il segno meno nell'equazione 4.23, è dovuto alle dimensioni fisiche usate nell'equazione 4.22.
Il dataset reale $d$ è spesso incompleto da non permettere di definire univocamente tutti i valori di resistività coinvolti nel processo d'inversione. Inoltre, l'insieme dei dati interessato nell'inversione potrebbe essere soggetto ad un certo errore da rendere la soluzione incerta oltre che irrealistica (Peruzzo L., 2014/2015).
A tal proposito è obbligatorio che esista un criterio appropriato per ottenere una soluzione pratica e fisica significativa col minor errore possibile (Busato L., 2016).
Tale criterio è comunemente raggiunto tramite l'applicazione del *principio d'inversione alla Occam*, il quale consiste di raggiungere un risultato sensato tramite l'ottimizzazione della *funzione obiettivo* $\Phi(m)$ (eq. 4.24), ossia la miglior minimizzazione possibile dello scarto quadratico medio tra i dati misurati $d$ e il modello $m$.

$$\Phi(m) = \Phi_d(m) + \alpha\Phi_m(m) \tag{4.24}$$

Dove $\Phi_d(m)$ rappresenta la somma dei quadrati degli scarti, o *misfit* dei dati, ed è definita come:

$$\Phi_d(m) = ||W_d[(d) - f(m)]||^2 \tag{4.25}$$

In cui $\|\cdot\|$ rappresenta la norma Euclidea, $f$ è l'operatore del modello diretto, $W_d$ è una matrice di peso (*diagonal data weighting matrix*) che deriva dalle informazioni sugli errori dei dati.
Mentre $\Phi_m(m)$ corrisponde ad una funzione obiettivo di regolarizzazione o stabilizzazione:

$$\Phi_m(m) = ||W_m(m - m_{ref})|| \tag{4.26}$$

Questa funzione è usata per vincolare un modello di riferimento $m_{ref}$ basato su una certa matrice di peso $W_m$ e avente come valore una distribuzione di resistività elettrica assegnata omogenea (Marin M., 2016/2018).
L'equazione 4.24 è composta dunque da due parti ben distinte. Nella prima si ha il misfit tra il modello diretto ed inverso, mentre nella seconda i valori noti dei parametri $m$ tendono ad essere regolati da una funzione di regolarizzazione (eq. 4.26) per giungere ad una soluzione stabile (Marin M., 2016/2017).
Se si utilizzasse però unicamente il misfit dei dati (eq. 4.25) potrebbe succedere che il sistema si trovi contemporaneamente sovradeterminato (troppi dati a disposizione) e sottodeterminato (troppe incognite e troppe poche equazioni) (Borriello A., 2016/2017). Di conseguenza il risultato potrebbe mostrare un errore nei dati tale da rendere la soluzione instabile.
Proprio per questo motivo si cerca di vincolare il processo d'inversione aggiungendo la funzione dell'equazione 4.26, anche chiamata *funzione di lisciatura*. Secondo il ragionamento alla Occam accennato in precedenza, questa consente proprio di ottenere dei risultati più "lisci", ovvero il più omogenei possibili, dove non ci sia quindi la distinzione di valori assoluti né troppo grandi nè troppo piccoli da indurre un possibile errore dei dati (Marin M., 2016/2017).
In particolare, la funzione di lisciatura assieme al cosiddetto *parametro di regolarizzazione* $\alpha$ (vedi eq. 4.24), cerca di regolare gli scambi tra il misfit dei dati (eq 4.23) e la funzione obiettivo del modello (eq 4.22) durante il processo d'inversione.
Più precisamente, la procedura di minimizzazione dell'equazione 4.24 viene

eseguita adottando l'approccio di Gauss-Newton che porta a svolgere un processo iterativo secondo la seguente operazione:

$$(J^T W_d^T W_d J + \alpha R) = \Delta m = J^T W_d^T (d - F(m_k)) - \alpha R m_k$$

Dove $J$ è il Jacobiano, $J_{i,j} = \left\{\frac{\partial d_i}{\partial m_j}\right\}$, $m_k$ è il set di parametri $m$ all'iterazione $k$, e $\Delta$m è il set di parametri aggiornato all'iterazione $k$, così da ottenere (Busato L., 2016):

$$m_{k+1} = m_k + \Delta m$$

Con l'avvio dei calcoli per ogni step $k$, il valore di $\alpha$ viene cambiato continuamente fino a che non viene raggiunta la convergenza. Nel dettaglio, ad ogni passaggio viene calcolato un valore di α e dell'RMS (*Root Mean Square*), dove quest'ultimo rappresenta la somma dei quadrati degli scarti tra e costituisce proprio lo scopo principale per considerare conclusa la serie si calcoli.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum\left(\frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i}\right)^2}$$

Quando l'RMS, o misfit, arriva ad un valore pari ad 1, la soluzione desiderata è raggiunta.

Tuttavia, è da non dimenticare che degli errori nei dati potrebbero condizionare il risultato finale che deriva dal processo d'inversione. Bisogna conoscere, quindi, quali siano tali errori e questo è possibile grazie ad es. l'approccio dell'analisi dei reciproci precedentemente presentata.

## *4.2 GeoRadar*

Come la Tomografia di Resistività Elettrica, anche il *Ground Penetrating Radar (GPR)*, meglio noto come GeoRadar, è un metodo geofisico attivo non invasivo. La chiara differenza è che invece di iniettare corrente elettrica nel sottosuolo, il GPR immette delle onde elettromagnetiche (EM) in funzione del tempo a delle determinate frequenze (solitamente tra i 10 MHz e i 2 GHz) in maniera tale da registrare le variazioni delle proprietà elettriche dei diversi materiali presenti nel medesimo sottosuolo. (Busato L., 2010/2011).

Il metodo GPR ha incominciato a svilupparsi negli anni ’60 quando venne utilizzato nel campo della glaciologia per la misura dello spessore di alcune calotte polari. Questo perché si tratta di un metodo la cui penetrazione delle onde elettromagnetiche EM è molto efficace con corpi resistivi come il ghiaccio. Tuttavia, da quando c’è stato un rapido sviluppo in termini di hardware e di tecniche di misura oltre che di analisi, il GPR è stato ampiamente utilizzato per molte applicazioni. A seconda della configurazione d’acquisizione, della forma delle antenne e della frequenza utilizzata, il metodo può risultare di rapido impiego e conveniente a molte necessità (Peruzzo L., 2014/2015). Ad esempio, in riferimento alla frequenza d’antenna, valori inferiori ai 500 MHz lavorano solitamente bene per indagini geologiche e/o archeologiche dato che è più richiesto un’importante capacità di penetrazione anche se la risoluzione che si ottiene è solitamente bassa. Al contrario, cifre tra i 900 MHz e 1 GHz vengono tipicamente utilizzate per usi ingegneristici (controllo pavimentazione della strada, cementificazione, ecc..) dove sarà invece maggiore la risoluzione e minore la penetrazione.

Comunque, altri campi in cui il GPR ha avuto successo son ad esempio la scienza forense, l’esplorazione mineraria e il mappaggio di suoli contaminati (come per tale tesi).

### *4.2.1 Principi fondamentali*

Le fondamenta del metodo GPR giacciono nella teoria elettromagnetica (EM). Essa tratta delle equazioni di Maxwell che descrivono matematicamente la fisica di campi EM, e delle relazioni costitutive che quantificano le proprietà elettriche che magnetiche dei materiali. La loro combinazione consente di ottenere i principi fondamentali per descrivere quantitativamente i segnali GPR.
In termini matematici, i campi EM e le relazioni son espresse come segue:

$$\overline{\nabla} \times \overline{E} = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t}$$

$$\overline{\nabla} \times \overline{H} = \overline{J} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}$$

$$\overline{\nabla} \cdot \overline{D} = q$$

$$\overline{\nabla} \cdot \overline{B} = 0$$

Dove $\overline{E}$ è il vettore dell'intensità del campo elettrico (V/m); $q$ è la carica elettrica densità (C/m$^3$); $B$ è il vettore densità di flusso magnetico (T); $J$ è la corrente elettrica vettore densità (A/m$^2$) ; $D$ è il vettore spostamento elettrico (C/m$^2$); $t$ è il tempo (s); e $H$ è l'intensità del campo magnetico (A/m).

Le relazioni costitutive costituiscono, invece, i mezzi per descrivere la risposta di un materiale quando sottoposto all'azione dei campi EM.

$$\overline{J} = \tilde{\sigma}\overline{E}$$

$$\overline{D} = \tilde{\varepsilon}\overline{E}$$

$$\overline{B} = \tilde{\mu}\overline{H}$$

Dove è possibile inquadrare le proprietà elettriche e magnetiche. Nelle prime due si ha la conduttività elettrica $\sigma$ [Siemens/m] e la costante dielettrica $\varepsilon$ mentre nell' ultima la permeabilità magnetica $\mu$ [Henry/m].

Combinando le equazioni di Maxwell con le relazioni costitutive, è possibile scrivere due equazioni d'onda dissipative, che descrivono come si propagano i campi elettrico e magnetico attraverso un mezzo.

$$\nabla^2\bar{E} - j\mu\omega\sigma\bar{E} = -\mu\varepsilon\omega^2\bar{E} \tag{4.27}$$

$$\nabla^2\bar{H} - j\mu\omega\sigma\bar{H} = -\mu\varepsilon\omega^2\bar{H} \tag{4.28}$$

Dove $j$ è l'unità immaginaria. Ciò che si deduce è che la propagazione delle onde EM dipende dalle proprietà intrinseche del materiale ($\mu$, $\varepsilon$ e $\sigma$) e dalla frequenza del segnale ($\omega$) dove quest'ultima è data da:

$$\omega = 2\pi f$$

In cui $f$ corrisponde alla frequenza [Hz].
Inoltre, le equazioni 4.27 e 4.28 possiedono due termini fondamentali: quello di dissipazione $\mu\varepsilon\sigma$, a sinistra, e quello di propagazione $\mu\varepsilon\omega$, a destra.
Il rapporto dei due corrisponde al cosiddetto *fattore di perdita* (P):

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

Nel caso in cui P << 1, dovuto ad una bassa conduttività e/o ad una alta frequenza dell'onda EM, il fattore di perdita indicherà la prevalenza del campo della propagazione d'onda, consentendo di investigare col GeoRadar a profondità maggiori. Viceversa se P >> 1 avremo un'alta conduttività e/o bassa frequenza col risultato della dominanza del campo diffusivo e la propagazione dell'onda sarà fortemente attenuata, favorendo invece l'applicazione dell'altra grande categoria dei metodi elettromagnetici, ossia i metodi ad induzione.

Le due relazioni sopra riportate (eq. 4.27 e 4.28) possono essere scritte anche in relazione alla velocità di propagazione delle onde EM:

$$\nabla^2 E = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

Dove $v$ è appunto la velocità dell'onda EM:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad (4.29)$$

Da cui si può osservare che dipende principalmente dal parametro $\varepsilon$, mentre la variabilità di $\mu$ risulta spesso trascurabile.
La costante dielettrica del mezzo attraversato $\varepsilon$ è data da:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Dove $\varepsilon_r$ corrisponde alla *costante dielettrica* o *permittività elettrica relativa* del materiale attraversato e $\varepsilon_0$ a quella del vuoto. La permittività elettrica di un materiale descrive la capacità di un materiale di immagazzinare e rilasciare energia elettromagnetica EM sotto forma di carica elettrica (Cassidy N.J. (a), 2009).

Dall'equazione 4.29 si nota che la velocità di propagazione delle onde è inversamente proporzionale alla radice quadrata della costante dielettrica $\varepsilon$, per cui a maggiori valori $\varepsilon$ corrisponderanno minori velocità $v$.
Come per la resistività $\rho$ nei metodi geoelettrici, anche qui il valore che assume la *costante dielettrica relativa* $\varepsilon_r$, dipende dalla caratteristiche del mezzo

attraversato. Ad esempio, nei mezzi geologici essa è solitamente compresa tra valori che vanno da 3 a 30; mentre in aria è pari ad 1 e in acqua a 81.

Quest'ultimo fa capire come il contenuto idrico possa costituire un parametro in grado di modificare considerevolmente la velocità di propagazione delle onde EM (Busato L., 2010/2011).

Si ricorda che la capacità di penetrazione dell'onda EM, e quindi la sua velocità $v$, dipende anche dalla conduttività elettrica $\sigma$ [*S/m*] oltre che dalla frequenza $f$ [Hz]. Come accennato all'inizio, il GPR appartiene al campo della propagazione d'onda (P << 1) in cui si ha a che fare generalmente con basse conduttività e alte frequenze. Ciò significa che in presenza di corpi resistivi (ad es. il ghiaccio) e di basse frequenze ci si aspetta di ottenere una maggior penetrazione dell'onda EM. In un tal contesto, la velocità di propagazione $v$ risulterà bassa secondo quello che è il suo legame con la frequenza $f$ e la lunghezza d'onda $\lambda$:

$$v = f\lambda \tag{4.30}$$

Altre due importanti proprietà delle onde elettromagnetiche EM son l'impedenza elettromagnetica $Z$ e l'attenuazione $\alpha$.
La prima è definita secondo la seguente radice quadrata:

$$Z = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu}{j \cdot \sigma + \varepsilon \cdot \omega}} \tag{4.31}$$

Nel caso in cui $\sigma$ abbia un valore basso e $\mu$ sia praticamente trascurabile e, quindi, anche la *frequenza angolare* $\omega$, è possibile approssimare l'equazione 4.31 con la seguente espressione:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

Una variazione di tale grandezza fisica individua i diversi orizzonti riflettenti che permettono la riflessione del segnale radar.
Nello specifico, l'impedenza $Z$ si riferisce al rapporto tra le componenti trasversali

dei campi elettrico TE e magnetico TM, ossia le componenti perpendicolari rispetto alla direzione di propagazione (*Figura 4.13*). Queste dipendono dalla direzione del percorso compiuto dall'onda EM che cambierà in accordo con quanto dice la legge di Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

Come nel caso della geoelettrica, considerati due mezzi con caratteristiche elettriche ($\sigma$ e $\varepsilon$) e magnetiche ($\mu$) diverse e separati da un'interfaccia ad es. planare, nel momento in cui l'onda incidente EM del primo mezzo con velocità $v_1$ ed *angolo d'incidenza* $\theta_1$ formato con la normale *n* incontra l'interfaccia, si produce nel secondo mezzo un'onda rifratta EM avente invece una velocità $v_2$ e un *angolo di rifrazione* $\theta_2$. In particolare, quando $v_1 > v_2$, il secondo mezzo si ritrova ad avere una velocità $v_2$ inferiore rispetto alla $v_1$ del primo mezzo, si formerà un angolo critico $\theta_c$ per il quale l'energia non è in grado di propagare dal primo al secondo mezzo.

Inoltre, all'interfaccia tra i due mezzi, si conosce la relazione che esiste tra il coefficiente dell'intensità del campo incidente *I*, riflesso *R* e trasmesso *T*:

$$I + R \cdot I = T \cdot I \tag{4.32}$$

Questi sono determinati richiedendo che la legge di Snell venga soddisfatta, che i campi magnetici ed elettrici nel piano dell'interfaccia siano continui e che la corrente elettrica e la densità del flusso magnetico che attraversa l'interfaccia siano uguali su entrambi lati (Annan A.P., 2009).

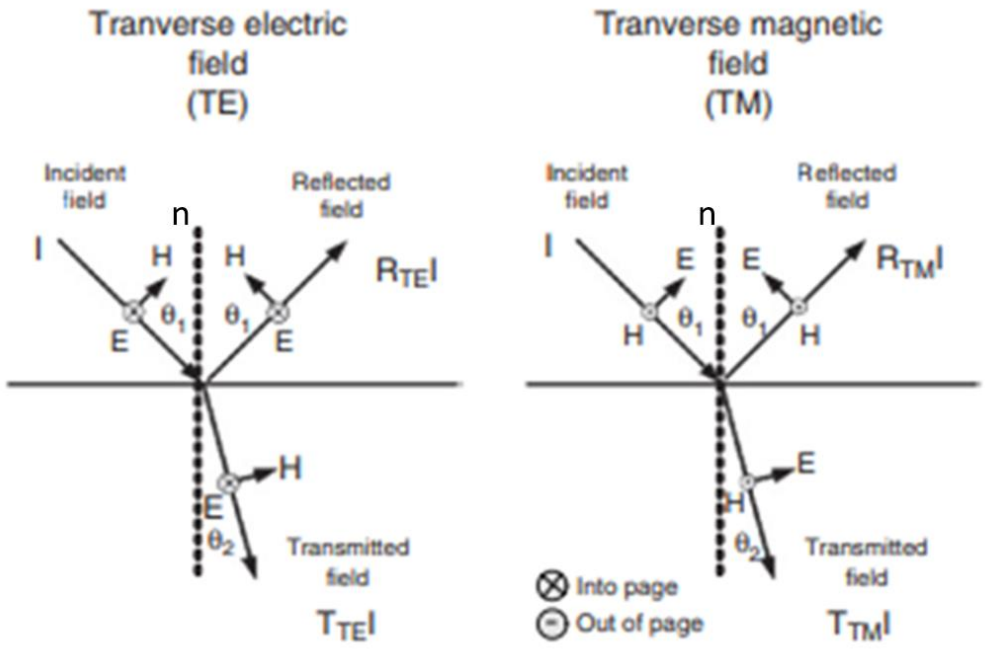



*Figura 4.14: Esempio delle componenti trasversali del campo magnetico (TM) ed elettrico (TE) rispetto ad una qualsiasi direzione di propagazione delle onde EM (linea tratteggiata) per un'interfaccia planare tra due differenti mezzi (immagine modificata da Annan A.P., 2009).*

Se l'incidenza *I* risulta normale all'interfaccia ($\theta_I = 0$), Il coefficiente di riflessione complessivo è definito come:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{4.33}$$

dove $Z_1$ e $Z_2$ sono le impedenze di due mezzi a contatto.

Sapendo che il coefficiente di trasmissione totale *T* è uguale a:

$$\mathrm{T} = 1 - \mathrm{R}$$

Allora è possibile calcolare anche l'incidenza *I* dall'equazione 4.32.

Per le componenti trasversali TE e TM i loro coefficienti di riflessione $R_{TE}$ e $R_{TM}$ saranno dati da (Annan A.P., 2009):

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cdot \cos\theta_1 - Y_2 \cdot \cos\theta_2}{Y_1 \cdot \cos\theta_1 + Y_2 \cdot \cos\theta_2}$$

$$R_{TM} = \frac{Z_1 \cdot \cos\theta_1 - Z_2 \cdot \cos\theta_2}{Z_1 \cdot \cos\theta_1 + Z_2 \cdot \cos\theta_2}$$

Dove $Z_i$ e $Y_i$ sono le impedenze e le ammettenze ($Y_i = 1/Z_i$) dell'i-esimo materiale interessato.

Inoltre, quando l'onda EM è incidente verticalmente sull'interfaccia ($\theta_1 = \theta_2 = 0$), non esiste alcuna distinzione tra un'onda TE e un'onda TM e i coefficienti di riflessione $R_{TE}$ e $R_{TM}$ diventano identici.

Infine, se il sistema è costituito da mezzi non magnetici (la maggior parte dei mezzi geologici), cioè nel caso in cui si abbia $\mu 0 = \mu 1 = \mu 2$, si può riscrivere la 4.33 come:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

Per spiegare il concetto d'attenuazione α si fa riferimento ai casi in cui mezzi interessati dal segnale GPR son costituiti da proprietà elettriche e magnetiche eterogenee nelle varie interfacce che li separano. Più precisamente, l'eterogeneità estrarrebbero energia al passaggio dei campi elettromagnetici EM e la diffonderebbero in tutte le direzioni per l'intero mezzo interessato (Annan A.P., 2009).

L'attenuazione $\alpha$ [dB/m] è proprio una conseguenza di questo effetto di dissipazione di energia che le eterogeneità provocano sul segnale GPR e, quindi, su ogni oscillazione d'onda EM.

Infatti, a seconda di quali siano le caratteristiche geologiche del materiale investigato e le sue rispettive proprietà elettriche, l'attenuazione tende a variare.

Tipici valori di attenuazione di alcuni terreni più comuni è possibile vederli nella sottostante *Tabella 4.0*:

| Terrain | Attenuation $\alpha$ (dB/m) | Resisitivity $\rho$ (ohm/m) | Relative permittivity $\varepsilon_r$ |
|---|---|---|---|
| Saturated shale | 51.8 | 10 | 10 |
| Argillaceous marl | 14.5 | 40 | 8 |
| Calcareous marl | 5.8 | 100 | 8 |
| Saturated sand | 3 | 100 | 30 |
| Limestone | 2 | 400 | 4 |
| Fresh water | 1.8 | 100 | 81 |
| Dry sand | 0.82 | 1000 | 4 |
| Pure water | 0.2 | 1000 | 81 |
| Ice | 0.082 | 10000 | 4 |
| Sound concrete or sound granite | 0.06 | 10000 | 6.5 |

*Tabella 4.0: Alcuni tipici valori di attenuazione α per diversi tipi di terreni e relative proprietà elettriche.*

Ciò che si deduce è che le attenuazioni del segnale GPR possono essere dovute cambiamenti litologici e variazioni del contenuto d'acqua che spesso son correlabili alle eterogeneità delle proprietà elettriche e magnetiche di quel tipo di materiale.

A parte i materiali geologici, anche le proprietà elettriche e magnetiche dei contaminanti potrebbero comportare una certa attenuazione del segnale GPR. Generalmente, alcuni NAPL (*Non-acqueous phase liquids*) possiedono una permittività dielettrica relativa $\varepsilon_r$ maggiore rispetto a quella dell'acqua. In particolare, si fa riferimento a due dei contaminanti principali responsabili dell'inquinamento del sito in esame di questa tesi, ovvero il Tricloroetilene (TCE) e il Percloroetilene (PCE) (vedi capitolo 3). Rispetto alla costante dielettrica dell'acqua (81), questi avrebbero valori rispettivamente di 3.4 e 2.3. In più, la conduttività elettrica degli NAPL è tipicamente molto bassa in confronto a quella dell'acqua. Ad esempio, il TCE ha una $\sigma$ pari a 0.8 $x\ 10^{-6}$ [S/m] rispetto a circa i 0.01-5 [S/m] dell'acqua (Redman J.D., 2009).

In riferimento a tali proprietà, quando gli NAPL sostituiscono l'acqua presente nei pori dei suoli o delle rocce, ne consegue, da una parte, una riduzione della conduttività e della costante dielettrica del mezzo interessato, dall'altra, un

aumento della velocità delle onde EM e una diminuzione dell'attenuazione. Tuttavia, molto spesso risulta complicato che si verifichi sicuramente quanto appena spiegato. Le componenti della fase dei NAPLs dissolte nell'acqua non modificano direttamente le proprietà elettriche dell'acqua stessa ma lo potrebbero fare indirettamente tramite una loro biodegradazione. Secondo alcuni studi, ciò aumenterebbe la conduttività nelle zone saturate da questi tipi di contaminanti con l'effetto di una maggior attenuazione del segnale GPR (Redman J.D., 2009). Inoltre, oltre a dipendere dalla conduttività elettrica $\sigma$, l'attenuazione dei materiali dipende anche dalle frequenze d'antenna utilizzate: a maggiori frequenze corrispondo più elevate attenuazioni (*Figura 4.14)*.

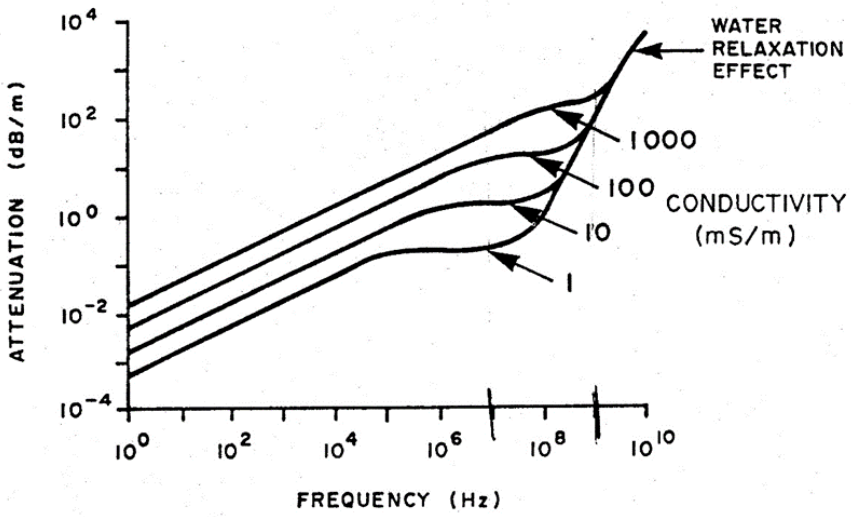



*Figura 4.15: Relazione tra frequenza (Hz), attenuazione α [dB/m] e conduttività elettrica σ [mS/m].*

La frequenza è anche molto importante per la risoluzione del segnale GPR, ossia quanto può essere accuratamente localizzato l'oggetto a quella certa profondità d'indagine e quale grado di informazione può essere estratto circa sulla sua geometria (dimensione, forma e spessore) (Annan A.P., 2009). A minori valori di frequenza, corrisponde una maggior probabilità di ottenere una penetrazione dell'onda EM ad importanti profondità nel mezzo. Infatti, come per la sismica, secondo l'equazione 4.30 più le frequenze son basse, maggiori son le lunghezze d'onda e, quindi, maggiore è la profondità d'investigazione.

D'altro canto, la risoluzione è precisamente relazionata a due tematiche: "l'oscuramento" del trasmettitore e la separazione del target. La prima si riferisce all'incapacità del trasmettitore di individuare i segnali fino alla fine della sua trasmissione. Nel caso dei GPR, il trasmettitore è solitamente vicino al ricevitore. Se la sorgente trasmittente emette grandi segnali, il ricevitore sarà in grado di riconoscerli. Ma se il segnale è sufficientemente grande, potrebbe succedere un sovraccarico dell'elettronica ricevente da non garantire il riconoscimento del segnale. La seconda è specificatamente legata a come si presenta il segnale. Se si considera la sua propagazione nel tempo, potrebbe arrivare contemporaneamente, sovrapposto o separato (*Figura 4.14*) (Annan A.P., 2009).

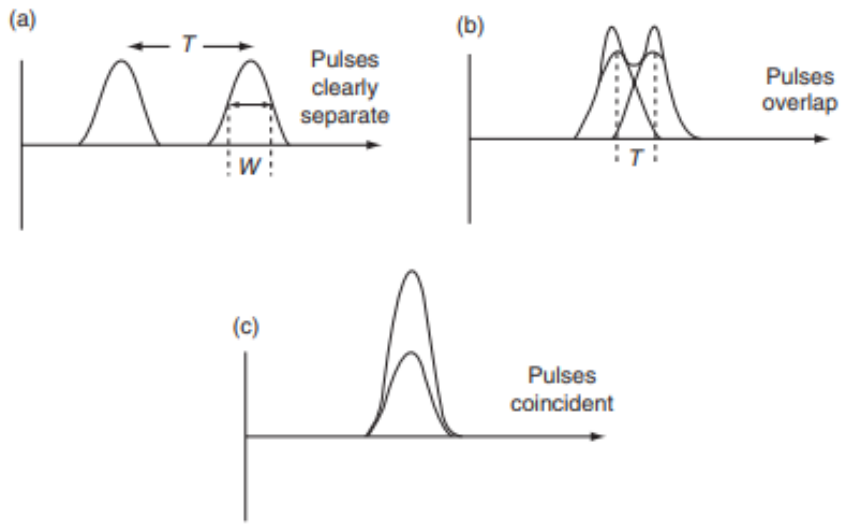



*Figura 4.16: Impulsi con mezza ampiezza W per un certo periodo T. a) Impulsi chiaramente separabili quando T>>W; b) Sovrapposizione degli impulsi quando T≈W; c) Impulsi coincidenti e non distinguibili quando T<<W (immagine tratta da Annan A.P., 2009)*

Dalla figura soprastante è ampiamente accettata l'idea che due impulsi son distinguibili se separati da metà della loro mezza ampiezza *W*. Quando questi son divisi meno di quest'ultima quantità, è molto probabile che siano interpretati come un singolo evento (Annan A.P., 2009).

Esistono due componenti di risoluzione che dipendono dal concetto di separazione dell'impulso nel tempo: la lunghezza di risoluzione radiale *Δr* (o *range resolution*) del GPR piuttosto che quella laterale *Δl* (o *angular resolution*) (*Figura 4.16*).

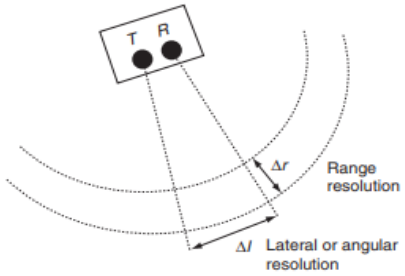



*Figura 4.17: La risoluzione per il Georadar (GPR) si divide in due parti: la risoluzione longitudinale (o d'intervallo) e risoluzione laterale (o angolare) (immagine tratta da Annan A.P., 2009)*

Se tale concetto viene considerato nello spazio, è possibile esprimere:

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4}$$

Da cui ne consegue che l'ampiezza dell'impulso *W* e la velocità di propagazione d'onda EM *v* nel materiale interessato, stabiliscono la *Δr*, o distanza radiale che intercorre tra due target. Idealmente, la risoluzione radiale è indipendente dalla distanza dalla sorgente. In pratica, a maggiori distanze, una possibile attenuazione e dispersione dell'impulso possono incidere sulla risoluzione radiale. Al contrario, la lunghezza di risoluzione laterale, oltre a dipendere dall'ampiezza dell'impulso *W* e dalla velocità *v*, dipende dalla distanza tra il target e il sistema che emette il segnale *r* (Annan A.P, 2009).

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}}$$

Più grande è la distanza $r$, maggiore è la risoluzione laterale $\Delta l$.

Inoltre, nei metodi GPR, l'ampiezza dell'impulso $W$ nel tempo è direttamente legata a due parametri fondamentali per la risoluzione: l'ampiezza di banda $B$ e la frequenza centrale $f_c$ (Annan A.P., 2009).

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c}$$

L'ampiezza di banda $B$ è definita dalla risoluzione radiale secondo la seguente espressione (Annan A.P., 2009):

$$B \geq \frac{v}{4\Delta r}$$

In generale, i segnali GPR son caratterizzati generalmente dal rapporto $R$ tra la larghezza di banda $B$ e la frequenza centrale $f_c$ (Annan A.P., 2009):

$$R = \frac{B}{f_c}$$

Gli strumenti GPR mirano sempre a massimizzare il più possibile $B$ e a minimizzare $f_c$ cercando di rendere il più grande possibile $R$ fino a portarlo al suo valore limite che solitamente corrisponde ad 1 (Celli N.L., 2011/2012; Annan A.P., 2009). Da quando i metodi GPR tendono ad avere un $R \approx 1$, possiedono un dettaglio, o risoluzione radiale $\Delta r$, che diventa totalmente caratterizzato dalla loro frequenza centrale. In particolare, la risoluzione radiale, o verticale, corrisponde circa a $\lambda/4$ e la lunghezza d'onda deriva dalla scelta della frequenza centrale considerata (Peruzzo L., 2014/2015).

### *4.2.2 Acquisizione dei dati*

Le indagini GPR vengono effettuate mediante l'utilizzo di due antenne, una trasmittente (Tx) e l'altra ricevente (Rx). La prima emette onde elettromagnetiche

EM con la frequenza propria dell'antenna stessa, mentre la seconda permette la ricezione delle onde una volta che queste sono state riflesse dagli orizzonti riflettenti.

L'obiettivo principale è di misurare l'ampiezza, o intensità, del campo EM in funzione del tempo (o *tempo di volo*) successivamente alla sollecitazione prodotta. Il risultato che ne deriva è il tipico radargramma, ovvero una visualizzazione della sezione GPR acquisita e/o elaborata in cui in ascissa è presente la distanza percorsa dall'antenna mentre in ordinata può esserci il cosiddetto *tempo doppio* o l'ampiezza del segnale. In quest'ultimo caso per ogni traccia corrisponde una serie di fluttuazioni o "ondine" (*wavelet*) man mano che si prosegue con l'acquisizione (*Figura 4.17*).

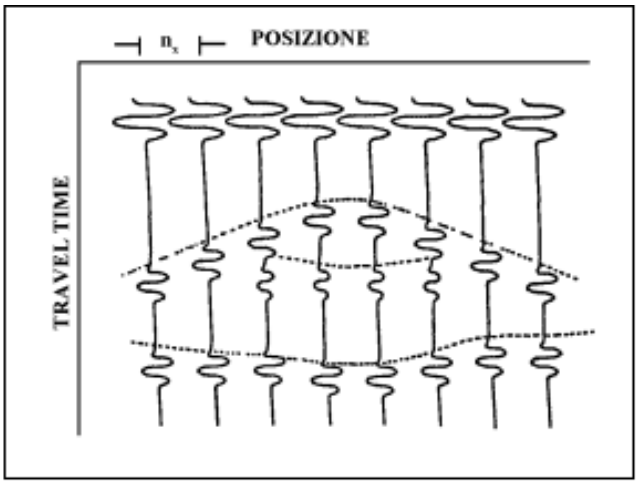



*Figura 4.18: Esempio schematico di radargramma: $n_x$ corrisponde alla posizione di ogni singola traccia (immagine tratta da Cerilli S., Sebastiani P., 2014)*

Il motore principale del sistema GPR è rappresentato dalla cosiddetta unità di temporizzazione (dall'inglese *timing*), che controlla la generazione e l'individuazione dei segnali (Annan A.P., 2009). Il segnale acquisito (riflessioni) relativo alle variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche del sottosuolo dovute alle discontinuità (ad es. contrasti litologici come suolo vs bedrock) in esso contenute, verrebbe infine digitalizzato tramite dei convertitori analogici-digitali (A/D) presenti all'interno di un unico dispositivo costituito generalmente da un

computer e un display, fino ad essere registrato, processato ed interpretato (*Figura 4.19)*.

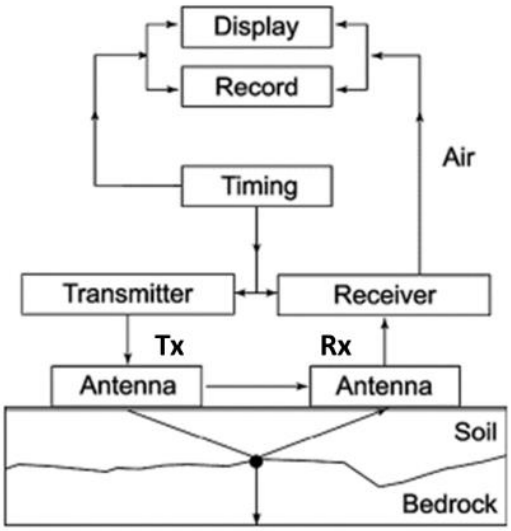



*Figura 4.19: Diagramma di blocco rappresentante i principali componenti per l'acquisizione dei dati GPR (modificato da Annan A.P., 2009).*

Le antenne radar son spesso alloggiate su una slitta di plastica o fibra di vetro che è poi la parte che viene adagiata sulla interfaccia aria-terreno, o appoggiata su ruote a pochi centimetri dal suolo oppure possono essere messe direttamente sull'interfaccia. In più, le antenne possono essere rinchiuse all'interno di un "contenitore" avente un suo proprio *"shield"* (*Figura 4.20*).

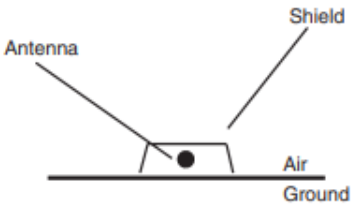



*Figura 4.20: Antenna GPR rinchiusa all'interno di una protezione ("shield") per ridurre l'interazione dei segnali con l'aria. Tali segnali potrebbero derivare dal sistema GPR stesso o da sorgenti esterne (Annan A.P., 2009).*

Le antenne a scudo hanno l'obiettivo di massimizzare l'energia mandata e ricevuta dal target presente nel sottosuolo e di rendere minimo l'energia diretta dal trasmettitore al ricevitore, l'energia che viene dispersa nell'aria e i rumori elettromagnetici EM esterni. Tuttavia, possono essere impiegate anche antenne senza scudo preferibilmente con basse frequenza (Annan A.P., 2009).
Solitamente, la banda di frequenza delle antenne viene scelta in base allo scopo dell'indagine come presentato all'inizio.

Generalmente è possibile acquisire i segnali con un Georadar in modalità monostatica e bistatica. Nel primo caso sia l'antenna trasmittente che quella ricevente formano un'unica antenna che prima trasmette il segnale e successivamente si abilita a ricevere. In più, la loro distanza reciproca, o *offset*, è costante (offset = 0) ed è legata alle caratteristiche del sistema stesso (*Figura 4.20*).

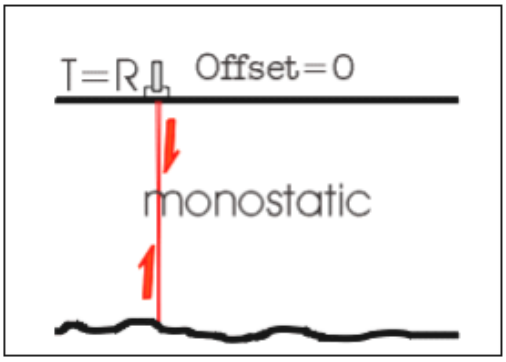



*Figura 4.21: Funzionamento di un'antenna monostatica: la medesima antenna prima immette nel terreno un'onda elettromagnetica e poi ne registra l'eco (immagine tratta da Angelino A. et al., 2011).*

Il termine monostatico viene anche usato per definire quei Georadar che pur essendo bistatici hanno un offset molto piccolo e fisso.
Nel secondo caso le antenne sono fisicamente separate e questo consente di posizionarle e, quindi, modificare il loro offset in base alla modalità di acquisizione prescelta (*Figura 4.22*).

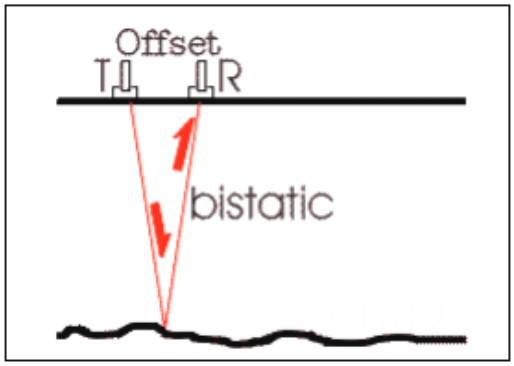



*Figura 4.22: Un'antenna trasmette l'onda elettromagnetica EM nel terreno e successivamente un'altra antenna riceve il segnale riflesso (immagine tratta da Angelino A. et al., 2011).*

Tra i vantaggi dei monostatici bisogna sicuramente evidenziare la loro capacità di permettere ad un unico operatore l'acquisizione in completa autonomia. Mentre il bistatico richiede due operatori con il vantaggio però di consentire indagini anche in aree poco accessibili (Busato L., 2010/2011).

Inoltre, grazie al fatto che le antenne siano spostate sul terreno, è possibile acquisire in modo continuo (*time mode*) o in distanza (*distance mode*): nel primo caso il sistema emette e riceve continuamente gli impulsi radar nel tempo, nel secondo invece il sistema è capace di trasformare la velocità di trascinamento dell'antenna in distanze lineari.

Dal punto di vista pratico, l'acquisizione dei dati mediante tecniche GPR è realizzabile sia da superficie che in foro.

Nel primo caso sono possibili le 3 seguenti modalità bistatiche:

1. Common Offset;

2. Wide-Angle Reflection and Refraction (WARR);

3. Common Mid Point (CMP).

In realtà, la prima è da considerarsi monostatica dato che sia il trasmettitore (Tx) che il ricevitore (Rx) mantengono lo stesso offset. Come appena visto, in alcuni casi si dice anche che siano posizionati allo zero-offset (trasmettitore e ricevitore

coincidenti). Tale modalità è caratteristica dello strumento che è stato utilizzato per le indagini GPR per questo lavoro, per cui ne si è voluto riportare un breve approfondimento (vedi in seguito). Per quanto riguarda alle funzionalità dei suoi accessori, si veda il capitolo successivo.

Invece, le acquisizioni da foro son costituite dalle seguenti 4 modalità:

1. Vertical Radar Profile (VRP);
2. Zero Offset Profile (ZOP);
3. Multiple Offset Gather (MOG);
4. Riflessione con entrambe le antenne nello stesso foro.

In generale, le prime consentono d'indagare in modo continuo e veloce vaste aree o lunghi tratti (Peruzzo L., 2014/2015). La frequenza utilizzata per la maggior parte degli scopi geologici varia tra la decina di MHz e i 500 MHz (nel caso dello strumento per questa tesi si è utilizzato una frequenza di 170 MHz e una di 600 MHz). A seguire delle illustrazioni schematiche dei metodi d'acquisizione superficiali.

Come accennato prima, per il sistema *common-offset* se ne riporta una breve descrizione. L'acquisizione dei dati avviene mentre un paio di Tx e Rx, posti ad una fissata distanza *S*, son trascinati secondo una linea dritta verso una nuova posizione sulla superficie compiendo delle misurazioni ad intervalli regolari $\Delta_x$ tra una stazione e l'altra (*Figura 4.22*).

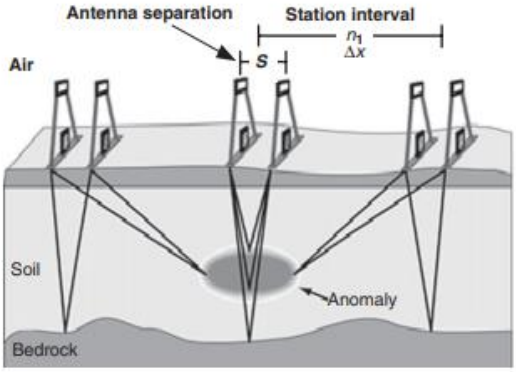



*Figura 4.23: Illustrazione schematica dell'acquisizione common-offset lungo una linea (immagine tratta da Annan A.P., 2009).*

Il common-offset è efficace per la localizzazione delle profondità delle interfacce orizzontali tramite la loro riflettività rispetto alla posizione nello spazio. In aggiunta, nella condizione di zero-offset accennata in precedenza, è possibile individuare maggiormente iperboli di riflessioni riferite a tubazioni, tunnels, oleodotti e oggetti compatti sepolti (Emgeosci., 2015/2018).

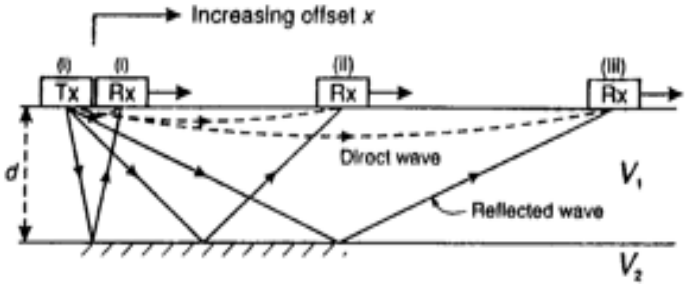



*Figura 4.24: Schema di acquisizione secondo la modalità WARR.*

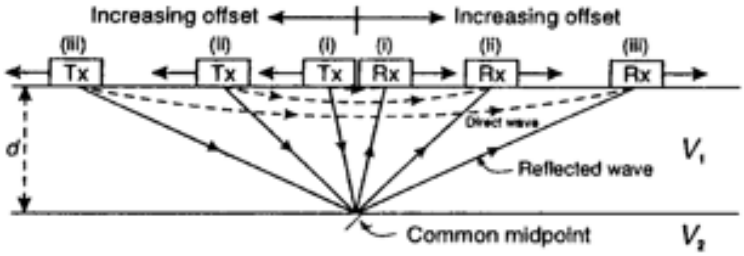



*Figura 4.25: Schema di acquisizione secondo la modalità Common Mid Point (CMP).*

Per quanto riguarda quelle in pozzo, le antenne vengono fatte scendere alle profondità desiderate. Se si hanno a disposizione ad es. due pozzi, posti ad una opportuna distanza, è possibile compiere delle misure di tipo *zero-offset* (le due antenne son posizionate alla profondità nei due pozzi) o un'acquisizione *multiple offset gather (*ad ogni posizione dell'antenna trasmittente si registrano gli arrivi in tutte le posizioni dell'antenna ricevente).
Nel primo caso è possibile ottenere un profilo verticale di velocità e monitorare variazioni mono-dimensionali, nel secondo le informazioni saranno invece 2D.

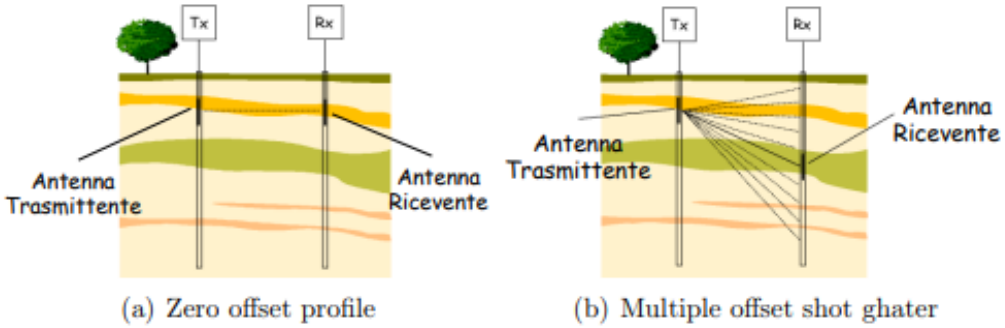



*Figura 4.26: Tipiche modalità di acquisizione GPR in foro (immagine tratta da Busato L., 2014/2015)*

### *4.3.3 Processing*

Una volta ottenuto il profilo GPR (o radargramma) dai dati misurati dallo strumento è possibile passare alla fase del *processing*. Questo consiste in un processo che mira a migliorare la qualità degli stessi dati acquisiti in modo da facilitare l'interpretazione delle proprietà fisiche/naturali del sottosuolo piuttosto che limitarsi semplicemente a "vedere qualcosa in un radargramma" (Cassidy N.J. (b), 2009).
Nel dettaglio, la funzione del processing è quella di incrementare il rapporto segnale/rumore e rendere i dati conformi con la geometria della zona indagata (Celli N.L., 2011/2012).
Tale processo però è alquanto complicato perché è fortemente dipendente dalla

sensibilità e dall'esperienza dell'operatore. A tal proposito, nel tentativo di ottenere una *"good picture"* facile da interpretare, è probabile che si vada, nel migliore dei casi, a "distorcere" la finale interpretazione, e nel peggiore, ad introdurre delle caratteristiche che possono rappresentare un prodotto della natura mal-posta di una delle fasi particolari del processing (Cassidy N.J. (b), 2009). Comunque, è da precisare che solamente se si ha a disposizione una buona qualità dei dati raccolti durante l'acquisizione sarà possibile ricavare un profilo soddisfacente indipendentemente da quanto o come essi vengano elaborati (Celli N.L., 2011/2012).

Tuttavia, nel processing vengono scelti e applicati alcuni step che per questa tesi son stati messi in pratica grazie al software *Geolitix* (si veda capitolo successivo). Una volta eseguiti tali passaggi, è possibile passare all'interpretazione di quanto ottenuto. Il GPR mostrerà "ondine" di riflessione più forti e più deboli che possono essere interpretate diversamente a seconda di quale sia l'oggetto con cui si pensa di aver a che fare.
L'interpretazione tende ad essere un processo che richiede molto tempo a volte in quanto non è così immediato capire ad es. a cosa si possa riferire esattamente quell'iperbole di riflessione.
Tuttavia, esistono alcune considerazioni generali che possono aiutare ad interpretare una sezione GPR. Ad esempio, oggetti come piccoli massi, tubi, oleodotti o reperti archeologici, creano riflessioni iperboliche che possiedono solitamente una forma ad U rovesciata dove l'apice dell'iperbole determina la posizione dell'oggetto. Nel caso del sito di Nisse è stato possibile, infatti, individuare una possibile conduttura (vedi capitolo 6) seguendo tale spiegazione. Inoltre, in alcuni casi volte potrebbe comparire quella che è una forma di rumore chiamata *ringing* che impatta negativamente l'interpretazione dei dati di un radargramma da rendere il segnale poco chiaro e come una serie di ondine l'una accatastata sopra l'altra (*Figura 4.27*).

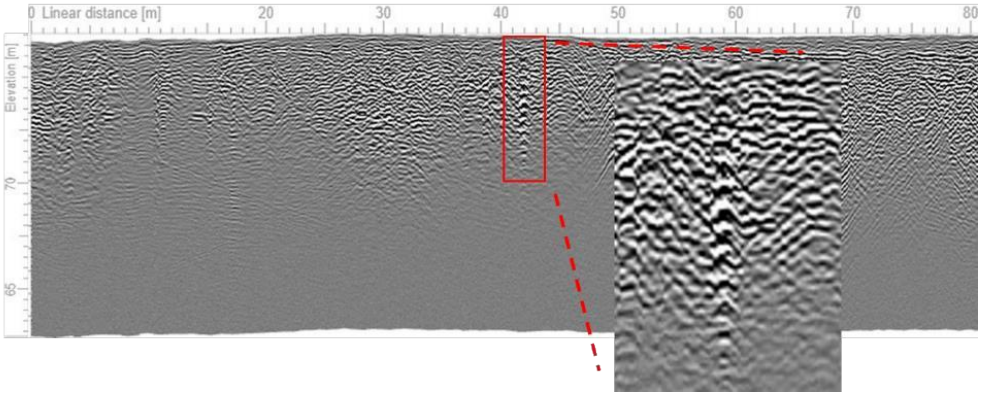



*Figura 4.27: Esempio di "ringing" estratto da una sezione GPR a 170 MHz di una delle linee eseguite sul sito di Sibbarp.*

### *4.4 MIP (Membrane Interface Probe)*

Una sonda MIP consiste in uno strumento di misura per il rintracciamento in-situ e in tempo reale, cioè con il campionamento che avviene senza commettere lunghi ritardi, dei composti organici volatili VOC (tipicamente i solventi clorurati) con la profondità nel suolo, sia nella zona insatura che satura, assieme alla conduttività elettrica e la permeabilità dello stesso (GEOPROBE SYSTEMS, 2018).

Uno sketch degli elementi principali del sistema per il funzionamento della sonda MIP è possibile vederlo in *Figura 4.28*. L'intero sistema MIP-Sounding è composto da una membrana permeabile ai gas ma impermeabile ai liquidi che viene fissata su un blocco d'acciaio che può essere riscaldato fino a circa 120 °C. Intanto un inerte gas trasportatore (solitamente azoto) è in grado di trascinare continuamente i contaminanti volatili rilasciati dal suolo ambientale o dalla falda in quanto scaldati per essere stati a contatto con la sonda. Il gas trasporterà i contaminanti in un gascromatografo con cui potrà essere effettuata una loro analisi chimica. Ciascun rivelatore risponde a diverse proprietà della sostanza misurata che consentono all'operatore MIP di discernere il contaminante nel suo gruppo familiare e di fornire la capacità di mappare il pennacchio di contaminante a partire dalla sua sorgente fino alla sua estensione (Wei H., 2018; GEOPROBE-SYSTEMS®, 2018).

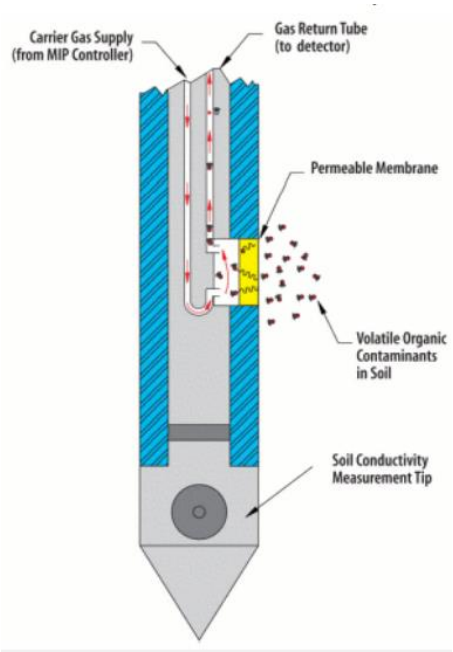



*Figura 4.28: Rappresentazione schematica degli elementi principali della sonda MIP per l'acquisizione della conduttività del suolo (E.P.A. (a), 2021).*

A seconda dei tipi di sensori di cui è dotato, il MIP-sounding può caratterizzare qualitativamente diversi parametri e sostanze nel suolo e nelle acque sotterranee. Per il caso della lavanderia a secco di Sibbarp, il detector che è stato utilizzato è il *Photoionization detector* (PID), un detector capace di individuare gli idrocarburi aromatici grazie al processo fisico della fotoionizzazione. Quando il gas campionato assorbe energia da una lampada PID, il gas viene eccitato e il suo contenuto molecolare viene alterato. Successivamente, il composto perde un elettrone (e-) e diventa uno ione caricato positivamente. Una volta che questo processo si verifica, la sostanza è considerata ionizzata (MSA., 2015).
Tuttavia, a parte il PID potrebbero essere usati anche altri tipi di rilevatori come il *dry electric conductivity* (DELCD) o il *flame ionization detector* (FID). Il primo è più adatto per i composti clorurati come il TCE e PCE mentre il secondo è più sensibile alle catene degli idrocarburi (Wei H., 2018).

### *4.5 Metodi per il campionamento delle acque sotterranee*

Rispetto alle sonde MIP-Sounding specializzate nel rilevamento della contaminazione nel suolo, i pozzi di campionamento delle acque sotterranee erano stati progettati e applicati da parte della società Golder per rilevare le concentrazioni degli inquinanti nelle acque sotterranee.

Anzitutto, secondo quanto riporterebbe l'Associazione Geotecnica Svedese SGF, per campionamento delle acque sotterranee si intende l'estrazione di un campione che rappresenti effettivamente la falda nelle vicinanze del tubo e che possieda una qualità sufficiente da soddisfare lo scopo del campionamento.
Quest'ultimo, quando si indagano aree contaminate, è di cruciale importanza per garantire la scelta dell'indagine di campionamento che si vuole eseguire e per fornire la base di dati necessaria per le decisioni future (ad es. una valutazione del rischio oppure un intervento di bonifica) e per chiunque volesse confrontare i propri risultati o, semplicemente, ottenere delle informazioni. Nel caso in cui lo scopo è riferito appunto ad una situazione d'inquinamento, solo dopo che si conosce con una certa certezza la natura e le proprietà degli inquinanti (in tal caso dei DNAPLs) e del mezzo sottoposto al campionamento (acque sotterranee) si è capaci di adottare la tecnica di campionamento più appropriata.
Da quanto già si conosce, i DNAPLs son tra i contaminanti più presenti nelle acque sotterranee anche perché si sa che son caratterizzati da una densità maggiore di quella dell'acqua. Il loro meccanismo di trasporto nelle medesime acque sotterranee potrebbe consistere non solo del meccanismo di diffusione (per via delle possibili ampie differenze di concentrazione) e advezione (dominata dalla velocità del flusso delle acque sotterranee) ma anche dalla percolazione verticale a causa della gravità (vedi capitolo 3).
A questo punto ci si chiede quale possa essere un metodo o una strategia conveniente per il campionamento delle acque sotterranee in riferimento a tali tipi di inquinanti.

In generale, i campioni di acque sotterranee vengono raccolti da un tubo installato in modo permanente o temporaneo. In casi specifici, ove ben giustificato, i campioni di acque sotterranee possono anche essere raccolti direttamente dal pozzo di perforazione o attraverso altri impianti temporanei o, in casi eccezionali, direttamente da una fossa di prova (SGF., 2020).
Nel dettaglio, un esempio di tecnica adatta alla situazione per il comportamento dei DNAPLs, descritto precedentemente, potrebbe essere i pozzi a multilivello (ad es. i sistemi a multilivello MLS o i pozzi a nido oppure quelli a grappolo, visibili in *Figura 4.24*) in quanto possono facilitare il mappaggio anche 3D nonché il monitoraggio della contaminazione a diversi livelli nel sottosuolo, a differenza di quelli con un tradizionale livello di campionamento dove il campione è visto come una "raccolta" mescolata verticalmente ai vari differenti livelli (Wei H., 2018).

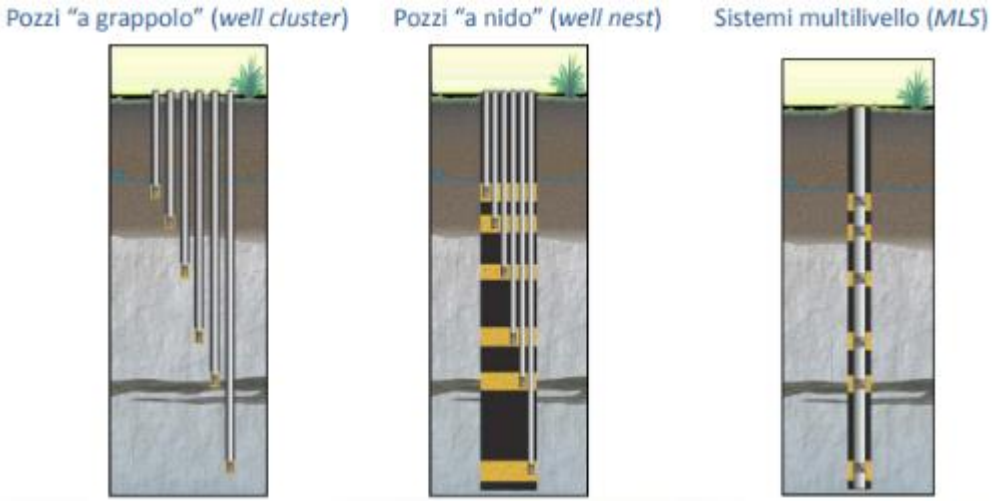



*Figura 4.29: Diversi approcci di pozzi multilivello: a sinistra il metodo dei pozzi a grappolo; in centro i pozzi a nido e a destra i sistemi multilivello (MLS) (Gargini A., 2015).*

Nel sito in esame di Sibbarp la metodologia utilizzata è molto simile a quella prevista da un sistema di pozzi a multilivello *well cluster* in quanto sarebbero stati effettuati dei campionamenti per la misura delle concentrazioni totali degli idrocarburi clorurati in [$\mu g/l$] attraverso dei filtri posti a delle specifiche e varie

profondità (vedi ***appendice B***) in sondaggi tra loro separati con la differenza di essere posti a diverse distanze l'uno rispetto all'altro.
Comunque, per una corretta esecuzione del campionamento e, quindi, per la scelta di una delle tecniche sopra accennate, è necessario compiere un'adeguata installazione e progettazione dei tubi o dei pozzi che tenga conto di alcune importanti condizioni, a partire dal metodo di "pulizia" del pompaggio (ad es. lo spurgo a basso flusso) ad altri aspetti generali come il posizionamento e la lunghezza dei filtri, il diametro e il materiale di sigillatura del pozzo o tubo (ad es. liquami di bentonite, *Figura 4.26*) (SGF., 2020).

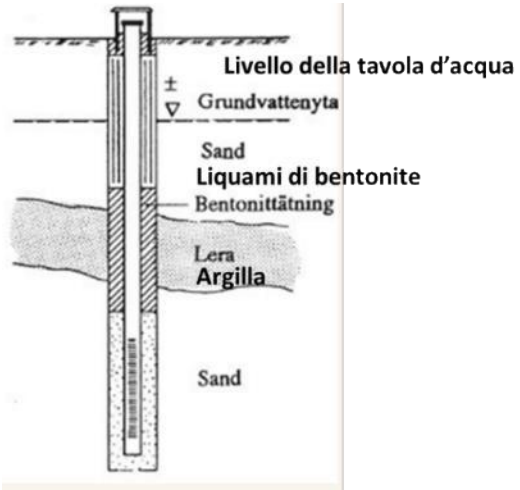



*Figura 4.30: Parti del tubo delle acque sotterranee, filtro a sabbia e guarnizione attorno al tubo con liquami di bentonite nel caso di una falda fortemente contaminata (immagine tratta e modificata da SFG., 2020)*

# 5. Acquisizione sul campo ed elaborazione dati

## *5.1 Indagine ERT*

Le misurazioni son state svolte con 5 stendimenti orizzontali il giorno 5 Agosto del 2021. La posizione dei loro profili può essere vista nell'ortofoto nella *Figura 5.0* sottostante. I primi quattro array son quasi paralleli l'uno rispetto all'altro in direzione da Sud verso Nord. Differente da questi quattro, il quinto inizia da un punto della sponda del fiume Helge å ad Ovest per finire sull'edificio verso Est circa. Tali arrangiamenti potrebbero essere convenienti per la verifica delle misure di resistività assieme a quelle complementari geochimiche (MIP e acque sotterranee).

*Figura 5.0: Ortofoto del sito d'interesse con rappresentati le cinque linee ERT eseguite sul campo. La freccia indica la direzione con cui era stata fatta la misura.*

I dati di resistività sono stati registrati utilizzando la versione 2 del Terrameter LS a 12 canali collegati a un ES10-64 interruttore relè (*Figura 5.1*). Quest'ultimo

consente di avere coppie di cavi paralleli che separano i segnali di corrente da quelli di potenziale. In più, la batteria dello strumento corrisponde a 12 Volt.

*Figura 5.1: ABEM Terrameter LS versione 2 e relè 0-64. Le line rosse rappresentano I cavi multi-elettrodo (ABEM, 2013).*

Altri elementi che è son stati aggiunti allo strumento possono essere riassunti nella seguente lista:

- Batteria esterna di ricambio;
- Martelli per gli elettrodi;
- Bottiglie di plastica per l'acqua salata usata per migliorare il contatto tra elettrodo e terreno.
- Vernice spray e paletti per marcare le linee dei profili (*Figura 5.2)*

*Figura 5.2: Vernice spray color verde sulla sommità di un paletto usata per indicare la linea di un profilo ERT.*

La misurazione è stata condotta con l'array di tipo a gradiente multiplo con separazioni tra i cavi circa di 1 m in tutti i test ma il numero di elettrodi degli stendimenti non è stata la stessa. Per le linee dalla 1 alla 4 si son utilizzati 82 elettrodi mentre 72 per la linea 5 per motivi di spazio tra il fiume e l'edificio. Uno sketch di riferimento del tipo di disposizione degli elettrodi delle cinque linee orizzontali ERT e del suo funzionamento è presentato nella *Figura 5.2* sottostante.

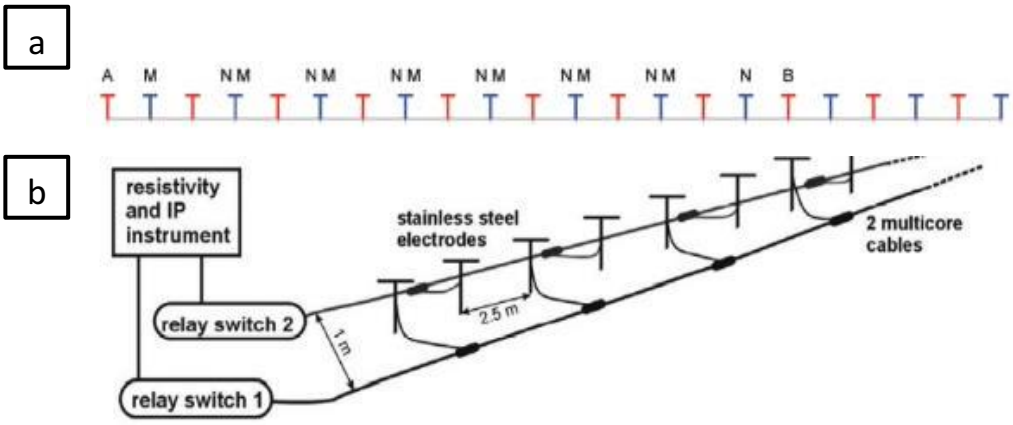



*Figura 5.3: a) Sketch della separazione minima degli elettrodi per la misura a gradiente multiplo (A, B = elettrodo di corrente, M, N = elettrodo di potenziale); b) schema realizzato sul campo: dei cavi separati per la misura della trasmissione di corrente e di potenziale (immagine tratta da Dahlin T. & Leroux V., 2012).*

Usando tale tipo di sistema, un cavo è responsabile della trasmissione di corrente mentre l'altro per la misurazione di potenziale. Come già descritto nel capitolo precedente, coppie di elettrodi potenziali in posizioni diverse lungo la linea orizzontale hanno consentito misurazioni simultanee con le stesse posizioni degli elettrodi di corrente. Ogni secondo elettrodo è solamente usato per la trasmissione di corrente e gli elettrodi che son presenti nel mezzo sono solamente usati per le misure di potenziale (Dahlin T. & Leroux V., 2012). A metà stendimento era posta la batteria e il georestivimetro ABEM Terrameter LS v.2 (*Figura 5.3*), descritto in precedenza, a cui sono connessi i cavi in collegamento con ciascun elettrodo (picchetto) tramite delle pinzette (*Figura 5.4*).

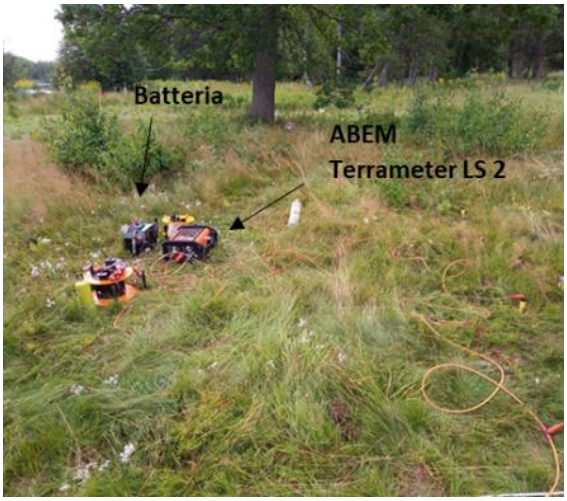



*Figura 5.4: Panoramica della strumentazione utilizzata sul campo. Il georesistivimetro ABEM Terrameter LS 2 e la batteria son indicate con delle frecce.*

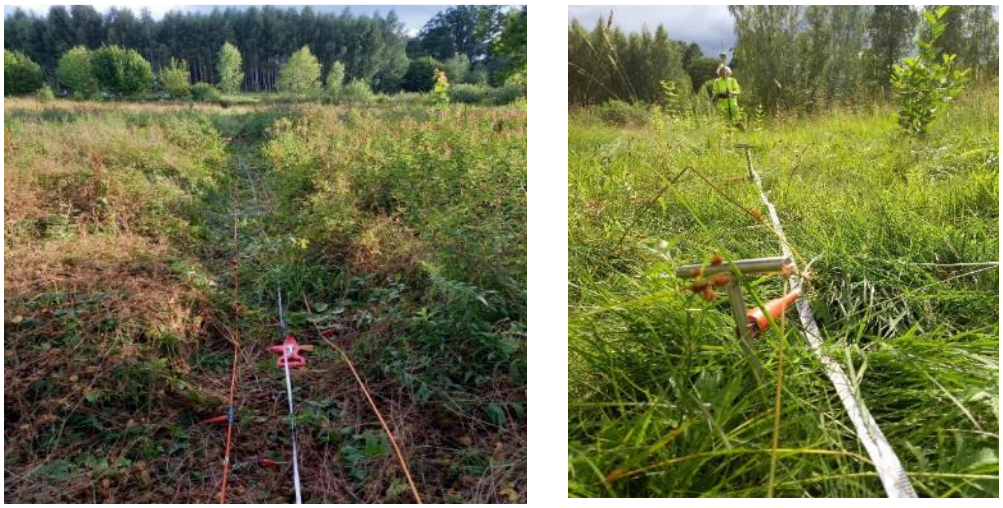


*Figura 5.5: A sinistra: cavi multicanale, uno per la trasmissione di corrente, l'altro per la misura di potenziale; a destra, picchetto e morsetto.*

### *5.1.1 Processing*

Una volta acquisito i dati in campagna, si è passati al loro *processing*. Esistono diversi strumenti consolidati con specifici codici per invertire i dati geoelettrici. Il software in grado di contenere tali codici per questa tesi è stata la versione *3.0.3 di ResIpy*.

Tuttavia, prima di passare al software ResIpy, l'elaborazione dei dati acquisiti con lo strumento ABEM, è iniziata da parte di un altro software, ossia Terrameter LS Toolbox. Tale programma è servito a raccogliere e ad importare i dati provenienti dallo strumento stesso in forma di diversi progetti. Tra le numerose funzioni (vedi ABEM Terrameter AB., 2016), il software ha consentito anche di esportare i dati in *ResIpy v3.0.3.* secondo l'array elettrodico prestabilito (gradiente multiplo).

*ResIPy v3.0.3* è un software che è stato creato per consentire un approccio intuitivo, di facile uso per l'inversione dei dati geoelettrici usando un'interfaccia open-source grafica utente (GUI) e un'interfaccia di programmazione di applicazioni Python (API). In questo lavoro è stato utilizzato il primo tipo con cui è stato possibile gestire l'importazione, il filtraggio, la modellazione degli errori di dati geoelettrici e utilizzare quei codici liberamente disponibili sia per l'inversione (R2) dei dati di resistività che di quelli della polarizzazione indotta IP (cR2) che però non è stato considerato in questo lavoro.
Qui sotto un esempio della schermata principale dell'interfaccia GUI (*Figura 5.5*)

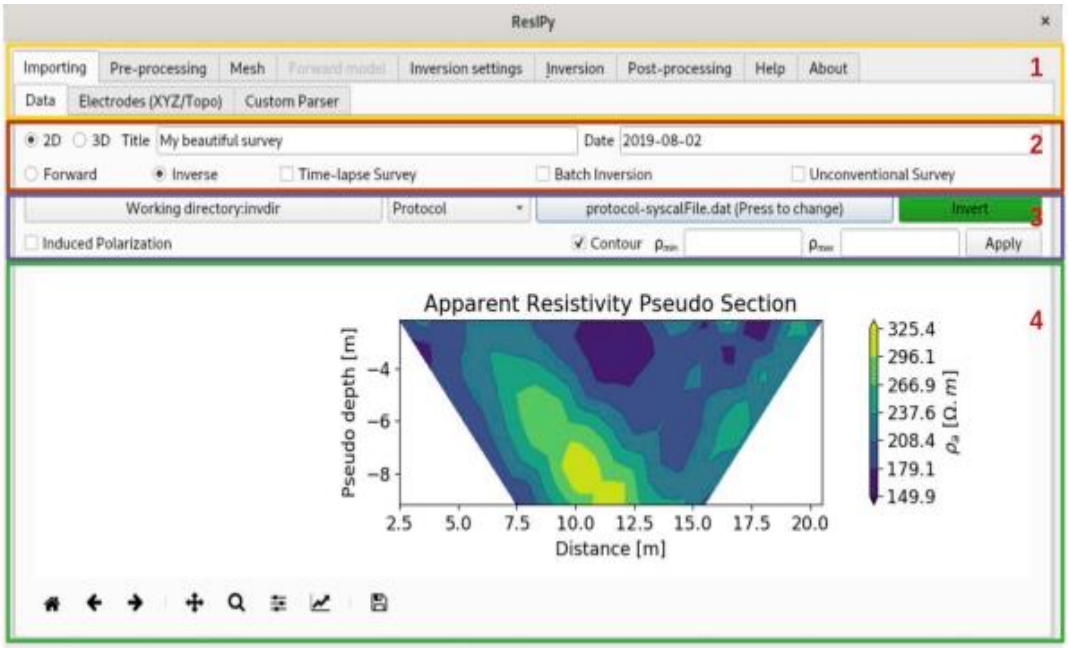



*Figura 5.6: Layout generale dell'interfaccia utente grafica GUI con (1) schede diverse per ogni fase di elaborazione, (2) Opzioni per tipo di rilevamento e di modellazione inversa, (3) importazione dati e controllo IP, (4) grafico in pseudo-sezione dei dati importati (immagine tratta da Balcnhy G., 2020).*

La fase dell'importazione ha riguardato, non solo i dati geoelettrici ma anche topografici. I primi possono essere importati direttamente usando un certo numero di formati standard (ad es. i file Syscal dello strumento IRIS, di Res2DInv, ecc..) oppure manualmente tramite il comando "*Custom Parser tab*" (Blanchy G., 2020). Tale funzione è stata adottata per il lavoro presente di cui viene riportata la schermata generale nell' ***appendice C***. Mentre i secondi possono essere a loro volta inseriti manualmente o, come in questo caso, caricati tramite un file *comma separated value* (csv) nel formato tabella chiamato *"Electrodes (XYZ/Topo)"* (vedi *tab* 1 in *Figura 5.6*) una volta che son stati importati i precedenti. Un'immagine della tabella è vista sempre nell'***appendice C*** senza però il file dei dati topografici importati.

A questo punto si è passati direttamente al comando per l'inversione presente all'interno della finestra "*importing*". Grazie a tale funzione si è stati in grado di realizzare le immagini finali di resistività. Un'importante considerazione da fare è che tutti i parametri dell'inversione del software ResIpy possono essere accessi e modificati secondo specifici comandi. Ad esempio, l'utente può modificare il tipo di regolarizzazione, se l'inversione converte i dati in valori logaritmici, anisotropia di livellamento, numero massimo di iterazioni e stime di errore dei dati (Blanchy G.,2020). In tal caso, per quest'ultime son state scelte delle specifiche soglie di errore per far in modo che il numero di iterazioni fosse tale da rendere il valore del RMS (Root Mean Square) il più prossimo all'unità.
Prima di passare all'inversione è stato possibile, oltre che importare, anche di applicare personalmente alcuni metodi rigorosi di pulizia/filtraggio dei dati. Tale processo è disponibile nella schermata dell'interfaccia GUI "*Pre-processing*". Da precisare che in questo caso le misure reciproche non erano presenti e che non è servito, quindi, alcun filtro. Indipendentemente dal fatto che ci siano o no le misure reciproche, si è stati in grado di rimuovere delle misurazioni indesiderate tramite il comando *"filter-manual"* presente nella sezione "*Manual/Reciprocal Filtering"* (vedi *linee guida ResIpy*). Questo metodo interattivo ha consentito di selezionare e rimuovere manualmente i dati punti all'interno della GUI (*Figura 5.6)* (Blanchy G., 2020).

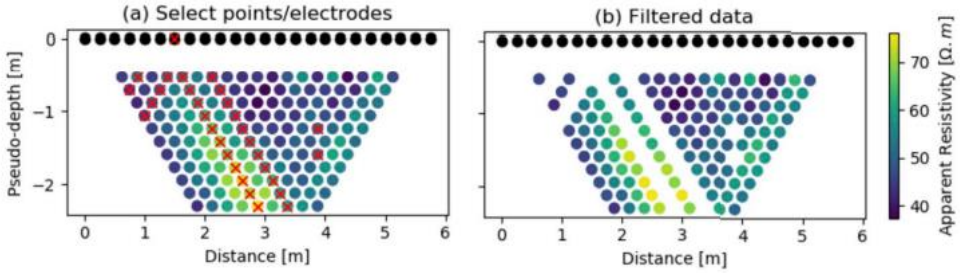



*Figura 5.7: Filtraggio manuale interattivo. (a) Pseudo sezione con punti dati indesiderati selezionati (barrata in rosso), (b) Pseudo sezione con punti dati rimossi (immagine tratta da Blanchy G.,2020).*

A questo punto, si può passare all'inversione col comando visibile nella *tab* 3 della schermata GUI nella *Figura 5.5* precedente.

Come già accennato in precedenza, si è tenuto in considerazione la soglia di errore ottimale per ogni linea, affinché il numero di iterazioni non risultasse troppo elevato e che l'RMS risultasse il più vicino possibile a 1. In questo caso non tutte le linee hanno presentato un ugual numero di iterazioni: la linea 1, 3 e 4 hanno presentato un massimo di 3 iterazioni mentre la 5 e la 2 valori alquanto elevati addirittura fino a 16 e 20, rispettivamente. Quest'ultime due saranno escluse, infatti, nell'interpretazione dei risultati finali in quanto di pessima qualità (vedi ***appendice B***).

Infine, si ottiene così la sezione di resistività desiderata che sarà oggetto di discussione assieme a quella ottenuta col Georadar.

Un ultimissimo step che consente di effettuare il software riguarda la fase del *post – processing* che ha consentito di capire quanto bene sia stato compiuto il *misfit* dei dati, ovvero le inversioni degli errori (*Figura 5.7*).

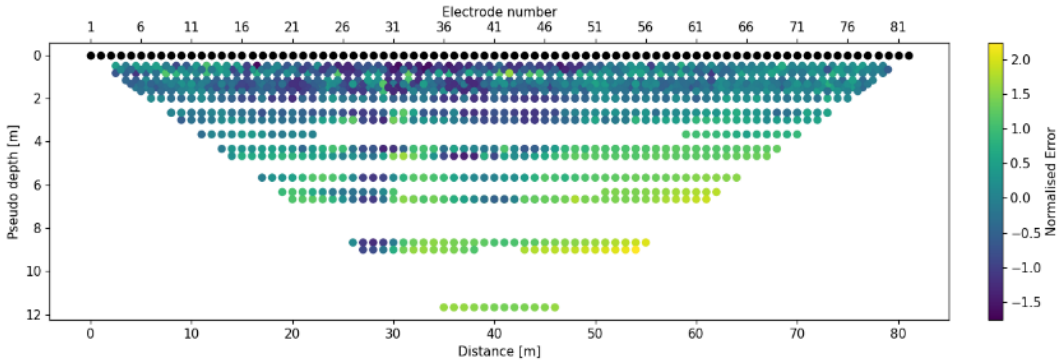



*Figura 5.8: Sezione ottenuta nella fase di post-processing (Gitlab, 2022).*

Dove si hanno dei pallini di diverso colore significa che si ha a che vedere con aree con misure positive e negative. Se fosse così, allora il fitting non è avvenuto perfettamente. Al contrario se si ha una uniforme distribuzione del colore.

## *5.2 Indagine GPR*

Per quanto riguarda all'indagine GPR, la mappa di riferimento relativa al modo con cui è stata svolta è vista in *Figura 5.8*. Il metodo è stato applicato sia per quello a griglia che lineare dove per quest'ultimo l'acquisizione è stata eseguita sia lungo i profili coincidenti con quelli ERT che in alcuni esterni a quest'ultimi di numero pari a 6. Da sottolineare fin da subito che le misurazioni GPR per gli array ERT 1 e 3 non vanno da Sud verso Nord bensì in senso opposto.
Per quanto riguarda alla griglia GPR son state compiute, invece, 13 linee parallele tra di loro, alcune in direzione Sud/Sud-Ovest e Nord/Nord-Est, altre all'incontrario, con spaziatura definita pari a 1 m, ottenendo complessivamente un'area rettangolare di dimensioni pari a 12x22m (marcata da una linea tratteggiata blu).
Si appunta, inoltre, che durante la misurazione vi era una notevole presenza di vegetazione (tanta erba alta) (*Figura 5.9*) e buche che qualche volta hanno reso difficile l'acquisizione. Nella linea 2, infatti, il radargramma finale mostra

un'evidente depressione (vedi ***appendice B***).

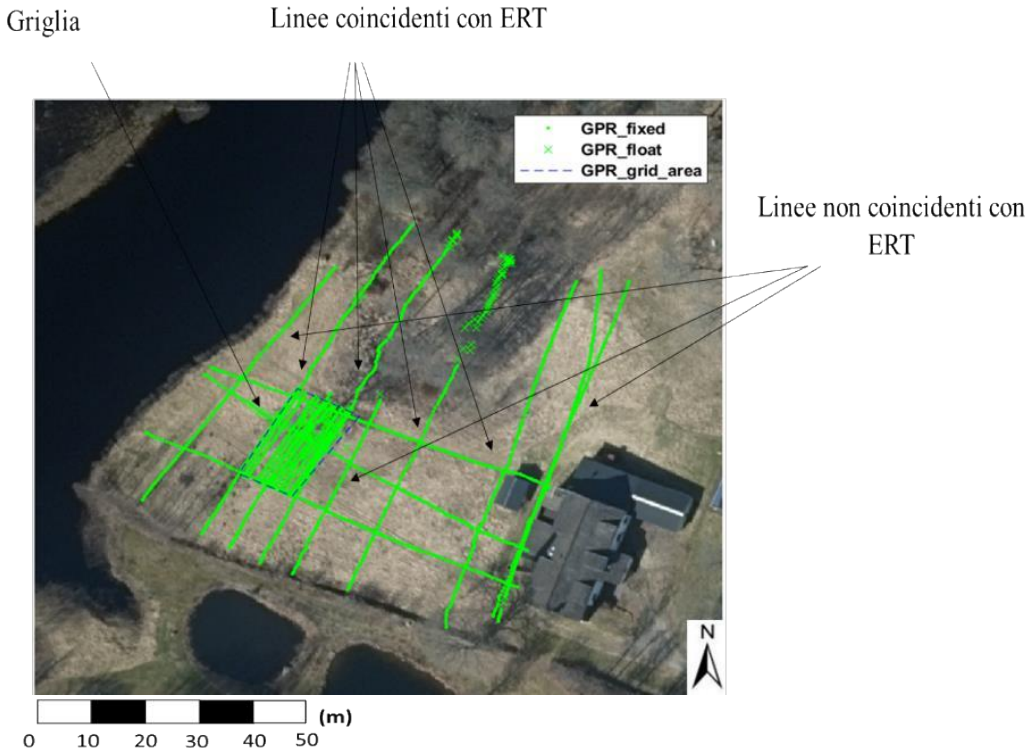



*Figura 5.9: Mappa generale delle linee GPR compiute sul campo.*

*Figura 5.10: Immagine dell'acquisizione GPR in atto. Si evidenzia in particolare la presenza dell'erba alta che ha reso maggiormente difficile il trascinamento dello strumento.*

Per la registrazione dei dati GPR si è scelto di utilizzare la serie Georadar *CrossOver CO1760*, uno strumento in grado di consentire sondaggi più rapidi con prestazioni migliorate grazie all'incorporazione di due canali con frequenze a banda ultra larga centrate intorno a 170 MHz e 600 MHz che lo rendono ideale per una gamma di applicazioni GPR comuni, come appunto l'individuazione di contaminanti nel sottosuolo (*Figura 5.10*) (Geo-matching, 2022).

*Figura 5.11: Strumento CrossOver 1760 e suoi principali componenti utilizzati per l'acquisizione dei dati GPR sul campo (immagine tratta da Geo-matching, 2022)*

Tale sistema GPR è fatto apposta da essere trascinato in dei "carrelli" appositi via mano o per mezzo di veicoli a qualsiasi velocità.

Il sistema è controllato da una *Android – driven user interface* grazie alla quale si ha la possibilità di aver maggior flessibilità nella scelta di acquisizione e del dispositivo di controllo (ad es. tablet o smartphone) tramite un collegamento wireless. Tutto ciò rende sicuro il trasferimento dei dati tra l'antenna e la *user interface* oltre a semplificare il set-up e l'uso pratico. Inoltre, l'apparecchio è basato su quella che viene definita la *real-time-technology* (RTS) con la quale è possibile conferire una migliore performance (aumento della sensitività, della profondità di penetrazione, della larghezza di banda) ai progetti rispetto a quelli convenzionali. Infine, lo strumento è caratterizzato da un basso consumo di energia, il che garantisce un tempo di operazione pari a 7 ore su un'unica batteria (Geo-matching, 2022).

### *5.2.1 Processing*

In questa parte verranno presentati gli steps utilizzati per la visualizzazione ed elaborazione dei radargrammi ottenuti dal strumento tramite il software Geolitix.

La *Figura 5.12* mostra un esempio di schermata generale della piattaforma di lavoro del software in cui è possibile inquadrare in alto a destra il nome che è stato attribuito al file importato secondo i dati GPR acquisiti sul campo assieme alla frequenza utilizzata (in questo caso 170 MHz) oltre alle coordinate (est, ovest e l'elevazione) sotto ai precedenti.

Prima di arrivare alla fase del "*processing* e *interpretation"* è stato possibile inserire i dati relativi alla localizzazione dei profili GPR tramite dei files GNSS (Global Navigation Satellite System) all'interno della finestra "*positioning*" e, quindi, georeferenziare i dati GPS. Il risultato mostra una mappa con le varie linee GPR compiute sul campo una volta scelto come *mode* i dati GPS, cioè la modalità di visualizzazione dei dati, e *imagery source* la funzione *mapbox* (*Figura 5.11*).

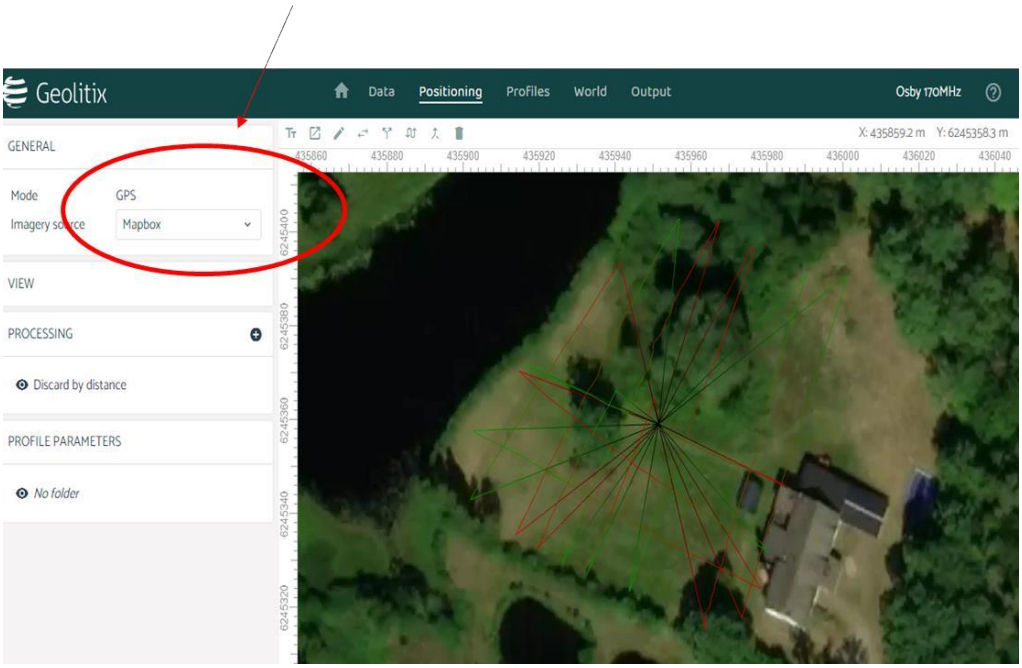



*Figura 5.12: Schermata della fase di "positioning" dei dati GPS e loro modo di visualizzazione (Geolitix,2020).*

Passando alla voce *Profiles*, una volta selezionato il profilo d'interesse, uno dei primi passaggi che si è potuto effettuare è calcolo della velocità e, quindi, della costante dielettrica, secondo la formula 4.29, compiuto con la funzione del software "*interpretation*". In particolare, per l'analisi di velocità è stato fatto l'uso del metodo delle iperboli col risultato di una costante dielettrica pari a 18.4 per un valore di velocità intorno a 0.07 m/ns.

A questo punto si è passati al processing in cui son stati selezionati alcuni conosciuti *"processes"* ritenuti i migliori per l'individuazione e l'interpretazione della geologia della zona nonché della presenza di oggetti individuali come l'ipotetica conduttura sepolta in prossimità dell'edificio. Il tutto è visibile in un es. in *Figura 5.11* della linea 1 anche se la sezione mostrata non è stata completamente processata con in basso a sinistra gli step utilizzati:

- *Time zero correction;*
- *Resample traces equidistantly;*
- *Migration;*
- *Manual Gain;*
- *Background subctraction;*
- *Time Cut*

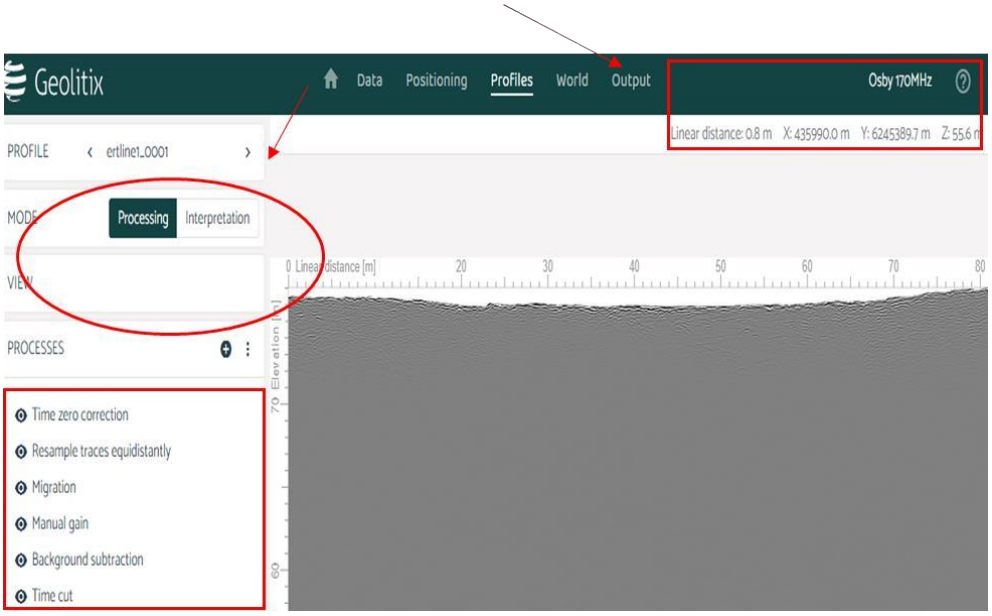



*Figura 5.13: Esempio della schermata per la fase di processing con inquadrati gli step eseguiti per questo lavoro. (Geolitix,2020).*

Questi lo sono stati anche per le altre linee parallele alle linee ERT oltre a quelle esterne.

Per i profili della griglia si è aggiunto il filtro di frequenza (*Frequency filter*) e la trasformata di Hilbert (*Hilbert transform*).

Da precisare che il software ha permesso di processare la sezione semplicemente aggiungendo gli step nella finestra chiamata "*processes*".

A quel punto si è cercato di utilizzarli in base alla loro funzione fino a quando non si è raggiunto una qualità dell'immagine considerata utile per la successiva fase dell'interpretazione.

Nell'***appendice B*** son riportati alcuni radargrammi processati e considerati per questo lavoro.

# 6 Risultati

I risultati ottenuti dal processing dei dati per il metodo ERT e GPR hanno tenuto conto delle informazioni e dei dati ottenuti sul campo dei sondaggi eseguiti negli anni 2018 – 2019 dalla società Golder, sia per quanto riguarda al campionamento dei suoli e delle acque sotterranee che alla tecnologia MIP.
In questo paragrafo viene, quindi, raccolto un riassunto di queste informazioni, in quanto è stato ritenuto importante confrontarle con i risultati nelle sezioni finali delle due tecniche geofisiche ottenute dal lavoro di campagna.

I primi risultati che vengono presentati in *Figura 6.0* riguardano le sezioni di resistività con sovrapposte le sezioni Georadar a frequenza 170 MHz assieme ad alcuni sondaggi stratigrafici della società Golder ritenuti i più vicini a quella linea geofisica. Invece, le sezioni sovrapposte a sequenza 600 MHz non son state considerate in quanto di pessima qualità (vedi ***appendice B***).
Sulla base dei valori di resistività e della presenza di una maggiore o minore attenuazione del segnale Georadar, si è cercato di contraddistinguere i possibili limiti stratigrafici in relazione alla descrizione dei sondaggi. Inoltre, Si è tenuto in considerazione solamente dei profili 1, 3 e 4 per il confronto tra imaging ERT e GPR perché i risultati ERT derivati dal processo d'inversione della linea 2 e 5, come già accennato nel capitolo precedente, non son stati del tutto soddisfacenti e, quindi, li si è ritenuti poco affidabili per l'interpretazione.
Tuttavia, si riporterà nel testo principale il profilo Georadar della linea 2 in quanto si è ritenuto utile per inquadrare l'ipotetica conduttura sotterranea assieme a quella della linea 3.

Successivamente si passa all'argomento inerente ai risultati delle indagini MIP e campionamento delle acque sotterranee. Per questa parte è stato scelto di mostrare solamente le mappe areali sulla distribuzione delle massime concentrazioni totali dei contaminanti calcolate per diverse profondità tratte dal rapporto della WSP (Torin L. et al., 2021) con le linee delle indagini geofisiche.

Infine, verranno considerati, oltre a quelli della linea 2 e 3, uno dei profili GPR costituenti la griglia e due lineari non coincidenti con le linee ERT per mostrare delle evidenze sulla possibile presenza della conduttura.

Tuttavia, ci si tiene a precisare che i risultati delle indagini geofisiche son stati più utilizzati per interpretare e mostrare le caratteristiche degli strati in relazione alle loro proprietà elettriche e solo secondariamente per vedere un qualche riscontro con i risultati geochimici.

## *6.1 Visualizzazione ed interpretazione dei profili geofisici*

Prima di descrivere la relazione tra le sezioni ERT e GPR sovrapposte e i possibili strati, è importante precisare che i profili di resistività son stati ottenuti tenendo conto della medesima scala naturale per i valori di resistività in [Ω·m] così da consentire meglio il confronto tra le differenti sezioni.
I possibili limiti stratigrafici son stati tracciati in base ai cambiamenti di resistività e all'andamento delle iperboli di riflessione (linea nera tratteggiata). La linea azzurra tratteggiata si riferisce al livello della tavola d'acqua che è stato possibile disegnarlo anche grazie ai valori sulla sua profondità registrati e forniti dai sondaggi considerati.

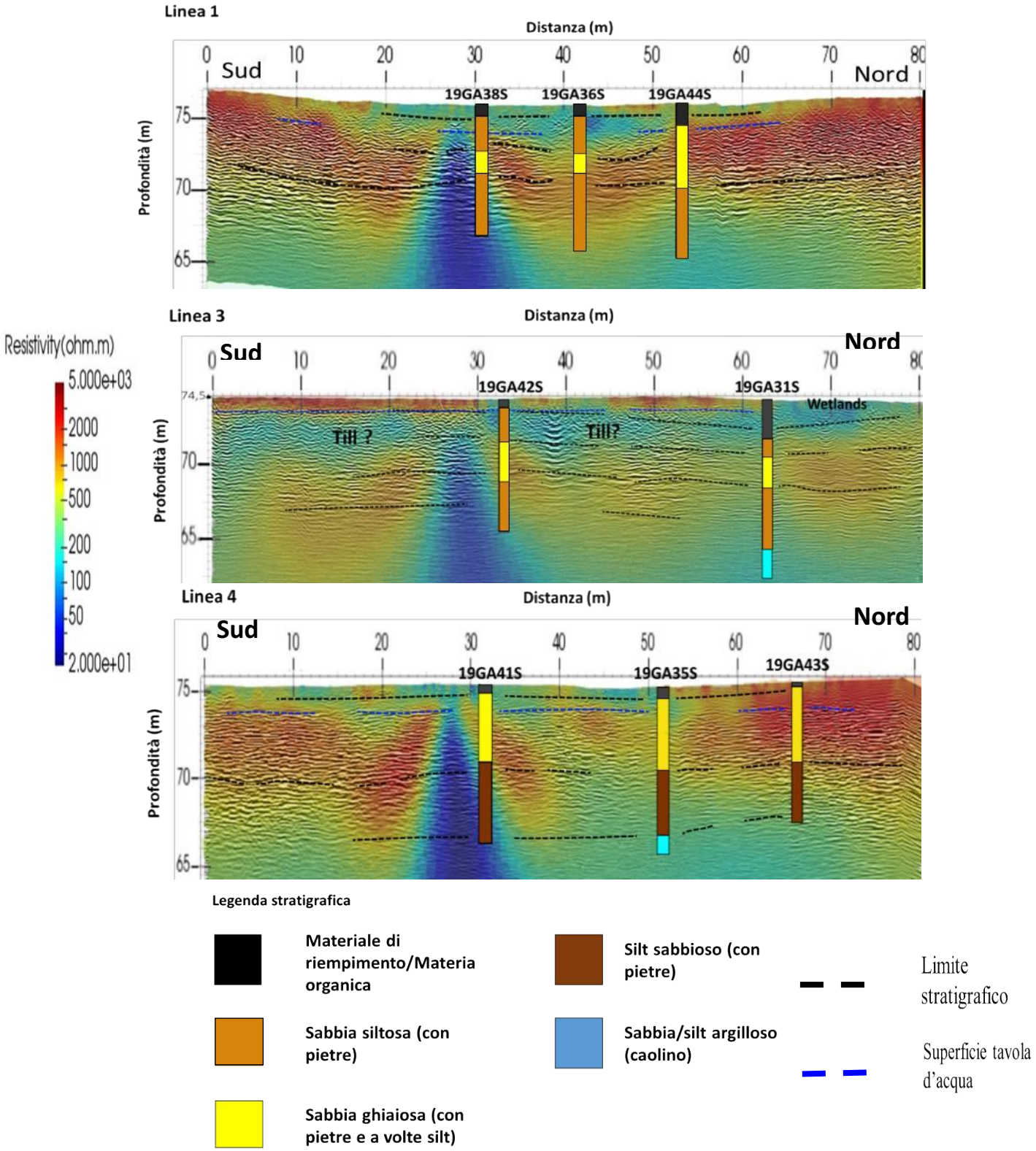



*Figura 6.0: Sezioni finali ERT e GPR sovrapposte della linea 1,3 e 4 confrontate ed interpretate con i risultati schematizzati dei sondaggi stratigrafici.*

Una possibile considerazione generale che appare a prima vista dalle tre sezioni è la presenza di un'evidente fascia centrale con valori più elevati di resistività accompagnata da nitide iperboli di riflessione mentre nella parte al top e soprattutto al fondo i primi sembrerebbero diminuire e le seconde tenderebbero ad attenuarsi. In realtà, nella parte più superficiale son evidenti altre zone in cui è possibile vedere significativi valori resistività oltre che chiare riflessioni, soprattutto nella linea 3.

Inoltre, è possibile inquadrare la strana anomalia a forma di cono con importanti valori di conduttività. Questa è possibile che sia dovuta al materiale costituente la *pipeline* (probabilmente acciaio o ferro) sepolta e situata vicino all'edificio come accennato prima e nel capitolo 2. Evidenze della sua presenza verranno mostrate successivamente come detto all'inizio.

## *6.2 Caratteristiche degli strati e proprietà elettriche*

Complessivamente son stati interpretate 4 tipi litologie: materiale di ricoprimento e materia organica, sabbia siltosa o silt sabbioso con a volte ghiaia e pietre, sabbia ghiaiosa con pietre e sabbia o silt argilloso. Da precisare che il secondo nell'elenco è stato considerato nelle linee 1 e 3 come un unico strato anche se si ripete nella sequenza stratigrafica ad eccezione della 4 a cui si è conferito un altro tipo di interpretazione risultando piuttosto in un netto contrasto tra una sabbia e un silt.

### *6.2.1 Materiale di riempimento e materia organica*

A cominciare dall'alto verso il basso, si è potuto intravedere un primo strato superficiale di spessore variabile con profondità massima raggiunta su circa 2 m nel sondaggio 19GA31S della linea 3. Questo sarebbe incluso all'interno di quella che è stata intesa come la zona insatura secondo il modello concettuale del sottosuolo, già nominato nel capitolo 2 (vedi ***appendice A***), e le profondità della tavola d'acqua riscontrate nei sondaggi considerati. Tale strato sarebbe costituito da un materiale di riempimento assieme a della sabbia contenente materia

organica. Più precisamente, secondo quanto riporta la descrizione proposta nei vari sondaggi da parte della società Golder, il primo corrisponderebbe a *concrete*, a volte mattoni oppure a grossi blocchi o semplicemente a della sabbia grossolana che si pensa sia derivato dalla sponda del fiume Helge in quanto visto come barriera in caso di esondazione mentre la seconda molte volte è rappresentata dalla presenza di radici (in svedese *Rötter*) oppure generalmente indicata col termine svedese *Organiskt*, ossia qualcosa di biologico. Considerando i 3 profili, ciò che potrebbe giustificare la sua provenienza da punti limitrofi al fiume, è la sezione della linea 3 che si trova proprio in corrispondenza del fiume stesso. Essa mostrerebbe, infatti, un'evidente zona caratterizzata da elevati valori di resistività nella parte più a Sud dello stendimento anche se è possibile vederne un'altra a metà circa tra i due sondaggi illustrati. Ad un materiale di riempimento è solitamente, ma non esclusivamente, associato un significativo valore di resistività che in tal caso, secondo la scala riportata, corrisponderebbe a più di 2000 Ω·m. Un altro motivo per cui si può pensare che questi alti valori di resistività siano tipici di un tale materiale, è il forte contrasto con una più bassa resistività che spesso è facilmente intravedibile per via della presenza di materiali sottostanti più fini (ad es. silt, argilla o semplicemente sabbia) o appunto ricchi di materia organica. In particolare, considerando la parte più a Nord (a circa 70 m da Sud) sempre del profilo della linea 3, è molto evidente un importante spessore di materiale altamente conduttivo (50 – 100 Ω·m). Si pensa che questo sia dovuto alla presenza di una zona fortemente paludosa (*wetlands*) o ricca di vegetazione, oppure al fatto che si incominci ad avere sedimenti saturati al di sotto della tavola d'acqua. In presenza di quest'ultimo, la resistività diminuirebbe perfino a valori attorno a 100 Ω·m rispetto a quello che ci aspetta dagli standard di una sabbia normale (vedi *Figura 4.1* nel capitolo 4).
Dal punto di vista del segnale GPR, quest'ultima parte molto poco resistiva apparirebbe abbastanza attenuata da far capire come la possibile presenza di materia organica o di materiale fine (ad es. una sabbia fine siltosa appartenente al successivo strato sottostante) possa incidere nelle riflessioni da renderle quasi invisibili o, se non altro, mancanti.

### *6.2.2 Sabbia siltosa, sabbia ghiaiosa, sabbia ghiaiosa e siltosa o silt ghiaioso e sabbioso (con pietre)*

L'interpretazione dello strato sottostante al precedente ha avuto molte complicazioni di cui si è consapevoli che potrebbe non essere del tutto corretto. Nella sezione della linea 4 si è deciso di considerarlo come un'unica sabbia ghiaiosa con a volte la presenza di silt e di pietre. Lo stesso discorso vale per l'orizzonte sottostante ad esso dove però si avrebbe una prevalenza del silt. Oppure, come è stato interpretato invece nelle altre due sezioni, si mette in evidenza uno strato che secondo la descrizione dei sondaggi appariva il più delle volte come sabbia con sola ghiaia in presenza di pietre, senza la componente siltosa. A questo son stati associati valori di resistività più elevati (> 2000 Ω·m) che caratterizzano la parte più centrale della sezione delle linee 1 e 3. L'unica eccezione è stata vista per il sondaggio 19GA44S della linea 1 in cui l'orizzonte di sabbia ghiaiosa prenderebbe il posto di quella che è la sabbia siltosa (a volte con pietre) soprastante visibile negli altri due sondaggi 19GA36S e 19GA38S anche se è possibile vederlo anche nei sondaggi 19GA31S e 19GA42S della linea 3. Per quanto riguarda a quest'ultimo orizzonte, comparirebbe sia al top che sotto allo strato di sabbia ghiaiosa centrale. Questo per la presenza di una diminuzione di resistività rappresentata da valori tendenti ad andare sotto i 1000 Ω·m, il che sarebbe ragionevole per una sabbia con una certa frazione di silt. La stessa considerazione la si è fatta anche per il silt ghiaioso e sabbioso sottostante della linea 4, mentre per la soprastante sabbia ghiaiosa e siltosa si nota una transizione da resistività simili a quelli della sabbia con sola ghiaia a resistività minori attinenti a quello sottostante del silt e, quindi, da circa 1000 Ω·m a valori estremamente bassi sui 100 – 200 Ω·m. A proposito di tale livello di conduttività, nella linea 3 si nota chiaramente un importante spessore che interessa lo strato della sabbia siltosa e che tenderebbe a mantenersi per tutto lo stendimento. Secondo quanto riporterebbe una descrizione relativa al sondaggio 19GA32S che sarebbe compreso tra i due sondaggi mostrati della linea 3 ma che non è stato

scelto in quanto non avente una litologia compatibile con quest'ultimi, si avrebbe a che fare con del till sabbioso in presenza di pietre. In generale, è difficile conferire dei precisi valori di resistività $\rho$ ad un till perché può contenere di tutto, da frazioni di sabbia, silt e argilla a rocce oltre che a frammenti di pietra o massi. Per cui la sabbia siltosa con pietre rappresentata nei sondaggi 19GA42S e 19GA31S potrebbe tranquillamente far parte di un till. Si potrebbe dedurre, quindi, che possa esserci sia sabbia derivata dalla sponda del fiume Helge che dal ghiacciaio che aveva interessato la zona in passato, formando così un insieme delle due possibili provenienze.
Per quanto riguarda alla risposta GPR, l'attenuazione sembra farsi più sentire verso la parte soprastante e sottostante con una sabbia siltosa rispetto allo strato centrale della sabbia ghiaiosa con pietre che risulta invece caratterizzato maggiormente da evidenti iperbole di riflessione.

### *6.2.3 Argilla (caolino)*

In tutte e tre le sezioni, al di sotto degli orizzonti precedenti, è chiaramente visibile un possibile strato più profondo contraddistinto da una evidente conduttività e attenuazione. Secondo quanto è descritto nel rapporto svedese (Torin L. et 2021) e nei campioni ottenuti dai sondaggi stratigrafici verrebbe riconosciuto come caolino. In realtà, verrebbe più correttamente definito come un sedimento contenente una grande quantità di caolino con qualche volta la presenza di sabbia e silt, poco denso, non omogeneo, con alcune parti permeabili e giacente al di sopra dell'ipotetico bedrock (vedi lo schema delle aree di proprietà in ***appendice A***). Come già accennato nell'inquadramento geologico del capitolo 2, l'unica chiara e sicura informazione che conferma la sua presenza sarebbe stata vista nel sondaggio 19GA31S lungo la linea 3 a circa una profondità di 12 m anche se si ipotizza che si arrivi perfino a 30 m. Anche nel sondaggio 19GA35S della linea 4 comparirebbe il caolino ma l'informazione non è così sicura come lo è stato, invece, per l'altro sondaggio. Tuttavia, valori di resistività dell'ordine di circa tra i 100 e i 200 Ω·m sarebbero tutto sommato abbastanza comprensibili. In realtà, secondo gli standard di riferimento, i valori tenderebbero ad essere un po'

più elevati. Questo potrebbe essere dovuto appunto alla presenza di altro materiale come sabbia o silt. Dove si avrebbero, invece, maggiori conduttività potrebbe essere legato alla presenza di acqua in delle possibili fratture presenti, il che potrebbe andar d'accordo con la descrizione vista in precedenza riguardo alle parti più permeabili dei sondaggi.
Considerando l'attenuazione che mostra il segnale GPR è possibile confermare che si tratti di un sedimento molto fine. Quel che ci si domanda è se tale attenuazione possa essere dovuta anche ad un possibile accumulo di contaminante biodegradato per aver incontrato uno strato più impermeabile. Utili evidenze di quest'ultima osservazione le si potrebbero considerare in riferimento ai risultati sulle concentrazioni dei contaminanti provenienti dei sondaggi geochimici.
Comunque, non vi è alcuna certezza che si tratti proprio di un caolino e fino a che profondità arrivi. Però, dai risultati geofisici la presenza di un materiale molto fine e un silt o una sabbia fine argillosa potrebbe essere una considerazione più che ragionevole.

### *6.3 Distribuzione dei contaminanti*

Il risultato della distribuzione dei contaminanti nel sottosuolo si basa principalmente su due tipi di misurazioni, campionamento delle acque sotterranee attraverso tubi di campionamento delle acque sotterranee e sonde MIP assieme ai loro sensori di fotoionizzazione PID accennati nel capitolo 4.
Da precisare che ciascuna mappa è stata tenuto conto in funzione della profondità rispetto al piano campagna. In particolare, ci si riferisce a valori che son stati misurati per la zona insatura (0.0 – 1.5 m), satura intermedia (1.5 – 4.0 m) e satura profonda (> 4 m) già considerate per la descrizione stratigrafica del sottosuolo nell'inquadramento geologico (vedi capitolo 2).
Le mappe dei risultati provenienti da tali metodologie son serviti per tre scopi:

1. Ottenere una complessiva panoramica della distribuzione dei contaminanti rispetto alle caratteristiche litologiche;

2. Confrontare i risultati delle sonde MIP e quelli delle acque sotterranee;
3. Confrontare i risultati delle indagini geofisiche sovrapposte con i risultati MIP e acque sotterranee.

### *6.3.1 Visualizzazione dei risultati MIP*

La mappa seguente in *Figura 6.1* prese dal rapporto WSP (Torin L. et al. 2021), mostra i massimi valori di concentrazione misurati per ciascuna sonda MIP assieme alle linee ERT e GPR realizzate durante la campagna d'indagini.

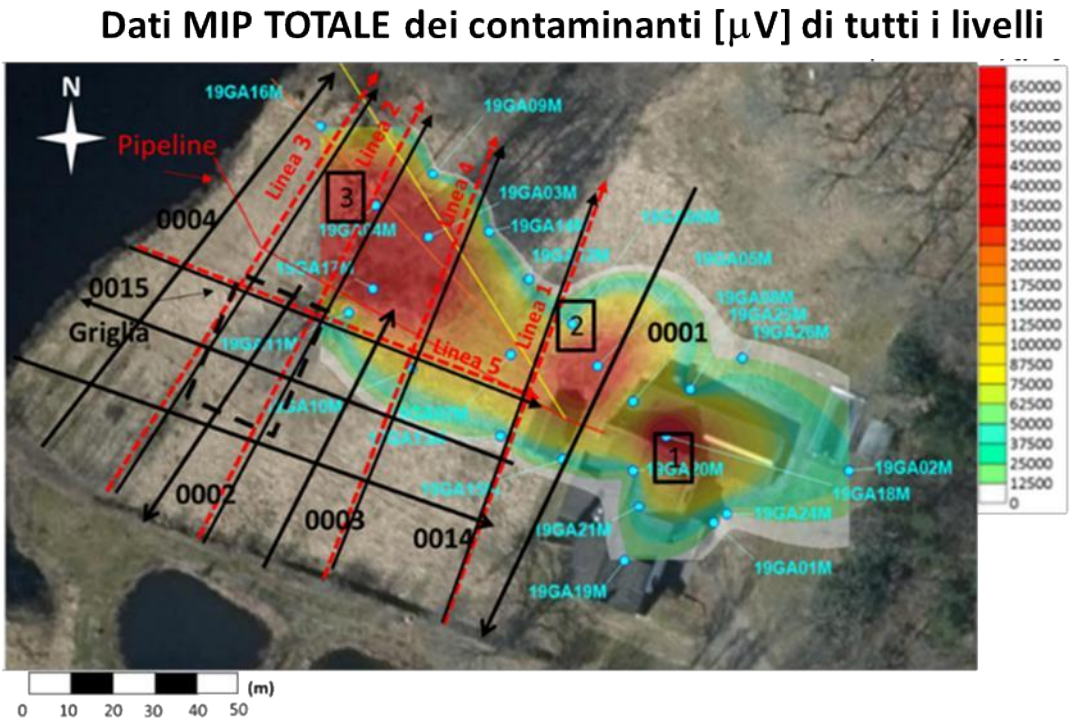



*Figura 6.1: Mappa areale dei risultati dei dati MIP assieme alle linee dei profili geofisici eseguiti sul campo. Le cifre corrispondono alla nomenclatura delle medesime linee. In particolare, quelle incorniciate si riferiscono alle aree con i più alti valori totali dei contaminanti calcolati per tutte le profondità (immagine modificata e tratta da Torin L. et al, 2021).*

Sulla base dei dati MIP le informazioni che si possono estrarre sono circa la distribuzione dei contaminanti con la profondità che si può ritenere utile se confrontata con le caratteristiche geologiche del sottosuolo secondo i sondaggi stratigrafici in prossimità dei vari punti corrispondenti alle sonde MIP (serie

19GAXXM di color verde-mare) in cui si son rilevati i valori di $\mu V$ da parte del sensore utilizzato (in tal caso il PID) che son derivati dalla concentrazione di quel contaminante.
A prima vista, si possono riconoscere 3 aree in cui sembrerebbe esserci stata una maggior diffusione del contaminante. Queste coinciderebbero con quelle 3 cosiddette *aree di proprietà* secondo l'idea di un modello concettuale per la caratterizzazione del sito riportato nell'***appendice A***.
Queste 3 zone son state indicate con l'apposito numero in *Figura 6.1* e son state definite come segue:

1) **Area in corrispondenza dell'edificio;**
2) **Area tra l'edificio e il fiume;**
3) **Area in prossimità del fiume.**

La prima non è stata tenuta conto in quanto non interessata dagli array dell'indagine geofisica.
Come introdotto precedentemente, i valori son stati ricavati a diverse profondità. Questi son risultati elevati sia vicino alla superficie che in profondità, in particolare nell'area a metà strada rispetto al fiume in prossimità della sonda 19GA04M che 19GA03M. Secondo il rapporto (Torin L. et al., 2021) la prima ha mostrato dei picchi già alla profondità di 0.8 m. Questi punti elevati già in superficie giacerebbero lungo ad una fossa (linea arancione in figura) in cui, secondo quanto riporta il rapporto svedese (Torin L. et al., 2021), si pensa che i contaminanti siano stati rilasciati oppure trasportati dall'edificio verso il fiume prima di penetrare nel sottosuolo. Il secondo, invece, ha registrato i più alti valori da 1.5 m fino a circa 4 m. Per quanto riguarda alla situazione a maggiori profondità, si prende in considerazione la sonda 19GA17M con significative misure attorno ai 7.5 m. Un'ultima importante diffusione la si avrebbe più in prossimità dell'edificio alla sonda 19GA05M che secondo il rapporto (Torin L. et al., 2021), occuperebbe un importante spessore di circa 5 m.

### *6.3.2 Visualizzazione dei risultati dei metodi di campionamento acque sotterranee*

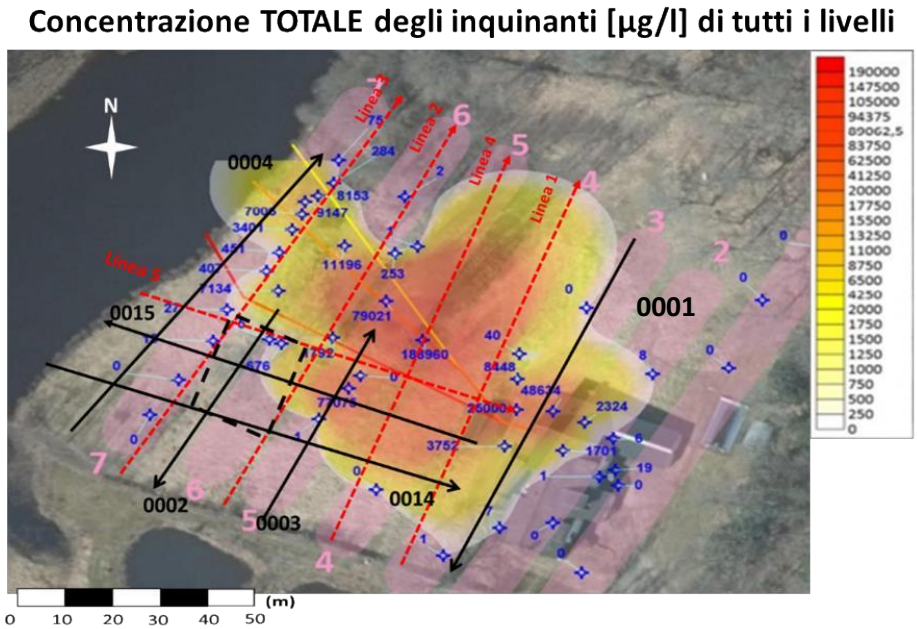



*Figura 6.2: Mappa areale dei risultati dei dati del campionamento delle acque sotterranee assieme alle linee dei profili geofisici eseguiti sul campo. Le cifre in blu corrispondono ai valori delle concentrazioni totali [µg/l] dei contaminanti calcolate per tutte le profondità a cui si trova il filtro (immagine modificata e tratta da Torin L., 2021).*

La mappa soprastante mostra la distribuzione delle concentrazioni dei contaminanti dei valori di concentrazione totali in *µg/l* degli idrocarburi alogenati misurati in corrispondenza di ciascun filtro del piezometro a quella specifica profondità (vedi ***appendice B***).

Secondo quanto riporterebbe il rapporto (Torin L. et al. 2021), dallo studio sul contenuto totale dei solventi clorurati eseguito a differenti profondità è emerso che per ciascun pozzo i livelli più elevati di contaminazione nelle acque sotterranee siano stati riconosciuti nel top della zona delle acque sotterranee, ossia tra 1.5 e i 4 m di profondità nella parte centrale dell'area. In più, è possibile vedere una certa demarcazione sia a Nord che a Sud di ciò che rappresenterebbe il plume di contaminante anche se sarebbero necessarie ulteriori informazioni per

poterne essere sicuri.

### *6.4 L'anomalia osservata alla progressiva 30 metri*

Come già introdotto all'inizio, in tutte e tre le sezioni sopra riportate è chiaramente visibile una forma a cono di un color blu intenso ad indicare valori di resistività molto bassi (20 – 50 Ω·m). Si pensa che il motivo di tali valori siano riferiti al materiale di rivestimento della possibile conduttura che serviva per il trasporto del liquido chimico. Non si è certi di che materiale si tratti ma si presume che sia acciaio o ferro considerati i loro alti valori di conduttività anche se dipende molto dalla temperatura (ad es. la $\sigma_{ferro}$ a 20 °C è $1{,}00 \times 10^{7}$ S/m).
In seguito son state considerate alcune sezioni GPR a frequenza di 170 MHz senza tener conto dello step del processing della *migration* per risaltare di più le iperboli di riflessione che potrebbero riferirsi alla condotta oltre ad a due profili della griglia che mostrerebbero una comune attenuazione proprio in prossimità di dove sarebbe lo strano cono blu tre profili principali di *Figura 6.0*. In particolare vengono segnati dei pallini rossi ad indicare la posizione in cui è risultata l'alta conduttività nei profili GPR della linea 2 e 3 corrispondente a dove passerebbe la traccia della condotta (*Figura 6.3*).
Inoltre, vengono mostrate successivamente delle sezioni GPR di una linea della griglia (profilo 0004) e di due non coincidenti con quelle della ERT (profili 0002 e 0003) includenti un'interessante effetto sul segnale in termini di attenuazione oltre che di ampiezza dello stesso vista con lo step della trasformata di Hilbert nella sezione della griglia GPR. Nello specifico, vengono riportate le mappe elaborate col software Geolitix con la corrispondente localizzazione del punto in cui è stata individuata l'anomalia (cerchio rosso tratteggiato) oltre alla linea riferita a dove passerebbe la conduttura (linea rossa tratteggiata) (*Figura 6.5, 6.6 e 6.7).*

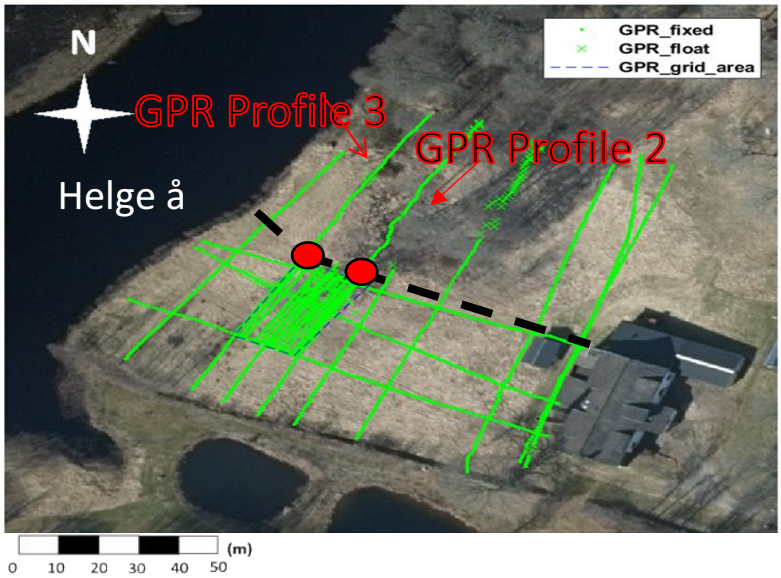
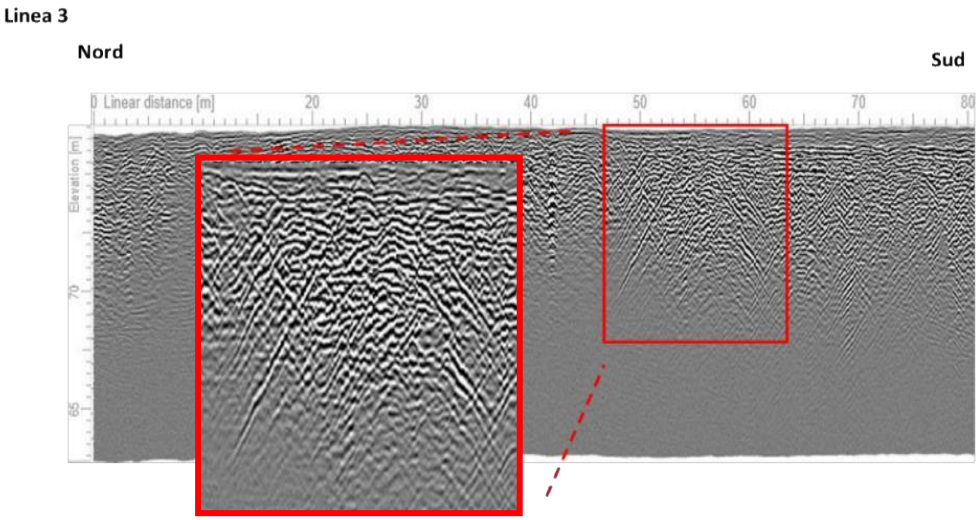



*Figura 6.3: Localizzazione dei punti della strana anomalia a circa 30 m da Sud della linea 2 e 3 GPR in corrispondenza dell'ipotetica traccia della pipeline (linea nera tratteggiata).*



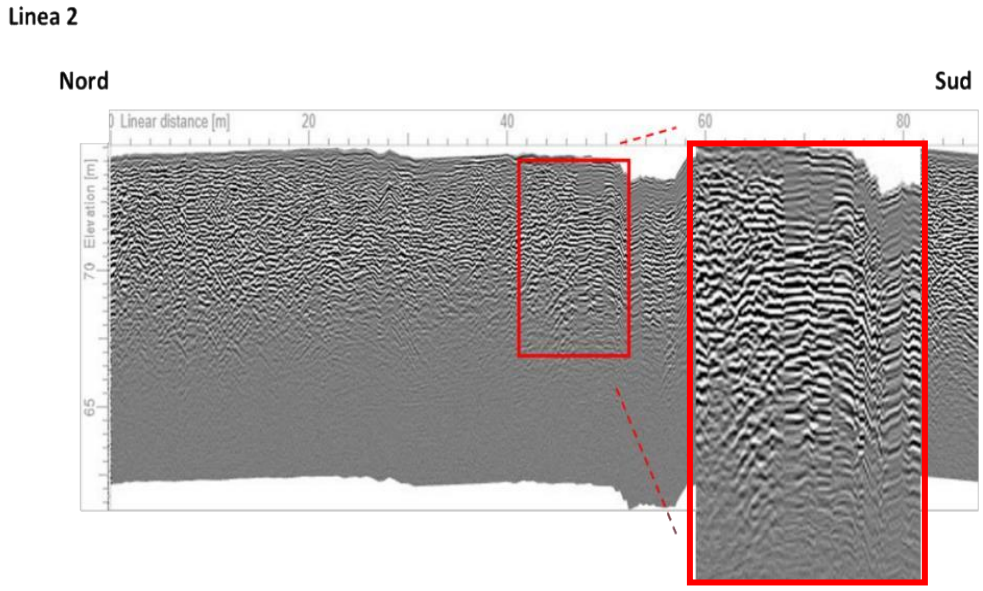
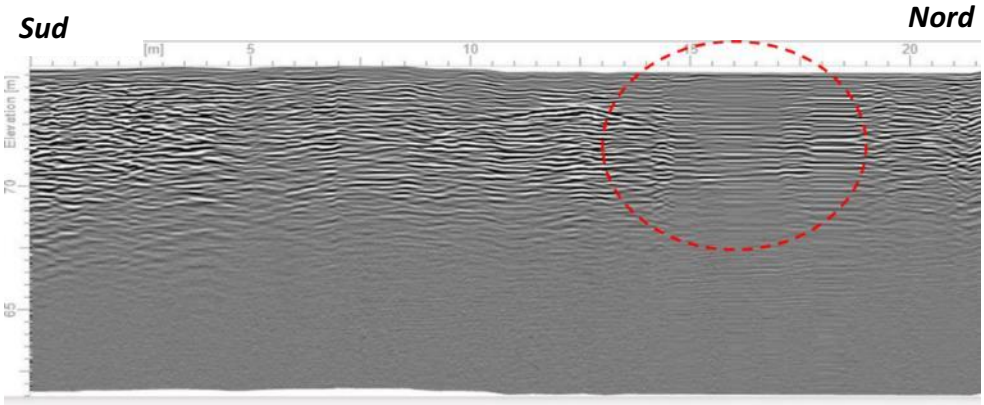



*Figura 6.4: Mappa della localizzazione dei punti inerenti all'anomalia vista nelle tre sezioni iniziali e relativa sezioni della linea 2 e 3 GPR a 170 MHz con ingrandite le iperboli di riflessioni per indicare la possibile presenza della conduttura (tratta e modificata da Geolitix, 2020).*

*Figura 6.5: Mappa con localizzazione del punto dell'attenuazione visibile lungo la linea 0004 della griglia GPR ottenuta tramite il software Geolitix (tratta e modificata da Geolitix, 2020).*



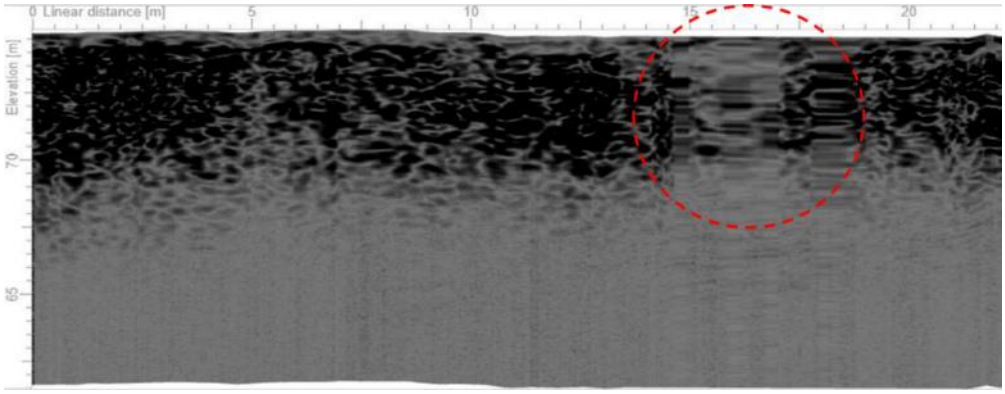
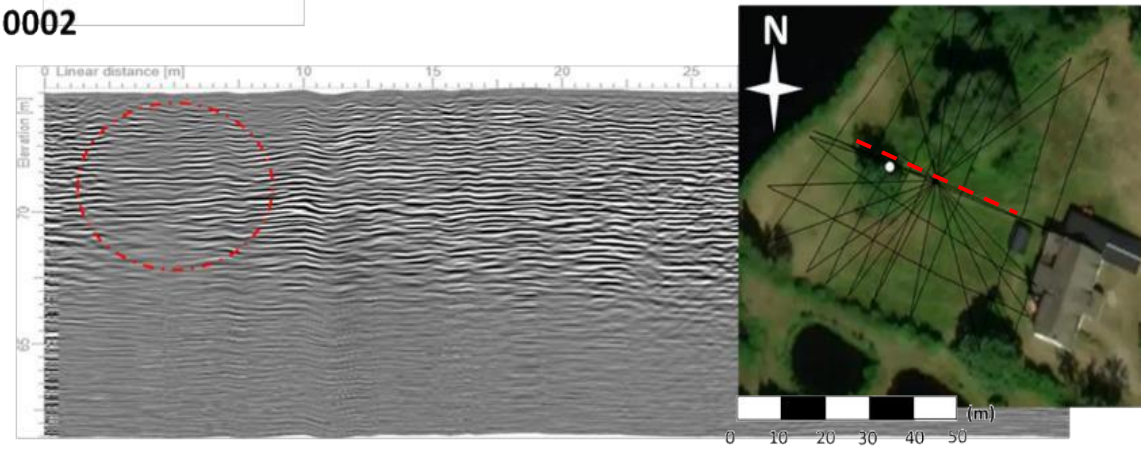



*Figura 6.6: Sezioni GPR 170 MHz della linea 0004: in alto senza l'applicazione della trasformata di Hilbert; in basso con la sua applicazione (tratta e modificata da Geolitix, 2020).*

**Linea GPR 0002**




**Linea GPR 0003**

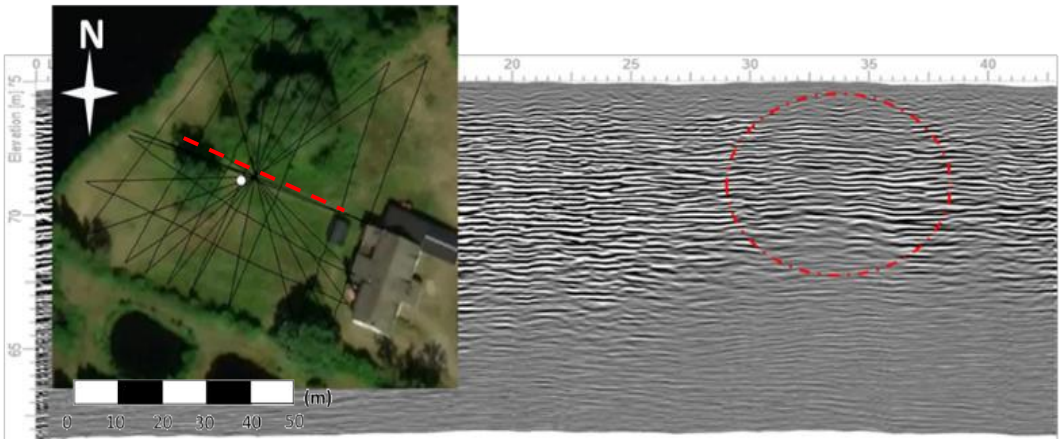



*Figura 6.7: Sezione e mappa delle linee 0002 e 0003 con indicato il punto in cui risulterebbe la stessa attenuazione delle linee a griglia GPR (tratta e modificata da Geolitix, 2020).*

# 7. *Discussione e considerazioni finali*

I metodi geofisici della Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) e del GeoRadar (GPR) son stati utilizzati nel sito contaminato di Sibbarp (Svezia) con lo scopo principale di interpretare e riconoscere la struttura geologica del sottosuolo tramite *imaging* 2D. Sono stati allo scopo impiegati i software ResIpy e Geolitix. Alle indagini geofisiche si sono integrate le informazioni derivate dai sondaggi stratigrafici geochimici (MIP, PID e concentrazioni nelle acque sotterranee), che son hanno permesso di definite la distribuzione della presenza dei contaminanti.

Partendo dal confronto tra profili ERT e GPR sovrapposti ai dati provenienti dai sondaggi stratigrafici messi a disposizione dalla società Golder, è stato possibile caratterizzare la struttura geologica del sottosuolo. In particolare, in base ai valori di resistività elettrica, all'andamento delle iperboli di riflessione radar e alla descrizione riportata dai sondaggi considerati, si è potuto delineare i confini litologici, mostrando in particolare la presenza di 3-4 principali corpi stratigrafici. Nella parte superiore si è potuto riconoscere uno strato superficiale contenente materiale sabbioso organico evidenziato da modeste resistività e segnale radar piuttosto attenuato, talora intervallato da materiali antropici di riempimento rappresentati invece da elevati valori di resistività e una minor attenuazione del segnale radar.
Al di sotto degli strati superficiali la struttura del sito è risultata di più complessa determinazione, data la elevata eterogeneità laterale presente. Appare evidente la presenza di un orizzonte di materiale più grossolano, come sabbia ghiaiosa, per via dei più alti valori di resistività e le maggiori riflessioni radar, confinato sia sopra che sotto da un materiale invece più fine, come la sabbia siltosa, caratterizzato da resistività più basse. L'eterogeneità del sito è confermata dalle stratigrafie di sondaggio (ad es. il 19GA32S) che riportano la presenza di till sabbioso o siltoso a volte con pietre, ovvero una alternanza di sabbia siltosa e ciottoli tipica di depositi glaciali. Se si considerano però i valori di resistività elettrica, è difficile attribuire ad un till specifici intervalli, in quanto

comprenderebbe quelli per la sabbia, la ghiaia e addirittura l'argilla (vedi *Figura 4.1*). A questi depositi si alternano anche depositi tipicamente fluviali, quali il materiale di ricoprimento della linea 3 in cui sarebbero presenti anche grandi massi oltre che ghiaia, che si ritiene derivanti dalla sponda del fiume nel momento di una sua possibile esondazione. Si può dedurre quindi che il corpo centrale delle sezioni sia generalmente costituito da depositi fluviali e morenici mischiati tra di loro.
Per quanto riguarda la parte basale, la suggerita presenza di un sedimento sabbioso e/o siltoso con la prevalenza di argilla sembrerebbe concordare con i risultati geofisici. Si nota infatti una notevole diminuzione di resistività ed un incremento di attenuazione del segnale radar, tipico di depositi argillosi.

In prima conclusione, è possibile affermare dunque che la documentazione dei suoli riportata dalle tecniche geognostiche eseguite in passato da parte della società Golder, si integri bene con le risposte delle sezioni geofisiche ERT e GPR sovrapposte.
In riferimento alla parte relativa alla distribuzione dei contaminanti, non si son riscontrate nelle indagini geofisiche delle evidenze certe della loro presenza. Dove sarebbero state rilevate le più alte concentrazioni totali dei contaminanti, i profili delle tecniche geofisiche sembrano non mostrare alcuna anomalia, sia in termini di resistività elettrica che di attenuazione. In letteratura si sono notate sia diminuzioni dei valori di resistività legati alla degradazione del contaminante, sia aumenti di resistività elettrica legati a forti concentrazioni del contaminante PCE non degradato. Ad esempio, gli elevati valori di resistività a Nord della linea 4 coincidono con i dati di elevata concentrazione rilevati nei primi 4 m di sottosuolo dalla sonda MIP 19GA03M. Tuttavia, si è in presenza di una sabbia ghiaiosa il che renderebbe difficile l'accumulo del contaminante non degradato data la sua elevata permeabilità. L'unica ragionevole considerazione potrebbe essere che l'inquinante non sia riuscito a penetrare per la presenza sottostante di un materiale più impermeabile come il silt sabbioso del sondaggio 19GA43S.

Da tali osservazioni, si può comprendere dunque che la sola sezione geofisica non sia sufficiente per mappare correttamente gli inquinanti. Al contrario, integrando le informazioni geofisiche con le informazioni geochimiche, è possibile ottenere delle significative indicazioni sia sulla loro concentrazione che distribuzione presenti nei suoli e nelle acque sotterranee e le strutture del sottosuolo.

I risultati di tali indagini hanno consentito di individuare infatti la contaminazione a diverse profondità rispetto alla superficie. In particolare, i sondaggi MIP hanno permesso di inquadrare un'area in vicinanza al fiume con massimi valori di presenza di inquinante nei livelli più superficiali fino a 4 m di spessore, ed altre due zone particolarmente inquinata più verso l'edificio con spessori di 5 m fino a più di 7 m di profondità.
Un'altra interessante osservazione riguarda il confronto tra le mappe dei MIP e delle acque sotterranee. La distribuzione degli inquinanti dei dati delle acque sotterranee differisce parzialmente rispetto a quella ottenuta dai MIP. Ciò potrebbe essere dovuto a tre motivi. Il primo potrebbe essere riferito al fatto che si verifichino degli impedimenti sulla diffusione coinvolti in un processo di dissoluzione e diluizione dei composti organici; il secondo potrebbe riguardare ad alcuni fattori che influenzano la solubilità degli inquinanti nell'acqua, come la temperatura (il valore di solubilità dato nella *Tabella 3.0* è sotto alla condizione standard quando la temperatura è pari a 25 °C). Infine, il terzo potrebbe essere relativo alla dissoluzione nelle acque sotterranee provocata dall'esistenza di altre fasi presenti assieme ai contaminanti. Ad es. se la fase acquosa del DNAPL volatilizza come gas riempiendo i pori del suolo, non rimarrà DNAPL acquoso da essere dissolto nell'acqua (la tendenza di volatilizzare è numericamente descritta dalla legge della costante di Henry della medesima *Tabella 3.0).* In aggiunta alla volatilizzazione, si potrebbe ipotizzare la tendenza del DNAPL ad aderire sulla superficie solida presente nel suolo. Ciò potrebbe consentire al contaminante di non essere coinvolto completamente dal flusso delle acque sotterranee e viceversa.

Infine, si sottolinea la anomalia individuata a circa 30 m da Sud in alcune prospezioni geofisiche considerate. Nelle sezioni della linea 2 e 3 si crede che le iperboli di riflessione radar si riferiscano alla presenza dell'ipotetico oleodotto sepolto che, secondo quanto riporta il rapporto svedese (Torin L. et al., 2021), sarebbe stato rinvenuto a circa 25 m di distanza dalla struttura durante l'esecuzione di uno scavo. A parte considerare la distribuzione delle iperboli, un'altra importante osservazione è l'evidente configurazione a forma di cono altamente conduttiva nelle indagini ERT. Come spiegato nel capitolo 4, un'alta conduttività comporta una forte attenuazione nel segnale GPR. A tal proposito è possibile che l'attenuazione osservata nelle sezioni GPR sia riconducibile all'elevata conduttività del materiale di rivestimento della conduttura. D'altra parte, non è da escludere l'ipotesi che la conduttività e l'attenuazione corrispondente siano dovute ad un sversamento di contaminante degradato per via di una possibile rottura della pipeline.

In conclusione, da tutte queste considerazioni finali descritte è possibile confermare l'efficienza delle tecniche geofisiche ERT e GPR nella caratterizzazione geologica del sottosuolo, soprattutto se integrate a dei sondaggi geognostici. Invece, pur con l'aggiunta di dati geochimici, non son in grado di mappare chiaramente i contaminanti ma possono essere fornite utili indicazioni sulla presenza di condotte come possibile sorgenti della contaminazione.

In riferimento a quanto è riportato nel rapporto svedese della WSP (Torin L. et al., 2021), possibili misure di futuro intervento si riferirebbero allo scavo o alla miscelazione del terreno tramite il ferro zero valente o agenti ossidanti, specialmente per gli strati superiori. Queste due richiedono l'utilizzo di potenti escavatori che potrebbero causare dei problemi per il successivo rilevamento di inquinanti negli strati dei suoli, perfino ad importanti profondità.

A tal proposito, la geofisica potrebbe evitare tale problematica data la sua caratteristica di tecnica non invasiva e ridurre ulteriormente il numero di sondaggi diretti oltre che rendere i costi maggiormente contenuti. Inoltre la geofisica

permetterebbe la caratterizzazione del volume di terreno ritenuto potenzialmente contaminato, senza la necessità di ricorrere ad una sua estrazione attraverso delle perforazioni.

Infine, ai fini del progetto di un piano di bonifica del sito contaminato di Sibbarp, si potrebbe pensare di applicare anche delle indagini geofisiche a scopi di monitoraggio. Ad esempio, in accordo con quanto descritto nel documento IDSS visto nel capitolo 3 del solito rapporto svedese (Torin L. et al, 2021) per stabilire una strategia di monitoraggio, risulta importante la conoscenza della distribuzione della contaminazione nel sottosuolo oltre che nelle acque sotterranee, in quanto possibili vettori di trasporto degli inquinanti. In un tal ambito, la geofisica potrebbe risultare vantaggiosa per controllare nel tempo i processi di decomposizione di alcune forme di prodotti iniettati al fine di ridurre i livelli di contaminazione. L'indagine geofisica ERT e GPR potrebbe garantire infatti di osservare nel tempo stesso possibili cambiamenti delle concentrazioni dei contaminanti in base a delle possibili variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche della porzione di sottosuolo interessato.

# Bibliografia


Angelino A., Di Fiore V., Gargiulo V., Antimo G., Iavarone M., Losanno S., Pelosi N., Di Vettimo P.S., Tarallo D., 2011, *Indagini georadar finalizzate all'individuazione di sottoservizi*, Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, Napoli.

Annan P., 2009, *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*, Ground Penetrating Radar Theory and Applications, p. 4 – 22, Harry Jol, University of Wisconsin, Eau Claire, USA.

ABEM Instrument AB (PDF), 2013 *Terrameter LUND Imaging System*, www.abem.se, versione di Dicembre.

ABEM Instrument AB (PDF), 2016, *ABEM Terrameter LS Toolbox – User's Guide,* Disponibile [Online]: www.abem.se.

Bertini F., 2017/2018, *Applicazioni di Tomografie elettriche di resistività e tecniche di polarizzazione indotta per il monitoraggio di bonifiche ambientali*, Tesi Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova.

Binley, A.M., Kemna, A., 2005. *DC resistivity and induced polarization methods*. In: Rubin, Y., Hubbard, S.S. (Eds.), Hydrogeophysics. Springer, Netherlands, p. 129–156.

Blanchy G., Saneiyan S., Boyd J., Mclachlan P., Binley A., 2020, *ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling*, Computers and Geosciences, Collon P., Grana D., Mueller U.,

Borriello A., 2016/2017, *Verifica della qualità dei dati di tomografia elettrica e relative influenze sui risultati d'inversione*, Dipartimento di Geoscienze, Università degli studi di Padova.

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

Busato L., 2010/2011, *Analisi Comparata di dati GPR da foro acquisiti su un sito contaminato*, Dipartimento di Geoscienze, Università degli studi di Padova.

Celli N.L., 2011/2012, Studio *Ground Penetrating Radar del settore occidentale del ghiacciaio del monte Canin*, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Università degli Studi di Trieste.

Cerilli S., Sebastiani P., 2014, *Relazione indagini elettromagnetiche con GPR (Ground Penetrating Radar) eseguite presso l'area ubicata nel Comune di Roma, impianto semaforico Via C.Colombo - V.le Del Circuito,* ARCHEOGEOS S.n.c., Roma.

Cassidy N. J. (a), 2009, *Eletrical and Magnetic Properties of Rocks*, *Soils and Fluids,* Ground Penetrating Radar Theory and Applications, p. 41-72, Harry Jol, University of Wisconsin, Eau Claire, USA.

Cassidy N. J. (b), 2009, *Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling And Analysis*, Ground Penetrating Radar Theory and Applications, p. 141 – 164, Harry Jol, University of Wisconsin, Eau Claire, USA.

Daily W., Abelardo R., Binley A. & LaBrecque D., 2005, *Electrical Resistance Tomography—Theory and Practice*, Innovation in Near-Surface Geophysics, pp. 576-579, Dwain K. Butler, Exploration Geophysics, Tulsa, Oklahoma.

Dahlin T. & Zhou B., 2006, *Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging*. Near Surface Geophysics, 4, 113-123

Dahlin T. & Leroux V., 2012, *Improvement in time-domain induced polarization data quality with multi-electrode systems by separating current and potential cables*, Engineering Geology, Lund University, Sweden.

EMGeoSci., 2015/2018, *Survey*, Disponibile [Online]: Survey — Electromagnetic Geophysics (geosci.xyz).

E.P.A. (Environmental Protection Agency), 2009. *National Primary Drinking Water Regulations*. In: AGENCY, U. S. E. P. (ed.), U.S.A.

E.P.A. (United States Environmental Protection Agency) (a), 2021, *Membrane Interface Probe (MIP),* Contaminated Site Clean-Up Information, Technology Innovation and Field Services Division, U.S.A.

E.P.A (c), 2016, Parametri di riferimento per il suolo contaminato, Disponibile [Online]: Generella riktvärde (trad. valori guida generali) 2016-07-07 (naturvardsverket.se) [Ultimo accesso 14/01/2022], Svezia.

E.P.A. (Environmental Protection Agency) (b), 2021, *Contaminated Land - What are the trends in contaminated land and their effects on human health and the environment?* Disponibile [Online]: https://www.epa.gov/report-environment/contaminated-land, U.S.A.

E.P.A. (Environmental Protection Agency) (d), 2021, *Contaminated areas in Sweden*, Svezia, Disponibile [Online]: https://www.naturvardsverket.se/en/topics/contaminated-areas/contaminated-areas-in-sweden/.

Gargini A. (I.S.P.R.A), 2015, *Applicazione della caratterizzazione multilivello e del fingerprinting isotopico in acquiferi contaminati da DNAPL*, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali, Università di Bologna.

Geolitix, 2020, *Processing,* Disponibile [Online]: https://www.geolitix.com.

Geo-matching, 2022, *ImpulseRadar CrossOver CO1760 ground penetrating radar*, website: geomatching.com

GEOPROBE-SYSTEMS®. 2018. *MIP (Membrane Interface Probe),* Disponibile [Online]: https://geoprobe.com/mip-membrane-interface-probe [Accesso 12/01 2022].

Gitlab, 2022, ResIpy v.2.2.2, Disponibile [Online]: https://gitlab.com/hkex/resipy

Huling, S. G. & Weaver, J. W. 1991. *Dense nonaqueous phase liquids, Superfund Technology Support Center for Ground Water*, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.

IARC. 2015. *List of classifications in alphabetical order*, Disponibile [Online]: http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsAlphaOrder.pdf [Ultimo accesso: 14/01/2022]

INSURE (Innovative Sustainable Remediation)., 2017, *EQS limit and guideline values for contaminated sites,* Report.

ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2011. *Integrated DNAPL Site Strategy*. IDSS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Integrated DNAPL Site Strategy Team. www.itrcweb.org.

K. K. Roy., 2008, *Potential theory in applied geophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Lumetzberger M., 2014, *3-D and 2-D resistivity and IP mapping of geology and chlorinated aliphatics at Färgaren 3, Kristianstad*, Department of Geosciences and Natural Resource, KU.

Milieu Ltd, Ö., Risk & Policy analysts (RPA) and RIVM, 2017, *Study for the strategy for a nontoxic environment of the 7th Environment Action Programme.* European Commission.

Marin M., 2016/2017, *Monitoraggio geofisico di tecniche di bonifica di siti contaminati*, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.

MSA., 2015, *Photoionization Detectors (PIDs) Theory, Uses and Applications*, The Safety Company, U.S.A.

Naturvårdsverket (trad. E.P.A svedese), 2016, Parametri di riferimento per il suolo contaminato, Disponibile [Online]: Generella riktvärde (trad. valori guida generali) 2016-07-07 (naturvardsverket.se) [Ultimo accesso 14/01/2022]

Oldenborger, G. A., Routh, P. S., & Knoll, M. D. 2005. *Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors*. Geophysical Journal International, 163(1), 1-9.

Palacky, G., 1987. *Resistivity characteristics of geologic targets*. Geosciences Journal, 3, 138-144.

Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S., 2014, *Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation*, Institute of Methodologies for Environmental Analysis, CNR, Italy.

Redman J.D., 2009, *Electrical Properties of Contaminated Rock and Soil,* Contaminant Mapping, Ground Penetrating Radar Theory and Applications, p. 250-253, Harry Jol, University of Wisconsin, Eau Claire, USA.

SGF., 2020, *Campionamento delle acque sotterranee* (tradotto), Disponibile [Online]: Campionamento delle acque sotterranee (in svedese: fororenadeomraden.se), [Ultimo accesso: 16/01/2022].

SGI., 2020, *Areas of espertise-Contaminated areas,* Disponibile [Online]: https://www.sgi.se/en/vagledning--verktyg/fororenade-omraden/

SGU. (a), 2012. Bedrock: 1:50000, Comune di Osby. SGUs Map Generator. Disponibile [Online]: Map generator (sgu.se) [Accesso il 28/10/2021].

SGU. (b) 2012. Quanternary deposits: 1:25000, Comune di Osby. SGUs Map Generator, Disponibile, [Online]: Map generator (sgu.se) [Accesso: 05/02/2022]

SGU., 2020, *Physical planning - Contaminated Areas*, Disponibile [Online]: https://www.sgu.se/en/physical-planning/contaminated-areas/

SGU., 2021, *Sedimenti fluviali di ghiaccio – tracce del fiume di ghiaccio,* Disponibile [Online]: Sedimenti fluviali di ghiaccio – tracce del fiume di ghiaccio (sgu.se).

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff. R.E., 2010, *Applied geophysiscs*, *Second Edition.* Cambridge University Press.

Torin L., Davidsson L., Nilsson M., 2021, *INLEDANDE PROJEKTERING AV NISSES KEMTVÄTT I OSBY (tr. Initial Design of Nisses dry-cleaning facility in Osby),* WSP Environmental Sverige, Sweden.

Vanzetti C., Gianoglio N., Sesia E. (A.R.P.A), 2016, *STUDIO SULLA CONTAMINAZIONE DIFFUSA DA SOLVENTI CLORURATI NELLE ACQUE SOTTERRANEE*, A.R.P.A., Piemonte

Wei H., 2018, *Interpretation of geophysical and geochemical data in a 3D geological model construction of a contaminated site — A case study at Alingsås drying-cleaning facility, Sweden,* Dipartimento di Ingegneria Tekniska Högskola (Università di Lund)

# Ringraziamenti

*Desidero ringraziare per primo il dipartimento di Geoscienze per avermi dato la grande opportunità di compiere l'esperienza erasmus nella cittadina universitaria di Lund in Svezia grazie alla quale ho avuto modo di realizzare il presente lavoro. Ringrazio anche il prof. Jacopo Boaga per la gentile disponibilità e l'aiuto fornito durante tutte le fasi di questo lavoro di tesi nonché il Dott. Matteo Rossi e tutto il team del dipartimento della facoltà di ingegneria di Lund per la pazienza e il tempo dedicatomi oltre ai preziosi suggerimenti che mi hanno permesso di cominciare e completare il lavoro con soddisfazione.*

*Un ringraziamento particolarmente sentito e un abbraccio va alla mia famiglia che, con il suo continuo sostegno e affetto, mi ha consentito di raggiungere finalmente questo traguardo. Non scorderò mai tutti gli innumerevoli incoraggiamenti dei miei genitori prima di un esame e l'enorme pazienza da parte dei miei fratelloni ogni volta che mi mettevo a ripetere ad alta voce per un'interrogazione. Grazie!*

*Non può mancare una riconoscenza speciale ai miei amici più stretti e universitari, grazie per essermi stati vicini di fronte ad ogni difficoltà. Ringrazio anche mio cugino Giovanni con cui ho potuto condividere ogni momento di questo cammino universitario.*

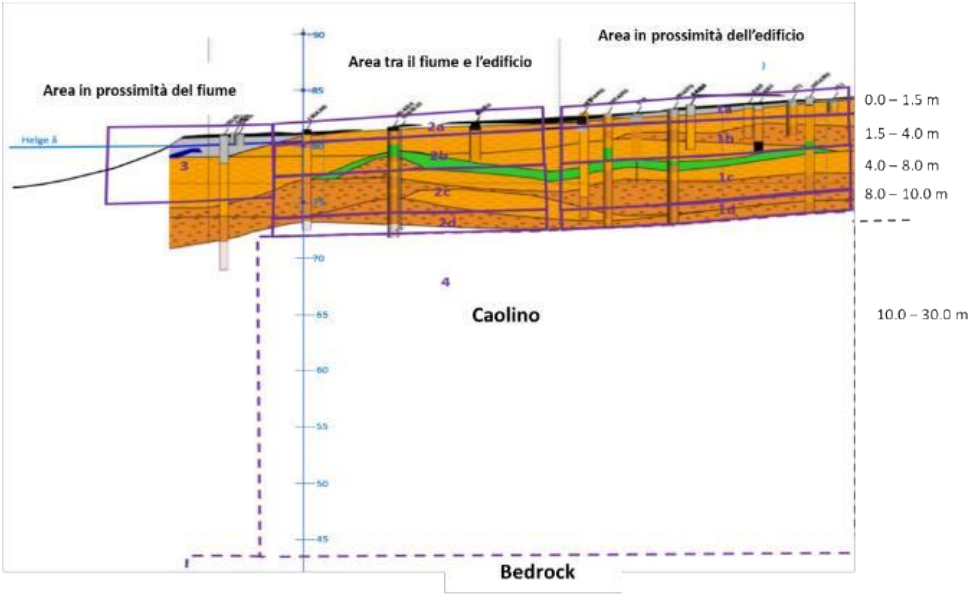
*Un ultimo ringraziamento va anche alla mia cara nonnina che mi ha sempre ascoltato su qualsiasi argomento di cui volevo parlare. Oramai sa un sacco di cose di geologia!*

# Appendici

## Appendice A

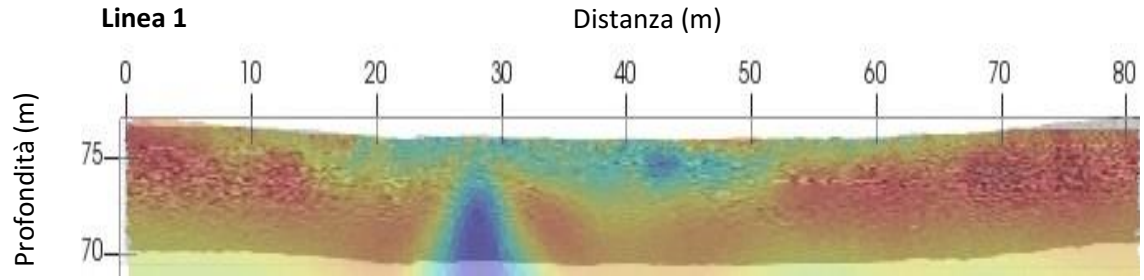
1) **Documentazione fotografica dell'edificio tratta e modificata dal rapporto svedese WSP (Torin L. et al., 2021)**

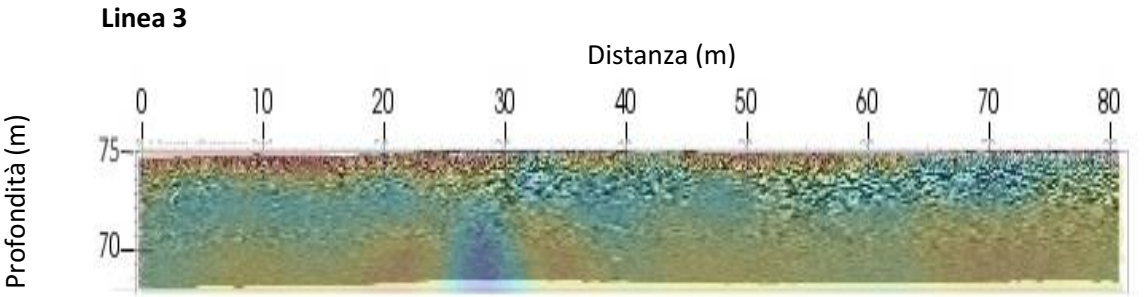
2) **Sezione del modello concettuale delle *aree di proprietà* tratta e modificata dal rapporto svedese WSP (Torin L. et al., 2021); per la leggenda stratigrafica si veda *Figura 2.8*.**

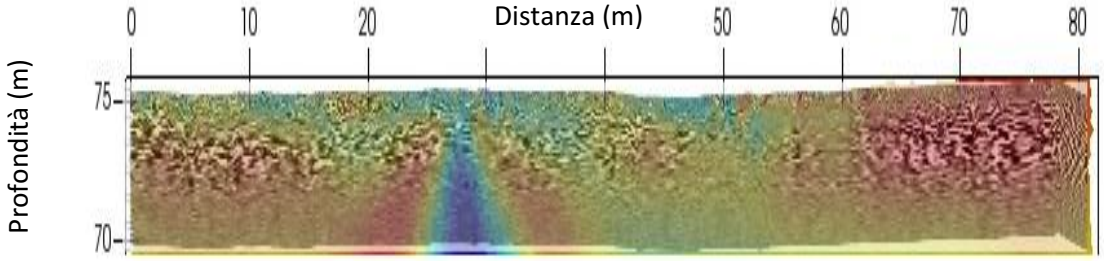



## Appendice B

### 1) Sezioni GPR e ERT 600 MHz sovrapposte



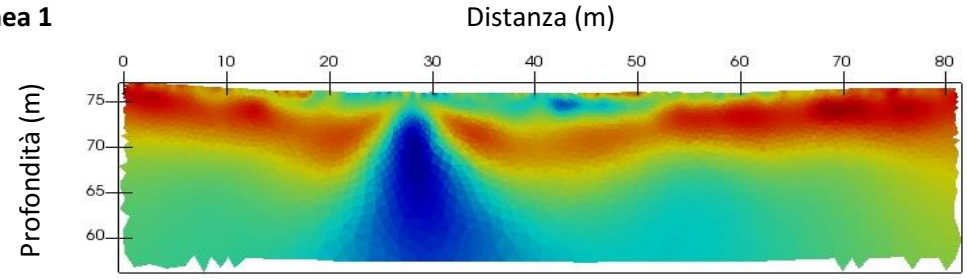





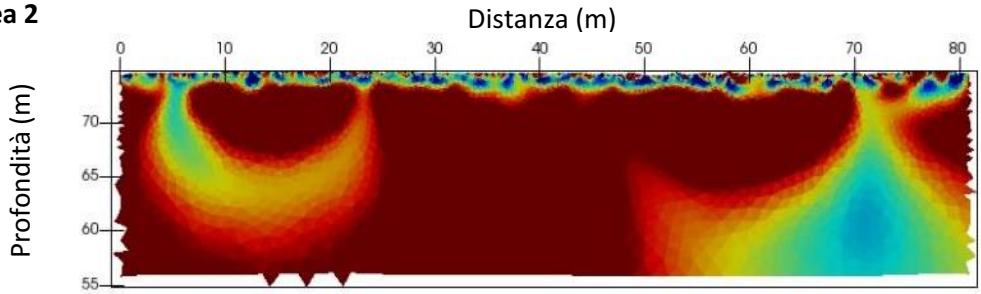

**Linea 4**

## 2) Sezioni ERT

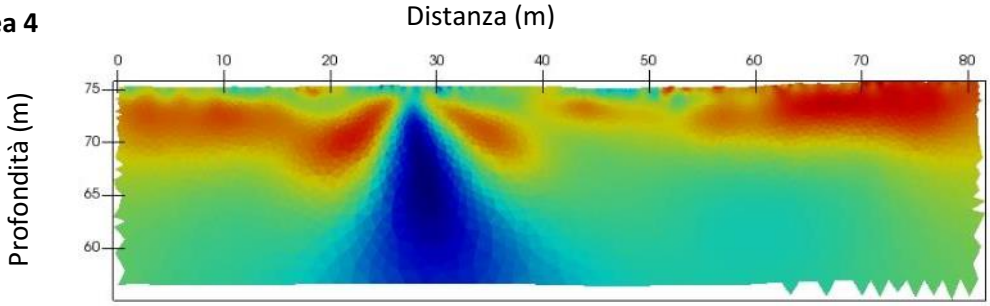
**Linea 1**



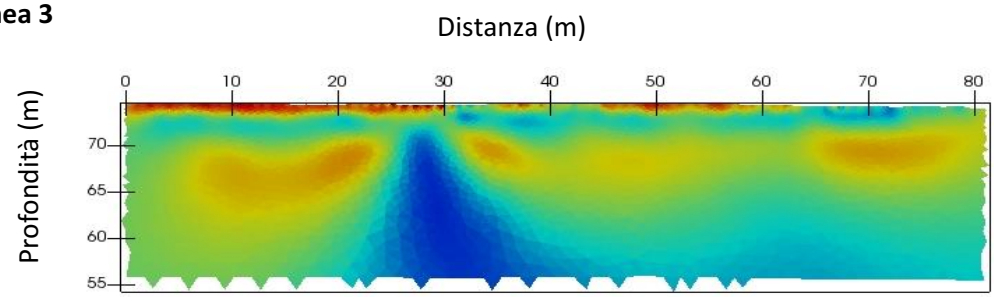

**Linea 2**



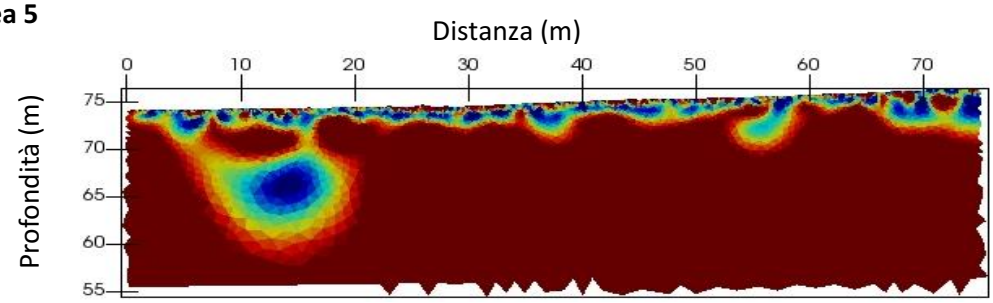
**Linea 4**




**Linea 3**

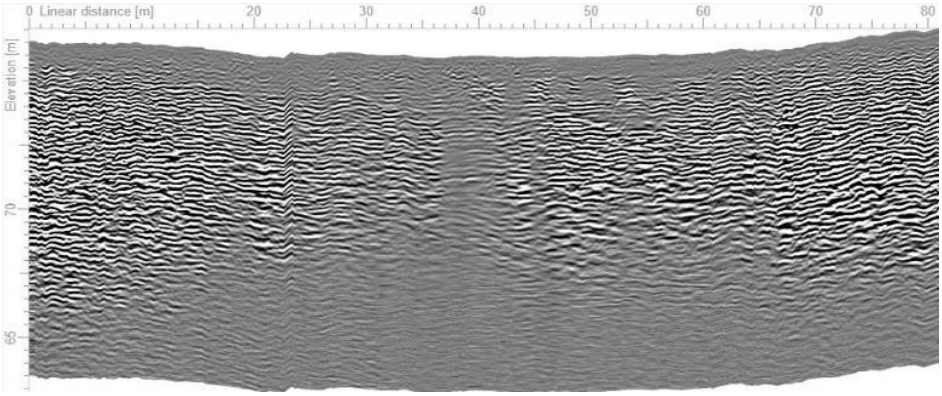



**Linea 5**

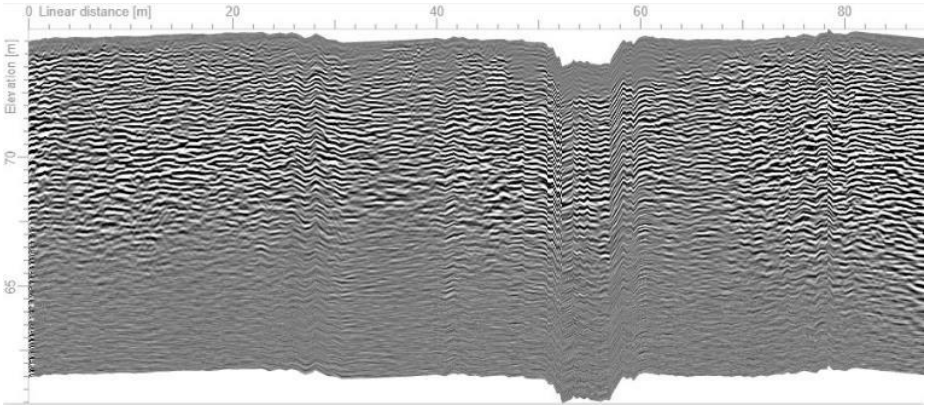


## 1) Sezioni GPR 170 MHz lungo le linee ERT:

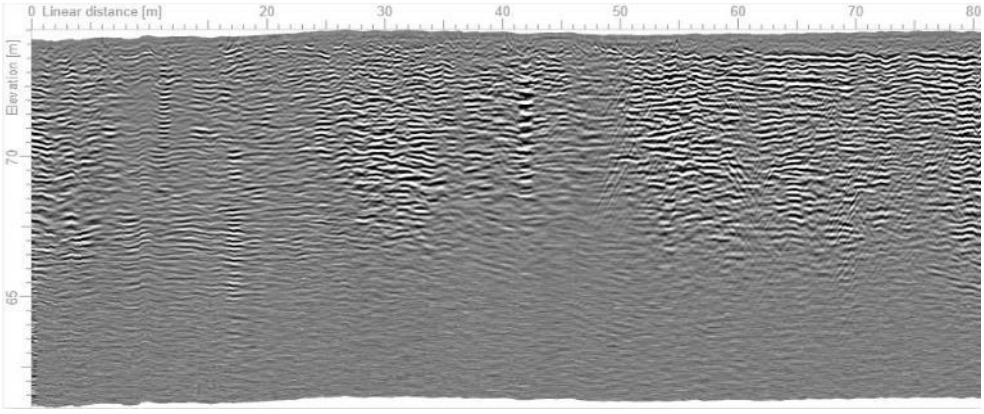
**Linea 1**



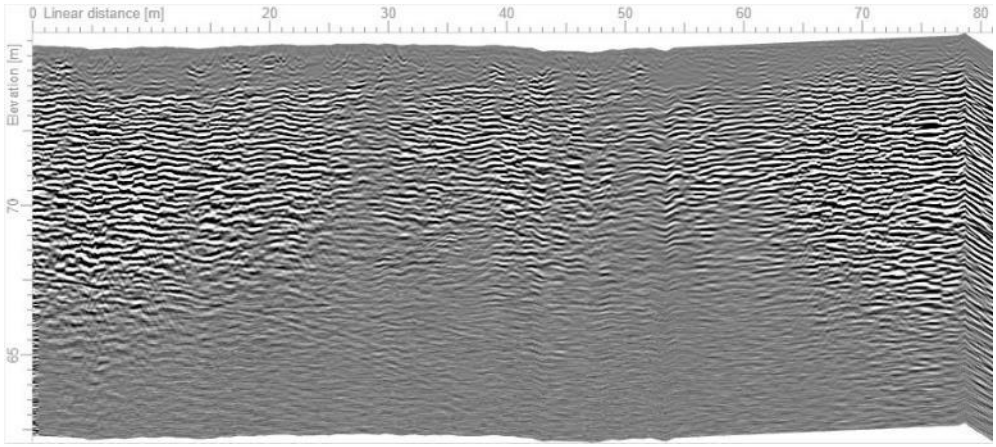

**Linea 2**



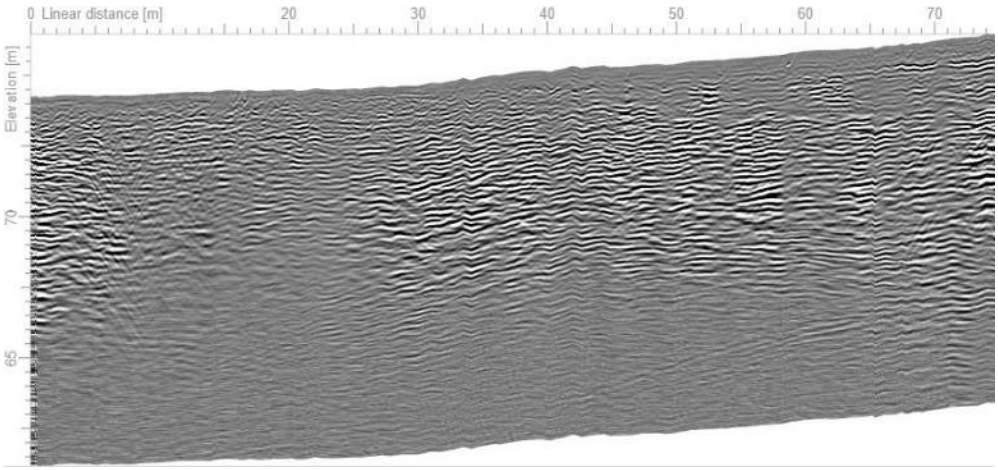

**Linea 3**



**Linea 4**

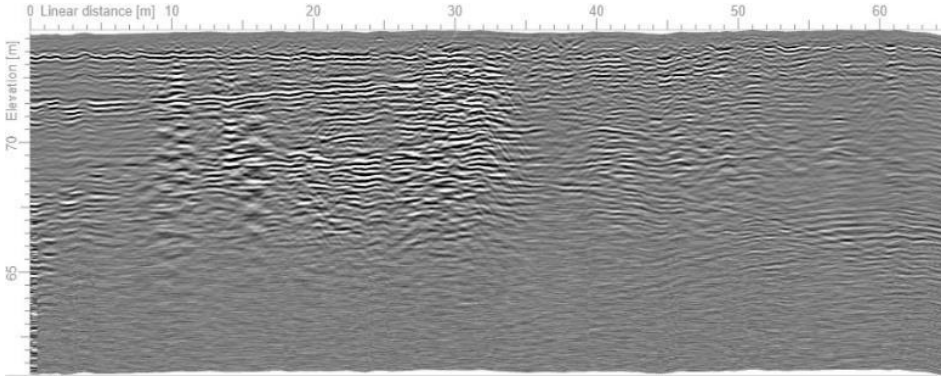



**Linea 5**

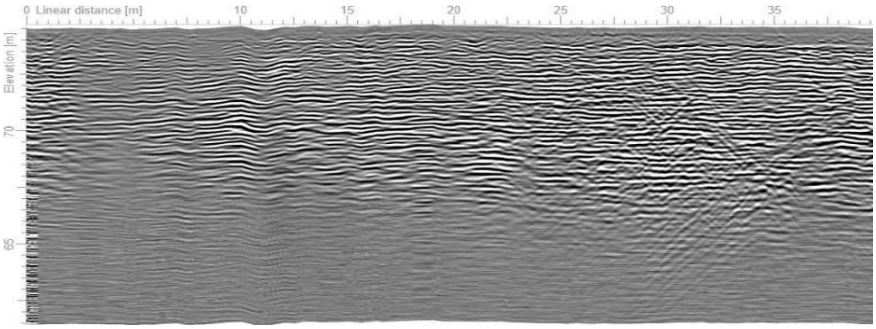



## 2) Linee GPR 170 MHz non coincidenti con le linee ERT

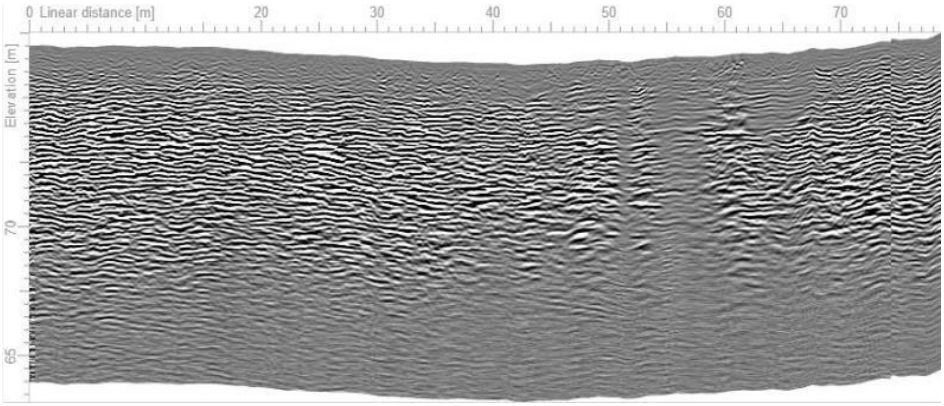
**Linea 0001**



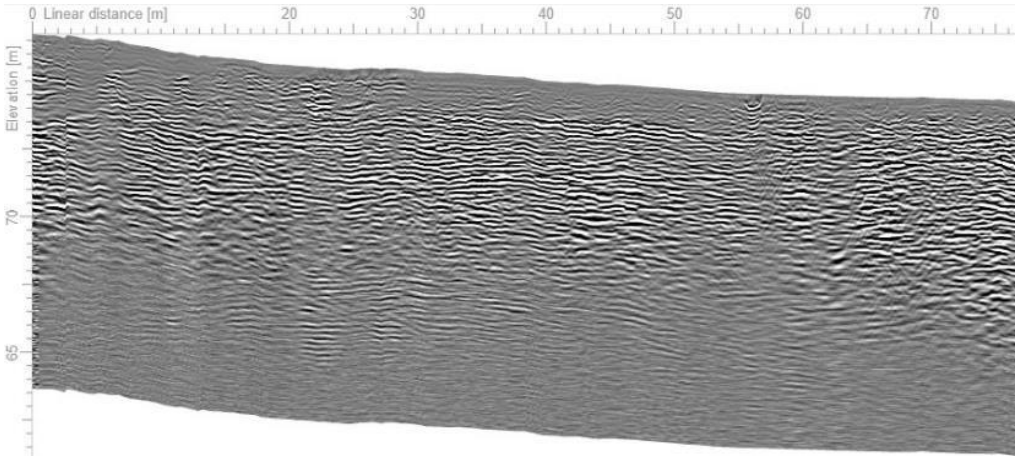
**Linea 0002**



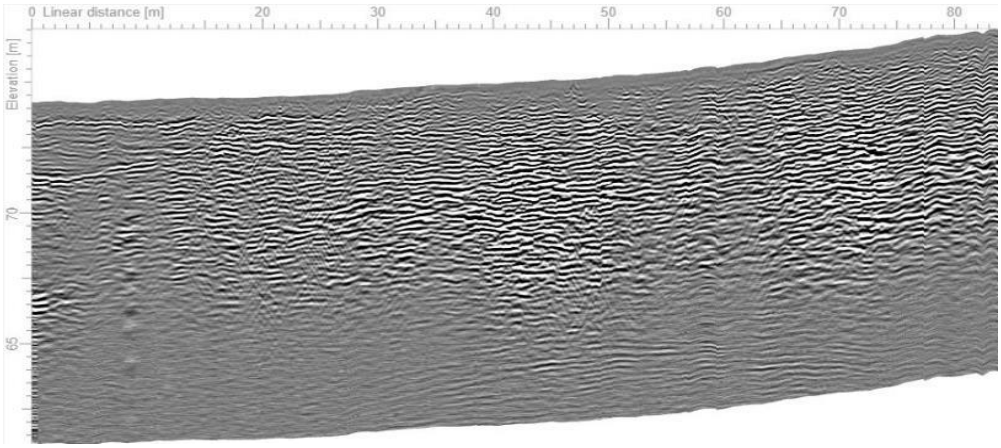

**Linea 0004**



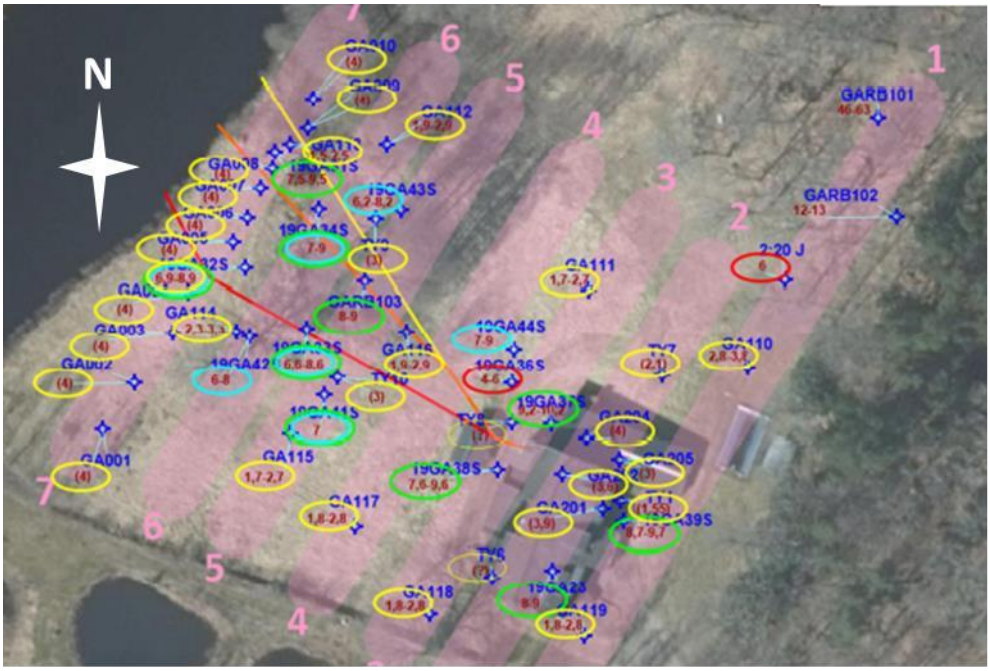
**Linea 0014**




**Linea 0015**



## 3) Mappa profondità filtri dei pozzi di campionamento delle acque sotterranee

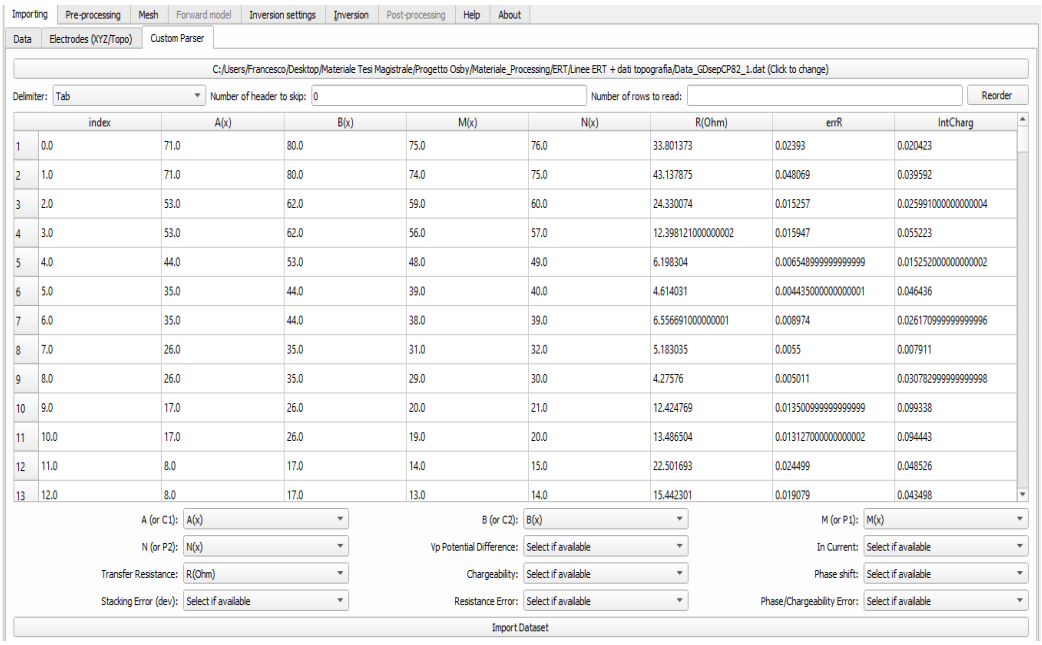



(m)
0 10 20 30 40 50

Cerchi gialli: Filtro tra 2-4 m;
Cerchi rossi: Filtra tra 4-6 m;
Cerchi verdemare: Filtro tra 6-8 m;
Cerchi verde: Filtro tra 8-10 m.

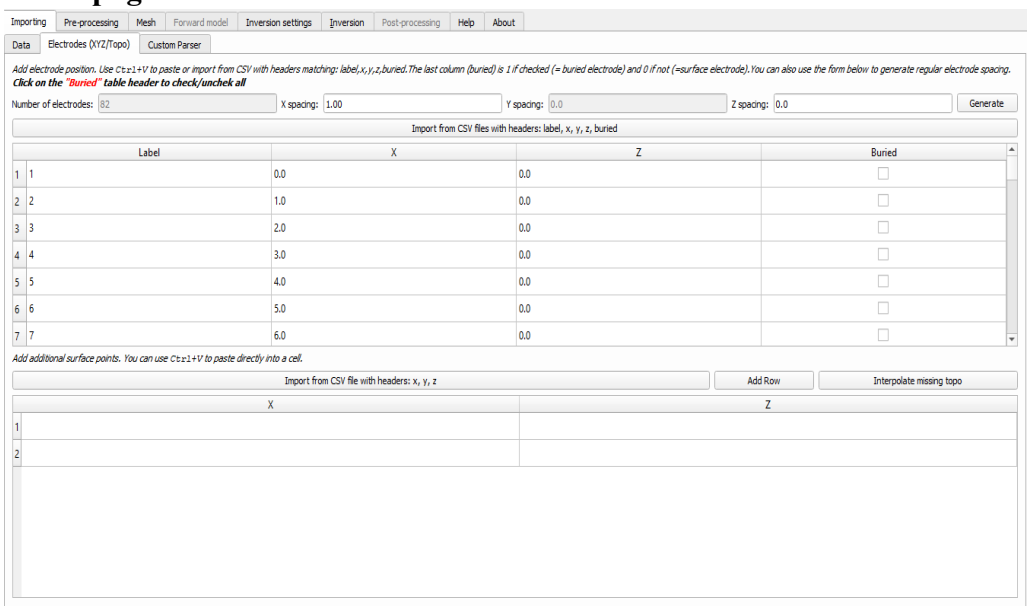
## Appendice C

### 1) Schermata della funzione "*Custom Paster*" della fase di importazione dei dati in ResIpy




| | index | A(x) | B(x) | M(x) | N(x) | R(Ohm) | errR | IntCharg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.0 | 71.0 | 80.0 | 75.0 | 76.0 | 33.801373 | 0.02393 | 0.020423 |
| 2 | 1.0 | 71.0 | 80.0 | 74.0 | 75.0 | 43.137875 | 0.048069 | 0.039592 |
| 3 | 2.0 | 53.0 | 62.0 | 59.0 | 60.0 | 24.330074 | 0.015257 | 0.025991000000000004 |
| 4 | 3.0 | 53.0 | 62.0 | 56.0 | 57.0 | 12.398121000000002 | 0.015947 | 0.055223 |
| 5 | 4.0 | 44.0 | 53.0 | 48.0 | 49.0 | 6.198304 | 0.006548999999999999 | 0.015252000000000002 |
| 6 | 5.0 | 35.0 | 44.0 | 39.0 | 40.0 | 4.614031 | 0.004435000000000001 | 0.046436 |
| 7 | 6.0 | 35.0 | 44.0 | 38.0 | 39.0 | 6.556691000000001 | 0.008974 | 0.026170999999999996 |
| 8 | 7.0 | 26.0 | 35.0 | 31.0 | 32.0 | 5.183035 | 0.0055 | 0.007911 |
| 9 | 8.0 | 26.0 | 35.0 | 29.0 | 30.0 | 4.27576 | 0.005011 | 0.030782999999999998 |
| 10 | 9.0 | 17.0 | 26.0 | 20.0 | 21.0 | 12.424769 | 0.013500999999999999 | 0.099338 |
| 11 | 10.0 | 17.0 | 26.0 | 19.0 | 20.0 | 13.486504 | 0.013127000000000002 | 0.094443 |
| 12 | 11.0 | 8.0 | 17.0 | 14.0 | 15.0 | 22.501693 | 0.024499 | 0.048526 |
| 13 | 12.0 | 8.0 | 17.0 | 13.0 | 14.0 | 15.442301 | 0.019079 | 0.043498 |

### 2) Schermata della funzione "*Electrodes (XYZ/Topo)* per l'inserimento dei dati topografici.




| | Label | X | Z | Buried |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0.0 | 0.0 | ☐ |
| 2 | 2 | 1.0 | 0.0 | ☐ |
| 3 | 3 | 2.0 | 0.0 | ☐ |
| 4 | 4 | 3.0 | 0.0 | ☐ |
| 5 | 5 | 4.0 | 0.0 | ☐ |
| 6 | 6 | 5.0 | 0.0 | ☐ |
| 7 | 7 | 6.0 | 0.0 | ☐ |

| | X | Z |
|---|---|---|
| 1 | | |
| 2 | | |