



Istituto di Ricerca Sulle Acque
UOS Bari



**Relazione sulle
indagini geofisiche
LUGLIO 2020**

Caratterizzazione geofisica della discarica RSU dismessa sita in località Burgesi -Ugento



Responsabile Scientifico Dott. Lorenzo De Carlo

Gruppo di Lavoro
dott. Lorenzo De Carlo, dott.ssa Maria Clementina Caputo,
dott.ssa Antonietta C. Turturro



Istituto di Ricerca Sulle Acque
UOS Bari

PREMESSA	3
1. Descrizione del sito	3
2. Metodologia elettromagnetica	6
3. Scelta della metodologia EMI: motivazioni	8
4. Strumentazione utilizzata	9
5. Attività di indagine geofisica	11
6. Pre-processing delle misure sperimentali	12
7. Inversione dei dati elettromagnetici	15
8. Modello elettromagnetico del corpo discarica	17
9. Interpretazione dei risultati	27
10. Conclusioni	29



PREMESSA

La presente relazione descrive le risultanze delle indagini geofisiche condotte sulla discarica dismessa di rifiuti solidi urbani (RSU) sita in località Burgesi, ricadente nel territorio comunale di Ugento.

Tale relazione è stata redatta in ottemperanza a quanto previsto all'Art. 8 dell'**Accordo Organizzativo per la esecuzione, da parte del CNR-IRSA ed in collaborazione con ARPA Puglia, delle indagini indirette presso la discarica in località Burgesi, nel Comune di Ugento, e successiva interpretazione dei dati**, stipulato fra le due parti interessate in data 13/03/2019 e successivamente prorogato in data 21/02/2020, in esecuzione della Deliberazione della Giunta Regionale pugliese 21.12.2018 n. 2465.

Oggetto del presente Accordo è l'esecuzione di indagini di tipo elettromagnetico ad elevata risoluzione da eseguire sul corpo della discarica "Monteco srl", finalizzate al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- 1) caratterizzazione geofisica del corpo rifiuti ed individuazione della potenziale presenza di contaminazione da composti organici ad alto contenuto di PCB;
- 2) stima dell'estensione della suddetta contaminazione organica;
- 3) verifica dell'integrità della geomembrana posta sul fondo della discarica stessa.

Le suddette indagini sono state eseguite in conformità a quanto indicato nel paragrafo 5 "**Progettazione esecutiva delle indagini EMI - Fase 1**" del **Progetto esecutivo delle indagini geofisiche**, inviato da CNR-IRSA ad ARPA in data 19/07/2019 n. prot. CNR IRSA 0004172 e da ARPA alla Regione in data 25/07/2019 n. prot. ARPA 0055312.

1. Descrizione del sito

Il sito in località Burgesi, ricadente nel territorio comunale di Ugento, comprende due discariche di rifiuti solidi urbani: una attualmente in esercizio e una dismessa ubicata in adiacenza alla prima.

La discarica dismessa si estende complessivamente per 90.000 m² ed è suddivisa in n. 3 lotti (Fig.1), ciascuno dei quali è stato impermeabilizzato, mediante geomembrana in HDPE sul fondo e sulle pareti laterali, in fase di realizzazione della discarica, e in superficie dopo la dismissione creando una copertura provvisoria.

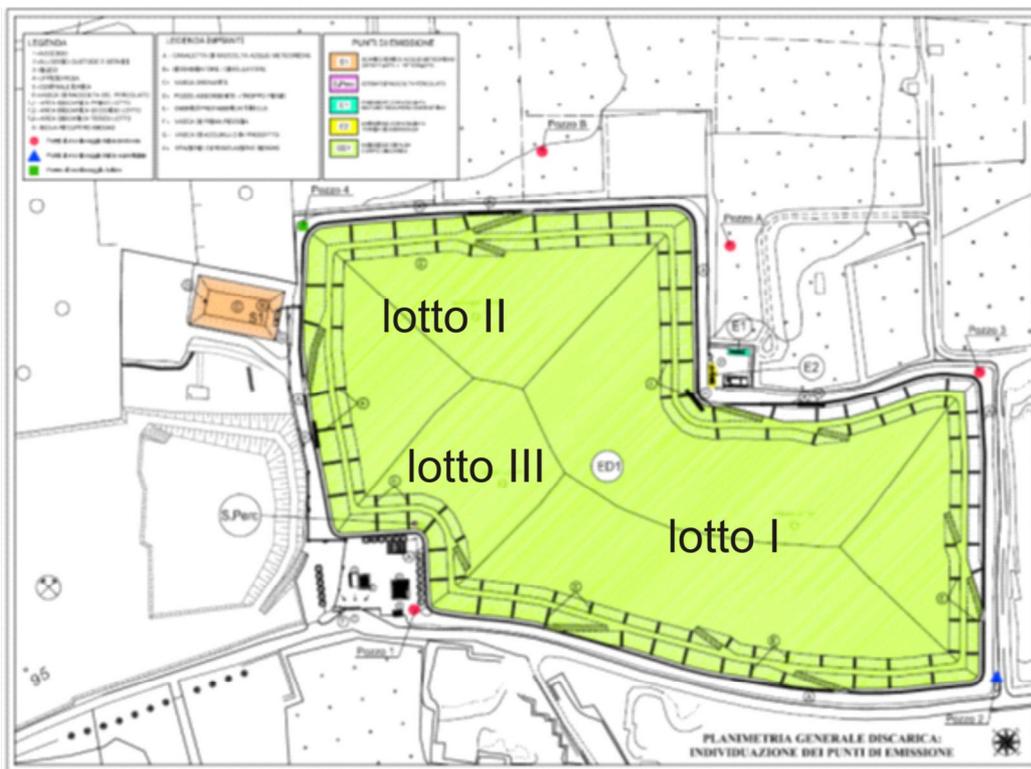


Fig. 1 - Planimetria della discarica dismessa ubicata in località Burgesi - Ugento con indicazione dei lotti di coltivazione.

A seguito di comunicazione personale fornita dal gestore del sito, è stata cartografata la distribuzione delle tubazioni drenanti e collettori che, dai cinque pozzetti di raccolta attualmente in funzione, fanno confluire il percolato nella vasca di raccolta (Fig. 2).

La quantità di percolato estratto è in media di 70 tonnellate/mese.

Il valore medio della conducibilità elettrica dell'eluato raccolto nei tre lotti è di 4.8 S/m, come rilevato dalle analisi chimico-fisiche eseguite periodicamente dal gestore. In Fig. 2 sono indicate anche le quote di attestazione del fondo della discarica per i tre lotti, come indicato nel Progetto Esecutivo della discarica. Da tali informazioni si deduce che la quota di attestazione dei lotti II e III è compresa tra - 8 e - 9 m rispetto al piano stradale, mentre quella del lotto I si trova a circa - 5 m.

Considerato che la quota attuale della sommità del corpo discarica si attesta intorno a + 10 m dal piano stradale, si deduce che lo spessore del corpo rifiuti è di circa 15 m nel lotto I e compreso tra 18 e 19 m nei lotti II e III.

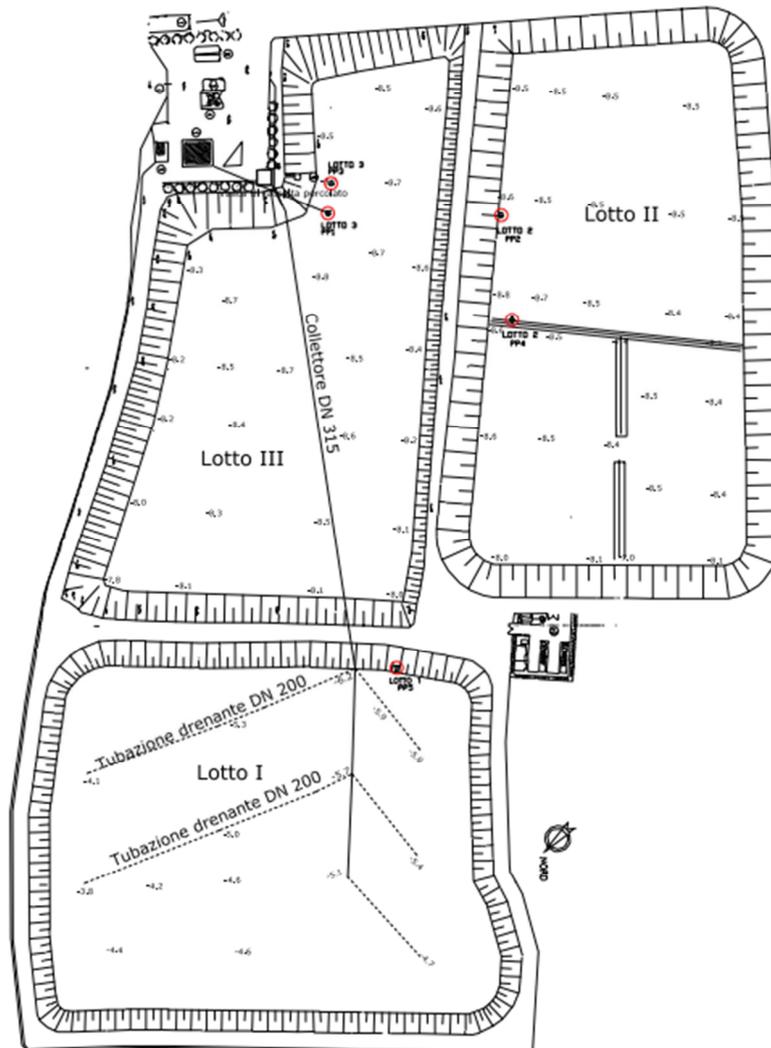


Fig. 2 – Planimetria originale della discarica e ubicazione dei pozzetti di raccolta del percolato, delle tubazioni drenanti e del tubo collettore.

In occasione di un incontro tecnico tenutosi a settembre 2018 presso la discarica di Burgesi le Forze dell'Ordine, impegnate in attività investigative sul sito in oggetto, hanno riferito che materiale contaminato da composti organici costituiti prevalentemente da policlorobifenili



(PCB), sia stato raccolto in fusti metallici ed abbancato, insieme ai rifiuti urbani, ad una profondità di circa 20 m dalla sommità del corpo discarica. Tali fusti sarebbero stati concentrati in una specifica area del lotto III. Se tale informazione risultasse veritiera, sussisterebbe la possibilità che tali contaminanti, anziché essere contenuti all'interno di fusti, siano dispersi nel corpo rifiuti.

Il sopralluogo condotto in data 16 aprile 2019 ha consentito di verificare lo stato dei luoghi con particolare riferimento alla valutazione di potenziali fonti di disturbo per l'esecuzione delle indagini indirette quali la presenza della geomembrana in HDPE posta sulla sommità del corpo discarica e copertoni in gomma, solitamente utilizzati come ancoraggio provvisorio della geomembrana stessa prima della realizzazione della chiusura della discarica mediante realizzazione del capping.

2. Metodologia elettromagnetica

Di seguito sono riportati cenni sulla metodologia elettromagnetica proposta, già ampiamente presentata nel **Progetto esecutivo delle indagini geofisiche**.

Tale metodologia è ampiamente utilizzata in ambito idrologico (Boaga et al., 2018; Cassiani et al. 2011), per la caratterizzazione di discariche pericolose (Martinelli et al. 2008), in studi archeologici (Lascano et al., 2006; Osella et al., 2005), in studi di agricoltura di precisione (Dragonetti et al., 2018; Yao et al., 2010) e per l'individuazione di ordigni inesplosi (Huang et al. 2007).

La metodologia si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica nel dominio della frequenza (FDEM) ed utilizza una sonda elettromagnetica costituita da due bobine collegate tra loro attraverso un cavo di lunghezza costante che vengono utilizzate come coil trasmettitore e come ricevitore, rispettivamente. Nella bobina trasmittente viene fatta passare una corrente sinusoidale alternata che, per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, produrrà un campo magnetico primario variabile H_p in grado di indurre un flusso di corrente nel terreno (McNeill, 1980). Se è presente nel terreno un'anomalia di resistività la corrente indotta creerà un campo magnetico secondario H_s , distorto rispetto a quello primario in direzione, ampiezza e fase, che verrà registrato dalla bobina ricevente.

In particolar modo, il rapporto fra i campi magnetici secondari e primari H_s/H_p viene misurato dal dispositivo, fornendo informazioni sull'ampiezza e sulla fase del segnale.



La parte reale, o componente in fase, del segnale misurato è principalmente influenzata dalla permeabilità magnetica, mentre la parte immaginaria, chiamata anche componente in quadratura, è legata principalmente alla conducibilità elettrica.

Quando sono rispettate certe condizioni, le complesse equazioni di Maxwell che descrivono la propagazione nel semispazio delle onde elettromagnetiche possono essere semplificate e il modello elettromagnetico risultante è linearmente dipendente dalle misure sperimentali.

In particolar modo, tale semplificazione si basa sull'assunzione che sia rispettata la condizione di basso numero di induzione, $B \ll 1$, definito come:

$$B = \frac{s}{\delta}$$

dove s è la distanza di separazione fra le bobine e δ rappresenta lo skin depth, ossia la profondità alla quale un segnale elettromagnetico si attenua di un valore pari a $1/e$, dove e rappresenta il numero di Nepero.

Lo skin depth è strettamente legato alle proprietà elettromagnetiche del mezzo attraversato ed definito dalla seguente equazione:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}$$

dove $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henry/m è la permeabilità magnetica dell'aria, σ è la conducibilità elettrica e ω è la frequenza dell'onda elettromagnetica immessa.

La lineare dipendenza della risposta strumentale consente di predire la conducibilità elettrica nelle due disposizioni a coil orizzontale o verticale attraverso semplici equazioni:

$$\sigma^H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{1/2}}$$

$$\sigma^V(z) = \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{3/2}}$$

e allo stesso modo le due componenti della fase:

$$\varphi_V(z) = \frac{12z(8z^3 - 3)}{(4z^2 + 1)^{7/2}}$$

$$\varphi_H(z) = \frac{12z}{(4z^2 + 1)^{5/2}}$$



La maggior parte delle applicazioni riportate nelle referenze bibliografiche sopra citate rispettano tale condizione perché vengono utilizzati dispositivi con piccole distanze fra i coils che investigano suoli aventi conducibilità elettrica medio-alta (suoli sabbiosi e/o argillosi).

Quando non è rispettata la condizione di basso numero di induzione $B \ll 1$, la risposta strumentale è non lineare, rendendo più complessa la predizione delle componenti di conducibilità e di fase.

E' questo il caso del sito in esame, in cui la condizione di basso numero di induzione non è verificata sia perché, per poter aumentare la penetrazione del segnale, sono state utilizzate grandi spaziature inter-coils, sia per l'elevata conducibilità del corpo discarica. L'elevata conducibilità influenza principalmente la distribuzione della componente in fase perché può determinare alti valori della fase anche per materiali non magnetici.

3. Scelta della metodologia EMI: motivazioni

In contesti estremamente complessi come quello di una discarica dismessa, pur trattandosi di metodologie indirette che non sempre garantiscono risultati univoci, l'utilizzo della metodologia elettromagnetica rappresenta l'unico strumento in grado di caratterizzare il corpo discarica, fornendo informazioni altrimenti difficilmente ottenibili con qualsiasi metodologia di indagine indiretta.

Infatti, basandosi sul principio dell'induzione elettromagnetica, le misure EMI non necessitano del contatto del sensore con il terreno e quindi non sono condizionate dalla presenza della geomembrana in HDPE posta sulla sommità del corpo discarica.

Inoltre la capacità di acquisire un gran numero di misure in tempi relativamente brevi consente di avere una elevata copertura areale su tutto il corpo discarica.

In riferimento al raggiungimento dei tre obiettivi indicati nell'Accordo organizzativo, le misure EMI possono rilevare l'eventuale presenza di composti organici tipo PCB, raccolti in fusti metallici e/o plastici oppure diffusi nel corpo rifiuti. Infatti, la componente in fase del segnale elettromagnetico è molto sensibile alla presenza di oggetti metallici; allo stesso modo in presenza di fusti plastici l'impulso elettromagnetico trasmesso in superficie, al contatto con la superficie dei fusti, viene in parte assorbito e in parte riflesso generando per effetto dell'induzione elettromagnetica, un campo magnetico indotto. Quindi, l'analisi del segnale elettromagnetico riflesso può rilevare eventuali anomalie associabili alla presenza dei fusti plastici. In caso di diffusione dei composti organici nel corpo discarica, poiché il loro



comportamento elettrico è altamente resistivo, si avrebbe un elevato contrasto di resistività con il corpo rifiuti che, invece, è conduttivo, determinando anomalie localizzate associate proprio alla presenza dei suddetti composti.

Inoltre, tali misure possono verificare l'integrità della geomembrana posta sul fondo della discarica stessa perché la presenza di lacerazioni nella geomembrana evidenzierebbe anomalie di conducibilità in corrispondenza delle rotture.

Considerata l'elevatissima conducibilità del percolato, il contrasto di conducibilità elettrica rispetto al basamento sottostante risulterebbe significativo.

4. Strumentazione utilizzata

Le attività di indagine geofisica sono state svolte nel mese di gennaio 2020.

È stato utilizzato l'elettromagnetometro mod. CMD DUO della GF Instruments, costituito da una unità di controllo integrata (datalogger palmare CMD/C) la cui connessione con le sonde è fornita via cavo o mediante unità Bluetooth (Fig. 3).

Tale strumentazione consente di acquisire misure elettromagnetiche in modalità manuale, ossia posizionandosi sul punto di interesse ed eseguendo una singola misura, o in continuo, ossia acquisendo misure in automatico con una certa frequenza lungo un profilo. Il datalogger è dotato di unità GPS incorporata in modo che ad ogni punto misura sono associate le coordinate. Ciascuna delle tre sonde, utilizzate per l'acquisizione delle misure di campo, è costituita da 2 bobine elettromagnetiche circolari di diametro 65 cm e peso 5 Kg, collegate fra loro mediante cavi di lunghezza rispettivamente di 10 m, 20 m e 40 m. Per ogni punto misura le bobine vengono orientate perpendicolarmente al terreno, ossia disponendo il dipolo magnetico in posizione verticale (VMD). Al variare della lunghezza del cavo di collegamento tra le due bobine (10 m, 20 m e 40 m) si acquisiscono tre diversi data set di misure corrispondenti a profondità d'investigazione crescenti. Per incrementare la penetrazione del segnale elettromagnetico e aumentare la risoluzione verticale del modello elettromagnetico, le stesse misure sono acquisite variando l'orientazione delle bobine, ossia disponendo le bobine parallelamente al terreno, quindi il dipolo magnetico in posizione orizzontale (HMD). In sintesi la profondità d'investigazione e la risoluzione sono strettamente correlate alla distanza fra le bobine riceventi e trasmettenti e alla funzione di sensitività di ciascuna sonda elettromagnetica.

È opportuno evidenziare che la misura di conducibilità elettrica e di fase acquisita in campo rappresenta un valore integrale nell'intero volume investigato per ciascuna configurazione selezionata. Fig. 4 mostra la funzione di sensibilità normalizzata per il CMD DUO, sonda utilizzata nello studio in esame, sia in configurazione VDM (Low depth range) che HDM (High depth range).



Fig. 3 – Unità di controllo integrata CMD/C.

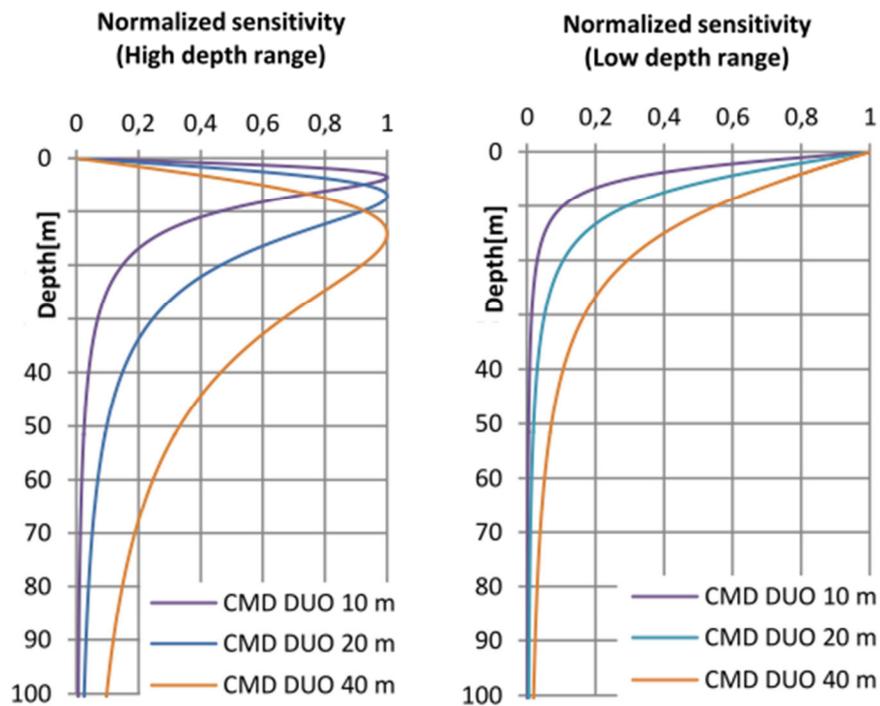


Fig. 4 – Funzione di sensibilità normalizzata per il CMD DUO.



Sull'asse x è riportata la sensitività normalizzata, sull'asse y è indicata la profondità al di sotto della sonda ovvero la profondità al di sotto della superficie sulla quale si eseguono le indagini, supponendo la sonda disposta a una distanza di circa 1 m dalla superficie stessa.

Utilizzando la spaziatura massima di 40 m, il CMD DUO nella configurazione VMD è molto sensibile a target sepolti posti ad una profondità orientativa di 15 m, mentre la profondità efficace, ossia la profondità corrispondente al 75% della sensitività cumulativa, è di 60 m.

Nella configurazione HMD e utilizzando la massima spaziatura, la sensitività normalizzata assume valori massimi in corrispondenza della superficie, poi diminuisce fino a raggiungere una profondità efficace di 30 m.

Come già riferito nel paragrafo precedente, le profondità d'investigazione fornite dalla casa costruttrice dello strumento sono valide se è rispettata la condizione di basso numero di induzione.

In assenza di tale condizione, la profondità d'investigazione raggiunta non può essere calcolata analiticamente applicando le formule semplificate dell'equazione di Maxwell ma può essere solo stimata in seguito dell'inversione dei dati elettromagnetici, note alcune informazioni sito specifiche, quali ad esempio la quota di attestazione del fondo dei singoli lotti.

5. Attività di indagine geofisica

La planimetria di progetto prevista nel **Progetto esecutivo delle indagini geofisiche** è mostrata in Fig. 5.

Tale planimetria è stata utilizzata per individuare in situ i nodi del grigliato regolare, con maglia di dimensioni 20 m x 20 m, lungo il quale sono stati acquisiti i profili EMI.

A seguito di acquisizioni preliminari, dopo aver verificato il basso livello di rumore ambientale e al fine di incrementare la densità di punti misura sul corpo discarica, è stata selezionata la modalità di acquisizione delle misure in continuo piuttosto che l'acquisizione manuale solo in corrispondenza dei nodi del grigliato.

Tale modalità ha consentito, impostando un tempo di campionamento prestabilito, di acquisire un elevato numero di misure lungo un profilo. Nel caso specifico, è stato impostato un tempo di campionamento pari a 2 s, corrispondente all'acquisizione di una misura ogni 2 m circa.

PLANIMETRIA GENERALE DISCARICA

LEGENDA	
	Pozzi di Captazione Biogas
	Pozzi Percolato
	Punti misura EMI

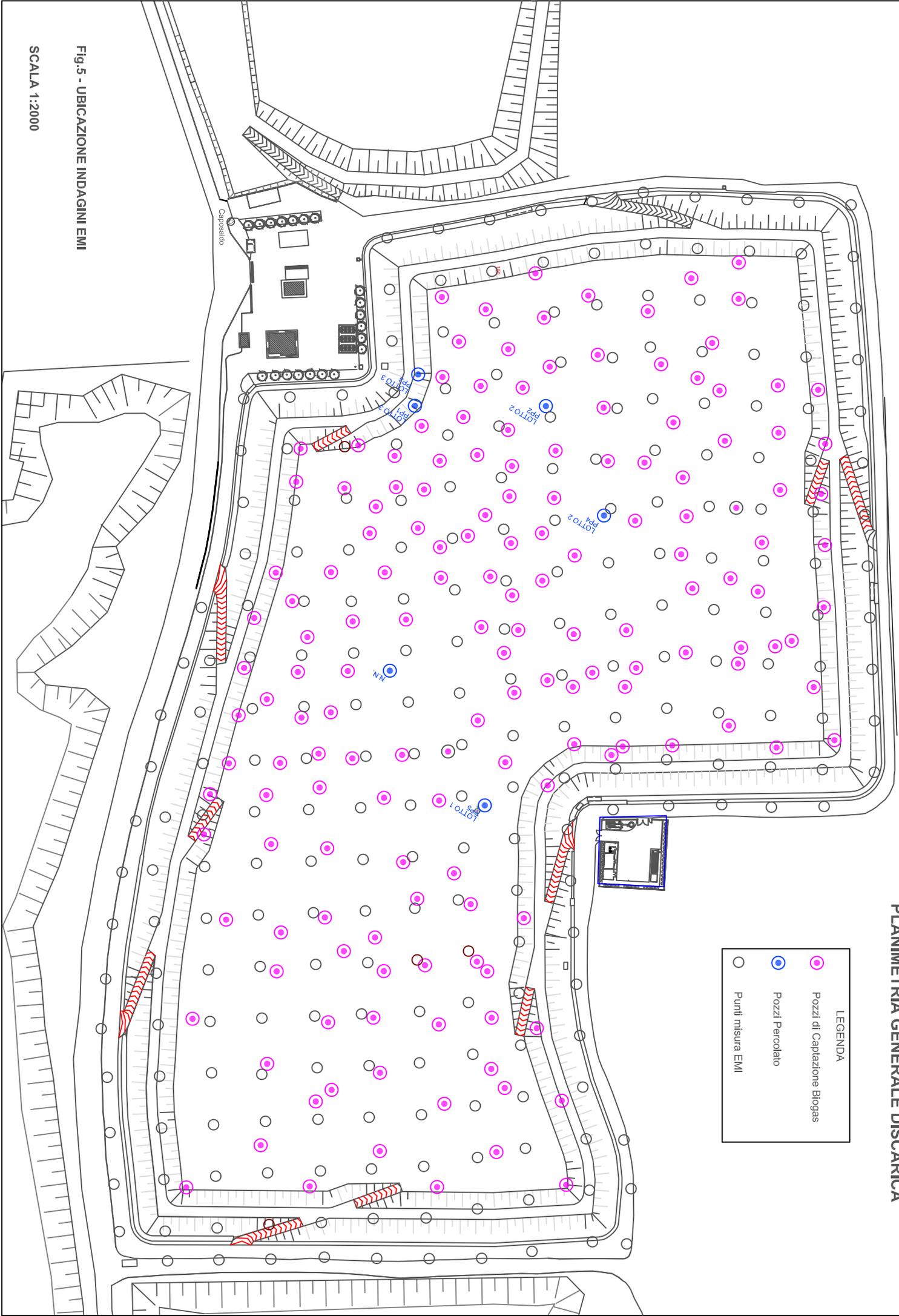


Fig. 5 - UBICAZIONE INDAGINI EMI

SCALA 1:2000



Complessivamente sono stati eseguiti:

- n. 12 profili longitudinali in direzione NW-SE che intersecando i nodi del grigliato originariamente definito risultano equidistanziati di 20 m;
- n. 12 profili trasversali in direzione NE-SW, equidistanziati fra loro di 40 m.

In aggiunta, sono stati eseguiti n. 2 profili perimetrali rispetto al corpo discarica, uno sulla fascia di terra disposta a mezza costa e avente quota topografica inferiore di circa 2-3 m rispetto alla sommità del corpo discarica e l'altro sul piano stradale in cui sono locati i vani tecnici.

Sono state acquisite complessivamente circa 11.000 misure, con una copertura areale nettamente superiore a quella prevista nel **Progetto esecutivo**.

6. Pre-processing delle misure sperimentali

Al termine delle operazioni di acquisizione delle misure di campo è stato effettuato il **pre-processing delle misure sperimentali**, consistito in tre distinte fasi: 1) analisi qualitativa delle misure sperimentali; 2) riposizionamento dei punti misura acquisiti in campo; 3) raggruppamento della sestina di misure e ricostruzione dei profili verticali.

L'analisi qualitativa dei dati viene effettuata al fine di individuare e rimuovere valori affetti da fonti di rumore localizzate e/o a errori strumentali.

Le possibili fonti di rumore possono essere legate alla presenza dei pozzetti di captazione del biogas e/o pozzi di percolato distribuiti sulla sommità del corpo discarica. Tali fonti di rumore possono essere facilmente rilevabili poiché sono generalmente associate ad anomalie con andamento lineare o puntuale laddove il profilo EMI sia stato acquisito in vicinanza di elementi metallici distribuiti linearmente o localizzati.

Gli errori strumentali sono tipicamente associati ad un non corretto posizionamento delle sonde durante le acquisizioni che può essere rilevato nelle acquisizioni in continuo poiché, a causa della presenza di piccoli ostacoli rinvenuti lungo lo stendimento, non sempre è possibile mantenere costante sia la distanza fra le bobine che l'andatura degli operatori che trasportano le bobine.

Inoltre, poiché la misura acquisita in campo è registrata dalla bobina ricevente che, a sua volta, è collegata via Bluetooth al datalogger, la posizione GPS della misura è riferita alla posizione della bobina ricevente e non al punto medio fra le due bobine, come assegnato convenzionalmente.



Pertanto, in ambiente GIS, è opportuno effettuare una procedura di riposizionamento di tutti i punti misura.

Fig. 6 riporta la mappa dei punti misura acquisiti con le varie configurazioni.

La densità di punti misura ottenuta con le varie configurazioni varia al variare della lunghezza del cavo selezionato poiché a parità di lunghezza del profilo viene acquisito un numero minore di punti per cavi di lunghezza maggiore. Al termine dell'operazione di riposizionamento, la sestina di misure corrispondenti alle sei differenti configurazioni, ossia i tre data set di misure acquisiti con i tre cavi di diversa lunghezza per ciascuna delle due configurazioni, orizzontale e verticale, è stata raggruppata e riferita a ciascun punto misura sulla sommità della discarica in modo da ricostruire profili verticali puntuali.

Tale operazione è propedeutica all'inversione dei dati elettromagnetici che fornirà il modello elettromagnetico del corpo discarica.



.....segue

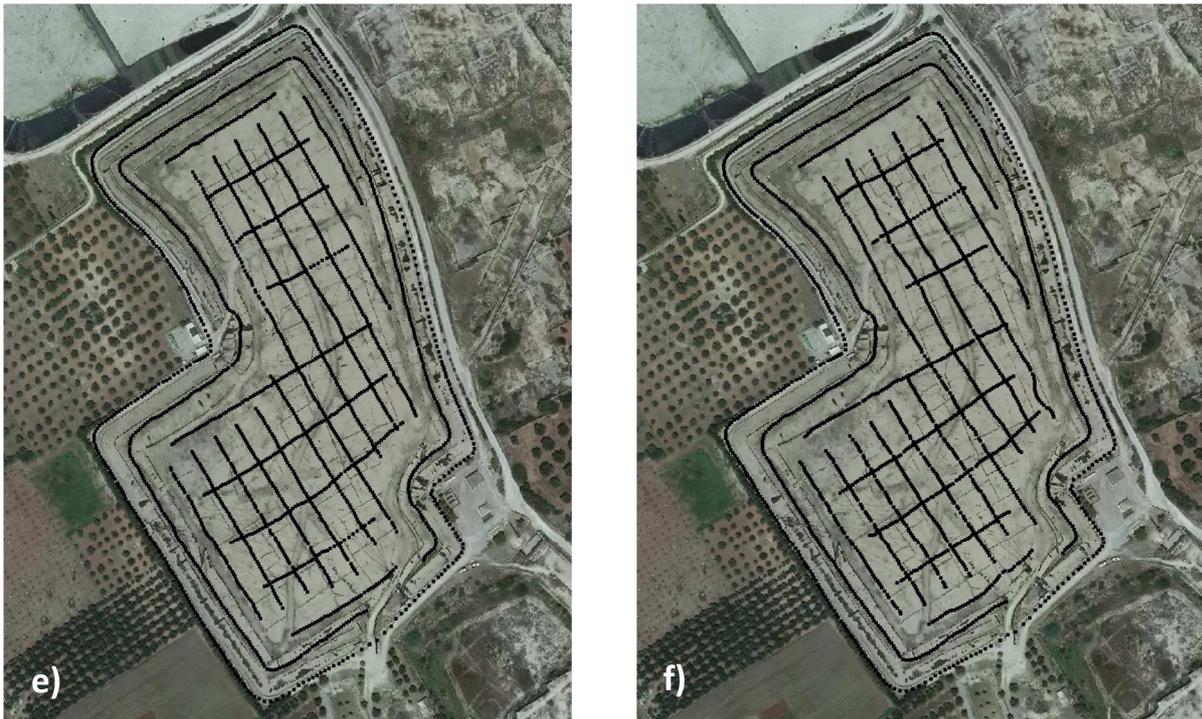


Fig. 6 - Mappa dei punti misura acquisiti con le varie configurazioni: a) 10-Lo; b) 10-Hi; c) 20-Lo; d) 20-Hi; e) 40-Lo; f) 40-Hi.

7. Inversione dei dati elettromagnetici

Nel report **“Relazione descrittiva sulle attività di indagini geofisiche”** consegnato ad APRILE 2020 sono state mostrate le immagini di conducibilità elettrica e fase apparenti.

Come riportato in quel report, tali mappe forniscono una rappresentazione qualitativa dei dati sperimentali.

La visualizzazione di mappe di conducibilità e di fase apparenti rappresenta la modalità maggiormente utilizzata per la restituzione delle misure elettromagnetiche.

Negli ultimi anni, si è consolidato un approccio più rigoroso di inversione dei dati elettromagnetici, seguendo la procedura utilizzata per tutte le altre tipologie di dati geofisici.

Infatti, i dati “apparenti” tengono conto di semplificazioni nella soluzione delle equazioni descrittive dell’elettromagnetismo che possono causare discrepanze rispetto ai valori “reali”.

Inoltre, come già rilevato in precedenza, le misure apparenti sono misure integrali nell’intero volume investigato e forniscono informazioni qualitative sullo stesso mezzo.

Pertanto, al fine di ricavare un modello elettromagnetico del corpo rifiuti investigato è necessario eseguire una procedura di inversione che consenta di ricavare la distribuzione



delle conducibilità σ del sottosuolo a partire da una distribuzione di osservazioni sperimentali.

Nel caso specifico, non essendo rispettata la condizione di basso numero di induzione, $B \ll 1$, è stato utilizzato un modello non-lineare in grado di minimizzare la funzione obiettivo data dalla differenza fra le misure osservate (dato misurato) e le misure predette (dato calcolato o modello forward). È stato utilizzato il codice di inversione FDEMtools (Deidda et al. 2019) in grado di calcolare modelli forward complessi in maniera più accurata rispetto ai pochi codici commerciali esistenti che, a causa della loro natura user-friendly, sono adatti per applicazioni più semplici.

Nella fase di inversione un prezioso supporto è stato fornito dal Prof. Deidda (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura Università di Cagliari) e dal Prof. Cassiani (Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova).

Il codice di inversione FDEMtools (Deidda et al. 2019) si basa sull'assunzione di un suolo stratificato in cui sia la conducibilità elettrica che la permeabilità magnetica non variano nello spazio compreso fra due osservazioni adiacenti.

Poiché i dati contengono sempre un certo grado di rumore, per minimizzare tale funzione obiettivo è necessario regolarizzare la soluzione numerica.

Il codice è in grado di generare sia un modello di conducibilità elettrica che di fase, nota una delle due componenti.

Nel caso specifico, l'elevata conducibilità elettrica del percolato posto sul fondo della discarica, confrontabile con la conducibilità dell'acqua di mare, ha influenzato la distribuzione della componente in fase, impedendo di raggiungere la convergenza del modello di inversione della permeabilità magnetica.

Pertanto, per quanto riguarda esclusivamente l'analisi della componente in fase, verranno considerate le mappe di fase apparente.

Considerato che le tubazioni drenanti e collettori, mostrati in Fig. 2, sono ripartiti in maniera omogenea sull'intero corpo discarica è plausibile ipotizzare che lo strato di percolato sia distribuito uniformemente sui tre lotti. Peraltro, negli anni, il gestore non ha segnalato anomalie nel sistema di raccolta del percolato che possano indurre ad ipotizzare accumuli localizzati del percolato stesso. In questo modo il disturbo sulle misure apparenti potrebbe considerarsi costante e quindi l'eventuale presenza di masse metalliche genererebbe ugualmente un significativo contrasto del segnale in fase rispetto al materiale circostante.



Il modello non lineare utilizzato nell'inversione dei dati ha raggiunto una profondità d'investigazione massima pari a 22 m, più della metà di quella teorica fornita dalla casa costruttrice, tuttavia sufficiente per raggiungere gli obiettivi dell'indagine. Tale profondità d'investigazione, infatti, ha consentito di ricavare informazioni sull'intero corpo rifiuti fino a spingersi in una porzione del basamento calcarenitico su cui la discarica si attesta. Infatti, considerata la differente quota del fondo dei tre lotti precedentemente riportata, il modello elettromagnetico si è approfondito per circa 7 m al di sotto del fondo discarica in corrispondenza del lotto I e 3-4 m al di sotto dei lotti II e III. L'errore di modello è stato stimato intorno al 10%.

8. Modello elettromagnetico del corpo discarica

In Fig. 7 sono riportate le mappe relative al modello di conducibilità elettrica per differenti profondità d'indagine.

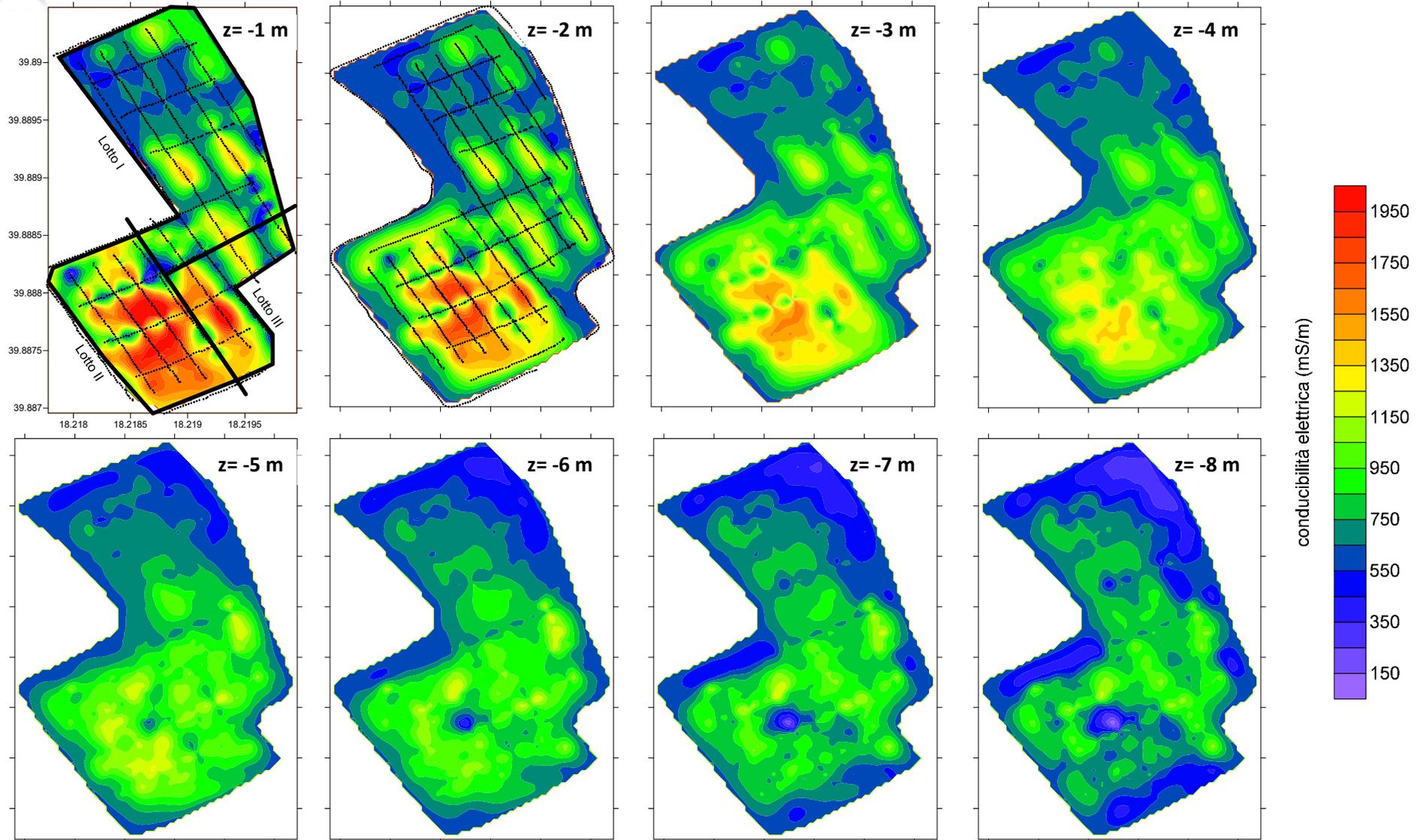
Sono state ricostruite 22 mappe di conducibilità con progressiva 1 m a partire dalla profondità di $z=-1$ m dalla sommità della discarica, in modo da evidenziare graduali variazioni di conducibilità con la profondità.

Le mappe sono state ottenute con il software Surfer interpolando mediante kriging gli output del modello invertito. I punti del modello sono stati sovrapposti alle mappe di profondità $z=-1$ m, $z=-2$ m e $z=-10$ m, ossia in corrispondenza delle variazioni topografiche rilevate sul corpo discarica.

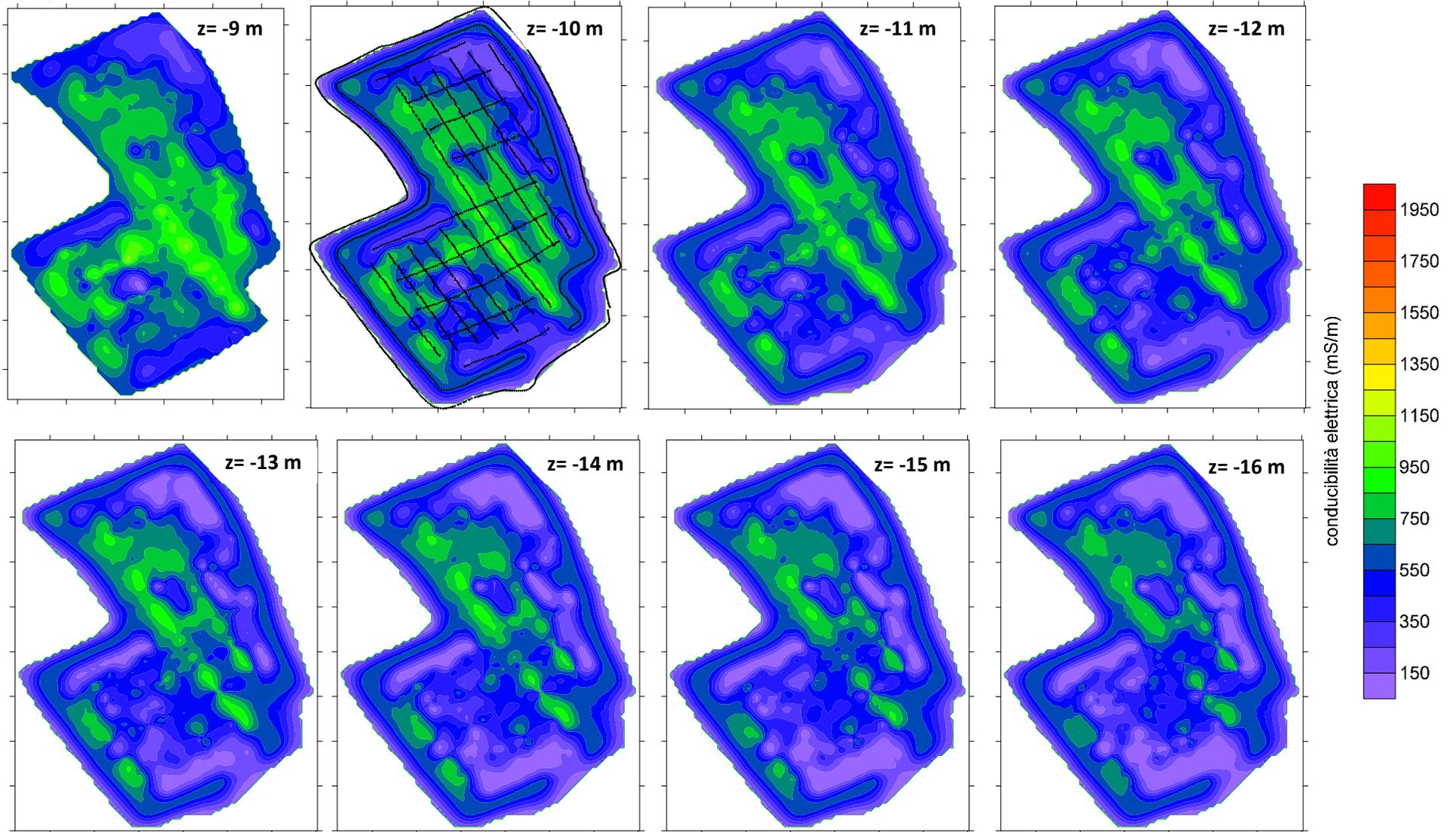
Infatti, alla profondità di $z=-2$ m, sono state incluse le misure perimetrali acquisite sulla fascia di terra disposta a mezza costa, e alla profondità di $z=-10$ m, le misure perimetrali acquisite sul piano stradale lungo la stradina sterrata che costeggia l'intero corpo discarica.

Nella porzione più superficiale (3-5 m dalla sommità del corpo discarica) il modello di conducibilità elettrica riporta valori di conducibilità più elevati in corrispondenza del lotto II e in parte del lotto III ($\sigma > 2000$ mS/m) rispetto a quelli rilevati nel lotto I ($\sigma \approx 700$ mS/m).

Con l'aumentare della profondità, fino a $z=-10$ m, è stata rilevata una graduale diminuzione della conducibilità elettrica nei lotti II e III fino a raggiungere valori compresi fra 600 e 700 mS/m, ossia i valori rilevati nel lotto I. A partire dalla profondità $z=-10$ m il modello include la fascia perimetrale esterna al corpo discarica. Al di sotto della profondità $z=-10$ m e fino alla profondità massima raggiunta, ossia $z=-22$ m, è stata rilevata una graduale diminuzione della conducibilità elettrica, con un range di valori variabili 300 e 700 mS/m.



.....segue



.....segue

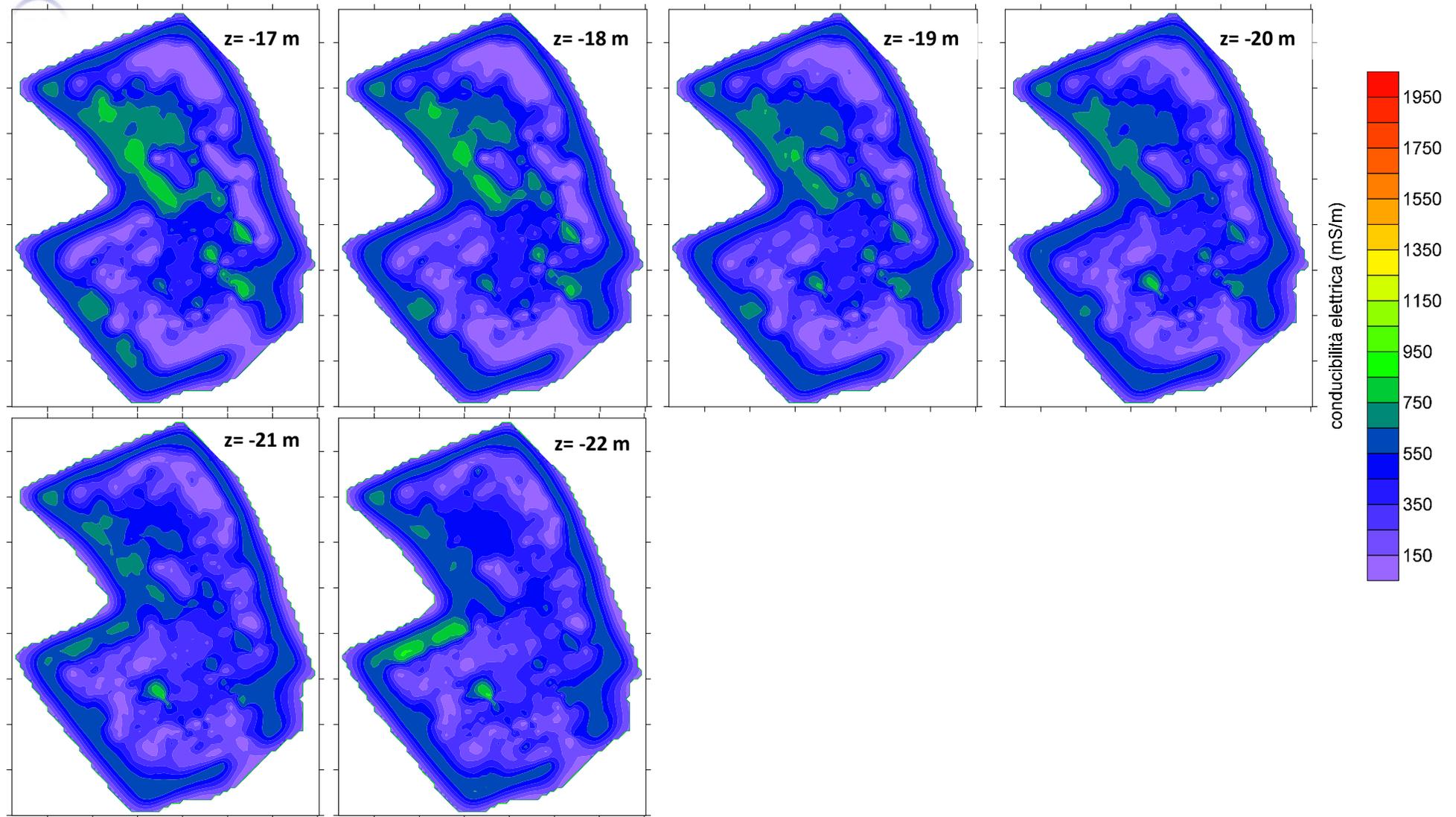


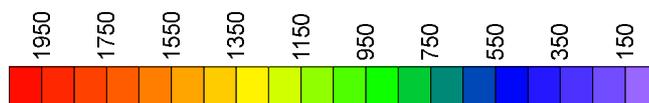
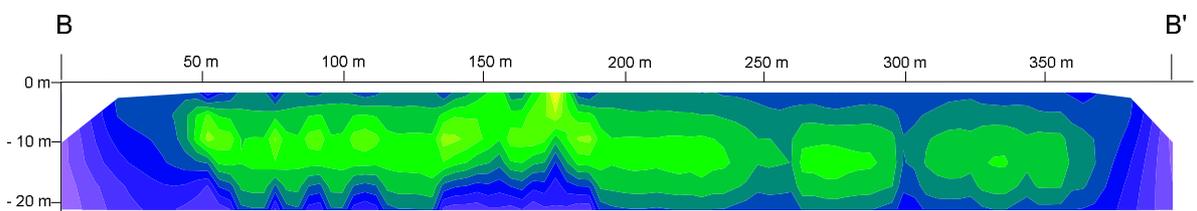
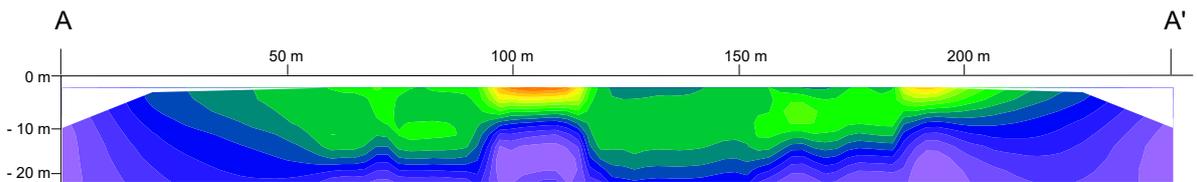
Fig.7 - Mappe di conducibilità elettrica ricavate dal modello elettromagnetico. Sulla mappa $z=-1$ m sono riportati i confini di ciascun lotto

Fig. 8 mostra le tracce delle sezioni ricavate dal modello di conducibilità elettrica.



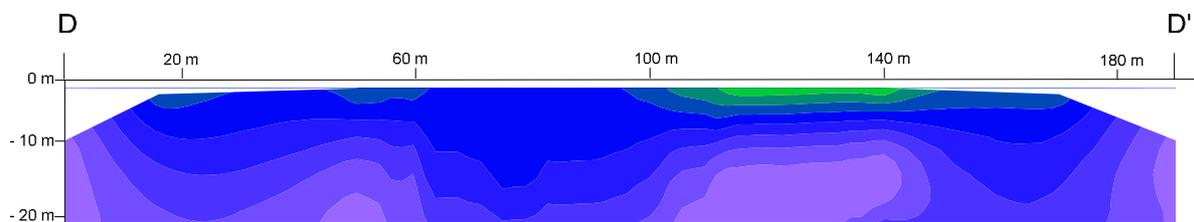
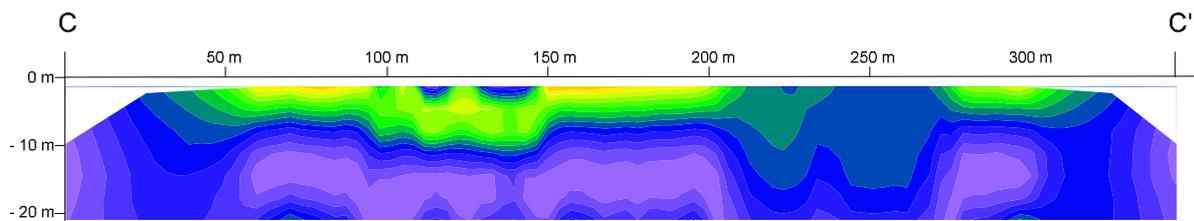
Fig. 8 - Traccia delle sezioni ricavate dal modello di conducibilità elettrica.

Le sezioni confermano la presenza di un corpo conduttivo superficiale che sovrasta un mezzo più resistivo. La superficie di separazione fra i due mezzi non è sempre netta e facilmente individuabile.



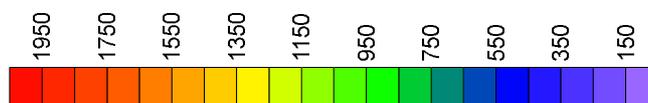
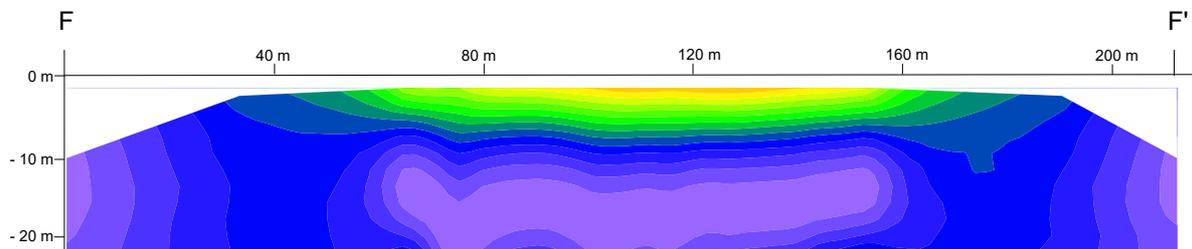
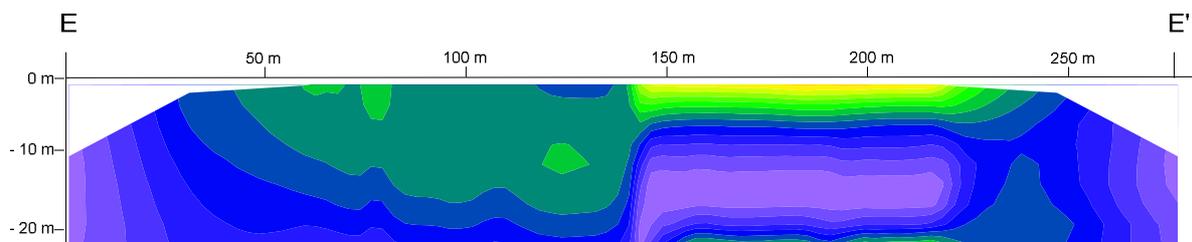
conducibilità elettrica (mS/m)

.....segue



conducibilità elettrica (mS/m)

.....segue



conducibilità elettrica (mS/m)

Fig. 9 – Sezioni di conducibilità elettrica.



Per quanto riguarda le misure di fase, non avendo ricavato un robusto modello d'inversione della permeabilità magnetica, sono state analizzate le mappe della fase apparente.

Come già riportato in precedenza, le misure apparenti rappresentano misure integrali su tutto lo spessore investigato, spessore variabile a seconda della configurazione scelta.

Esse pertanto forniscono un'indicazione qualitativa sull'andamento della permeabilità magnetica del mezzo investigato.

Fig. 9 mostra le mappe di fase apparenti distribuite per differenti configurazioni (Low Depth, 9 a-c e High Depth, Fig. 9 d-f). In queste mappe non sono state incluse le misure perimetrali poiché fortemente influenzate dalla presenza dei vani tecnici presenti all'ingresso del sito e del trasformatore ubicato nelle vicinanze del lotto I e II.

I valori rilevati nelle mappe di fase variano da -150 a 650 ppt.

Misure negative possono essere relative a malfunzionamento dello strumento, inclusi effetti di surriscaldamento della bobina trasmittente, o a misure al di sotto della sensibilità dello strumento stesso (0.1 mS/m).

Negli strati più superficiali sono state rilevate anomalie localizzate o ad andamento lineare, probabilmente associabili a fonti di rumore legate alla presenza dei presidi quali pozzetti di captazione del biogas e/o pozzetti di raccolta del percolato.

Alle maggiori profondità d'investigazione, localmente è stato rilevato un aumento graduale della fase e un'assenza di significative anomalie localizzate.

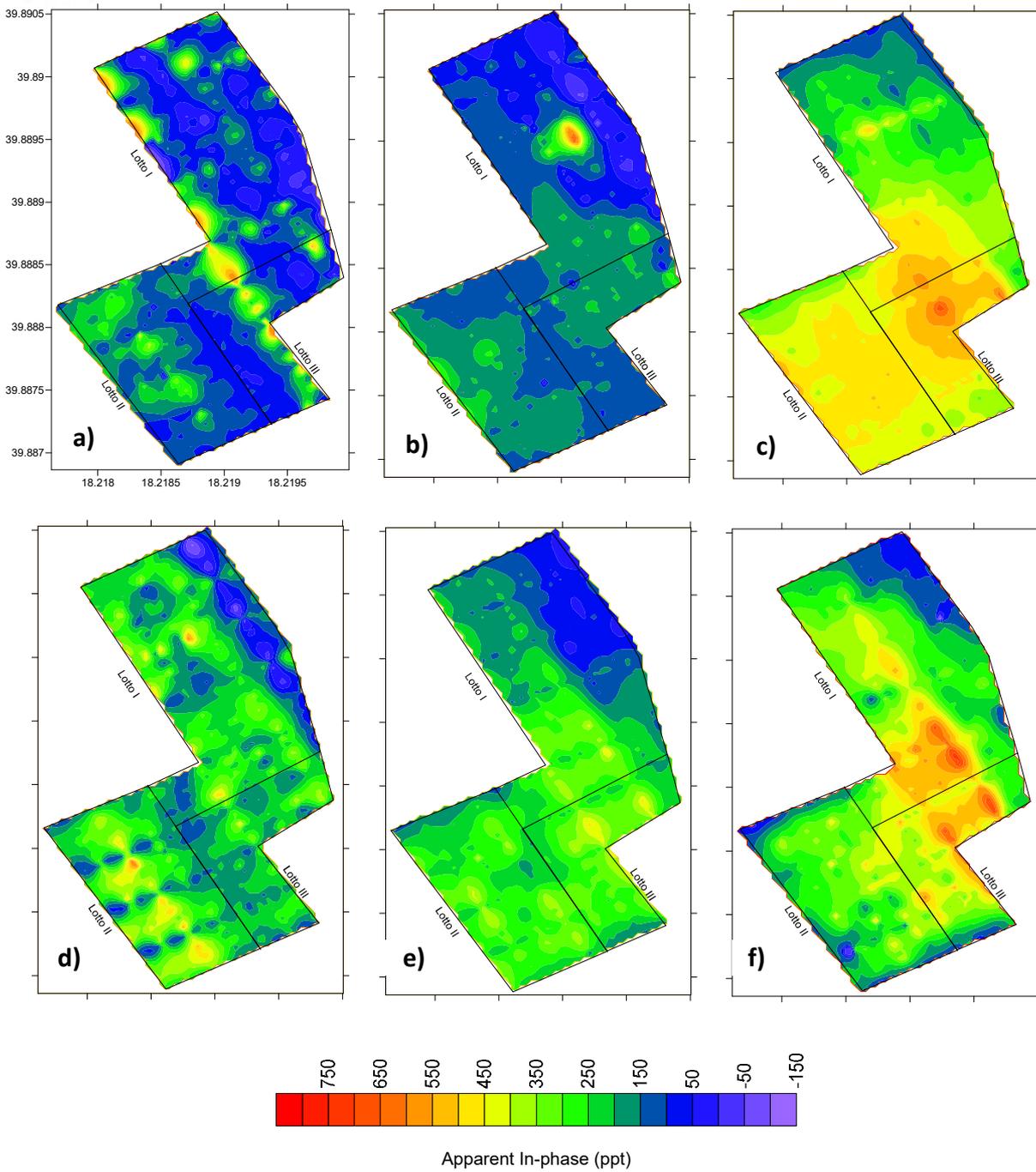


Fig. 10 – Mappe di fase apparente per differenti configurazioni: a) 10-Lo; b) 20-Lo; c) 40-Lo; d) 10-Hi; e) 20-Hi; f) 40-Hi



9. Interpretazione dei risultati

Nel seguente paragrafo viene fornita un'interpretazione dei risultati del modello elettromagnetico con particolare riferimento al raggiungimento degli obiettivi prefissati dallo studio.

1) Caratterizzazione geofisica del corpo rifiuti ed individuazione della potenziale presenza di contaminazione da composti organici con contenuto di PCB.

Il modello ha consentito di caratterizzare il corpo rifiuti per tutto il suo spessore, variabile fra 15 e 19 m.

Nella porzione più superficiale (3-5 m dalla sommità del corpo discarica) è stata rilevata una diffusa eterogeneità, come evidenziato dalla differente distribuzione di conducibilità elettrica fra i lotti II e III e il lotto I.

Valori più elevati di conducibilità rilevati nei lotti II e III possono essere attribuiti ad una differente tipologia di rifiuto o ad un rifiuto avente maggiore grado di umidità.

Con l'aumentare della profondità, il carico litostatico provoca una disidratazione del pacco di rifiuti più antichi, causando una diminuzione della conducibilità elettrica del mezzo.

Tale ipotesi è supportata dal fatto che sulla sommità della discarica, dismessa gradualmente a partire dai primi anni 2000, è stata eseguita una copertura provvisoria dei singoli lotti, che ha impedito l'afflusso di apporti meteorici all'interno.

La mancata localizzazione di forti anomalie di bassa conducibilità elettrica all'interno del corpo rifiuti unitamente alla sua graduale variazione esclude la presenza di composti organici con contenuto di PCB diffusi nel corpo rifiuti.

2) Stima dell'estensione della suddetta contaminazione organica.

L'ipotesi originaria prevedeva che la contaminazione organica fosse stata raccolta in fusti metallici abbancati sul fondo della discarica e concentrati in una specifica area del lotto III.

L'eventuale presenza di un numero considerevole di fusti metallici concentrati in una specifica zona della discarica avrebbe generato un rilevante incremento di segnale in corrispondenza della presunta zona di abbancamento.

L'analisi delle mappe di fase apparente esclude la presenza di fusti metallici concentrati in una zona della discarica poiché non sono state rilevate significative anomalie in corrispondenza delle profondità d'investigazione più elevate.



Analoga considerazione può essere estesa all'individuazione di fusti di natura plastica che avrebbero generato un'anomalia di bassa conducibilità concentrata nella zona di accumulo.

3) Verifica dell'integrità della geomembrana posta sul fondo della discarica stessa.

Il modello elettromagnetico ha consentito di ricavare informazioni sulla porzione del basamento calcarenitico sottostante il corpo discarica, approfondendosi per circa 7 m al di sotto del fondo discarica in corrispondenza del lotto I e 3-4 m al di sotto dei lotti II e III. Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi delle mappe relative alle profondità da $z=-14$ m a $z=-22$ m, poiché tali mappe mostrano il comportamento elettrico nella zona di transizione fra il corpo rifiuti sovrastante e il basamento calcarenitico sottostante.

Infatti, come già indicato in precedenza, la quota di attestazione del fondo del lotto I è di circa -15 m mentre per i lotti II e III è pari a circa -18/-19 m dalla sommità della discarica.

La risoluzione del modello non è in grado di discriminare queste piccole variazioni topografiche se il contrasto di conducibilità fra i mezzi non è significativo.

Peraltro, in questa zona è stato rilevato un basso contrasto di conducibilità elettrica, se si confrontano i valori di conducibilità elettrica del corpo rifiuti e del basamento calcarenitico, sia della parte sottostante la discarica che della fascia perimetrale esterna al corpo discarica.

Tale evidenza non è sorprendente se si considera che la natura porosa del mezzo calcarenitico può conferire una conducibilità elettrica molto variabile a causa di diversi fattori intrinseci (porosità efficace, dimensioni dei pori, disposizione dei granuli), oltre che al grado di saturazione e pressione litostatica.

Un indicatore fondamentale per la verifica della tenuta del telo impermeabile in HDPE è rappresentato dal forte contrasto di conducibilità che si genera fra il percolato e il mezzo circostante, in caso di lacerazione della geomembrana.

Tale contrasto è acuito dall'elevatissima conducibilità elettrica misurata nel percolato, confrontabile con quella dell'acqua di mare.

Infatti, in caso di lacerazione della geomembrana, la diffusione del percolato negli strati sottostanti crea una significativa anomalia di conducibilità elettrica nella zona della lacerazione. Peraltro, in caso di integrità della geomembrana, il modello non è in grado di rilevare il modesto spessore del percolato posto al di sopra della geomembrana.

Nel caso in studio, l'assenza di anomalie diffuse sul fondo della discarica garantisce la tenuta della geomembrana.



10. Conclusioni

Il presente studio è stato finalizzato alla caratterizzazione geofisica della discarica dismessa di rifiuti solidi urbani sita in località Burgesi-Ugento.

Nella suddetta discarica la copertura impermeabile in HDPE posta sulla sommità del corpo rifiuti rende particolarmente oneroso l'utilizzo delle tradizionali metodologie geofisiche di tipo elettrico. Infatti, tali metodologie presuppongono la perforazione del telo per l'inserimento degli elettrodi e il successivo ripristino in quanto la presenza del telo inibisce il flusso di corrente. Al fine di salvaguardare l'integrità del telo, di non comprometterne la funzione di "capping", di garantire la sicurezza dei presidi presenti sulla discarica e, al tempo stesso, fornire adeguate risposte scientifiche ai quesiti posti nella convenzione, è stato utilizzato l'approccio geofisico di tipo elettromagnetico mediante tecnica EMI (Electromagnetic Induction) che, basandosi sul principio di induzione elettromagnetica, non richiede alcun contatto tra il sensore e il suolo.

Benché la tecnica EMI sia comunemente utilizzata per indagini di carattere geologico ed idrogeologico, la scelta di tale soluzione in contesti così complessi come quelli di una discarica dismessa si è rivelata innovativa nel panorama scientifico internazionale, come dimostrato dall'assenza di casi studio riportati in letteratura.

Il basso rumore ambientale registrato nei sopralluoghi condotti sul sito in esame ha consentito di acquisire misure in continuo su tutto il corpo rifiuti. Tale soluzione ha permesso di acquisire un numero di punti misura molto più elevato (oltre 11000 dati) rispetto a quello previsto nel Progetto Esecutivo.

Il modello elettromagnetico, ricavato mediante il codice di inversione FDEMtools, sviluppato dall'Università di Cagliari e particolarmente efficace in contesti molto complessi in cui la risposta strumentale è non lineare, ha consentito di caratterizzare da un punto di vista geofisico il corpo rifiuti e di fornire le risposte ai quesiti posti.

In sintesi il modello elettromagnetico ha evidenziato:

- l'assenza di anomalie di conducibilità elettrica associabili alla presenza di composti organici con contenuto di PCB diffusi nel corpo rifiuti;
- l'assenza di anomalie diffuse sul fondo della discarica a garanzia della tenuta della geomembrana.



Istituto di Ricerca Sulle Acque
UOS Bari

- l'assenza di fusti metallici poiché l'analisi delle mappe di fase apparente non ha rilevato anomalie significative in corrispondenza delle profondità d'investigazione più elevate.

Il Responsabile Scientifico

Dott. Lorenzo De Carlo

Lorenzo De Carlo



References

- Boaga, J., Ghinassi, M., D'Alpaos, A., Deidda, G.P., Rodriguez, G., Cassiani, G. (2018). Geophysical investigations unravel the vestiges of ancient meandering channels and their dynamics in tidal landscapes. *Sci. Rep.* 8, 1708.
- Cassiani, G., Ursino, N., Deiana, R., Vignoli, G., Boaga, J., Rossi, M., Perri, M.T., Blaschek, M., Duttmann, R., Meyer, S., Ludwig, R., Soddu, A., Dietrich, P., Werban, U. (2012). Noninvasive monitoring of soil static characteristics and dynamic states: a case study highlighting vegetation effects on agricultural land. *Vadose Zone J* 11(13).
- Deidda, G. P., Diaz de Alba, P., Fenu, C., Lovicu, G., Rodriguez, G. (2019). FDEMtools: a MATLAB package for FDEM data inversion. *Numerical Algorithms* <https://doi.org/10.1007/s11075-019-00843-2>
- Dragonetti, G., Comegna, A., Ajeel, A., Deidda, G.P., Lamaddalena, N., Rodriguez, G., Vignoli, G., Coppola, A. (2018). Calibrating electromagnetic induction conductivities with time-domain reflectometry measurements. *Hydrol. Earth. Syst. Sc.* 22, 1509–1523.
- Huang, H., SanFilipo, B., Oren, A., Won, I.J. (2007). Coaxial coil towed EMI sensor array for uxo detection and characterization. *J. Appl. Geophys.* 61(3), 217–226.
- Lascano, E., Martinelli, P., Osella, A.(2006). EMI data from an archaeological resistive target revisited. *Near Surf. Geophy.* 4(6), 395–400.
- Martinelli, P., Duplaa, M.C. (2008). Laterally filtered 1D inversions of small-loop, frequency-domain EMI data from a chemical waste site. *Geophysics* 73(4), F143–F149.
- McNeill, J.D.(1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Report TN-6 Geonics Limited (1980)
- Osella, A., de la Vega, M., Lascano, E.(2005). 3D electrical imaging of an archaeological site using electrical and electromagnetic methods. *Geophysics* 70(4), G101–G107.
- Yao, R., Yang, J. (2010). Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Agric. Water Manag.* 97(12), 1961–1970.



Istituto di Ricerca Sulle Acque
UOS Bari

ALLEGATO A

Documentazione fotografica delle attività di indagine geofisica



Preparazione delle attività di indagini: definizione dei nodi del grigliato regolare 20 m x 20 m,



Sonde elettromagnetiche di trasmissione e ricezione utilizzate nell'indagine.



Configurazione Vertical Magnetic Dipole (VMD) con dipoli magnetici distanziati di 10 metri.



Configurazione Horizontal Magnetic Dipole (HMD) con dipoli magnetici distanziati di 10 metri.



Configurazione Vertical Magnetic Dipole (VMD) con dipoli magnetici distanziati di 20 metri.



Configurazione Horizontal Magnetic Dipole (HMD) con dipoli magnetici distanziati di 20 metri.



Configurazione Vertical Magnetic Dipole (VMD) con dipoli magnetici distanziati di 40 metri.



Configurazione Horizontal Magnetic Dipole (HMD) con dipoli magnetici distanziati di 40 metri