

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE AMBIENTALI

Corso di laurea magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

**Indagini di Tomografia Geo-elettrica sulle dune
costiere della Provincia di Ravenna**

Tesi di laurea in Idrologia Ambientale

Relatore

Prof. Marco Antonellini

Presentata da

Chiara Amaini

Correlatore

Dott. Nicolas Greggio

III sessione

Anno Accademico 2013/2014

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	MOTIVAZIONI DELLO STUDIO E INQUADRAMENTO NELLE SCIENZE AMBIENTALI.....	1
1.1.1	L'intrusione salina negli acquiferi freatici costieri: "il problema fisico"	5
1.2	CARATTERIZZAZIONE DELLE DUNE COSTIERE	11
1.2.1	La formazione delle dune costiere.....	11
1.2.2	Il ruolo e l'importanza dei sistemi dunosi.....	13
1.2.3	I rischi per gli ambienti di duna.....	15
1.2.4	Le dune costiere in Emilia Romagna.....	17
1.3	ACQUE SOTTERRANEE	19
1.3.1	Caratteristiche della matrice acqua	19
1.3.2	Normativa di riferimento sulle acque	20
1.4	METODI DI INDAGINE GEOFISICA	22
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO	25
2.1	DESCRIZIONE DEL SITO D'INDAGINE	25
2.1.1	Sito di Importanza Comunitaria e Zona di Protezione Speciale (SIC-ZPS).....	26
2.2	FLORA.....	28
2.3	VEGETAZIONE: associazione dunale.....	29
2.4	FAUNA	31
2.5	EVOLUZIONE STRATIGRAFICA E GEOLOGICA	33
2.6	EVOLUZIONE DELLA LINEA DI COSTA	39
2.7	SUBSIDENZA.....	41

2.8	TOPOGRAFIA	44
2.9	SUOLI ED USO DEL SUOLO	45
2.10	ASSETTO IDROLOGICO	46
2.11	CLIMATOLOGIA	47
3	MATERIALI E METODI	49
3.1	METODO GEOELETTRICO	49
3.1.1	Teoria del metodo geoelettrico	51
3.1.2	Il metodo della resistività	52
3.1.2.1	Resistività delle rocce e dei sedimenti	53
3.1.2.2	Configurazioni quadripolari	54
3.1.2.2.1	Tipi di modellizzazione del sottosuolo.....	55
3.1.2.2.2	Caratteristiche dei diversi tipi di configurazione (array).....	56
3.1.2.3	Tomografie elettriche	59
3.1.2.3.1	Approfondimento della configurazione Wenner	60
3.2	STRUMENTAZIONE	62
3.2.1	Strumentazione per la raccolta diretta dei dati in campagna	62
3.2.1.1	GPS	62
3.2.1.2	Trivella	63
3.2.1.3	Freatimetro.....	63
3.2.1.4	Pompa peristaltica e Sonde Multiparametriche.....	64
3.2.2	Strumentazione per i rilievi geoelettrici	65
3.2.2.1	Strumento PASI	65
3.2.2.1.1	Funzionamento del software adoperato dallo strumento PASI	67
3.2.2.2	Software per l'inversione ed elaborazione dei dati geoelettrici..	68
3.2.2.2.1	Software RES2DINV e suo funzionamento.....	69
3.3	METODI DI RILIEVO E MANIPOLAZIONE DEI DATI RICAVALI.....	73

3.3.1	Rilievi Global Positioning System (GPS)	73
3.3.2	Rilievi diretti della superficie fratica e misurazione dei parametri chimico-fisici dell'acqua.....	73
3.3.3	Procedura di avvio e settaggio PASI per i rilievi geoelettrici.....	73
3.3.4	Metodologie di inversione ed elaborazione dei dati.....	74
3.3.4.1	Procedura di settaggio per il software RES2DINV.....	74
3.3.4.2	SURFER 11	75
3.3.4.2.1	AUTOCAD 2011	76
3.3.4.3	Q-GIS	76
3.3.4.3.1	EXCEL.....	76
4	RISULTATI E DISCUSSIONE	77
4.1	SEZIONI INVERTITE.....	84
4.2	DATI MISURATI SULLE ACQUE	97
4.3	CORRELAZIONI.....	102
5	CONCLUSIONI	111
6	RINGRAZIAMENTI.....	113
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFIA	115
8	ALLEGATI	125
8.1	Approfondimento del funzionamento del software adoperato dallo strumento PASI	125
8.2	Approfondimento del software RES2DINV e suo funzionamento.....	126
8.3	Procedura di avvio e settaggio PASI per i rilievi geoelettrici.....	127
8.3.1	Procedura di settaggio dello strumento PASI.....	129
8.4	Procedura di settaggio per il software RES2DINV.....	138

ABSTRACT

Questa tesi Magistrale è frutto di un'attività di ricerca, che consiste nella realizzazione di un'indagine geofisica di tipo geoelettrico (ERT *Electrical Resistivity Tomography*). Lo scopo è quello di caratterizzare l'idrogeologia di una porzione limitata dell'acquifero freatico costiero ravennate, situato nella Pineta Ramazzotti di Lido di Dante, cercando di apportare nuove conoscenze sulle dinamiche che favoriscono l'ingressione marina (problema di forte attualità) che potrebbero contribuire a migliorare la gestione e la tutela delle risorse idriche. In questo contesto la tesi si pone come obiettivo quello di valutare l'applicabilità del metodo geoelettrico verificando se questo è in grado d'individuare efficacemente l'interfaccia acqua dolce-salata e le strutture presenti nel sottosuolo, in due tipologie di ambiente, con e senza un sistema di dune.

I risultati dimostrano che dal punto di vista scientifico, il metodo geoelettrico, ha verificato il principio di Ghyben-Herzberg, il quale suppone che vi sia una relazione inversa tra quota topografica e limite superiore della zona satura con acqua salata, inoltre si è riscontrata una certa stagionalità tra i profili acquisiti in momenti diversi (influenzati dalla piovosità). Mentre dal punto di vista tecnologico, il metodo, è di difficile utilizzo negli ambienti di transizione tanto che chi si occupa professionalmente di questi rilievi preferisce non eseguirli. Questo è dovuto alla mancanza di un protocollo per le operazioni di acquisizione e a causa dell'elevato rumore di fondo che si riscontra nelle misurazioni. Con questo studio è stato possibile calibrare e sviluppare un protocollo, utilizzabile con diverse spaziature tra gli elettrodi, che è valido per l'area di studio indagata.

Si è riscontrato anche, che l'utilizzo congiunto delle informazioni delle prospezioni e quelle dei rilievi classici (monitoraggio della superficie freatica, parametri chimico-fisici delle acque sotterranee, rilievo topografico e sondaggi geognostici), generino un prodotto finale di semplice interpretazione e di facile comprensione per le dinamiche in atto.

1 INTRODUZIONE

1.1 MOTIVAZIONI DELLO STUDIO E INQUADRAMENTO NELLE SCIENZE AMBIENTALI

I cambiamenti climatici globali e l'innalzamento del livello marino, unitamente a cause locali naturali e antropiche, hanno provocato l'ingressione di acque marine negli acquiferi costieri in molte parti del mondo. Secondo il rapporto World Meteorological Organization (WMO), già dal 1995 molti paesi si trovano in condizioni di stress idrico, ossia a rischio di compromettere le loro riserve di acqua dolce. Una corretta ed efficiente gestione delle risorse idriche di acque dolci è dunque di cruciale importanza per le zone costiere, che sono anche le più densamente popolate (UNCSD, 1999). Circa il 50 % della popolazione mondiale vive in queste aree, esercitando una forte pressione sulle riserve di acqua dolce (Beatley et al., 2002). Stando alle previsioni più accreditate, la percentuale della popolazione mondiale che vive nelle zone costiere è destinata a salire fino al 75 % di quella globale entro il 2100 (Finkl, 1994).

Un acquifero freatico costiero è definito come un corpo sedimentario sotterraneo ad elevata conduttività idraulica dove si incontrano le acque continentali con quelle marine, localizzato per l'appunto nella zona costiera (Post, 2005). L'acquifero freatico è costituito principalmente da depositi sabbiosi marini costieri, generalmente confinati alla base da dei sedimenti fini di origine continentale ed esposti all'atmosfera in superficie.

Con il termine intrusione salina o più precisamente "cuneo salino", s'intende una forma d'inquinamento delle acque, che si verifica qualora l'acqua marina penetra all'interno della falda acquifera (De Breauck, 1991), causando una salinizzazione delle acque dolci sotterranee; questo mette a rischio l'eventuale utilizzo della risorsa idrica, danneggia la qualità dei suoli, con impatti negativi soprattutto sull'attività agricola e pregiudica la sopravvivenza degli ecosistemi naturali (pinete, dune costiere e lagune).

Le principali cause locali dell'intrusione marina negli acquiferi costieri, sono di origine antropica, come la subsidenza indotta, causata da eccessivi prelievi delle acque di falda (viene a mancare la pressione interstiziale che sostiene il suolo), ma può essere presente anche in ampie zone interne. Infatti in tutto il territorio nazionale, la crescente domanda di risorse idriche ha portato ad uno sfruttamento incontrollato ed eccessivo delle acque sotterranee per diversi usi (urbano, industriale e agricolo). Questo fenomeno di ingressione è regolato dal principio di GhybenHerzberg (Badon-Ghijben, 1888; Herzberg, 1901), descritto nel paragrafo seguente.

Nel caso specifico l'acquifero costiero ravennate, veniva classificato "a rischio di salinizzazione" già in un rapporto del Ministero dell'Ambiente del 1997. L'acquifero attualmente risulta essere fortemente contaminato dall'intrusione salina poiché gli apporti idrici avvengono esclusivamente dalla ricarica superficiale e da mare. L'acquifero stesso risulta essere delimitato verso l'entroterra da depositi fini che ne riducono gli scambi di fluidi. Le aree in cui può avvenire la ricarica sono quindi le fasce di duna e le porzioni di territorio in cui i depositi sabbiosi superficiali sono affioranti ma, ciò nonostante i tassi di infiltrazione sono moderati a causa delle scarse precipitazioni e alte temperature (Antonellini et al., 2008).

L'area di studio, rappresenta una zona molto interessante dal punto di vista culturale, economico ed ambientale, in quanto coesistono aree con una destinazione d'uso molto differenti (insediamenti abitativi, stabilimenti balneari, coltivazioni, aree boschive, aree di cava e zone umide). Le pratiche d'irrigazione e il fabbisogno di acqua per sostenere il turismo causano una forte pressione sulle risorse idriche che sono sempre più scarse (Antonellini et al., 2008; Custodio, 2010).

L'intrusione di acque marine può inoltre avvenire anche attraverso i corsi d'acqua direttamente connessi con il mare in cui non si hanno barriere artificiali nel tratto terminale. In tali circostanti si crea una risalita sul fondo dell'alveo fluviale d'acqua salata proveniente dal mare e favorita dall'assenza di gradienti naturali. Un aumento dell'intrusione salina da corsi d'acqua si deve anche ai recenti anni siccitosi che, hanno diminuito gli apporti fluviali di acqua dolce verso la costa (Zinoni et al., 2004; Dillon, 2005). La portata ridotta di acqua dei fiumi romagnoli nel loro tratto terminale è anche determinata dalla quantità di prelievi che

vengono effettuati a monte per usi agricoli e l'introduzione in tempi recenti di colture non endemiche (idro-esigenti come la coltivazione del kiwi), il che ha causato un'ulteriore riduzione del contributo degli apporti fluviali alla ricarica degli acquiferi costieri.

Per questi motivi l'acquifero è considerato di scarso valore qualitativo e le sue acque non sono impiegate per uso potabile. Ciò nonostante, l'acquifero rappresenta la riserva d'acqua a cui fa riferimento l'intero ecosistema ambientale presente lungo la costa adriatica della parte meridionale della pianura padana. Perciò, dalla qualità delle acque in esso presenti dipende la salute delle specie che vivono in questi habitat (Adams, 1995; Antonellini et al., 2008; Antonellini et al., 2010b).

Altri fattori, oltre a quelli sopracitati, sono responsabili del deterioramento della qualità delle acque costiere che è tanto maggiori quanto più il clima è arido o semiarido:

- gli elevati tassi di evaporazione contribuiscono ad aumentare la concentrazione di sali nelle acque sotterranee e superficiali, soprattutto nelle aree di laguna, laghi di cava ed altre zone umide (Mollema et al., 2010);
- l'evapotraspirazione, fattore legato alla presenza di vegetazione che può concentrare i sali nel suolo con un fattore di oltre 5 volte (Stuyfzand, 1994). I pini stessi possiedono un effetto negativo sulla salinità, poiché l'apparato radicale opera un continuo pompaggio che consuma la maggior parte dell'acqua dolce di origine meteorica, lasciando un'acqua residua molto salata e facilitando la risalita di acqua salata dal fondo dell'acquifero (Antonellini and Mollema, 2009a; Antonellini and Mollema, 2010a Mollema et al., 2011);
- la secrezione di sali negli apparati radicali delle piante (Stuyfzand, 1993);
- il dilavamento e l'infiltrazione dei sali presenti nell'aerosol (spray marino) e depositi nei livelli più superficiali del suolo, con formazioni di croste e patine saline (Stuyfzand and Bruggeman, 1994);
- la risalita di acque salmastre fossili (acqua inclusa nei pori durante la sedimentazione) dalla base dell'acquifero che avviene ad opera delle

idrovoce, in quanto, riducendo il carico idraulico favoriscono la risalita di acque profonde con salinità, molto spesso, superiori a quella di mare.

- i terreni dell'area di studio hanno quota nulla o sono al di sotto del livello del mare e vengono drenati mediante l'uso di numerosi impianti di sollevamento idraulico (idrovoce), che sono localizzati lontano dalla costa (circa 5 chilometri dalla linea di riva), generano un cono di depressione avente la massima profondità ad oltre 2 metri sotto il livello del mare, nella zona ad Ovest delle Pinete storiche. Questo drenaggio crea dei gradienti idraulici verso l'interno del territorio e promuove un richiamo di acqua salata direttamente dal Mare Adriatico (Antonellini et al., 2008).

Il fenomeno dell'intrusione salina all'interno degli acquiferi è ormai riconosciuto come un problema dal punto di vista ambientale, economico e sociale, documentato in Europa (Scheidleger et al., 2004), ed in particolar modo in Italia da numerosi lavori (Barrocu et al., 2001; Cau et al., 2002; Pranzini, 2002; Barrocu, 2003; Capaccioni et al., 2005; De Luca et al., 2005; Antonellini et al., 2008; Ulazzi et al., 2008).

Diversi studi hanno dimostrato che la salinizzazione dell'acquifero costiero è veramente in atto (salinità maggiore di 3 g/l, composizione prevalentemente cloruro-sodica) (Giambastiani et al., 2007; Antonellini et al., 2008; Antonellini et al., 2010b; Marconi et al., 2011; Mollema et al., 2012b).

L'impatto della salinizzazione delle acque sotterranee nelle zone costiere, si ripercuote direttamente sia sulla diversità naturale della vegetazione che sulla produzione agricola (FAO, 2002) mettendo a rischio la fertilità dei suoli e causando una perdita di biodiversità nelle aree naturali (salvaguardia delle pinete e delle aree boschive) (Antonellini and Mollema, 2010a). Si ha anche una salinizzazione dei suoli causata da un processo di degradazione e perdita più diffusa di suolo, dovuta principalmente allo spray marino (Louw et al., 2011) e ad attività antropiche come l'irrigazione con acque saline e l'eccessivo drenaggio (Toth et al., 2008) che provocano alti tassi di subsidenza (Antonellini et al., 2008; Mollema et al., 2012b). L'unica difesa dallo spray marino per le aree più interne è costituita dai cordoni di paleodune con andamento parallelo alla linea di costa, impiantati a pino domestico e pino marittimo: queste zone rappresentano l'unica

topografia al di sopra del livello del mare. La salinizzazione dei suoli è strettamente legata al processo di desertificazione, perché l'alta concentrazione di sale ha effetti negativi, come l'arresto della crescita, la riduzione della capacità di assorbire acqua dalle radici ne risulta e, di conseguenza, una minore resa ed un calo delle dimensioni delle colture (FAO, 2002).

La stratificazione delle acque sotterranee in ambito costiero mostra solitamente la presenza di una lente di acqua dolce al tetto, che sovrasta un corpo d'acqua salina a maggiore densità costituito dal cuneo di acque marine penetrate al fondo dell'acquifero costiero, oppure già presenti nell'acquifero dal periodo trasgressivo (Hubbert, 1940). Nel caso dell'area di studio, alcuni fattori naturali ed antropici condizionano l'andamento tipico della distribuzione di acque dolci e saline in ambito costiero, come la presenza di corpi d'acqua superficiali, che occupano le principali depressioni di un territorio sub-pianeggiante.

1.1.1 L'intrusione salina negli acquiferi freatici costieri: "il problema fisico"

L'intrusione dell'acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente negli acquiferi costieri. A causa della presenza d'acqua salata, all'interno dell'acquifero si crea una zona di contatto tra l'acqua dolce, meno densa e quindi più leggera, che scorre verso mare e l'acqua salata, più densa e pesante, che si incunea dal mare verso l'entroterra (Figura 1).

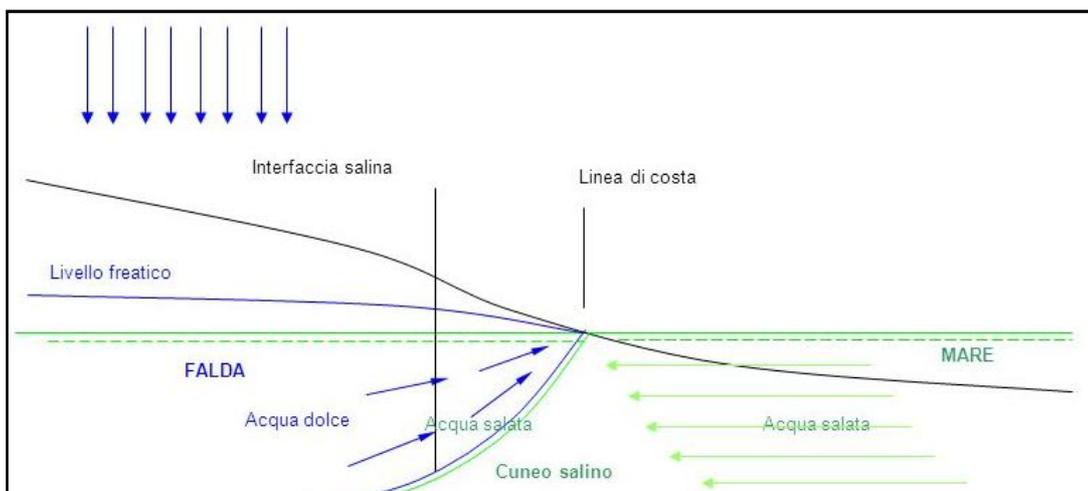


Figura 1. Intrusione salina in un acquifero costiero non confinato (da Fetter, 2001, modif.)

L'acqua dolce e quella salata sono fluidi parzialmente miscibili e pertanto la zona di contatto tra i due, assume la forma di una zona di transizione o di mescolamento a causa della diffusione di soluti dovuta al gradiente salino. Tuttavia, in certe condizioni, l'ampiezza della zona di transizione è piccola rispetto allo spessore dell'acquifero e la zona di passaggio graduale può essere approssimata con un fronte netto di interfaccia. Negli acquiferi costieri non confinati si instaura una condizione di equilibrio caratterizzata da un flusso ciclico: le acque dolci che fluiscono verso mare e le salate verso l'interfaccia (Cooper, 1959).

La forma e la posizione dell'interfaccia nel corpo sabbioso costiero è in funzione del gradiente idraulico e quindi del livello di falda (Figura 2). Un qualsiasi cambiamento della superficie freatica determina un cambiamento della forma e profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Minime fluttuazioni della posizione di tale superficie di separazione, sono determinate dall'ampiezza delle escursioni di marea e dalle variazioni stagionali della superficie freatica: ne deriva quindi, che l'interfaccia acqua dolce-acqua salata è in uno stato di quasi-equilibrio. Alcune attività umane, agendo sul volume d'acqua sotterranea o sul carico idraulico possono rompere questo equilibrio e determinare uno spostamento dell'interfaccia verso terra.

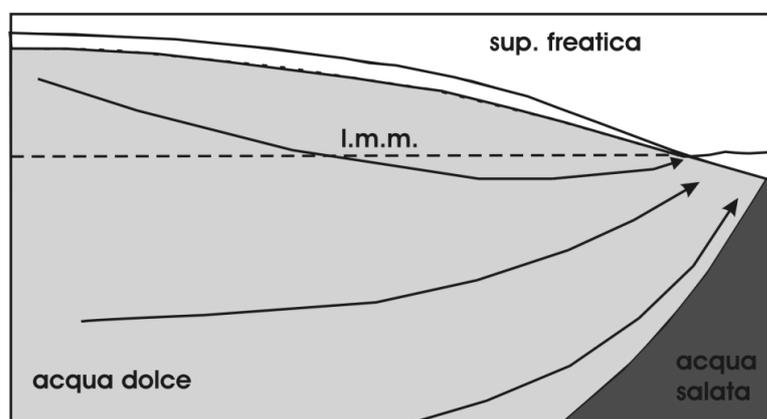


Figura 2. Posizione dell'interfaccia acqua dolce/salata in condizioni di equilibrio

Il fenomeno dell'invasione dell'acquifero da parte delle acque marine viene detto intrusione del cuneo salino e può essere di tipo passivo o attivo (Fetter, 2001).

L'intrusione passiva avviene quando, pur avendo una riduzione del volume di acqua dolce, viene mantenuto un livello freatico al di sopra del livello del mare e con un gradiente idraulico verso mare: in questo caso l'interfaccia mantiene

indicativamente la stessa forma, spostandosi verso terra fino a quando non si ristabiliscono le nuove condizioni di equilibrio (Figura 3).

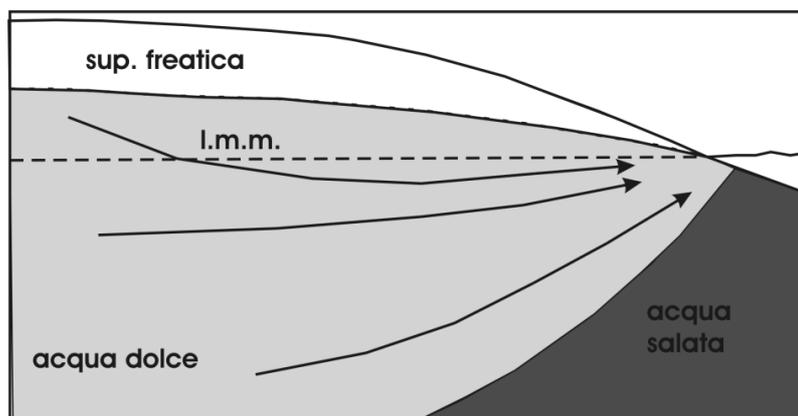


Figura 3. Intrusione salina passiva dovuta ad un generale abbassamento del livello della falda

L'intrusione attiva invece, si verifica quando l'utilizzo della risorsa idrica determina un'inversione del gradiente idraulico (falda al di sotto del livello medio mare): questo si verifica nel caso di prelievi puntuali (es. pozzi di estrazione o sistema di drenaggio) che creano coni di depressione (Figura 4). L'interfaccia risale molto più rapidamente rispetto al caso passivo non permettendo l'instaurazione di un nuovo stato di equilibrio.

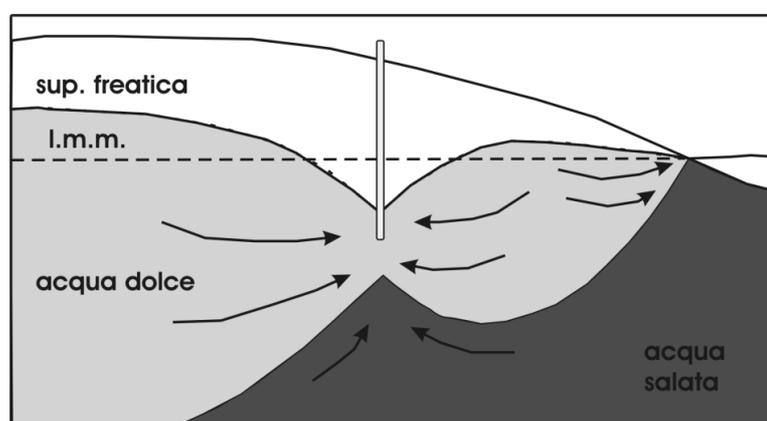


Figura 4. Intrusione salina attiva con creazione di un cono di depressione dovuto ad un pozzo di estrazione dell'acqua

Nel diciannovesimo secolo W. Badon-Ghyben e A. Herzberg hanno formulato il principio di Ghyben-Herzberg (Fetter, 2001; Bear et al., 1999), che afferma: in un acquifero costiero omogeneo ed isotropo, la profondità dell'interfaccia tra acqua dolce e salata, è direttamente proporzionale all'elevazione del livello di falda (cioè lo spessore di acque dolci) presente al di sopra del livello medio marino (lettera h in Figura 5) (Badon-Ghyben, 1888; Herzberg, 1901).

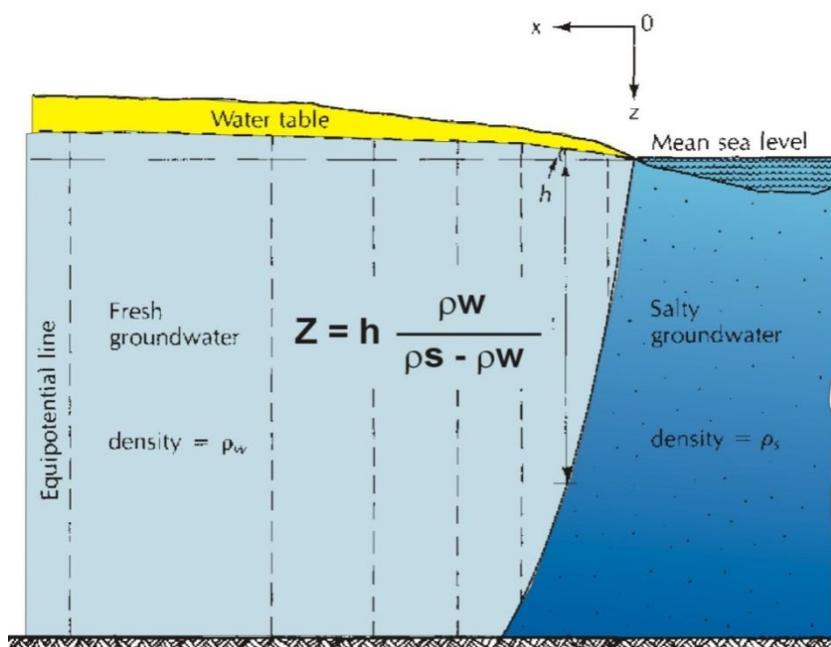


Figura 5. Relazione di Ghyben-Herzberg per un acquifero freatico costiero (da Fetter, 2001; modif.)

Secondo tale principio negli acquiferi freatici costieri l'interfaccia acqua dolce-acqua salata si trova ad una profondità, rispetto al livello del mare, pari a circa 30 volte l'altezza del livello piezometrico. Quindi una piccola variazione della lente d'acqua dolce ad esempio un abbassamento di 0.1 m del livello piezometrico, causa la risalita di circa 3 m verso la superficie topografica dell'acqua salata.

Il principio di Ghyben-Herzberg è così formulato:

$$Z_{(x,y)} = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h_{(x,y)}$$

Dove:

$Z_{(x,y)}$ = profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata [L];

$h_{(x,y)}$ = lo spessore della falda dolce sopra il livello del mare [L];

ρ_w = densità dell'acqua dolce [ML⁻³];

ρ_s = densità dell'acqua salata [ML⁻³].

Per: $\rho_s = 1035 \text{ [Kg m}^{-3}\text{]}$, che è la densità dell'acqua marina dell'Adriatico e $\rho_w =$

$1000 \text{ [Kg m}^{-3}\text{]}$, il rapporto
$$G = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \cong 30$$

Quindi:
$$Z_{(x, y)} = G h_{(x, y)} = 30 h_{(x, y)}$$

L'applicazione del principio di Ghyben-Herzberg è limitato a condizioni di equilibrio statico con distribuzione idrostatica della pressione per l'acqua dolce e salata.

Combinando la legge di Ghyben-Herzberg con l'equazione di Dupuit (1863), il risultato è una relazione che mostra, in condizioni idrodinamiche, gli effetti della conduttività idraulica (K) sulla profondità (Z_w) tra le acque dolci e saline (Todd, 1953). La conduttività idraulica dipende dalla litologia dell'acquifero, quindi le variazioni litostratigrafiche possono avere una forte influenza sulla distribuzione della salinità nell'acquifero freatico (Harris 1967; Fetter 1972; Simmons 1986, Collins and Easley 1999; Anderson et al. 2000, Schneider and Kruse 2005; Antonellini et al, 2008). Per valori alti di conduttività la profondità dell'interfaccia diminuisce, mentre per valori bassi di K l'interfaccia è più profonda.

Nel caso specifico dell'area indagata da questo lavoro di tesi è stato pubblicato un lavoro di Antonellini et al. (2008) in cui viene valutata l'intrusione salina prendendo in considerazione la subsidenza (perciò la topografia), la profondità della tavola d'acqua e la salinità in falda. Ne risulta che l'acquifero costiero situato a Sud del Delta del Po' presenta, per quasi tutta la sua estensione una quota che si trova poco al disopra o al disotto del livello del mare. Perciò la subsidenza, la distruzione delle dune costiere, l'erosione costiera e la mancanza di apporti sedimentari fluviali dal 1950 ad oggi, non permettono la presenza di un livello di falda sopra il livello del mare, e quindi di un carico idraulico, che contrastino l'ingressione marina in accordo con il principio di Ghyben-Herzberg.

A questo punto si possono identificare e schematizzare, come in Figura 6, i flussi in entrata ed in uscita che si verificano nella situazione dell'acquifero costiero ravennate (Antonellini et al., 2009b).

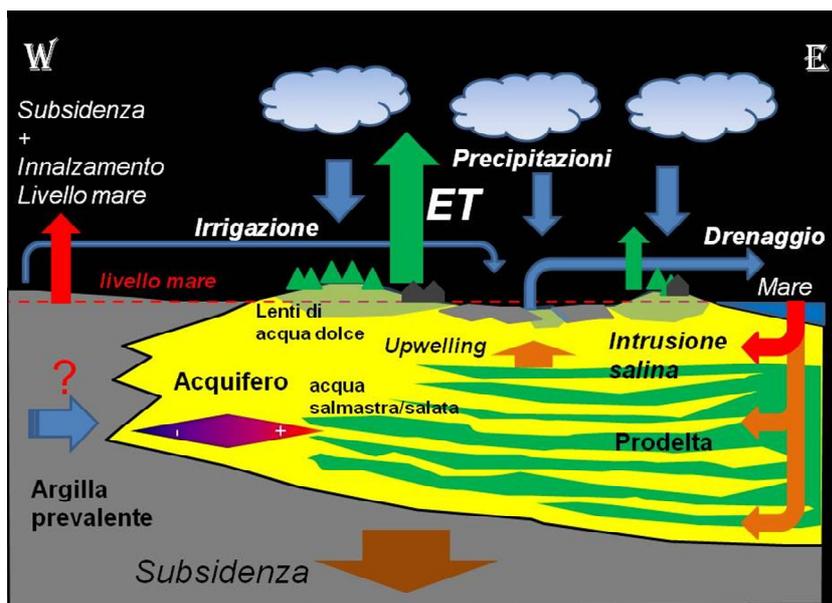


Figura 6. Rappresentazione schematica dei flussi in entrata ed in uscita nell'acquifero costiero ravennate (Antonellini, 2009b)

Infine, date le caratteristiche specifiche del territorio nell'area di studio, è necessario ricordare un altro modello concettuale, complementare a quello precedentemente descritto. Nelle aree pianeggianti con scarsa elevazione sul livello del mare, in cui la superficie freatica è artificialmente regolata, si ha la formazione di una lente di acqua dolce al tetto dell'acquifero nell'area compresa tra due canali di drenaggio (Figura 7).

In queste condizioni, la lente d'acqua dolce è solitamente discontinua e mostra variazioni stagionali marcate, contemporaneamente le acque saline del fondo dell'acquifero sono richiamate in superficie (fenomeno di *seepage*) dalla presenza dei canali di drenaggio che riducono il carico idraulico sovrastante (Maas, 2007; Schot et al., 2004) (Figura 7).

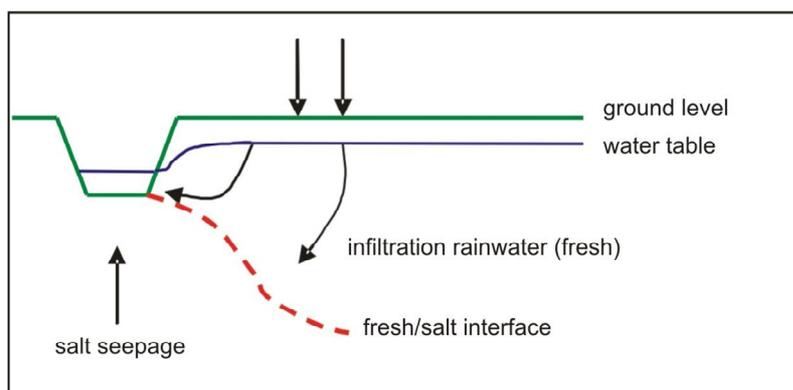


Figura 7. Rappresentazione schematica del fenomeno di risalita (*seepage*) di acque saline dal fondo dell'acquifero in prossimità di canali. La linea verde rappresenta il piano campagna, in blu è rappresenta la superficie freatica e la linea rossa coincide con l'interfaccia tra acque saline e dolci

1.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE DUNE COSTIERE

Le spiagge, costituite da una parte emersa ed una sommersa, insieme alle dune, sono parte integrante di un unico sistema ambientale e territoriale chiamata “zona di transizione”, dove si assiste al passaggio tra l'ambiente terrestre e quello marino. Si tratta di un sistema molto dinamico, nello spazio e nel tempo, in cui il sedimento sabbioso viene costantemente ridistribuito dalle onde e dal vento e sul quale si sviluppa una tipica vegetazione pioniera particolarmente resistente alla salinità (specie alofile).

La duna è un accumulo eolico di sedimenti incoerenti, costituita da sabbie con granulometria compresa tra i 2 - 0.063 mm e costituisce l'elemento geomorfologico di base dei complessi sistemi di dune (Figura 8).



Figura 8. Esempio di duna in Località Lido di Dante

1.2.1 La formazione delle dune costiere

L'origine e l'evoluzione delle dune costiere presenta meccanismi abbastanza complessi ma, è possibile identificare tre elementi essenziali per una loro naturale formazione:

- una spiaggia sabbiosa sufficientemente ampia e con idonea dimensione dei granuli del sedimento;
- un vento attivo durante l'anno per un sufficiente periodo di tempo, unitamente ad una energia in grado di spostare i sedimenti;

- una rapida colonizzazione da parte della vegetazione pioniera che, trattenendo i granuli, può originare piccoli cumuli i quali danno inizio al processo di formazione e, successivamente, crescita della duna.

Le dune litoranee si possono generalmente suddividere in due categorie:

1. avandune (o dune primarie): tipici depositi eolici ancorati alla vegetazione, paralleli alla linea di costa, che occupano nel momento della loro formazione la posizione più avanzata rispetto al mare. Sono una forma relativamente stabile che evolve in sito grazie all'interazione tra il trasporto eolico e la vegetazione;
2. dune secondarie: rappresentano vecchi cordoni di dune primarie, relegati in una posizione retrostante a seguito della formazione di nuovi cordoni frontali.

Inoltre, le dune si possono classificare in funzione del loro grado di maturità (Figura 9), così si distinguono in:

- duna stabilizzata (o fissa): con vegetazione di tipo arboreo/arbustivo che impedisce o diminuisce la dinamica sedimentaria in quanto le radici della vegetazione trattengono la sabbia;
- duna semi-stabilizzata (o mobile): con vegetazione rada ed erbaceo/arbustiva con aree in evoluzione sedimentaria;
- duna attiva (o embrionale): priva di vegetazione e in continua evoluzione morfosedimentaria.



Figura 9. Schema del grado di maturità di una duna

1.2.2 Il ruolo e l'importanza dei sistemi dunosi

L'ambiente di spiaggia è caratterizzato dall'elevata dinamicità delle morfologie, le quali si adattano continuamente alle forzanti meteo-marine, assumendo una configurazione di equilibrio nel profilo topografico e batimetrico tale da dissipare l'energia del moto ondoso e da ridistribuire i sedimenti disponibili. Infatti, nel bilancio sedimentario del sistema spiaggia-dune, queste ultime rappresentano una riserva di sedimento utilizzabile nei periodi in cui la spiaggia emersa si trovi in uno stato di deficit causato, per esempio, dal mancato apporto fluviale o dall'elevato tasso di erosione dovuto a mareggiate. Questo stato si verifica soprattutto nella stagione invernale quando aumentano le mareggiate, sia in intensità che in frequenza, cosicché viene eroso un elevato quantitativo di sedimento e sequestrato nelle barre sottomarine facendo assumere alla spiaggia il cosiddetto "storm profile" (Figura 10). Al contrario, nel periodo estivo, il moto ondoso ha minor energia per cui esercita un'azione costruttiva formando le morfologie deposizionali tipiche dello "swell profile" (Figura 10) quali berme e avandune (Pranzini, 2004).

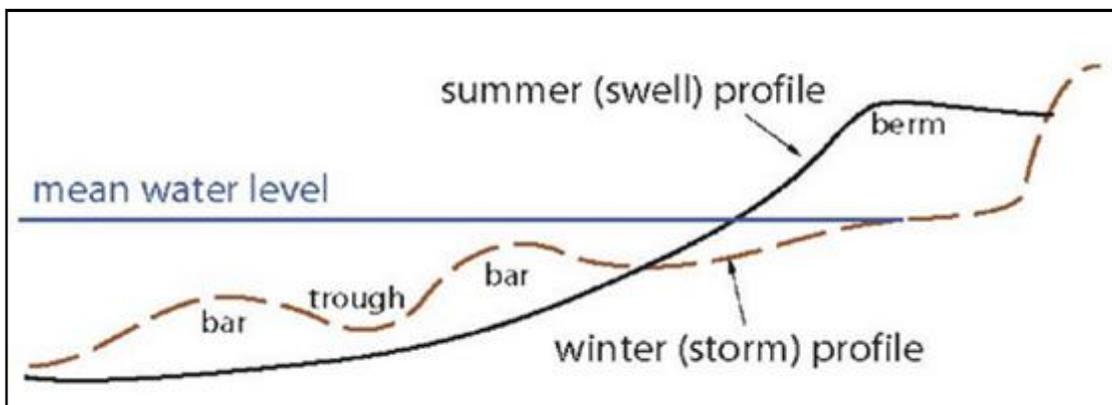


Figura 10. Schema del ciclo sedimentario profilo estivo (linea nera) ed invernale (linea marrone tratteggiata)

Inoltre, la presenza di uno o successivi cordoni dunosi, laddove questi si presentano con elevato grado di naturalità, si presta come unica difesa naturale, al rischio di ingressione marina nell'entroterra indotto da forti mareggiate poiché costituiscono l'unico rilievo topografico naturale della costa, in grado di essere una barriera morfologica. Questo aspetto ricopre maggiore importanza per territori che per assetto geologico si trovano al di sotto del livello medio mare, come ad esempio le pianure alluvionali in cui è spesso presente una naturale

subsidenza. Studi condotti sulla vulnerabilità delle aree costiere in Emilia Romagna, rispetto all'ingressione marina, mostrano come in presenza di dune di altezza non inferiore a 4 m ed una spiaggia con pendenza media del 2 %, le aree si possano considerare sicure anche per eventi con tempo di ritorno di 100 anni (Ciavola et al., 2008).

Un'ulteriore azione delle dune costiere è rappresentata dal contrasto all'intrusione d'acqua marina nel sottosuolo. In particolare, tale opposizione viene effettuata dalla presenza di una falda, seppur modesta, di acqua dolce che viene ricaricata dalle piogge. La formazione di tale lente d'acqua dolce al di sopra del livello del mare è permessa dall'elevata porosità e permeabilità delle sabbie che costituiscono le dune stesse (Antonellini et al., 2010b). L'eventuale modificazione del profilo morfo-topografico del corpo dunale, quindi, non garantirebbe la presenza di questa modesta lente d'acqua dolce provocando la risalita del cuneo salino fino alla superficie con conseguenti problemi di salinizzazione delle acque e dei suoli (Figura 11) (Antonellini et al., 2010b).

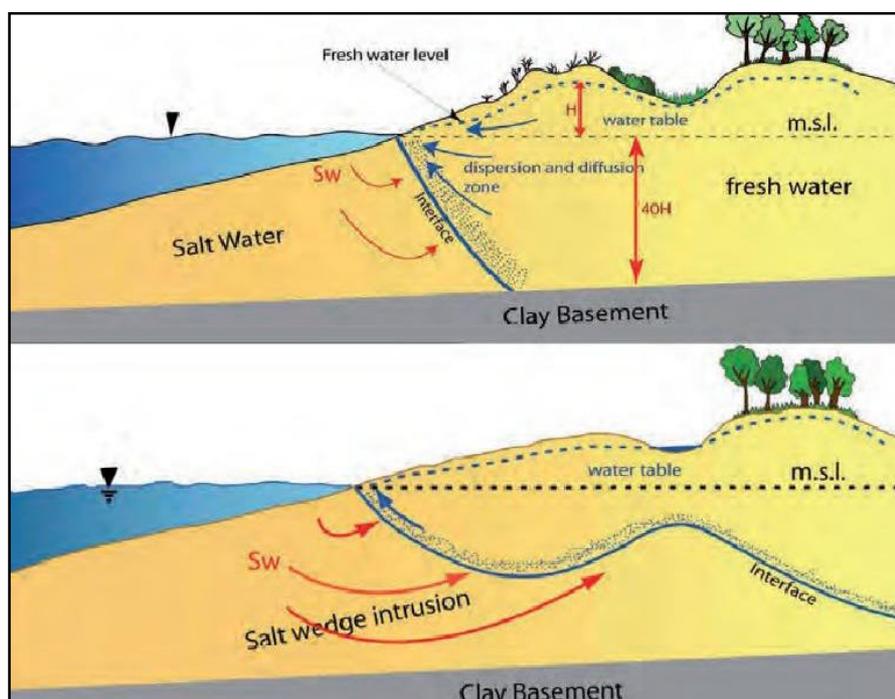


Figura 11. Effetto della variazione della falda freatica sull'intrusione salina in una situazione naturale (sopra) e in una alterata (sotto) (Antonellini, 2010b)

Studi sul ruolo idrogeologico delle dune costiere evidenziano anche il loro fondamentale ruolo nella conservazione della copertura vegetale originale (Antonellini et al., 2008).

Le dune costiere, infatti, costituiscono habitat peculiari per comunità vegetali molto specializzate, a cui si devono i meccanismi di formazione, accrescimento e stabilizzazione dei depositi eolici costieri, e per numerose associazioni animali. Inoltre, svolgono anche funzioni ecologiche di sostegno e protezione di altri ecosistemi, quali stagni, lagune e foci fluviali, boschi litoranei, agro ecosistemi retro-dunali. Per di più, le dune costiere possono svolgere ruoli importanti come corridoi ecologici (Gabbianelli and Antonellini, 2009).

Infine, le dune costiere sono presenti in 11 diverse tipologie di habitat elencati nell'allegato I della direttiva Habitat 92/43/CE di cui 3 sono habitat "prioritari", cioè tipi di habitat naturali che rischiano di scomparire.

1.2.3 I rischi per gli ambienti di duna

E' stato stimato che il turismo e l'urbanizzazione abbiano sacrificato, in un secolo, circa 70000 ettari di dune sabbiose del Mediterraneo, con una perdita del 71 % degli oltre 100000 ettari di dune esistenti all'inizio del secolo scorso (Boccalaro, 2009).

Secondo il Rapporto Europeo sull'Ambiente, tra tutti i paesi europei, spetta all'Italia il triste primato di aver sacrificato più dune: dai circa 45000 ettari dell'inizio del 1900 si è passati ai 9000 attuali con una perdita, quindi, dell'80 % di paesaggio litoraneo.

La regressione delle dune costiere si è accelerata nel corso degli ultimi decenni per ragioni di ordine naturale (ad esempio, la forte erosione ed il mancato apporto di sedimenti fluviali), ma ancor di più per cause antropiche (turismo di massa) e per una cattiva gestione dei litorali.

L'erosione costiera è definita come l'asportazione superficiale di materiale ottenuto con azione di attrito da parte del mare ed è controllata da numerosi fattori: meteo-climatici, geologici, biologici ed antropici.

Secondo GNRAC (Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero) nel 2006 ben il 42,5 % del litorale italiano era in erosione. È chiaro che questa situazione ha le sue radici in una serie di fattori che riguardano da una parte lo sviluppo urbano, la diminuzione delle superfici coltivate a seminativo nei tratti montani a fronte di un aumento di colture meno erodibili (prati, pascoli e boschi), la protezione dei versanti, lasciano poco spazio alla dispersione del sedimento

nei bacini imbriferi fino ai fiumi. Dall'altra, l'imbrigliamento e la progressiva canalizzazione dei fiumi intrappola il sedimento a monte delle numerose opere di regimazione fluviale, quali briglie e dighe, impedendone il trasporto verso la foce e quindi il naturale rifornimento alle spiagge. Quando il sedimento arriva alla foce viene ridistribuito, a seconda della granulometria, dalle correnti lungo riva (longshore current).

A partire dagli anni '60, infatti, si è verificata un'esplosione del settore turistico-balneare quando il completamento di grandi opere di bonifica ed infrastrutturali hanno reso di facile raggiungimento le zone di spiaggia provocando un graduale smantellamento dei sistemi di dune (Figura 12) (Sytnik and Stecchi, 2014).



Figura 12. Stabilimenti balneari e insediamenti abitativi della costa romagnola

Questo ha portato ad un'enorme urbanizzazione dei territori costieri con un conseguente aumento della densità di popolazione (più elevata rispetto alla media nazionale), soprattutto nei periodi turistici di punta.

I danni maggiori si verificano nel periodo primaverile – estivo poiché:

1. migliaia di persone si riversano in pochi metri quadrati di arenile;
2. si formano aree di parcheggio immediatamente dietro le dune, provocando il loro spianamento e deterioramento;
3. si costruiscono strutture balneari sempre più grandi, attrezzate e stabili che ostacolano il normale evolvere delle morfologie della spiaggia e la possibilità di edificazione di nuove dune.

I principali rischi per i sistemi spiaggia/duna sono quelli associati all'erosione e al prelievo di sabbia o agli squilibri nel suo trasporto a mare (Audisio et al., 2002).

1.2.4 Le dune costiere in Emilia Romagna

Le coste dell'Emilia Romagna hanno un'estensione di circa 130 Km, che vanno da Nord a Sud rispettivamente dalla foce del Po di Goro fino a Cattolica, e sono costituite per la maggior parte da spiagge sabbiose di tipo dissipativo, a debole pendenza aventi un'ampia zona di frangimento delle onde. Il ricorso in maniera così intensiva all'uso di difese rigide fu dettato dalla pesante crisi erosiva del litorale, innescatasi dalla prima metà del secolo scorso (Simeoni et al., 2006), a fronte di un fiorente sviluppo turistico da proteggere. Oltre la metà delle spiagge regionali (circa 74 km) sono protette da opere rigide di vario tipo. Le più diffuse sono scogliere parallele emerse che difendono circa 40 km di costa. I restanti 30 km sono protetti da scogliere radenti (opere parallele ed aderenti alla riva), scogliere a cresta bassa, barriere sommerse in sacchi e pennelli (www.arpa.emr.it). Visti gli impatti paesaggistico-ambientali di queste opere e in particolare l'innescarsi d'intensi processi erosivi nelle spiagge sottoflutto alle opere stesse, il Piano Costa del 1981 ha suggerito di abbandonare la difesa con le scogliere e di sostituirla con il ripascimento mediante l'impiego di sabbia prelevata inizialmente da cave a terra e, in seguito, da scavi edili, accumuli litoranei e giacimenti sottomarini (sabbie relitte). La Regione ha assunto, su indicazione dei Piani Costa 1981 e 1996, altre importanti iniziative a favore della costa. Tra di esse occorre menzionare: il blocco dello scavo di inerti lungo gli alvei fluviali, la costruzione di grandi opere acquedottistiche per portare acqua di superficie alla costa al fine di ridurre la subsidenza, l'istituzione di reti di controllo dell'evoluzione costiera, la ricerca di accumuli di sabbia sul fondale marino.

Al 2009, su 130 Km di litorale regionale, solo circa 34 Km riportano presenze di rilievi dunosi, di cui circa 10 Km in Provincia di Ferrara, 22 Km in Provincia di Ravenna e i rimanenti 2 Km distribuiti nel tratto costiero più meridionale (Regione Emilia-Romagna Servizio Difesa del suolo, della costa e bonifica, 2009).

Per quanto riguarda la tipologia è da evidenziare che solo il 3% di queste sono "dune attive", cioè di neoformazione e che attivamente scambiano sedimento con la spiaggia. La maggior parte del territorio è caratterizzata da cordoni dunosi formati 100 -150 anni fa in una fase di accrescimento della costa, fissati da vegetazione spontanea o piantumata a pineta, che si ritrovano al limite della spiaggia poiché questa è in una fase di regressione (GNRAC, 2006).

Laddove le dune si sviluppano su tratti in erosione e con un arenile inferiore ai 20 metri di ampiezza sono sottoposte all'azione scalzante del mare in maniera continuativa ed infatti presentano un'evidente erosione al piede e varchi d'esondazione soprattutto nei periodi invernali (Figura 13).



Figura 13. Avanduna con segni di scalzamento al piede

In alcuni casi lo sviluppo urbano ha inglobato queste formazioni che si ritrovano in vere e proprie aree urbane o comunque sono fortemente condizionate dalla pressione antropica circostante, come nei casi in cui i cordoni sono interrotti da edifici o stabilimenti balneari.

La vulnerabilità delle dune è aumentata anche dall'elevato tasso di subsidenza della costa che rappresenta una delle minacce più serie alla stabilità del litorale, in media 8 mm/anno per la fascia fino a 5 km dalla battigia (ARPA ER, 2009a), con i tassi maggiori nell'area deltizia del Po.

Un altro fattore di fragilità riscontrato è il degrado della vegetazione, elemento fondamentale per l'intrappolamento della sabbia. Significativi cordoni di dune permangono nell'area di Foce Bevano e in quella delle Vene di Bellocchio, entrambe zone protette Rete Natura 2000 e Riserve Naturali Statali. In quest'ultima zona, sebbene in riduzione nell'ultimo decennio, si estendono 4,6 km di dune costiere con quote tra 1 e 7 metri e larghezza dei cordoni tra i 100 e 650 metri. Gli apparati dunosi in regione soffrono quindi di una forte limitazione spaziale: dal lato della spiaggia, l'erosione e lo sfruttamento antropico sottraggono la sabbia necessaria alla loro crescita, dal lato interno invece la migrazione è bloccata dalla presenza di un'ampia fascia di pineta o dai territori coltivati o urbanizzati.

1.3 ACQUE SOTTERRANEE

1.3.1 Caratteristiche della matrice acqua

Le acque sotterranee sono quelle acque che si trovano al di sotto della superficie del terreno, nella zona di saturazione e in diretto contatto con il suolo e il sottosuolo (D.Lgs. 152/2006 art.74 comma 1 lettera l).

Le acque sotterranee rappresentano circa il 22% di tutte le acque dolci del nostro pianeta (Press and Siever, 1997) e sono ospitate in rocce permeabili chiamate acquiferi. L'acquifero è una formazione o gruppo di formazioni costituite da roccia e/o terreno sciolto i cui pori, all'interno della matrice solida, sono saturati da acqua in grado di muoversi in funzione della permeabilità dell'acquifero stesso (Calatace et al., 2007).

Quando le precipitazioni atmosferiche raggiungono il terreno, parte dell'acqua fluisce per ruscellamento superficiale fino a confluire nel reticolo idrografico, parte è usata dalle piante, parte evapora e ritorna in atmosfera ed, infine, parte si infiltra nel sottosuolo. L'infiltrazione è governata dalle caratteristiche intrinseche del suolo; in particolare dalla porosità e dalla permeabilità.

Lo sfruttamento di questa risorsa, talvolta, può rappresentare un problema poiché è lentamente rinnovabile in quanto i tassi di ricarica sono inferiori rispetto ai tassi di prelievo, soprattutto in luoghi in cui la popolazione abbia un'elevata densità. Inoltre, il sovrasfruttamento implica compattazione secondaria del materiale dell'acquifero e, conseguentemente, subsidenza.

L'acquifero freatico superficiale costiero è considerato di scarso valore qualitativo e le sue acque non rivestono un ruolo importante nell'approvvigionamento d'acque ad uso potabile (RER 2005). Da un punto di vista geochimico, le condizioni ambientali nell'acquifero sono neutre (pH circa 7), prevalentemente sub-anossiche e riducenti a causa dei bassi gradienti idraulici che limitano la circolazione delle acque, caratteristica comune agli acquiferi confinati padani sudorientali classificati in RER & ENI-AGIP (1998).

1.3.2 Normativa di riferimento sulle acque

È stato stimato che sul pianeta siano presenti 1.400 milioni di miliardi di tonnellate di acqua di cui solo 11.000.000 di miliardi siano acque dolci.

Sembrerebbero grandi numeri ma l'eccessivo sfruttamento del suolo, la distruzione dei boschi, l'agricoltura intensiva e l'eccessiva edificazione creano alterazioni e squilibri nel ciclo dell'acqua; in particolare, diminuiscono o si concentrano le precipitazioni e aumenta la richiesta di acqua per l'irrigazione e il sostentamento delle città. Inoltre, il problema quantitativo non è il solo, bensì esiste anche l'incognita qualitativa. È quindi facile capire che l'emergenza acqua non riguardi soltanto i paesi in via di sviluppo bensì anche l'evoluta Europa. Infatti, secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) il 16% della popolazione del Vecchio continente non ha acqua potabile e ben 140 milioni di europei non hanno accesso ad acqua pulita e servizi sanitari.

A fronte di queste evidenze, il Parlamento europeo e il Consiglio hanno istituito il 23 ottobre 2000 la **Direttiva Europea sulle Acque 2000/60/CE** (Water Framework Directive). Questa rappresenta il quadro legislativo per l'azione comunitaria in materia di acque con gli obiettivi di protezione e miglioramento della qualità di tutte le risorse idriche (fiumi, laghi, acque sotterranee, acque di transizione e acque costiere). La direttiva si pone il raggiungimento dei seguenti obiettivi generali:

1. ampliare la protezione delle acque, sia superficiali che sotterranee;
2. raggiungere lo stato di "buono", valutato sia in termini ecologici che chimici, per tutte le acque entro il 31 dicembre 2015;
3. gestire le risorse idriche sulla base di bacini idrografici indipendentemente dalle strutture amministrative;
4. procedere attraverso un'azione che unisca limiti delle emissioni e standard di qualità;
5. riconoscere a tutti i servizi idrici il giusto prezzo che tenga conto del loro costo economico reale;
6. rendere partecipi i cittadini delle scelte adottate in materia.

La Water Framework Directive è stata recepita nella legislazione italiana dal Testo Unico Ambientale – **D.Lgs 3/04/2006, n. 152 PARTE III – SEZIONE II.**

Le pressioni antropiche sulle acque sotterranee e gli eventuali impatti sono alla base dei criteri assunti per la definizione dei corpi idrici, insieme alle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'area (Arparivista/Ecoscienza, 2012).

La normativa impone pertanto la corretta definizione dei “valori di fondo naturale” di inquinanti di origine naturale per distinguere gli eventuali impatti antropici e definire le azioni necessarie per ripristinare la qualità delle risorse idriche. Al contrario, la presenza di nitrati nelle acque sotterranee – derivanti dall'uso di fertilizzanti chimici o dallo spandimento di reflui zootecnici – indicano un impatto antropico preoccupante.

Il **Decreto Legislativo 16 marzo 2009, n. 30** “Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento” definisce le misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento e il depauperamento delle acque sotterranee.

Il **Decreto 08 novembre 2010 n. 260** introduce i criteri aggiornati per il monitoraggio e la classificazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, vigenti a partire dal 22 Febbraio. Questo decreto sostituisce integralmente l'allegato I alla parte III del D.Lgs. 152/06, modificando in particolare il punto “Classificazione e presentazione dello stato ecologico”, per renderlo conforme agli obblighi comunitari, attraverso l'inserimento di criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici.

Anche la Regione Emilia Romagna tutela le acque sotterranee attraverso attività di pianificazione, gestione e controllo. A tale scopo elabora e predispone gli indirizzi e le linee per lo sviluppo delle reti di monitoraggio quali-quantitative, nonché definisce e predispone i risultati rilevati.

1.4 METODI DI INDAGINE GEOFISICA

La Geofisica è la scienza che si occupa dello studio, sotto l'aspetto fisico, di tutta la Terra (solida, liquida e gassosa) e dello spazio che la circonda (Norinelli, 1982). Lo studio geofisico della parte superficiale della Terra Solida, in generale a carattere applicativo, è volto all'individuazione di strutture geologiche, alla risoluzione di problemi di ingegneria civile, idraulica, mineraria e fa parte della Geofisica applicata. È noto, per esempio, che grazie al contributo della Geofisica si possono ottenere parametri del sottosuolo altrimenti non conoscibili e si può indagare a profondità altrimenti irraggiungibili (Norinelli, 1982).

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico-strumentale e l'affinamento delle conoscenze analitico-matematiche (implementazione dei codici e dei modelli di calcolo), che ha interessato le metodologie di prospezione geofisica (= insieme delle indagini condotte sul terreno), ha consentito l'applicazione di sistemi quali i metodi geoelettrici, gravimetrico, sismico, magnetico e il Ground Penetrating Radar (GPR). I campi di applicazione sono diversi: ingegneristico; ambientale per ricerche idrologiche; archeologico per ottenere informazioni dettagliate sulle dimensioni e la localizzazione di elementi antropici sepolti, sfruttando le proprietà elettriche dei materiali di cui sono costituiti (Corrao, 2006). Inizialmente queste tecniche erano esclusivamente finalizzate al settore degli idrocarburi e/o minerario ma, finalmente questa idea è stata abbandonata.

Naturalmente queste tecniche, notevolmente più economiche e di rapida esecuzione, non sostituiscono la geologia applicata (es. indagini penetrometriche), infatti gli studi pregressi sulla geologia dell'area d'interesse sono sempre indispensabili e contribuiscono a migliorare il lavoro di prospezione (di caratterizzazione fisico-meccanica e geometrica del suolo).

Alcune di queste tipologie di rilievo geofisico prevedono lo scorrimento dello strumento che è fissato su un carrello, mentre in altri casi è necessario il fissaggio per alcuni centimetri di elettrodi metallici (di diametro di circa 1 cm) nel terreno. Queste tecniche sono considerate **non invasive** poiché non prevedono significative perturbazioni del suolo come scavi o pozzi, fatta eccezione per le pavimentazioni e strutture storiche di importanza culturale, in cui può essere considerato un rilievo invasivo.

Lo scopo quindi è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo, attraverso una serie di misure opportunamente effettuate dalla superficie. Queste misure riguardano delle grandezze fisiche intrinseche dei mezzi del sistema sottoposto alla prova. Queste tecnologie consentono di aprire virtualmente il mezzo investigato e di osservarlo nelle sue parti più interne (Corrao, 2006).

Risultano essere un discreto strumento di rappresentazione fisica e geometrica dei mezzi materiali (Corrao, 2006).

Campi d'impiego:

- Geologia: discontinuità litologiche e cavità, depositi di ghiaia e sabbia, pianificazione estrattiva;
- Idrogeologia: rilievo di acquiferi, rilievo interfaccia acque dolci/salate (ambito costiero);
- Bonifiche: presenza d'inquinanti nel terreno, aree di riempimento, individuazione perdite da discariche, tracciamento di percolati e contaminanti in falda;
- Edilizia: individuazione di fondamenta e tubature prima di effettuare scavi per nuove costruzioni;
- Archeologia: rilievo di strutture sepolte.

Principali vantaggi dei metodi geofisici:

- Buona risoluzione stratigrafica in senso verticale e laterale ai fini della stima volumetrica degli ammassi sepolti;
- Costo contenuto rispetto alle indagini sismiche e di tipo geognostico diretto;

In situazioni complesse non è sufficiente l'uso di una sola metodologia ma è consigliabile una combinazione di metodi differenti. In Tabella 1 è riportato il confronto tra i diversi metodi geofisici e il loro campo di applicazione.

Tabella 1. Confronto tra metodi geofisici e campo di applicazione

<i>target</i>	Geoelettrica	Sismica	GPR
Acquiferi	Buono	Medio	Medio/Scarso
Inquinamento chimico (Conduittivo)	Buono	Scarso	Scarso
Inquinamento chimico (Resistivo)	Medio	Scarso	Buono/Medio
Zone di Faglia	Medio	Buono	scarso
Profilo Bedrock	Medio	Buono	Medio
Cavità, Massi	Medio (dipende da prof./dimensione)	Medio/Scarso	Buono/Medio

I principali metodi d'indagine confrontati in Tabella 1 (Norinelli, 1982) si differenziano per le seguenti peculiarità:

- **Metodi geoelettrici:** sono impiegati per ricerche idrogeologiche, stratigrafiche, strutturali, giacimentologiche;
- **Metodo sismico:** per ricerche strutturali, l'individuazione di faglie, anticlinali, sinclinali e trappole strutturali per idrocarburi. È valido per ricerche stratigrafiche e in molti problemi di ingegneria civile;
- **Metodo magnetico (GPR):** per ricerche di giacimenti minerali (contenenti elementi ferrimagnetici) e di rocce eruttive sepolte, per la determinazione della profondità del basamento nelle ricerche petrolifere. Molto utile per la localizzazione di tubazioni metalliche sepolte per procedere a diversi tipi di lavori come quelli stradali e di manutenzione.

2 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 DESCRIZIONE DEL SITO D'INDAGINE

L'area oggetto della presente tesi si colloca a circa 13 km dal Comune di Ravenna, a Sud della località marittima di Lido di Dante, nell'area Sud-Est della Pianura Padana. Lido di Dante è una frazione di circa 170 abitanti, compreso tra la Foce dei Fiumi Uniti, a Nord, e la Foce del Bevano, a Sud.

L'area di studio si estende da Nord verso Sud, dal centro abitato alla Foce del Torrente Bevano, ad Est è confinata dal Mare Adriatico mentre ad Ovest dalla Pineta Ramazzotti (Figura 14).

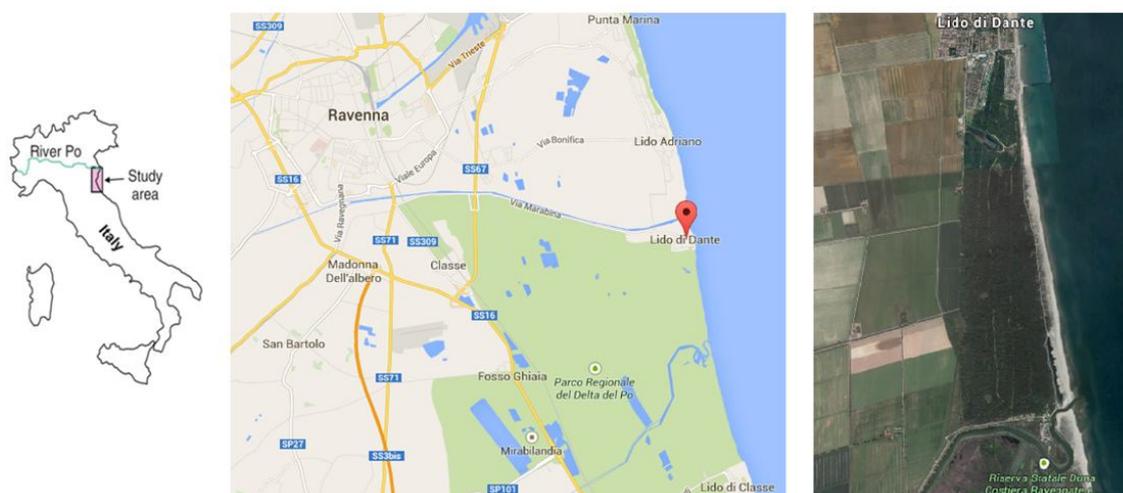


Figura 14. Area di studio

La Pineta Ramazzotti è stata colpita, il 19 Luglio del 2012, da un grande incendio, di origine dolosa, che fece andare in fumo oltre 65 ettari di pineta (Figura 15).



Figura 15. Immagini dell'incendio

L'area costiera presa in considerazione da questo studio, rappresenta un sito ad elevato valore naturalistico-ambientale. Il sito è inserito tra le Riserve Naturali Biogenetiche Statali ("Duna costiera ravennate e foce torrente Bevano") gestite dal Corpo Forestale dello Stato di Punta Marina. La Riserva ricopre un'areale di 1256 ettari, interessando anche una fascia costiera retro-dunale che comprende le zone umide dell'Ortazzo e Ortazzino. Inoltre, la zona di studio è interamente compresa entro il Parco Regionale del Delta del Po – Stazione "Pineta di Classe e Saline di Cervia" ed è tutelata come "bellezza naturale", Zona di Protezione Speciale, Sito di Importanza Comunitaria, Zona Ramsar ed Oasi di Protezione della Fauna.

2.1.1 Sito di Importanza Comunitaria e Zona di Protezione Speciale (SIC-ZPS)

Quest'area, appartiene al SIC-ZPS IT4070009 "Ortazzo, Ortazzino, Foce del Torrente Bevano" (Figura 16) e ricade quasi interamente nel Parco Regionale del Delta del Po. È uno dei siti con maggiore diversità ambientale in ambito litoraneo della Regione.

In esso ricadono la foce del Torrente Bevano (ultimo estuario meandriforme dell'alto Adriatico), cinque chilometri di dune costiere attive con alle spalle la pineta litoranea a *Pinus pinaster* e il sistema di zone umide peri-fluviali salmastre dell'Ortazzino e dell'Ortazzo. Il sito comprende anche la fascia marina costiera per circa 300 metri di larghezza. La foce del Bevano vera e propria occupa un'area di circa 40 ettari, e testimonia, con i suoi equilibri tra acque e sabbie mutevoli, in base agli andamenti stagionali di maree e portate fluviali, ci da un'idea di come doveva essere l'intera fascia costiera regionale prima dei massicci interventi antropici.

L'area a destra della foce (Sud), denominata Ortazzino, comprende i meandri fossili del Bevano, parte delle dune costiere, i retrostanti prati umidi salmastri con falda affiorante e prati aridi con arbusteti termofili. In questo complesso di zone umide e dune aride sono presenti quasi tutti i tipi di vegetazione alofila nord adriatica.

Alle spalle delle dune si trovano le pinete demaniali (sezioni Ramazzotti e Savio), create a partire dal 1881 sul cordone litoraneo di più recente deposizione, con lo

scopo di proteggere le colture retrostanti dai venti marini. Le pinete artificiali sono state sovrapposte all'originaria vegetazione arbustiva tipica delle dune consolidate che, in parte, rimane nelle fasce marginali e nel sottobosco.

In posizione più arretrata, si sviluppa la zona umida dell'Ortazzo, un'antica valle d'acqua dolce, arginata ed ottenuta dalla riconversione di precedenti risaie; attualmente è soggetta agli influssi salmastri della falda e si caratterizza come un ampio stagno sub-costiero, in parte controllato dall'immissione di acque dal canale Bevanella e dal Fosso Ghiaia. Le vasche con acque più basse si prosciugano durante l'estate, originando distese fangose in cui si insediano le comunità alofile annuali tipiche di questi ambienti. La palude è attraversata da una penisola con pineta a *Pinus pinea*. A sud dell'Ortazzo sono presenti praterie umide con acque dolci, di recente ripristino.

Nel sito sono presenti 12 habitat d'interesse comunitario in eccellenti condizioni di conservazione (quattro dei quali prioritari); questi coprono circa l'80% della superficie del sito stesso. In esso si mantiene intatta la naturale successione dal mare all'entroterra, senza insediamenti balneari ed alterazioni antropiche. Recenti ricerche indicano la presenza di altri 2 habitat di interesse comunitario di cui uno prioritario: dune mobili del cordone litorale con presenza di *Ammophila arenaria* ("dune bianche") e quello delle dune costiere fisse a vegetazione erbacea ("dune grigie").

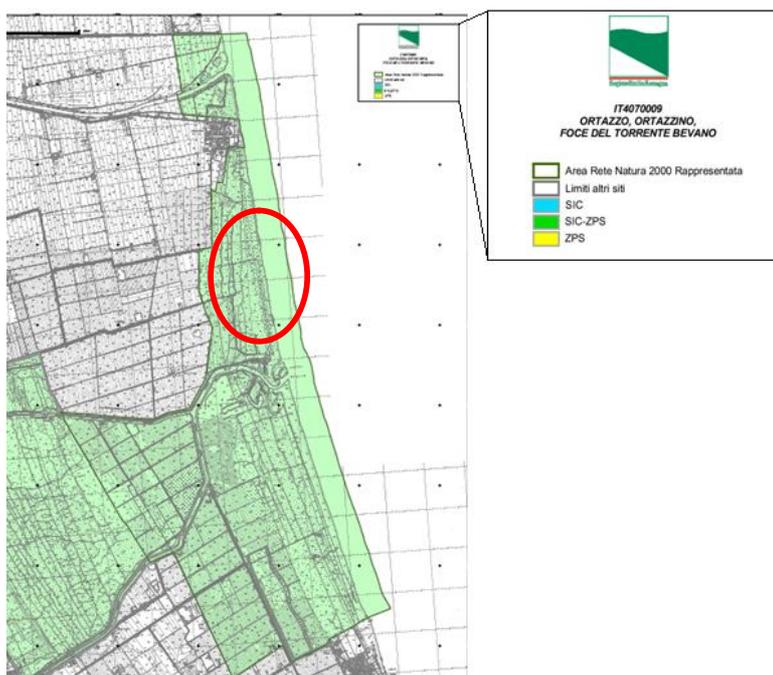


Figura 16. Carta del SIC-ZPS IT4070009 (www.ambiente.regione-romagna.it). Nel cerchietto rosso è indicata precisamente l'area di studio

2.2 FLORA

Il particolare ambiente delle sabbie litoranee ha selezionato una flora specializzata (Figura 17), in grado di tollerare un terreno sciolto ed incoerente, generalmente povero di nutrienti, un'esposizione ai venti marini carichi di sabbia e di particelle di sale, una forte insolazione con un'elevata temperatura in alcune ore del giorno, una forte aridità e un'ingressione di acqua salata con le mareggiate. Le specie vegetali che colonizzano le sabbie costiere sono indicatrici di habitat di grande interesse per la conservazione della biodiversità nel territorio europeo. Di grande rilievo per la conservazione è la *Salicornia veneta* (Figura 17), oggetto di tutela prioritaria a livello europeo (Allegato 2 alla Direttiva Habitat 92/43/CEE) (www.minambiente.it).



Figura 17. *Salicornia veneta* (a sinistra), *Medicago marina* (centrale) e *Convolvulus soldanella* (a destra)

Tra gli habitat di pregio si annoverano la “Vegetazione annua delle linee di deposito marine” dominato da *Cakile maritima* (Figura 18) e da *Salsola kali*, spesso compromesso dall'erosione marina e dal calpestio dei numerosi visitatori. L'habitat delle “Dune mobili embrionali”, per lo più scarsamente sviluppato, è dominato da *Agropyron junceum*. Invece l'habitat delle “Dune mobili del cordone litorale” è caratterizzato dalla presenza di *Ammophila littoralis* (Figura 18), in genere discretamente conservato che è un'importante edificatrice della duna, infine l'habitat prioritario delle “Dune costiere fisse a vegetazione erbacea (dune grigie)”.



Figura 18. *Cakile maritima* (a sinistra) e *Ammophila Littoralis* (a destra)

Le comunità arbustive del retroduna, comprendono l'habitat delle "Dune costiere con *Juniperus spp.*", dove il ginepro comune si accompagna ad un altro interessante arbusto, l'olivello spinoso (*Hippophae rhamnoides*), affiancato dall'habitat delle "Dune con foreste di *Pinus pinea* e/o *Pinus pinaster*".

Si tratta di due habitat prioritari e pertanto da tutelare con particolare attenzione. In entrambi gli habitat sono presenti specie arbustive sempreverdi, quali: *Phillyrea angustifolia*, *Pyracantha coccinea*, *Asparagus acutifolius*, *Rubia peregrina*, *Clematis flammula*, proprie del sottobosco della foresta di leccio e pertanto indicatrici di una possibile evoluzione verso tale tipologia di foresta.

2.3 VEGETAZIONE: associazione dunale

L'ambiente costiero delle sabbie (spiagge e dune) costituisce un caso esemplare di "ambiente estremo". Il vento trasporta piccolissime goccioline d'acqua marina insieme a grandi quantità di minuscoli granelli di sabbia creando un vero e proprio "aerosol" che smeriglia ed incrosta di salsedine tutto ciò che incontra, sommergendo rapidamente i rami e le foglie delle piante. L'eccessivo drenaggio delle acque piovane nel terreno sabbioso che dilava via i nutrienti minerali e l'intensa evaporazione causata dal sole e dal vento, il suolo ed il sottosuolo sabbiosi risultano essere "fisiologicamente" aridi.

L'intensità di questi fattori estremi e delle loro risultanti decresce man mano che ci si allontana dalla battigia, dando origine a situazioni progressivamente più permissive e consentendo un aumento di diversità specifica procedendo verso l'interno.

Visto anche il fatto, che tale substrato è anche fisicamente molto instabile e mobile, ne deriva che la formazione delle comunità vegetali è spesso molto difficile e solo poche specie vegetali altamente specializzate vi riescono a vivere.

Queste sono le piante "psammofile", ovvero le piante delle sabbie, che hanno adottato particolari e ben specifici adattamenti morfologici e fisiologici:

- adattate ad ambienti fisiologicamente aridi ma non salati, vivono sempre ad un livello decisamente superiore a quello dell'alta marea, in modo da essere inondate da acque salate solo saltuariamente e per periodi molto brevi;

- alcune hanno radici molto sviluppate per poter raggiungere in profondità l'acqua, dolce, che scarseggia in superficie, altre invece in orizzontale in modo da raccogliere la maggior quantità possibile d'acqua piovana;
- possiedono una notevole resistenza all'ambiente aereo salmastro, ovvero ai cristalli di sale minutissimi trasportati dai venti che possono smerigliare le gemme e le foglie delle piante;
- generalmente sono basse o presentano un portamento prostrato per opporre al vento una resistenza limitata;
- producono germogli a diverse altezze per evitare il completo seppellimento da parte della sabbia portata dal vento;
- hanno foglie con una colorazione chiara per proteggersi dai raggi del sole;
- la superficie delle foglie ridotta al minimo ricoperte da una leggera peluria per evitare un'eccessiva traspirazione;
- possiedono sistemi di accumulo d'acqua nelle foglie, che hanno spesso aspetto carnoso (crassulenza);
- possiedono una ridotta traspirazione, per evitare l'eccessiva evaporazione causata dal forte irraggiamento solare.

In generale è giusto osservare che il sistema delle comunità vegetali psammofile costiere costituisce una sorta di "diaframma elastico" su cui si attutiscono fortemente gli effetti del mare e che la sua presenza è condizione necessaria sia per l'equilibrio della diversa vegetazione naturale retrostante che per il mantenimento delle dune e delle spiagge e la loro resistenza all'azione erosiva del mare. Una sana situazione litoranea, con dune progressivamente più stabili e basse macchie nelle dune più interne, è in grado di alzare i venti salsedinosi carichi di aerosol marino e di limitare quindi la quantità di sabbia trasportata lontano dal vento, condizioni queste indispensabili per consentire l'esistenza di comunità forestali stabili retrostanti al sistema dunale.

Dalla battigia verso l'interno, comprende le seguenti comunità (Figura 19):

- il Cakileto, al margine interno della battigia;
- l'Agropireto, nelle dune più "basse" al limite interno della "spiaggia";
- l'Ammofileto, sulle dune "mobili" e basse macchie a ginepro e olivello spinoso sulle dune più interne e consolidate.

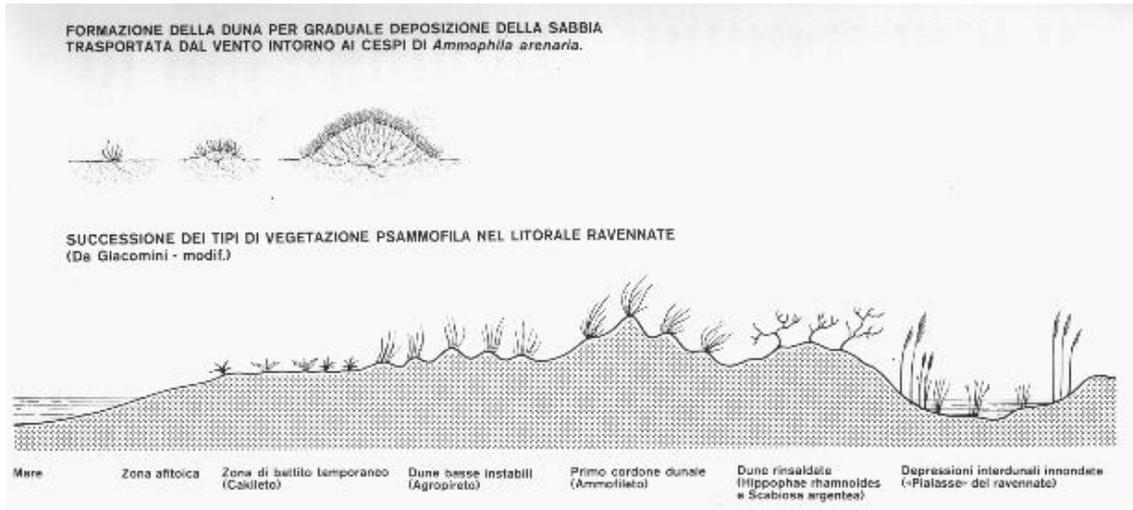


Figura 19. Associazione dunale (www.vegetazionecostiera.it)

2.4 FAUNA

Nell'area di foce del torrente Bevano sono presenti diverse specie tutelate dalla direttiva Habitat 92/43/CEE: fra gli invertebrati è stata segnalato il lepidottero Licena (*Lycaena dispar*) (Figura 20).



Figura 20. Lepidottero *Lycaena dispar*

Fra i pesci sono state segnalate 4 specie d'interesse comunitario: la Cheppia (*Alosa fallax*), il Nono (*Aphanius fasciatus*), il Ghiozzetto di laguna (*Knipowitschia panizzae*) e il Ghiozzetto cenerino (*Pomatoschistus canestrinii*); quest'ultime due specie di ghiozzi sono tipiche di acque salmastre degli ambienti lagunari ed estuariali.

Fra i rettili sono note la Testuggine palustre (*Emys orbicularis*), il Saettone (*Elaphe longissima*), la Natrice tessellata (*Natrix tessellata*).

Fra gli anfibi il Rospo Smeraldino (*Bufo viridis*), la Rana verde (*Rana lessonae*) e il Ramarro (*Lacerta viridis*).

Non è presente all'interno del sito nessuna specie di mammiferi d'interesse comunitario. Tra i mammiferi degni di rilievo vi sono il Vespertilio di Daubenton *Myotis daubentoni*, Chiroterro molto localizzato in regione, l'Istrice, recentemente comparso, e la Puzzola. È presente anche il Daino.

Nel sito inoltre sono note 44 specie di uccelli tutelate dalla direttiva Uccelli 79/409/CEE fra cui la Garzetta (*Egretta garzetta*), l'Airone (*Egretta alba*), il Fenicottero (*Phoenicopterus ruber*), l'Occhione (*Burhinus oedicephalus*), il Calandro (*Anthus campestris*), il Fraticello (*Sterna albifrons*) e il Martin Pescatore.

La maggior parte di queste 44 specie è legata alle zone umide ed è localizzata negli stagni costieri, nelle praterie esondabili dei meandri fluviali, nelle spiagge, negli ambienti prativi aperti. Il Succiacapre ed alcuni passeriformi frequentano essenzialmente le aree pinetali ed arbustive.

Per due specie in particolare, l'Occhione e il Calandro, la fenologia potenziale è diversa da quella rilevata (la fenologia indica le modalità di presenza sul territorio delle varie specie nei vari periodi dell'anno: nidificante, svernante, stanziale, di passo); in altre parole, queste due specie, pur avendo nel sito habitat idonei alla riproduzione, non vi nidificano a causa della presenza di fattori perturbativi. Nella fattispecie, il disturbo antropico causato dalla frequentazione a scopo balneare della spiaggia, pregiudica l'insediamento di tali specie, per lo stesso motivo, anche il Fraticello (Figura 21), risulta essere un nidificante irregolare e molto localizzato.



Figura 21. Esempio di Fraticello

2.5 EVOLUZIONE STRATIGRAFICA E GEOLOGICA

Il bacino sedimentario della pianura del fiume Po (46000 km²) prende origine dalla fossa impostata fra l'Oligocene e il Miocene a causa dell'emersione della catena appenninica e della presenza di quella Alpina già quasi completamente emersa (Amorosi et al., 2002). L'acquifero costiero ravennate è caratterizzato da sedimenti sabbiosi, limosi e argillosi che si alternano nella sequenza verticale secondo i vari cicli deposizionali che hanno caratterizzato quest'area nel tempo (Amorosi et al., 2004). L'evoluzione geologica recente di questa regione è stata controllata dall'alternanza tra fasi di sedimentazione continentale e marina che sono responsabili dell'interdigitazione che si riscontra fra i sedimenti stessi (Amorosi et al., 2002). La testimonianza di questa evoluzione la ritroviamo a circa 25 m di profondità dal piano campagna dove, ad argille e limi nerastrati torbosi, si sovrappongono sedimenti marino costieri di pro-delta e cordoni litorali depositati durante la trasgressione. La stratigrafia della porzione più superficiale della fascia costiera padana (da 0 a 150 m di profondità dal piano campagna in Figura 22 comprende i due cicli trasgressivo-regressivi più recenti (olocenico e pleistocenico), correlabili con la curva glacio-eustatica di Figura 23.

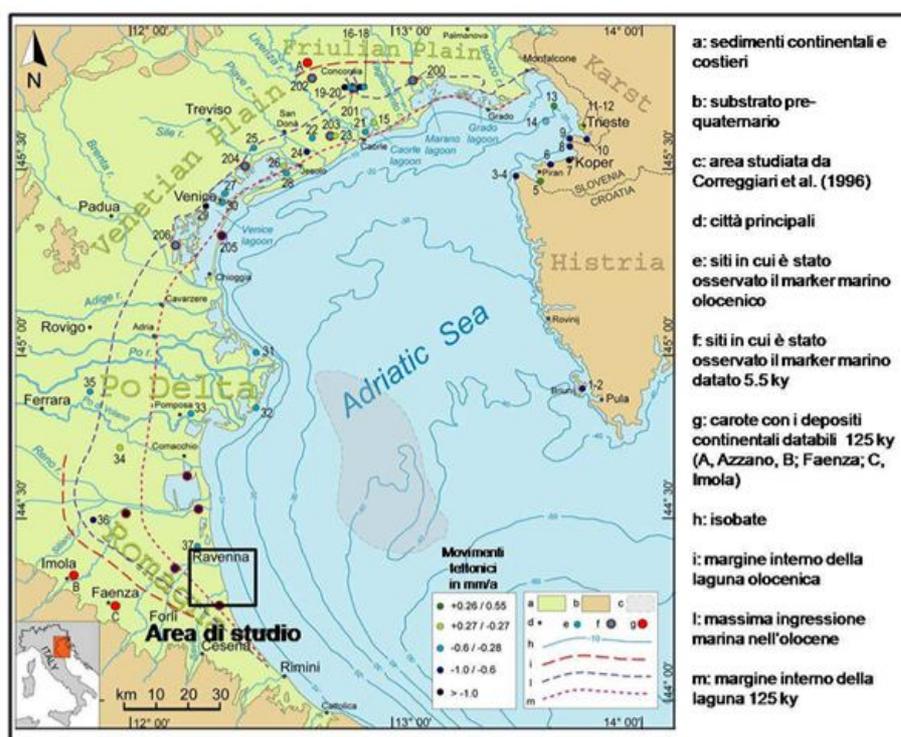


Figura 22. Ubicazione dell'area di studio nell'area dell'Adriatico settentrionale (Antonioli et al., 2009). Nella mappa sono rappresentati i siti in cui sono state osservate le ingressioni merine Oloceniche e tardo Pleistoceniche (simboli e-f in legenda), le relative paleolinee di costa dell'Adriatico (simboli i-m) e i tassi di subsidenza della regione in mm/anno

La dinamica sedimentaria è stata controllata prevalentemente dalle fluttuazioni climatiche ed eustatiche (cioè variazioni del livello del mare).

Le principali tappe evolutive della fase più recente di caduta ed innalzamento del livello marino (cicli di 4° ordine in Figura 23) sono state identificate nei sedimenti depositi negli ultimi 125000 anni e interpretate in termini di stratigrafia sequenziale da Amorosi et al. (1999a; 1999b):

- **FASE REGRESSIVA (FRS).** E' iniziata circa 125000 anni fa e si è conclusa da circa 30000 anni. Durante l'ultima glaziazione Wurmiana, il livello del mare si abbassò progressivamente fino a circa 120 metri rispetto al livello attuale facendo regredire la linea di costa di circa 250 Km verso sud-est, con conseguente formazione di ambienti continentali (linea i in Figura 22) (Veggiari, 1974; Amorosi et al., 1999a; Amorosi et al., 1999b).
- **FASE DI STAZIONAMENTO BASSO (LST).** Nel periodo compreso tra 30000 e 16000 anni fa, l'intera area nord adriatica si trasformò in un'ampia pianura alluvionale con valli larghe e poco incise, in cui la sedimentazione fluviale iniziò solo intorno al termine di questa fase (da 18000 a 16000 anni fa).

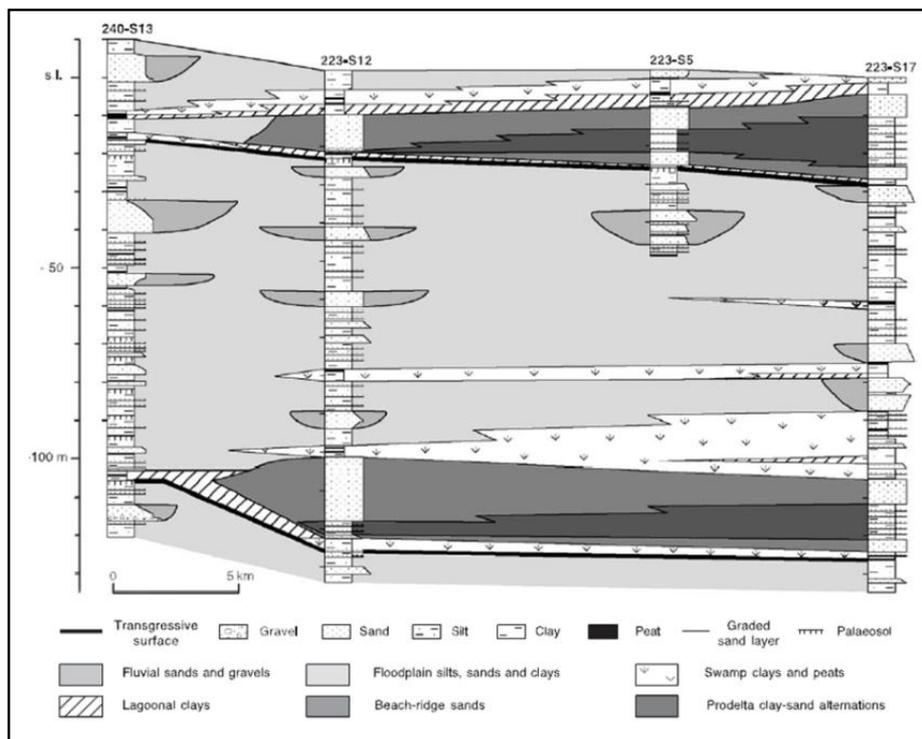


Figura 23. Stratigrafia dei primi 150 metri del sottosuolo nella pianura sud orientale (Amorosi, 2004). Alternanza ripetitiva di facies continentali, transizionali e marine corrispondenti ai due cicli trasgressivi più recenti (ultimi 125000 anni)

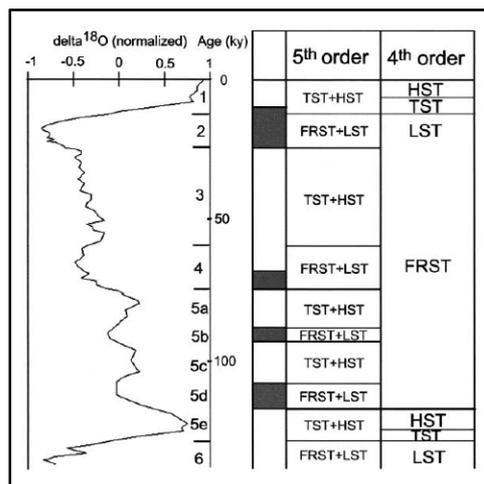


Figura 24. Stratigrafia sequenziale della pianura padana sud occidentale (Amorosi, 2001). I principali cicli glacio-eustatici sono messi in relazione con le sequenze di 4° ordine ed evidenziati dalle date in grassetto, mentre le oscillazioni minori della curva eustatica sono correlabili con le sequenze di 5° ordine

- **FASE TRASGRESSIVA (TST).** Durante questo periodo ha inizio una fase di miglioramento climatico a scala globale, che portò ad una riduzione dei ghiacciai ed a un aumento del livello marino e venne denominata Flandriano (Olocene) circa 5500 anni fa (Correggiari et al., 1996). In risposta ad un rapido innalzamento del livello marino e agli scarsi apporti fluviali, il sistema costiero barriera-laguna migrò progressivamente verso l'entroterra nel periodo compreso tra 16000 e 5500 anni fa (Pleistocene tardo glaciale ed Olocene inferiore). All'epoca della massima ingressione marina la linea di costa si trovava circa 20-30 Km verso l'entroterra rispetto alla posizione attuale (linee l e m in Figura 22). La sedimentazione trasgressiva iniziò solo nell'Olocene (10500-6000 anni fa). In pianura padana sud orientale, i sedimenti di questo periodo consistono di pelite organica in facies di zona palustre e/o lagunare (in verde in Figura 25). Questa facies è stata interpretata da molti autori come corrispondente allo stadio iniziale di costruzione del moderno delta del Po (Amorosi et al., 1999a; Amorosi et al., 1999b; Bondesan et al., 1995a; Rizzini, 1974).

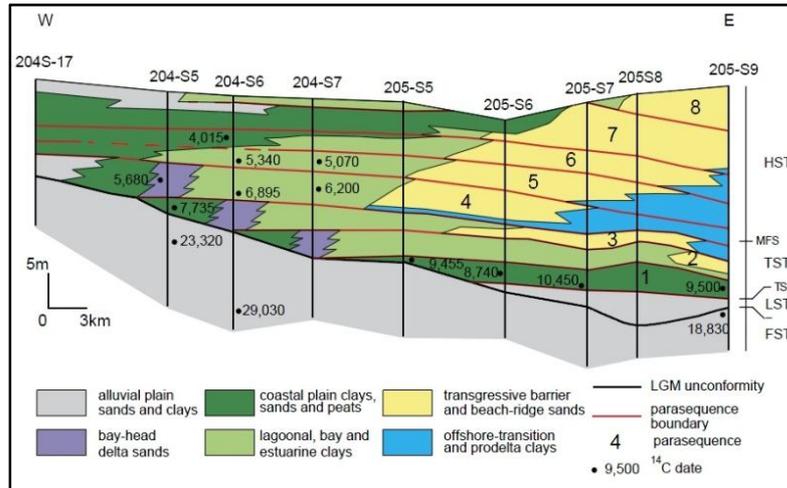


Figura 25. Sezione della pianura padana sud orientale che mostra la sequenza trasgressivo-regressiva suddivisibile in 8 cicli minori (Amorosi, 2005). I pallini neri indicano le età dei sedimenti lungo le superfici di discontinuità diacrone (in rosso)

- **FASE DI STAZIONAMENTO ALTO (HST)** A questa fase tardo olocenica corrisponde una rapida progradazione del delta del Po, dovuta alla combinazione di fattori tettonici (subsidenza) e climatici (aumento dell'erosione e del trasporto fluviale). Proprio in questa fase si è avuto l'Optimum climatico, circa 5500 anni fa, caratterizzato da un forte arretramento della linea di costa che si spinse, nelle aree più depresse dell'attuale pianura ravennate, fino a circa 20 chilometri all'interno rispetto alla posizione attuale (Bondesan et al., 1995a).

Alla progradazione del fiume Po corrisponde la messa in posto di sabbie di fronte deltizia/cordoni sabbiosi e alternanza di peliti e sabbie fini di prodelta (rispettivamente in giallo e azzurro in Figura 25), che si sono messi in posto al di sopra della pelite organica che rappresenta la massima ingressione marina nell'area (Marchesini et al., 2000). L'ambiente sedimentario cambiò da continentale (in facies: piana alluvionale, fluviale, zona palustre) a marino nel tardo Pleistocene (circa 18000 anni fa; Figura 25). Durante il ciclo glacio-eustatico principale (4° ordine) si sono registrate molte oscillazioni minori del livello marino (5° ordine), che hanno portato ad episodi secondari di sedimentazione fluviale e formazione di paleosuoli nelle aree intervallive, come quello che si verificò circa 13000 anni fa (5° ordine in Figura 24), verosimilmente a causa dell'aumento del trasporto fluviale. Allo stesso modo, negli ultimi 2000 anni si è avuta la deposizione di cordoni e dune sabbiose, localmente intercalati da sottili livelli di silt e argilla in facies di retroduna (Amorosi et al., 1999a;

Amorosi et al., 1999b). La sequenza trasgressivo-regressiva più recente in pianura padana sud orientale, è suddivisibile in 8 cicli minori con spessore pari a 3-5 metri e durata di circa 1000 anni, che sono illustrati in Figura 25, in una sezione perpendicolare alla linea di costa (Amorosi et al., 2005). Le sabbie di cordone (in giallo) delle parasequenze 4-8 costituiscono l'acquifero freatico dell'area di studio, mentre le sabbie delle parasequenze 2-3 costituiscono l'acquifero confinato più superficiale. La superficie di massima ingressione marina (MFS in Figura 25) è stata datata 5680 anni e si colloca tra questi due intervalli. Entrambi gli acquiferi sono cuneiformi e hanno estensione areale limitata: l'acquifero freatico si estende da mare verso l'entroterra per circa 6 chilometri con dei sedimenti di prodelta (azzurro in Figura 25), che separano l'acquifero sottostante dal freatico e si assottigliano progressivamente verso l'entroterra, fino ad essere costituiti da un orizzonte sottile (pochi centimetri) a circa 5 chilometri dalla linea di costa nell'area di studio.

In Figura 26 è riportata la stratigrafia di un carotaggio effettuato nell'area di studio, presso la località Lido di Dante, e una parte della sezione stratigrafica parallela alla costa ricostruita dalla Regione Emilia-Romagna sulla base di numerosi carotaggi. E' possibile osservare gli spessori degli acquiferi e degli acquitardi: i sedimenti sabbiosi che costituiscono l'acquifero freatico (in rosso) hanno spessore pari a circa 7 metri, i sedimenti fini di prodelta hanno spessore di circa 10 metri, le sottostanti sabbie dell'acquifero confinato hanno spessore pari a circa 5 metri. Il livello, lenticolare, di pelite organica (in bianco e blu in Figura 26) corrisponde all'inizio della sedimentazione trasgressiva (TST di Figura 24), evento delimitato dalla linea rossa di Figura 26 (base del subsystema di Ravenna).

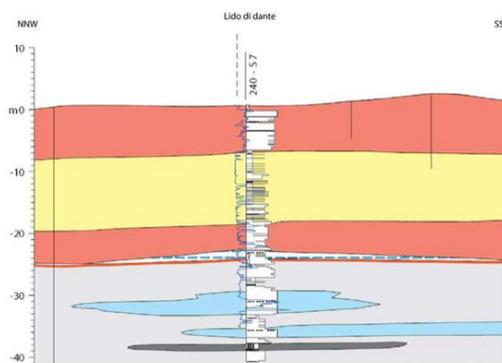


Figura 26. Stratigrafia di un carotaggio eseguito presso Lido di Dante dalla Regione Emilia Romagna. I due livelli in rosso corrispondono ai due acquiferi più superficiali presenti nell'area di studio (acquifero freatico: circa 0: -7 metri, acquifero confinato: circa -20: -25 metri)

Per quanto riguarda la geologia, l'evoluzione e le vicende antropiche recenti hanno apportato notevoli cambiamenti alla porzione costiera considerata; la geologia superficiale consiste di paleo cordoni affioranti (acquifero freatico) o sepolti da materiale argillo-limoso continentale con spessore variabile da 1 a 4 metri portato in loco dalle bonifiche dello scorso secolo (Luppis, 1940; Calastri et al., 1976; Stefani and Vincenzi, 2005). Su di una sezione trasversale alla costa eseguita all'altezza dell'abitato di Lido di Dante (Figura 27), è evidente come i sedimenti di spiaggia e di duna, risultino affioranti nei pressi delle dune costiere attuali e al di sotto delle pinete storiche. In tali zone questi depositi formano le porzioni più superficiali dell'acquifero freatico. Tra i due corpi di paleodune affioranti, vi sono dei depositi marini sepolti da sedimenti più fini di origine continentale (in nero in Figura 27).

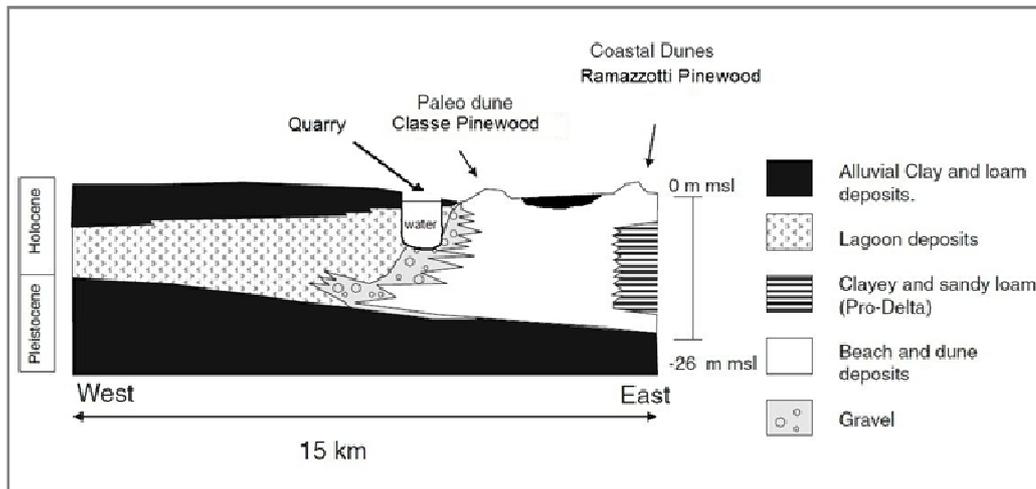


Figura 27. Sezione litostratigrafica presso Lido di Dante (modificato da Amorosi et al., 1999 e Giambastiani et al., 2007)

Nel complesso, la composizione chimica dei sedimenti nell'area di studio è calcarea ed è comune la presenza di concrezioni carbonatiche, in parte dolomitiche. La presenza di gesso e dolomite, di origine sia alpina che appenninica, nell'acquifero freatico costiero della provincia di Ravenna, è nota in letteratura (Curzi et al., 2006; Marchesini et al., 2000). Sono abbondanti anche i micronoduli di Ferro e Manganese. Le tracce di ossidazione sono comuni nella zona di oscillazione della falda (esclusi le zone con maggiore permeabilità: dune attive).

In Figura 28 vengono mostrate le porzioni di territorio in cui si hanno le sabbie affioranti, cioè dove si riscontrano i maggiori tassi di ricarica naturale

dell'acquifero freatico e anche di potenziale inquinamento. È evidente come nella maggior parte dei casi tali aree coincidano con le pinete storiche e con le pinete costiere.

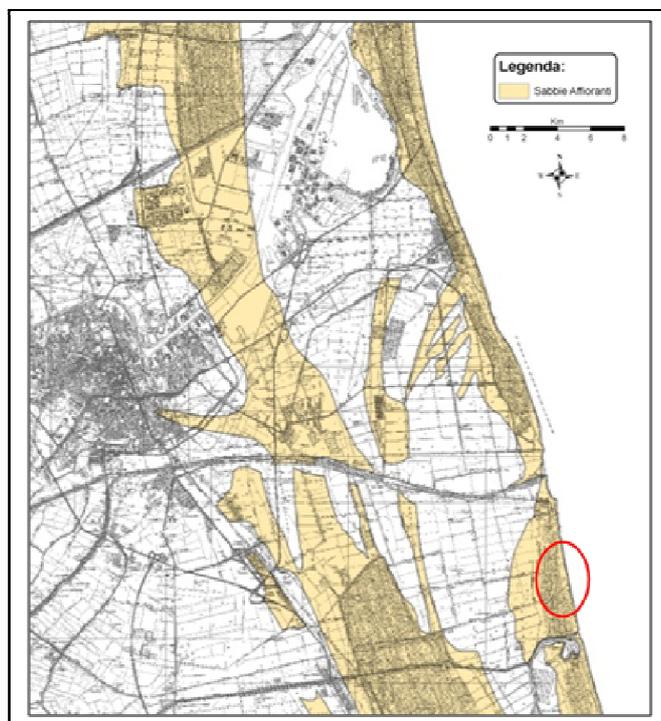


Figura 28. Mappa delle porzioni di territorio in cui si trovano le sabbie affioranti dell'acquifero (RER)

2.6 EVOLUZIONE DELLA LINEA DI COSTA

Dall'epoca della massima ingressione marina ad oggi, nella regione costiera padana l'ambiente è progressivamente cambiato da marino, a salmastro e a dolce (in azzurro, giallo e verde, rispettivamente, in Figura 29). La massima estensione di aree palustri di acqua dolce si ebbe circa 2300 anni fa (Figura 29 C) nell'area del delta del Po, mentre nell'area di studio le zone umide di acqua dolce erano presenti circa 400 anni fa (presso Classe in Figura 29 D). L'evoluzione del territorio in epoca storica comprende la presenza di una stretta laguna salmastra lungo tutta la linea di costa da Chioggia a Classe fino al 1600. Si nota inoltre come in quel lasso temporale vi sia stata una prima abbondante pro-gradazione in corrispondenza della foce del Primaro (attuale corso del Fiume Reno) che è stata poi smantellata nei secoli seguenti. I sedimenti trasportati sono stati rideposti a formare le paleodune su cui s'insediano le Pinete Storiche (linee gialle e arancioni in Figura 29).

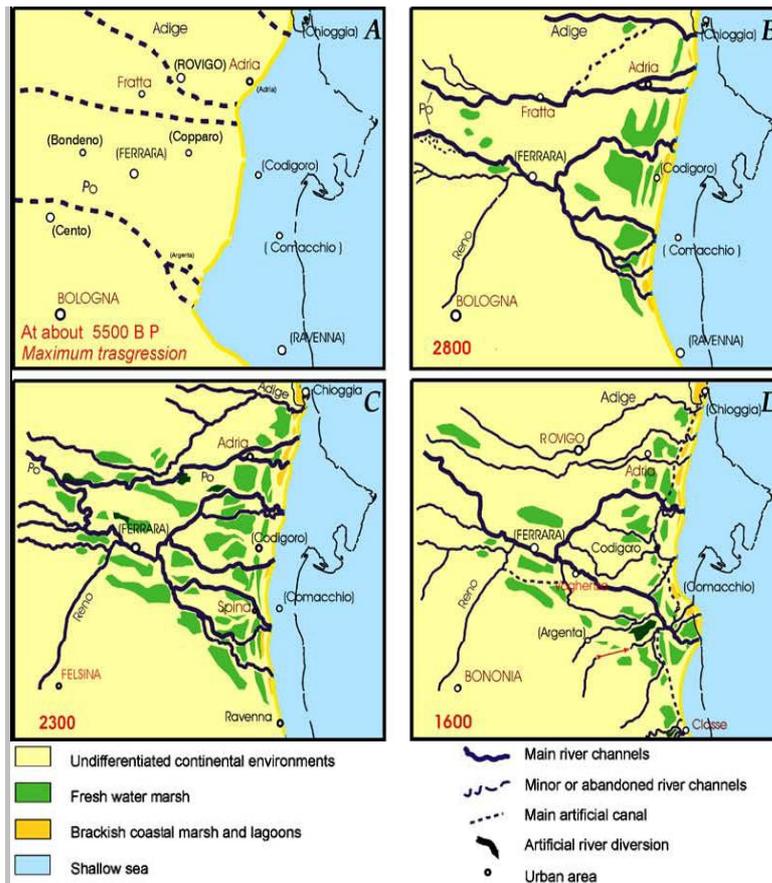


Figura 29. Evoluzione regionale della linea di costa dalla massima ingressione marina (5500 anni fa) al 1600 (modificato da Stefani and Vincenzi, 2005)

Dalla Figura 30 si osserva come la linea di costa sia avanzata, nelle aree in cui il fenomeno è stato più forte come ad esempio in corrispondenza della Pineta di Classe, anche di 5 chilometri. Uno dei fattori che negli ultimi 150 anni ha permesso l'emersione di molte aree costiere, nell'intera regione del delta del Po, è l'opera di bonifica (Stefani and Vincenzi, 2005), effettuata per permettere lo sfruttamento agricolo delle terre. Altro fattore molto importante è la costruzione di argini e terrapieni per la canalizzazione e rettificazione dei corsi fluviali con anche un'impermeabilizzazione dell'alveo, in modo da prevenire le inondazioni.

La progradazione è stata anche causata dall'erosione dei sedimenti delle cuspidi deltizie del fiume Ronco e del fiume Savio. I sedimenti erosi sono stati poi ridistribuiti lungo la costa dalle correnti marine, che hanno indotto una progressiva rettificazione della linea di costa (CNR e Comune di Ravenna, 1994). Attualmente, spiagge e dune costiere sono in erosione lungo tutta la costa adriatica (Bondesan et al., 1995b). Nel 2003 l'altitudine delle dune più esterne dell'area di studio fu ridotta di circa 1 m da un singolo evento di tempesta (Ciavola et al., 2007).

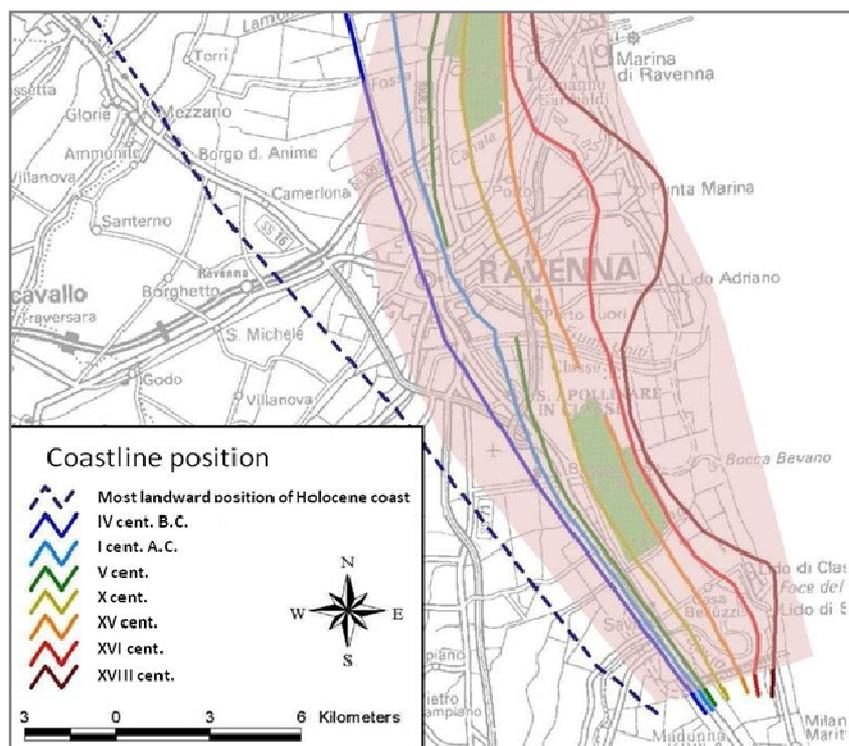


Figura 30. Evoluzione della linea di costa nella zona di Ravenna

2.7 SUBSIDENZA

La subsidenza è un fenomeno geologico di lento abbassamento della superficie del suolo su scala più o meno ampia, che può assumere particolare gravità nelle zone di pianura dove gli insediamenti antropici si trovano a quote di poco superiori a quella del livello marino.

Questo fenomeno può essere sia di origine sia naturale che antropica (Bau' et al., 2000; Teatini et al., 2006). La prima agisce su scala "regionale" ed il suo impatto si presenta più distribuito rispetto alla seconda che invece agisce su scala "locale" ovvero limitata a piccole aree.

La subsidenza naturale può essere causata da fattori come la glacio-isostasia (movimenti verticali di riequilibrio del territorio successivi allo scioglimento delle coltri glaciali dell'ultima glaciazione) oppure può essere determinata dalla compattazione differenziale dei sedimenti della successione stratigrafica. Si considera che la velocità media di subsidenza nella zona di Ravenna per l'intero Quaternario sia stata circa 1,8-3 mm/anno (Bertoni et al., 1988; Sestini, 1992).

La subsidenza naturale dell'area è di 0,5 mm/anno ed è causata dalla compattazione dei sedimenti (Carbognin e Tosi, 1995; Carminati et al., 2005).

La Pianura Padana è un enorme bacino sedimentario sottoposto alle spinte tettoniche di Alpi ad Appennini che ne determinano una subsidenza strutturale (Pignone, 2007); infatti la subsidenza è legata a cause tettoniche profonde e a compattazione differenziata dei sedimenti plio-quadernari (Selli and Ciabatti, 1977; Venturini, 1996; Amorosi et al., 2002).

In un contesto meno antropizzato, i tassi di abbassamento del suolo, sarebbero compensati dai sedimenti alluvionali, erosi a monte e trasportati a valle dai fiumi. Attualmente però, questo trasporto solido verso mare, è ostacolato dalle opere di regimazione (briglie e dighe), arginatura e cementificazione dei letti fluviali, che sono state necessarie per prevenire i danni a dei centri abitati, che sorgono in prossimità degli alvei fluviali a causa di un'urbanizzazione incontrollata avvenuta durante il boom economico degli anni 60.

Negli ultimi 35 anni la quota topografica nelle aree più subsidenti si è ridotta di ben 1.5 metri (Teatini et al., 2006), favorendo l'ingressione d'acqua marina negli acquiferi costieri.

I fattori antropici che intervengono nella determinazione della subsidenza includano:

- il carico di edifici e di insediamenti umani, che provocano il consolidamento dei siti sottostanti;
- le bonifiche che provocano il costipamento a causa dell'abbassamento della pressione dei fluidi ed il conseguente aumento della pressione efficace;
- lo sfruttamento intensivo di risorse quali le acque sotterranee e il gas (Bertoni et al., 1998);
- La necessità di prelevare acqua dal sottosuolo è principalmente legata ad esigenze connesse a forti concentrazioni industriali, urbane e turistiche.

In epoca storica, alla subsidenza naturale si è aggiunta la subsidenza antropica, dall'eccessiva estrazione d'acqua potabile e di gas naturale (metano), destinati ad alimentare il comparto industriale di Ravenna (Gambolati et al., 1991; Gambolati and Teatini 1998; Bau' et al., 2000; Carminati et al., 2002; Teatini et

al., 2006). Queste estrazioni hanno accelerato il fenomeno di compattazione naturale del sedimento alluvionale di cui è costituito il sottosuolo dell'area.

La subsidenza totale nel periodo di rapida industrializzazione 1950-1990 è arrivata fino a 1 metro (Antonellini et al., 2010b). In particolare, tra il 1972 ed il 1973 vennero registrati i valori massimi pari anche a 1.10 metri/anno in corrispondenza dell'area industriale (Teatini et al. 2005a).

La subsidenza è diminuita dagli anni 80 ed il generale miglioramento è imputabile sicuramente alla chiusura di alcuni pozzi di estrazione d'acqua e la sostituzione dell'approvvigionamento idrico, prelevando le acque superficiali dal Fiume Lamone e dalla diga di Ridracoli per usi idropotabili e dal Po per quelli agricoli (Canale Emiliano Romagnolo CER) anziché utilizzare acque sotterranee (Preti, 2000). Ciò nonostante la subsidenza è un problema ancora presente soprattutto se accoppiato anche all'innalzamento del livello marino. Teatini et al (2005b) e Simeoni et al., (2003) prevedono che a causa della subsidenza e dell'innalzamento del livello del mare, nel 2020 il 48% del territorio costiero si troverà sotto il livello del mare invece del 15% rilevato nel 2003.

Esiste una stretta correlazione, già chiaramente dimostrata (Carbognin et al., 1984), tra la depressurizzazione degli acquiferi e l'entità della subsidenza causata dallo sfruttamento delle acque sotterranee. La subsidenza, ha raggiunto i valori maggiori nelle zone di maggior abbattimento piezometrico come nell'area industriale ed in altri poli di emungimento concentrato. Infatti, il prelievo di acqua da uno strato più o meno superficiale del terreno provoca un abbassamento della pressione interstiziale che provoca a sua volta un aumento del carico sopportato dai grani del terreno; a ciò corrisponde una deformazione elastica del terreno seguita eventualmente da una compattazione degli strati che corrisponde ad una deformazione permanente di tipo plastico.

In Figura 31 è riportata la variazione della piezometria dell'acquifero profondo multistrato nella zona di Ravenna (Teatini et al., 2005a). Il profilo mostra il continuo e rapido abbassamento della piezometria a partire dal 1950 fino alla prima metà degli anni '70. Dopo questa data, appunto in concomitanza all'attivazione dell'acquedotto pubblico di Ridracoli e alla costruzione del nuovo acquedotto industriale (fine anni 70), le quote piezometriche hanno iniziato un lento recupero e i tassi di abbassamento si sono ridotti drasticamente.

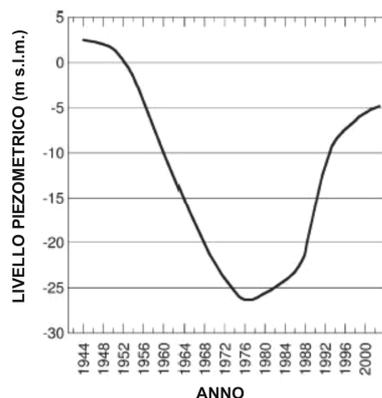


Figura 31. Variazioni del livello piezometrico nell'acquifero profondo di Ravenna (Teatini, 2005a)

Inoltre, la forte depressurizzazione che coinvolge sia la falda freatica che quelle artesiane più profonde, richiama lateralmente e verticalmente l'acqua salina che è insediata nelle stesse falde. Un fenomeno che spesso si accompagna ai pompaggi intensivi è il richiamo di acque saline fossili (connate) che spesso si trovano immediatamente al di sotto del sistema acquifero sfruttato.

2.8 TOPOGRAFIA

La topografia è pressoché pianeggiante (Figura 32) e le uniche aree topograficamente elevate sono le fasce dei cordoni dunosi litoranei che hanno un'altimetria dell'ordine di qualche metro. Il cordone situato più internamente (paleocordone) è occupato dalla Pineta di Classe, la quale ricopre un'area di circa 900 ettari, mentre il cordone odierno, situato esattamente nell'area d'interesse, è occupato dalla Pineta Costiera Ramazzotti che si estende da Nord a Sud rispettivamente da Lido di Dante a Lido di Classe. Fra i due cordoni è presente un'area depressa, una zona acquitrinosa denominata Valle dell'Ortazzo.

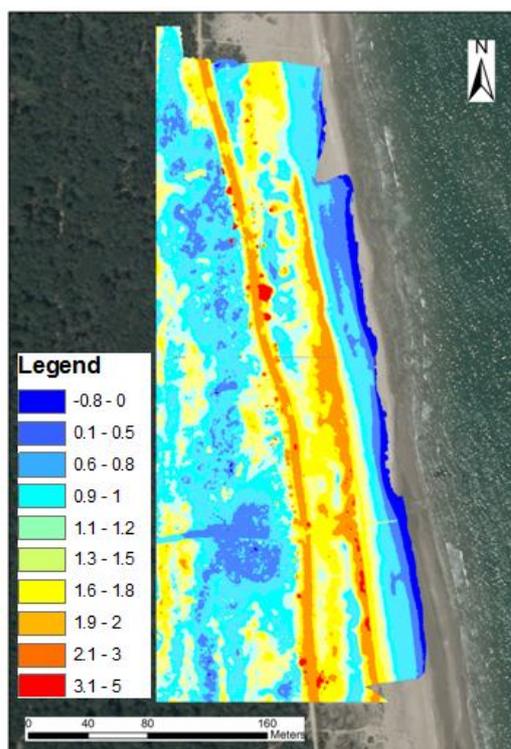


Figura 32. Andamento altimetrico dell'area di studio

2.9 SUOLI ED USO DEL SUOLO

La carta dei suoli in Figura 33 mostra come i suoli presenti nell'area ravennate si differenzino in funzione della geologia superficiale.

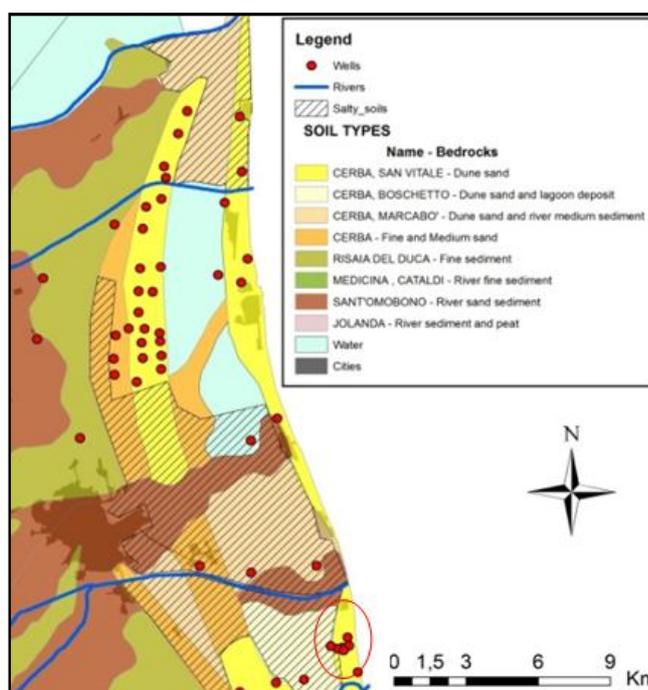


Figura 33. Carta dei suoli (Corticelli, 2003). In tratteggio le porzioni di suoli agricoli potenzialmente esposti a salinizzazione

A seconda della granulometria dei suoli essi mostreranno maggiori o minori rischi verso la problematica della salinizzazione (FAO, 2002). Ne deriva che tutti i suoli presenti nella porzione costiera di Ravenna sono potenzialmente a rischio di salinizzazione, a causa della topografia depressa, del forte drenaggio e della presenza di acque salate in acquifero.

La carta dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna (Figura 34) (Corticelli, 2003) evidenzia come il territorio in esame si presenti per lo più come zona agricola adibita prevalentemente a seminativo. Il resto del territorio è occupato da aree ambientali: le Pinete storiche di Classe e San Vitale, le pinete costiere, le “zone umide” di Punta Alberete e Valle Mandriole, le “Valli salmastre” della Piailassa Baiona, Piomboni ed Ortazzo e Ortazzino. Se aggiungiamo alle precedenti le aree antropiche raggiungiamo circa la metà della superficie totale presa in considerazione.

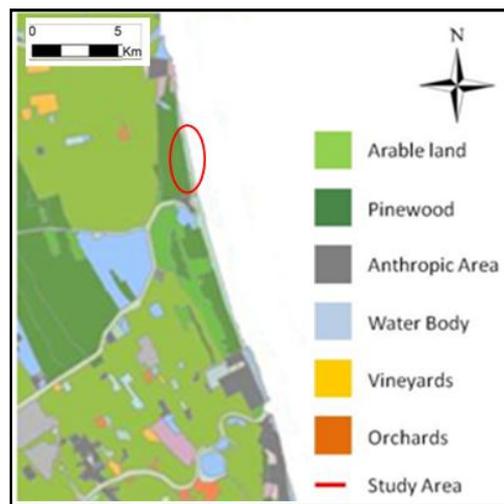


Figura 34. Carta di uso del suolo della Regione Emilia Romagna

2.10 ASSETTO IDROLOGICO

Il sistema idrologico dell'area ravennate risulta estremamente complesso e articolato, perché costituito da corpi idrici diversi per origine (naturale o artificiale) e per uso. Gli elementi che caratterizzano maggiormente questo territorio sono sicuramente i bacini salmastri e le Piailasse, le aste fluviali, i canali che compongono il reticolo di bonifica, le opere di presa e distribuzione delle acque fluviali e il mare Adriatico (Figura 35).

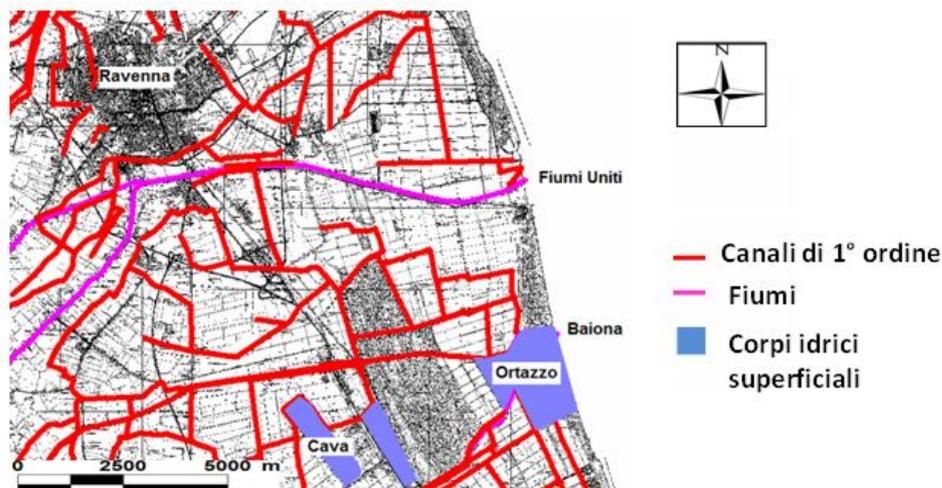


Figura 35. Mappa dei corpi idrici superficiali. In blu le zone umide e i laghi, in magenta i fiumi e in rosso i canali

Come si può notare dalla Figura 35 i fiumi principali scorrono secondo il gradiente topografico in direzione SO-NE e sfociano ad Est nel Mare Adriatico. Essi sono: il Fiume Montone, il Fiume Ronco ed il Fiume Savio. I primi due confluiscono a Nord dell'area oggetto d'indagine dando origine ai Fiumi Uniti. Da non sottovalutare l'importanza del torrente Bevano, che è un corso d'acqua caratterizzato da piene improvvise ma brevi. In condizioni di scarsa efficienza del sistema di foce, portano ad un forte innalzamento del livello dell'acqua nel torrente, ad una maggiore difficoltà di scolo delle acque dai canali di bonifica (che drenano un territorio posto al di sotto del livello del mare) e che determinano un elevato rischio di esondazione (Montanari, 2009).

2.11 CLIMATOLOGIA

Il regime termico dell'Emilia-Romagna è di tipo prevalentemente sub-continentale tendente al temperato sublitoraneo e dunque al mediterraneo solo lungo la fascia costiera.

Le precipitazioni sono di mediocre entità nella pianura e hanno massimi primari autunnali e secondari nel periodo estivo ma possono anche assumere forma nevosa durante i mesi invernali soprattutto a ridosso della catena appenninica.

3 MATERIALI E METODI

3.1 METODO GEOELETTRICO

Il metodo geoelettrico fu sperimentato da Schlumberger a partire dal 1912, in Normandia sulla possibilità di definire la natura e le strutture presenti nel sottosuolo attraverso misure opportunamente eseguite in superficie, in particolare, le caratteristiche di conducibilità dei materiali.

Nell'ambito delle metodologie utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, la prospezione geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente (metodo della resistività), attraverso misure congiunte d'intensità di corrente elettrica (continua o alternata a bassa frequenza) immessa artificialmente nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi per alcuni centimetri nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi a diretto contatto con il suolo (configurazione Quadripolo).

Il metodo geoelettrico è un metodo "indiretto", che si basa sui principi che descrivono la conduzione elettrica attraverso un mezzo: più una matrice si lascia attraversare da portatori di carica, più essa viene definita conduttiva, viceversa essa è definita resistiva. Ciò che si misura non è la corrente elettrica ma la distorsione del potenziale, dovuto a cambiamenti del flusso di corrente che attraversa l'anomalia (disomogeneità = corpo a diversa capacità di conduzione, poichè esso deflette le linee di corrente e distorce pertanto la normale distribuzione di potenziale elettrico) (Figura 36).

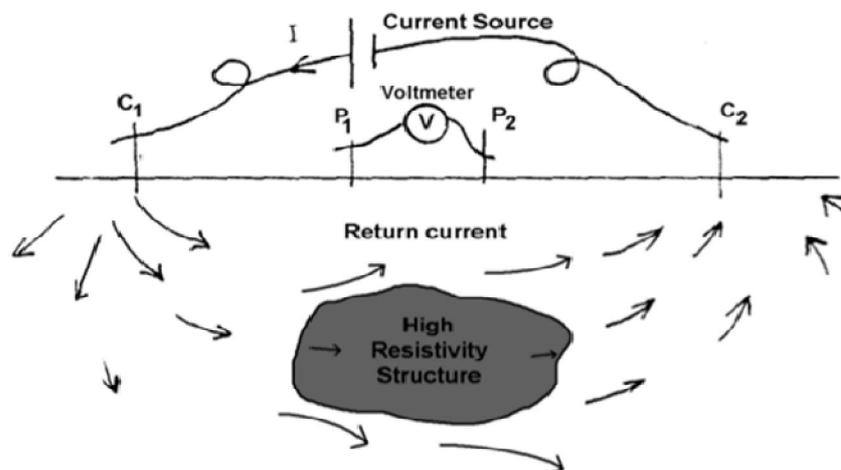


Figura 36. Esempio di anomalia del flusso di corrente

Lo studio di come la corrente elettrica si muove nel sottosuolo tra gli elettrodi, fornisce informazioni dettagliate su eventuali oggetti sepolti, che vengono evidenziati dal flusso irregolare di energia. Questo metodo consente quindi di verificarne le risposte elettriche e di risalire, da queste, alla sua struttura e composizione. Al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, è possibile fare un'analisi del comportamento della resistività evidenziando efficacemente i contrasti esistenti nel sottosuolo.

È necessario "ripulire" i dati ottenuti dal rumore di fondo, quindi si calcola la resistività apparente, per ottenere un modello di resistività del sottosuolo in 2 o 3 dimensioni (ricostruzione modellistica con l'applicazione di algoritmi) che si avvicini il più possibile alla situazione reale degli orizzonti stratigrafici sommersi. Solo un operatore consapevole di tutti i passaggi, è in grado di ricavare informazioni utili da un'indagine geoelettrica. L'interpretazione dei modelli di resistività va condotta, con la massima attenzione e prudenza per non cadere in facili approssimazioni o arrivare a conclusioni errate. Infatti, dai risultati che si ottengono si possono costruire delle mappe più o meno dettagliate e predisporre studi e/o interventi successivi.

Nell'ambito dei volumi investigati, si forniscono così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, ecc.), sull'andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sull'individuazione dei fenomeni di inquinamento delle varie matrici ambientali.

Le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di sostanze inquinanti, sia di natura inorganica che organica, infatti lo strumento è molto sensibile alle variazioni dei parametri fisici. Si possono ottenere informazioni di dettaglio sui percorsi d'infiltrazione degli inquinanti, spesso molto articolati, e sull'evoluzione nel tempo del loro processo, qualora l'indagine geoelettrica venga ripetuta periodicamente. Utile anche per ricostruire gli andamenti litologici delle strutture presenti e consente di delimitare gli spessori degli acquiferi.

I principali svantaggi del metodo sono dovuti alla massiccia presenza di acqua o altri conduttori nel terreno che, anche se sono sottoposti alle opportune correzioni, le misure possono essere falsate (resistenza di contatto elettrodo/terreno, che si elimina inumidendo con acqua e sali gli elettrodi o utilizzando delle sonde impolarizzabili) (Corrao, 2006). Altri problemi possono

essere dovuti alla topografia del sito studiato, che può causare difficoltà nel posizionamento dei transetti e alterazioni nelle rilevazioni della resistività, di cui bisogna tenere conto al momento della formulazione dei modelli.

Le potenzialità di queste tipologie d'indagine comprendono la previsione di eventi pericolosi come: frane, smottamenti causati dall'intensificarsi delle precipitazioni e sinkhole. Inoltre favoriscono la pianificazione territoriale delle zone interessate, tra cui la sicurezza degli abitanti e la conservazione del territorio. Utili nell'elaborare dei modelli previsionali che, valutano l'evoluzione dei fenomeni indagati nel tempo con la possibilità di individuare le aree a rischio per procedere all'eventuale e tempestiva evacuazione.

3.1.1 Teoria del metodo geoelettrico

Il metodo consiste, come accennato precedentemente, nella misurazione della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno. L'obiettivo è quindi di costruire modelli di resistività del sottosuolo attraverso un processo d'inversione dei dati acquisiti in fase di campagna.

Il metodo consiste nel far fluire cariche elettriche (ΔQ) attraverso un conduttore e misurarne il passaggio in un intervallo di tempo (Δt) definendo il concetto di **corrente elettrica**:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$$

In presenza di un **conduttore ohmico** (cioè un conduttore elettrico per cui vale la legge di Ohm) la corrente elettrica incontra una **resistenza** (R), misurata in Ohm, che dipende dalla **differenza di potenziale** (ΔV), misurata in Volt, e dalla corrente (I), misurata in Ampère, secondo la Legge di Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

che per un conduttore **omogeneo** (ovvero un corpo in cui ogni sua parte ha le stesse proprietà fisiche), **isotropo** (ovvero un corpo le cui proprietà fisiche non dipendono dalla direzione lungo le quali vengono considerate) e **cilindrico** con sezione (S), lunghezza (l) e resistività tipica del materiale (ρ), può essere espressa come:

$$R = \rho \left(\frac{l}{S} \right)$$

che evidenzia la resistenza elettrica di un materiale non dipende solo dalle sue proprietà fisiche (natura intrinseca del materiale) ma anche dalle sue caratteristiche geometriche. La resistività è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche.

La conducibilità (σ), misurata in $S\ m^{-1}$, è considerata equivalente all'inverso della resistività (ρ). Entrambe dipendono dalle caratteristiche elettriche del materiale considerato:

$$\sigma \equiv \frac{1}{\rho}$$

Sulla base di queste premesse è possibile effettuare studi che ci consentano di categorizzare i materiali che compongono i diversi tipi di suolo. Principalmente, è essenziale distinguere i conduttori in (Norinelli, 1982):

- buoni ($\rho < 1\ \Omega m$);
- intermedi ($1\ \Omega m < \rho < 10^7\ \Omega m$);
- isolanti ($\rho > 10^7\ \Omega m$).

3.1.2 Il metodo della resistività

Il metodo geoelettrico della resistività (ρ) prevede l'energizzazione del terreno (generalmente attraverso una batteria) con corrente continua (I) ed una misurazione diretta, sulla superficie del suolo, della differenza di potenziale (ΔV). Combinando le equazioni precedenti otteniamo:

$$\rho_a = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

dove con K ci indica un **fattore geometrico**, misurato in metri e con ρ_a la **resistività apparente**, misurata ohm*metri (Ωm), la quale è influenzata dal contributo delle diverse resistività degli elementi presenti nel sottosuolo (matrice e fluido).

La resistività è influenzata dalla natura dei litotipi investigati e il suo valore dipende dalla natura mineralogica dei terreni, dalla presenza di eventuali fluidi di saturazione, dalla temperatura, dalla porosità e dal grado di cementazione.

A differenza del modello cilindrico precedentemente descritto, nel caso di una misura geofisica, non si verificano quasi mai le condizioni di omogeneità ed isotropia del mezzo. Il sottosuolo infatti, è generalmente molto eterogeneo ed anisotropo dal punto di vista elettrico. Un successivo processo d'inversione

consente di passare dalle misure di resistività apparente al modello di resistività reale (Jaeger, 1972).

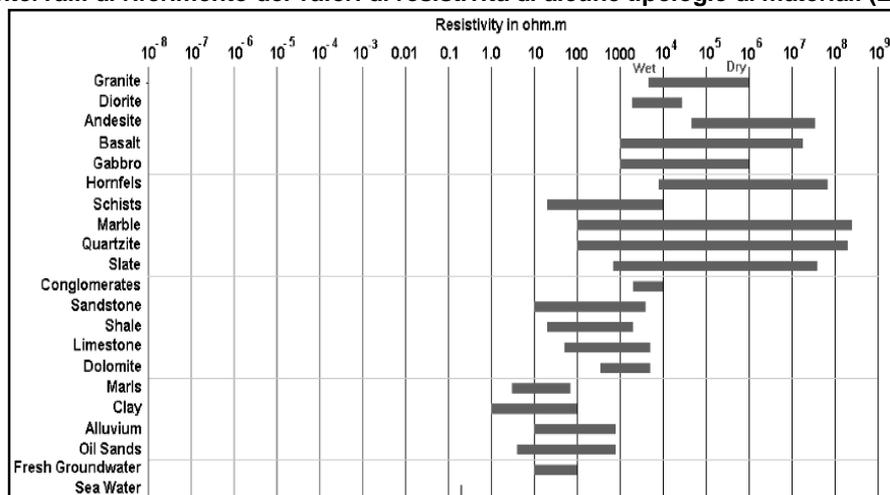
Essendo note le resistività di diversi materiali, a seconda dell'andamento della corrente, è possibile evidenziare e studiare le eventuali anomalie riscontrate nella porzione di suolo considerata.

3.1.2.1 Resistività delle rocce e dei sedimenti

Tutte le rocce naturali possono condurre elettricità se sottoposte ad un campo elettrico. La misura con la quale le rocce e i sedimenti si lasciano attraversare dalla corrente, dipende principalmente da: porosità, contenuto di fluidi, composizione mineralogica, grado di cementazione, temperatura della roccia, contenuto di argilla, salinità della soluzione acquosa, presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi), grado di fratturazione e percentuale delle fratture riempite da acqua di falda (Keller and Frischknecht 1966; Daniels and Alberty 1966). Il valore di resistività di un particolare corpo minerale può differire molto dalla resistività dei singoli cristalli (i valori a volte variano di diversi ordini di grandezza, Tabella 2). Ad esempio se siamo in presenza di sabbie la resistività aumenta, mentre diminuisce quando abbiamo delle argille.

A causa di queste numerose variabili la resistività non può essere rappresentata da un solo valore, ma da un intervallo più o meno ampio entro il quale esso può ricadere. Inoltre spesso i *range* di resistività delle varie litologie si sovrappongono tra loro, comportando ulteriori problemi in fase di elaborazione dei dati e di identificazione del tipo di materiale.

Tabella 2. Intervalli di riferimento dei valori di resistività di alcune tipologie di materiali (Loke, 1994)



La legge di Archie rappresenta la relazione tra resistività e porosità (Archie, 1950):

$$\rho_r = a \rho_w \varphi - m$$

- dove:
- $a \approx 1$;
 - $m \approx 2$;
 - ρ_r è la resistività di roccia/sedimento;
 - ρ_w è la resistività del fluido;
 - φ è la frazione di roccia/sedimento riempita dal fluido

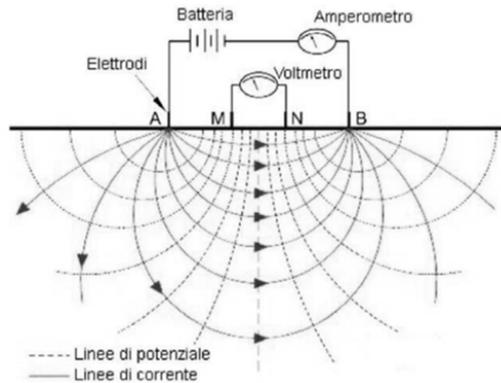
La resistività delle acque sotterranee può variare da 10 a 100 $\Omega \cdot m$ e dipende dalla concentrazione dei sali disciolti. Mentre la resistività dell'acqua di mare può variare da 0.2 a 3 $\Omega \cdot m$ in relazione al grado di salinità (Musset, 2003).

La saturazione in acqua, infine, ricopre un ruolo importante nella determinazione della resistività apparente del terreno, essendo inversamente proporzionale alla resistività. Alla luce di queste considerazioni del tutto generali è evidente che non esiste una corrispondenza biunivoca tra valore di resistività riscontrato nel modello e materiale presente nel sottosuolo. Solo un'interpretazione che tenga conto delle caratteristiche geologiche e fisiche del sito indagato, può chiarire la variabilità dei valori di resistività.

3.1.2.2 Configurazioni quadripolari

Approfondiamo ora le configurazioni Quadripolari rappresentate in Figura 37, nel caso di un terreno omogeneo, in cui è previsto il posizionamento di 4 elettrodi, di cui due di corrente (A e B) e due di potenziale (M e N), posti ad una distanza nota.

Sempre in Figura 37, sono rappresentate anche le linee di corrente e quelle di potenziale. Queste linee seguono traiettorie curve semisferiche che si espandono in direzione radiale rispetto alla sorgente. Le cariche, nel passare da un elettrodo all'altro, percorrono linee di corrente a profondità diverse: maggiore è la separazione tra A e B, maggiore sarà la diffusione della corrente nel terreno e, conseguentemente, la profondità raggiunta, e minore risulterà la differenza di potenziale registrato in superficie al centro tra M e N.



A e B = elettrodi di corrente (di immissione)

M e N = elettrodi di potenziale (di misura)

Amperometro = misura l'intensità di corrente

Voltmetro = misura la differenza di potenziale

Figura 37. Schema di distribuzione della corrente elettrica in un terreno omogeneo

Nel caso di un terreno reale invece, che non è quasi mai omogeneo, le linee di corrente subiscono una deformazione (distorsione dei flussi), dovuta alle linee di corrente che attraversano un'interfaccia che separa corpi con resistività differenti (Corrao, 2006).

3.1.2.2.1 Tipi di modellizzazione del sottosuolo

Nell'inversione dei dati geofisici, si cerca di ricavare un modello in grado di rappresentare i dati raccolti in campo. Il modello è una rappresentazione matematica idealizzata di una porzione di sottosuolo.

I modelli utilizzati possono essere classificati come 1D, 2D e 3D (Griffiths et al., 1990, Loke, 1994), come rappresentati in Figura 38:

- a) **1D**: la resistività cambia solo nella direzione verticale (con la profondità). Le indagini sono semplici da realizzare, ma il modello d'interpretazione può essere troppo semplicistico e in molti casi non sufficientemente accurato;
- b) **2D**: variazioni di resistività in direzione verticale e in una direzione orizzontale (direzione x). Si assume che la resistività non cambi nella direzione y e risulta essere il miglior compromesso tra le altre soluzioni;
- c) **3D**: variazioni di resistività in tutte le direzioni dello spazio. I modelli sono potenzialmente più accurati, ma comportano costi più elevati e maggiori risorse per l'elaborazione dei dati. Questo tipo di modello è ottenuto da sezioni 2D ravvicinate e parallele, che poi vengono interpolate nello spazio tridimensionale.

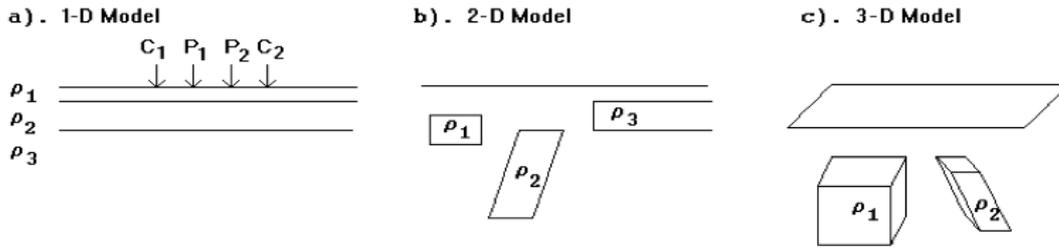


Figura 38. Tipi di modellizzazioni del sottosuolo (Loke, 1994)

3.1.2.2.2 Caratteristiche dei diversi tipi di configurazione (array)

In tutti i tipi possibili di modellizzazione del sottosuolo, la metodologia di acquisizione può variare a seconda di come vengono posizionati sul terreno gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale.

Esistono diverse metodologie per disporre gli elettrodi al suolo che consentono di individuare un volume con forma e risoluzione differente, inoltre la densità dell'indagine è in funzione della profondità. A seconda delle configurazioni per il posizionamento dei picchetti viene determinato un diverso coefficiente geometrico (rapporto segnale/rumore). Esso è misurabile secondo la formula seguente:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{MB} + \frac{1}{NB}}$$

K è il fattore geometrico (adimensionale), calcolabile come rapporto tra la costante della semisfera (2π) e la somma algebrica dei reciproci delle distanze tra gli elettrodi (Figura 39).

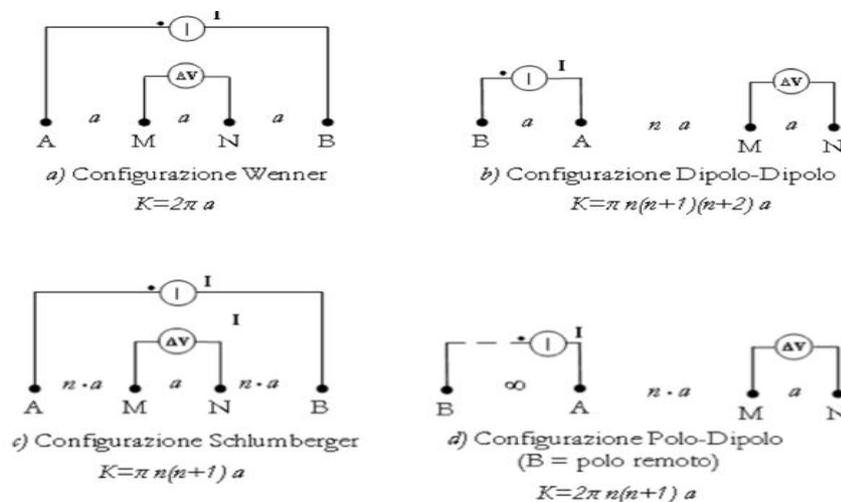


Figura 39. Principali configurazioni simmetriche con il rispettivo fattore geometrico (K)

Tipi di configurazioni:

- a) **Wenner**: gli elettrodi sono sistemati in linea in modo da essere equidistanti tra loro secondo lo schema A M N B. Questo metodo risulta essere particolarmente sensibile ai cambiamenti verticali di resistività al di sotto del centro dello stendimento, ma meno sensibile alle variazioni di resistività orizzontali. Esso, pertanto, risulta essere adeguato nel caso si vogliono individuare strutture orizzontali (quali stratificazioni o pavimentazioni). Adatto per effettuare sondaggi in zone molto rumorose (a causa della sua elevata resistenza del segnale) ma meno idoneo in presenza di strutture verticali (ovvero con variazioni di resistività orizzontali) (Griffiths and Turnbull 1985; Griffiths et al., 1990);
- b) **Dipolo-Dipolo**: il potenziale elettrico è misurato al di fuori della linea ideale che congiunge gli elettrodi di corrente: lo schema del quadripolo è dunque A B M N. Questo assetto è particolarmente sensibile alle strutture verticali, ma poco adatto all'indagine stratigrafica orizzontale: per questa ragione può essere particolarmente efficace in contesti archeologici il cui obiettivo spesso è quello di evidenziare strutture antropiche (muri, cisterne, trincee, ecc.) che provocano forti discontinuità orizzontali di resistività. Per ottenere una buona risoluzione orizzontale sono necessari: uno strumento sufficientemente sensibile e un buon contatto con il suolo (Loke and Barker, 1996a);
- c) **Schlumberger**: lo schema d'acquisizione è A M N B, dove la distanza tra gli elettrodi A-M e N-B risulta essere un multiplo n (dove questo fattore " n " corrisponde al rapporto tra la distanza AM e l'interdistanza MN) della distanza degli elettrodi di corrente A e B. Questa configurazione è discretamente sensibile sia alle strutture orizzontali sia a quelle verticali;
- d) **Polo-Dipolo**: poco utilizzato perchè dispone di un numero limitato di elettrodi (stendimento non simmetrico) ed è un'alternativa al Dipolo-Dipolo per indagini di polarizzazione indotta (IP);
- e) **Wenner-Schlumberger**: è il compromesso migliore quando si vogliono ottenere delle buone risoluzioni sia verticali che orizzontali, oppure quando è necessaria una buona potenza di segnale (Pazdirek and Blaha, 1996).

Le caratteristiche da considerare per la scelta del tipo di array sono:

- ✓ la profondità d'indagine;
- ✓ la sensibilità ai cambiamenti di resistività verticali e orizzontali del sottosuolo;
- ✓ la copertura orizzontale dei dati;
- ✓ la potenza del segnale.

La **profondità media d'indagine** (z_e) può essere facilmente calcolata facendone il rapporto alla distanza (a) o alla lunghezza totale (L) per i diversi tipi di configurazione (vedi Tabella 3) (Loke and Barker, 1996b). Per calcolare la reale profondità d'indagine, basta moltiplicare questo rapporto per il valore dei fattori, a o L , utilizzati nel rilievo (Loke, 1994).

Tabella 3. Profondità media d'indagine dove z_e/a = spaziatura tra gli elettrodi e z_e/L = lunghezza dello stendimento (Loke, 1994)

Array type	z_e/a	z_e/L
Wenner Alpha	0.519	0.173

Abbiamo quindi che la profondità d'investigazione nel caso di uno stendimento del tipo Wenner, è pari a circa 0.5 volte la spaziatura tra gli elettrodi e una copertura orizzontale che diminuisce con l'aumentare della spaziatura tra gli elettrodi. Per i sistemi con un numero limitato di elettrodi questo dispositivo è fortemente sconsigliato per investigazioni nel sottosuolo.

Come si può vedere nella Figura 40, all'aumentare della distanza tra gli elettrodi, aumenta anche la profondità indagata, pur mantenendo la stessa quantità di corrente immessa nel suolo.

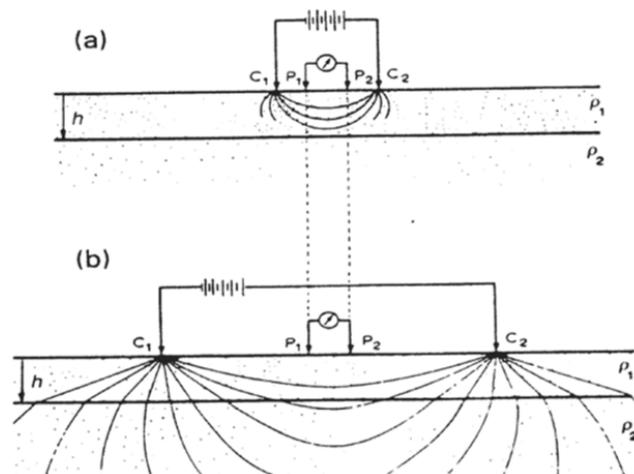


Figura 40. Schema mostra come muta la distribuzione delle linee di corrente quando si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi piantati in superficie

Allargando progressivamente i quattro elettrodi e mantenendo invariato il centro del quadripolo si ottiene un **sondaggio elettrico verticale (SEV)**, mentre spostando lateralmente ad ogni misura i quattro elettrodi lungo un allineamento orizzontale si realizza un **sondaggio elettrico orizzontale (SEO)** a profondità costante. L'avanzamento tecnologico ha permesso di passare dalle configurazioni dotate di soli quattro elettrodi a quelle con numero molto maggiore (ad esempio 32) e di unire le metodologie SEV e SEO per ridurre i tempi di acquisizione dovuti allo spostamento dei picchetti. Questo ci consente di acquisire contemporaneamente le informazioni di resistività sia sull'orizzontale che sulla verticale, ampliando di molto la superficie indagata e restituendoci dei profili più rappresentativi della situazione reale.

3.1.2.3 Tomografie elettriche

La tecnologia ERT (**Electrical Resistivity Tomography**) è utilizzata come prova preliminare, ed è di supporto ai classici metodi di campionamento come: analisi di acque e suoli in situ. Hanno mostrato ampie potenzialità per utilizzi futuri di monitoraggio e prevenzione.

Fissata la direzione del transetto da indagare, è possibile realizzare più profili; il risultato è un insieme di misure che formano una sezione 2D di resistività apparente, detta **pseudosezione**. Un sondaggio elettrico bidimensionale è, pertanto, un'indagine che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale sia lungo la direzione orizzontale. Attraverso un processo d'inversione è possibile elaborare le misure di resistività apparente per ottenere un modello 2D di resistività del sottosuolo chiamato **tomografia elettrica**.

Le tomografie elettriche consentono di definire volumetricamente con ottime risoluzioni latero-verticali ammassi sepolti, morfologie di substrati o superfici di falda. Esse consistono nella disposizione sul suolo di un numero elevato di elettrodi (Barker, 1998), che progressivamente vengono commutati automaticamente dallo strumento in: A, B, M, N; lungo una prestabilita direzione variandone la distanza inter-elettrodica al fine di aumentare la profondità di investigazione (Corrao, 2006).

Questo tipo di acquisizione 2D è indubbiamente molto laboriosa se gli elettrodi del quadripolo dovessero essere spostati (MIGRAZIONE in coppia degli elettrodi) sul terreno ogni volta che si compie la misura: questo problema è stato risolto impiantando nel terreno decine di elettrodi (multi-elettrodici), nel nostro caso abbiamo realizzato schieramenti di 32 elettrodi, collegati mediante gli appositi cavi al computer che gestisce l'acquisizione (strumentazione PASI). Un metodo estremamente valido, speditivo ed economico per prospezioni di grande dettaglio, anche in condizioni di basso rapporto segnale/rumore.

3.1.2.3.1 Approfondimento della configurazione Wenner

Per l'acquisizione dei dati necessari per il mio lavoro di tesi si è deciso di utilizzare uno schema elettrodico quadripolare multielettrodo. Si era indecisi sul tipo di configurazione tra Wenner e Schlumberger. Il primo di questi richiede più tempo per ogni ciclo di lettura (Burger et al., 1992a), però è più sensibile alle variazioni laterali e verticali e per questo motivo risulta più idoneo per l'indagine geoelettrica nella zona costiera sito della nostra indagine.

È ampiamente riconosciuto e descritto che le prospezioni geo-elettriche sono tra i metodi più adatti agli studi idrogeologici (Kunetz, 1966) e risultano particolarmente utili al fine di definire lo stato di salinizzazione di un acquifero costiero (Carbognin et al., 2003; Hamzah et al., 2006; Cimino et al., 2007; Song et al., 2007; Adepelumi et al., 2009).

Wenner risulta essere il tipo di configurazione con il più basso valore possibile di K (coefficiente geometrico) e consente di ottenere una maggiore intensità del segnale. I dati che si misurano risultano essere poco rumorosi, infatti, se ne consiglia l'utilizzo nelle zone in cui è alto il "rumore" ambientale di origine naturale o antropica (noise).

In questa configurazione gli elettrodi A, M, N, B sono disposti a intervalli costanti (equidistanziati) e sono allineati simmetricamente rispetto al centro di misura che è posto tra M e N. Gli elettrodi di corrente A e B sono posti agli estremi, mentre quelli di potenziale M e N sono posti nella zona centrale tra A e B.

Si distanziano gli elettrodi con "n" progressivamente maggiori ($n = 1, 2, 3$, ecc) per ottenere i dati di resistività a profondità investigata sempre maggiori (Figura 41).

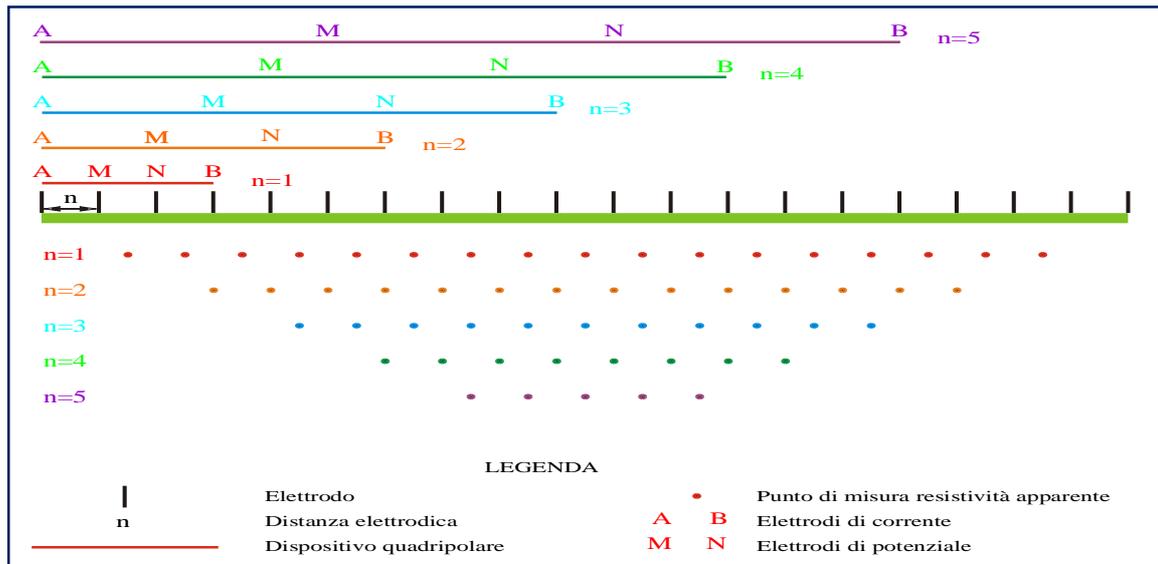


Figura 41. Schema di acquisizione dati con configurazione Wenner e ricostruzione della relativa pseudosezione di resistività apparente

La procedura operativa di campo prevede la connessione degli elettrodi, precedentemente infissi nel terreno, con la sorgente di corrente continua e il computer dove viene misurata la caduta di potenziale che si verifica lungo il conduttore rappresentato dal terreno.

3.2 STRUMENTAZIONE

La strumentazione è stata suddivisa in quella utilizzata per la raccolta diretta dei dati in campagna e quella per i rilievi geoelettrici, che verranno descritti nei paragrafi seguenti.

3.2.1 Strumentazione per la raccolta diretta dei dati in campagna

La strumentazione utilizzata per la raccolta diretta dei dati in campagna è la seguente:

- GPS
- Trivella
- Freatimetro
- Pompa peristaltica e Sonde Multiparametriche

3.2.1.1 GPS

È stato usato un GPS (Global Positioning System) Leica ad asta, con una precisione che arriva fino a circa 2 centimetri. Esso viene utilizzato per tracciare i transetti che si intende indagare con i sondaggi geoelettrici. Così facendo si ottiene la georeferenziazione dei dati e i profili altimetrici dell'andamento topografico del sito studiato (Figura 42).



Figura 42. GPS ad asta Leica

3.2.1.2 Trivella

La trivella manuale è utilizzata per scavare dei piezometri, fori di piccolo diametro, in cui è possibile inserire il freatimetro per misurare la superficie della falda e in seguito s'inserisce il tubo della pompa peristaltica per prelevare dei campioni di acque (Figura 43).



Figura 43. Trivella manuale

3.2.1.3 Freatimetro

Il freatimetro modello BFK-30 (Figura 44) è uno strumento costituito da una sonda di lettura alimentata a batteria, che viene calata all'interno del piezometro, per mezzo di un cavo centimetrato di 30 metri di lunghezza. Il circuito elettrico si chiude nel momento in cui la sonda viene a contatto con la superficie dell'acqua. Un segnale acustico abbinato all'accensione di un led, avverte dell'avvenuto contatto con l'acqua e quindi si procede con la lettura della profondità. La profondità della superficie piezometrica della falda è definita come la superficie lungo la quale la pressione dell'acqua è pari a quella atmosferica. Tutte le misure in campo sono riferite al piano campagna da cui successivamente è possibile ricavare la quota topografica sul livello del mare.



Figura 44. Freatimetro modello BFK-30

3.2.1.4 Pompa peristaltica e Sonde Multiparametriche

Il campione di acqua si estrae usando una pompa peristaltica (Figura 45 a sinistra) e successivamente raccolto in un barattolo di plastica in cui sono stati immersi gli elettrodi della sonda multiparametrica (modello PCD 6.50, Eutech Instruments, in Figura 45 a destra), per la lettura dei parametri. Una volta raggiunta la stabilità, vengono annotati i valori di temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e la conducibilità elettrica (mS/cm). La sonda misura anche il pH e il potenziale redox o di ossidoriduzione (Eh) (Figura 46).



Figura 45. A sinistra la pompa peristaltica e a destra la sonda multiparametrica



Figura 46. Misurazioni parametri chimico-fisici

3.2.2 Strumentazione per i rilievi geoelettrici

Nei paragrafi seguenti verranno descritti gli strumenti usati per i rilievi geoelettrici. Questi apparecchi li possiamo suddividere in: usati direttamente in campo per acquisire i dati geoelettrici e quelli usati presso i laboratori per invertire ed elaborare i dati ottenuti in campagna. In campo abbiamo lo strumento PASI (di cui si approfondirà il funzionamento) mentre in laboratorio abbiamo i software: RES2DINV, SURFER e Q-GIS.

3.2.2.1 Strumento PASI

La ditta PASI produce diversi tipi di strumenti per la tomografia elettrica, quello che è stato usato nel presente studio è il modello **16SG24-N** (Figura 47). In questo dispositivo è combinata la sismica a rifrazione/riflessione (a 24 canali) e la tomografia geoelettrica. Esso è utilizzato principalmente per individuare cavità, studi di contaminazione da acqua salata in acquiferi costieri, monitorare frane e dighe.

Per il dispositivo 16SG24-N sono disponibili due tipi di software per l'elaborazione dei dati acquisiti in campagna, tra cui Res2dinv per ottenere delle sezioni 2D e Res3dinv per quanto riguarda il 3D.

L'attrezzatura utilizzata per i sondaggi di tomografia geoelettrica è costituita da:

- ✓ **georesistivimetro PASI modello mod. 16SG24-N (unità centrale)**, composto da un computer portatile da campo con installato un software che permette all'utente di gestire le acquisizioni, di elaborare i dati e di fornire un adeguato supporto per la loro prima analisi. Il georesistivimetro contiene millivoltmetro, milliamperometro e circuito di azzeramento dei potenziali spontanei;
- ✓ **batteria** di energizzazione del computer (ricaricabile) dotata di un cavo per il collegamento Batteria/Georesistivimetro PASI;
- ✓ **energizzatore P-300T**, che genera la potenza sufficiente per l'indagine;
- ✓ **2 Link Box (centraline di gestione)**, sono degli apparecchi di ricetrasmisione e controllano dei moduli di massimo 16 elettrodi ciascuno;

- ✓ **32 elettrodi in acciaio inox** inossidabile di diametro di circa 1 centimetro (16 per il LinkBox1 e 16 per il LinkBox2);
- ✓ **cavi di collegamento:** 1 Georesistivimetro PASI /Link Box 1;
1 Link Box 1/Link Box 2;
1 Georesistivimetro PASI /Energizzatore;
- ✓ **2 cavi con connettori multi-elettrodo** (1 Link Box 1/Elettrodi + inverter e 1 Link Box 2/Elettrodi) con 16 takeout, cioè gli alloggi in cui agganciare i connettori, ciascuno spazati da 5 metri di cavo (che è la massima unità spaziale degli elettrodi), montati su dei rulli spalleggiabili (lunghezza totale del cavo 85 metri);
- ✓ **connettori (o morsetti)** che fanno da ponte tra elettrodo e cavo elettrico;
- ✓ **mazza di battuta** per piantare gli elettrodi nel terreno;
- ✓ **cordella metrica** per misurare la distanza "a" tra i diversi picchetti;
- ✓ **caraffa** per bagnare gli elettrodi.



Figura 47. Strumentazione PASI 16SG24-N

Negli allegati viene riportato un approfondimento del funzionamento del software adoperato dallo strumento PASI (paragrafo 8.1).

3.2.2.1.1 Funzionamento del software adoperato dallo strumento PASI

Il software che utilizza lo strumento PASI, permette di fare delle tomografie elettriche automatizzate. Questo tipo di tomografie sono anche dette TES (Tomografia Elettrica di Superficie). Esse si basano sull'acquisizione di un'elevata quantità di misure elettriche, effettuate su un discreto numero di elettrodi (32) posizionati sul terreno, lungo il profilo da investigare. La ricostruzione tomografica della sezione verticale del profilo di terreno si effettua tramite appositi software di elaborazione che utilizzano generalmente il **Metodo degli Elementi Finiti** (FEM). Il terreno al di sotto degli elettrodi viene così suddiviso idealmente in un numero finito di maglie o celle (i cosiddetti "elementi finiti"), ciascuna di resistività omogenea ed incognita. La forma degli elementi è generalmente quadrata o rettangolare e le loro dimensioni sono determinate in base alla distanza tra gli elettrodi (metà della spaziatura tra due elettrodi adiacenti).

Nella ricostruzione tomografica l'incognita è costituita dalla distribuzione della resistività nel sottosuolo, mentre le misure elettriche effettuate sul terreno rappresentano i termini noti.

Questa apparecchiatura è stata studiata e progettata per eliminare i tempi morti che erano dovuti al fatto che l'operatore era costretto a spostare gli elettrodi al termine di ogni singola acquisizione. Con questo nuovo tipo di strumento il modo di procedere risulta nettamente più rapido, efficace e può essere così sintetizzato:

- ✓ gli elettrodi vengono tutti infissi nel suolo prima di iniziare l'esecuzione del sondaggio;
- ✓ si seleziona il tipo di configurazione (array) più adatto per la particolare applicazione;
- ✓ si impostano i parametri di acquisizione (durata dell'impulso di energizzazione, durata pausa di interciclo, numero di misure e corrente di energizzazione, ecc);
- ✓ si dà quindi inizio all'acquisizione automatica.

A questo punto è lo strumento che attiva il ciclo di acquisizione programmato dall'utente e comunica continuamente con i Link Box, inviando loro le informazioni necessarie per cambiare la funzione dei vari elettrodi. Ogni picchetto

infisso nel terreno si "trasforma" quindi di volta in volta in elettrodo A, M, N, B o scollegato, a seconda della misura effettuata e del tipo di sondaggio scelto.

I valori via via acquisiti vengono visualizzati in tabelle per la verifica immediata dell'andamento della misura e sono contemporaneamente memorizzati (salvataggio automatico, il file è identificato da: data, ora ed un'eventuale nota) su l'Hard Disk interno e i dati vengono poi esportati dal computer di campo mediante una chiavetta USB per poi essere elaborati ed interpretati.

Lo strumento comunica continuamente anche con l'energizzatore P300-T fornendogli le specifiche programmate e ricevendo informazioni sulla corrente erogata.

Per ogni sondaggio viene visualizzato il tempo (minimo e massimo) necessario per completare la sessione di misura. Questo tempo è in funzione non solo dei tempi impostati per la creazione dell'onda di energizzazione, dal numero di cicli e di elettrodi, ma anche dal tipo di valori acquisiti (lo strumento effettua l'autoranging in automatico). Pertanto il tempo minimo corrisponde al caso in cui tutti i valori acquisiti richiedano una sola lettura (valori elevati), mentre il tempo massimo corrisponde al caso in cui tutti i valori richiedano 3 letture (valori molto bassi). Anche se lo strumento è nato per gestire i metodi in modo automatico, possono essere realizzati dei sondaggi in modalità interattiva (metodi non automatici).

3.2.2.2 Software per l'inversione ed elaborazione dei dati geoelettrici

Illustriamo ora i software utilizzati in laboratorio per la manipolazione dei dati ottenuti in campo e sono principalmente tre:

- RES2DINV: utilizzato per l'elaborazione e l'inversione dei dati registrati dallo strumento PASI (ne seguirà un approfondimento);
- SURFER11: usato per migliorare la visualizzazione grafica dei dati ottenuti con il precedente software RES2DINV e per delinearne delle linee iso-resistive a intervalli definiti indispensabile per poter confrontare i diversi sondaggi effettuati;
- Q-GIS: questo è servito per georeferenziare i profili nell'area di studio.

Tutti questi passaggi dei diversi software sono stati necessari per poter arrivare ad avere dei dati finali confrontabili tra i diversi sondaggi eseguiti.

3.2.2.2.1 Software RES2DINV e suo funzionamento

Il software RES2DINV versione 3.58, è prodotto dalla Geotomo Software Malesia e distribuito da P.A.S.I. srl Torino (www.pasigeophysics.com).

È un programma per computer che crea automaticamente una sezione bidimensionale (2D) del modello di resistività del sottosuolo con i dati ottenuti dalle indagini geoelettriche (Griffiths and Barker, 1993).

In Figura 48, è riportata la disposizione degli elettrodi e la sequenza di misurazione che può essere utilizzata per il rilevamento.

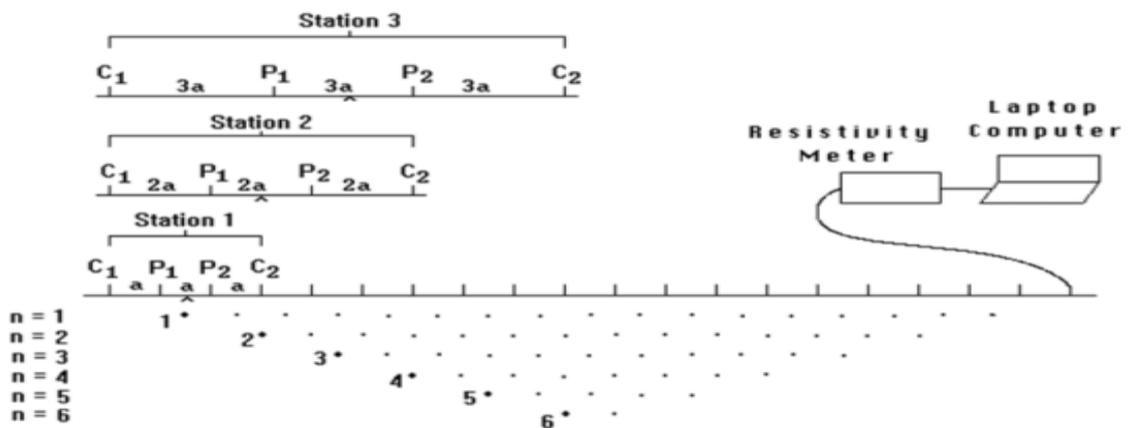


Figura 48. Sequenza di misurazione multielettrodo

Lo scopo del programma è quello d'invertire grandi insiemi di dati (con circa 200-21000 punti misurati) raccolti con un sistema multielettrodo (circa 25-16000 elettrodi) (Dahlin and Loke, 1998).

Il modello bidimensionale prevede la divisione del sottosuolo in un certo numero di blocchi rettangolari (Metodo del Contouring) (Figura 49). Questo serve per determinare i valori di resistività apparenti dei blocchi rappresentati in una pseudosezione che rappresenta la resistività apparente concorde con le misure reali. La dimensione e la disposizione dei blocchi viene generata automaticamente, utilizzando i punti misurati a titolo indicativo. La posizione orizzontale è stabilita dal punto medio tra gli elettrodi utilizzati per la misura, mentre la posizione verticale è posta ad una distanza proporzionale alla spaziatura tra gli elettrodi. In cui il primo strato di blocchi è posizionato ad uno spessore di 0.5 volte la distanza tra gli elettrodi. Ad ogni strato successivo più profondo lo spessore aumenta del 10%. L'ultima fila inferiore di blocchi è impostata per essere approssimativamente equivalente alla profondità media

utilizzare il modello con 3-5 iterazioni dopo che l'errore RMS non cambia più significativamente (per ulteriori informazioni è disponibile un tutorial sul sito web www.geoelectrical.com). Il programma sceglie automaticamente i parametri ottimali per l'inversione per un particolare insieme di dati, tuttavia, questi parametri possono anche essere modificati dall'utente (Loke and Barker, 1996a). L'utente può essere guidato nelle scelte dei parametri ottimali per l'inversione, valendosi di informazioni come quelle ottenute dalle trivellazioni o da altre fonti che possono essere incluse nel modello.

Tutti i metodi d'inversione cercano di determinare un modello per il sottosuolo la cui risposta sia in accordo con i dati misurati. I PARAMETRI (Q) sono i valori di resistività delle celle del modello, mentre i DATI osservati (y) sono i valori di resistività apparente misurati. Un modello iniziale, solitamente omogeneo, viene modificato in modo iterativo, facendo in modo che la differenza (g)

$$g = y - f$$

tra i valori di resistività apparente misurati (y) e calcolati (f) si riduca ad ogni iterazione (Figura 50).

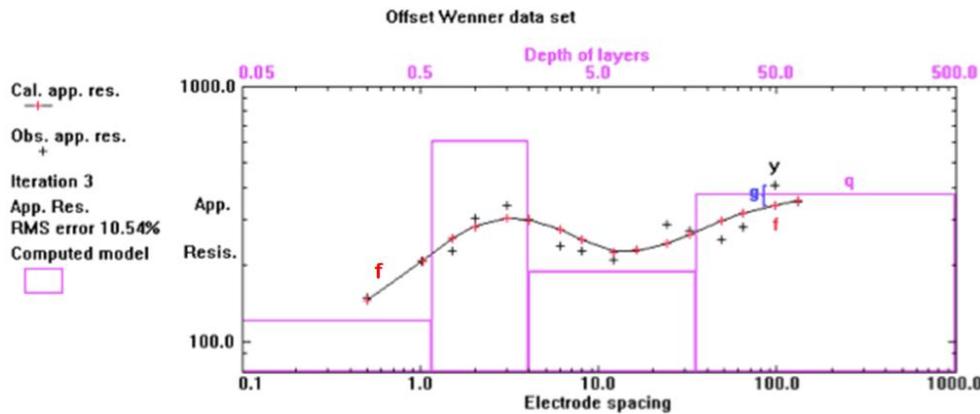


Figura 50. Parametri del modello e dati osservati

Il software utilizza due metodi per l'**elaborazione** dei dati, quello delle DIFFERENZE FINITE e quello degli ELEMENTI FINITI. Entrambi i metodi devono risolvere la seguente equazione di Poisson:

$$I_c = -\nabla \left[\frac{1}{\rho(x,y)} \nabla \phi(x,y,z) \right]$$

dove: I_c è la corrente;

$\rho(x,y)$ è la resistività;

$\phi(x,y,z)$ è il potenziale nei nodi che deve essere calcolato.

Ogni cella del modello in cui è suddiviso il sottosuolo può avere un valore di resistività diversa.

Questo secondo metodo degli Elementi Finiti, può avere delle celle non regolari e per questo motivo è il più utilizzato quando siamo in presenza di topografia (Figura 51).

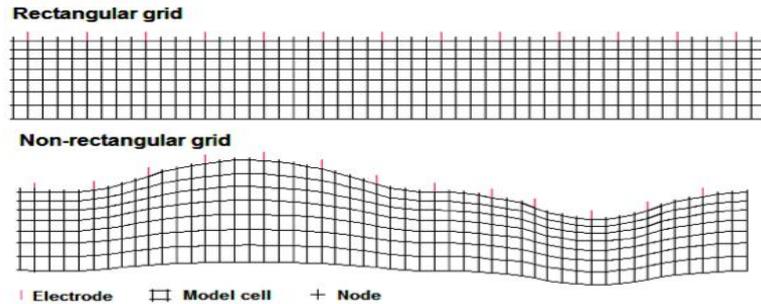


Figura 51. Schema di disposizione delle celle senza e con la topografia

Mentre il programma per l'**inversione** dei dati si basa sul smoothness-constrained metodo dei minimi quadrati (Degroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1992). Questo metodo deve risolvere la seguente equazione:

$$(J^T J + u F) d = J^T g$$

dove:

- $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$;
- f_x = filtro di planarità orizzontale;
- f_z = filtro di planarità verticale;
- J = matrice delle derivate parziali;
- u = Damping Factor (fattore di smorzamento);
- d = modello perturbazione vettore;
- g = vettore di discrepanza.

Un vantaggio di questo metodo è che i filtri, fattore di smorzamento e di planarità possono essere regolati per adattarsi ai diversi tipi di dati. Una descrizione dettagliata delle diverse varianti del metodo dei minimi quadrati di scorrevolezza con i limiti, si può trovare nelle note tutoriali fornite da Loke (2001).

Per ulteriori dettagli sul software RES2DINV e il suo funzionamento, si rimanda agli allegati (paragrafo 8.2).

3.3 METODI DI RILIEVO E MANIPOLAZIONE DEI DATI RICAVATI

3.3.1 Rilievi Global Positioning System (GPS)

I rilievi sono stati realizzati mediante l'utilizzo di un GPS (descritto in precedenza) con cui abbiamo tracciato tutti i transetti indagati con le indagini geoelettriche e punti in cui sono state effettuate le trivellazioni.

Questi rilievi topografici sono stati condotti per poter inserire le informazioni altimetriche nel corso dell'elaborazione con il software RES2DINV, in modo che le pseudosezioni tenessero in considerazione anche l'andamento superficiale del terreno mentre ne veniva calcolato il modello di resistività del sottosuolo.

Così facendo si ottiene anche la georeferenziazione dei dati del sito studiato.

3.3.2 Rilievi diretti della superficie fratica e misurazione dei parametri chimico-fisici dell'acqua

Nei punti in cui sono state fatte le trivellazioni (almeno tre punti per ciascun sondaggio) si cala la sonda del freatometro per misurare la profondità della superficie freatica e si estraggono mediante una pompa peristaltica dei campioni d'acqua. Di questi campioni si misurano i parametri chimico-fisici tra cui temperatura e conducibilità elettrica, utilizzando delle sonde multiparametriche che vengono immerse nel campione d'acqua all'interno di un barattolo.

I dati ottenuti dai campioni d'acqua ci servono per calibrare i sondaggi geoelettrici.

3.3.3 Procedura di avvio e settaggio PASI per i rilievi geoelettrici

In Figura 52 si riassumono i collegamenti necessari per avviare l'acquisizione con lo strumento PASI, si rimanda poi, agli allegati (paragrafo 8.3) per la sequenza completa delle operazioni eseguite in campagna le precauzioni da adottare per effettuare un buon sondaggio e la procedura di settaggio (sottoparagrafo 8.3.1).

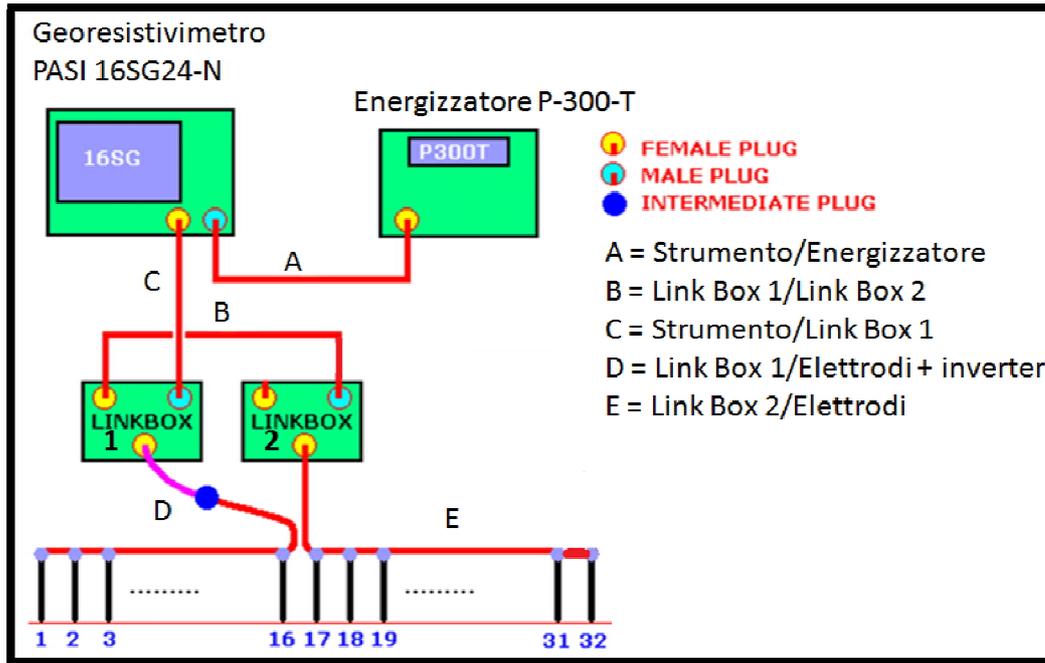


Figura 52. Schematizzazione della disposizione al suolo dello strumento e dei collegamenti necessari per il funzionamento

3.3.4 Metodologie di inversione ed elaborazione dei dati

I software che sono stati usati per invertire ed elaborare i dati ricavati dalle indagini geoelettriche sono tre:

- RES2DINV;
- SURFER;
- Q-GIS.

3.3.4.1 Procedura di settaggio per il software RES2DINV

Il valore che ricaviamo dai dati di campagna è una resistività apparente che coincide con la resistività vera, solo quando il sottosuolo è un semispazio omogeneo ed isotropo. Nei casi reali, molto spesso, il sottosuolo presenta delle proprietà eterogenee ed anisotrope, nei quali viene misurata un'anomalia, cioè dove la resistività apparente differisce da quella vera. Per risalire al valore della resistività effettiva del materiale è necessaria un'elaborazione dei dati e la loro inversione. Il valore di resistività apparente non è semplicemente il valore medio delle resistività degli elettrostrati incontrati, ma è definito da una funzione più

complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati che dai loro spessori.

I dati di resistività apparente sono stati invertiti, in modo da ottenere profili di resistività che ci mostrano la distribuzione degli elettrostrati rispetto alla profondità. Per questo lavoro di tesi sono stati usati tutti i dati tomografici raccolti in campo, costituendo quindi un ampio database di dati di partenza. Questi dati geofisici sono stati poi utilizzati durante l'inversione per rappresentare dei profili bidimensionali profondità/resistività, sviluppati in sezione. Il software per l'inversione dei dati RES2DINV applica delle equazioni che tengono conto della rifrazione che subisce la corrente elettrica immessa nel terreno incontrando strati con differente resistività. RES2DINV determina automaticamente delle sezioni bidimensionali (2D) del modello di resistività del sottosuolo per i dati ottenuti dalle indagini geoelettriche (Griffiths and Barker, 1993). Infatti come input inseriamo le resistività apparenti misurate in campagna e come output ci restituisce delle sezioni in cui si possono vedere gli spessori dei vari strati a diversa resistività.

Negli allegati (paragrafo 8.4) si può trovare l'elenco della procedura completa (una sorta di manuale) con il settaggio adottato per il software RES2DINV, utilizzato per ottenere le pseudosezioni di resistività.

3.3.4.2 SURFER 11

Come enunciato nei paragrafi precedenti, si è provveduto a salvare i profili elaborati con il software RES2DINV nel formato SURFER. Questo si è reso necessario per poter modificare le scale cromatiche dei profili e renderle uniformi per gli stessi intervalli di resistività, in modo da poter confrontare tutti i dati raccolti. Il contouring nelle sezioni verticali è stato fatto per interpolazione. In questo studio sono stati usati solo due tipi di metodi d'interpolazione: Kriging (K) e Natural Neighbor (NN). Alla fine viene creato il file.GRD corrispondente. La differenza tra i due metodi d'interpolazione risiede nel fatto che NN preserva il valore del dato puntuale registrato e restituisce una rappresentazione meno spigolosa delle linee a uguale resistività rispetto a quella che otteniamo con K.

Tutte le sezioni dei profili indagati sono state ricolorate, rispetto alle classi che RES2DINV assegna automaticamente. Sono state fissate le seguenti 4 classi di intervalli di resistività (Ω m):

- ✓ 0-30 Ω m = in ROSSO, sabbia satura in acqua salata;
- ✓ 30-300 Ω m = in BLU, sabbia satura in acqua da salmastra a dolce;
- ✓ 300-700 Ω m = in VERDE, zona di risalita capillare;
- ✓ 700-1000 Ω m = in GIALLO, sabbia asciutta (insatura).

É stata fatta anche una rappresentazione usando *Classed post* che ci permette di visualizzare solo i punti reali in cui sono state misurate direttamente le resistività, con il rispettivo valore registrato e il colore delle classi fissate. SURFER supporta una grande varietà di formati tra cui quelli basati su vettori come AutoCAD DXF.

3.3.4.2.1 AUTOCAD 2011

Si esportano le isoeresistive ottenute con SURFER, in AUTOCAD 2011. Questo programma ci permette di eliminare le isoeresistive che non ci interessano, cioè tutte, escluse quelle con resistività: 30, 300 e 700 Ω m, a queste si aggiunge l'andamento topografico (Z).

3.3.4.3Q-GIS

Si apre il file modificato in AUTOCAD e si seleziona il sistema di riferimento (WGS84/UTM32N). Si crea un nuovo vettore e si salva come "data.shp". Convertiamo le linee isoeresistive in punti, usando CONVERT LINES TO POINTS, alla distanza di 10 centimetri e li esportiamo in EXCEL, salvando in "file.dbf".

3.3.4.3.1 EXCEL

Apriamo il file elaborato con Q-GIS e ricaviamo, per ciascun profilo indagato, le profondità delle *contour lines* con le soglie delle resistività stabilite in precedenza (30, 300, 700 Ω m) rispetto alla topografia (Z). Una volta sistemato tutti i dati è possibile fare un'analisi statistica dei dati utilizzando una matrice di correlazione. Una volta ottenute le matrici di correlazione è possibile discutere i risultati ottenuti.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Il lavoro di elaborazione dei dati, descritto dettagliatamente nei capitoli precedenti, è stato ripetuto per tutti i transetti indagati, che sono localizzati, come già detto, nell'area della Pineta Ramazzotti a Sud dell'abitato di Lido di Dante (Figura 53).

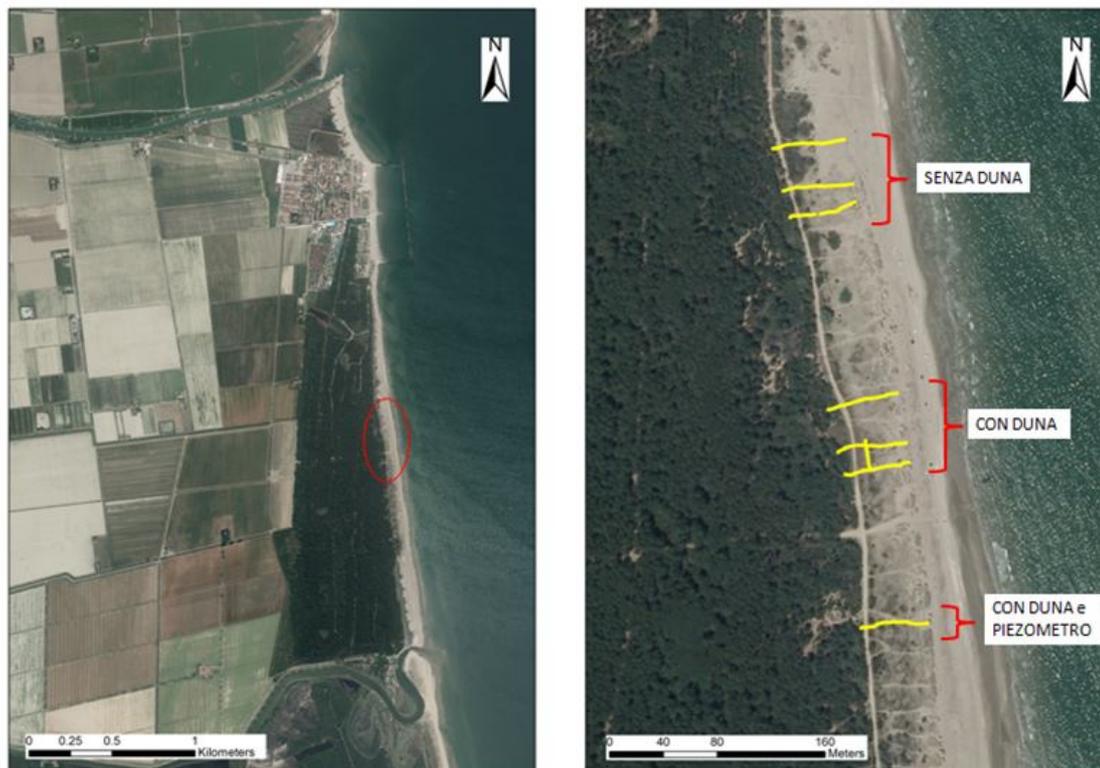


Figura 53. Area di studio nel cerchio rosso a sinistra e transetti indagati in giallo a destra

Le indagini sono state realizzate in una campagna di misura compresa tra i mesi di Luglio e Dicembre 2014, in cui sono state effettuate 7 uscite.

Le tomografie geo-elettriche possono essere suddivisi, andando da Nord verso Sud, come riassunto in Figura 54:

●	Profilo 7	28 OTTOBRE	}	SENZA DUNA
●	Profilo 1	23 OTTOBRE		
●	Profilo 2	8 OTTOBRE		
●	Profilo 3	16 LUGLIO	}	CON DUNA
●	Profilo 4	4 LUGLIO		
●	Profilo 5	25 LUGLIO		
●	Profilo 6	16 LUGLIO	→	PARALLELO A COSTA
○	Profilo 8	28 OTTOBRE e 18 DICEMBRE	}	CON DUNA e PIEZOMETRO

Figura 54. Riassunto delle tomografie geo-elettriche eseguite con le rispettive date di esecuzione

Durante queste uscite sono stati registrati 9 profili, che si distinguono per orientazione e morfologia intercettata (Figura 55).

Per l'orientazione abbiamo:

- 8 profili, perpendicolari alla linea di costa, in direzione Ovest - Est;
- 1 profilo, parallelo alla costa, in direzione Sud - Nord.

Per la morfologia intercettata abbiamo:

- 5 profili, in un'area in cui è presente un corpo di duna ben preservato, di cui due in presenza di un piezometro con microfiltri;
- 3 profili, in cui la duna è andata quasi totalmente distrutta da intense mareggiate.

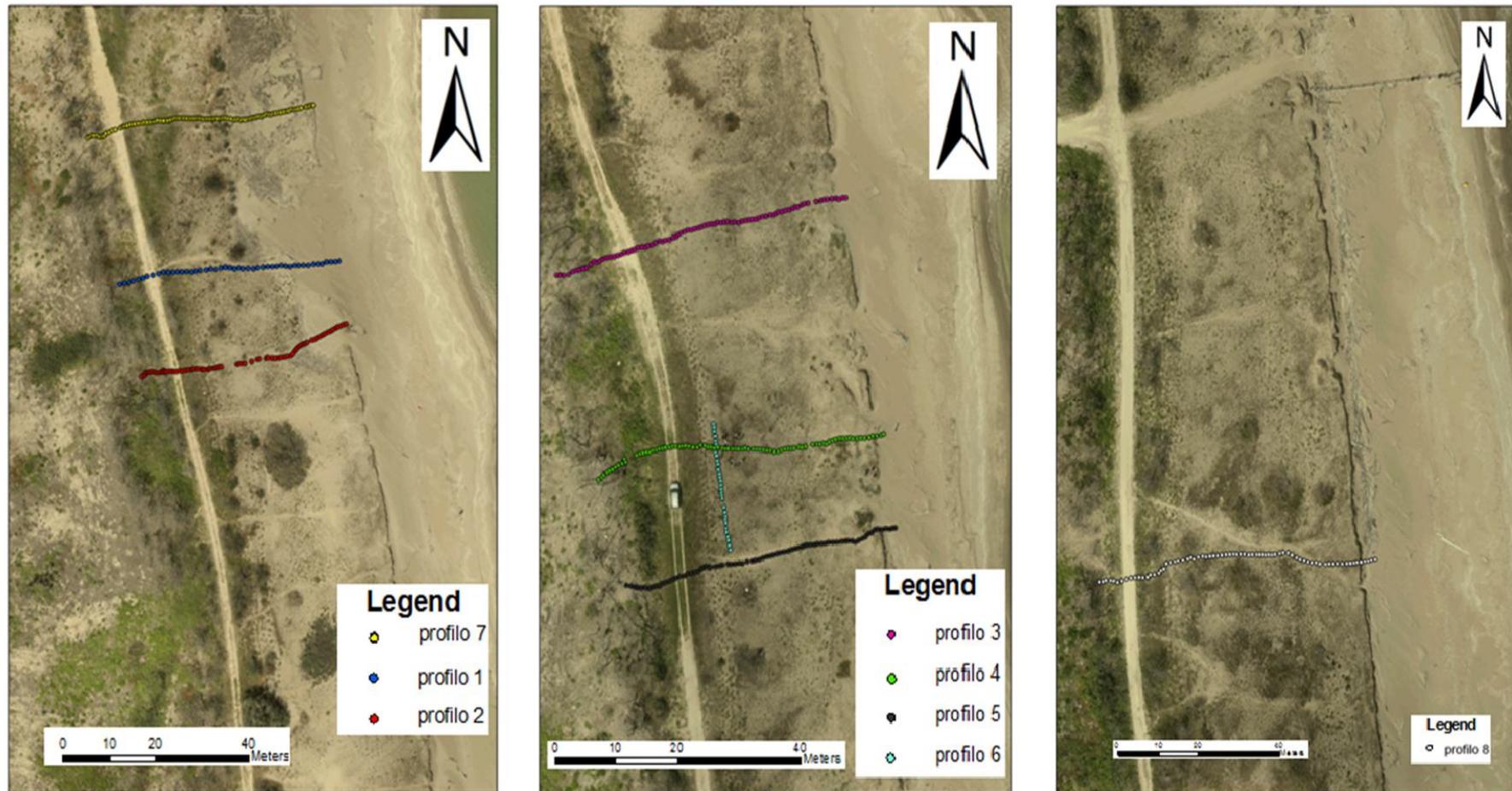


Figura 55. Sondaggi effettuati nell'area dell'area si studio, procedendo da sinistra verso destra troviamo: i profili SENZA DUNA (più a Nord), i profili CON DUNA (nell'area centrale del sito studiato) e i profili CON DUNA e PIEZOMETRI dotati di un sistema di microfiltri (nell'area più a Sud).

In Figura 56 e in Figura 57, sono illustrati gli andamenti altimetrici dell'area di studio.

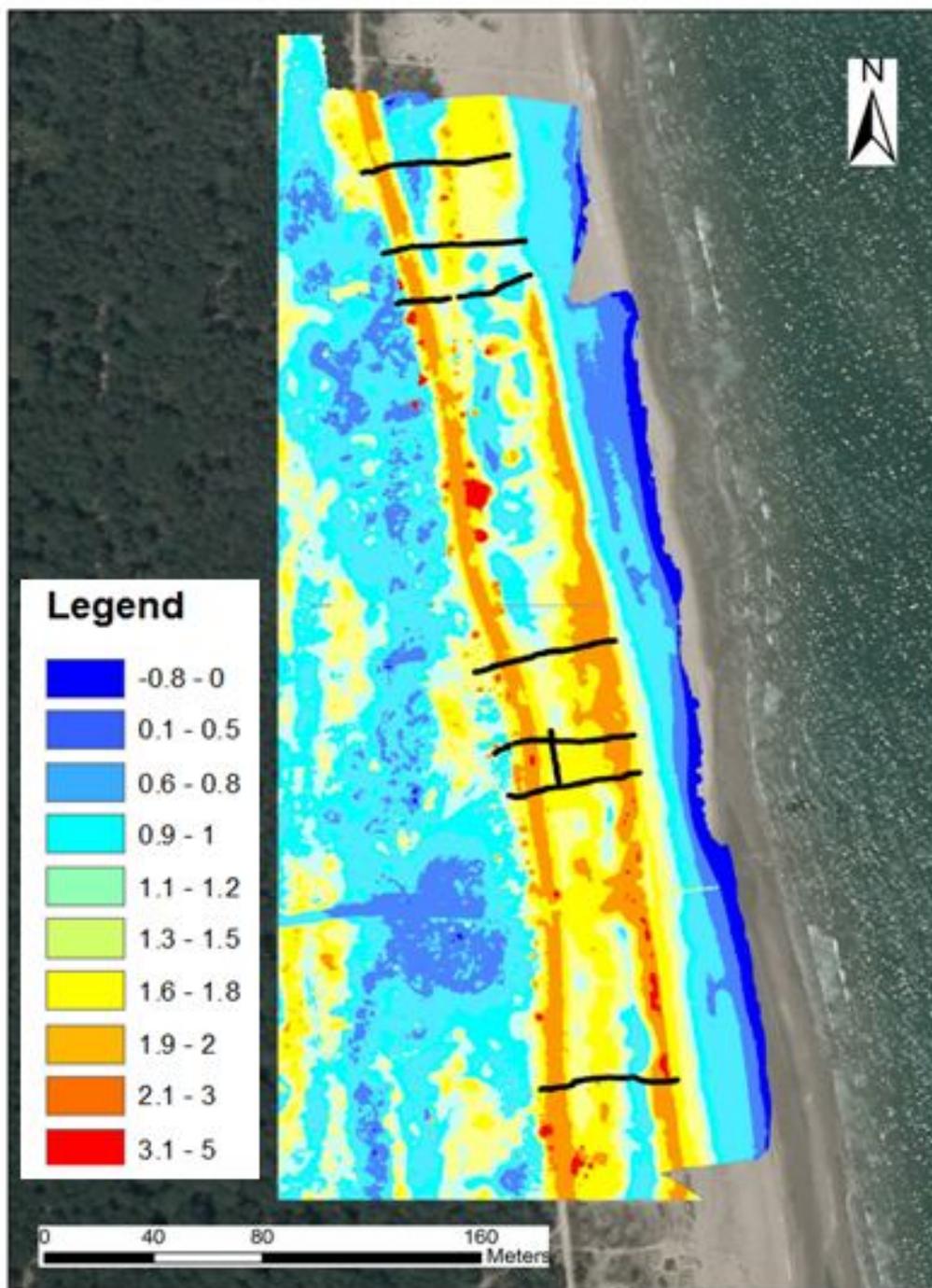


Figura 56. Altimetria intera area di studio

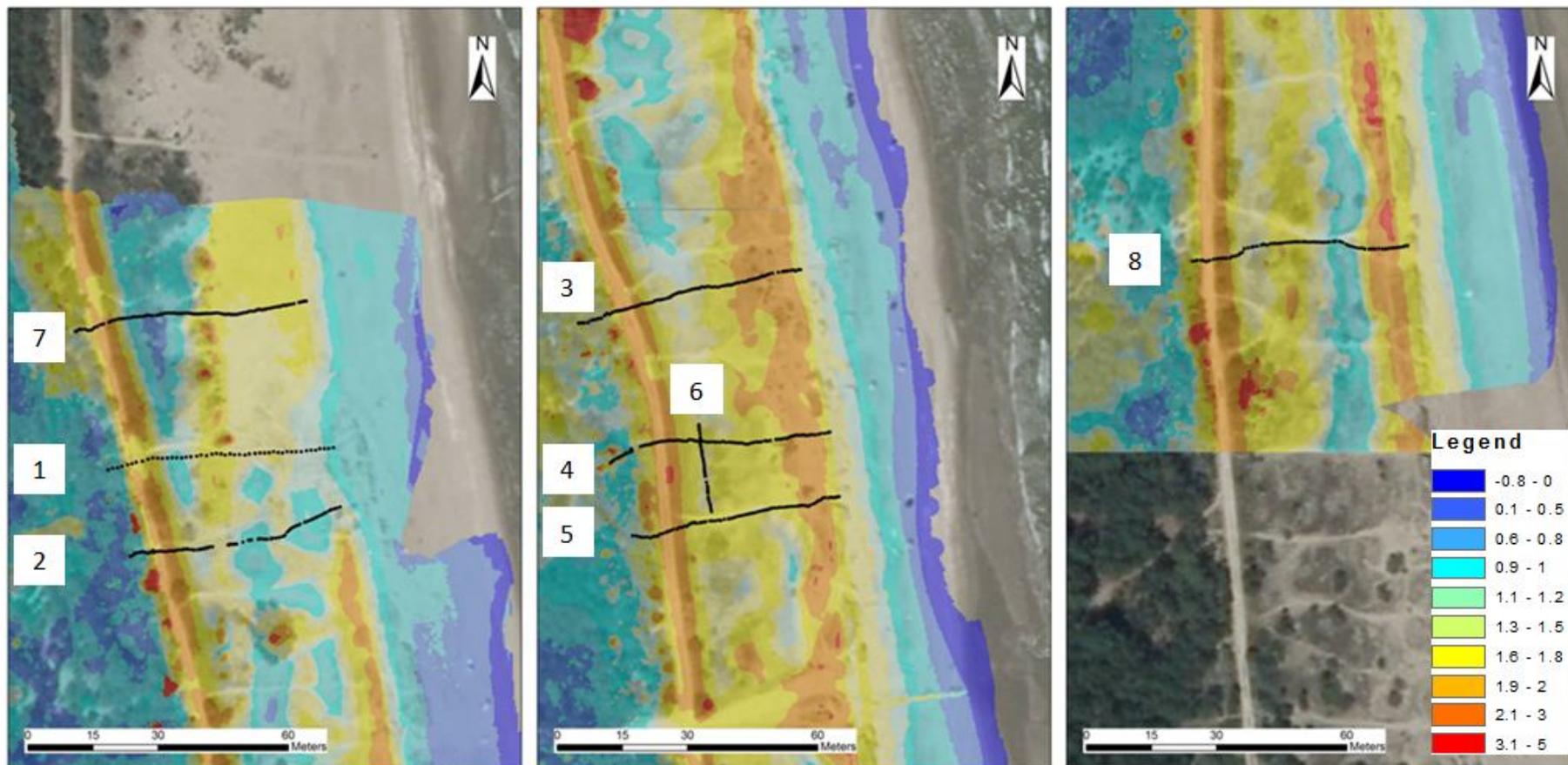


Figura 57. Altimetria dei siti indagati (a sinistra SENZA DUNA, centrale CON DUNA e a destra CON DUNA e PIEZOMETRI)

Per 7 degli 8 profili con orientazione sub-trasversale alla linea di costa, sono stati effettuati due stendimenti di 32 elettrodi ciascuno con una sovrapposizione di 16 elettrodi, infissi nel terreno con una spaziatura prestabilita di 1 metro e con una lunghezza complessiva di 48 metri. Per il restante profilo eseguito il 18 Dicembre, si è scelto di ribattere il transetto (Profilo 8) eseguito in precedenza in data 28 Ottobre. Per questo sondaggio è stata dimezzata la spaziatura tra gli elettrodi (0.5 metri), che ci consente di avere una maggiore risoluzione verticale (dettaglio) questa però a scapito di una perdita di profondità indagata. Per avere la stessa copertura spaziale degli altri profili eseguiti (48 metri di lunghezza), sono stati quindi necessari 5 stendimenti di 32 elettrodi, sempre con una sovrapposizione di 16. Questo transetto a spaziatura più ristretta, è stato effettuato per confrontare i dati che si ottengono modificando il passo tra i picchetti e valutare così quale sia il migliore compromesso tra qualità della risoluzione e profondità indagata.

L'unico transetto parallelo alla linea di costa, eseguito il 16 Luglio, è situato tra la duna e la strada utilizzata dalla forestale. Questo profilo è stato utile per calibrare lo strumento di acquisizione dei dati geoelettrici, aiutandoci ad individuare gli intervalli di resistività significativi (limite zona satura/insatura, l'interfaccia acqua dolce/salmastra e l'interfaccia acqua salmastra/salata dell'acquifero sottostante).

Per tutti i profili è stata usata la configurazione Wenner, con la quale si è ottenuta una profondità media d'investigazione di circa 4 metri per i sondaggi con spaziatura di 1 metro, che si riduce a circa 2 metri di profondità per il sondaggio a 0.5 metri di offset.

I dati possono essere comparati con quelli misurati direttamente sulle acque mediante l'effettuazione di trivellate. Ogni sondaggio è accompagnato da almeno tre punti di misura (trivellate), posizionati all'inizio, al centro e alla fine di ciascun profilo. Questi punti sono utili per conoscere meglio i primi metri dell'area indagata, in cui sono stati misurati la profondità della superficie piezometrica e i parametri chimico-fisici delle acque della parte superficiale della falda (conduttività elettrica e temperatura).

A seguito dell'elaborazione dei dati ottenuti, si procede ad un'analisi per ogni zona con una descrizione generale.

Per ognuno dei profili si riporta:

- ✓ la pseudosezione con l'andamento topografico (profilo profondità/resistività) ottenuta con RES2DINV;
- ✓ le elaborazioni fatte con SURFER11 tra cui: *Natural Neighbor* con le *contour lines* predefinite (quota topografica, 700, 300 e 30 Ω m) e un esempio di *Classed post*;
- ✓ le tabelle con i valori dei parametri chimico-fisici delle acque misurati direttamente in campo;
- ✓ le matrici di correlazione tra i dati ricavati da Q-GIS e importati in EXCEL.

4.1 SEZIONI INVERTITE

Alla fine dell'inversione dei dati, sono stati individuati vari elettro-strati che rappresentano sia diverse litologie che la distribuzione della salinità all'interno delle acque di falda. Per quanto riguarda le soglie di resistività dei vari depositi e dei vari tipi di acque vi è un'ampia letteratura (Burger, 1992; Celico, 1998; Bulter, 2005). In questo studio è stata utilizzata una tabella di valori di resistività fissata per i diversi materiali incontrati nell'area indagata, durante uno studio sull'intrusione salina nell'area costiera romagnola condotto dalla Dott.ssa Zambrini nel 2007.

La chiave di lettura dei profili è rappresentata in Figura 58:

- ogni litotipo è associato ad un intervallo di resistività in relazione alla tipologia di fluido saturante (più o meno salato);
- naturalmente sono state prese in considerazione solo le litologie presenti nella zona in esame e si è fatto riferimento alle stratigrafie dedotte dai sondaggi (SEV) forniti dalla banca dati della Regione Emilia Romagna.

LITOTIPO	RESISTIVITA' (ohm*m)
Acqua dolce	10-100
Argille in acqua dolce	5-15
Limi argillosi in acqua dolce	10-30
Limi sabbiosi in acqua dolce	20-50
Sabbie sciolte sature in acqua dolce	50-150
Sabbie sciolte secche	1000
Ghiaie sature in acqua dolce	150-300
Acqua salmastra	2-3
Acqua salata	0.2
Argille in acqua salata	1.5-2
Limi argillosi in acqua salata	1.5-2
Limi sabbiosi in acqua salata	1-5
Sabbie sciolte sature in acqua salata	1-5

Figura 58. Resistività dei materiali (elaborato Zambrini, 2007)

In questo modo il grafico profondità-resistività può essere interpretato come profilo "idro-stratigrafico". Si tenga presente inoltre che spesso, laddove c'è saturazione con acqua salata, risulta molto complicato individuare la litologia del sedimento (argillosa o sabbiosa) perché l'intervallo di resistività è molto ristretto; può succedere quindi che più strati salati vengano raggruppati in un unico strato con una resistività media (ρ) molto bassa in genere (1-3 ohm metro). Si deve porre invece attenzione sulla sensibilità che il sistema ha nell'individuare il cambiamento di salinità del fluido saturante, obiettivo di questa indagine.

Ogni caso di studio verrà illustrato nelle sue parti di maggiore rilevanza ai fini di questo studio, evidenziandone le difficoltà tecniche sia in fase di acquisizione dati che della loro restituzione nonché le finalità proposte ed i limiti in cui ci si è imbattuti. Al termine del capitolo si tenterà di proporre, in base a quanto risultato dai casi esposti, una procedura che tenda a limitare le problematiche sorte e favorisca al meglio la fase di acquisizione dati.

Tutti i transetti sono rivolti verso Nord, quindi abbiamo a sinistra l'entroterra (Ovest) mentre il mare è a destra (Est).

Nelle sezioni ottenute con RES2DINV, i colori freddi rappresentano i valori di resistività maggiori, mentre quelli caldi quelli minori. Si possono individuare principalmente tre elementi caratteristici che si presentano in tutti i profili:

- ✓ in colore blu/azzurro si riconosce la sabbia insatura;
- ✓ da colori verdi a gialli l'acqua da dolce a salmastra;
- ✓ oltre (in termini di colori ancora più caldi) la linea di colore giallo con resistività $< 30 \Omega \cdot m$ si riconosce l'area satura in acqua salata (in rosso).

Mentre per le sezioni ottenute con il secondo software adoperato, SURFER11, è stato possibile definire delle scale cromatiche uguali per tutti i profili, in modo da rendere più facile il confronto. Come detto in precedenza sono state fissate 4 classi di intervalli di resistività (Ω m) (Figura 59):

- ✓ 0-30 Ω m = in ROSSO, sabbia satura in acqua salata;
- ✓ 30-300 Ω m = in BLU, sabbia satura in acqua da salmastra a dolce;
- ✓ 300-700 Ω m = in VERDE, zona di risalita capillare;
- ✓ 700-1000 Ω m = in GIALLO, sabbia asciutta (insatura).



Figura 59. Scala cromatica con gli intervalli stabiliti utilizzata in SURFER11

Tra i profili **SENZA DUNA** abbiamo:

- o PROFILO 7, effettuato il 28 OTTOBRE (Figura 60):

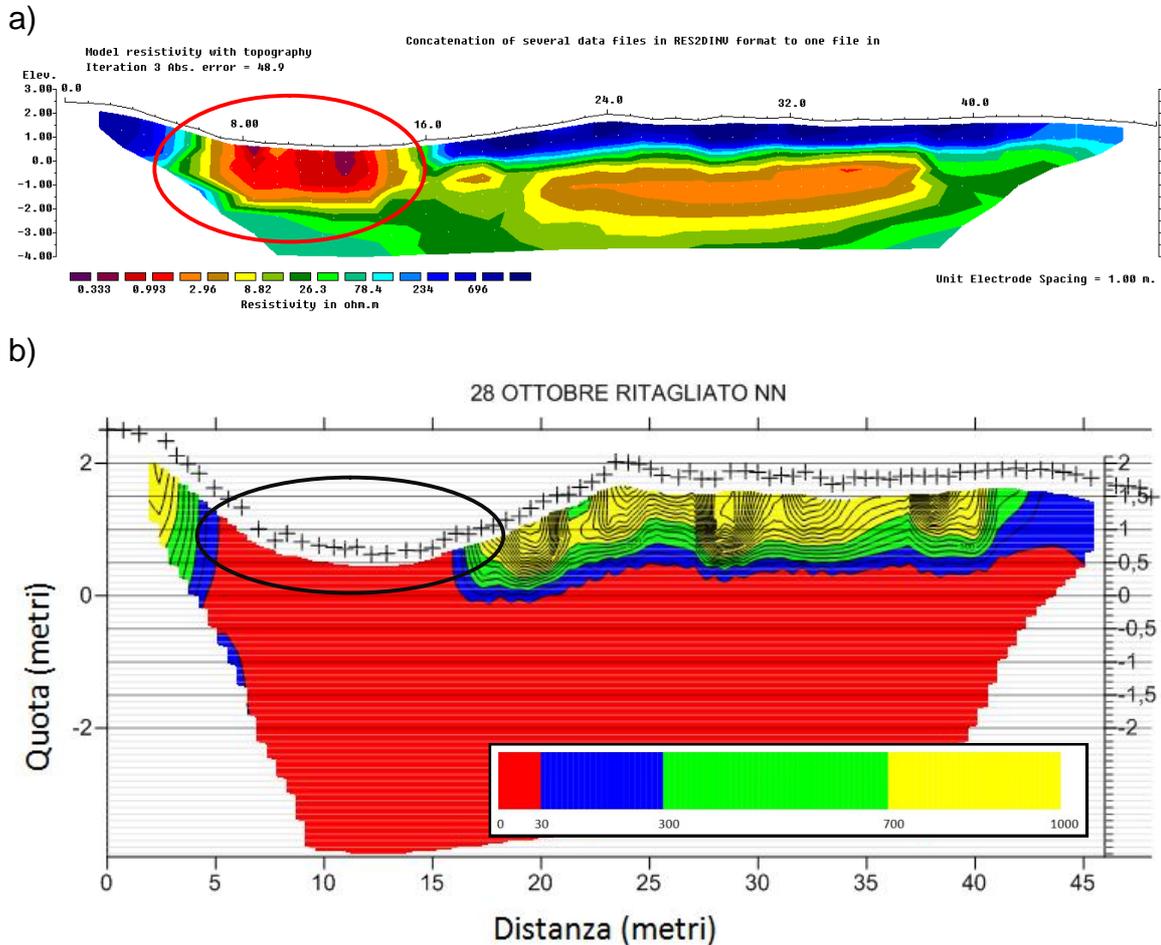


Figura 60. Profilo 7, a) RES2DINV e b) SURFER11

In Figura 60 a), si nota nell'area depressa situata a sinistra tra la duna e la strada forestale (indicata dal cerchio rosso), un brusco calo delle resistività (0-3 Ω m), visualizzata dall'area rossa/arancione, che ci indica una risalita di acqua salata. A destra nella sezione, si vede un sottile strato superficiale di colore blu, che rappresenta le sabbie insature, cioè quelle asciutte.

Anche nella sezione in Figura 60 b), indicata da un cerchio nero, si vede una forte risalita di acqua salata localizzata nella zona depressa tra duna e strada. Si nota come in poco più di 1 metro di profondità si assiste al passaggio tra sabbie asciutte (in giallo), zona capillare (in verde) e zona satura (in blu).

o **PROFILO 1, effettuato il 23 OTTOBRE (Figura 61):**

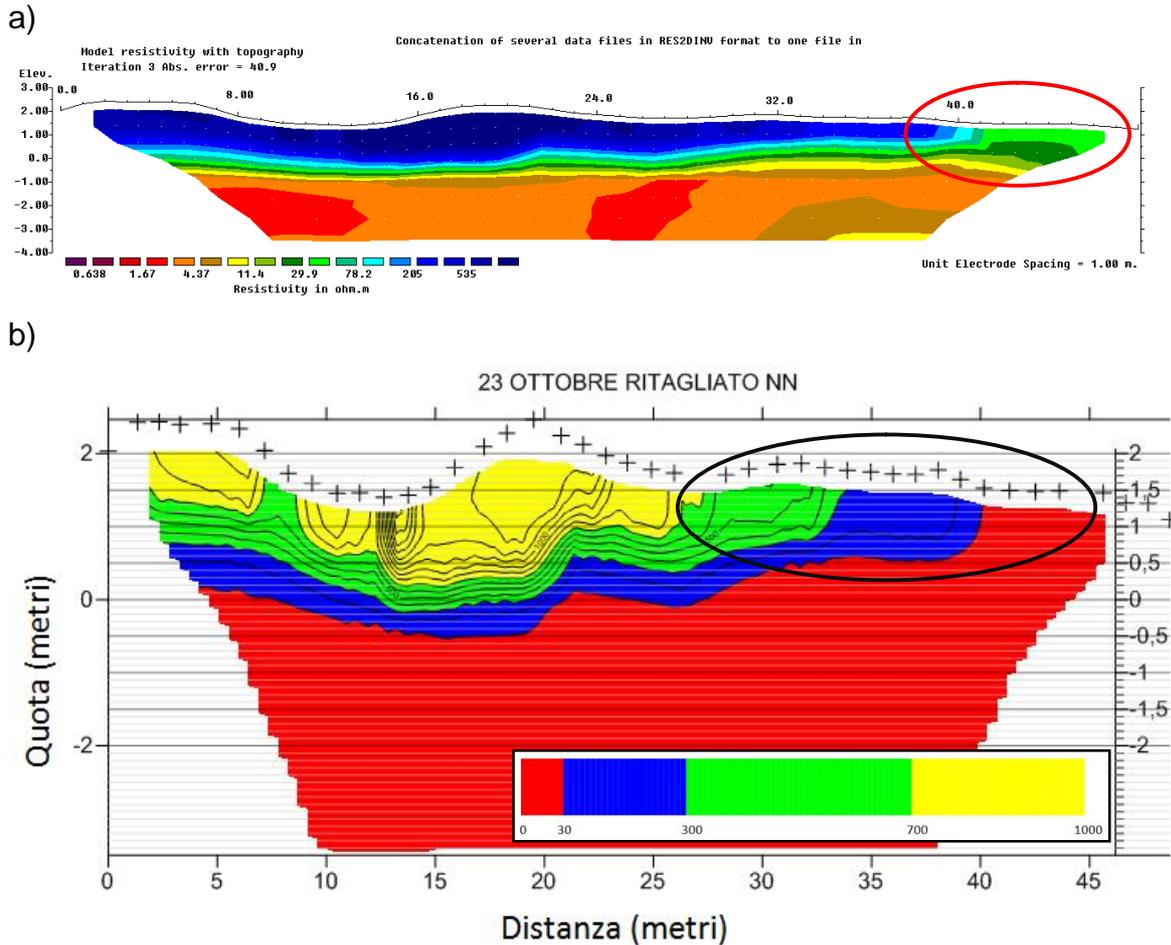


Figura 61. Profilo 1, a) RES2DINV e b) SURFER11

In Figura 61 a), a destra nella sezione (cerchio rosso), nel lato verso mare, si può notare una zona verde (15-30 Ω m), che ci segnala un'intrusione d'acqua salata. Essa è imputabile alla zona di transizione tra bassa e alta marea, infatti, in quest'area la quota topografica della duna è praticamente nulla. Questa penetrazione d'acqua marina è confermata anche dal ritrovamento di molto materiale spiaggiato (legno), che viene trasportato dall'energia delle onde.

Come detto nel profilo appena descritto, anche in Figura 61 b), nella zona a destra (verso mare), si vede chiaramente un'intrusione d'acqua marina. Inoltre in questa sezione si vede anche come lo strato blu diventi più profondo procedendo da mare verso l'entroterra, evidenziando la tipica forma a cuneo che si origina nell'area di contatto tra l'interfaccia d'acqua dolce con quella salata.

- PROFILO 2, effettuato l'8 OTTOBRE (Figura 62):

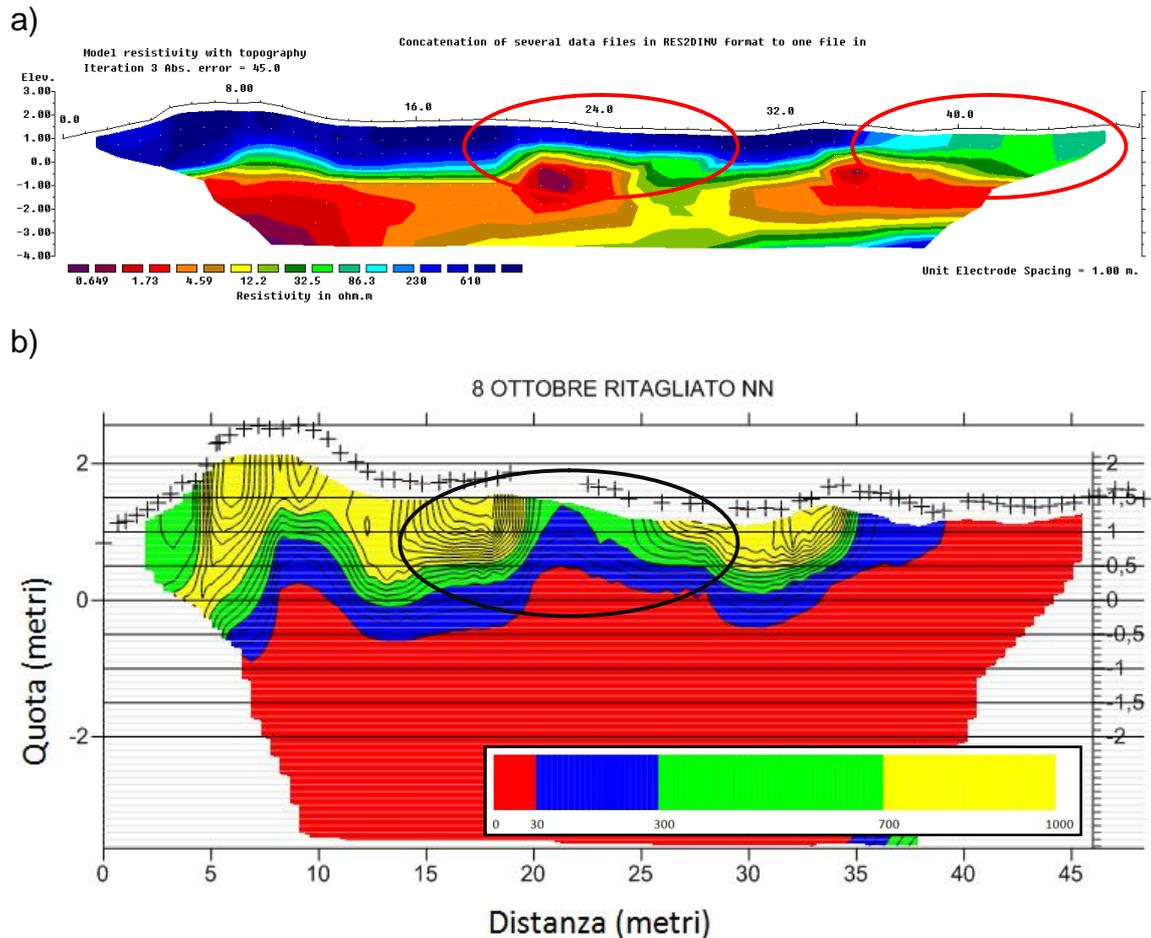


Figura 62. Profilo 2, a) RES2DINV e b) SURFER11

Nel profilo di Figura 62 a), nell'area centrale si vede come al diminuire della quota ci sia un avvicinamento della zona rossa (strati a bassa resistività) verso il piano campagna. Questa risalita si vede maggiormente in Figura 62 b), dove le zone blu sfiorano la superficie. Inoltre, come nel profilo precedente (Profilo 1, del 23 Ottobre), si nota che sul lato destro vi è la presenza d'acqua salata sino alla superficie.

Si può anche vedere che rispetto al Profilo 1 (in Figura 61 b)) l'andamento dello strato blu che rappresenta la tavola d'acqua e le conduttività elettriche più dolci (in Figura 62) sia molto più irregolare, probabilmente dovuto ad una minore topografia lateralmente tra i 15-20 metri di distanza della sezione.

Tra i profili **CON DUNA** abbiamo:

- o **PROFILO 3**, effettuato il 16 LUGLIO (Figura 63):

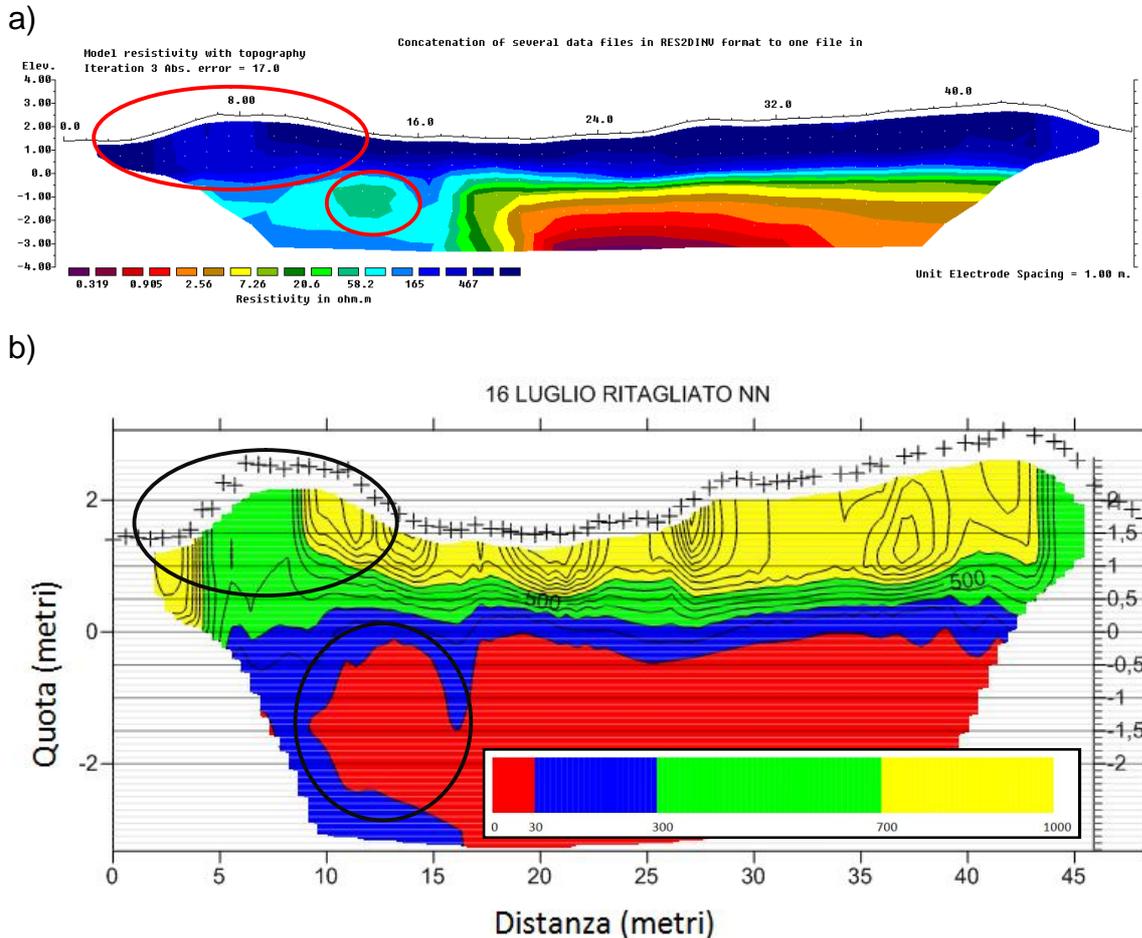


Figura 63. Profilo 3, a) RES2DINV e b) SURFER11

Nell'area a sinistra, indicata nel cerchio rosso (Figura 63 a)), si vede una zona di colore blu/azzurra, imputabile a un'area con maggiore compattazione del suolo (quindi a minore porosità) e situata proprio in prossimità della strada utilizzata dalla forestale. Il segnale elettrico che attraversa questa zona, risulta più lento che quello che si registra per le sabbie insature (parti di colore blu scuro). Anche in Figura 63 b), si vede quanto detto per quella ottenuta con RES2DINV, a sinistra c'è una zona più compatta attribuibile alla strada. Nei cerchi posti più in profondità (Figura 63 a) e b)), si riscontra lo stesso andamento sub-ciclorale, dovuto probabilmente ad un accumulo di acqua salmastra. A differenza dei profili SENZA DUNA, si nota un significativo inspessimento dell'area di passaggio tra le diverse classi di resistività, con una maggiore quantità d'acqua dolce (in blu) che si spinge sino in profondità del margine orientale della sezione studiata.

- PROFILO 4, effettuato il 4 LUGLIO (Figura 64):

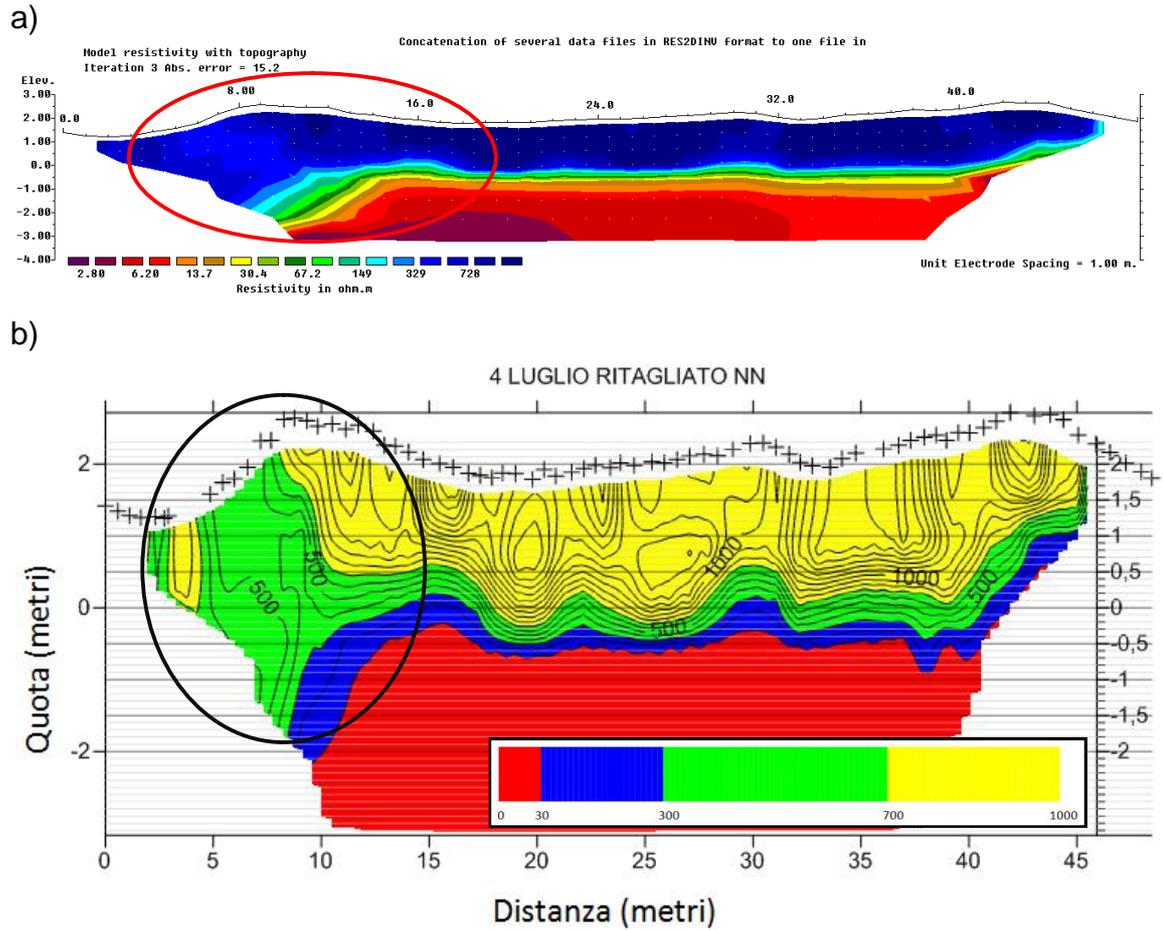


Figura 64. Profilo 4, a) RES2DINV e b) SURFER11

Nell'area a sinistra (Figura 64 a) e b)), a ridosso della strada si riconosce chiaramente come all'aumentare della quota topografica, le aree rosse (resistività basse) vengano spinte in profondità, allontanando così l'acqua salata dalla superficie.

Si consideri che le quote soprattutto nel lato verso mare sono notevolmente accentuate, raggiungendo quote che superano i 2 metri di altezza.

o **PROFILO 5**, effettuato il 25 LUGLIO (Figura 65):

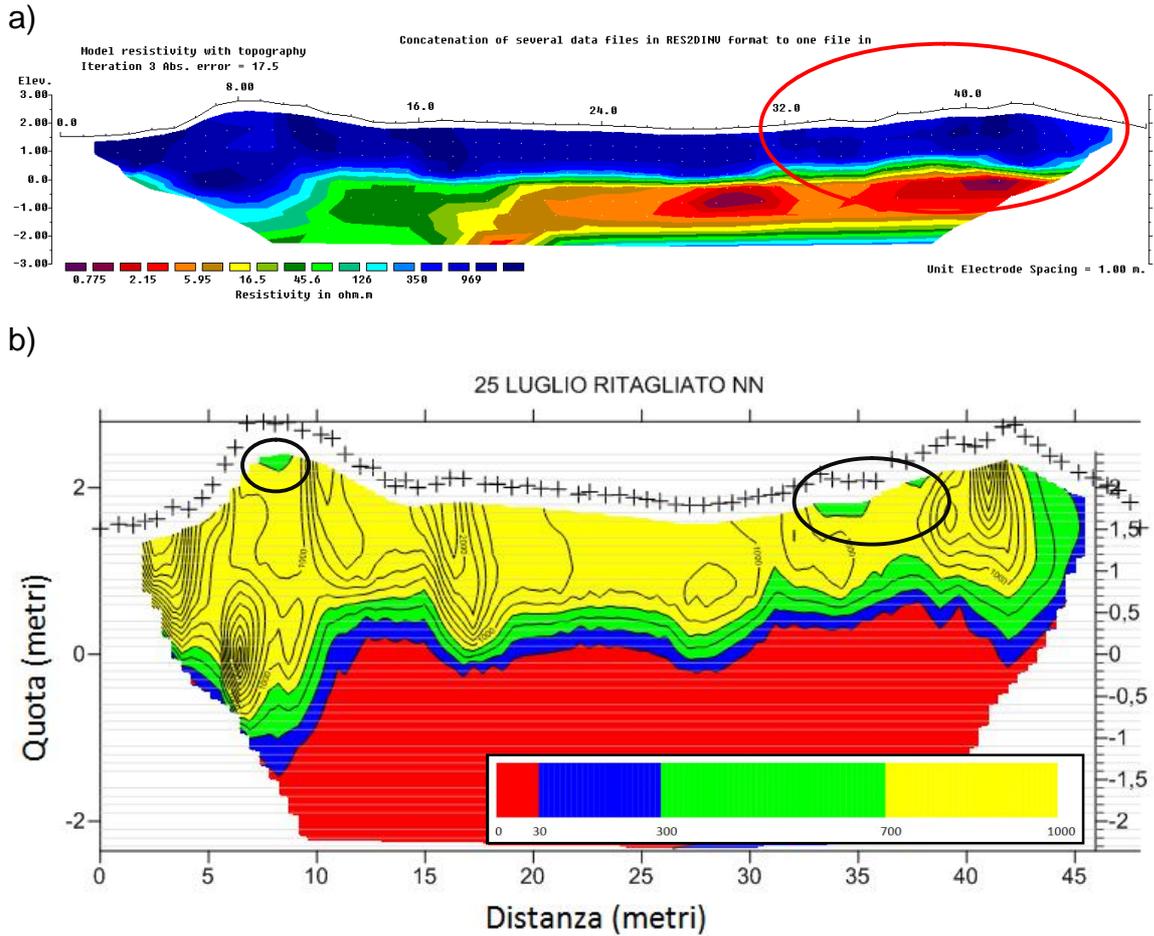


Figura 65. Profilo 5, a) RES2DINV e b) SURFER11

In Figura 65 b), si vedono delle anomalie (zone verdi indicate nei cerchi) poste in superficie che non vengono riscontrate nella Figura 65 a), imputabili a degli artifici grafici ottenuti durante la procedura d'interpolazione.

Si noti che lo spessore delle sabbie insature (in giallo) rispetto alle sezioni descritte prima (Figura 63 b) e Figura 64 b)), aumenta di spessore procedendo da mare (a destra) verso l'entroterra (da Est verso Ovest).

Si riconosce anche un netto inspessimento in confronto con le sezioni esaminate nelle pagine precedenti dei profili SENZA DUNA (Figura 60, Figura 61 e Figura 62), si passa dai circa 2 metri di spessore delle sezioni CON DUNA a circa la metà per quelli SENZA DUNA.

Infine tra i profili **CON DUNA e PIEZOMETRO** abbiamo:

➤ **PROFILO 8**, effettuato il 28 OTTOBRE (Figura 66):

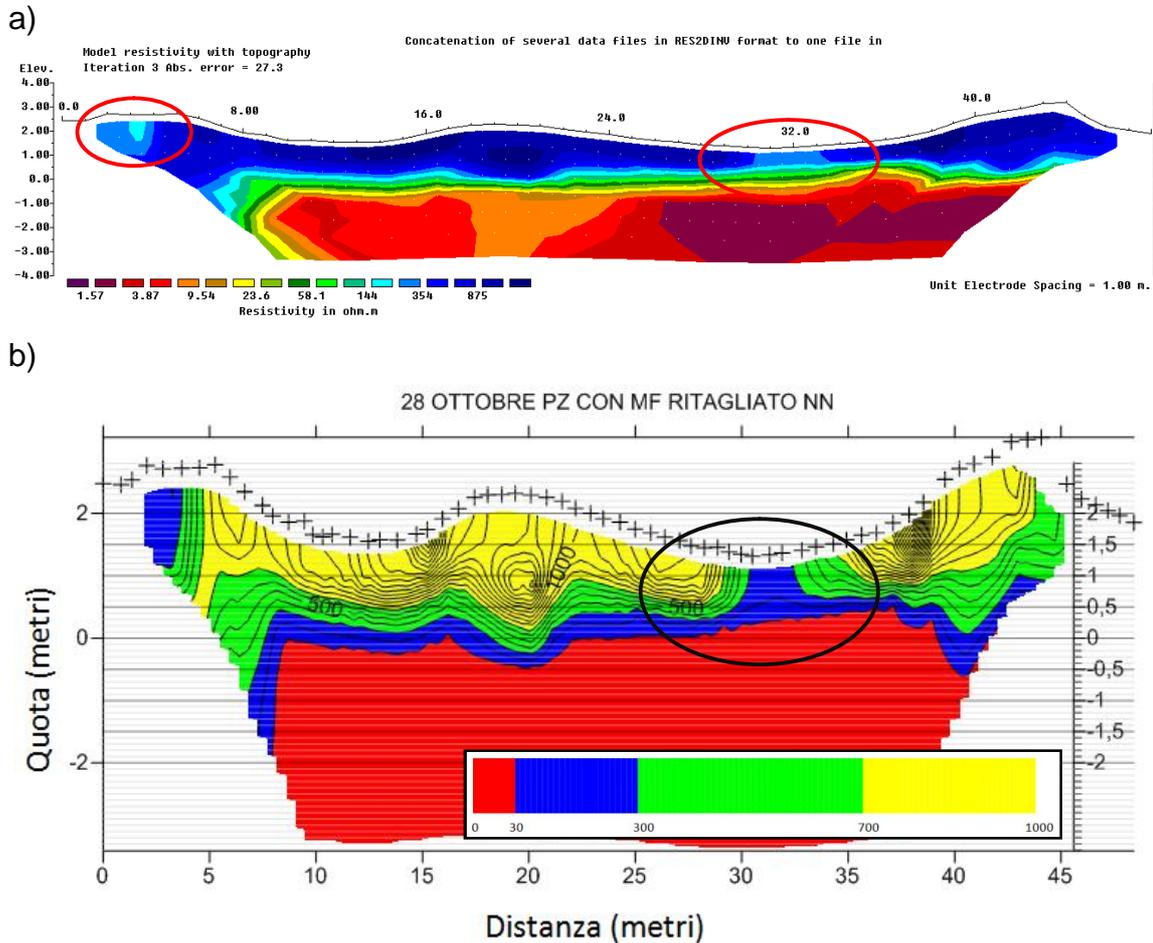


Figura 66. Profilo 8 del 28 Ottobre, a) RES2DINV e b) SURFER11

Nella sezione di Figura 66 a), nel lato sinistro si vede chiaramente l'area in coincidenza con la strada.

Mentre, nell'area interdunale, di Figura 66 a) e b), si ha una risalita della tavola d'acqua, giustificata anche dai dati diretti delle trivellate, che indicano come la superficie freatica sia di poco al di sotto del piano campagna.

È possibile fare un confronto della qualità dell'acqua che risale in quest'area, in Figura 66 a), le acque risultano essere più dolci (resistività tra 144 e 354 Ω m), rispetto a quelle che sono state riscontrate nella zona in cui è assente il sistema dunoso (Figura 60 a)), in cui le resistività registrate sono comprese tra 0-3 Ω m.

➤ **PROFILO 8, effettuato il 18 DICEMBRE (Figura 67):**

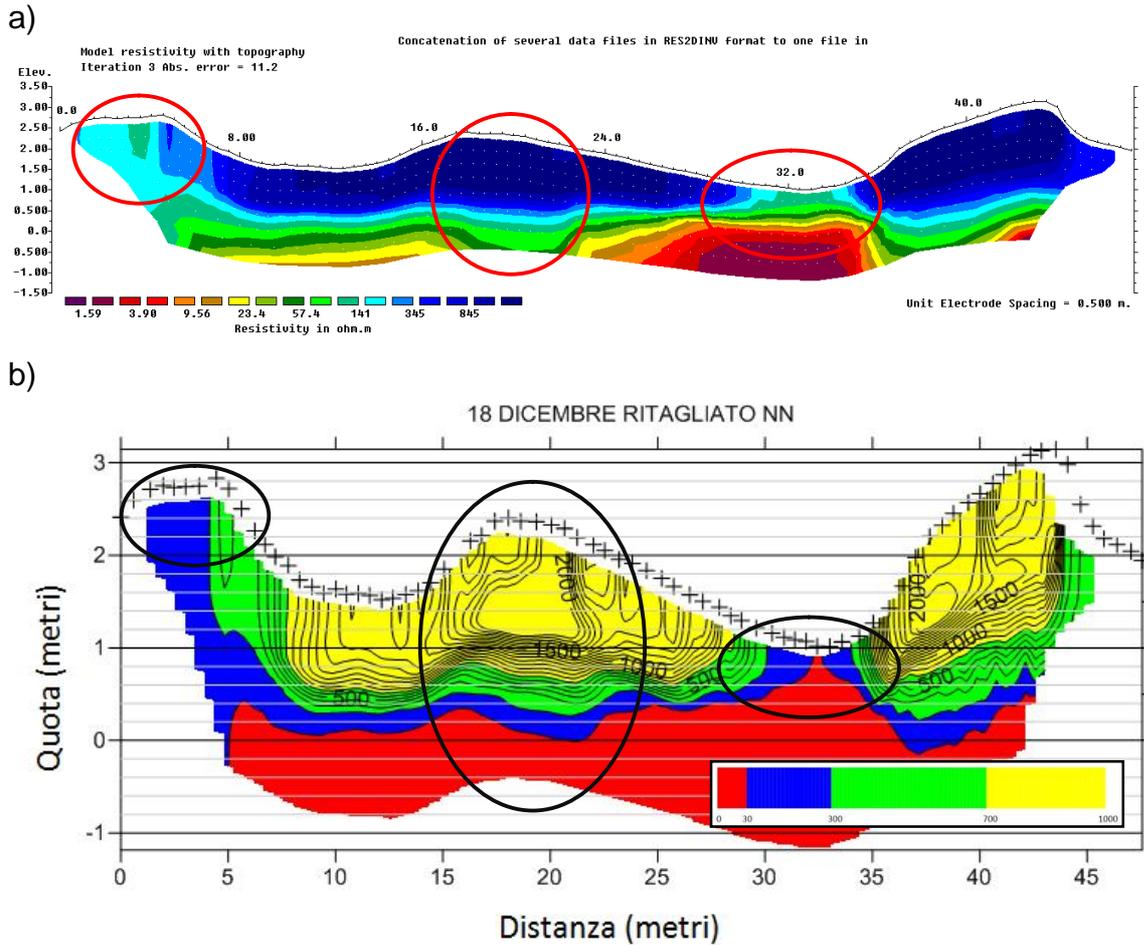


Figura 67. Profilo 8 del 18 Dicembre, a) RES2DINV e b) SURFER11

La tomografia elettrica di Figura 67 a), è stata realizzata dimezzando la spaziatura tra gli elettrodi, portandola a 0.50 metri anziché di 1 metro, questo per focalizzare lo studio nella parte più superficiale (strati poco profondi) e aumentare così la risoluzione verticale permettendoci di individuare meglio l'interfaccia tra acqua dolce-salata. In Figura 67 a) e b), si riconosce a sinistra l'effetto della strada e a destra la risalita della falda fin quasi alla superficie. L'acqua dolce presente nel retroduna infiltra dalla sommità della duna (alta oltre 3 metri) si accumula nella zona più depressa (posizionata quasi 2 metri più in basso). Nell'area centrale si osserva molto bene come la notevole quota della duna (quasi 2.50 metri) sovrastante spinga verso il basso le resistività più basse che rappresentano le acque salate (sinonimo d'intrusione salina).

In Figura 68 viene riportato un esempio di elaborazione a *Classed post* in cui sono visualizzati i punti reali di misura mediante dei pallini colorati che rispecchiano le classi cromatiche definite per le *contour lines* utilizzate nel metodo d'interpolazione *Natural Neighbor*.

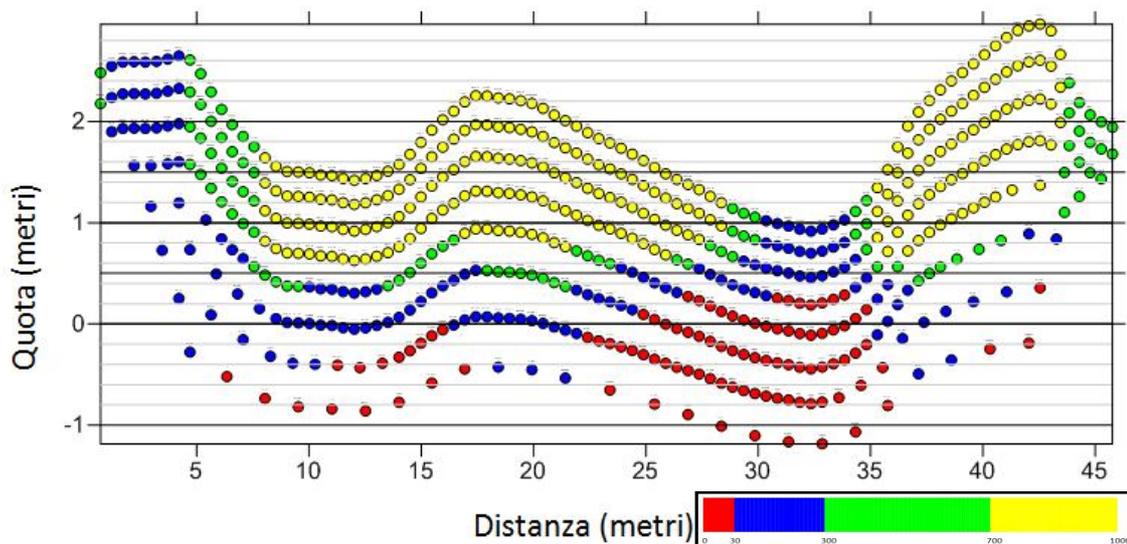


Figura 68. Profilo 8, del 18 Dicembre, SURFER11 *Classed Post*

In ultimo abbiamo il profilo **PARALLELO** alla linea di costa:

✓ **PROFILO 6**, effettuato il 16 LUGLIO (Figura 69):

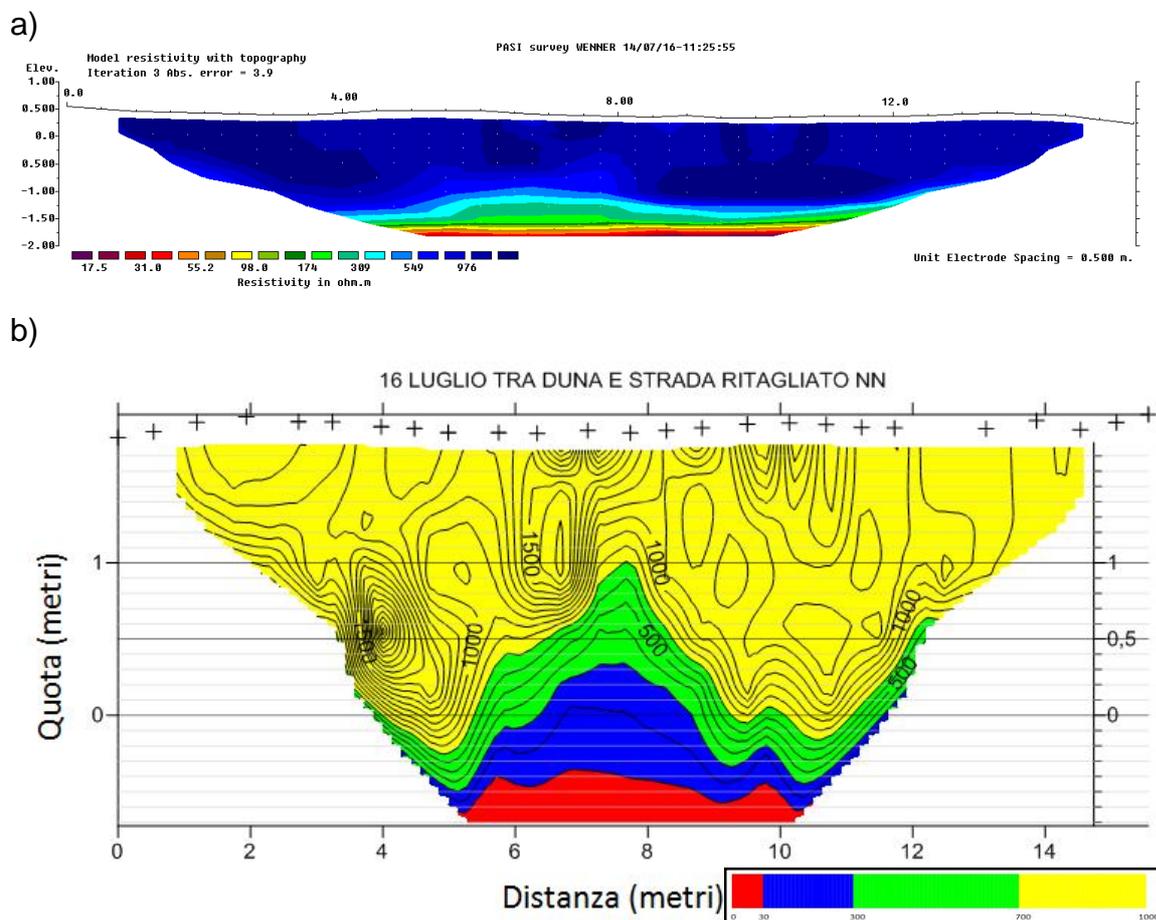


Figura 69. Profilo 6, a) RES2DINV e b) SURFER11

Si vede come essendo orientati in modo parallelo alla linea di costa, tutti gli strati resistivi abbiano un andamento sub-parallelo concorde con la superficie topografica che è praticamente orizzontale.

4.2 DATI MISURATI SULLE ACQUE

Di seguito vengono riportate le tabelle riassuntive dei parametri chimico-fisici che sono stati misurati direttamente in campo (valori reali), che confermano i dati indiretti ottenuti con la geoelettrica.

Sono state effettuate tre trivellate per ogni sondaggio acquisito:

1. inizio dello stendimento, situato nell'entroterra;
2. centro dello stendimento;
3. fine dello stendimento, situato nel lato verso mare.

Viene riportata una tabella per:

- Profili SENZA DUNA (Tabella 4);
- Profili CON DUNA (Tabella 5);
- Profili CON DUNA e PIEZOMETRO (Tabella 6).

Si ricorda che la conducibilità elettrica (EC) è definita come la capacità di una sostanza di condurre corrente elettrica e corrisponde esattamente all'inverso della resistenza, viene misurata in milliSiemens/cm (mS/cm), o in microSiemens/cm (μ S/cm).

La conduttività elettrica è direttamente proporzionale alla quantità di sali disciolti in acqua, quindi per acque salate registreremo valori elevati sia di EC che di salinità, mentre avremo valori minimi di EC in coincidenza con valori bassi di salinità (acque dolci).

Tabella 4. Valori trivellate SENZA DUNA

DATA	SENZA DUNA	TRIVELLATA ENTROTERRA	TRIVELLATA CENTRALE	TRIVELLATA MARE
		ELETTRODO 48	ELETTRODO 24	ELETTRODO 1
08-ott	Elevation (m asl)	1.33	1.484	1.484
	WT (m asl)	0.013	0.391	0.314
	EC (mS/cm)	2.38	3.79	31.05
	Vadose zone thickness (m)	1.317	1.093	1.17
23-ott	Elevation (m asl)	2.034	1.782	1.095
	WT (m asl)	0.142	0.473	0.305
	EC (mS/cm)	4.55	17.65	36.2
	Vadose zone thickness (m)	1.892	1.309	0.79
28-ott	Elevation (m asl)	0.637	2.009	1.492
	WT (m asl)	0.49	0.436	0.212
	EC (mS/cm)	6.485	13.88	35.53
	Vadose zone thickness (m)	0.147	1.573	1.28

Si riconosce che la conduttività elettrica (EC) decresce procedendo da mare verso l'entroterra, passando da valori prossimi a 30-35 mS/cm, caratteristici di acqua salata, per raggiungere a circa 5 mS/cm nelle aree più interne.

Tabella 5. Valori trivellate CON DUNA

DATA	CON DUNA	TRIVELLATA ENTROTERRA	TRIVELLATA CENTRALE	TRIVELLATA MARE
		ELETTRODO 48	ELETTRODO 24	ELETTRODO 1
04-lug	Elevation (m asl)	1.414	2.017	1.803
	WT (m asl)	0.083	0.371	-0.127
	EC (mS/cm)	0.775	11.7	7.6
	Vadose zone thickness (m)	1.331	1.646	1.93
16-lug	Elevation (m asl)	1.399	1.688	1.726
	WT (m asl)	0.059	0.348	-0.054
	EC (mS/cm)	0.897	0.592	9.26
	Vadose zone thickness (m)	1.34	1.34	1.78
25-lug	Elevation (m asl)	1.511	1.914	1.52
	WT (m asl)	0.06	0.288	0.077
	EC (mS/cm)	0.673	0.412	10.31
	Vadose zone thickness (m)	1.451	1.626	1.443

Tabella 6. Valori trivellate CON DUNA e PIEZOMETRO

DATA	CON DUNA E PIEZOMETRO	TRIV. 5	TRIV. 4	MINIFILTRO 3_1	TRIV. 3	TRIV. 2	TRIV. 1
28-ott	Elevation (m asl)	1.57		2.319			1.31
	WT (m asl)	0.31		0.32			0.56
	EC (mS/cm)	1.251		0.6			6.683
	Vadose zone thickness (m)						
18-dic	Elevation (m asl)	1.117	1.539	2.37	1.448	1.102	1.916
	WT suolo	0.72	1.12		0.99	0.57	1.4
	WT (m asl)	0.397	0.419	0.57	0.458	0.532	0.516
	EC (mS/cm)	0.536	0.82	0.5	1.033	0.53	6.779
	temperatura	14.9	12.5	13.5	12.1	11	13.1
	Vadose zone thickness (m)	0.72	1.12	1.8	0.99	0.57	1.4

A differenza dei dati della tabella precedente (Tabella 4) si evince chiaramente come la conduttività elettrica (EC) sia inferiore nel lato verso mare. Infatti i valori massimi di EC che si registrano in questi profili CON DUNA sono intorno a 10 mS/cm anziché 30-35 mS/cm dei profili SENZA DUNA. Questo ci dimostra come il sistema dunoso permetta l'esistenza di una lente d'acqua dolce, in grado di contrastare efficacemente l'intrusione d'acqua marina.

Le trivellate effettuate ai lati degli stendimenti (punti iniziali e finali), hanno fornito risultati esterni al profilo geoelettrico. In un primo momento, non si era considerato che durante l'inversione dei dati con il software RES2DINV, i dati ai margini vengono eliminati dall'analisi perché fonte di errore (grande approssimazione). Infatti, il programma genera una pseudosezione di forma trapezoidale escludendo i dati in prossimità delle trivellate fatte ai margini, che ci sarebbero state utili per calibrare meglio l'elaborazione dei dati. Per questo motivo è consigliato, per studi futuri, eliminare le trivellate laterali e farne un maggior numero al centro dello stendimento, dove abbiamo la sovrapposizione con i dati geoelettrici.

Quando ci siamo resi conto di questa mancanza di sovrapposizione, abbiamo effettuato un numero maggiore di trivellate centrali. Questo è stato possibile, però, solo per l'ultimo profilo eseguito il 18 Dicembre (con spaziatura ridotta tra gli elettrodi), ci ha consentito di sovrapporre graficamente i dati delle trivellate a quelli ottenuti con l'elaborazione di SURFER11. In Figura 70. Sovrapposizione dei dati geoelettrici e delle trivellate, si mostrano con delle stelline i punti in cui è stata misurata direttamente la superficie della tavola d'acqua (WT, in Tabella 7), successivamente questi punti sono stati uniti con delle linee nere, questo per visualizzare meglio l'andamento approssimativo della falda.

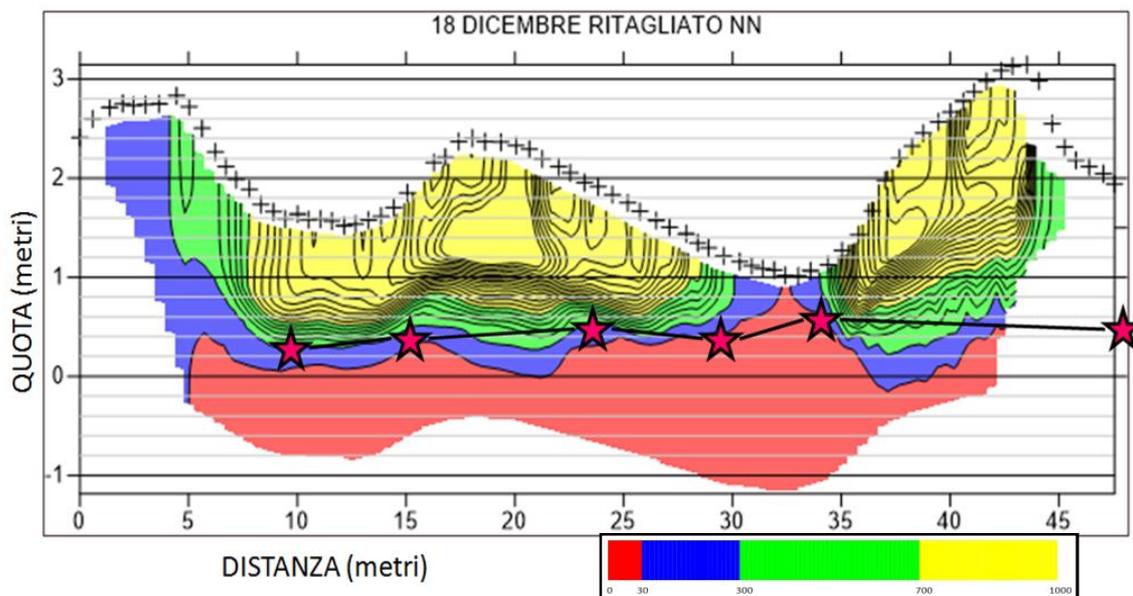


Figura 70. Sovrapposizione dei dati geoelettrici e delle trivellate

Tabella 7. Valori trivellate del 18 Dicembre

DATA	CON DUNA E PIEZOMETRO	TRIV. 5	TRIV. 4	MINIFILTRO 3_1	TRIV. 3	TRIV. 2	TRIV. 1
18-dic	Elevation (m asl)	1.117	1.539	2.37	1.448	1.102	1.916
	WT (m asl)	0.397	0.419	0.57	0.458	0.532	0.516
	EC (mS/cm)	0.536	0.82	0.5	1.033	0.53	6.779

Si evince chiaramente dalla Figura 70, che i dati delle trivellate rispecchiano molto bene l'andamento che è stato ricavato dall'elaborazione dei dati ottenuti con il metodo geoelettrico.

Alla luce di quanto emerso fino ad ora, l'indagine ha permesso di localizzare in tutte le pseudosezioni in modo concorde l'andamento dello strato alto resistivo (in superficie), imputabile a del materiale sabbioso (più resistivo), esso mostra un ispessimento procedendo da mare verso l'entroterra, che sovrasta uno strato completamente saturo in acqua a diversa concentrazione di sale. È stato altresì possibile individuare la zona d'ingressione di acqua marina, sul margine destro dei profili, questa che penetra all'interno della linea di costa con la tipica geometria a cuneo. La discontinuità che si riscontra nelle linee di iso-resistività può essere associata a delle particolari strutture geologiche che modificano il percorso della falda nel sottosuolo investigato.

4.3 CORRELAZIONI

Usando SURFER11 si è proseguita l'elaborazione dei dati, mediante l'esportazione in AUTOCAD 2011, in Q-GIS ed infine in EXCEL. Alla fine di questa elaborazione è stato possibile ottenere le matrici di correlazione riportate di seguito.

Le matrici di correlazione sono state fatte perché risultano un rapido metodo per confrontare i dati geofisici con quelli topografici (non quelli idrogeologici perché abbiamo solo 3 punti di campionamento), assumendo, grazie ai dati bibliografici (Burger, 1992; Celico, 1998; Bulter, 2005; Zambrini, 2007), che dove abbiamo una duna ben strutturata la quantità d'acqua dolce (lente) risulta essere maggiore e spinge l'acqua salata più in profondità.

Dove per correlazione s'intende una relazione che rappresenta la tendenza di una variabile a variare in funzione di un'altra, con una "certa regolarità".

In quest'analisi statistica dei dati, consideriamo:

- Z = quota della topografia;
- CON 700, CON 300 e CON 30 = sono le quote delle *contour lines* rispettivamente delle linee iso-resistive con resistività: 700 Ω m, 300 Ω m, 30 Ω m.

Come detto in precedenza la *contour lines* 700 (CON 700) rappresenta il limite tra la zona capillare e le sabbie asciutte, la *contour lines* 300 (CON 300) è il limite superiore della tavola d'acqua (zona satura d'acqua dolce) e infine la *contour lines* 30 (CON 30) che è il limite superiore della zona satura ad acqua salata.

Si riporta la matrice di correlazione (Tabella 8) che riassume tutti i profili, mentre nelle pagine seguenti verranno esaminati separatamente i profili CON e SENZA DUNA.

Tabella 8. Matrice di correlazione tra: quota (Z), CON 700, CON 300 e CON 30, di tutti i profili eseguiti

	CON DUNA					SENZA DUNA		
	Profilo 3 16 Luglio	Profilo 4 04 Luglio	Profilo 5 25 Luglio	Profilo 8 28 Ottobre	Profilo 8 18 Dicembre	Profilo 7 28 Ottobre	Profilo 1 23 Ottobre	Profilo 2 08 Ottobre
Quota topografica (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)
Zona di risalita capillare (CON 700)	0.54	0.54	0.62	-0.02	0.05	0.65	0.02	0.45
Limite superiore della tavola d'acqua (WT) (CON 300)	0.61	0.22	0.56	-0.32	0.36	0.86	0.19	0.21
Limite superiore della zona satura ad acqua salata (CON 30)	0.23	-0.60	0.37	-0.30	-0.27	0.25	0.37	0.09

Da questa prima analisi complessiva si può dedurre che vi è una correlazione:

- positiva (o diretta) tra Z-CON 300 (top della WT) e tra Z-CON 700 (zona capillare);
- negativa (o indiretta) tra Z-CON 30 (acqua salata), infatti dove si ha una minore quota (Z) abbiamo una risalita della *contour lines* 30, lo spessore giallo è minore e l'acqua salata si addentra maggiormente verso l'entroterra.

Questi risultati delle matrici di correlazione sono anche stati inseriti in un grafico (Figura 71), per vedere l'andamento delle *contour lines* (700, 300 e 30) rispetto alla quota topografica (Z).

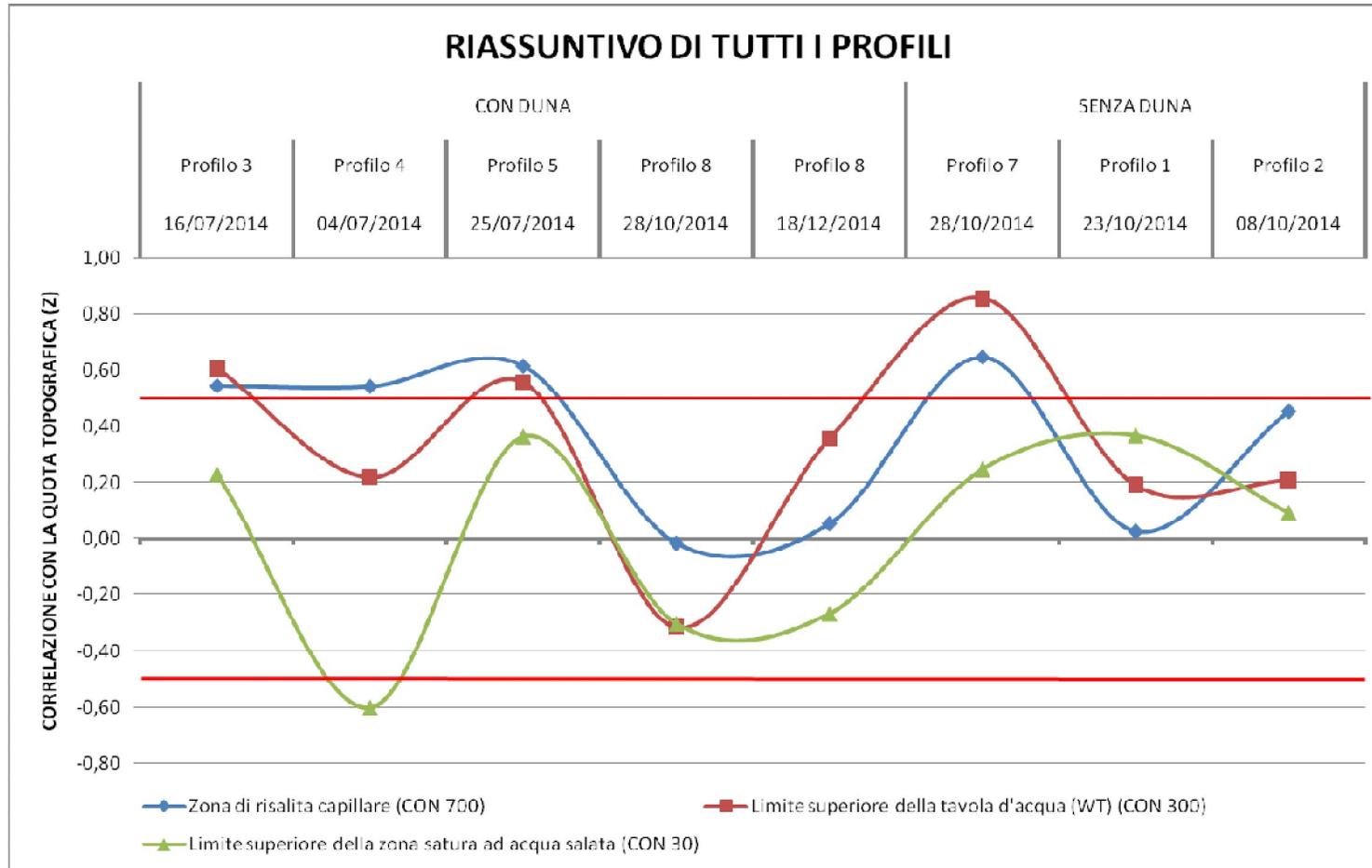


Figura 71. Grafico delle matrici di correlazione RIASSUNTIVO di tutti i profili effettuati

Le linee rosse in Figura 71, Figura 73 e Figura 75, rappresentano indicativamente delle soglie, infatti se i dati sono $> \pm 0.50$ abbiamo una buona correlazione, diretta se il valore è positivo e inversa se invece il valore è negativo.

È stata poi fatta un'analisi più dettagliata separando i profili CON DUNA (Tabella 9 e Figura 73) e quelli SENZA DUNA (Tabella 10 e Figura 75), come riportato di seguito.

Si riportano, anche le distribuzioni delle precipitazioni registrate nell'area di studio, nei mesi che vanno da Luglio a Dicembre 2014 (Figura 72 e Figura 74).

Tra i profili CON DUNA abbiamo: la matrice di correlazione (Tabella 9), l'andamento delle precipitazioni (Figura 72) e il grafico che rappresenta la matrice di correlazione (Figura 73).

Tabella 9. Matrice di correlazione CON DUNA

	CON DUNA				
	Profilo 3	Profilo 4	Profilo 5	Profilo 8	Profilo 8
	16/07/2014	04/07/2014	25/07/2014	28/10/2014	18/12/2014
Quota topografica (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)
Zona di risalita capillare (CON 700)	0.54	0.54	0.62	-0.02	0.05
Limite superiore della tavola d'acqua (WT) (CON 300)	0.61	0.22	0.56	-0.32	0.36
Limite superiore della zona satura ad acqua salata (CON 30)	0.23	-0.60	0.37	-0.30	-0.27

Dalla Tabella 9 si deduce:

- moderata correlazione positiva tra la quota Z con la zona i risalita capillare (CON 700) e il limite superiore della tavola d'acqua (CON 300) dei profili 3, 4 e 5 eseguiti nel periodo estivo (mese di Luglio). Mentre non si ritrova lo stesso andamento nei due profili 8, del 28 Ottobre e del 18 Dicembre, a causa forse delle diverse condizioni climatiche e di piovosità. Infatti prima di questi ultimi due sondaggi, sono state registrate delle intense precipitazioni (indicate dai rettangoli rossi in Figura 72) che hanno provveduto ad omogeneizzare un po' l'intero profilo;
- debole o moderata correlazione negativa tra la quota Z e la zona satura ad acqua salata (*contour lines* 30), nei profili 4 e i due profili 8.

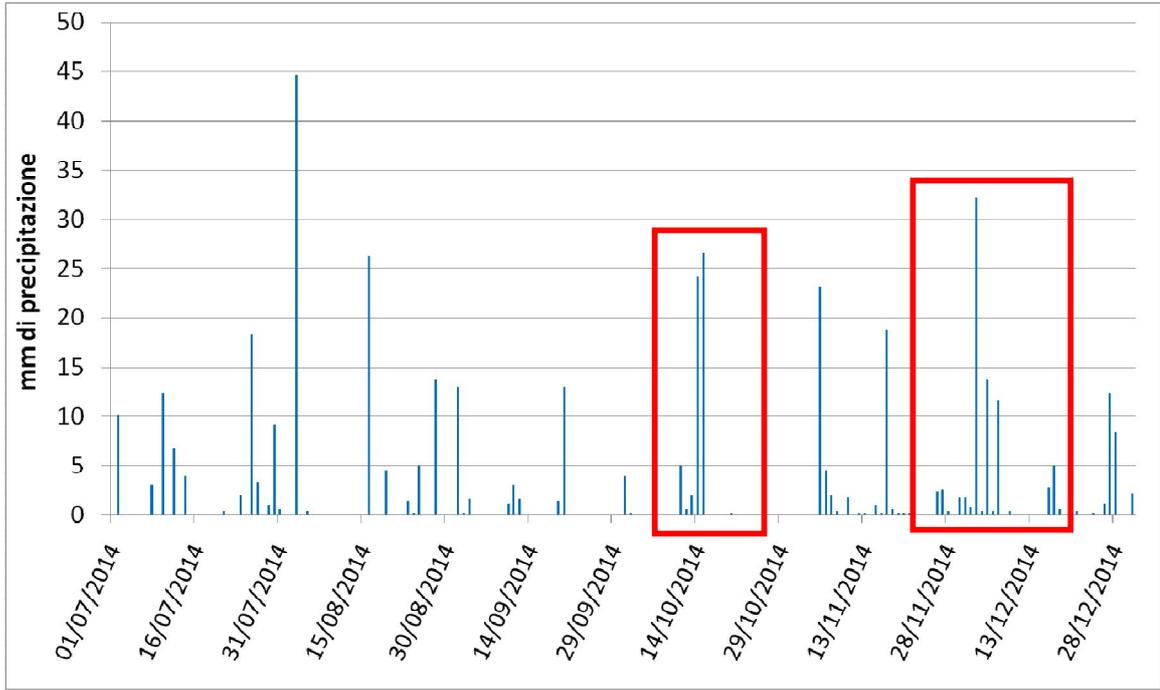


Figura 72. Precipitazioni dei mesi da Luglio a Dicembre 2014

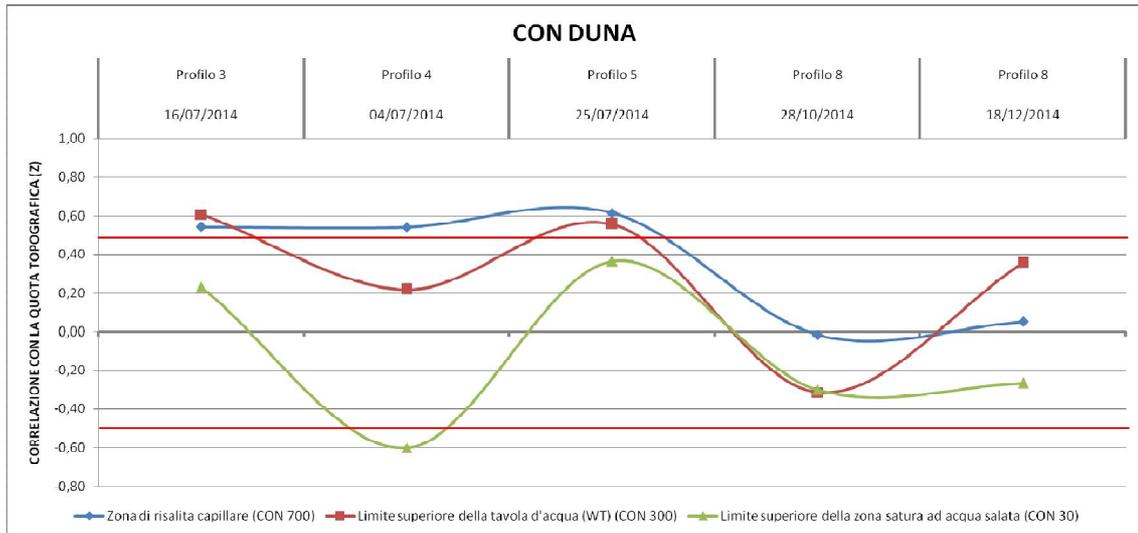


Figura 73. Grafico della matrice di correlazione CON DUNA

Tra i profili SENZA DUNA abbiamo: la matrice di correlazione (Tabella 10), l'andamento delle precipitazioni (Figura 74) e il grafico che rappresenta la matrice di correlazione (Figura 75).

Tabella 10. Matrice di correlazione SENZA DUNA

	SENZA DUNA		
	Profilo 7	Profilo 1	Profilo 2
	28/10/2014	23/10/2014	08/10/2014
Quota topografica (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)	Quota (Z)
Zona di risalita capillare (CON 700)	0.65	0.02	0.45
Limite superiore della tavola d'acqua (WT) (CON 300)	0.86	0.19	0.21
Limite superiore della zona satura ad acqua salata (CON 30)	0.25	0.37	0.09

Dalla Tabella 10 si deduce:

- debole o moderata correlazione positiva tra la quota Z e la zona capillare (CON 700), nei profili 7 e 2;
- moderata correlazione positiva tra Z e il limite superiore della tavola d'acqua (CON 300) nel profilo 7;
- debole correlazione positiva tra Z e il limite superiore della zona satura ad acqua salata (CON 30) in tutti i profili (7, 1 e 2), questo può essere dovuto della spaziatura tra gli elettrodi che non permette una buona risoluzione in profondità.

Questi profili sono stati tutti acquisiti nel periodo autunnale del mese di Ottobre, si nota in Figura 74 che vi sono state delle intense precipitazioni (20-25 mm di pioggia) in prossimità della metà del mese. Queste precipitazioni si sono verificate tra il 14-16 Ottobre, proprio prima dell'acquisizione del Profilo 1 (del 23 Ottobre), che risulta infatti l'unico con un andamento che si discosta da quelli acquisiti prima e dopo tali date (Profilo 7 e 2).

In Figura 74 sono visualizzate le precipitazioni che hanno interessato l'area di studio, nel quadrato rosso sono indicate quelle riguardanti il mese di Ottobre.

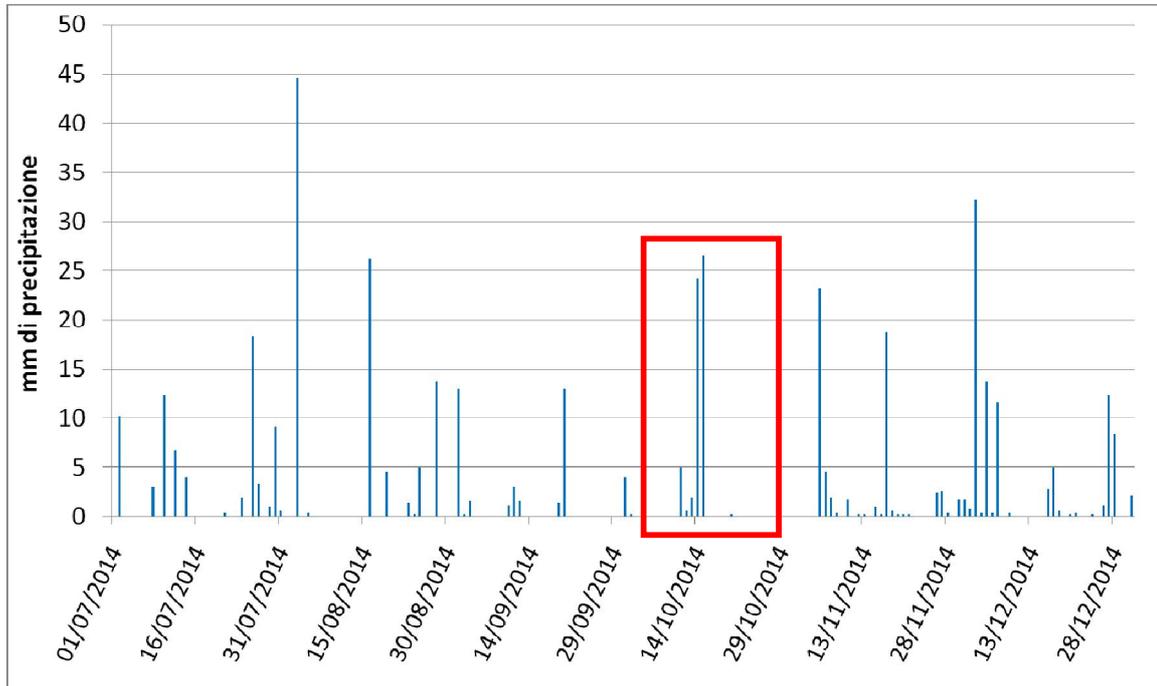


Figura 74. Precipitazioni dei mesi da Luglio a Dicembre 2014

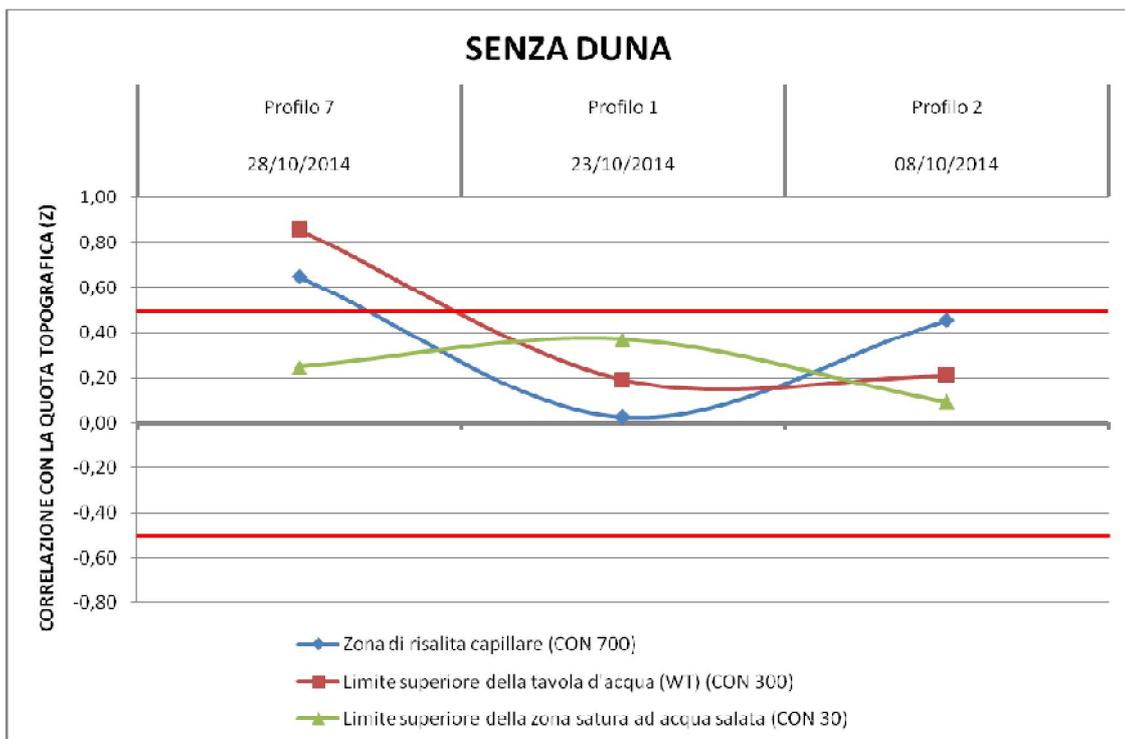


Figura 75. Grafico della matrice di correlazione SENZA DUNA

Inoltre con i dati a nostra disposizione si è provato a fare una matrice di correlazione tra: quota topografica (Z), tavola d'acqua (WT) e conducibilità elettrica (EC) dei parametri misurati in campo dalle acque (Tabella 11), per vedere quale relazione ci fosse tra le variabili considerate.

Tabella 11. Matrice di correlazione tra: quota Z, WT, EC e spessore della zona vadosa

	Quota Z (m asl)	WT (m asl)	EC (mS/cm)	Spessore zona vadosa (m)
Quota Z (m asl)				
WT (m asl)	-0.11			
EC (mS/cm)	-0.21	0.40		
Spessore zona vadosa (m)	0.90	-0.53	-0.35	

Da questi dati si deduce come vi sia una forte correlazione tra: quota (Z) e spessore della zona vadosa, confermandoci anche in questo caso come con un'elevata topografia anche lo spessore della zona vadosa risulti maggiore.

Si nota una moderata correlazione positiva tra la profondità della tavola d'acqua (WT) e la conduttività elettrica (EC).

Si vede una moderata correlazione inversa tra lo spessore della zona vadosa con la profondità della tavola d'acqua (WT) e conduttività elettrica (EC).

5 CONCLUSIONI

Dall'analisi delle prospezioni geoelettriche, trattate nei paragrafi precedenti, sono ottenute delle sezioni bidimensionali della distribuzione spaziale dell'acqua dolce-salata.

La programmazione delle indagini è stata pianificata in considerazione della profondità trovare ipotizzata per l'interfaccia fra le acque dolci e l'acqua salina proveniente da mare, in modo da scegliere il compromesso migliore tra spaziatura degli elettrodi, la risoluzione verticale e la profondità indagata.

L'ambito territoriale è stato in gran dettaglio a livello sia epidermico (topografia con GPS), che sotterraneo, tramite le prospezioni geofisiche e i parametri chimico-fisici misurati in fori aperti con trivellate. L'integrazione tra Tomografia geoelettrica e GPS (dati topografici) permette di sviluppare una rappresentazione perfettamente georeferenziata. Risulta evidente che l'acquisizione dei due tipi di dati vada sincronizzata tramite software adeguati che supportino i formati proposti dalle strumentazioni. Questa associazione presenta una grande quantità di applicazioni, soprattutto per quanto riguarda l'analisi territoriale. Dalle esperienze di campagna effettuate, risultano, chiare le notevoli potenzialità delle tecniche geoelettriche come strumento di mappatura, che trovano immediata applicazione nella creazione di un sistema informativo territoriale GIS in cui inserire e strutturare adeguatamente i dati acquisiti.

Il crescente interesse verso le problematiche ambientali e lo specifico contributo che i metodi geoelettrici possono fornire nella determinazione delle strutture presenti nel sottosuolo, hanno fornito le motivazioni fondamentali per questa tesi magistrale. Le applicazioni hanno dimostrato la validità della metodologia geoelettrica nella descrizione delle variazioni delle proprietà fisiche ed idrologiche presenti nei suoli. Il fine ultimo di questo lavoro era quello di definire, mediante l'utilizzo della metodologia geoelettrica ed in particolare del metodo della resistività le caratteristiche idrologiche del sottosuolo indagato.

I risultati dimostrano che dal punto di vista scientifico, il metodo geoelettrico, ha verificato il principio di Ghyben-Herzberg, il quale suppone che vi sia una relazione inversa tra quota topografica e limite superiore della zona satura con

acqua salata, inoltre si è riscontrata una certa stagionalità tra i profili acquisiti in momenti diversi (influenzati dalla piovosità). Mentre dal punto di vista tecnologico, il metodo, è di difficile utilizzo negli ambienti di transizione tanto che chi si occupa professionalmente di questi rilievi preferisce non eseguirli. Questo è dovuto alla mancanza di un protocollo per le operazioni di acquisizione e a causa dell'elevato rumore di fondo che si riscontra nelle misurazioni. Con questo studio è stato possibile calibrare e sviluppare un protocollo, utilizzabile con diverse spaziature tra gli elettrodi, che è valido per l'area di studio indagata.

Inoltre l'utilizzo congiunto delle informazioni delle prospezioni e quelle dei rilievi classici (monitoraggio diretto della superficie freatica, parametri chimico-fisici delle acque sotterranee, rilievo topografico e sondaggi geognostici), generano un prodotto finale di semplice interpretazione e di facile comprensione.

I metodi indiretti di tipo geoelettrico sono convenienti dal punto di vista del tempo impiegato ed hanno un minimo ambientale.

Considerando l'esperienza che ho maturato in campagna, si può ragionevolmente concludere che, il dispositivo Wenner consente delle buone ricostruzioni 2D. Inoltre se i vari transetti, paralleli tra loro, fossero più ravvicinati (adesso sono distanziati di circa 20-30 metri) si potrebbe pensare di fare delle elaborazioni 3D, interpolando i dati e ottenendo così dei piani che riuniscono i punti che hanno uguale resistività.

6 RINGRAZIAMENTI

Desidero, innanzitutto, ringraziare il Professor Marco Antonellini per l'opportunità concessami, per i suoi preziosi consigli, indispensabili per indirizzare al meglio il lavoro di questa tesi Magistrale.

Ringrazio il Dottor Nicolas Greggio, che ha condiviso il lavoro di ricerca, per la sua disponibilità a dirimere i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro. Un grazie anche ai colleghi del Laboratorio I.G.R.G., in primis Beatrice e tutti gli altri che mi hanno aiutata durante i sondaggi in campo e nell'elaborazione dei dati in laboratorio.



Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, per il sostegno morale e materiale che mi hanno dato in questi anni.

Ringrazio tutti i colleghi e gli amici (MICCE, Filippo, Cristiana e tanti altri), che ho avuto al mio fianco in questo percorso, con cui ho condiviso le fatiche, le difficoltà, le gioie e soprattutto hanno reso questi anni indimenticabili.

Sono soddisfatta del lavoro che ho svolto durante questi mesi di tesi, l'attività di ricerca mi è piaciuta molto e sono orgogliosa di aver raggiunto gli obiettivi che mi ero preposta.

*"Non accontentarti mai, perché oltre all'orizzonte
c'è sempre l'infinito"*

(Jim Morrison)



7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFIA

- Adams J. B., 1995. *Gnundation by Spartina marittima*. Aqua. Bot. 52: 183-191.
- Adepelumi A. A., Ako B. D., Ajayi T. R., Afolabi O., Omotoso E. J., 2009. *Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria*. Environ Geol 56: 927-933.
- Amorosi A., Asioli A., Bondesan M., Cibin U., Colalongo M. L., Correggiari A., Pasini G., Preti D., Roveri M., Sarti G., Severi P., Stefani M., Trincardi F., Vaiani S. C., Vincenzi S., 2002. *Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quadernaria dell'Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola*. Le pianure: conoscenza e salvaguardia. Il contributo delle Scienze della Terra, Ferrara.
- Amorosi A., Centineo M. C., Colalongo M. L., Fiorini F., 2005. *Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po plain, Italy*. Marine geology 222/223: 7-18.
- Amorosi A., Colalongo M. L., Fiorini F., Fusco F., Pasini G., Vaiani S.C., Sarti G., 2004. *Palaeogeographic and palaeoclimatic evolution of the Po Plain from 150-ky core records*. Global and planetary change 40: 55-78.
- Amorosi A., Colalongo M. L., Fusco F., Pasini G., Fiorinia F., 1999a. *Glacio-eustatic control of continental–shallow marine cyclicity from late quaternary deposits of the southeastern Po Plain, Northern Italy*. Quaternary Research, Vol. 52, Issue 1: 1-13.
- Amorosi, A., Colalongo, M. L., Pasini, G., Preti, D., 1999b. *Sedimentary response to late quaternary sea-level changes in the Romagna Coastal Plain (Northern Italy)*. Sedimentology 46: 99-121.
- Amorosi A., Milli S., 2001. *Late Quaternary depositional architecture of Po and Tevere river deltas (Italy) and worldwide comparison with coeval deltaic successions*: Sedimentary geology 144: 357-375.
- Anderson W. P. J. R., Evans D. G., Snyder S. W., 2000. *The effects of Holocene barrier-island evolution on water-table elevation*. Hatteras Island North Carolina, USA. Hydrogeology journal 8: 390-404.
- Antonellini M., Balugani E., Gabbianelli G., Laghi M., Marconi V., and Mollema P., 2010b. *Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola*. Studi costieri, 17: 83-104.
- Antonellini M., Donato C., Gabbianelli G., Greggio N., Laghi M., Mollema P., 2009b. *Mapping salinization in the coastal aquifer of Ravenna (Italy)*.
- Antonellini M., Mollema P., 2009a. *Relationship between groundwater salinity and biodiversity in the coastal Pine forests of Ravenna, Italy*. Proceedings of Hydro-eco 2009, Vienna Austria, 2nd International Conference on Hydrology and Ecology: Ecosystems interacting with groundwater and surface water.

- Antonellini M., Mollema P., Giambastini B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G., 2008. *Salt water intrusion in the coastal aquifer of southern Po Plain, Italy*. Hydrogeology journal 16: 1541-1556, DOI 10.1007/s10040-008-0319-9.
- Antonellini, M., Mollema P., 2010a. *Impact Of Groundwater Salinity On Vegetation Species Richness In The Coastal Pine Forests And Wetlands Of Ravenna, Italy*. Ecological Engineering. 236 (9), 1201-1211, Doi:10.1016/J.Ecoleng.9.12.007.
- Antonioli F., Ferranti L., Fontana A., Amorosi A., M., Bondesan A., Braitenberg C., Dutton A., Fontolan G., Furlani S., Lambeck K., Mastronuzzi G., Monaco C., Spada G., Stocchi P., 2009. *Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian coastline*. Journal of Quaternary International, 231: 37-51.
- Archie G. E., 1950. *Introduction to petrophysics of reservoir rocks in American*. Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 34, n 5, pp.: 943-961.
- ARPA Emilia Romagna, 2009a. *Stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*.
- Arparivista/Ecoscienza, 2012. *Acque sotterranee, una risorsa preziosa*. Ecoscienza, n° 6, pp.: 56.
- Audisio P., Muscio G., Pignatti S., 2002. *Problemi di conservazione e gestione*. Quaderni habitat n°4: Dune e spiagge sabbiose – Ambienti tra terra e mare.
- Badon-Ghijben W., 1888. *Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam [Notes on the probable results of a well drilling near Amsterdam]*. Tijdschrift Koninklijk Instit Ing 1988/1989: 8-22.
- Barker R. D. 1998. *The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies*. The Leading Edge, 17: 1454-1458.
- Barrocu G., 2003. *Seawater intrusion in the coastal aquifers of Italy*. In: Calaferra J (ed) State of seawater intrusion in coastal aquifers of the Mediterranean Coast. SWIM-SWICA, Alicante, Spain.
- Barrocu G., Muscas L., Sciabica M. G., 2001. *GIS and modeling for studying saltwater intrusion in the Capoterra Alluvial plain (Sardinia, Italy)*. Proc. SWICA-M3, Essaouira, Morocco, April 2001.
- Bau' D., Gambolati G., Teatini P., 2000. *Residual land settlement near abandoned gas fields raises concern over Northern Adriatic coastland*. EOS Trans Am Geophys Union 81: 245-249.
- Bear J., Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D., Herrera I., 1999. *Theory and applications of transport in porous media – Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, pp.: 625.
- Beatley T., Brower D. J., Schwab A. K., 2002. *An introduction to coastal zone management*. Island Press: Washington DC.
- Bertoni W., Brighenti G., Gambolati G., Gatto P., Ricceri G., Vuillermin E., 1988. *Risultati degli Studi e delle Ricerche sulla Subsidenza di Ravenna*. Comune di Ravenna.

- Bertoni W., Gambolati G., Greggi S., 1998. *Qualità delle acque di falda, potenzialità degli acquiferi sotterranei e problemi della subsidenza nella prospettiva dell'uso integrato delle risorse idriche in Romagna*. Romagna Acque, Forlì.
- Boccalaro F., 2009. *SOS Dune – Buone pratiche per gli interventi di difesa ambientale delle dune costiere*.
- Bondesan M., Favero V., Viñals M. J., 1995a. *New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene*. Quaternary International Vol 29/30: 105-110.
- Bondesan M., Castiglioni G. B., Elmi C., Gabbianelli G., Marocco R., Pirazzoli P. A., Tomasin A., 1995b. *Coastal areas at risk from storm surges and sea level rise in north-eastern Italy*: Journal of Coastal Research 11: 1354-1379.
- Bulter D. K., 2005. *Near-surface Geophysics*. SEG Investigations in geophysics series; n°13, Library of congress ; pp.: 46.
- Burger D. C. and Burger H. R., 1992a. *Macintosh Computer Programs to accompany Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*. Prentice-Hall, 9 Macintosh computer programs and 48 spreadsheet templates.
- Burger H. R., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface*. Prentice Hall pp.: 291-295.
- Calastri A., Cervi O., Spagnesi M., Stinchi E., 1976. *Contributo alla conoscenza dell'Oasi faunistica di Punta Alberete (RA)*. Scritti in memoria di Augusto Toschi, suppl. Ric. Biol. Selvaggina, VII, pp.: 121-153.
- Calatace N., Fratini M., Guerra M., Pascarella F., Zampetti F., 2007. *Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati*. APAT – Manuali e linee guida 43/2006.
- Capaccioni B., Didero M., Paletta C., Didero L., 2005. *Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwater*. J Hydrol 307:1-16.
- Carbognin L., Tosi L., 1995. *Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland (Italy)*. In: Land subsidence. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.: 129-137.
- Carbognin L., Tosi L., 2003. *Il progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di Padova e Venezia*. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Consiglio Nazionale delle Ricerche Venezia; ISES 2003 pp.: 32.
- Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., 1984. *Case history no. 9.15: Ravenna, Italy*. In: Poland JF (ed) *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO, Paris, 291-305.
- Carminati E., Dogliosi C., Scrocca D., 2005. *Magnitude and causes of natural subsidence of Venice*. In: Fletcher C Spencer T (eds) *Flooding and environmental challenges for Venice and its lagoon*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.: 21-28.

- Carminati E., Martinelli G., 2002. *Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation*. Engineering Geology n.66, 241-255.
- Cau P., Lecca G., Muscas, Barrocu G., Uras G., 2002. *Saltwater intrusion in the plain of Oristano (Sardinia)*. 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6-10 May 2002, pp.: 435-444.
- Celico P., 1998. *Prospezioni Idrogeologiche*. Vol I, Liguori editore, V° ristampa 1998 pp.: 243.
- Ciavola P., Armaroli C., Chiggiato J., Valentini A., Deserti M., Perini L., Luciani P., 2007. *Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy)*: Journal of coastal research SI 50: 540-544.
- Ciavola P., Armaroli C., Perini L., Luciani P., 2008. *Evaluation of maximum storm wave run-up and surges along the Emilia-Romagna coastline (NE Italy): A step towards a risk zonation in support of local CZM strategies*. In: Integrated Coastal Zone Management (ICZM) - the global challenge, pp.: 505-516. Singapore: Research Publishing Services.
- Cimino A., Cosentino C., Oieni A., Tranchina L., 2007. *A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquedolci coastal aquifer (Northern Sicily)*. Environ Geol 55: 1473-1482.
- CNR & Comune di Ravenna, 1994. *Influenza della subsidenza sul "trend" evolutivo della fascia costiera ravennate*. C.N.R.
- Collins W. H., Easley D. H., 1999. *Freshwater Lens Formation in an unconfined barrier island aquifer*. Journal Am. Water Resour. Assoc., 35: 1-2.
- Cooper H. H. Jr., 1959. *A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer*. Journal of Geophysical Research 64: 461-67.
- Corrao M., 2006. *Geofisica applicata elementi di geosismica e geoelettrica*. Dario Flaccovio Editore. Capitolo 6 pp.: 107-122.
- Correggiari A., Roveri M., Trincardi F., 1996. *Late-Pleistocene and Holocene evolution of the north Adriatic sea. Late-Glacial and early Holocene climatic and environmental changes in Italy*. Il Quaternario: Italian Journal of Quaternary Sciences 9 : 697-704.
- Corticelli S., 2003. *Carta dell'uso del suolo (Land Use Map)*. Copertura Vettoriale. Stampata Dalla Regione Emilia Romagna, Italy.
- Curzi P., Dinelli E., Ricci Lucchi M., Vaiani S.C., 2006. *Palaeoenvironmental control on sediment composition and provenance in the late Quaternary deltaic successions: a case study from the Po delta area (Northern Italy)*. Geological Journal 41: 591-612, DOI: 10.1002/gj.1060.
- Custodio E., 2010. *Coastal Aquifers Of Europe: An Overview*. Hydrogeology Journal, 18(1): 269-280 DOI: 10.1007/S10040-009-0496-1.
- Dahlin T. and Loke, M. H., 1998. *Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling*. Journal of Applied Geophysics, 38: 237-249.
- Daniels F. and Alberty R. A., 1966. *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.

- De Breauck W., 1991. *Hydrogeology of Salt Water Intrusion*. Vol. 11 of International contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, Hannover, Germany.
- De Luca A., Preziosi E., Giuliano G., Mastroianni D., Falconi F., 2005. *First evaluation of the saltwater intrusion in the Tiber delta area (Rome, central Italy)*. 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May-3 June 2004, pp.:34.
- Degroot-Hedlin C., Constable S., 1990. *Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data*. *Geophysics*, 55: 1613-1624.
- Dillon P., 2005. *Future management of aquifer recharge*. *Hydrogeology journal* 13: 313-316, DOI 10.1007/s10040-004-0413-6.
- Dupuit J., 1863. *Estudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables (Second Edition ed.)*. Dunod Paris.
- Edwards L.S., 1977. *A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization*. *Geophysics*, 42: 1020-1036.
- FAO, 2002. *Agricultural Drainage Water Management In Arid And Semi-Arid Areas* [Ftp://Ftp.Fao.Org/Docrep/Fao/005/Y4263e/Y4263e11.Pdf](ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/Y4263e/Y4263e11.pdf)
- Fetter C. W., 1972. *Position of the saline water interface beneath oceanic islands*. *Water Resour Res* 8: 1307-1315.
- Fetter C. W., 2001. *Applied Hydrogeology*. Ed. Prentice Hall, Fourth Edition; pp.:691.
- Finkl C. W., 1994. *Coastal hazards, perception, susceptibility and mitigation*. *Journal of Coastal Research* SI 12.
- Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J. and Rijo, L., 1980. *Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys*. *Geophysics*, 45: 75-93.
- Gabbianelli G., Antonellini M., 2009. *Foce Bevano: l'area naturale e protetta e l'intervento di salvaguardia*. Assessorato alla sicurezza territoriale difesa del suolo e della costa protezione civile. Centro stampa della Regione Emilia-Romagna.
- Gambolati G., Ricceri G., Bertoni W., Brighenti G., Vuillermin E., 1991. *Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna*. *Water Resour. Res.* 27: 2899-2918.
- Gambolati G., Teatini P., 1998. *Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin*. Gambolati G. (ed) CENAS, Coastal evolution of the upper Adriatic sea due to sea level rise and natural and anthropogenic land subsidence. Kluwer Academic Publishing, Water Science & Technology Library n° 28: 103-131.
- Giambastiani B. M. S., Antonellini M., Oude Essink G. H. P., Stuurman R. J., 2007. *Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model*. *Journal of Hydrology* 340: 94-104.
- GNRAC, 2006. *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri n° 10.
- Griffiths D. H., Barker R. D., 1993. *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology*. *Journal of Applied Geophysics*, 29: 211-226.

- Griffiths D. H., Turnbull J., Olayinka A. I. 1990, *Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array*. First Break 8: 121-129.
- Griffiths, D. H., Turnbull, J., 1985. *A multi-electrode array for resistivity surveying*. First Break 3, n° 7: 16-20.
- Hamzah U., Rahim S., Malim E., 2006. *Groundwater investigation in Kuala Selangor using vertical electrical sounding (VES) surveys*. Environ Geol 51: 1349-1359.
- Harris W. H., 1967. *Stratification of fresh and saltwater on barrier islands as a result of differences in sediment permeability*. Water Resour. Res. 3: 89-97.
- Herzberg A., 1901. *Die Wasserversorgung einiger Nordseebaeder [The water supply of selected North Sea towns]*. Z F Gasbeleucht Wasserversorg 44: 815-844.
- Hubbert M.K., 1940. *The theory of ground-water motion*. Journal of Geology 48: 785-944.
- Jaeger, 1972. *Rock Mechanics and Engineering*, Barla.
- Keller G. V., Frischknecht F. C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Kunetz G., 1966. *Principles of direct current resistivity prospecting*. Geoexploration monographs, Gebruder-Borntraeger, Berlin. pp.:103.
- Loke M. H., Barker R. D., 1996a. *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44: 131-152.
- Loke, M. H., Barker, R. D., 1996b. *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical Prospecting, 44: 499-523.
- Loke, M. H., 1994. *The inversion of two-dimensional resistivity data*. Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.
- Loke, M. H., 2000. *Topographic modelling in resistivity imaging inversion*. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M. H., 2001. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomo Software, Malaysia.
- Louw, P. G. B., De, Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J., Baaren, E. S., Van and G. H. P. OUDE ESSINK., 2011. *Shallow Rainwater Lenses In Deltaic Areas With Saline Seepage*, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 8: 7657-7707.
- Luppis A., 1940. *Proposta di una nuova inalveazione del fiume Lamone con immissione nel Reno presso la Torre di Primaro*. Ann. Lavori Pubblici, n° 78, pp.: 1005-1018.
- Maas K., 2007. *Influence of climate change on a Ghyben-Herzberg lens*. Journal of hydrology, 347: 223-228.
- Marchesini L., Amorosi A., Cibin U., Zuffa G. G., Spadafora E., Preti D., 2000. *Sand composition and sedimentary evolution of a late Quaternary depositional sequence, Northwestern Adriatic Coast, Italy*. Journal of Sedimentary Research 70 (4): 829-838.
- Marconi V., Antonellini M., Balugani E., Dinelli E., 2011 *Hydrogeochemical Characterization Of Small Coastal Wetlands And Forests In The Southern Po Plain (Northern Italy)*. Ecohydrol. Vol.4, 597-607.
- Ministero dell'Ambiente, 1997. *Relazione sullo stato dell'ambiente*. Poligrafico dello Stato.

- Mollema P. N., Antonellini A., Gabbianelli G., Galloni E., 2011. *Water Budget Management of a Coastal Pine Forest in a Mediterranean Catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy)*. Submitted manuscript.
- Mollema P. N., Antonellini M., Gabbianelli G. and Laghi M., 2010. *The Influence of Surface Water Evaporation on Salt Water Intrusion in Ravenna, Italy*. Implications for Climate Change. In: Proceedings of the Salt Water Intrusion Meeting, Sao Miguel, Azores, June 2010.
- Mollema P., Antonellini A., Dinelli E., Gabbianelli G., Greggio N., Stuyfzand P. J., 2012b. *Identification Of Fresh And Salt Water Intrusion Types In The Upper Ravenna Coastal Aquifer (Italy)*. Via Hydrochemical Systems Analysis. Submitted to Applied Geochemistry.
- Montanari, 2009. Foce Bevano - Le Problematiche idrauliche e ambientali.
- Musset, 2003. *Esplorazione del sottosuolo una introduzione alla geofisica applicata*. Zanichelli. Parte I, Sezione 1.5, Capitolo 12, 13, 14, pp.: 168-216.
- Norinelli A., 1982. *Elementi di geofisica applicata*. Pàtron Editore. Introduzione pp.: 7-10; Capitolo IV pp.: 193-227.
- Pazdirek, O., Blaha, V., 1996. *Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system*. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam.
- Pignone R., Cibin U., Severi P., 2007. "La subsidenza in Emilia Romagna".
- Post V., 2005. *Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead?* Hydrogeol J 13: 120-123.
- Pranzini E., 2004. *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*.
- Pranzini G., 2002. *Groundwater salinization in Versilia (Italy)*. 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6-10 May 2002, pp.: 412-421.
- Press F., Siever R., 1997. *Capire la Terra*, Zanichelli.
- Preti M., 2000. *Eustatismo, subsidenza e linee di intervento per la difesa del territorio costiero in Emilia-Romagna: Mare e cambiamenti globali*. ICRAM, ARPA – Ingegneria Ambientale, Bologna, 167-179.
- Regione Emilia Romagna & Eni-Agip, 1998. *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. Bologna.
- Regione Emilia-Romagna, 2009. *Servizio Difesa del suolo, della costa e bonifica*.
- Regione Emilia-Romagna, 2005. *Piano di tutela delle acque. Relazione generale comprensiva del quadro conoscitivo, Regione Emilia-Romagna*, Arpa – Ingegneria Ambientale.
- Rizzini A., 1974. *Holocene sedimentary cycle and heavy-mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy*. Sedimentary geology 11 (1): 17-37.
- Sasaki, Y., 1992. *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*. Geophysical Prospecting, 40: 453-464.

- Scheidleger A., Grath J., Lindinger H., 2004. *Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation EEA inventory throughout Europe*. In: 18th Saltwater Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May-3 June 2004, pp.: 125.
- Schneider J. C., Kruse S. E., 2005. *Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier Islands*. Dog Island and St. George Island, Florida, USA: Hydrogeol J 14: 131-145.
- Schot P. P., Dekker S. C., Poot A., 2004. *The dynamic form of rainwater lenses in drained fens*. Journal of Hydrology 293: 74-84.
- Selli R., Ciabatti M., 1977. *L'abbassamento del suolo della zona litoranea ravennate*, Giornale di geologia, 42/1, Bologna: 1-47.
- Sestini G., 1992. *Implication of climatic changes for the Po Delta and Venice lagoon*, in: Climatic Change and the Mediterranean, 429-491.
- Simeoni U., Del Grande C., Gabbianelli G., 2003. *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi costieri 7: 81-93.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C., Corbau C., 2006. *Le dune costiere dell'EmiliaRomagna*. Studi Costieri n° 11.
- Simmons D. L., 1986. *Geohydrology and ground-water quality on Shelter Island*. Suffolk County, New York, 1983-84: US Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 85-4165.
- Stefani M, Vincenzi S., 2005. *The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system*: Marine Geology 222/223: 19-48.
- Stuyfzand P. J., 1993. *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands*. Ph.D. Thesis Free Univ. Amsterdam, publ. by KIWA ltd. Research and Consultancy Nieuwegein The Netherlands. ISBN 90-74741-01-0 366 pp.
- Stuyfzand, P.J., Bruggeman G.A., 1994. *Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes*. Proc. 13th Salt Water Intrusion Meeting, June 1994, Cagliari Italy. pp.:15.
- Song S.H., Lee J.Y., Park N. 2007. *Use of vertical electrical soundings to delineate seawater intrusion in a coastal area of Byunsan, Korea*. Environ Geol 52: 1207-1219.
- Sytnik O., Stecchi F., 2014. *Disappearing coastal dunes: tourism development and future challenges, a case of study from Ravenna, Italy*. Journal of Coastal Conservation, pp.: 1-13.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bertoni W., Gonella M., 2005a. *A century of land subsidence in Ravenna, Italy*. Environ. Geol, 47: 831-846.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Gonella M., 2006. *Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: modeling the past occurrence and the future trend*. Water Resour Res 42:1-19.
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Wegmüller, U., Rizzetto, F., 2005b. *Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system*. Remote Sensing of Environment (98) 403-413.

- Todd D. K., 1953. *Sea-water intrusion in coastal aquifers*. Am. Geophys. Union Trans. 34 (5): 749-754.
- Tong, L. and Yang, C., 1990. *Incorporation of topography into twodimensional resistivity inversion*. Geophysics, 55: 354-361.
- Toth G., Montanarella L., Rusco E., 2008. *Updated Map Of Salt Affected Soils In The European Union*. Threats To Soil Quality In Europe, Office For Official Publications Of The European Communities, Luxembourg, pp.: 61-74.
- Ulazzi E., Antonellini M. and Gabbianelli G., 2008. *Saltwater Intrusion in a Unconfined Coastal Aquifer: The Case Study of Cervia (North Adriatic Sea, Italy)*. P. Meire et al (eds), *Integreted Water Management: Practical Experience and case studies*, 295-308.
- United Nations Commission for Sustainable Development (UNCSD), 1999. *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*. UN Division for Sustainable Development, New York.
- Veggiani A., 1974. *Le ultime vicende geologiche del Ravennate*. In: *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale*. Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna. Ed. Compositori, Bologna, 48-58.
- Venturini S., 1996. *Dati preliminari sulla stratigrafia e sulla subsidenza naturale nel Quaternario dell'area Ravennate e Veneziana*, T.R., AGIP DIRA/GERA, Marina di Ravenna.
- Water Framework Directive 2000/60/CE del 23 ottobre 2000. Official Journal of the European Communities, L327,22 December 2000, pp.: 1-72.
- Zambrini R., 2007. *Studio sull'intrusione salina nell'area costiera romagnola*. Centro Interdisciplinare di Ricerca per le Scienze Ambientali (C.I.R.S.A.).
- Zinoni F., Marletto V., Botarelli L., Alessandrini C., Spisni A., 2004. *Siccità e desertificazione: uno studio nella valle del fiume Lamone*. ARPA Rivista 5: 38-39.

SITOGRAFIA

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/parchi-natura2000/rete-natura-2000/siti/it4070009>

<http://www.ambiente.regione.emilia-romagna.it>

<http://www.arpa.emr.it>

<http://www.goelectrical.com/> (Manuale Res2Dinv versione 3.58.27 Geotomo)

<http://www.minambiente.it/pagina/direttiva-habitat>

<http://www.pasigeophysics.com>

<http://www.pasisrl.it/> (Manuale PASI 16G-N_IT_rev1)

http://www.vegetazionecostiera.it/5_Vegetazione%20psammofila.htm

8 ALLEGATI

8.1 Approfondimento del funzionamento del software adoperato dallo strumento PASI

Caratteristiche principali di questo tipo di strumento sono:

- soppressione automatica dei potenziali spontanei;
- visualizzazione di tutte le acquisizioni memorizzate (ordinate per ora e data);
- Autoranging automatico per la corrente e la tensione;
- calcolo automatico del Coefficiente Geometrico (K);
- procedure di test automatico per verificare la funzionalità ottimale dei Link-Box 1 e 2 (Test Link Box), da effettuare prima di ogni campagna di misura;
- gestione dell'energizzazione e dell'inversione di polarità dall'unità centrale;
- procedura di verifica automatica di connessione con i picchetti (Test Coupling);
- progettazione dell'onda di energizzazione;
- visualizzazione GTDT (Ground Time Domain Test) per una corretta programmazione dell'onda di energizzazione;
- visualizzazione di una pseudosezione in modalità lineare e logaritmica;
- scaricamento dati dal PC utilizzando una porta USB;
- monitoraggio continuo di batteria e temperatura interna;
- metodo del ROLL-ALONG si usa per la realizzazione di profili continui con un minimo di 32 elettrodi. Utilizzando questa opzione è possibile realizzare dei lunghi stendimenti, pur possedendo un numero limitato di elettrodi. L'intero stendimento viene suddiviso in un certo numero di passi necessari per ricoprire la distanza desiderata. Al termine di ogni passo, si spegne lo strumento e si spostano gli elettrodi (16) in avanti e si esegue l'acquisizione relativa al passo successivo. Una volta eseguiti tutti i passi necessari e tutte le singole acquisizioni di ciascun passo, esse verranno ricomposte in fase di elaborazione (CONCATENATE) dando origine ad un

unico file di acquisizione. La situazione di partenza è la seguente (Figura 76):

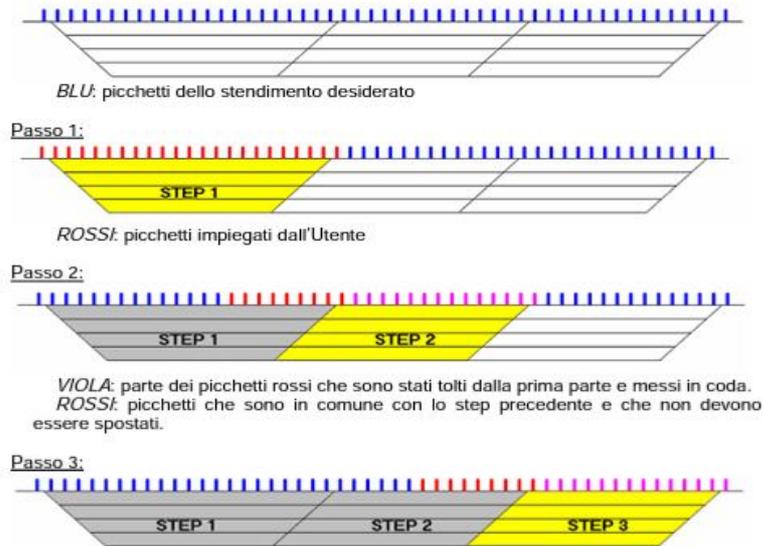


Figura 76. Metodo del Roll-along

Maggiore sarà il numero di livelli richiesti (profondità indagata), minore sarà il numero dei picchetti spostati in avanti (viola) per ogni step (quindi ci sono più elettrodi sovrapposti, comuni o non spostati con il passo precedente). Come risultato otteniamo dei trapezi di dati che sarebbero incompleti nel caso in cui non avessimo un minimo di sovrapposizione per questo il numero di passi necessari per coprire la distanza voluta sarà maggiore.

8.2 Approfondimento del software RES2DINV e suo funzionamento

L'indagine si effettua principalmente con un sistema nel quale gli elettrodi sono disposti lungo una linea, il più retta possibile, con una distanza costante tra elettrodi adiacenti (più il passo di campionatura è minore, migliore sarà la ricostruzione del profilo, maggiore risoluzione ma minore profondità indagata). Tuttavia, il programma può anche gestire un insieme di dati con una distanza tra gli elettrodi non uniforme. Oltre alle normali indagini effettuate con gli elettrodi sulla superficie del terreno, è probabilmente il primo, e finora l'unico, programma che supporta anche le indagini subacquee e in pozzi. Oltre al programma adoperato per questa tesi esiste anche un altro programma di modellizzazione

2D in versione gratuita che si chiama RES2MOD. Questo però è stato scartato perchè non permetteva un'adeguata manipolazione dei dati.

8.3 Procedura di avvio e settaggio PASI per i rilievi geoelettrici

In campagna si eseguono le seguenti operazioni tra cui:

- l'osservazione dell'area in cui si vorrebbe fare il sondaggio geoeletttrico (controllando che non vi siano degli ostacoli), si procede con lo srotolamento della cordella metrica e si piantano gli elettrodi nel suolo alla distanza predefinita;
- si organizza lo stendimento posizionando gli strumenti (Computer da campo PASI, energizzatore, due Link Box e batteria ricaricabile) al centro dell'area di sondaggio (avendo così 16 elettrodi a sinistra e 16 a destra);
- si effettuano tutti i collegamenti schematizzati in Figura 77 e si esegue l'acquisizione geoeletttrica dei dati.

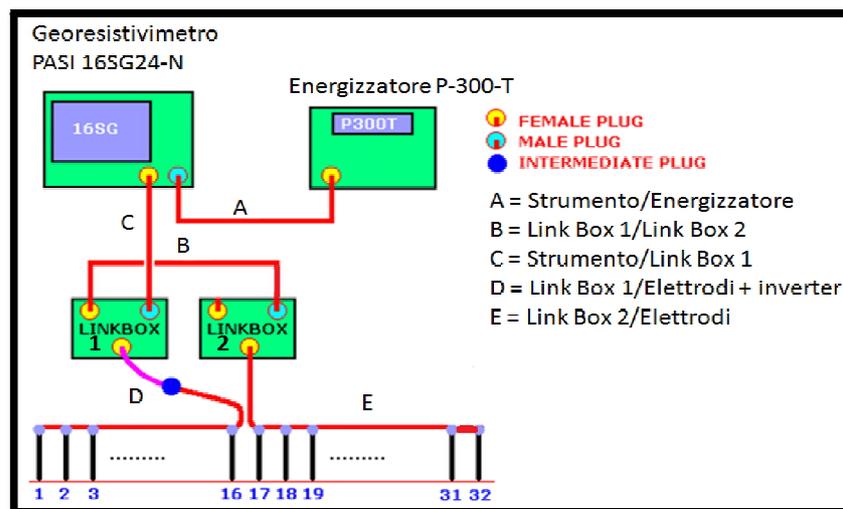


Figura 77. Schematizzazione della disposizione al suolo dello strumento e dei collegamenti necessari per il funzionamento

Precauzioni per effettuare un buon sondaggio:

- pianificare lo stendimento prima di uscire in campagna, così da valutare quale configurazione sia la migliore, perfezionandola in fase di prova o perchè si è a conoscenza delle caratteristiche del sito (profondità di investigazione) o quelle del target che si intende studiare;
- prima di muovere un picchetto, accertarsi che l'energizzatore sia spento, per l'elevato rischio di scosse elettriche anche mortali, è fortemente consigliato l'uso di guanti e di scarpe antinfortunistiche isolanti;

- bagnare gli elettrodi con acqua salata se siamo in presenza di sabbia per migliorare così l'accoppiamento elettrodo-suolo (eliminando la resistenza di contatto). Si ricorda che l'acqua salata è meno resistiva ma più conduttiva rispetto a quella dolce, questo perchè ha un maggior contenuto di sali disciolti che fungono da portatori di carica;
- fare molta attenzione quando si fanno i collegamenti (elettrodi/morsetti e morsetti/cavi). Pulire bene le connessioni se sono presenti dei granuli di materiale come sabbia, erba (la presenza di erba secca potrebbe sviluppare degli incendi) o sporcizia varia, sfregare su e giù i morsetti così da eliminare l'eventuale patina di ossidazione che può essersi formata durante i precedenti utilizzi. Queste operazioni sono importanti perchè se non vengono eseguite potrebbero causare un accoppiamento non ottimale tra elettrodo e morsetti (Figura 78);

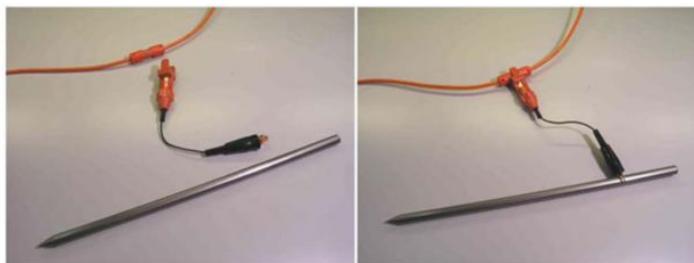


Figura 78. Corretto collegamento tra elettrodi e cavi elettrici

- prestare attenzione ad animali eventualmente presenti nell'area di energizzazione: questi potrebbero ricevere scosse elettriche e manifestare turbe del loro comportamento;
- in caso di acqua di falda affiorante o subaffiorante si devono prelevare alcuni campioni di acqua per la definizione della conducibilità;
- accertarsi che la polarità dei morsetti sulla batteria sia corretta (rosso sul + e nero sul -) e che la batteria sia carica (la cui tensione superi i 10.5 V);
- accendere lo strumento solo dopo aver collegato i cavi dei Link Box e dell'energizzatore;

leggere almeno una volta l'intero manuale e, in caso di problemi, evitare l'improvvisazione!

Questi semplici provvedimenti, servono ad eliminare possibili danni e consentono di ottenere un miglior rendimento diagnostico.

8.3.1 Procedura di settaggio dello strumento PASI

Per ogni sondaggio geoelettrico eseguito, sono stati effettuati tutti i passaggi (settaggi) che seguono.

IL MENU PRINCIPALE:

Dopo aver collegato il computer con la batteria si accende l'interruttore principale, dopo alcuni secondi comparirà il menù principale (Figura 79).

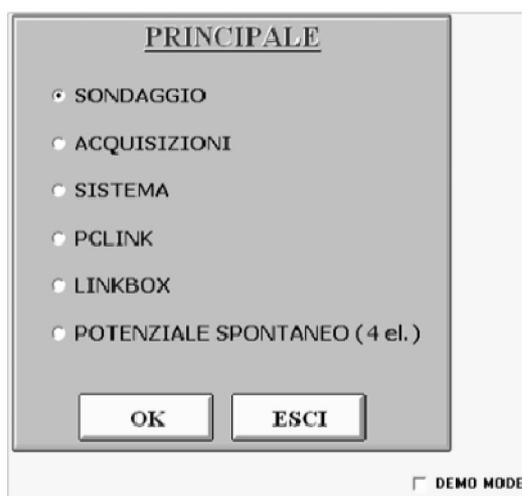


Figura 79. Menù PRINCIPALE

LINKBOX:

All'interno di questa funzione vi sono due tipi di test importantissimi che vanno eseguiti prima di iniziare l'acquisizione:

- **TEST**, determina eventuali problemi all'interno dei Link Box e viene fatto per sicurezza all'inizio di ogni campagna di misura. Viene collegando un Link Box alla volta con il normale connettore al computer (facendo attenzione che non siano collegati i picchetti), prima il Link Box 1 e successivamente il Link Box 2. Il ciclo di diagnostica dura circa 2 minuti, durante i quali lo strumento effettua un test completo dei componenti elettromeccanici presenti all'interno del Link Box. Durante il test viene visualizzata la percentuale di elaborazione (barra progressiva) raggiunta fino a quel momento. Una volta che il test è stato passato si procede con il test successivo.

- **TEST COUPLING**, permette di verificare il corretto accoppiamento dei picchetti nella catena di misura (Coupling). Viene quindi controllata la continuità elettrica dei collegamenti picchetto/terreno, connettore/picchetto e connettore/Link Box. Se qualcosa è scollegato appare un messaggio che ci restituirà il numero dei picchetti non collegati correttamente. In questo caso si procede a ripetere nuovamente il test. Il metodo per determinare la continuità elettrica si basa sul passaggio forzato di corrente nel terreno con determinate configurazioni dell'elettrodo: se il flusso è inferiore ad un dato valore di progetto, il picchetto viene considerato scollegato. Se il picchetto viene considerato scollegato, potrebbe esserlo realmente o potrebbe trattarsi un falso contatto tra il morsetto ed il cavo dei picchetti. In alcuni casi potrebbe essere dovuto al terreno troppo asciutto nei pressi dell'elettrodo, si consiglia perciò di "annaffiare" la zona di infissione.

Un messaggio al termine di queste procedure di verifica ci informa se è stato passato oppure no il test effettuato. Una volta che sono stati superati entrambi i test è possibile far iniziare il sondaggio con la configurazione prescelta.

SONDAGGIO:

Si clicca su SONDAGGIO e si seleziona il tipo di stendimento che si vuole effettuare, nel nostro caso si esegue una "Tomografia Geoelettrica" con configurazione Wenner, in cui si misura la Resistività (Figura 80).



Figura 80. Schermata di SONDAGGIO

PROGETTAZIONE ONDA DI ENERGIZZAZIONE:

Prima di procedere con il sondaggio occorre progettare l'onda di energizzazione. Se si desidera modificare i valori predefiniti, si clicca ONDA nel menù principale. Per il tipo di acquisizione della resistività apparente, la misurazione rispetto all'onda di energizzazione avverrà secondo il grafico seguente (Figura 81).

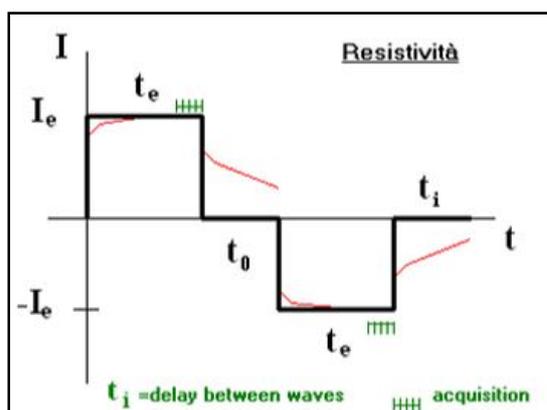


Figura 81. Grafico dell'ONDA di energizzazione

I parametri per il progetto dell'onda di energizzazione sono i seguenti (Tabella 12):

Tabella 12. Parametri per la progettazione dell'onda di energizzazione

DESCRIZIONE	MINIMO	MASSIMO	PREDEFINITO	UTILIZZATI NEL PRESENTE STUDIO
T0=TEMPO DI OFF	0.50 s	10 s	0.50 s	0.75 s
Te=TEMPO DI ON	0.25 s	25 s	1.00 s	0.50 s
Ti=TEMPO DI INTERCICLO	1.00 s	100 s	1.00 s	1.00 s
NUMERO DI MISURE CICLO	10	100	13	13
NUMERO DI CICLI	1	50	1	1
CORRENTE	50 mA	500 mA	50 mA	50 mA

L'energizzatore è un generatore di corrente. La quantità di corrente erogata non è necessariamente quella impostata ma dipende dalla resistenza del terreno. Il prodotto tra la resistenza del terreno e la corrente non può superare i 300 Volt. Il valore di corrente impostato deve essere ragionato in funzione della presunta resistività del terreno e dell'autonomia dell'energizzatore. Il valore preimpostato è pari a 50 mA. Qualora i valori di tensione V che vengono via via visualizzati durante l'acquisizione fossero inferiori a 5-6 mV, è consigliabile interrompere immediatamente la sessione di misura e ricominciarla impostando un valore di

corrente più elevato. Nel caso della modalità di acquisizione automatica, utilizzata da questo studio, le misure per le quali lo strumento ha rilevato una rumorosità troppo elevate vengono evidenziate su uno sfondo giallo; in questo modo è possibile ripeterle successivamente impostando un valore di corrente adeguato.

GTDT (Ground Round Time Domain Test):

Nel menù ONDA è possibile fare il test GTDT (Ground Round Time Domain Test), questa è una funzione molto potente che permette di valutare con precisione i parametri di input dell'onda di energizzazione, soprattutto al fine di ottimizzare le risorse di alimentazione. Infatti quando si impostano i tempi di energizzazione, in genere si fa solo un ipotesi di come potrebbe reagire il terreno, senza poterne effettivamente valutare il comportamento reale. Il terreno risponde elettricamente con tempi di salita e discesa variabili e l'acquisizione deve essere fatta solo dopo che l'onda si è stabilizzata, cioè al termine del transitorio. Una cattiva impostazione del tempo di energizzazione, può far avvenire l'acquisizione quando l'onda non è ancora stabilizzata o, nel caso opposto, può aumentare inutilmente il tempo di lavoro con conseguente diminuzione dell'autonomia elettrica della strumentazione.

In questo test GTDT, si scelgono i picchetti campione dello stendimento, la corrente ed il numero di misure per ciclo impostati. Viene effettuata un'energizzazione di 2" ed un'acquisizione dell'intera onda positiva, che è visualizzata in un grafico. Il grafico ha grigliatura verticale a distanza di 50 ms, mentre l'ampiezza è normalizzata. L'onda verde rappresenta la tensione, mentre gli istanti d'inizio e fine energizzazione sono indicati con un tratto verticale giallo (Figura 82).

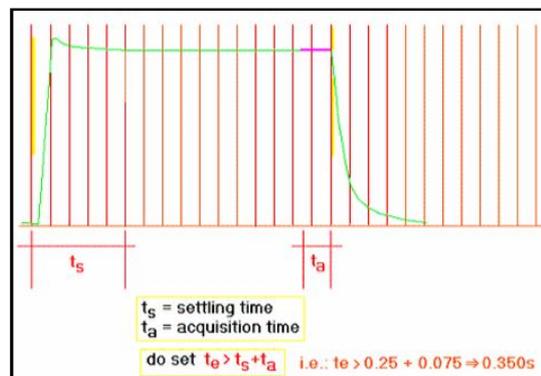


Figura 82. Onda visualizzata dal Test GTDT

Il tempo t_e deve essere sufficientemente lungo per accogliere il transitorio iniziale (tratto che va dalla linea gialla verticale allo stato di onda stabile) ed il tempo di acquisizione (indicato in viola). In Figura 82, abbiamo che l'onda impiega circa 5 tratti per stabilizzarsi ($5 * 50\text{ms} = 250\text{ms}$) e un tratto e mezzo per l'acquisizione ($1.5 * 50\text{ms} = 75\text{ms}$), per cui il t_e dovrà essere almeno di 325ms (che approssimiamo a 350ms o più). Un tempo t_e superiore non danneggerà certamente l'acquisizione, ma non sarà necessario. Per un corretto uso di questa funzione si consiglia di valutare t_e solo dopo aver fatto qualche acquisizione campione (premendo il pulsante TEST) in zone diverse dello stendimento e con varie spaziature. Il terreno può avere comportamenti differenti da punto a punto e il t_e deve essere calcolato sull'acquisizione più svantaggiosa. Esaminando poi la rumorosità della forma d'onda, si può anche valutare se la corrente immessa è sufficiente.

METODI AUTOMATICI:

Mediante il metodo automatico, come detto in precedenza, non occorre spostare i picchetti dopo ogni acquisizione, ma è sufficiente disporli tutti sul terreno e collegarli con il suo apposito cavo multipolare, lo strumento, poi, effettuerà automaticamente tutte le combinazioni volute.

WENNER:

Nella figura seguente (Figura 83) è mostrato in maniera schematica il movimento degli elettrodi nel caso della configurazione di Wenner:

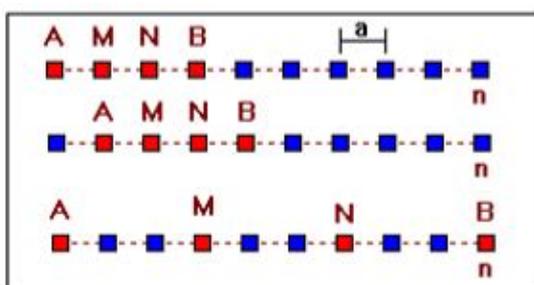


Figura 83. Visualizzazione dello stendimento Wenner

Sono richiesti i seguenti parametri di input (Tabella 13):

- numero di elettrodi;
- numero di livelli;
- distanza tra gli elettrodi.

Tabella 13. Parametri di input per l'acquisizione di tipo Wenner

DESCRIZIONE	MIN	MAX	PREDEFINITO	UTILIZZATI NEL PRESENTE STUDIO
Numero di elettrodi	4	464	16	32
Numero di livelli	1	**	1	8
Distanza elettrodi (<i>a</i>)	0.10 m	100 m	1 m	1 m e 0.50 m

Nello specifico di questo caso di studio: il numero di elettrodi usati è sempre stato 32 e il numero di livelli è stato 8, mentre per la distanza tra gli elettrodi (*a*) abbiamo usato la spaziatura di 1 metro per quasi tutti i transetti eccetto uno in cui abbiamo usato 0.5 metri.

I livelli rappresentano la distanza tra A, M, N, B e pertanto condizionano la profondità d'investigazione del sondaggio. Impostando un numero di livelli inferiore diminuisce il numero totale di letture da eseguire.

L'intera sessione di misura può essere seguita tramite una simulazione animata, sullo schermo vengono disegnati gli elettrodi rappresentati simbolicamente da cerchi numerati (Figura 84). I cerchi rossi rappresentano gli elettrodi attivi in quel momento, cioè quelli coinvolti nella misura in un dato istante, mentre i cerchi blu rappresentano gli elettrodi inattivi. Dopo ogni misura le etichette A, M, N, B, si posizioneranno sugli elettrodi successivi che diventeranno a loro volta attivi.

Dopo ogni misura nella griglia di acquisizione vengono inseriti:

1. Tensione espressa in Volt e in notazione esponenziale;
2. Corrente espressa in mA con 3 cifre decimali (per apprezzare il μA);
3. Resistività espressa in ohm·m e in notazione esponenziale;
4. Potenziale spontaneo espresso in mV;
5. Posizione elettrodo A, B, M, N coinvolti nella misura;
6. Coefficiente geometrico (K).

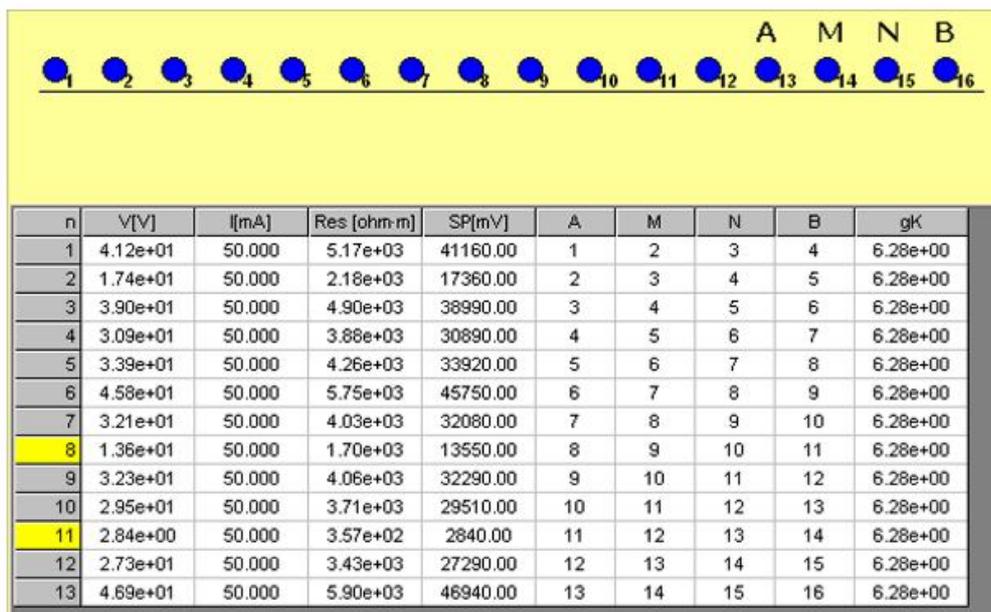


Figura 84. Esempio di sondaggio Wenner

In Figura 84 si vedono tutti i dati misurati riassunti in una tabella, dove la prima colonna (n) a seconda del colore dello sfondo ci dice che tipo di misura è stata acquisita. Se lo sfondo è grigio significa che i valori misurati sono ritenuti dallo strumento corretti. Mentre se lo sfondo è di colore giallo ci evidenzia che le misure si discostano molto dai valori che sono stati registrati nelle sue immediate vicinanze, a causa della rumorosità troppo elevata. Si consiglia di ripetere le misure evidenziate in giallo al termine della sessione di acquisizione e di impostare un valore di corrente adeguato, ricordando però che si riduce notevolmente la durata della batteria. Se il numero delle misure gialle viene ritenuto eccessivo si consiglia di sospendere l'acquisizione e di impostare un valore di corrente più elevato, in modo da migliorare il rapporto segnale – disturbo.

RIPETERE UNA MISURA:

È possibile ripetere una qualunque misura effettuata, occorre solo attendere la fine del sondaggio e cliccare il numero della riga che si intende ripetere. Il nuovo valore acquisito sostituirà il precedente nella griglia e nel file.

In qualunque momento della sessione di lavoro è possibile spegnere lo strumento e riprendere successivamente il sondaggio interrotto semplicemente richiamando l'acquisizione tramite l'opzione ACQUISIZIONI del menù principale.

L'operazione di richiamare un'acquisizione iniziata in precedenza, non permette però più di modificare i valori d'ingresso e i parametri relativi all'onda di energizzazione.

RUMOROSITA' DELLE MISURE:

Una misura è costituita dalla media di n acquisizioni consecutive. Il numero delle acquisizioni viene settato dall'Utente come "Misure per ciclo" nella schermata di "Progetto onda di energizzazione", nel nostro caso $n = 13$.

Nel terreno, è noto, che i rumori possono essere di varia natura e intensità, per cui le acquisizioni possono esserne interessate in modo anche sostenuto, per questo motivo una misura è calcolata come la media di un certo numero di acquisizioni. Le acquisizioni componenti la media, dal canto loro, devono però non discostarsi troppo dalla media stessa, pena la perdita di attendibilità delle medesime. Per valutare l'entità del rumore, e quindi la bontà di una misura, si è provveduto pertanto a evidenziarle in giallo, nella griglia di acquisizione, la casella contenente il numero della misura che ha presentato un rumore oltre i limiti di sicurezza. L'operatore, in questo modo, può vedere direttamente già in campagna se sta facendo un buon lavoro o meno. In particolare visto che spesso il rumore può essere presente ad istanti alterni, a termine sessione si possono ripetere tutte le misure che sono state considerate non idonee confidando in un risultato migliore.

Per alcune misure, specie quelle d'intensità minore, la segnalazione di rumorosità potrebbe non essere eliminata nemmeno ripetendo la misura, si può procedere nel modo seguente:

- 1) ripetere la sola misura evidenziata a termine della sessione;
- 2) ripetere l'intera sessione impostando un maggior numero di misure per ciclo e/o di cicli;
- 3) accertarsi dell'esistenza di un buon contatto tra ciascun elettrodo ed il terreno; in caso di siccità può essere utile inumidire il terreno in cui è conficcato ogni picchetto;
- 4) ridurre la spaziatura tra gli elettrodi e/o il numero dei livelli impostati.

Qualche misura sporadica affetta da rumore deve comunque essere accettata, nella globalità delle misure.

ACQUISIZIONI:

Dall'opzione ACQUISIZIONI si possono visualizzare tutti i sondaggi memorizzati nello strumento, riprendere un sondaggio interrotto mantenendo tutti i parametri impostati durante la fase di inizializzazione (tali parametri non sono più modificabili) (Figura 85).

Nell'elenco ciascuna acquisizione è individuata tramite la data e l'ora in cui è avvenuta, più un'eventuale nota.



Figura 85. Schermata di ACQUISIZIONI

PC-LINK:

Questa funzione consente il trasferimento delle acquisizioni su chiave USB, si seleziona tramite doppio click l'acquisizione che si intende trasferire.

Si sceglie il tipo di formato di output (TEXT o PASI).

A ogni acquisizione viene attribuito un nome (PREFISSO) prima del trasferimento, seguito da un suffisso di 3 caratteri (ad esempio 001, 002, ecc).

Se la chiave USB è già inserita l'unità di destinazione viene automaticamente assegnata.

Se si vuole, il file può essere trasferito in una cartella specifica se questa è stata creata in precedenza sulla chiavetta USB.

BATTERIA:

Ogni 10 minuti circa viene automaticamente effettuato un test sulla batteria che controlla il livello di corrente rimanente. Ci sono due tipi di avvertimenti:

- "ultimi 30 minuti di autonomia"
- "batteria scarica", quando restano solo 2 minuti

Oltre questi avvisi si avrà lo scaricamento completo della batteria e quindi lo strumento si spegnerà.

Oltre allo strumento PASI va impostato anche l'energizzatore (Figura 86). Esso va messo in ON INT nell'area "Battery" e MANUAL nella zona di "Electrical Tomography" (dove ho il collegamento con il PC PASI), OFF per "Output H.V.".

Questo dispositivo è dotato di una batteria interna, quindi bisogna ricordarsi di ricaricarlo prima di ogni uscita in campagna.



Figura 86. Energizzatore

8.4 Procedura di settaggio per il software RES2DINV

Qui di seguito illustrerò nel dettaglio la procedura per il settaggio di RES2DINV che ho utilizzato per tutti i profili indagati.

Si inizia con il cliccare sull'icona (Figura 87) e si inserisce la chiavetta per poter passare dalla versione SemiDemo (di cui si possono utilizzare solo alcune funzioni), a quella completa.

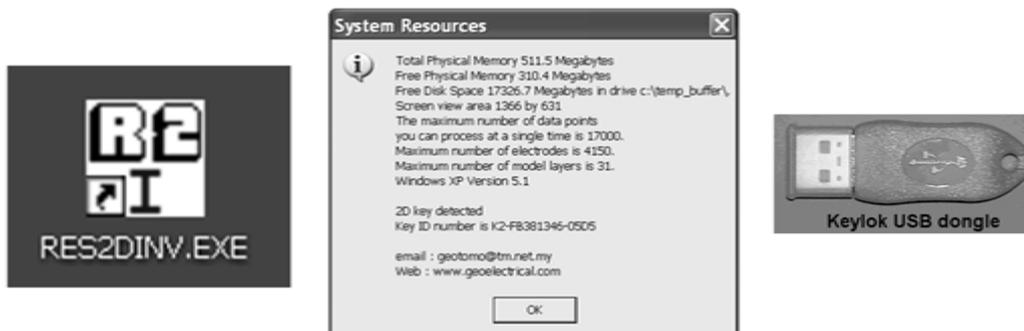


Figura 87. Icona RES2DINV e chiave USB per la versione completa

Si visualizza il menù principale dal quale si accede a tutte le opzioni del software (Figura 88).



Figura 88. Menù principale

Come prima cosa bisogna importare il file acquisito con lo strumento PASI. Si seleziona FILE, DATA IMPORT, IMPORT DATA IN PASI FORMAT (Figura 89). In questo modo viene modificata l'estensione del file da "nomefile.txt" a "nomefile.DAT".

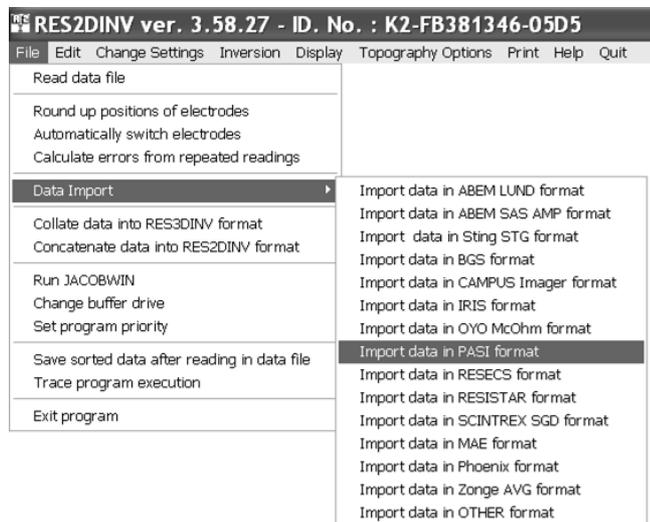


Figura 89. Data Import

Viene visualizzata una schermata in cui vengono elencati: il tipo di metodo usato (Wenner), la distanza tra gli elettrodi "a" (misurata in metri), data e ora di quando è stata eseguita l'acquisizione e di seguito la tabella con tutti i dati registrati (Figura 90).

a	b	m	n	V/I[ohm]	V[V]	I[A]	R[ohm*m]	SP[V]	NW	NI
1	4	2	3	5.66e+01	1.638e-01	0.002893	3.558e+02	-0.060	7.00e-04	1.73e-04
2	5	3	4	1.23e+02	3.506e-01	0.002861	7.690e+02	-0.144	5.46e-04	1.07e-04
3	6	4	5	1.02e+02	2.938e-01	0.002875	6.419e+02	-0.041	5.49e-04	8.27e-05
4	7	5	6	1.41e+02	4.021e-01	0.002843	8.888e+02	-0.137	6.19e-04	7.28e-05
5	8	6	7	1.43e+02	4.169e-01	0.002910	9.003e+02	-0.036	6.69e-04	1.15e-04
6	9	7	8	1.67e+02	4.785e-01	0.002873	1.047e+03	-0.066	5.37e-04	1.30e-04
7	10	8	9	1.64e+02	4.672e-01	0.002845	1.032e+03	-0.102	6.86e-04	1.17e-04
8	11	9	10	1.37e+02	3.927e-01	0.002870	8.596e+02	-0.005	6.03e-04	1.43e-04
9	12	10	11	1.74e+02	5.043e-01	0.002898	1.093e+03	-0.057	6.42e-04	1.36e-04
10	13	11	12	1.08e+02	3.069e-01	0.002850	6.766e+02	0.005	6.15e-04	8.75e-05
11	14	12	13	1.00e+02	2.923e-01	0.002915	6.302e+02	-0.097	5.19e-04	1.61e-04
12	15	13	14	8.42e+01	2.422e-01	0.002878	5.289e+02	-0.082	5.91e-04	9.37e-05
13	16	14	15	5.08e+01	1.449e-01	0.002853	3.191e+02	-0.056	5.76e-04	7.02e-05
14	17	15	16	4.66e+01	1.350e-01	0.002897	2.927e+02	0.006	6.76e-04	2.43e-04
15	18	16	17	3.01e+01	8.668e-02	0.002879	1.892e+02	-0.112	5.94e-04	9.53e-05
16	19	17	18	4.95e+01	1.430e-01	0.002891	3.107e+02	-0.111	6.27e-04	1.14e-04
17	20	18	19	5.78e+01	1.676e-01	0.002900	3.630e+02	-0.089	5.51e-04	1.56e-04
18	21	19	20	8.32e+01	2.424e-01	0.002913	5.228e+02	0.061	5.51e-04	1.18e-04
19	22	20	21	9.82e+01	2.802e-01	0.002852	6.173e+02	-0.104	5.25e-04	7.62e-05
20	23	21	22	1.06e+02	3.066e-01	0.002896	6.651e+02	-0.016	5.56e-04	9.18e-05
21	24	22	23	1.25e+02	3.592e-01	0.002881	7.834e+02	-0.047	6.03e-04	1.50e-04
22	25	23	24	1.26e+02	3.625e-01	0.002879	7.909e+02	-0.209	7.09e-04	8.54e-05
23	26	24	25	1.41e+02	4.008e-01	0.002846	8.848e+02	0.074	6.82e-04	7.86e-05
24	27	25	26	1.45e+02	4.256e-01	0.002935	9.111e+02	-0.078	4.74e-04	1.50e-04
25	28	26	27	1.62e+02	4.616e-01	0.002841	1.021e+03	-0.072	6.08e-04	1.07e-04
26	29	27	28	1.87e+02	5.454e-01	0.002922	1.173e+03	-0.033	5.80e-04	1.91e-04
27	30	28	29	1.76e+02	5.157e-01	0.002929	1.106e+03	-0.099	7.96e-04	2.21e-04
28	31	29	30	1.97e+02	5.706e-01	0.002903	1.235e+03	-0.039	5.43e-04	1.61e-04
29	32	30	31	1.97e+02	5.745e-01	0.002910	1.240e+03	-0.092	6.47e-04	1.24e-04
1	7	3	5	4.24e+01	1.228e-01	0.002900	5.322e+02	0.013	6.52e-04	1.17e-04
2	8	4	6	3.95e+01	1.134e-01	0.002873	4.959e+02	-0.011	6.10e-04	7.94e-05
3	9	5	7	4.54e+01	1.309e-01	0.002883	5.707e+02	-0.224	4.64e-04	1.08e-04
4	10	6	8	6.64e+01	1.887e-01	0.002843	8.339e+02	-0.225	4.80e-04	8.86e-05
5	11	7	9	5.01e+01	1.452e-01	0.002897	6.298e+02	-0.115	5.60e-04	1.24e-04
6	12	8	10	4.13e+01	1.183e-01	0.002867	5.187e+02	-0.040	6.74e-04	1.06e-04

Figura 90. Esempio di dati registrati in formato TXT

Una volta importato il file si procede con la lettura READ DATA FILE (Figura 91).

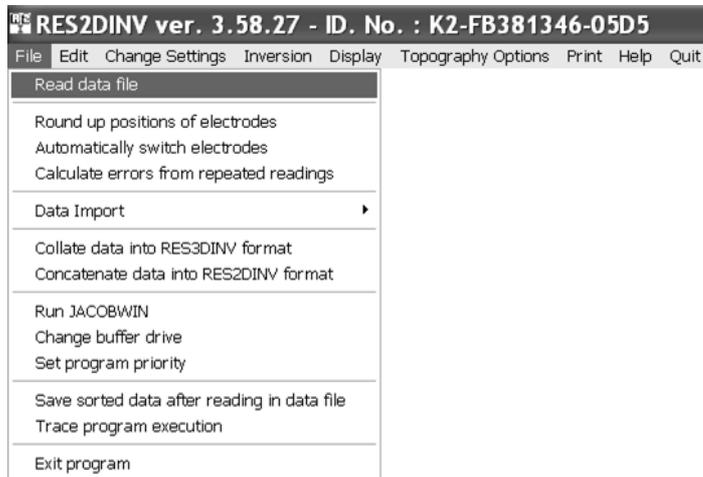


Figura 91. Read data file

Il file testo (.txt) viene modificato e otteniamo quello con estensione DAT (vedi Figura 92).

```

PASI survey WENNER 14/10/28-13:26:00
1.00
1
148
0
0
0.0000,1.00000,355.62799
1.00000,1.00000,772.83118
2.00000,1.00000,640.88440
3.00000,1.00000,885.92841
4.00000,1.00000,898.49475
5.00000,1.00000,1049.29114
6.00000,1.00000,1030.44153
7.00000,1.00000,860.79572
8.00000,1.00000,1093.27332
9.00000,1.00000,678.58350
10.00000,1.00000,628.31799
11.00000,1.00000,529.04376
12.00000,1.00000,319.18555
13.00000,1.00000,292.79620
14.00000,1.00000,189.12373
15.00000,1.00000,311.01743
16.00000,1.00000,363.16782
17.00000,1.00000,522.76056
18.00000,1.00000,617.00830
19.00000,1.00000,666.01709
20.00000,1.00000,785.39752
21.00000,1.00000,791.68073
22.00000,1.00000,885.92841
23.00000,1.00000,911.06116
24.00000,1.00000,1017.87518
25.00000,1.00000,1174.95471
26.00000,1.00000,1105.83972
27.00000,1.00000,1237.78650
28.00000,1.00000,1237.78650
0.00000,2.00000,532.81372
1.00000,2.00000,496.37125
2.00000,2.00000,570.51276
3.00000,2.00000,834.40637

```

Figura 92. Esempio di dati importati nel formato DAT

La prima riga indica il nome del sondaggio (data e ora), la seconda la spaziatura tra gli elettrodi "a", la terza il numero del tipo di configurazione (1 = Wenner), la quarta il numero totale dei punti misurati, la quinta la posizione (x) del primo elettrodo utilizzato per la matrice, la sesta 1 per i dati IP (polarizzazione indotta) e 0 per i dati di resistività.

Poi la matrice nella prima colonna ha: posizione-X, spaziatura tra gli elettrodi (n=1, 2, 3... solo numeri interi che vengono raddoppiati all'aumentare del numero di livello e quindi della profondità indagata) e valore di resistività misurato.

Il programma presuppone che la posizione dei punti lungo x aumenta da sinistra verso destra nella pseudosezione.

Alla fine di questa serie di dati si inseriscono:

- 0, 1 o 2, a seconda che:
 - 0 = non sia presente la topografia;
 - 1 = sia presente la topografia con coordinate reali orizzontali e verticali lungo una linea di rilevazione;
 - 2 = usato nella maggior parte dei casi, in cui è presente la topografia ma le distanze dei punti lungo la superficie non corrispondono con la una vera distanza orizzontale, perchè sono misurate da

un cordella metrica che segue l'andamento della superficie del terreno in pendenza (la distanza tra gli elettrodi risulta essere sempre minore rispetto a quando siamo in presenza di una superficie piana);

- il numero totale dei punti quotati con il GPS lungo il transetto indagato;
- l'elenco di tutti i dati misurati (una colonna per la distanza X e una con la quota Z);
- alla fine vengono messi cinque 0, che indicano la fine del file.

Fare attenzione che il separatore decimale sia il PUNTO e non la virgola.

Una volta letti i file del transetto di cui ci interessa ottenere il profilo delle resistività, si procede con il **CONCATENATE**, una funzione che consente di unire più profili 2D fatti in successione e avere così un unico profilo per l'intera retta d'indagine (Figura 93).

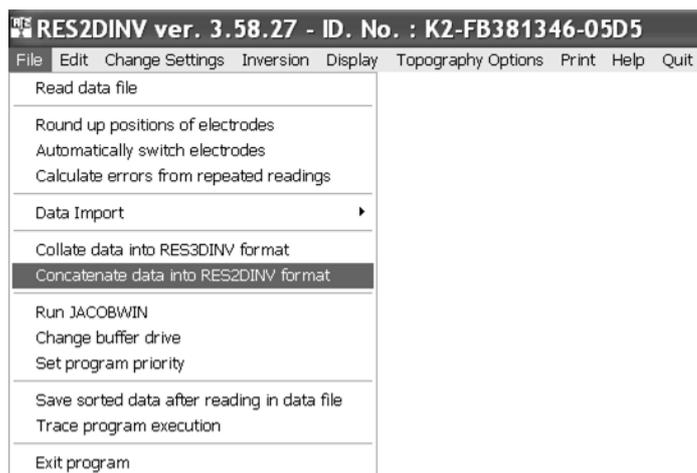
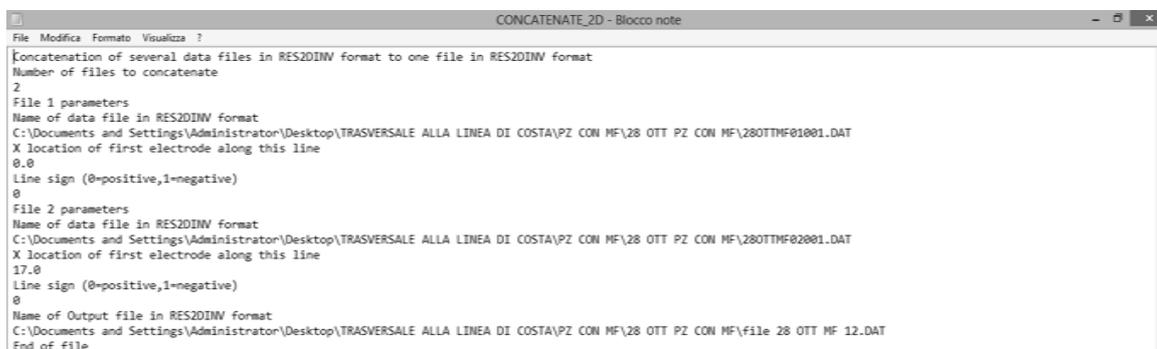


Figura 93. Concatenate

Si prende lo script di esempio "CONCATENATE_2D.txt" e lo si modifica inserendo i percorsi dei file da unire, il nome e la destinazione del file di output. Bisogna fare attenzione nei sistemi multi-elettrodo perchè ogni nuova registrazione inizia con una posizione che è uguale a zero per il primo elettrodo. Occorre quindi cambiare la posizione x in modo che abbiano una origine comune (la fine del primo stendimento deve coincidere con l'inizio del secondo) (Figura 94). Nel nostro caso di studio abbiamo sempre una sovrapposizione di 16 elettrodi, cioè piantiamo 32 elettrodi per il 1° sondaggio poi si spostano i primi 16 che vanno posizionati in coda così si può procedere alla 2° acquisizione. Questo

è necessario perchè le pseudosezioni sono a forma trapezoidale e per poter avere una copertura in profondità senza lacune di dati è necessaria una buona sovrapposizione.



```

Concatenation of several data files in RES2DINV format to one file in RES2DINV format
Number of files to concatenate
2
File 1 parameters
Name of data file in RES2DINV format
C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\TRASVERSALE ALLA LINEA DI COSTA\PZ CON MF\28 OTT PZ CON MF\280TTMF01001.DAT
X location of first electrode along this line
0.0
Line sign (0=positive,1=negative)
0
File 2 parameters
Name of data file in RES2DINV format
C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\TRASVERSALE ALLA LINEA DI COSTA\PZ CON MF\28 OTT PZ CON MF\280TTMF02001.DAT
X location of first electrode along this line
17.0
Line sign (0=positive,1=negative)
0
Name of Output file in RES2DINV format
C:\Documents and Settings\Administrator\Desktop\TRASVERSALE ALLA LINEA DI COSTA\PZ CON MF\file 28 OTT MF 12.DAT
End of file

```

Figura 94. Esempio di script per il Concatenate

Esiste anche la funzione COLLATE DATA INTO RES3DINV FORMAT che consente di unire delle linee d'indagine parallele con eventuali collegamenti in direzione perpendicolare, raccogliendo tutti i dati in un unico file 3D (Loke e Barker, 1996b) modificando lo script COLLATE_2D_3D.txt.

Inserendo la topografia (che può essere sfalsata rispetto alla posizione dei picchetti) si crea una distorsione delle celle del modello. Per ogni cella è calcolato e risolto l'algoritmo. Prima di ottenere le pseudosezioni bisogna fare una pulizia dei data point che più si discostano dall'andamento generale dei valori di resistività misurati. L'operazione è effettuata facendo EDIT, EXTERMINATE BAD DATUM POINTS (Figura 95).

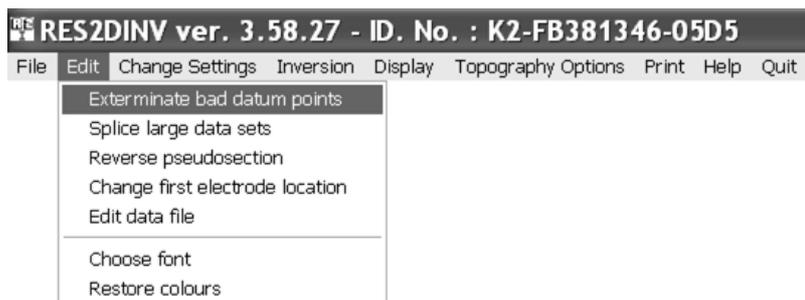


Figura 95. Edit, Exterminate bad data points

Questa funzione ci permette di eliminare i punti tra i dati cattivi registrati in campoche, in modo soggettivo, differiscono da quelli circostanti. In questa opzione, i valori di resistività apparente vengono visualizzati sotto forma di profili per ogni livello di dati. Si decide di eliminare, cioè pulire, le misure puntuali che sono fuori scala, tenendo in considerazione che questa operazione comporta una

perdita di informazioni, a volte si eliminano per intero i livelli più profondi della sezione. Una volta fatta questa scelta si aprirà un nuovo menù che visualizza tutti i data point indicati da delle croci, che cambieranno colore diventando da nere a rosse una volta selezionate. Una volta deciso i dati che vogliamo eliminare si salva il file con un nuovo nome (ad esempio: Pulizia1, Figura 96). I punti selezionati vengono rimossi dal data set, infatti se rifacciamo EDIT EXTERMINATE BAD DATA POINTS vediamo che ci rimane uno spazio vuoto dove avevamo prima il valore anomalo (picco).

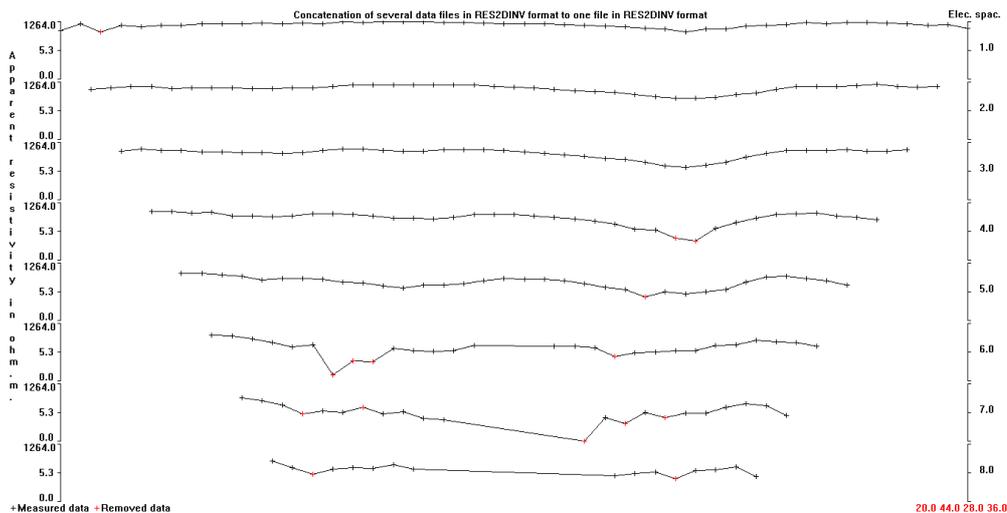


Figura 96. Esempio di Edit, Pulizia 1

Rifare la procedura di READ DATA FILE e selezionare Pulizia 1.

Nel nostro caso di studio per necessità operative si è reso necessario partire con l'elettrodo 1 posizionato sulla battigia, proseguendo la linea d'indagine da mare verso l'entroterra. Questo però dal punto di vista scientifico non è del tutto corretto perchè abbiamo un rovesciamento dei punti cardinali avendo il Sud in alto e il Nord in basso. Ecco perchè è opportuno ribaltare, cioè invertire orizzontalmente da sinistra a destra la sezione, utilizzando REVERSE PSEUDOSECTION, ottenendo così il profilo con il Nord rivolto verso l'alto (Figura 97).

Specchiando la sezione abbiamo solo invertito il numero degli elettrodi e tenendo invariato il valore delle resistività misurate.

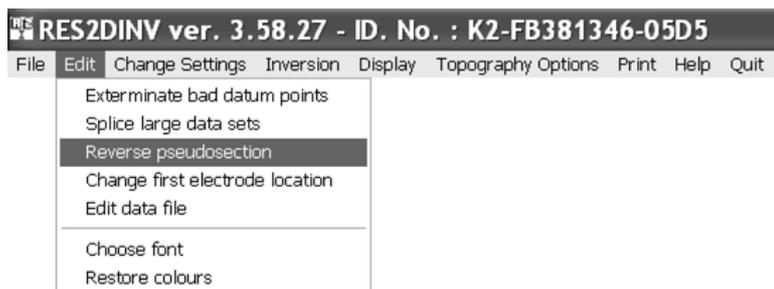


Figura 97. Reverse pseudosection

Arrivati a questo punto abbiamo il nostro profilo orientato in maniera corretta ed è ora possibile impostare il parametri per il settaggio e l'ottenimento della sezione invertita.

Andando su CHANGE SETTINGS, INVERSION PROGRESS SETTING si imposta il numero di iterazioni che vogliamo avere. Per default il programma mette automaticamente il numero massimo d'iterazione che è 7, mentre noi lo impostiamo a 3 (Figura 98).

Il programma ha una serie d'impostazioni predefinite per i fattori di smorzamento e di altre variabili che generalmente danno risultati soddisfacenti per la maggior parte dei set di dati. Tuttavia, in alcune situazioni, è possibile ottenere risultati migliori modificando i parametri che controllano il processo d'inversione. Per modificare una particolare impostazione bisogna spostare il cursore del mouse sulla riga appropriata e poi semplicemente cliccare su di esso. Apparirà un messaggio che fornisce alcune informazioni sui valori che è possibile utilizzare e il tipo d'informazioni necessarie per accedere.

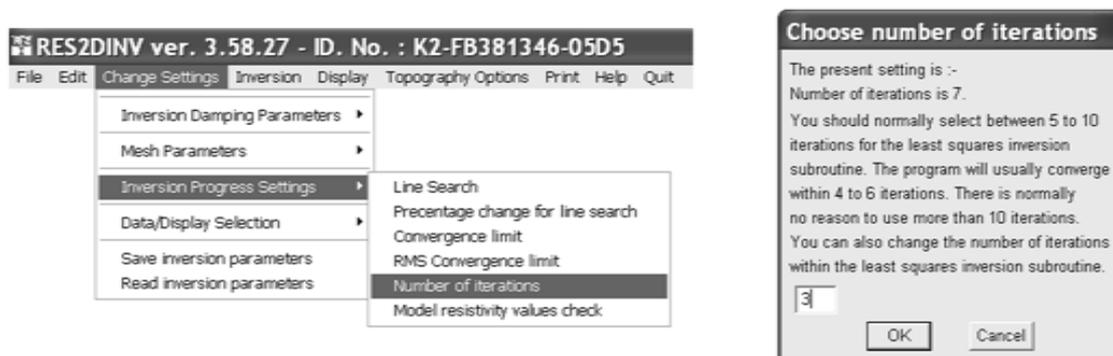


Figura 98. Inversion Process Settings, Number of Iterations

Il DISPLAY MODEL BLOCKS, consente di visualizzare la distribuzione dei blocchi del modello e dei punti misurati (questi ultimi sono plottati alla profondità

media d'indagine, Edwards, 1977) per la matrice utilizzata e modificare alcuni dei parametri che controllano il processo.

Il MODEL DISCRETIZATION, USE EXTENDED MODEL ci permette di modificare il modo in cui il programma suddivide il sottosuolo in celle (Figura 99).

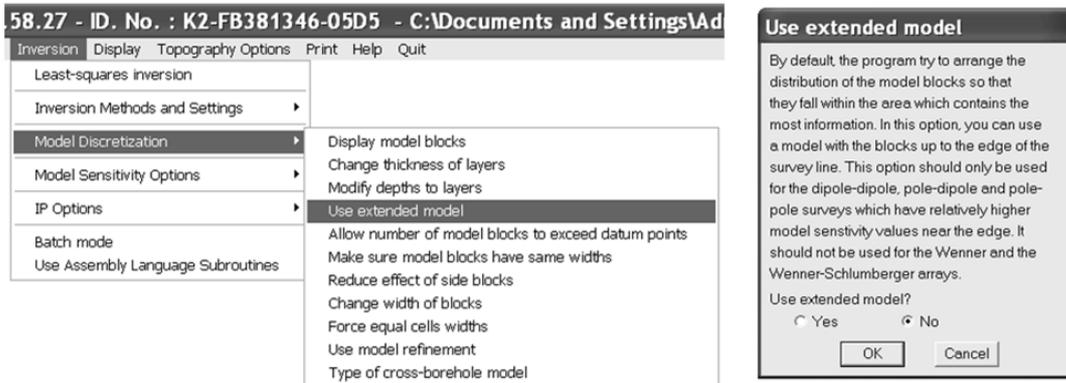


Figura 99. Inversion, Use extended model

La Figura 100 raffigura i diversi metodi di suddividere il sottosuolo in celle rettangolari 2D, dove:

- a) è ottenuto con l'algorithmo predefinito;
- b) consente di aumentare il numero dei blocchi rispetto al numero dei punti misurati;
- c) estende i blocchi fino ai bordi della linea di rilevamento.

Noi preferiamo non usare l'estensione dei blocchi, modello c), perché questa opzione produce delle ulteriori approssimazioni che vogliamo eliminare.

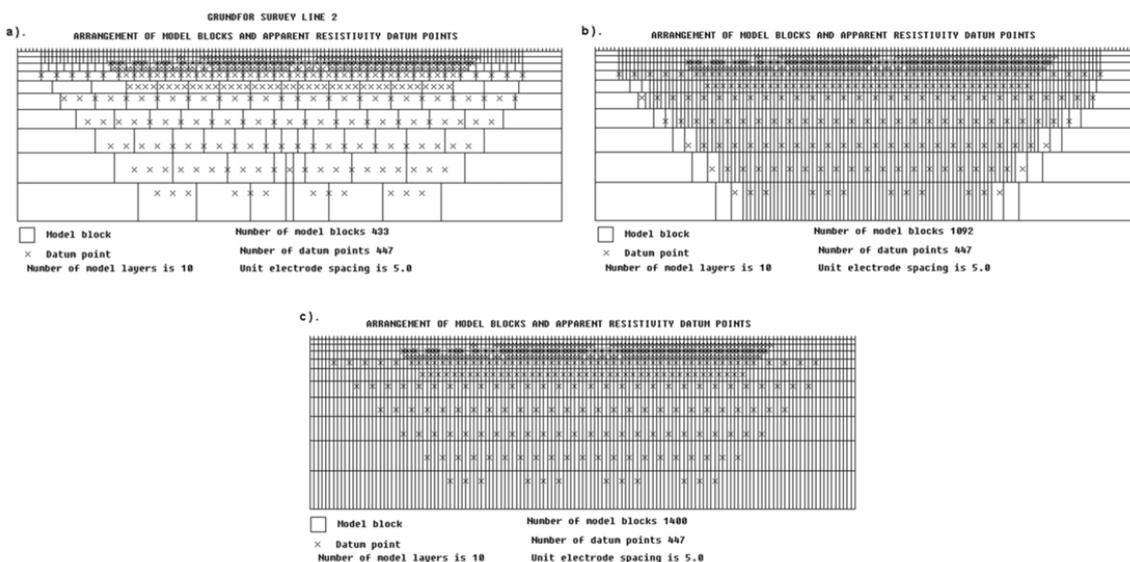


Figura 100. Metodi di suddividere il sottosuolo in celle rettangolari

Sempre nel menu MODEL DISCRETIZATION, ALLOW NUMBER OF MODEL BLOCKS TO EXCEED DATUM POINT, è predefinito che il programma cercherà di organizzare la posizione e le dimensioni delle celle in modo tale che non superino il numero di punti misurati (Figura 101).

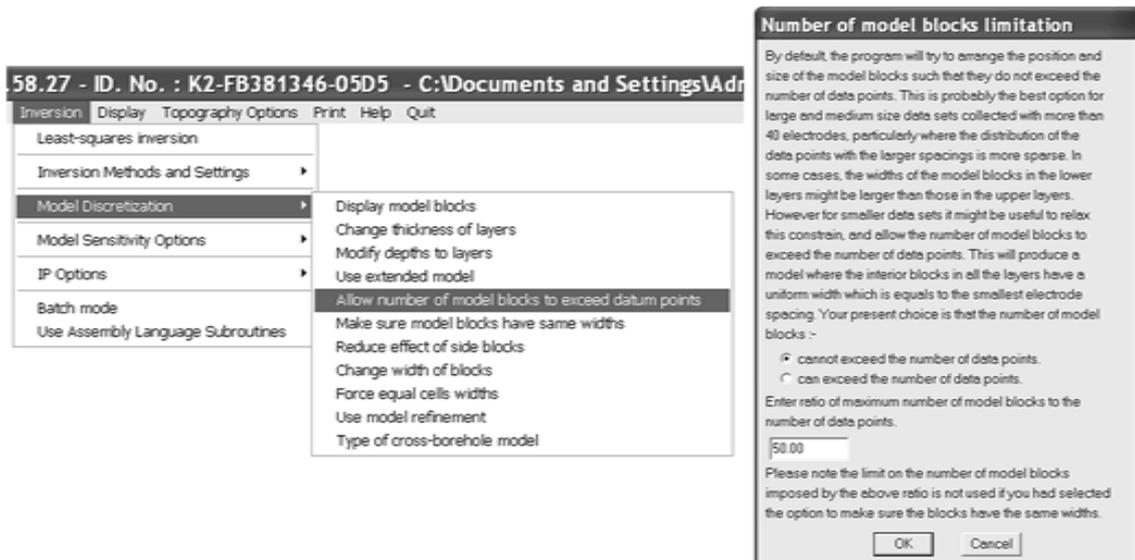


Figura 101. Model discretization, Allow number of model to exceed datum points

Si potrebbe anche ridurre l'effetto dei blocchi laterali "REDUCE EFFECT OF SIDE BLOCK", questa opzione influenza il calcolo dei valori della matrice Jacobiana per i blocchi del modello situati ai lati e sul fondo della sezione del modello.

Selezionando TOPOGRAPHY OPTIONS, DISPLAY TOPOGRAPHY si può visualizzare l'andamento della topografia (quota) (Figura 102).

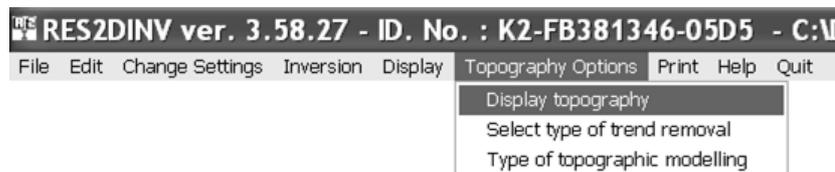


Figura 102. Topography Options, Display topography

Se vi è una marcata differenza in termini di quota lungo la linea di rilevazione, allora è consigliato tenere in considerazione l'effetto della topografia. Quando nel file iniziale vengono inserite le informazioni topografiche (semplicemente si copiano e incollano i dati ottenuti dal profilo GPS) il programma seleziona automaticamente il metodo degli elementi finiti, che incorpora la topografia nella maglia di modellizzazione utilizzata (Figura 103).

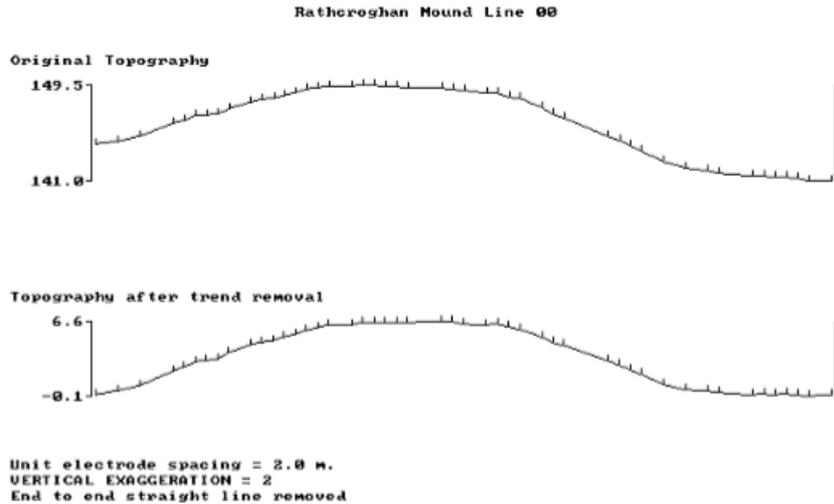


Figura 103. Display Topography

Andando su TYPE OF TOPOGRAPHY MODELLING apparirà la seguente figura di dialogo (Figura 104) in cui è possibile scegliere tra diversi metodi di modellizzazione topografica.

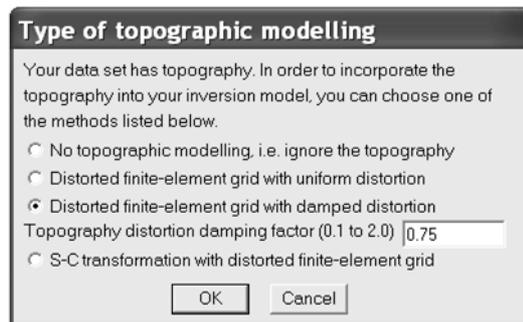


Figura 104. Type of topography modelling

1. La prima opzione riguarda il caso in cui la griglia non tiene conto della topografia oppure essa non è presente (Figura 105 a);
2. Nella seconda scelta la griglia degli elementi finiti subisce una distorsione uniforme tale per cui i nodi della maglia superficiale corrispondono alla topografia reale. Questo modello dà risultati più precisi nell'utilizzare i fattori di correzione nel caso di un'area terra omogenea che viene calcolata con il metodo degli elementi finiti (Fox et al., 1980). Esso può causare distorsioni nel caso in cui ci siano delle grandi variazioni di resistività in prossimità della superficie (Tong and Yang, 1990; Loke, 2000). Le celle della griglia e quindi anche gli strati del modello vengono spostati in verticale seguendo l'andamento della superficie (Figura 105 b);

3. Nella terza opzione la griglia degli elementi finiti viene smorzata, i nodi del sottosuolo in profondità vengono spostati in misura minore rispetto ai nodi in superficie, cioè l'effetto della topografia è "smorzato" con la profondità. Ci sono due casi di spostamento nei nodi nel sottosuolo: gradualmente ridotti con la profondità (moderata, Figura 105 c) o rapidamente ridotta con la profondità (elevata, Figura 105 d). Si sceglie questa opzione nel caso in cui l'ampiezza della curvatura della topografia è inferiore alla profondità dello strato più profondo del modello. Il grado di smorzamento può essere modificato dall'utente;
4. Nell'ultima opzione si utilizza un metodo di trasformazione Schwarz-Christoffel con griglia distorta degli elementi finiti. È probabilmente il metodo migliore che produce un effetto più "naturale" quando la curvatura è relativamente grande, ma non funziona quando si hanno pendenze elevate o dove i dati di topografia sono radi. In questo caso sarebbe utile aggiungere dei punti quotati il più vicino al vertice (Figura 105 e).

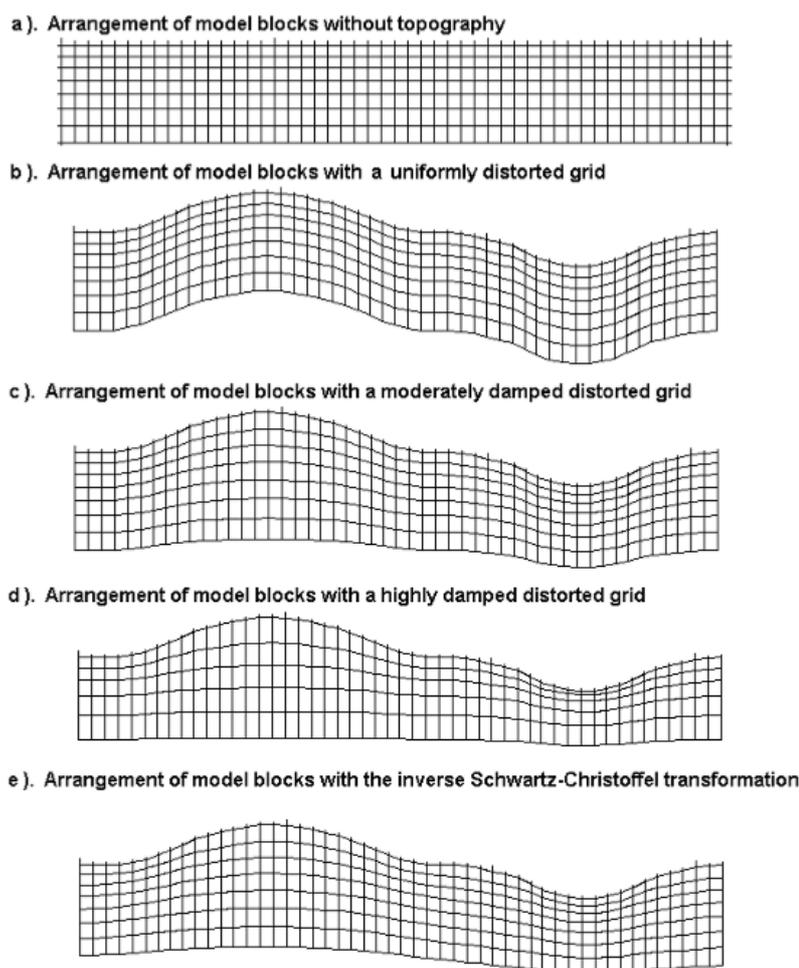


Figura 105. Diversi metodi di modellizzazione topografica

Ora si può procedere all'inversione INVERSION, LEAST-AQUARES INVERSION. Per convenzione ho impostato che i colori caldi indicano i valori bassi di resistività, mentre quello freddi rappresentano i valori di resistività più elevati. Se questo non avviene si deve fare DISPLAY, SHOW INVERSON RESULTS, si apre una nuova finestra CHANGE DISPLAY SETTINGS, REVERSE COLUOR SCAME (Figura 106). É possibile anche modificare la combinazione dei colori utilizzati dal programma e stampare in bianco e nero o in scala di grigi (COLOR/BLACK-WHITE DISPLAY).



Figura 106. Reverse colour scheme

Dopo aver impostato i colori, possiamo eseguire l'inversione che ci restituisce una pseudosezione. Selezionando INVERSION, LEAST-SQUARES INVERSION (Figura 107), verrà richiesto il nome del file di output in cui memorizzare i risultati (tecnica d'inversione dei minimi quadrati).

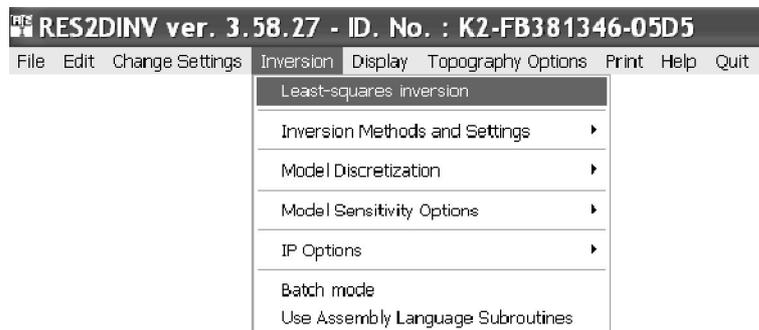


Figura 107. Inversion, Least-squares inversion

L'inversione ci mostra tre sezioni procedendo dall'alto verso il basso:

- la prima per i valori di resistività apparente misurata (dove i puntini bianchi indicano i dati);
- la seconda per la resistività apparente calcolata (misure mediate);
- l'ultima che rappresenta l'inversione del modello di resistività con 3 iterazioni (stimato/interpretato con l'errore RMS) (Figura 108).

Il programma ci visualizza un messaggio nel caso in cui, dopo un'iterazione del set di dati un valore di resistività sia troppo elevato (più di 20 volte il valore massimo di resistività apparente) o troppo ridotto (meno di 1/20 il valore minimo di resistività apparente).

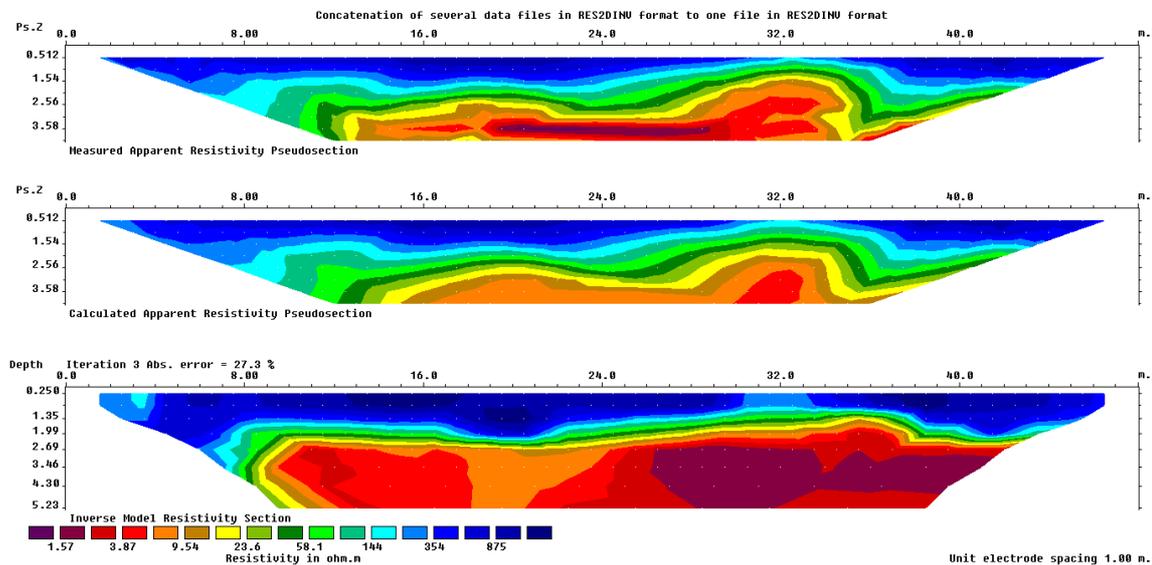


Figura 108. Esempio di inversione

Bisogna fare molta attenzione alla scala cromatica che può essere notevolmente forviante. Infatti per tenere i colori uguali per lo stesso intervallo di dati è stato necessario esportare i dati su SURFER che consente di impostare le soglie di resistività e il colore che si desidera, cosa che invece con Res2Dinv non è stato possibile fare (ogni profilo ha una scala cromatica che è suddivisa tra minimi e massimi registrati su cui sono spalmati uniformemente tutti i dati).

Tornando in, DISPLAY SECTIONS, INCLUDE TOPOGRAPHY IN MODEL DISPLAY otteniamo le finestre riportate in Figura 109.

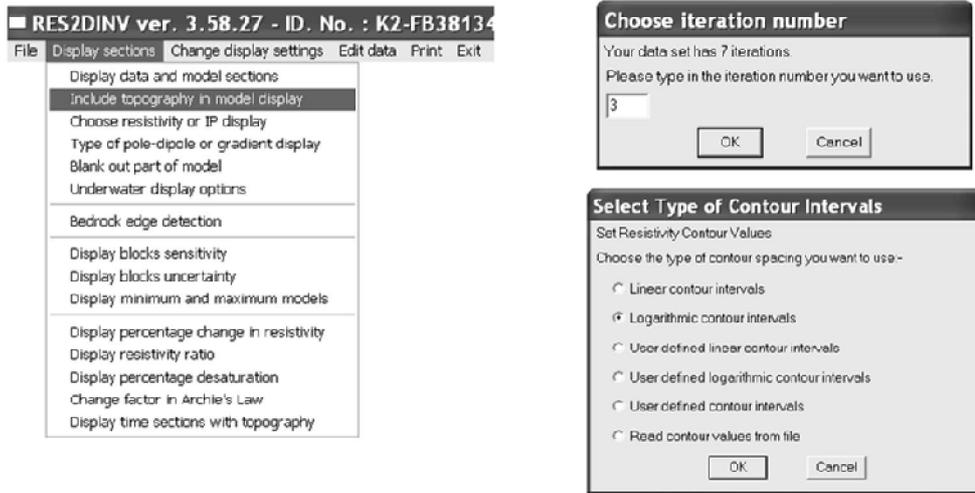


Figura 109. Include topography in model display

A questo punto viene chiesto di inserire il numero di iterazioni (es. 3) e gli intervalli di contorno (Logarithmic contour intervals) in Figura 109 a destra. Quello che viene prodotto è una pseudosezione i cui strati superficiali seguono l'andamento topografico.

Ecco un esempio di quello che si ottiene includendo la topografia all'interno del modello (Figura 110). La topografia può essere compresa nella visualizzazione del modello solo se è stata incorporata ai risultati prima di effettuare l'inversione. Così viene calcolata la profondità e la posizione vera del modello dei blocchi sotto la superficie.

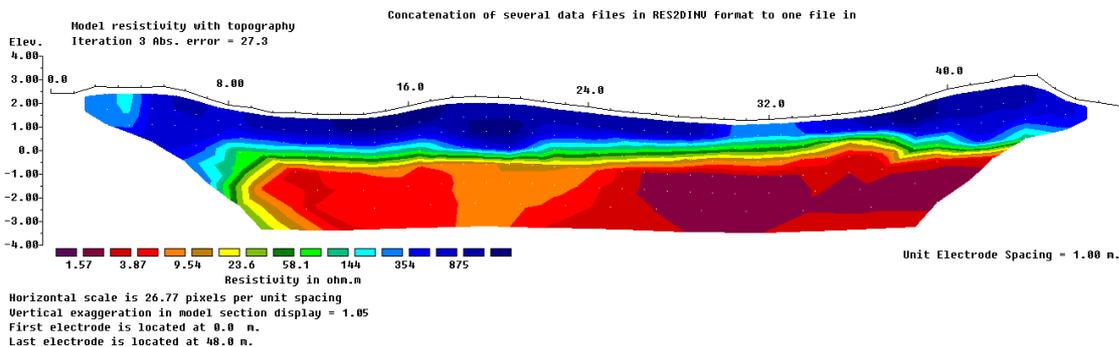


Figura 110. Esempio di pseudosezione in cui è stata inserita la topografia

Se si vuole è possibile anche esagerare o incrementare la scala verticale dei profili usando VERTICAL DISPLAY SCALING FACTOR.

È possibile visualizzare anche i dati di conducibilità al posto di quelli di resistività (RESISTIVITY OR CONDUCTIVITY DISPLAY), molto utilizzati in idrogeologia.

Si possono poi salvare i file nel formato SURFER, facendo FILE, SAVE DATA IN SURFER FORMAT. In questo modo con il software SURFER 11 è possibile settare una scala cromatica omogenea tra i campioni (Figura 111).

Verrà visualizzata una finestra di dialogo riportata in Figura 111 a destra, in cui si seleziona: il numero di iterazioni, si sceglie se salvare i dati direttamente o in forma logaritmica e si seleziona MODEL RESISTIVITY WITH TOPOGRAPHY, per poter esportare i dati compresi quelli topografici.

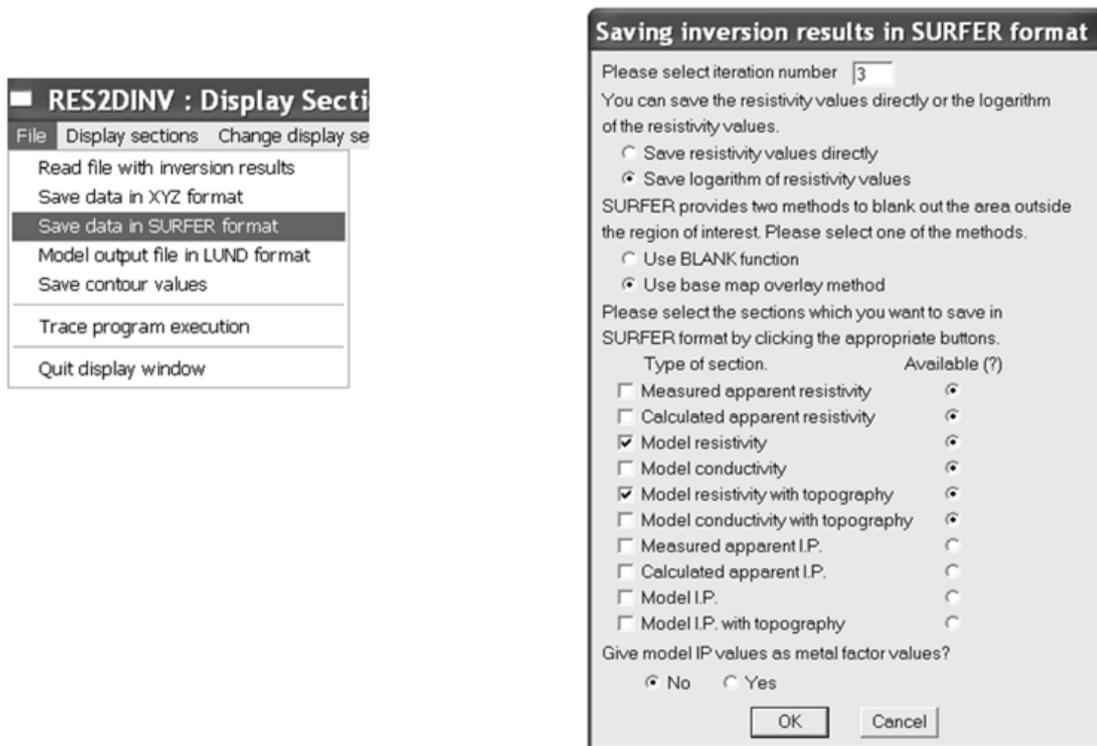


Figura 111. Save data in SURFER format

In un secondo momento sugli stessi dati sono stati modificati altri parametri per ottenere per ottenere un'inversione maggiormente rappresentativa dell'area indagata.

Per convenzione ho chiamato questa configurazione "DMS", dove ho modificato quanto segue:

1. D = Damping Factor (Figura 112)
2. M = Mesh Refinement (Figura 113)
3. S = Smoothing of model resistivity (Figura 114)

1. Damping Factor

INVERSION DAMPING PARAMETRES permette di modificare l'uso del fattore di smorzamento u con la profondità, selezionando CHANGE OF DAMPING FACTOR WITH DEPTH (Figura 112). Poiché la risoluzione del modello di resistività diminuisce esponenzialmente con la profondità, il fattore di smorzamento usato dal metodo d'inversione dei minimi quadrati viene normalmente anche incrementato ad ogni strato più profondo. Come valore preimpostato c'è 1.10 mentre noi lo abbiamo incrementato portandolo a 1.50. È consigliato aumentarlo se il modello mostra delle oscillazioni innaturali nei valori di resistività nelle sezioni più basse (Figura 112 a destra).

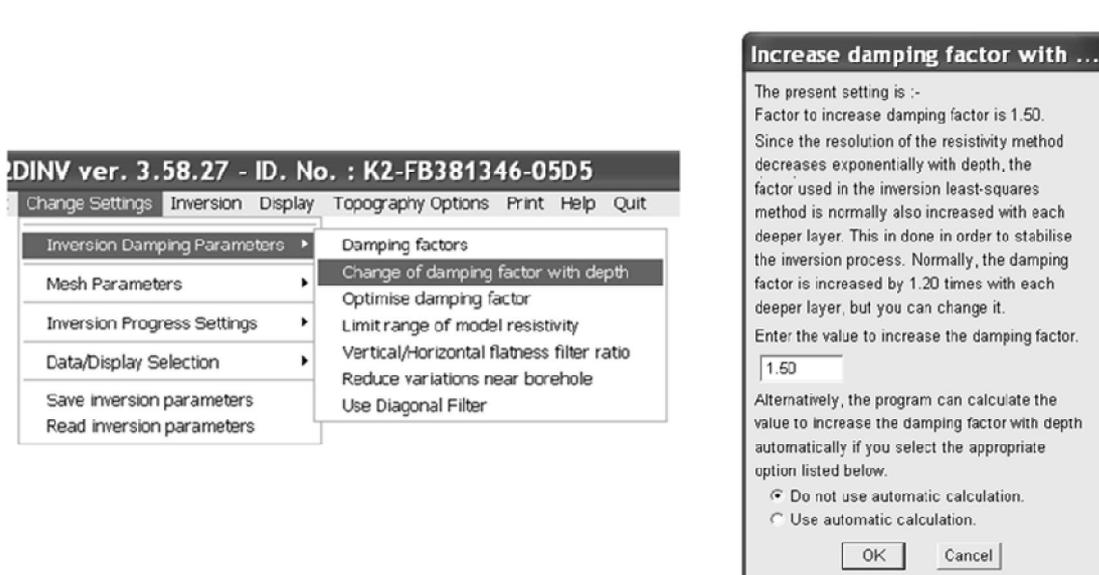


Figura 112. Change of damping factor with depth

2. Mesh Refinement

MESH PARAMETRES MESH REFINEMENT, questa opzione consente di utilizzare una maglia più fine, in senso verticale, per i metodi delle differenze finite o per il metodo degli elementi finiti (Figura 113). I valori di resistività apparente calcolati con entrambi i metodi saranno più precisi con una maglia più fine, ma il tempo di elaborazione per il computer e la memoria necessaria sarà maggiore. L'uso di una maglia più fine può dare dei risultati migliori, in particolare se siamo in un'area in cui uno strato a bassa resistività si trova sotto uno strato ad alta resistività. Inoltre è stato scelto di aumentare il numero di nodi tra elettrodi adiacenti da 2 (predefinita) a 4 della griglia a rete che è utilizzata dal programma di modellizzazione. Con 4 nodi per distanza tra gli elettrodi, i valori di resistività apparente calcolati sono più accurati (in particolare per i grandi contrasti di resistività). Di default il programma utilizza il primo metodo (differenze finite), che è più veloce, se il set di dati non contiene la topografia. Se quest'ultima è presente la scelta di default viene automaticamente modificata nel metodo degli elementi finiti.

Tra le tre possibilità date dal programma noi abbiamo scelto l'ultima FINEST MESH con 4 nodi (Figura 113 a destra).

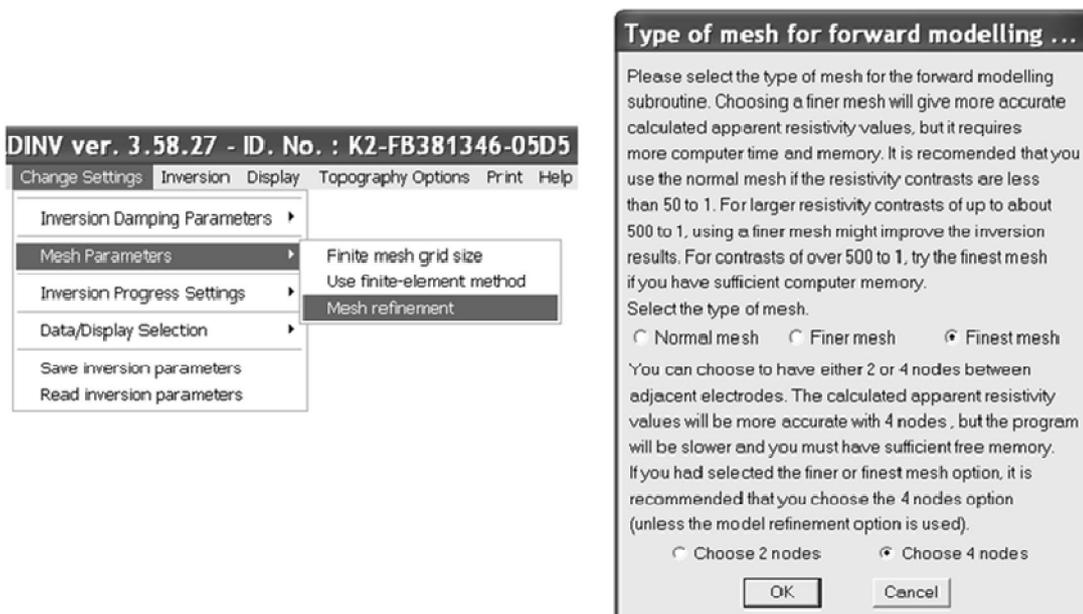


Figura 113. Mesh refinement

3. Smoothing of model resistivity

INVERSION METHODS AND SETTINGS permette di selezionare il metodo d'inversione da utilizzare. INCLUDE SMOOTHING OF MODEL RESISTIVITY, include un livellamento dei valori di resistività dal modello (Figura 114). Questa opzione viene usata nel caso in cui il set di dati sia molto rumoroso.

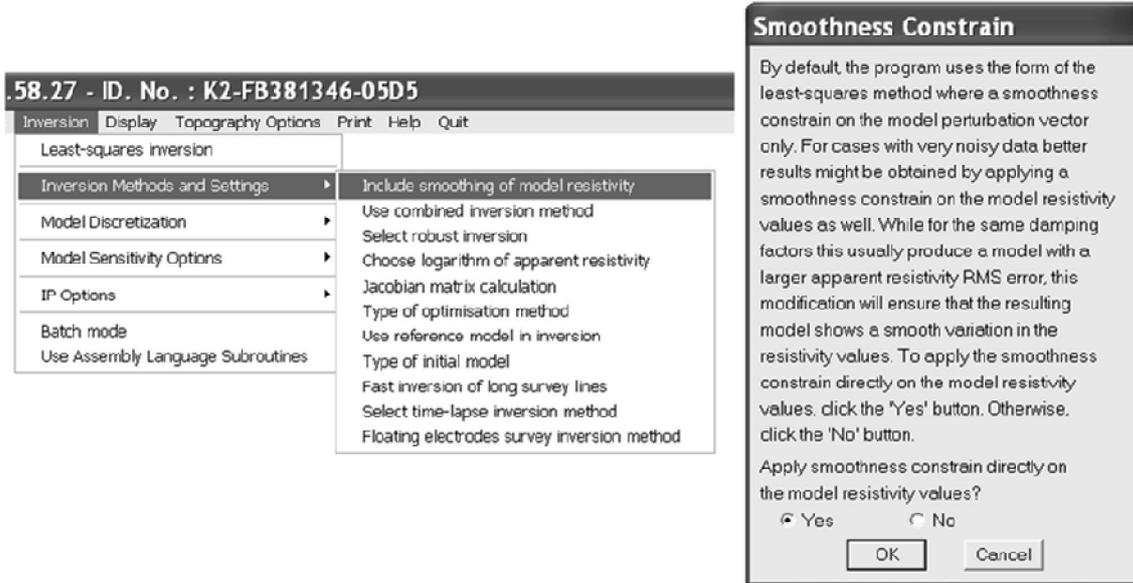


Figura 114. Include smoothing of model resistivity