

Monitoraggio di una discarica dismessa attraverso inversione di misure di resistività elettrica su griglia permanente

Paolo Durante, Giulio Dal Forno e Paolo Baldi

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna, durante@ibogfs.df.unibo.it; giulio.dalforno@unibo.it; p.baldi@unibo.it

Old landfill monitoring through electrical resistivity tomography on a permanent acquiring grid

Abstract: Closed waste disposal sites, both controlled or disused, represent a common source of environmental hazard for the surroundings. Leachate, particularly, rises the greatest concern for soil and groundwater, due to its content in high levels of organic and inorganic pollutants such as ammonia and heavy metals. In fact, old dumps, typically built before the current set of construction directives, have only inefficient, or even absent, containing and draining systems. This study reports the electrical resistivity tomography surveys conducted on a dismissed landfill site, characterized by frequent superficial percolate discharges. Such investigation has allowed to delineate the stratigraphy of the waste body, the position of its boundaries, the efficiency of drainage system and the presence of preferential leachate flows; resistivity data were collected in two different periods, separated by almost thirty days, on the same permanent acquiring grid. The geophysical information, integrated by some stratigraphic cores and drainage system maps, has conveyed a plausible explanation of the leachate discharges.

Key terms: Resistivity tomography, Landfill monitoring, Leachate, Permanent acquisition grid, Waste saturation
Termini chiave: Tomografia di resistività, Monitoraggio discarica, Percolato, Griglia di acquisizione permanente, Saturazione del rifiuto

Riassunto

Gli impianti di discarica dismessi, numerosi sul territorio nazionale, rappresentano una fonte di rischio di inquinamento ambientale per le zone limitrofe. La loro pericolosità, associata prevalentemente alla diffusione del percolato al di fuori del deposito di rifiuti, è accentuata dalle caratteristiche costruttive che rispecchiano procedure datate e non conformi alle attuali prescrizioni normative. Il tradizionale monitoraggio per punti di campionamento delle acque all'interno di pozzi di controllo prospicienti la discarica offre uno scarso dettaglio, è limitato dal numero di pozzi disponibili e risulta non sensibile alle fuoriuscite di fluidi liscivianti e agli accumuli non intercettati dai punti di campionamento.

Recentemente i metodi elettromagnetici ed elettrici, sensibili al differente contenuto in fluidi di saturazione che in parte determina la variazione delle proprietà fisiche del mezzo indagato, sono stati impiegati con successo nell'investigazione della diffusione del percolato in siti di discarica. In particolare i metodi elettrici sono da tempo utilizzati per il collaudo delle membrane impermeabilizzanti negli impianti di nuova costruzione, rappresentano uno strumento tradizionale per localizzare zone di accumulo del percolato e settori di flusso preferenziale all'interno del volume di rifiuto, e sono parte di sistemi sperimentali di monitoraggio in continuo.

Allo scopo di caratterizzare una porzione di una discarica dismessa interessata da eventi di fuoriuscita superficiale di percolato, sono state realizzate due indagini di tomografia elettrica successive sulla medesima griglia di acquisizione. Le sezioni tomografiche ottenute hanno permesso di definire la stratigrafia del deposito e di confermare l'efficacia del metodo nell'individuazione dei sistemi di drenaggio. I dati riferiti alle due indagini sono stati confrontati allo scopo di individuare le zone soggette alle variazioni di resistività più significative.

Le informazioni ricavate dalle sezioni di tomografia elettrica, supportate e integrate dai dati sui caratteri morfologici dell'area, da stratigrafie ottenute da sondaggi geognostici e da planimetrie del sistema di drenaggio, hanno consentito di ottenere un'interpretazione qualitativa delle fuoriuscite superficiali di percolato.

1. Introduzione

Nel mondo industrializzato gli impianti di discarica dismessi rappresentano una pesante eredità accumulatasi nel corso di decenni (Walsh and LaFleur, 1995). Questi siti sono oggi fonte di rischio per le aree limitrofe poiché i fluidi prodotti all'interno dell'ammasso di rifiuti, carichi di sostanze nocive, possono facilmente migrare e contaminare falde acquifere, campi coltivati e zone abitate. Per questo motivo, gli attuali criteri costruttivi di una discarica devono garantire il completo isolamento del

deposito escludendo qualsiasi evento di contaminazione dell'ambiente circostante, ad esempio tramite la realizzazione di barriere di impermeabilizzazione, di sistemi di drenaggio del percolato e di pozzi di captazione del biogas), in accordo con la normativa vigente in materia di tutela ambientale (USEPA, 1993; EU, 1999; D.LGS 23/01/2003 n. 36). Al contrario, molti dei vecchi impianti hanno sistemi di drenaggio e captazione dei fluidi liscivianti spesso inefficienti o addirittura assenti; mancano inoltre considerazioni e studi geologici sulle aree scelte per lo stoccaggio dei rifiuti, preferite talvolta soltanto per la vicinanza alla fonte del rifiuto stesso. Un classico esempio è rappresentato dalle vecchie cave abbandonate, utilizzate come deposito di materiali di rifiuto, a costituire il tipo di discarica detto "in avvallamento" o "in trincea" (Williams, 1999).

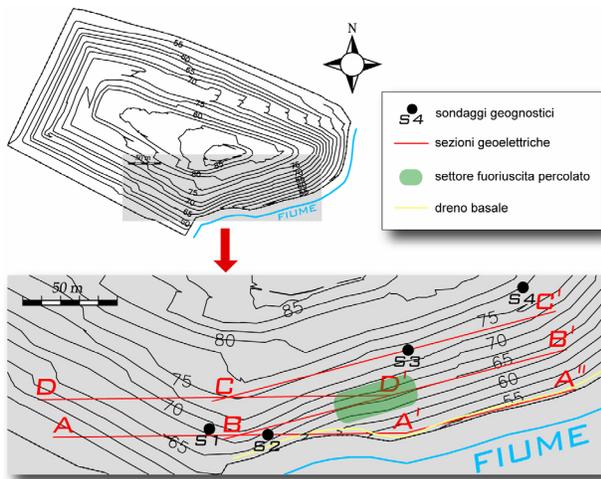


Figura 1: Planimetria del settore di indagine e ubicazione dei sondaggi e dei profili geoelettrici; è riportato inoltre il settore di fuoriuscita del percolato.

Figure 1: Plan of the investigated area and location of the core drillings and the geoelectric profiles; The area of the leachate discharge is also highlighted.

La conoscenza dei rischi associati allo stoccaggio dei rifiuti rende indispensabile la sperimentazione di tecniche di monitoraggio in grado di integrare i classici sistemi di campionamento di acque e suoli mediante la realizzazione di pozzi e sondaggi nelle aree limitrofe all'impianto; tali sistemi infatti non sono in grado di garantire l'individuazione e descrizione degli accumuli di fluidi liscivianti concentrati al di fuori dei punti campionati (Nobes *et alii*, 2000). Vari metodi geofisici, soprattutto elettrici ed elettromagnetici, sono stati recentemente impiegati con successo nella caratterizzazione fisica di siti di discarica (Green *et alii*, 1999). I metodi elettrici, sondaggi elettrici verticali e orizzontali, polarizzazione indotta, tomografia di resistività elettrica (ERT), sono sensibili alle ampie variazioni dei parametri fisici legati alla presenza di fluidi e contaminanti sia organici che

inorganici nel sottosuolo (Palacky, 1988; Abu-Zeid *et alii*, 2003; Monteiro Santos *et alii*, 2006); trovano pertanto ampia diffusione in monitoraggi e indagini ambientali per la caratterizzazione dei siti di discarica. La ERT rappresenta uno strumento per indagini di carattere ambientale ed ingegneristico ed è utilizzata di routine nella localizzazione di *plumes* di inquinanti (Aristodemou and Thomas-Betts, 2000; Goes and Meekes, 2004; Mota *et alii*, 2004; Chambers *et alii*, 2006), nella caratterizzazione di strutture geologiche (Meads *et alii*, 2003) e ingegneristiche (Daily and Ramirez, 2000) e in studi di carattere idrologico (Binley *et alii*, 2002; Sandberg *et alii*, 2002). Bernstone e Dahlin (1996) sono stati tra i precursori nell'utilizzo della ERT in aree di discarica per definire l'estensione e le caratteristiche idrologiche del corpo di rifiuto, ma esistono molti casi in cui tale metodologia è stata impiegata con successo. Ad esempio un'indagine ERT ha consentito di delineare la struttura interna del rifiuto e di confermare la presenza di una piuma di contaminazione sotto la base di una discarica priva di manto di contenimento (Depountis *et alii*, 2005). L'utilizzo del metodo ERT, associato a misure di potenziale indotto, ha fornito utili informazioni per definire i contorni del bacino di raccolta, per individuare le zone di accumulo del percolato e valutare l'integrità della geomembrana di sottofondo (Bavusi *et alii*, 2006). Inoltre, nuovamente combinando le due tecniche, Martinho e Almeida (2006) hanno ottenuto un modello spaziale accurato della diffusione di percolato da due discariche di rifiuti solidi urbani, nota precedentemente solo in termini di dati puntuali da campionamenti di pozzi limitrofi agli impianti.

Recentemente l'applicazione dell'inversione differenziale di misure di resistività, ampiamente utilizzata nei problemi di filtrazione (Godio and Ferraris, 2005; Leroux and Dahlin, 2006; Jomard *et alii*, 2007) ha portato sviluppi interessanti nella definizione della cinematica del percolato all'interno e all'esterno dell'ammasso di rifiuti (Gibson, 2005; Radulescu *et alii*, 2007). Questo tipo di analisi, inoltre, è parte integrante di sperimentazioni per il monitoraggio su griglie permanenti installate su impianti di nuova costruzione (Kuras *et alii*, 2006).

Il presente lavoro riporta i risultati preliminari di due indagini ERT su griglia permanente installata su un fianco di un vecchio sito di discarica, eseguite in due successivi periodi. L'installazione è avvenuta in un settore interessato da fuoriuscite di percolato nel biennio 2006-2007.

Questo lavoro si propone di valutare l'utilità della ERT nella definizione delle caratteristiche fisiche e idrologiche della porzione di discarica analizzata, e descrivere la cinematica dei fluidi liscivianti all'interno e all'esterno del deposito di rifiuti. Le informazioni ottenute dall'indagine ERT, integrate con le stratigrafie disponibili, con le informazioni morfologiche del sito e

alcune planimetrie dei sistemi di drenaggio, vengono impiegate per fornire una spiegazione agli eventi di fuoriuscita di percolato.

Dopo una breve descrizione delle caratteristiche dell'impianto e i principali aspetti geologici del sito in cui è ubicata la discarica, vengono analizzati gli aspetti tecnici dell'indagine e dell'elaborazione. Successivamente viene data ampia rilevanza all'interpretazione delle immagini ERT elaborate. Infine, all'interno del paragrafo conclusivo, è riportata l'integrazione di tutte le informazioni disponibili e una possibile interpretazione degli eventi di fuoriuscita.

2. Caratteri generali e geolitologici dell'area d'indagine

Il sito di discarica si colloca all'interno di un settore mostrante i caratteri geolitologici tipici di un'area di conoide, localizzata su un lato di un corso d'acqua particolarmente importante, caratterizzato da una portata media di 450 m³/s. L'assetto geomorfologico della pianura attraversata dal fiume risente della presenza della conoide e presenta, da sud a nord, termini evolutivi che passano da ghiaie nella parte più meridionale, allo sbocco in pianura del corso d'acqua, a sabbie fino a termini limoso argillosi dislocati nella parte alta della pianura stessa. Dal punto di vista stratigrafico i depositi alluvionali, rappresentati da sabbie e ghiaie sovrastate da uno strato superficiale di sedimenti più recenti a granulometria fine (argille e limi), ricoprono il substrato, costituito da "sabbie gialle" litorali pleistoceniche nella zona a nord, argille marnose del Pleistocene e del Messiniano nel tratto intermedio e dalla Formazione Gessoso Solifera nel settore più a sud. Tali alluvioni, da un punto di vista geotecnico, si presentano come terreni incoerenti e/o coesivi, mediamente addensati e/o consistenti. Le "sabbie gialle" presentano un certo grado di cementazione e affiorano in corrispondenza dell'alveo del fiume, determinando in alcuni tratti la presenza di ripide scarpate.

I termini litologici che caratterizzano il deposito di conoide all'interno del quale il fiume ha definito il proprio corso ed in cui è ospitata l'area di discarica, sono stati riconosciuti all'interno delle carote di terreno ottenute mediante quattro sondaggi realizzati sul corpo di discarica (Figure 1 e 2). I sondaggi testimoniano la presenza di uno strato superficiale di copertura, rappresentato da macerie di varia natura, con spessore variabile tra 0,3 e 1,1 m e, in accordo con le successioni litologiche rinvenute nelle aree limitrofe, presentano alternanze di strati limoso-argillosi, sabbiosi e ghiaiosi a granulometria variabile, a cui si intercalano dei pacchi potenti circa 25-30 m di rifiuto a differente grado di alterazione (Figura 2). Le stratigrafie S2 e S3 mostrano alla base la presenza di un livello argilloso, possibile strato impermeabile di sottofondo. Tale limite naturale

rappresenta con buona probabilità l'unica barriera impermeabile in grado di arginare il problema della filtrazione di fluidi di percolato fuori dal corpo di discarica.

Il deposito, costituito interamente da rifiuto indifferenziato, mostra attualmente una produzione di percolato variabile tra le 10.000 e 15.000 tonnellate annue, convogliate mediante un sistema di drenaggio perimetrale al rilevato, in vasche di raccolta. Da queste il percolato viene trasportato in stabilimenti per lo smaltimento. Il sistema così costituito, mostra comunque punti di debolezza messi in evidenza dagli eventi di fuoriuscita di fluidi lisciviati in superficie. La presenza dell'alveo del fiume posto a circa 15 m a valle del deposito, come precedentemente descritto e mostrato nell'immagine in Figura 1, rappresenta la principale criticità dal punto di vista ambientale.

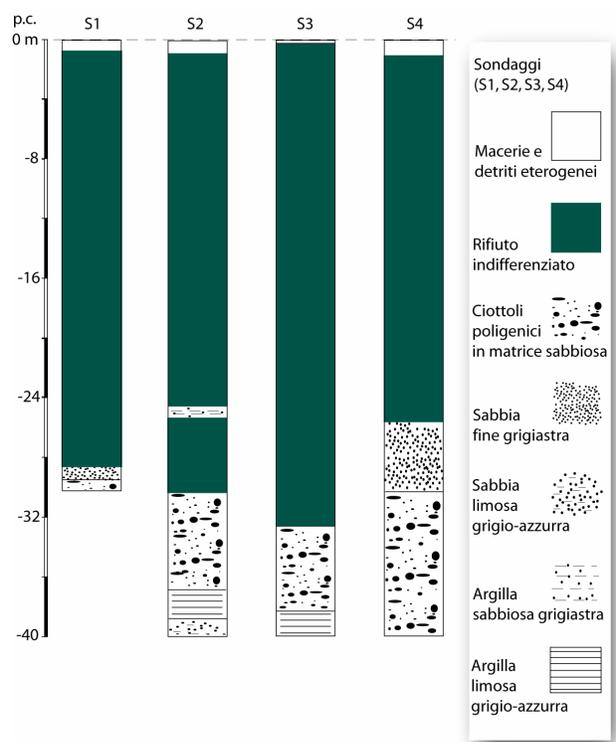


Figura 2: Stratigrafie ottenute dai sondaggi geognostici e riferite alla medesima quota. Le profondità raggiunte variano tra 30 e 40 m, con uno spessore del pacco di rifiuti variabile tra 24 e 32 m.
 Figure 2: Stratigraphies obtained from drillings and referred to the same altitude. The drillings, 30-40 meters deep, show a waste layer ranging from 24 to 32 m.

3. Descrizione e scopi dell'indagine ERT

Il monitoraggio dell'area precedentemente descritta è stato realizzato su griglia permanente; i dati sono stati acquisiti nelle giornate del 23 febbraio e del 23 marzo 2007. Il settore scelto per l'ubicazione della griglia di

monitoraggio (Figura 1) comprende un'area interessata da fuoriuscite superficiali di percolato, con un primo evento risalente alla primavera del 2006, a seguito di un periodo di intense precipitazioni, e un secondo evento datato 18 giugno 2007. I dati pluviometrici relativi ai periodi antecedenti alle due distinte misure e al secondo evento di fuoriuscita, sono stati integrati con le indagini ERT. Questi dati sono relativi a tre stazioni pluviometriche ubicate nei pressi dell'area di discarica. Non sono riportate le informazioni sulle precipitazioni che hanno preceduto l'evento di fuoriuscita della primavera 2006 poiché non è noto il suo inizio.

L'area interessata dalle fuoriuscite, posta sul fianco del rilevato, è limitata ad ovest da una linea di spartiacque superficiale; al piede, procedendo da est verso ovest al di fuori del deposito, la topografia presenta una moderata contropendenza verso il rilevato stesso. La conformazione "a catino" del settore descritto può rappresentare un elemento di richiamo per flussi superficiali e sotterranei di fluidi. L'area posta a valle del settore interessato dalle fuoriuscite ospita un dreno basale per la raccolta dei fluidi.

Il monitoraggio temporale è stato preceduto da una fase di indagine preliminare iniziata nel luglio 2006, realizzata al fine di comprendere la sensibilità del metodo geoelettrico e di definire spaziatura interelettrodica e lunghezza dei profili da realizzare. Queste ultime sono state scelte in funzione del massimo spessore raggiunto dal deposito di rifiuti, stimato sulla base dei dati forniti dalle stratigrafie ottenute dai sondaggi geognostici. Terminata la fase preliminare, è stata installata una griglia di monitoraggio costituita da cinque profili, di cui quattro della lunghezza di 188 m e realizzati con 48 elettrodi spazati 4 m, e uno di 92 m con 24 elettrodi posti alla medesima interdistanza. I dati di resistività elettrica sono stati acquisiti mediante l'utilizzo del georesistivimetro Ares (GF Instruments) secondo la disposizione quadripolare del tipo dipolo-dipolo; l'elaborazione è stata eseguita per mezzo del software Res2DINV (Loke and Barker, 1996 a,b) e la restituzione grafica delle sezioni di resistività realizzata mediante le routine di GMT (Wessel and Smith, 1998).

L'ubicazione della griglia di misura e la topografia del settore sono state ottenute mediante un rilievo GPS in modalità cinematica.

I principali scopi dell'indagine sono stati:

1. la determinazione della geometria del sito e la definizione dei contatti basale e laterale;
2. la localizzazione della porzione di rifiuto all'interno del corpo analizzato e l'individuazione dei limiti stratigrafici;
3. la verifica dell'influenza esercitata dal sistema drenante, dove è intercettato dalle sezioni, sul volume di suolo circostante;
4. l'identificazione di settori interessati dalla presenza di oggetti sepolti di dimensioni confrontabili con la

spaziatura interelettrodica utilizzata;

5. la determinazione della distribuzione spaziale e verticale dei fluidi di saturazione all'interno del rifiuto per l'intero settore di indagine;
6. l'identificazione delle regioni interessate da flussi preferenziali di percolato o caratterizzate da concentrazioni in fluidi di saturazione che mostrano sensibili variazioni spaziali e temporali.

4. Descrizione delle sezioni ERT

Le sezioni di resistività mostrate nelle Figure 3a e 3b sono relative ai 5 profili (cfr. Figura 1) realizzati per i due periodi di misura. La descrizione delle sezioni di resistività è avvenuta in maniera integrata con la lettura delle informazioni ottenute dai sondaggi geognostici realizzati nell'area di indagine. Le 4 sezioni realizzate sul fianco della discarica evidenziano la presenza di una stratificazione verticale in perfetto accordo con i dati forniti dai sondaggi. Il sondaggio S2, posto in corrispondenza della progressiva metrica 114 m del profilo AA' (Figure 1 e 2), indica la presenza di uno strato superficiale spesso 1,5 m a cui corrisponde nelle sezioni topografiche di febbraio (Figura 3a) e di marzo (Figura 3b) un livello di spessore pari a circa 2 m, con resistività elettrica compresa tra 25 e 200 Ω m; questi valori, con variazioni a carattere stagionale, sono compatibili con quelli dei materiali utilizzati come strato di copertura (Yoon *et alii*, 2003). La differenza di spessore è imputabile alla compattazione e perdita di materiale durante l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo nei primi metri di carota; a queste va aggiunto l'errore nella stima delle profondità per le sezioni ERT. La porzione di rifiuto individuata dal sondaggio si estende fino alla profondità di 30 m dal piano campagna; all'intero spessore del pacco di rifiuto è associato, nella sezione di resistività, un livello della stessa potenza con valori compresi tra 1 e 20 Ω m, perfettamente in linea con quelli pubblicati in letteratura per rifiuti solidi urbani (Meju, 2000). La variazione di resistività all'interno del rifiuto lungo la verticale è dovuta al differente grado di saturazione del mezzo; infatti come inizialmente definito da Archie (1942), considerando solo l'effetto della concentrazione in fluidi, la resistività di un mezzo saturo è inversamente proporzionale alla porosità. Una modifica di tale legge, proposta da Yaramanci (1994) mostra una riduzione della resistività in funzione dell'aumento del contenuto d'acqua, con esponente m variabile tra 1,3 e 2,5. In accordo con tali formulazioni petrofisiche è possibile identificare, all'interno del rifiuto, la porzione insatura (5-20 Ω m) e quella satura (1-5 Ω m). Alla profondità di 30 m dal piano campagna, il sondaggio S2 indica la fine del rifiuto e l'inizio di un livello costituito da argilla sabbiosa e limosa. La sezione tomografica evidenzia infatti la chiusura basale del corpo di rifiuto con un incremento dei valori di resistività fino a 10-20 Ω m. I valori del substrato

sono comparabili a quelli riportati in letteratura per depositi argillosi (Reynolds, 1997).

L'assetto stratigrafico generale presentato per le sezioni AA' si ripresenta nelle sezioni BB' (Figure 3a e 3b). Nella porzione compresa tra 48 m e 120 m del profilo lo strato a resistività 25-200 Ω m è assente. Questo settore, che comprende l'area interessata dalla fuoriuscita di percolato (da 60 m a 104 m), manca dello strato di copertura, rimosso a seguito dell'intervento di messa in sicurezza dell'area stessa. Il livello con resistività 10-20 Ω m mostra discontinuità laterale imputabile all'assenza del sottofondo argilloso o ad una contaminazione del substrato (Meju, 2000).

Le sezioni CC' e DD' (Figure 3a e 3b), ubicate a quota maggiore rispetto alle precedenti, mostrano un ispessimento del livello avente resistività compresa tra 25 e 200 Ω m, non direttamente correlabile alla presenza di una copertura più spessa (cfr. sondaggio S3, Figura 2) in quanto l'approfondimento della superficie piezometrica giustifica l'esistenza di una fascia di rifiuto completamente asciutto. Soltanto la sezione DD' presenta valori di resistività pari a 10-20 Ω m nella sua parte basale, a testimonianza della localizzazione del substrato argilloso.

La sezione AA' a 140 m e 164 m lungo il profilo (Figure 3a e 3b) evidenzia il possibile effetto prodotto dal dreno basale intercettato dal profilo (Figura 1), che si manifesta come una zona con valori di resistività più alti rispetto all'intorno. Tale effetto è dovuto alla riduzione della quantità di fluidi che dalla superficie si infiltra all'interno del deposito, per l'azione drenante del sistema.

A 104 m del profilo CC' (Figure 3a e 3b) è presente una anomalia con bassi valori di resistività, all'interno dello strato superficiale più resistivo. Come mostrato nei sondaggi, lo strato di copertura è costituito da macerie e materiale di riporto, eterogeneo nelle dimensioni e tipo. Per tale ragione l'anomalia osservata può essere imputata ad un oggetto conduttivo di dimensioni confrontabili con la spaziatrice interelettrica utilizzata nelle indagini, immerso nello strato di copertura.

La sezione A'A'' posta alla base del rilevato, fuori dal deposito, è stata realizzata per un controllo sull'eventuale flusso di fluidi liscivianti nel settore verso il fiume. Nella sezione si perdono i tratti di tripartizione comuni alle altre ma si osserva un livello caratterizzato da bassi valori di resistività che da quota -3 m dal piano campagna si estende fino a -16 m interessando il settore compreso tra 36 m e 48 m del profilo. Questo può essere imputabile ad un flusso di percolato al di fuori del corpo di discarica verso l'alveo del fiume il cui effetto è più evidente nella sezione relativa al mese di marzo.

5. Confronto tra sezioni

Informazioni aggiuntive sono state ricavate attraverso un confronto tra le sezioni di resistività relative ai due

differenti periodi di misura. Per ciascuna sezione è stato effettuata una differenza tra i valori di resistività e una normalizzazione del valore così ottenuto rispetto al valore massimo per ciascuna sezione. Le sezioni di Figura 4 esprimono la differenza di resistività percentuale dei valori di resistività di marzo rispetto a quelli di febbraio, normalizzata rispetto al valore massimo osservabile. Le differenze sono rappresentate graficamente in una scala di colori variabile tra il blu (< 0) e il rosso (> 0); valori negativi indicano pertanto condizioni di riduzione nei valori di resistività mentre valori positivi testimoniano un incremento degli stessi rispetto al periodo preso come riferimento. Il confronto effettuato rende possibile attribuire a ciascuna sezione condizioni di riduzione o incremento dei valori di resistività e localizzare per ciascuna i settori che mostrano le variabilità maggiori.

La sensibilità del metodo geoelettrico alle variazioni del contenuto in fluidi del mezzo indagato fa presupporre che le oscillazioni delle differenze percentuali di resistività ottenute dal confronto siano imputabili a variazioni del contenuto in fluidi di saturazione all'interno del corpo di discarica. Le aree in blu nelle sezioni di Figura 4 indicano condizioni di aumento nel contenuto in fluidi mentre i settori evidenziati in rosso indicano condizioni di riduzione nel contenuto in fluidi. I settori bianchi non mostrano consistenti variazioni tra i due periodi di misura.

Il profilo DD' che complessivamente evidenzia una condizione di aumento dei valori di resistività, presenta una stratificazione dei settori interessati da tali incrementi; questi sono disposti secondo due distinti livelli a profondità rispettivamente di -4 m e -12 m dal piano campagna. Questa stratificazione priva di evidenze di intercomunicazione tra la parte superiore e quella inferiore, corrisponde nella figura 3 al tetto e alla base del rifiuto.

La sezione AA' testimonia come tra le sezioni relative ai due periodi non ci siano particolari differenze, ad esclusione di quelle che interessano la sezione a 132 m dall'origine fino alla fine del profilo. In corrispondenza del dreno intercettato dalla sezione, si nota un incremento nei valori di resistività. Le sezioni CC', BB' e A'A'' presentano una distribuzione dei settori interessati da variazioni rilevanti dei valori di resistività tra i due periodi, secondo geometrie lobiformi. Nelle sezioni CC' e BB', tra 104 m e 140 m tali geometrie mostrano una corrispondenza spaziale da monte a valle lungo il fianco del rilevato. I settori che nelle differenti sezioni denotano la presenza di variazioni dei valori di resistività elettrica rispetto ai due periodi in cui sono state effettuate le indagini, possono essere interpretati come zone interessate da oscillazioni del grado di saturazione.

Le intense precipitazioni che hanno interessato l'area di indagine nel periodo maggio-giugno 2007 (Figura 5), hanno probabilmente innescato l'ultimo fenomeno di fuoriuscita di percolato manifestatosi nel giugno 2007.

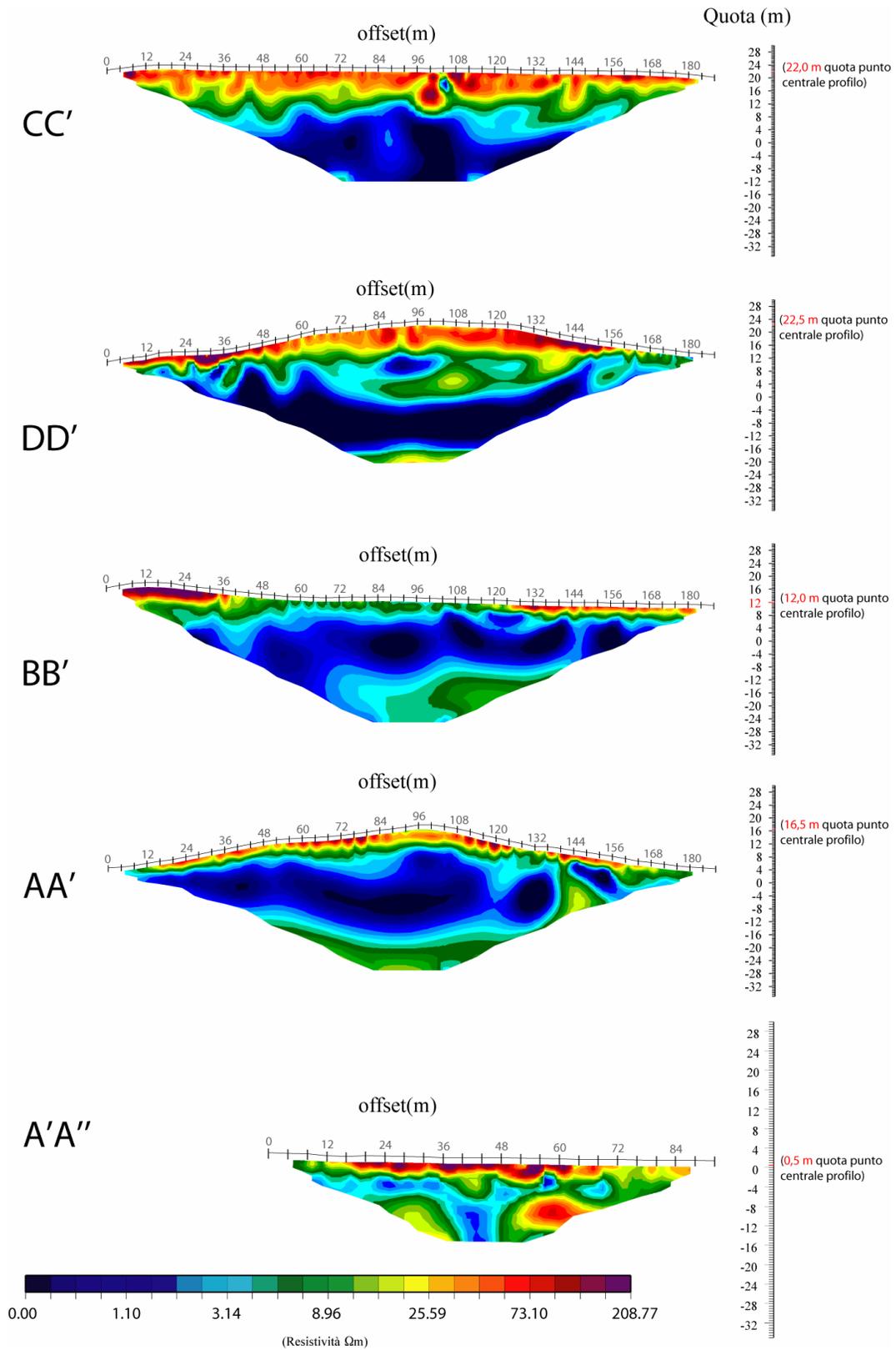


Figura 3a: Sezioni di resistività elettrica riferite ai 5 profili realizzati in data 23 febbraio 2007. La scala della sezione A'A'' è ingrandita di 1.5 volte.

Figure 3a: Resistivity sections referred to the data collected on 23rd February 2007. Section A'A'' is enlarged 1.5 times.

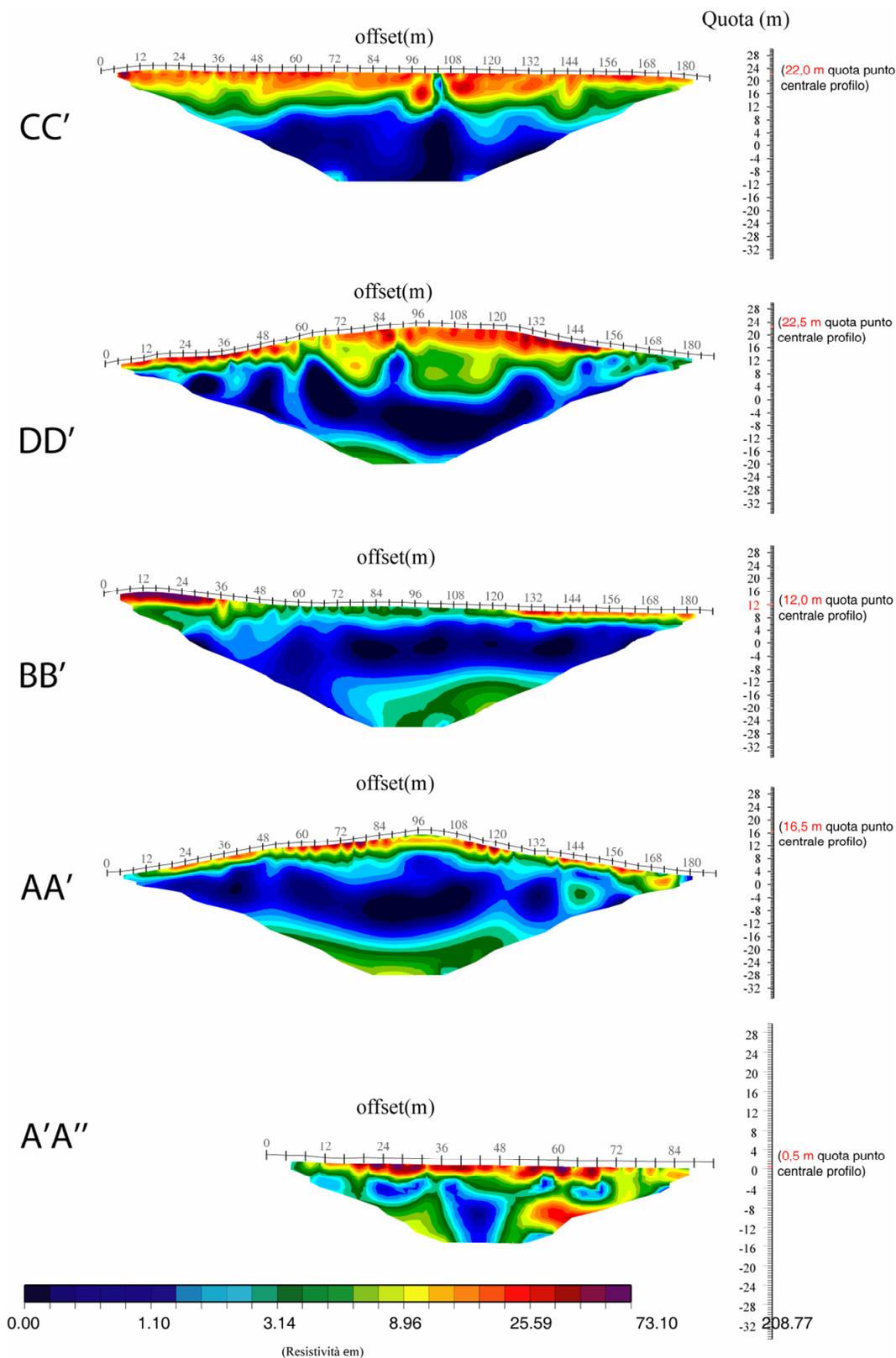


Figura 3b: Sezioni di resistività elettrica riferite ai 5 profili realizzati in data 23 marzo 2007. La scala della sezione A'A'' è ingrandita di 1.5 volte.

Figure 3b: Resistivity sections referred to the data collected on 23rd March 2007. Section A'A'' is enlarged 1.5 times.

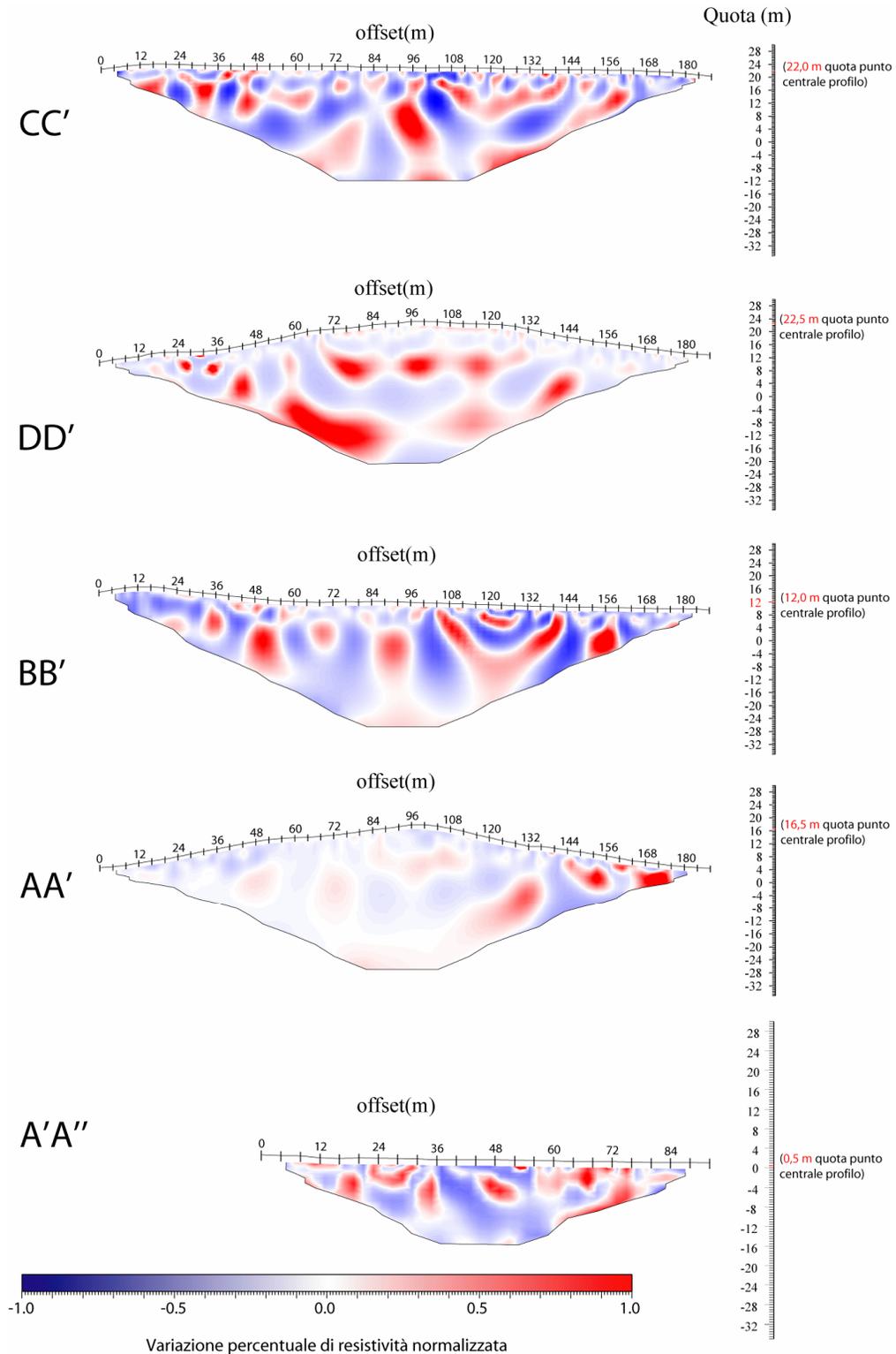


Figura 4: Differenza di resistività normalizzata tra le sezioni riferite ai due periodi di misura. Le sezioni in scala di colore dal blu (minor resistività) al rosso (maggior resistività) rappresentano la differenza dei valori di resistività elettrica delle misure di marzo in riferimento a quelle di febbraio, normalizzate rispetto al valore massimo di ciascuna sezione.

Figure 4: Normalized resistivity difference between the ERT sections related to the two periods of measurement. The sections, colour-scaled from blue (lower resistivity) to red (higher resistivity), show the resistivity differences between February and March data, normalized by the maximum resistivity value of every single section.

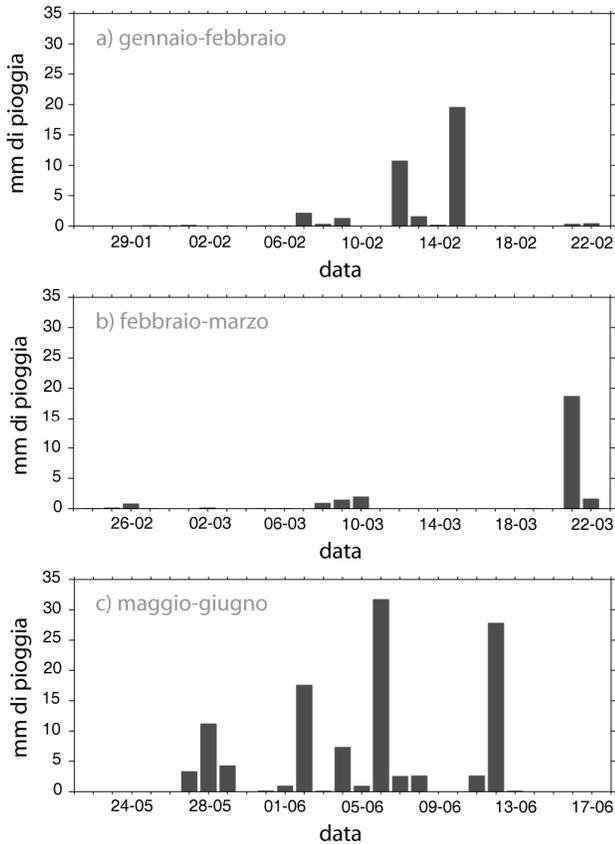


Figura 5: Grafici di piovosità per i periodi di circa 30 giorni che hanno preceduto le due indagini, riferiti a tre stazioni pluviometriche limitrofe alla discarica. I valori esprimono la piovosità giornaliera come media pesata rispetto all'inverso della distanza tra la stazione di misura e l'area di indagine. Sono inoltre riportati i valori di piovosità per il periodo maggio-giugno 2007, antecedente all'ultima fuoriuscita di percolato.

Figure 5: Rainfall graphs for the thirty-day period preceding each survey, obtained from three pluviometric gauges located close to the landfill site. These plots report daily-averaged rain values weighted by the distance between the gauge and the landfill. The last panel shows the average rain fell between May and June 2007, right before the last leachate discharge.

Le informazioni ottenute dall'indagine tomografica per il periodo febbraio – marzo 2007 sono state integrate dai dati pluviometrici di tre stazioni ubicate nei pressi dell'area di discarica. In particolare sono stati utilizzati dati sulle precipitazioni che hanno interessato il mese precedente ciascun gruppo di misure (Figura 5); i valori di piovosità per i periodi di interesse sono espressi come media giornaliera, pesata rispetto all'inverso della distanza stazione-discardica, al fine di attribuire un maggior peso ai dati forniti dalle stazioni pluviometriche più vicine alla discarica. I grafici evidenziano come il mese che ha preceduto le misure di marzo sia stato complessivamente meno piovoso con un unico giorno di intense precipitazioni (21 marzo); tale aspetto trova conferma

nelle sezioni di Figura 4 che mostrano una predominanza di settori in rosso, indicativi di condizioni di maggior resistività della sezione di marzo rispetto a quella di febbraio. Questo denota una influenza sulla misura di febbraio da parte delle precipitazioni dei quindici giorni precedenti; se il periodo di influenza fosse più breve, le sezioni di marzo mostrerebbero valori di resistività inferiori, dato il concentrarsi delle precipitazioni nei due giorni antecedenti l'acquisizione dei dati.

6. Conclusioni

L'installazione di una griglia di acquisizione permanente su un fianco di una ex-discardica interessato da eventi di fuoriuscita di percolato, ha consentito, attraverso la realizzazione di due indagini ERT, di delineare alcune caratteristiche dell'accumulo di rifiuti. Le indagini hanno permesso di estrapolare informazioni sui contatti basale e laterale del deposito, sul suo assetto stratigrafico, sul diverso grado di saturazione dei rifiuti, sulla distribuzione spaziale dei fluidi liscivianti, sull'efficienza di un dreno posto alla base del rilevato e sulla presenza di oggetti sepolti. Inoltre, il confronto tra le sezioni di resistività, in termini di differenza percentuale tra i due periodi di misura, ha rivelato come zone differenti dell'accumulo siano caratterizzate da una sensibile variabilità dei parametri elettrici imputabili a variazioni del contenuto in fluidi di saturazione.

Le conoscenze acquisite dalla campagna di indagine, integrate da informazioni sui caratteri morfologici dell'area, sulla natura dei litotipi per mezzo di sondaggi geognostici e sulla piovosità, hanno permesso di dare una possibile interpretazione dei meccanismi che hanno determinato la fuoriuscita di percolato in superficie.

L'evento del giugno 2007 si è verificato subito dopo un periodo di intense precipitazioni (cfr. ultimo grafico di Figura 5), che, in sinergia con la conformazione ad impluvio dell'area a valle delle fuoriuscite, ha probabilmente caricato il dreno basale con un eccessivo apporto di fluidi. Il dreno, che in condizioni normali ha mostrato di funzionare adeguatamente, come osservato sulla sezione di resistività AA' sia di febbraio che di marzo (Figure 3a e 3b), è probabilmente sottodimensionato per i periodi di intense precipitazioni. Quando il dreno non è in grado di espletare la propria funzione, il percolato inizia a ristagnare e il flusso monte-valle può deviare e riemergere in superficie dando origine ai fenomeni di fuoriuscita. Mancano tuttavia informazioni sul comportamento del dreno basale nelle condizioni associate alla fuoriuscita di percolato.

La campagna di indagine, pur completa nel lavoro svolto, rappresenta uno studio preliminare sulle potenzialità offerte dalla tomografia di resistività elettrica nella caratterizzazione di vecchi siti di discardica.

Bibliografia

- Abu-Zeid N., Bianchini G., Santarato G., & Vaccaro G., 2003. Geochemical characterization and geophysical mapping of landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy). *Environ. Geology*, **45**, 439 - 447.
- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity logs as an aid in determining some reservoir characteristics, Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 146, 54-62.
- Aristodemou E., Thomas-Betts A., 2000. DC resistivity and induced polarization investigation at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, **44**, 275-302.
- Bavusi, M., Rizzo, E., and Lapenna, V., 2006. Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy). *Environ. Geology*, **51**, 301- 08.
- Bernstone C., and Dahlin T., 1996. 2D resistivity surveying of old landfills. Procs. 2nd European EGS Meeting, Nantes, France, 2-4 September, 1996.
- Binley A.P., Winship L.J., Pokar M., and Middleton R., 2002. Seasonal variation of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles, *Journal of Hydrology*, **267**, 160-172.
- Chambers J.E., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., and Hollands J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, **71**(6), B231-B239.
- Daily W., and Ramirez A.L., 2000. Electrical imaging of engineered hydraulic barriers. *Geophysics*, **65**, 83-94.
- Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n.36 "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti".
- Depountis N., Harris, C., Davies, M.C.R., Koukis, G., and Sabatakakis, N., 2005. Application of electrical imaging to leachate plume evolution studies under in-situ and model conditions. *Environ. Geology*, **47**, 907-914.
- European Union, 1999. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. *Official Journal of the European Communities*, L182/1-L182/19.
- Gibson, P.J., 2005. Time-lapse resistivity imaging, location and movement of landfill plumes. *Proceedings of the International Association of Hydrologists meeting "Groundwater in Ireland" Tullamore 19th-20th April*, 117-121.
- Godio, A., and Ferraris, S., 2005. Time-lapse geophysics for monitoring an infiltration test in the vadose zone. *Boll. di Geofisica Teorica e Applicata*, **46**, 201-216.
- Goes B.J.M., and Meeke J.A.C., 2004. An Effective Electrode Configuration for the Detection of DNAPLs with Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **9.3**, 127-42.
- Green A., Lanz E., Mauren H., and Boerner D., 1999. A template for geophysical investigation of small landfills. *The leading edge*, **18** 248-254.
- Jomard, H., Lebourg, T., Binet, S., Tric, E., and Hernandez, M., 2007. Characterization of an internal slope movement structure by hydrogeophysical surveying. *Terra Nova*, **19**, 48-57.
- Kuras O., Ogilvy R.D., Pritchard J., Meldrum P.I., and Chambers J.E., 2006. Monitoring leachate levels in landfill sites using automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT). Near Surface 2006 Helsinki, Finland September 04 - 06, 2006.
- Leroux, V., and Dahlin, T., 2006. Time-lapse resistivity investigations for imaging saltwater transport in glaciofluvial deposits. *Environ. Geology*, **49**, 347-358.
- Loke M.H., and Barker R.D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131-152.
- Loke M.H., and Barker R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, **44**, 499-524.
- Martinho, E., and Almeida, F., 2006. 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. *Environ. Geology*, **49**, 1071-1078.
- Meads N.L., Bentley L.R., and Mendoza C.A., 2003. Application of electrical resistivity imaging to the development of a geologic model for a proposed Edmonton landfill site. *Canadian Geotechnical Journal* **40**, 551-558.
- Meju, M.A., 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas : model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, **44**, 115-150.
- Monteiro Santos S.A., Mateus A., Figueiras J., and Goncalves M.A., 2006. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method - A case study. *Journal of Applied Geophysics*, **60** 115-125.
- Mota R., Monteiro Santos F.A., Mateus A., Marques F.O., Goncalves M.A., Figueiras J., and Amaral H., 2004. Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys. *Journal of Applied Geophysics*, **57**, 11-22.
- Nobes D.C., Armstrong M.J., and Close M.E., 2000. Delineation of a landfill leachate plume and flow channels in coastal sands near Christchurch, New Zealand, using a shallow electromagnetic survey method. *Hydrogeol. J.*, **8**, 328 - 336.
- Palacky G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, **1**, 106-121.
- Radulescu, M., Valerian, C., and Yang, J., 2007. Time-lapse electrical resistivity anomalies due to contaminant transport around landfills. *Annals of Geophys.*, **50**, 453-468.
- Reynolds J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons, Inc., USA
- Sandberg S.K., Slater L.D., and Versteeg R., 2002. An integrated geophysical investigation of the hydrogeology of an anisotropic unconfined aquifer. *Journal of Hydrology*, **267**, 227-243.
- United States Environmental Protection Agency, 1993. Survey of technologies for monitoring containment liners and covers. *EPA 542-R-04-013*.
- Walsh D.C., and LaFleur R.G., 1995. Landfills in New York City: 1844-1994. *Ground Water*, **33**, 556-560.
- Wessel P., and Smith W.H.F., 1998. New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- Williams G.M., 1999. Natural attenuation of leachate-Letting nature take its course. *Transaction of the Institution of Mining and Metallurgy*, **108**, B33-B37.
- Yaramanci, U., 1994. Reation of in situ resistivity to water content in salt rocks. *Geophys. Prosp.* **41**, 229-239.
- Yoon, J.R., Lee, K., Kwon, B.D., and Han, W.S., 2003. Geoelectrical surveys of the Nanjido waste landfill in Seoul. Korea. *Environ. Geology*, **43**, 654-666.