

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	2 dicembre 2011	49-64	2012
--------------------	--------------------------------	-----------------	-------	------

ENRICO FARINATTI (\*), ROSSELLA MEROLA (\*), ROBERTO PEDRON (\*\*)  
& ANDREA SOTTANI (\*\*)

## INDAGINI INTEGRATE GEOFISICHE, IDROGEOLOGICHE E CHIMICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA ED AMBIENTALE DELL'IMPIANTO DI DISCARICA ESAURITA DI CAMPARDO A CORDIGNANO (TV)

**Abstract** - ENRICO FARINATTI, ROSSELLA MEROLA, ROBERTO PEDRON & ANDREA SOTTANI - Integrated geophysical, hydrogeological and chemical surveys for hydrogeological and environmental characterization of Campardo landfill in Cordignano (TV).

The purpose of this study was to provide the Public Administration an updated knowledge of the site in order to issue preparatory administrative and technical requirements by the competent authority of *post-mortem* ordinance. More specifically the plant still puts out a wide and abnormal production of leachate, which was confirmed by the high and persistent recorded levels, even with an annual average withdrawal of about 3400 tons of sewage. The investigations carried out were therefore divided into different phases of work: work alongside «classic» control and monitoring that have affected especially the groundwater and leachate, geoelectric surveys were conducted with measurements of resistivity and induced polarization, which concerned the whole area of the landfill. The geophysical surveys have allowed an examination of the conceptual model of the landfill and the identification of critical plant. The geophysical data were in perfect agreement with direct observations and allowed to split the dump into three distinct sectors and especially to understand the mechanism of charging of the site.

**Key words:** Landfill - Leachate - Electrical tomography - Resistivity - Induced polarization.

**Riassunto** - ENRICO FARINATTI, ROSSELLA MEROLA, ROBERTO PEDRON & ANDREA SOTTANI - Indagini integrate geofisiche, idrogeologiche e chimiche per la caratterizzazione idrogeologica ed ambientale dell'impianto di discarica esaurita di Campardo a Cordignano (TV).

---

(\*) E. Farinatti, R. Merola - IND.A.G.O.snc, via Balzan, 1 - I-45100 Rovigo.

(\*\*) R. Pedron, A. Sottani - Sinergeo srl, Contrà Pozzetto, 4 - I-36100 Vicenza.

Scopo dello studio è stato quello di fornire alla P.A. un aggiornamento conoscitivo del sito in ordine agli adempimenti tecnico amministrativi propedeutici all'emissione da parte dell'Amministrazione Provinciale competente del decreto di *post-mortem*. Più in dettaglio lo stato di fatto dell'impianto metteva e mette tutt'oggi in evidenza un'ampia ed anomala produzione di percolato, confermata da elevati e persistenti battenti nei punti di controllo, anche a fronte di un'asporto medio annuo di circa 3400 tons di liquami. Le indagini eseguite pertanto sono state articolate in differenti fasi di lavoro: a fianco delle attività «classiche» di controllo e monitoraggio che hanno interessato in particolare la falda e il percolato, sono state condotte indagini geoelettriche con misure di resistività e polarizzazione indotta, che hanno interessato tutta l'area di discarica. Le indagini geofisiche hanno consentito una verifica del modello concettuale della discarica e quindi l'individuazione delle criticità dell'impianto stesso. I dati geofisici sono risultati in perfetto accordo con le osservazioni dirette e hanno consentito di suddividere la discarica in tre comparti distinti e soprattutto di capire il meccanismo di ricarica della discarica stessa.

**Parole chiave:** Discarica - Percolato - Tomografia elettrica - Resistività - Polarizzazione indotta.

## 1. INTRODUZIONE

Scopo del lavoro è stato quello di confrontare dati ottenuti da indagini di tipo idrogeologico, con quelli ottenuti da indagini di tipo geofisico, per verificare il meccanismo di ricarica di percolato della discarica di Campardo a Cordignano (TV), dal momento che, nonostante quantitativi ingenti asportati (3400 tons medie annue), risulta avere sempre battenti consistenti in corrispondenza dei punti di controllo. Questo fatto impedisce tra l'altro di emettere il decreto «post mortem» da parte della Pubblica Amministrazione competente.

L'area della discarica è posta nella pianura trevigiana che, dal punto di vista idrogeologico, è caratterizzata dall'acquifero indifferenziato composto prevalentemente da ghiaie e sabbie ad elevata permeabilità. La Fig. 1 riporta un inquadramento dell'area.

## 2. INDAGINE

L'indagine completa è stata realizzata in due momenti distinti: la prima fase nel 2007 caratterizzata da rilievi diretti di tipo idrogeologico riguardanti la falda e la soggiacenza del percolato e la seconda nel 2009 in cui sono state realizzate una campagna di misure geoelettriche ed una di rilievi idrogeologici ed analisi chimiche.

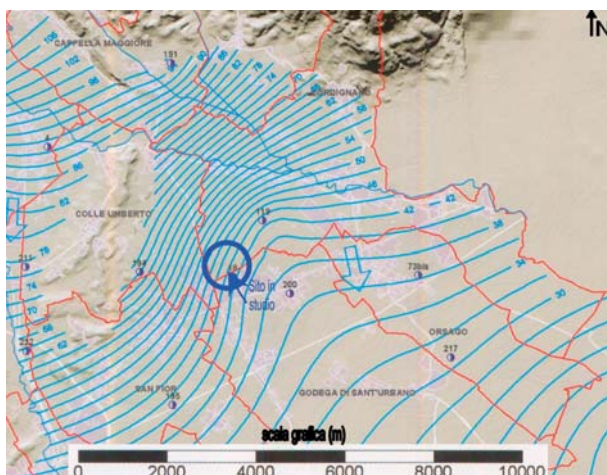


Fig. 1 - Inquadramento idrogeologico dell'area.

## 2.1 Prima fase di indagine

La prima fase è stata suddivisa in tre macroaree:

- Biogas
- Falda acquifera
- Percolato

Per quanto riguarda il Biogas è stata effettuata una campagna per rilevare le pressioni all'interno del corpo di discarica. Le misure, effettuate in data 21 e 22 settembre 2006 hanno messo in evidenza una zona a pressione maggiore nella parte meridionale della discarica con valori compresi tra 25 e 40 mbar, mentre i lotti 5 e 6 hanno fatto registrare delle pressioni una pressione negativa, compresa fra 4 e 14 mbar, indicante un potenziale flusso di aria dall'atmosfera al corpo della discarica.

Per i rilievi riguardanti la falda acquifera sono state installate due sonde piezoresistive ed un pluviometro per la registrazione e la quantificazione degli eventi meteorici. I risultati individuano il tetto della falda a quote comprese fra i 40 e i 47 m s.l.m.

Uno studio simile è stato svolto per ottenere una stima del percolato presente all'interno del corpo. Attraverso due sonde è stato monitorato in continuo il livello del percolato, ed è emerso che il carico sembra tendere verso livelli di equilibrio, nonostante i continui prelievi.

Sono stati quindi elaborati 3 grafici (Figg. 2, 3, 4) che mettono in relazione i dati acquisiti:

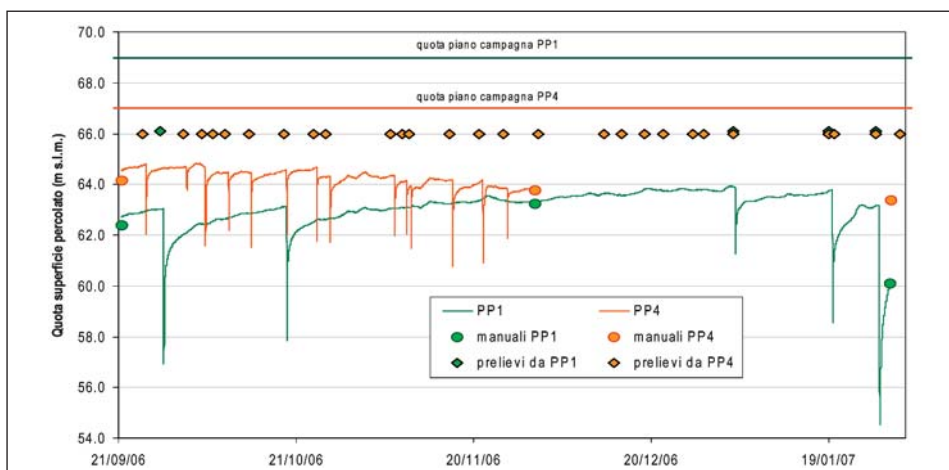


Fig. 2 - Livelli di percolato.

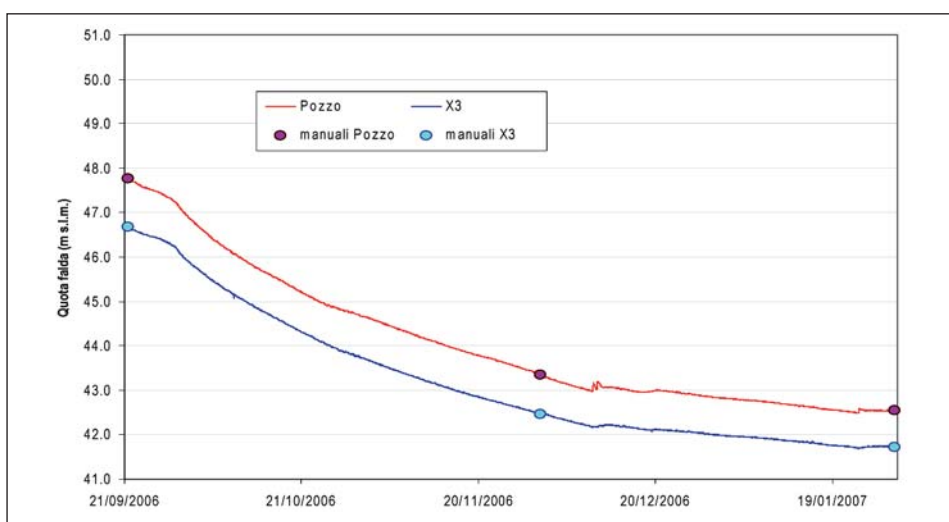


Fig. 3 - Livelli freatici.

Le evidenze analitiche e le misure effettuate hanno permesso di sviluppare il seguente modello concettuale preliminare della discarica e delle sue relazioni con i diversi comparti ambientali (atmosfera e sottosuolo).

La quantità di percolato «nativo» non è nota, ma considerando lo spessore saturo e assumendo una continuità idraulica è stato stimato, in via del tutto preliminare e cautelativa, che fosse presente nel corpo della discarica un volume totale di circa 390.000 m<sup>3</sup> di percolato.

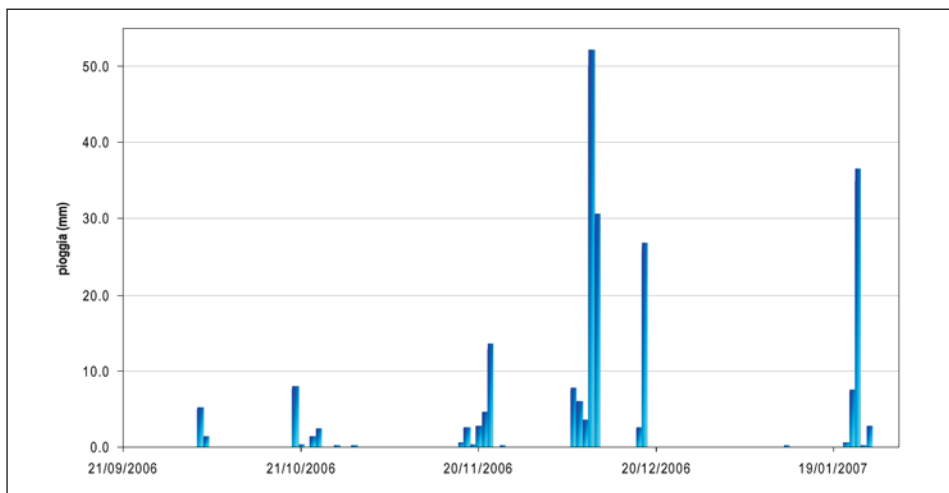


Fig. 4 - Precipitazioni.

## 2.2 Seconda fase di indagine: prospezione geoelettrica

La seconda fase di indagini ha visto la realizzazione di una campagna geofisica e una chimica.

Nello specifico dell'indagine geofisica, essa è consistita nell'esecuzione di 12 stendimenti di tomografia elettrica, partendo dal lato N della discarica e procedendo con direttrici subparallele verso il margine meridionale, mantenendo un'interdistanza di circa 30-35 m tra due profili contigui. Per ogni stendimento si sono condotte sia misure di resistività che di Polarizzazione Indotta.

La resistività elettrica rappresenta una delle proprietà fisiche più utilizzate per l'esplorazione geofisica del sottosuolo, grazie soprattutto all'ampio spettro di valori che essa può assumere al variare della natura dei corpi investigati. Questa metodologia rappresenta uno dei sistemi d'indagine più conosciuti e affidabili, le cui principali applicazioni consentono di:

- ricostruire la stratigrafia di massima dei terreni;
- rilevare la presenza di strutture sepolte;
- effettuare ricerche idriche o di acquiferi a diverso grado salino;
- monitorare movimenti degli acquiferi stessi o di fluidi in generale;
- mappare siti contaminati.

Tale sistema d'indagine consente di ottenere la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, elettricamente disomogeneo, immettendo una corrente continua mediante due elettrodi conficcati nel terreno, detti convenzionalmente

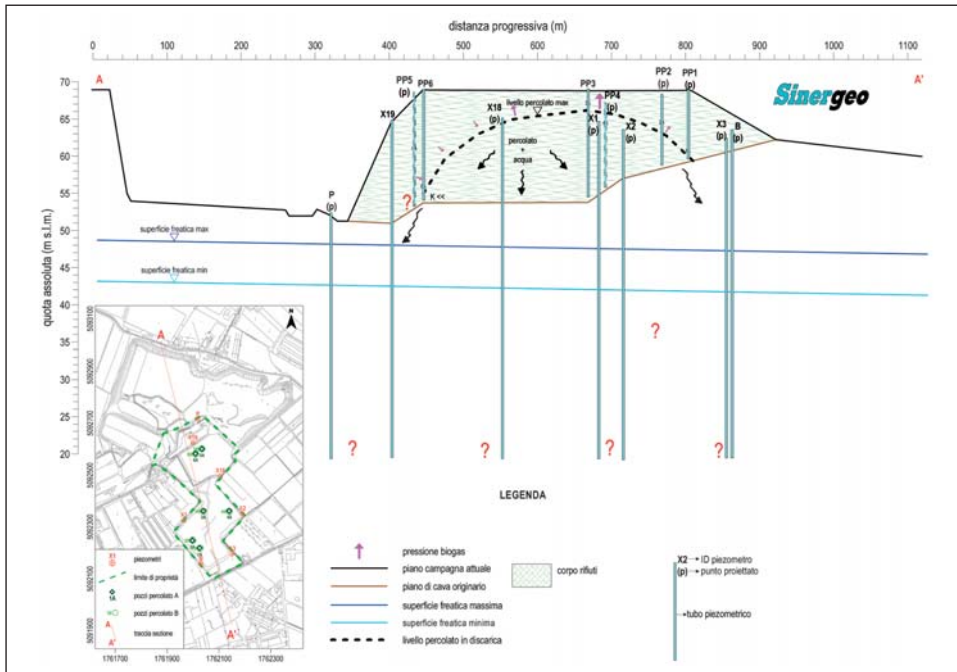


Fig. 5 - Schema concettuale della discarica.

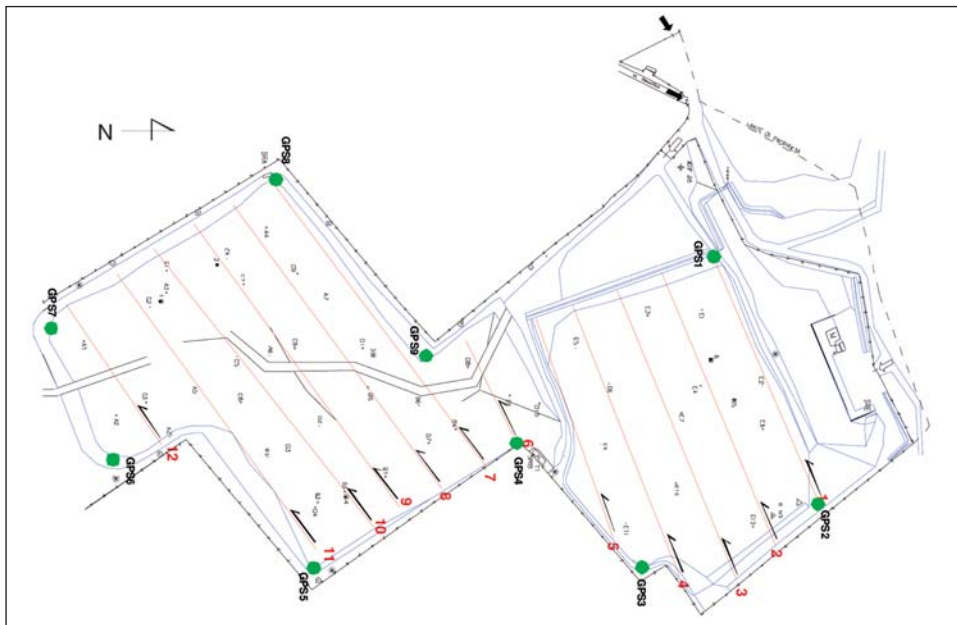


Fig. 6 - Ubicazione stendimenti di tomografia elettrica.

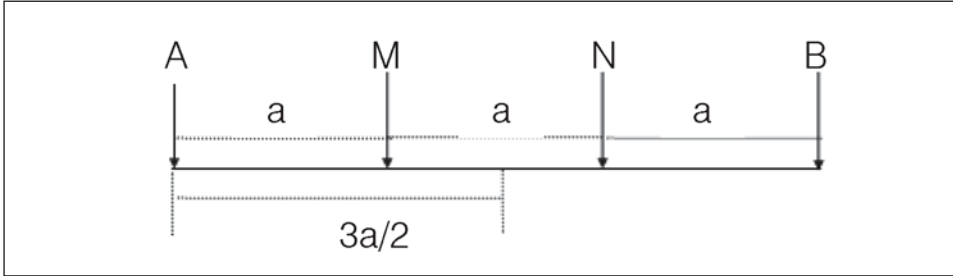


Fig. 7 - Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo WENNER, comunemente utilizzato per l'acquisizione di dati di resistività elettrica. AB: elettrodi di corrente; MN: elettrodi di potenziale.

AB, e misurando contemporaneamente la differenza di potenziale (d.d.p.) associata al campo elettrico generato tra due elettrodi distinti dai primi, detti convenzionalmente MN (Fig. 7).

Variando la distanza tra gli elettrodi A e B, o tra M e N, o tra AB e MN, e misurando ogni volta la corrente immessa agli AB e la differenza di potenziale «d.d.p.» risultante agli MN, si ottiene la resistività detta apparente, secondo la formula:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \text{ dove } k = \pi \frac{AM * AN}{MN} \quad (\Omega m)$$

in cui k è la costante geometrica del dispositivo quadripolare e dipende soltanto dalle distanze interelettrodiche.

Il valore di resistività apparente varia in funzione:

- a) della posizione reciproca degli elettrodi A, B, M e N (quadripolo elettrico), in quanto parti diverse del corpo vengono investigate dal passaggio della corrente;
- b) dalla misura della risposta in termini di d.d.p.

A causa della loro maggiore convenienza in termini di tempi di esecuzione delle misure, la pratica geofisica ha privilegiato alcune combinazioni dei 4 elettrodi A, B, M e N, come ad esempio quella di Fig. 7, detta quadripolo «Wenner», dove gli elettrodi sono equidistanziati e sullo stesso asse. A passo costante (distanza interelettrodica) corrisponde una profondità di investigazione all'interno del terreno all'incirca costante, mentre per ottenere un'informazione a diverse profondità occorre allargare progressivamente il passo del quadripolo.

Nel presente lavoro è stato utilizzato un altro tipo di dispositivo che ha rivelato una maggior efficacia nelle indagini in terreni come quello in oggetto. Questa geometria quadripolare corrisponde al cosiddetto «gradiente multiplo» (Mul-

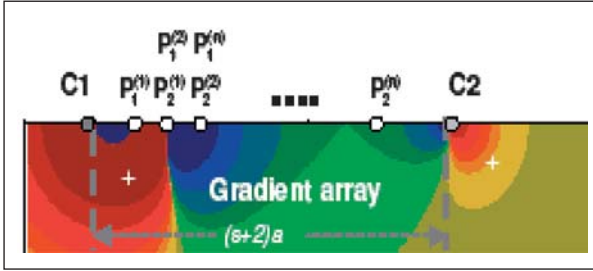


Fig. 8 - Schematizzazione del dispositivo quadrupolare tipo «Gradient array», utilizzato per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica e PI negli stendimenti effettuati

tipale Gradient Array), che presuppone la disponibilità di uno strumento multicanale in grado di effettuare diverse misure di resistività contemporaneamente. In questo caso si mantiene fissa la posizione degli elettrodi di corrente, traslando quelli di potenziale e misurando di volta in volta la d.d.p.

La schematizzazione del dispositivo tipo «Gradient Array», utilizzato quindi per tutti gli stendimenti, è riportata in Fig. 8, con C1 C2 elettrodi di corrente e p1 p2 elettrodi di potenziale.

La maggior efficacia di queste misure sta nel fatto che esse risultano avere una grande capacità risolutiva sia in senso verticale che laterale. Essendo però composte da un numero di punti di misura molto elevato rispetto ai dispositivi elettrodi «tradizionali», non sono molto praticate, in quanto richiedono una strumentazione particolarmente sofisticata.

Nel caso specifico è stato utilizzato un georesistivimetro della ABEM Instrument AB mod. LS.

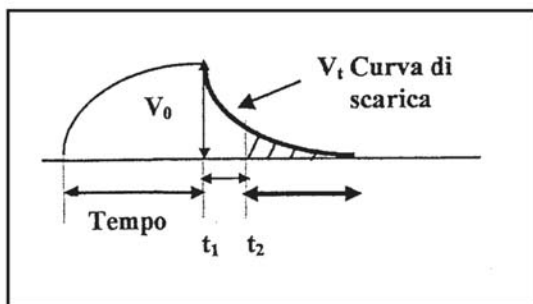
Il metodo della polarizzazione indotta venne per la prima volta descritto da Schlumberger negli anni '20 ed oggi viene applicato con successo in svariati campi d'indagine:

- dalle ricerche idriche;
- al monitoraggio di eventuali inquinanti di terreni e acquiferi ad opera di fluidi organici (idrocarburi) e/o sostanze tossiche;
- a corpi sepolti di natura metallica.

Per una valutazione corretta delle indicazioni fornite dall'applicazione di tale metodologia, è necessario conoscere i meccanismi e le modalità di interazione tra terreno e fluido organico.

Dal punto di vista fisico, il fenomeno della polarizzazione indotta comprende un insieme di processi, in regime transitorio, che avviene nel terreno quando esso è sottoposto ad un campo elettrico, applicato tramite un classico dispositivo quadrupolare ABMN (con AB = elettrodi di corrente e MN = elettrodi di potenziale). In sostanza, il terreno viene energizzato con una corrente di intensità costante attraverso gli elettrodi AB per un certo tempo T, e si misura il potenziale di equilibrio tra gli elettrodi MN. Tale potenziale, che si produce per effetto





$$M = \frac{100}{V_0(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V_t dt \quad (\%)$$

$V_t$  : d.d.p. di scarica ;

$V_0$  : voltaggio iniziale

$t$  : tempo

Fig. 9 - Esempio di curva di scarica PI.

della polarizzazione del terreno, assume un andamento asintotico. Allo stesso modo, la d.d.p. tra MN non cade istantaneamente a zero nel momento in cui si interrompe l'energizzazione, bensì decade in un certo tempo seguendo l'andamento di Fig. 9.

Si può quindi assimilare il comportamento del terreno a quello di una distribuzione di condensatori che si caricano e si scaricano attraverso delle resistenze. Il tempo richiesto per ripristinare le condizioni di equilibrio è funzione del grado di polarizzabilità del terreno. I principali fattori che influenzano la PI sono:

- la composizione mineralogica,
- la tessitura,
- la percentuale d'acqua (umidità naturale),
- la composizione chimica dell'acqua interstiziale (elettrolita).

In generale, i meccanismi che causano la PI sono poco conosciuti, ma per spiegare tale fenomeno si considerano due tipi di polarizzazione:

1. Polarizzazione di membrana.
2. Polarizzazione di elettrodo.

#### *Polarizzazione di membrana*

La polarizzazione di membrana, detta anche elettrolitica, si realizza quando nel terreno vi sono minerali fibrosi o lamellari che presentano particelle superficiali cariche negativamente, e che attraggono pertanto i cationi presenti nella soluzione elettrolitica che pervade i pori, formando un doppio strato elettrico.

Le particelle d'argilla tabulari (fillosilicati) sono i minerali in cui meglio avviene questo processo, poiché gli ossigeni del reticolo cristallino, presenti sulla superficie di esfoliazione, a contatto con l'elettrolita attraggono i cationi del fluido formando una «nube» cationica. Questo addensamento di ioni determina una parziale ostruzione dei pori. Nel momento in cui si immette corrente tra gli elettrodi AB, il passaggio è ostacolato, in quanto gli ioni positivi

passano attraverso la nube cationica, mentre quelli negativi sono attratti da essa, che funziona da membrana selettiva. Si formano così delle zone a diversa concentrazione ionica, ed è proprio questa diversa mobilità degli ioni che determina la polarizzazione. Al cessare della corrente esterna, le nubi ioniche si neutralizzano per diffusione, mantenendo una corrente transitoria dello stesso segno di quella applicata.

Inoltre, la polarizzazione di membrana è influenzata dal contenuto salino dell'elettrolita, nel senso che quanto più bassa è la sua concentrazione, tanto maggiore sarà l'effetto della polarizzazione.

### *Polarizzazione di elettrodo*

La polarizzazione di elettrodo, detta anche metallica o elettronica, trae origine dalla presenza di minerali metallici o particelle conduttive disseminate nella matrice, come solfuri e ossidi, che determinano il passaggio da conduzione ionica nell'elettrolita ad elettronica nei minerali.

Al passaggio della corrente, gli ioni si addensano sull'interfaccia dell'elemento conduttore ostacolando il flusso stesso di corrente, generando così un doppio strato elettrico, che costituisce l'equivalente di un dipolo elettrico. Si realizza quindi una resistenza addizionale transitoria detta «sovratensione» (overvoltage) o polarizzazione di elettrodo.

Il possibile contributo delle misure di PI per la definizione della geometria del materiale indagato e della presenza di eventuali fluidi risiede quindi nel carattere di polarizzabilità di quasi tutti i metalli (Zn escluso) e di molti ossidi e solfuri metallici.

### 3. RACCOLTA, ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI

Come già detto, nelle indagini è stato utilizzato un georesistivimetro mod. ABEM Terrameter LS con compensazione automatica dei potenziali spontanei.

Il trasmettitore di corrente opera con correnti da 0.2 a 2500 mA, con un voltaggio massimo di  $\pm 600$  V ed un impulso  $t$  di corrente variabile da 0.1 a 4 s. Il ricevitore, a quattro canali, ha un'impedenza min. di 10 M $\Omega$ . La precisione di  $\Delta V/I$  risulta superiore allo 0.5%.

I dati sono stati elaborati e interpretati in termini di profilo di resistività mediante il software Resistivity Imager 2D<sup>®</sup> prodotto dalla Geotomographie. Per la resa tridimensionale è stato usato il software Voxler<sup>®</sup>.

La profondità d'indagine raggiunta varia in base alla lunghezza degli stendimenti. Nei vari profili si possono comunque considerare attendibili le indicazioni fornite fino ad una profondità massima di 35÷40 m.

Le sezioni più significative con i profili di resistività e di polarizzazione in-

dotta sono riportate di seguito (Figg. 10, 11, 12); esse riproducono il modello di resistività e di caricabilità reali del terreno ottenuto dall'inversione dei dati di campagna. L'orientazione dei profili, come già descritto nei paragrafi precedenti, è indicativamente da NE a SW.

Il letto della discarica (tratteggio bianco) risulta evidente dal netto cambio in resistività che si registra a profondità non costanti, ma generalmente comprese tra 10 e 15 m da p.c. A parte le porzioni estreme delle sezioni, dove il letto ragionevolmente tenderà a risalire, l'andamento risulta essere grosso modo parallelo alla superficie topografica.

Mentre al di sopra del letto della discarica la resistività varia in funzione del grado di saturazione del terreno indagato, il passaggio al terreno naturale è contrassegnato da valori di resistività superiori a 25 Ohm m, che, nei profili più lunghi (7-11), tendono ad incrementare a partire da 25÷30 m di profondità (colori giallo-rosso).

Al di sopra del limite indicato come letto, si colloca quindi il materiale stocato in discarica, la cui resistività appare caratterizzata da valori variabili. Con l'eccezione dei profili laterali 1 e 5, si denota in superficie la presenza di materiale a resistività medio-basse (15÷35 Ohm m, colore verde-azzurro). Tale materia-

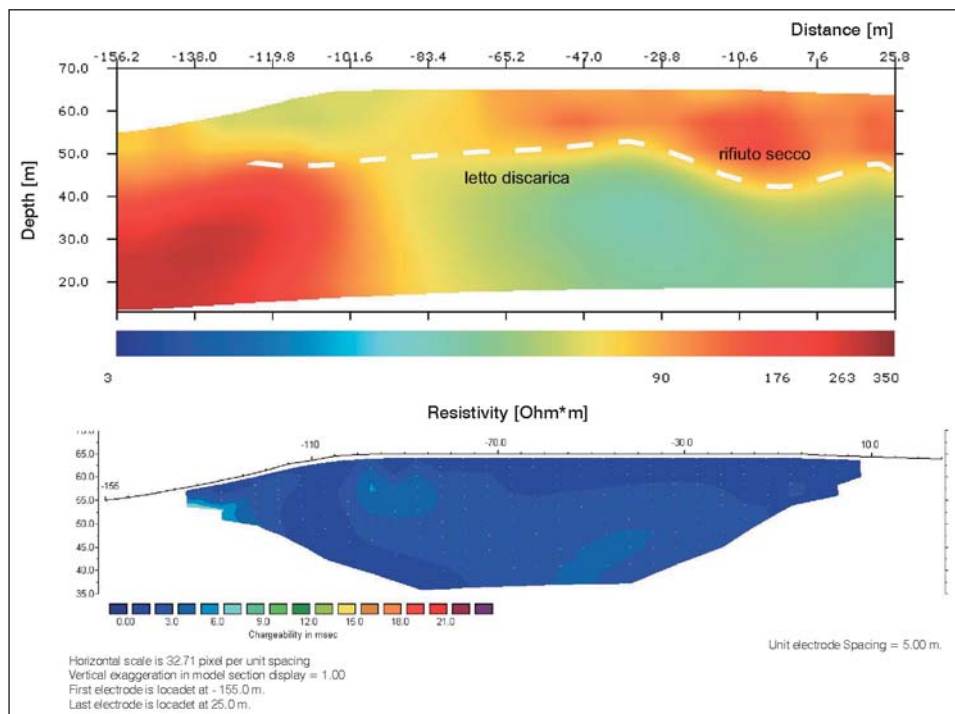


Fig. 10 - Profilo 1.

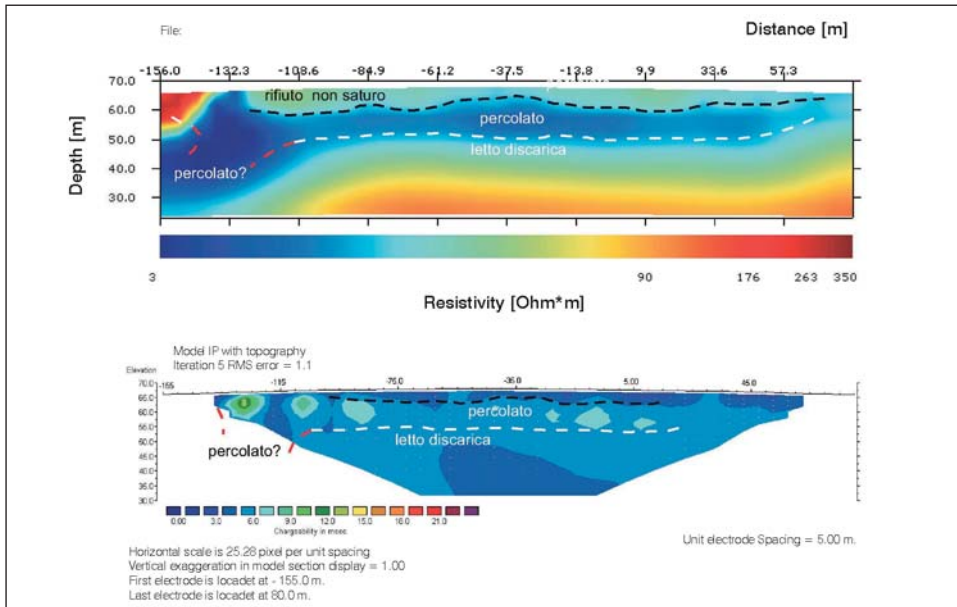


Fig. 11 - Profilo 8.

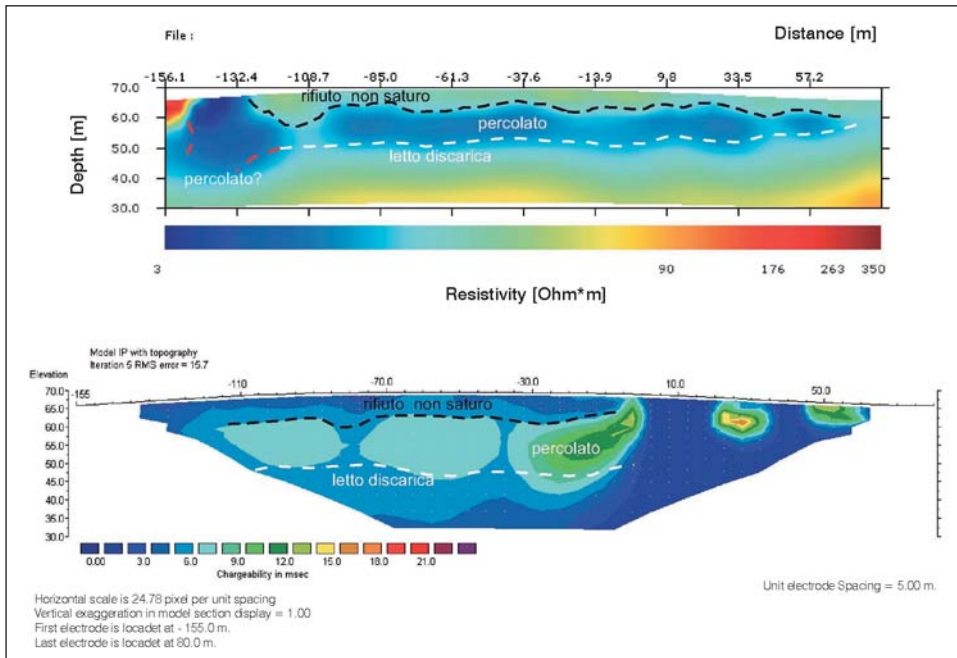


Fig. 12 - Profilo 10.

le è assimilabile a rifiuto drenato e comunque con basso grado di saturazione, in cui pertanto la quantità di liquidi presente è da considerarsi ragionevolmente trascurabile, e che è stato definito genericamente come 'rifiuto non saturo'. Il limite (tratteggio nero) ne indica una distribuzione differenziata, con sacche che talora arrivano sino al letto (profili 2, 4, 6, 7, 9, 11, 12), ma che per lo più si esauriscono entro i primi 5 m di profondità.

In continuità laterale con tale tipologia di rifiuto, ma più spesso al di sotto di esso, si trova del materiale a bassa o bassissima resistività ( $< 15 \text{ Ohm m}$ , colore blu scuro), da associare alla presenza di un rifiuto ancora molto ricco in fluidi e/o elettroliti, e pertanto riconducibile a percolato. La presenza costante (sempre con l'eccezione dei profili 1 e 5) indica la diffusione ancora marcata del percolato in tutto il corpo discarica. Inoltre, sacche a bassissima resistività che addirittura sembrano incunarsi al di sotto del letto (tratteggio rosso), sono presenti nei profili 2, 3, 4, 6, 7, 8, lasciando aperta la possibilità che il percolato sia in alcuni punti fuoriuscito dal corpo discarica stesso.

I profili 1, 5 e 11, al margine della discarica ma comunque condotti all'interno di essa, presentano diffuse aree ad alta resistività ( $> 80 \text{ Ohm m}$ , colore giallo-rosso). Tali valori sono indice di un certo grado di «inertizzazione» raggiunto dai rifiuti stoccati, senza dubbio dovuto al tempo trascorso. Essi sono quindi facilmente interpretabili come rifiuto secco, e quasi sempre, laddove presenti, si estendono sino al letto dell'impianto.

Va inoltre rilevato che sovente i profili presentano limitate aree ad alta resistività in corrispondenza dei loro estremi E-W (visibile nei profili 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10). È presumibile che tale bassa conducibilità sia in parte legata alla collocazione degli ultimi elettrodi al limite (o al di fuori) dell'impermeabilizzante che contiene il rifiuto, fattore questo che tende ad essere poi amplificato dal processo di inversione di dati. Le indicazioni che ne risultano sono in questo caso da considerarsi poco significative.

Le considerazioni effettuate sui profili di resistività sono state confrontate con i risultati forniti dai valori di caricabilità (in msec) ottenuti dalle misure di Polarizzazione Indotta. In questo caso i profili ottenuti non sono sempre stati indicativi, causa la distribuzione uniforme dei bassi valori di resistività. Tuttavia una parte degli stendimenti (2, 3, 8, 10, 11) presenta delle zone ad elevata caricabilità (da 7,5 a 15 msec), la cui collocazione è in accordo con la presenza del supposto percolato.

Al di sotto di queste zone di anomalia, valori ancora molto bassi indicano il letto dell'impianto e il passaggio al terreno naturale.

Sulla base delle considerazioni effettuate circa entità e distribuzione del supposto percolato, e tenendo conto dei rapporti spaziali tra le 12 sezioni (Fig. 14), si è proceduto ad un calcolo tendente a quantificare, pur se in modo approssimativo, il volume totale di percolato contenuto attualmente nell'impianto. In que-

sto calcolo non si è tenuto quindi conto della porzione che è possibile sia fuoriuscita dalla discarica stessa (delimitata dal tratteggio rosso), poiché essa non è quantificabile in profondità.

Per ciascun profilo (o porzione di esso) interessato da bassa resistività è stata perciò calcolata l'area corrispondente al percolato e ne è quindi stata determinata la distribuzione volumetrica ipotizzando un'estensione orizzontale per un tratto corrispondente alla semidistanza tra profilo e profilo.

Il risultato a cui si è pervenuti indicherebbe una quantità apparente di percolato corrispondente a circa 387.000 mc, che è risultato in buon accordo con i volumi calcolati dalle osservazioni dirette.

È necessario comunque ridurre tale volume in funzione della porosità efficace del materiale stoccato, che è stata assunta pari a 0.4, valore già adottato nel corso di stime volumetriche pregresse. L'applicazione di tale fattore correttivo permette di ricavare un volume complessivo di percolato entro il corpo discarica prossimo a 155.000 mc.

La Tab. 1 presenta le grandezze utilizzate in ogni profilo (escludendo i profili 1 e 5, senza percolato) e i corrispondenti ipotetici volumi, nonché la sommatoria degli stessi.

PROFILI	Lungh. (m)	Spessore (m)	Largh. (m)	Volume (mc)
2	90	12	33	35640
3	135	14	32	60480
4	138	13	30	53820
6	22	5	32	3520
7	170	4	33	22440
8	195	10	28	54600
9a	158	11	26	45188
9b	12	7	26	2184
10	200	10	33	66000
11	100	7	33	23100
12	40	13	38	19760
<b>TOT.</b>				<b>386732</b>

Tab. 1.

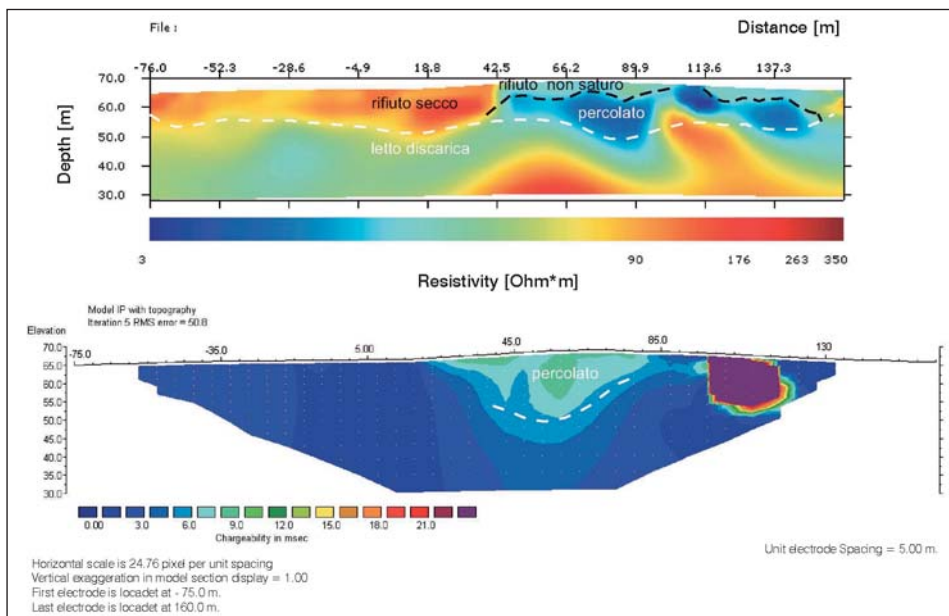


Fig. 13 - Profilo 11.

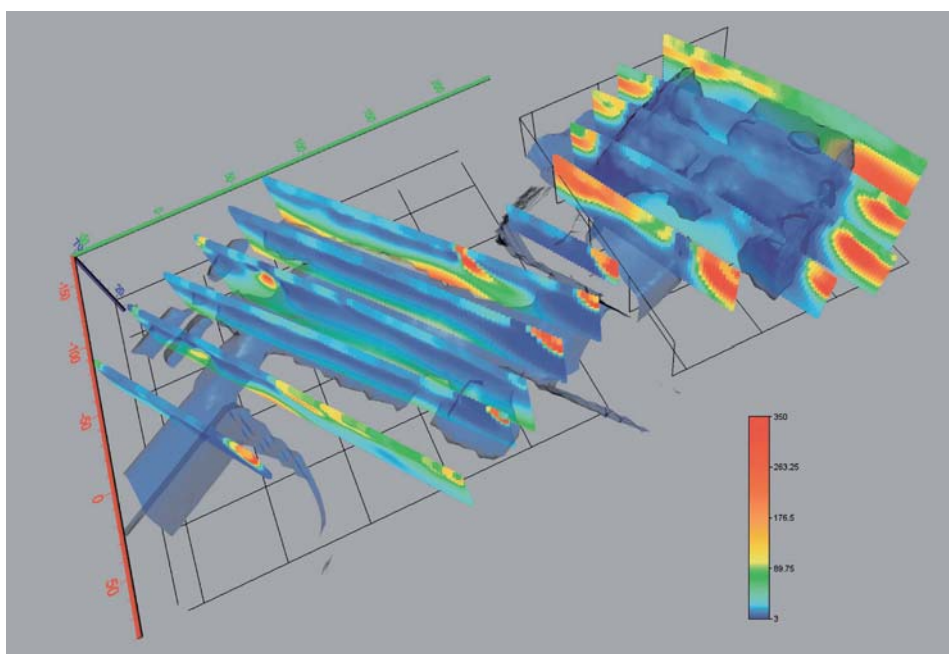


Fig. 14 - Ricostruzione 3D con isosuperficie delimitante il percolato.

#### 4. CONCLUSIONI

Le indagini effettuate entro la discarica di Campardo, a tutt'oggi esaurita, hanno permesso di aggiornare il quadro conoscitivo circa la morfologia del letto della discarica, nonché di stimare il volume del percolato.

Esaminando i 12 profili di tomografia elettrica si può posizionare il fondo della discarica in un range di quote compreso fra i 46 e i 55 m s.l.m.

In realtà, dunque, rispetto ai dati di progetto il letto della discarica è risultato più depresso con quote minime pari a 46 m s.l.m. e max pari a 60 m s.l.m. e con andamento del letto stesso sub-parallelo alla superficie topografica: questo fatto non esclude quindi che vi sia stato un contatto temporaneo con conseguente alimentazione transitoria da parte della falda.

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Consorzio Bacino TV1, per la gentile concessione di dati pregressi e di utilizzare i dati ottenuti nel corso delle ricerche.