

# STRATEGIE DI RILEVAMENTO CON METODOLOGIE INTEGRATE GEOLOGICHE E GEOFISICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DI AREE DI DISCARICA

Daniela Tarallo<sup>1</sup>, Antimo Angelino<sup>2</sup>, Giuseppe Cavuoto<sup>1</sup>, Massimo Contiero<sup>2</sup>, Michele Iavarone<sup>2</sup>, Massimiliano Lega<sup>3</sup>, Nicola Pelosi<sup>1</sup>, Michele Punzo<sup>1</sup>, Paolo Scotto di Vettimo<sup>4</sup>, Vincenzo Di Fiore<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ISPC-CNR – Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – Sede di Napoli.

<sup>2</sup> ISMAR-CNR – Istituto di Scienze Marine – Sede di Napoli.

<sup>3</sup> Università degli studi di Napoli Parthenope – Dipartimento di Ingegneria.

<sup>4</sup> SPIN-CNR – Istituto superconduttori, materiali innovativi e dispositivi – Sede di Napoli.

**Sommario** – Oggi nello studio di siti adibiti a discarica ed in particolar modo per quelli divenuti tali a seguito di azioni illecite, risulta di fondamentale importanza la comprensione preliminare dell'estensione e della morfologia dell'area interessata dall'accumulo di rifiuti così come delle interrelazioni tra gli stessi ed il territorio circostante e, in particolare, nel rilascio di percolato e biogas. I metodi di seguito proposti, pur seguendo due approcci distinti, hanno il fine comune di consentire la necessaria consapevolezza per pianificare e gestire al meglio ogni successiva azione di indagine e caratterizzazione puntuale che altrimenti si rivelerebbe sicuramente dispendiosa e non sempre efficace. Questo articolo riporta due casi studio condotti dai partecipanti del gruppo di lavoro con l'intento di mostrare il vasto campo di applicazione delle metodologie geofisiche nel rilevamento e nell'indagine delle principali caratteristiche di una discarica di rifiuti solidi. La presenza di discariche, in cui al corpo rifiuti spesso si associano biogas e percolato, determinano importanti variazioni di alcuni parametri fisico-chimici, individuabili mediante l'utilizzo di tecniche non invasive di tipo geofisico. La scelta di uno o l'altro metodo è fatta anche in base alla profondità ed estensione delle anomalie da investigare. Lo scopo del presente lavoro è l'analisi delle potenzialità e dei limiti dell'integrazione di differenti metodi geofisici (metodo magnetico, georadar, tomografia elettrica di resistività e polarizzazione indotta,) per la localizzazione di rifiuti interrati di diversa natura. La prima parte di questo lavoro ha avuto lo scopo di verificare l'efficienza di antenne GPR (Ground Penetration Radar) a diversa frequenza (100 MHz – 270 MHz) e indagini magnetometriche gradiometriche in terreni di natura piroclastica dove sono stati interrati oggetti di varia natura e a diverse profondità. L'attività ha permesso di conseguire importanti informazioni sulla scelta della frequenza di utilizzo delle antenne GPR e sulle tecniche magnetometriche in terreni piroclastici e della risposta che tale tecnica fornisce nell'identificazione di oggetti sepolti come fusti metallici e muretti in tufo. Nel secondo caso di studio la caratterizzazione e il monitoraggio dell'area di discarica

sono stati effettuati attraverso la combinazione e l'integrazione di diversi approcci metodologici (geofisici e non), come l'uso parallelo e combinato di dati raccolti da satellite, aereo e in situ, che sono stati convalidati attraverso indagini geofisiche (metodi geoelettrici) e che hanno rivelato l'efficacia di questa strategia.

**Parole chiave:** discarica, metodi geofisici, siti contaminati, resistività elettrica, anomalie magnetiche.

## DETECTION STRATEGIES BY INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL METHODS FOR THE IDENTIFICATION OF LANDFILL AREAS

**Abstract** – This article reports two geophysical case studies which aim was show the large geophysical methods application areas characteristics of a solid waste landfill. The presence of landfills, in which biogas and leachate are often associated with the waste body, determine important variations in some physico-chemical parameters, identifiable through the use of non-invasive geophysical techniques. In this paper we analyzed the potential and limits of different geophysical methods (electrical resistivity tomography, induced polarization, magnetic method and georadar). In the first case study, key novelty elements of this approach for the characterization and monitoring of the landfill area are the combination and integration of different methodological approaches (geophysical and otherwise), such as the parallel and combined use of collected data from satellite, airborne and in situ, which have been validated through geophysical investigations (geoelectric methods) and which have revealed the effectiveness of this strategy. The second part of this work aimed to verify the efficiency of GPR (Ground Penetration Radar) antennas at different frequencies (100 MHz – 270 MHz) and gradiometric magnetometric investigations in pyroclastic soils where objects of various kinds have been buried at different depths.

**Keywords:** landfill, geophysical methods, contaminated sites, electrical resistivity, magnetic anomalies.

\* Via Cardinale Guglielmo Sanfelice 8, 80134 Napoli (NA), 081 5423856, e-mail: vincenzo.difiore@cnr.it

Ricevuto il 14-4-2021. Modifiche sostanziali richieste il 5-7-2021. Accettazione il 2-12-2021.

## 1. INTRODUZIONE

Oggigiorno è sempre più chiaro che i rifiuti di diversa natura a contatto con il terreno nel tempo subiscono trasformazioni tali da rilasciare sostanze chimiche nocive nel sottosuolo e quindi nelle falde, provocando gravi danni ambientali a volte irreversibili (D'Alisia et al., 2014; Triassi et al., 2015). La caratterizzazione e il monitoraggio di siti adibiti a discarica che siano esse esaurite, in esercizio, o abusive è prioritario per la tutela e salvaguardia del territorio. A tal fine è importante porre particolare attenzione a quei siti in cui il deposito di rifiuti è avvenuto in maniera non autorizzata e quindi non controllata. Nel corso degli anni, i diversi interventi della Suprema Corte, hanno definito gli aspetti costituenti una “discarica abusiva”.

In particolare, una discarica si configura come abusiva se riscontrati i seguenti elementi (Corte di Cassazione Terza Sezione Penale, sentenza n. 36021/2012):

- l'accumulo dei rifiuti è ripetuto e non occasionale ed avviene in una determinata area;
- la massa dei materiali accumulati è eterogenea;
- l'abbandono non è temporaneo ma definitivo;
- vi è degrado anche tendenziale dello stato dei luoghi.

Tutti questi elementi vanno ben valutati da enti governativi e forze dell'ordine, che monitorano e valutano i rischi o i danni associati allo smaltimento dei rifiuti. Al giorno d'oggi è possibile beneficiare di nuove strategie di indagine multidisciplinari relativamente economiche e speditive utili all'identificazione, alla caratterizzazione e al monitoraggio delle discariche, sia che si tratti di discariche esaurite o ancora in esercizio, che di discariche abusive. Per la caratterizzazione di una discarica vengono definiti tre diversi obiettivi, tra loro consequenziali: (1) la rilevazione e l'identificazione del vero “corpo” dei rifiuti, principale fonte di contaminazione; (2) la caratterizzazione geometrica della fonte di contaminazione, in termini di estensione laterale, la profondità di scavo e penetrazione dei contaminanti (eventuale percolato); (3) la caratterizzazione del tipo di rifiuto, con riconoscimento dei rifiuti con una forte componente metallica (es. fusti in metallo o PVC, scorie d'altoforno, etc. ), fluidi ipersalini (es. sacche di percolato), materiali di scarto resistivi, ecc. In particolare, i metodi geofisici indiretti, forniscono una valida alternativa alle strategie di intervento “tradizionali” (pozzi esplorativi), grazie alla possibilità di ottenere modelli tridimensionali

del corpo di discarica attraverso l'analisi di anomalie dei parametri fisici come la conducibilità elettrica, la suscettibilità magnetica, la costante dielettrica stanti i limiti di risoluzione e profondità di investigazione che devono essere considerati (Dawrea et al., 2021; Di Giambattista et al., 2016).

In questo studio di si riportano i risultati di due casi di studio selezionati con l'obiettivo di mostrare il vasto campo di applicazione che nasce dall'integrazione di metodi geologici, geografici (telerilevamento) e geofisici nel settore dei rifiuti.

La prima applicazione riguarda la valutazione dell'efficacia delle tecniche GPR (Ground Penetration Radar) a diverse frequenze (100 MHz – 270 MHz) e magnetica gradiometrica in un test site situato nel comune di Succivo (NA) costituito da terreni piroclastici dove sono stati interrati oggetti di varia natura (fusti metallici e muretti in tufo) e a diverse profondità (1m – 2m – 3m).

Il secondo caso studio relativo ad una ex cava nel comune di Giffoni Valle Piana (Di Fiore et al. 2017), nella Provincia di Salerno, Regione Campania (Italia meridionale), concerne l'individuazione dell'eventuale presenza di una discarica e la sua caratterizzazione dal punto di vista dei materiali sepolti.

## 2. CASO STUDIO 1: SITO DI TEST

### 2.1. Descrizione del sito

L'area test, situata nel comune di Succivo (NA) (Figura 1a, a pagina seguente), è stata approntata al fine di verificare l'efficienza del metodo GPR (Ground Penetration Radar) a diverse frequenze (100 MHz – 270 MHz) e del metodo magnetico gradiometrico per l'individuazione di oggetti antropici di varia natura (fusti metallici, muretti in tufo e tubi in PVC) in terreni di natura piroclastica a piccole profondità (1m – 2m – 3m). In Figura 1b è illustrata la disposizione degli oggetti e delle strutture interrate.

### 2.2. Materiali e metodi

Nella zona di Succivo (NA) è stata progettata e realizzata un'area test costituita da un riempimento con terreni di natura piroclastica di uno scavo delle dimensioni di 7,8 m x 9,9 m. All'interno dello scavo sono stati sepolti, a profondità di 1 m, 2 m e 3 m, fusti metallici, muretti di tufo e un tubo in PVC.

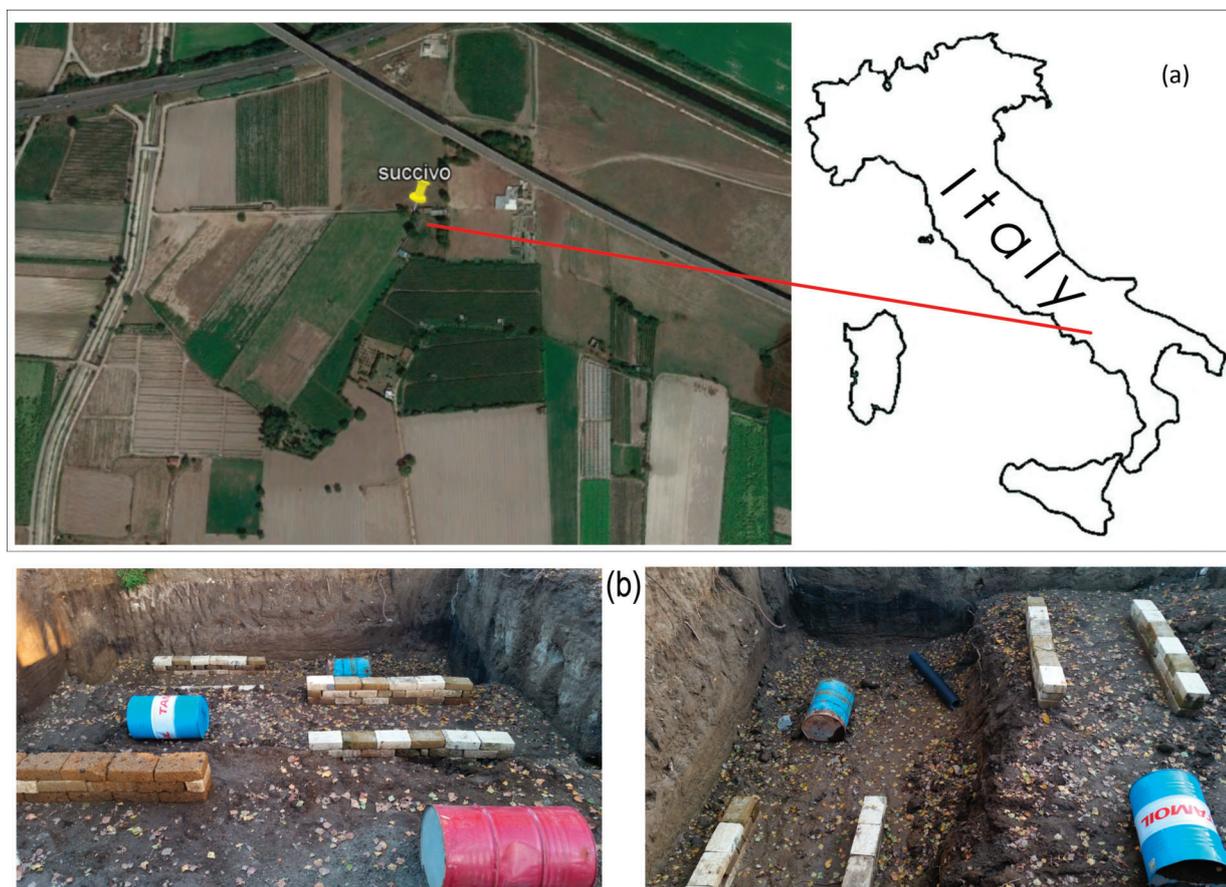


Figura 1 – a) Localizzazione dell'area test di Succivo (NA); b) immagini riferite al sito di sperimentazione ed in particolare dello scavo e degli oggetti posizionati per il test

Le posizioni degli oggetti sepolti sono illustrate in Figura 2a-b. In particolare, i fusti hanno una lunghezza di 0,90 m e un diametro di 0,60 m; i muretti hanno una lunghezza di 2,15 m; mentre la tubazione in PVC ha una lunghezza di 1,60 m e un diametro di 0,20 m.

La scelta di posizionare all'interno dello scavo oggetti di diverse dimensioni e materiali nasce allo scopo di comprendere il comportamento delle antenne radar a frequenza di 100 MHz e 270 MHz in terreni di natura piroclastica.

Il GPR è infatti utilizzato nel campo della tutela ambientale per rilevare sostanze liquide contaminanti o tossiche; in ambito urbano per la sua elevata risoluzione, velocità di acquisizione e non invasività, rilevando sottoservizi; in applicazioni forensi per individuare corpi, armi, stupefacenti nascosti ed eventuali ordigni bellici; in ambito archeologico per individuare spedite strutture al di sotto di una potenziale area di scavo (VV. AA., 2004)

Il metodo si basa sulla misura, ad intervalli spaziali e temporali generalmente ridotti, dei tempi

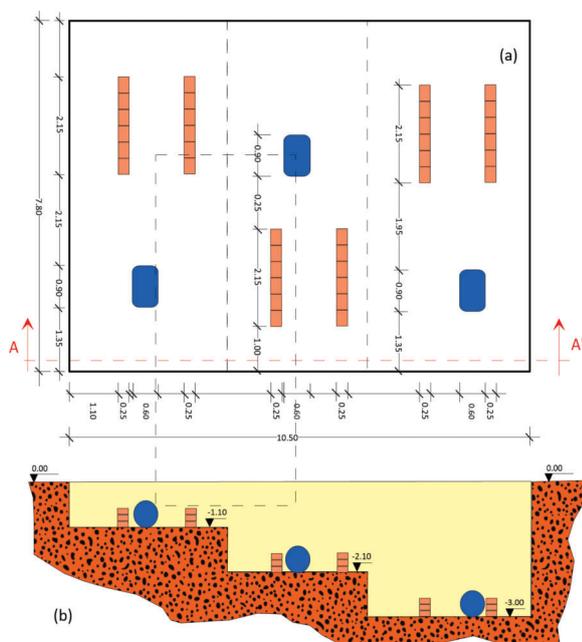


Figura 2 – Schema del posizionamento dei fusti metallici e dei muretti di tufo all'interno dello scavo; a) pianta; b) sezione A-A'



Figura 3 – a) Grid del rilievo GPR con antenna a 270 MHz; b) e a 100 MHz



Figura 4 – Grid del rilievo magnetico gradiometrico nell'area oggetto di studio

di viaggio di impulsi elettromagnetici (EM) ad alta frequenza (10 MHz – 3GHz). Indagando il sottosuolo lungo un allineamento rettilineo si ottiene un diagramma distanza-tempo (radargramma). Tramite una stima della velocità di propagazione dell'onda EM è possibile poi convertire l'asse dei tempi in profondità. Nella configurazione fixed offset (usata spesso nelle applicazioni a piccole profondità) le anomalie puntiformi sono rappresentate da iperboli di diffrazione,

mentre discontinuità piane e parallele alla superficie sono rappresentate nel radargramma nella loro forma effettiva. All'interno dell'area test sono state acquisite 6 profili GPR con antenna a 100 MHz (Figura 3a) con equidistanza delle linee di 0,5 m.

Con l'antenna a 270 MHz sono state acquisite 18 linee radar ortogonali fra loro. L'equidistanza è di 1 m per le linee longitudinali e 0,5 m per la direzione ortogonale (Figura 3b).

I dati acquisiti in questo modo hanno permesso di avere informazioni geofisiche lungo una griglia regolare costituita da maglie rettangolari ed ottenere così un'immagine del sottosuolo a profondità differenti a seconda dell'antenna utilizzata.

La seconda fase di studio ha previsto l'acquisizione dei dati magnetici gradiometrici. La tecnica di magnetometria differenziale è stata applicata durante gli ultimi anni per ricerca di materiale magnetico sepolto come fusti, serbatoi di stoccaggio sotterranei, condotte interrato (Schmidt P.W. and Clark D.A., 2000; Veryaskin, 2001). In particolare, è utilizzato nella caratterizzazione dei siti di discarica per individuare la presenza di materiale magnetico interrato (Barrow et al. 1990; Roberts et al., 1990; Marchetti et al., 2002).

Il rilievo magnetico è stato condotto utilizzando una configurazione gradiometrica. Questa metodologia, basata sull'uso di un pseudogradiante magnetico, fornisce la variazione spaziale totale e gradiometrica dell'intensità del campo geomagnetico. La tecnica del gradiente magnetico, rispetto al campo magnetico totale, è in grado di attenuare gli effetti della sorgente profonda e di eliminare ogni variazione magnetica naturale e temporale. Ulteriori vantaggi sono: la velocità di acquisizione (circa 10 misure al secondo); l'elevata discriminazione laterale del segnale; l'eliminazione automatica di qualsiasi rumore casuale o temporale. Il rilievo magnetico è stato condotto lungo 34 profili, con modalità operativa "simple survey", per una lunghezza totale di circa 2 km all'interno dell'area di studio (Figura 4).

Il rilievo magnetico ha previsto l'acquisizione di circa 30 profili ortogonali tra loro con un intervallo di circa 80-100 cm (Figura 4).

Il gradiente spaziale del campo magnetico si ottiene utilizzando due sensori magnetici in tandem. La configurazione comune prevede un sensore magnetico in verticale sopra l'altro, con una separazione compresa tra 0,5 e 1 m. La componente verticale del gradiente spaziale, o semplicemente il gradiente, si ottiene differenziando due misurazio-

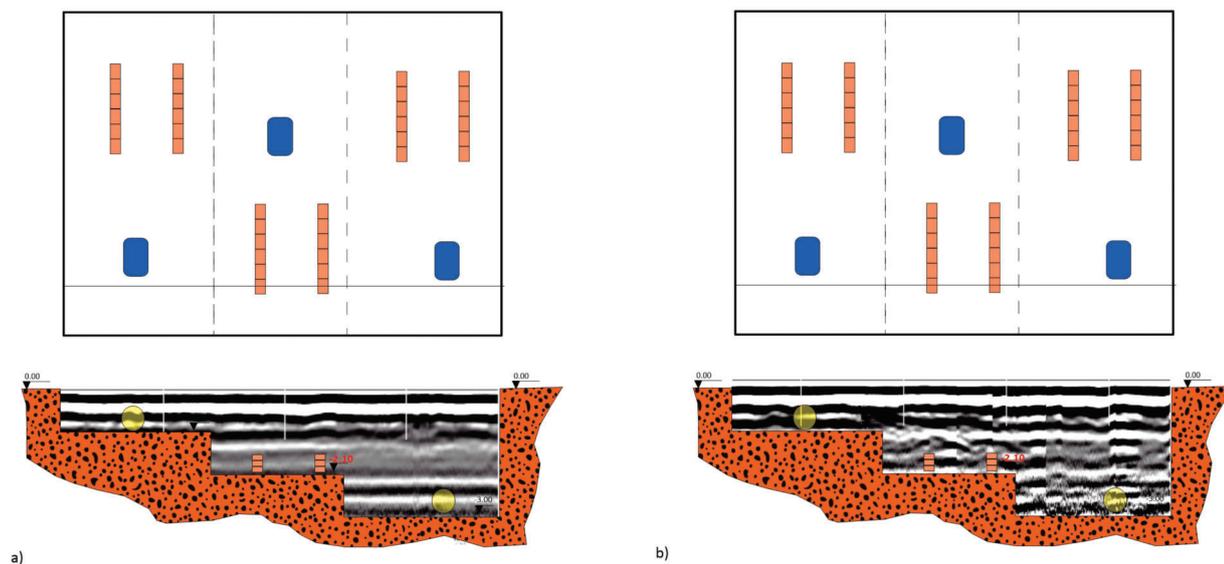


Figura 5 – Sovrapposizione del radargramma del profilo P02\_270 acquisito con antenna a 270 MHz con la sezione del terreno congruente. A) Prima dello scavo; b) Dopo lo scavo

ni simultanee di B e dividendo per la distanza di separazione dei sensori. Chiaramente, questa è un'approssimazione del gradiente, dovuto alla separazione finita dei sensori. Nel nostro caso abbiamo utilizzato due sensori disposti uno sopra l'altro ad una distanza di un 1m.

Risulta molto importante che l'area indagata sia caratterizzata da un basso noise elettromagnetico. In caso contrario le misure potrebbero essere affette da errori non eliminabili in fase di elaborazione dei dati (Di Fiore et al., 2019).

### 2.3. Risultati e discussione

I radargrammi ottenuti sono stati elaborati seguendo i seguenti step:

- Interpolazione dei dati relativi a posizioni intermedie rispetto ai markers.
- Correzione della direzione e delle coordinate dei profili.
- Correzione statica (effettuata per eliminare il disturbo provocato dall'accoppiamento dell'antenna col terreno).
- Gain: amplificazione preventiva del segnale che può essere successivamente variato o eliminato.
- Filtraggio 1D (filtro passa banda).
- Filtraggio 2D (background removal che rimuove il noise rappresentato da una banda orizzontale).
- Stacking a 10, 25 e 50 (cioè ad esempio in un pacchetto di tracce ne sono state considerate 10 e poi sommate così da riportarne una sola semplificativa su quella data distanza).

- Determinazione della velocità media di propagazione (calcolata mediante la taratura delle dimensioni delle iperboli direttamente restituite dai radargrammi).

Di seguito sono presentati i risultati di due delle linee acquisite, una ottenuta con frequenza dell'antenna di 270 MHz e una con frequenza di 100 MHz. La posizione delle linee è illustrata nelle Figg. 5 e 6. Entrambi i radargrammi sono stati confrontati con delle linee acquisite con la medesima antenna ma precedentemente lo scavo e l'inserimento degli oggetti. Per il radargramma acquisito con antenna GPR da 270 MHz si osserva (Figura 5) la presenza di diffrazioni laddove sono posizionati i muretti. Il primo fusto posizionato ad 1 m di profondità non crea nessun tipo di segnale dato che la linea acquisita non passa al di sopra dell'oggetto, mentre si nota il fusto posizionato a 3 m, dato che al crescere della profondità la porzione di sottosuolo "illuminata" dalla sorgente aumenta, seppur diminuisce la risoluzione, è possibile discernere anche anomalie laterali.

Nel radargramma acquisito con antenna a 100MHz (Figura 6 a pagina seguente) non sono invece visibili i risultati presenti con l'acquisizione a 270 MHz. Questo perché una frequenza nominale più bassa fa sì che il segnale arrivi a maggiore profondità ma non abbia la stessa risoluzione laterale e verticale.

Oltre le sezioni verticali (radargrammi) è stato possibile anche ottenere delle sezioni orizzontali (Time-slices) avendo a disposizione dei profili acqui-



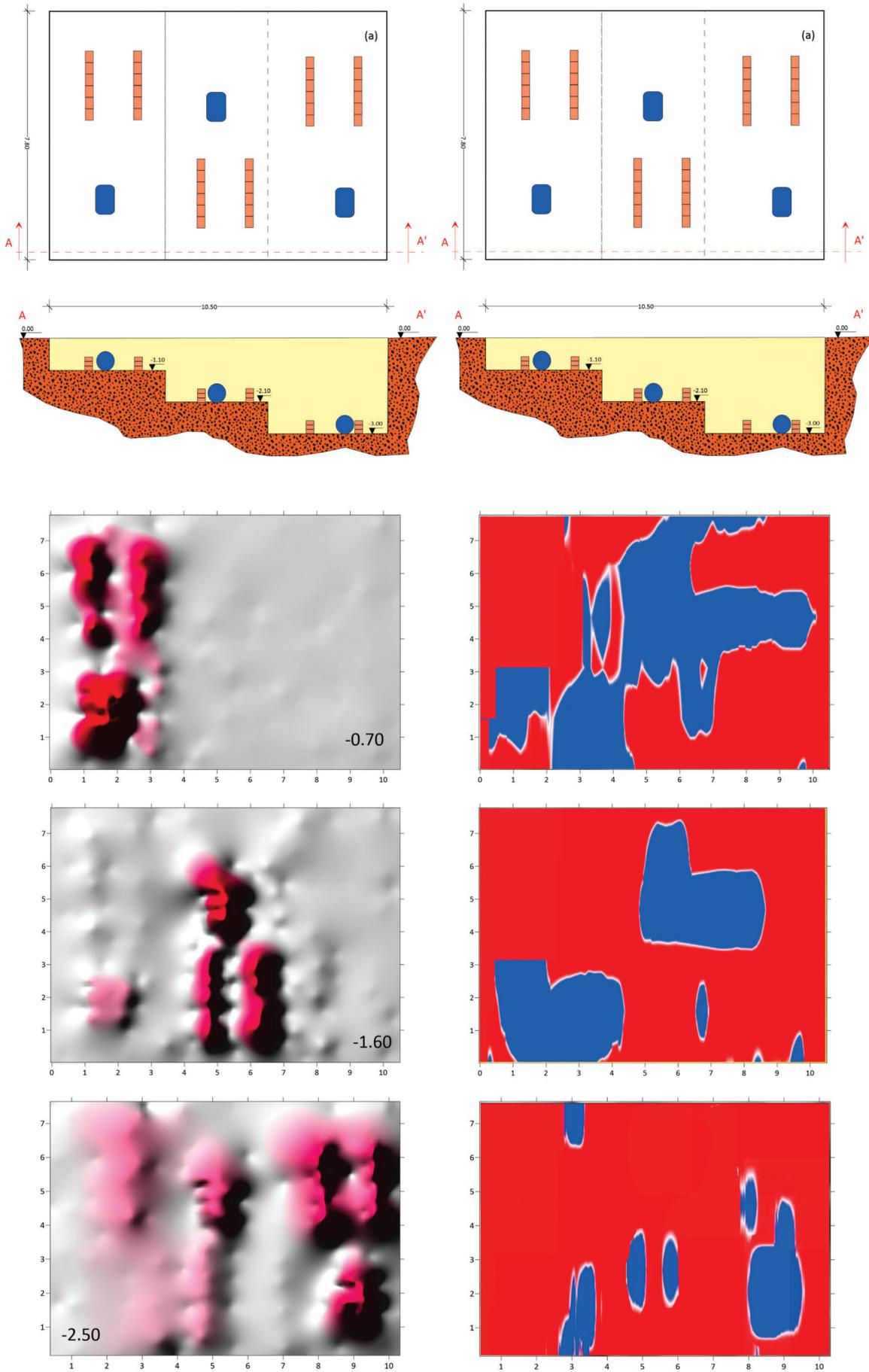


Figura 7 – Time slices ottenute alle profondità di 0,70 m, 1,60 m e 2,50 m (a) per l'antenna a 270 MHz (b) per l'antenna a 100 MHz

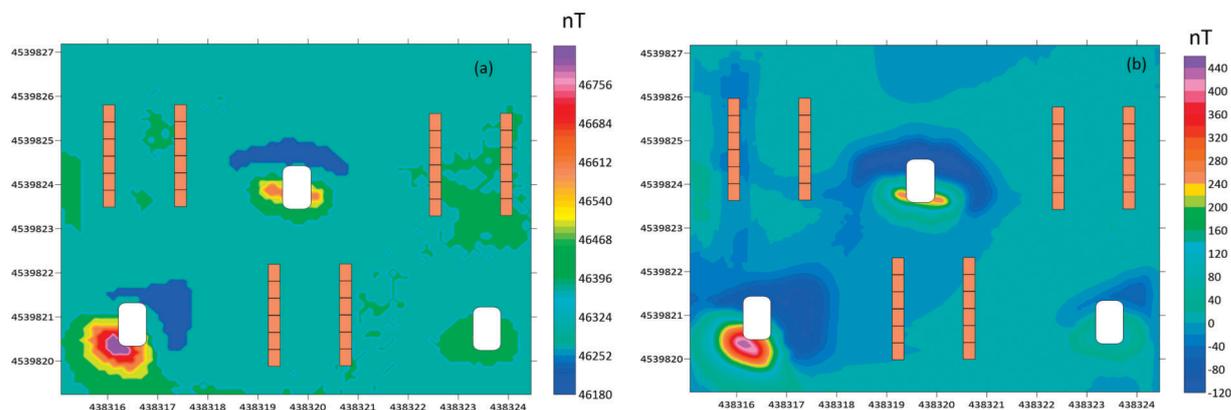


Figura 8 – Intensità del campo magnetico totale (a); Anomalia locale ottenuta dalla correzione del CM regionale (b)

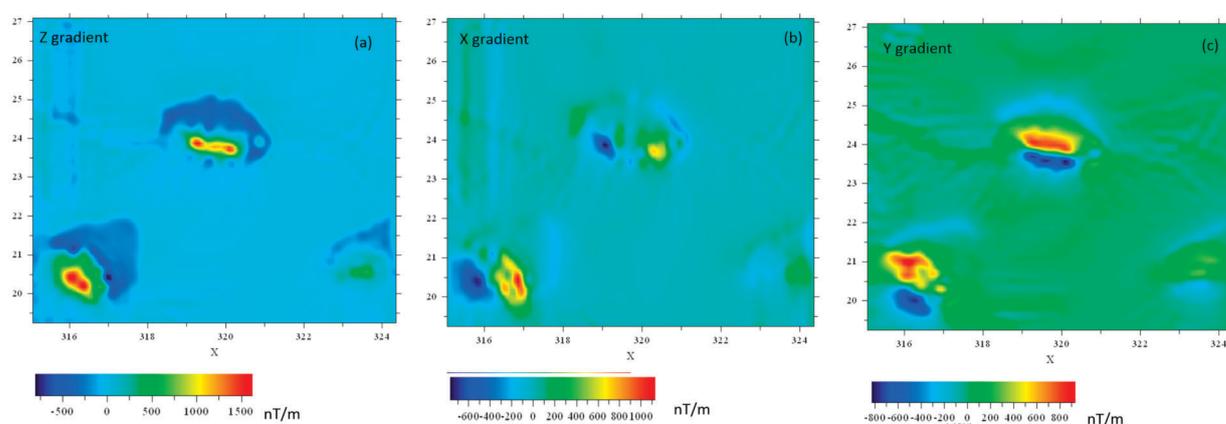


Figura 9 – Rappresentazione delle mappe dei gradienti  $d^2B/dz^2$  (a),  $d^2B/dx^2$  (b) e  $d^2B/dy^2$  (c) riferite all'area di indagine

magnetiche, che si basa sull'angolo di inclinazione del gradiente orizzontale totale. Le apprezzabili caratteristiche di questo metodo sono la creazione di massimi di ampiezza sui bordi della sorgente e l'equalizzazione dei segnali da sorgenti superficiali e profonde. La Figura 9 mostra le mappe dei gradienti nelle direzioni X, Y e Z. I risultati mostrano che il metodo è meno sensibile alle variazioni in profondità delle sorgenti e che indica la posizione dei bordi dei corpi causali in modo più accurato, rispetto ai metodi precedenti, anche per anomalie dovute a più sorgenti interferenti. Questi risultati dimostrano che il metodo proposto è uno strumento utile per l'interpretazione semi-quantitativa dei dati magnetici.

Sono chiaramente evidenti le aree sottese dagli oggetti sepolti in un fondo completamente omogeneizzato. Tali mappe sono state ottenute operando con il calcolo differenziale sui dati del campo magnetico B. I bordi di tali anomalie associate agli oggetti di Figura 9 non forniscono dettagli

geometrici su tali oggetti ma neppure stime in termini di profondità. Quello che ci dicono ed in particolar modo il gradiente lungo Z, è che si notano tre anomalie dipolari con differente intensità. Lo stesso gradiente  $dB/dz$  mostra valori anche di 1500 nT/m per il fusto sepolto a 1 m di profondità mentre gli altri gradienti raggiungono valori di 1000 nT/m ( $d^2B/dx^2$ ) e 600 nT/m ( $d^2B/dy^2$ ). A questo punto dell'analisi, applicando ulteriori operatori differenziali sui dati, è possibile ottenere informazioni aggiuntive. In particolare, eseguiamo il gradiente orizzontale (Figura 10a, a pagina seguente) ed il gradiente totale ovvero il segnale analitico (Figura 10b).

In questo caso otteniamo una maggiore risoluzione del segnale in cui si definiscono qualitativamente i bordi degli oggetti nel sottosuolo.

A conclusione dell'elaborazione si passa ad eseguire il "Tilt depth method" (TDD – Salem et al., 2007). Con tale metodo sulle mappe ottenute è possibile stimare la profondità dell'oggetto che pro-

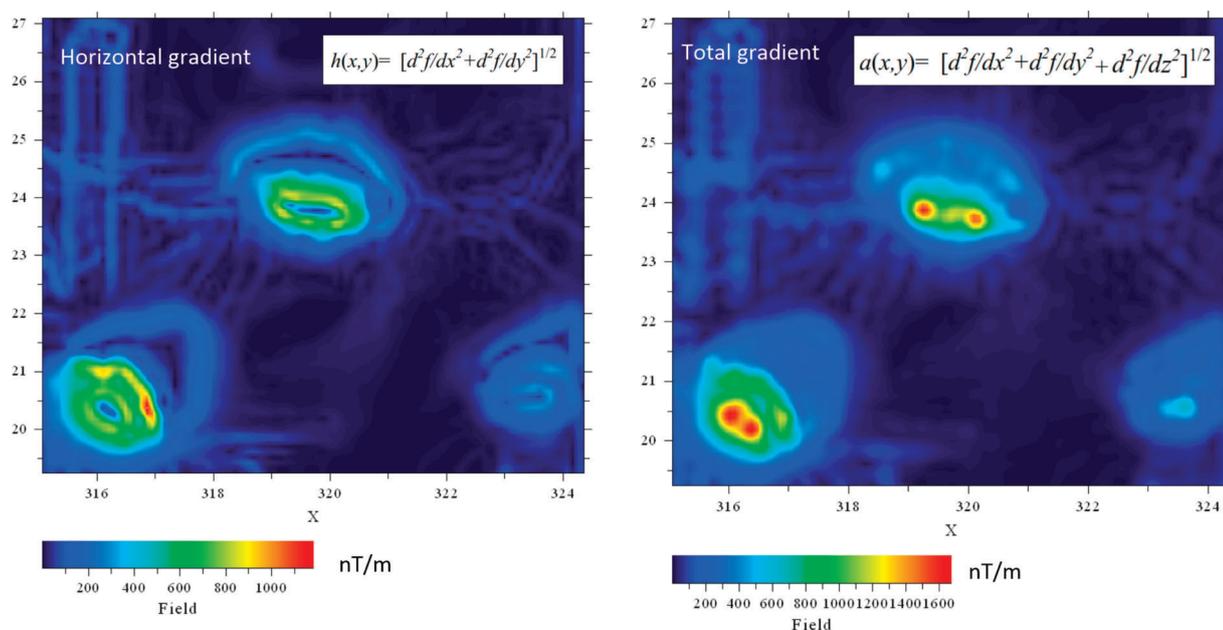


Figura 10 – Rappresentazione delle mappe dei gradienti. A) gradiente orizzontale; b) gradiente totale o segnale analitico

duce l'anomalia semplicemente andando a misurare sulla suddetta anomalia la distanza tra lo  $0^\circ$  ( $h=0$ ) e  $\pm 45^\circ$  ( $h=z$ ). Tale segmento rappresenta la profondità dell'oggetto.

La Figura 11 riporta questo tipo di analisi per il nostro test. In particolare, sulla mappa sono state individuate le anomalie e su di esse sono stati tracciati i segmenti che congiungono le isoanomalie di

$0^\circ$  e  $-45^\circ$ . I segmenti identificati con D1, D2 e D3 rappresentano rispettivamente le profondità del fusto a 0.5 m, 1.5 m e 2.5 m.

### 3. CASO STUDIO 2: DISCARICA ABUSIVA

#### 3.1. Descrizione del sito

Il sito di studio (Figura 12, a pagina seguente) si trova nel comune di Giffoni Valle Piana, nella Provincia di Salerno, Regione Campania (Italia meridionale) e fa parte di una zona di cava dismessa. La superficie analizzata presenta una forma sub-triangolare, ha una lunghezza di base di circa 175 m e una larghezza di circa 70 m, l'area totale è approssimativamente di circa 6000 m<sup>2</sup>. Negli ultimi anni la zona in prossimità dell'alveo del Rio Secco è diventata un'area di smaltimento di rifiuti a cielo aperto. Di conseguenza è stato necessario verificare l'esistenza di rifiuti interrati e l'eventuale presenza di inquinanti pericolosi. Questi materiali trasportati verso valle durante la stagione delle piogge possono essere un'importante fonte di inquinamento degli stessi corsi d'acqua e della falda acquifera, aumentando i rischi associati all'attività della discarica abusiva.

Dal punto di vista geologico l'area di studio (Figura 12) si trova nella pianura alluvionale della valle del Rio Secco, all'interno di un'ampia zona sub-pianeggiante, che rappresenta l'area sommitale di un antico terrazzo di origine alluvionale. Questa ter-

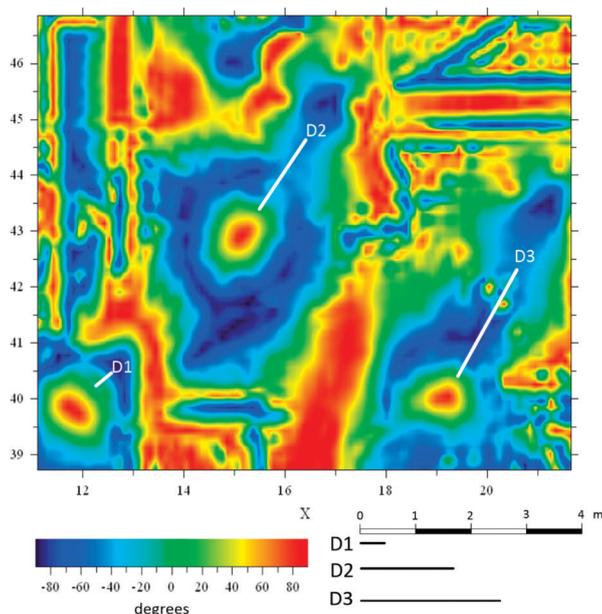


Figura 11 – Mappa ottenuta dal "Tilt-depth method". I segmenti in bianco (D1, D2, D3) rappresentano le congiungenti tra il valore del TDD  $0^\circ$  e  $-45^\circ$

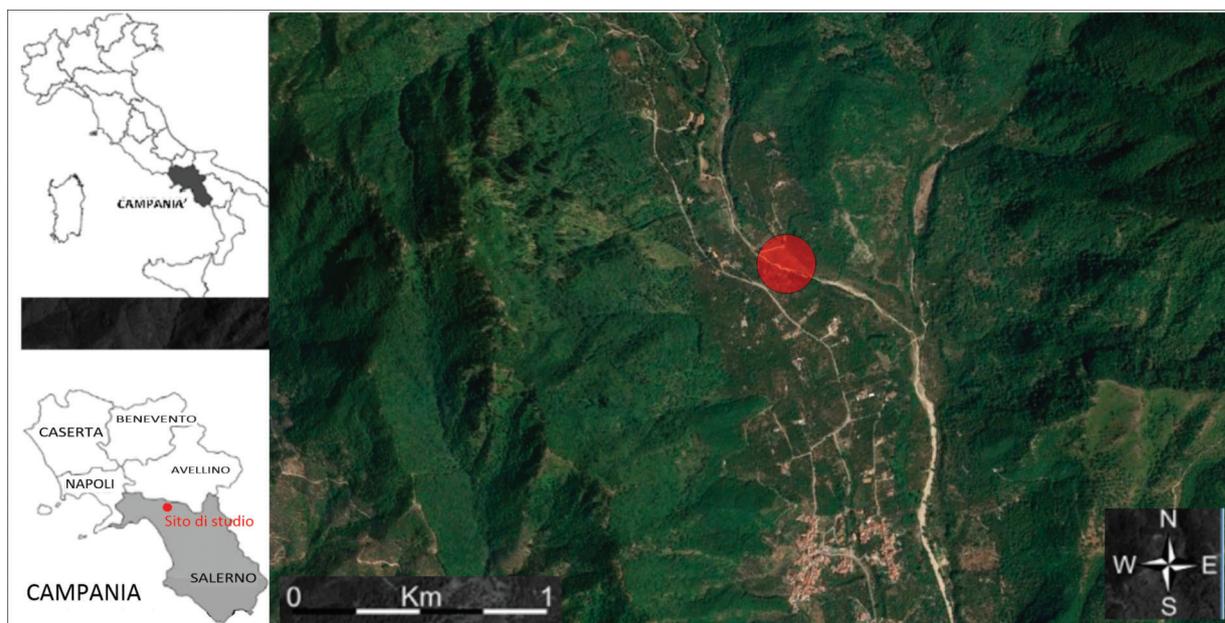


Figura 12 – Ortofoto dell’area di studio e suo inquadramento (da Di Fiore et al., 2017 modificata)

razza è delimitata da piccole scarpate che, verso il basso diventano via via più marcate. La discarica, posta ad un’altitudine di 460 m s.l.m. degrada a SE fino a 453 m s.l.m. Inoltre, l’area è delimitata da una scarpata di erosione, che originariamente delimitava la terrazza alluvionale (attualmente scomparsa a causa di una precedente opera idraulica di manutenzione). Gli affioramenti sono costituiti da rocce dolomitiche e calcari dolomitici. Questa formazione è totalmente coperta da depositi continentali (depositi conglomeratici in matrice piroclastica). Nella sua parte superiore, è ricoperta da un sottile deposito eluvio-colluviale di origine vulcanoclastica e da livelli sabbioso-argillosi pedogenizzati che, affiorano lungo le scarpate di erosione e nel letto del Rio Secco. Questi depositi sono ricoperti da depositi alluvionali terrazzati, con spessore di circa 20 m, composti da ghiaie e sabbie poligeniche fluviali alternate a sedimenti vulcanoclastici.

### 3.2. Materiali e metodi

Lo studio per la valutazione e la caratterizzazione della discarica ha previsto l’impiego di diverse strategie di esplorazione. Innanzitutto, è stata eseguita un’analisi multi-temporale per il riconoscimento della morfometria, delle caratteristiche geomorfologiche e per conoscere parametri quantitativi come i volumi della discarica eventualmente mobilitati. In particolare, sono state utilizzate quattro serie di foto aeree, scattate negli anni 1988, 1994, 1998 e 2006. Tutte le immagini sono state

georeferenziate utilizzando un GIS e successivamente tale strumento è stato utilizzato per evidenziare le modifiche dell’area investigata.

Sulle aree individuate come modificate nel corso degli anni, sono state calibrate le indagini geofisiche in situ. È stata utilizzata un’indagine geofisica congiunta del comportamento resistivo e capacitivo del sottosuolo: (1) il metodo della Tomografia elettrica di resistività (ERT) (2) Polarizzazione indotta nel dominio del tempo (PI). La ERT 2D è la tecnica geofisica non invasiva più applicata per il monitoraggio delle discariche, per determinare il rischio di contaminazione del suolo e delle falde acquifere e per fornire informazioni sui modelli di migrazione del percolato (Belghazal et al., 2013; Bichet et al., 2016; Dahlin et al., 2010; De Carlo et al., 2013; De Dono G. & Cardarelli E., 2017; Ustra A. & Elis V.R., 2018). Tale tecnica permette di ottenere attraverso l’immissione di corrente nel terreno e la misura del potenziale valori di resistività apparente del sottosuolo. Il valore di resistività che si misura, è una resistività apparente perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro, hanno attraversato più formazioni rocciose. La distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che la corrente ha attraversato. Pertanto, per ottenere un modello di resistività, e quindi per poter ricostruire l’andamento delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario realizzare un’inversione dei dati. Il processo di inver-

sione, implementato attraverso l'algoritmo di Occam (La Brecque et al., 1996), utilizza il metodo dei minimi quadrati non lineare e consente di ottenere la distribuzione della resistività nel sottosuolo mediante un processo iterativo di inversione dei dati che si basa sulla minimizzazione dell'errore tra i dati acquisiti in campagna e i dati calcolati sulla base di modelli teorici.

Il metodo della PI nel dominio del tempo, combinato al metodo ERT, permette in un ambiente di discarica di discriminare la presenza di rifiuti da litotipi naturali (Gallas et al., 2011; Gazoty et al., 2012). Ad esempio, quando si osservano valori di resistività bassi in discarica solo l'ausilio del parametro di caricabilità può aiutare a risolvere alcune ambiguità tra il terreno naturale ed un eventuale percolato. Infatti, elevati valori di caricabilità sono indice sicuro della presenza di materiale antropico e/o percolato.

Il metodo della PI nel dominio del tempo si basa sul fatto che il potenziale elettrico non decade a zero istantaneamente quando viene interrotta la corrente di energizzazione, ma si scarica in certo tempo (generalmente qualche secondo). Il tempo di decadimento dipende da fattori idrogeologici e antropici. Il parametro misurato è la caricabilità integrale apparente e tramite un processo di inversione analogo a quello relativo alla resistività si ottiene un modello di caricabilità reale del sottosuolo. La caricabilità è per definizione sensibile sia alla conduzione elettrolitica (di volume) che a quella superficiale. È stata poi calcolata la caricabilità normalizzata (MN) per esaltare i fenomeni superficiali ed essere maggiormente rappresentativa del fenomeno di PI (Slater & Lesmes, 2002).

I dati di resistività elettrica e polarizzazione sono stati acquisiti lungo quattro profili P1-P4 (Figura 13).

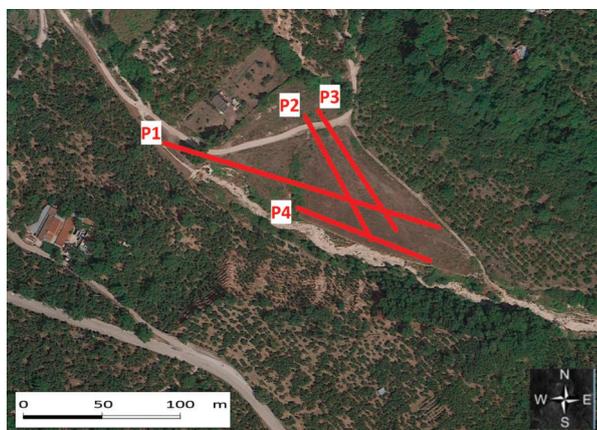


Figura 13 – Profili ERT e di Polarizzazione Indotta (P1-P4, linee in rosso da Di Fiore et al., 2017 modificata)

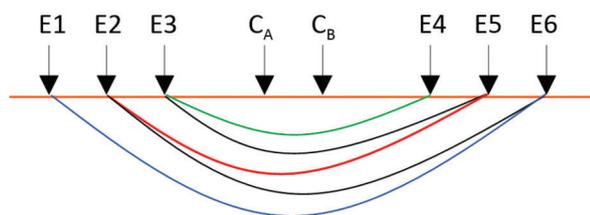


Figura 14 – Configurazione quadripolare Schlumberger reciproco, dove “ $C_A$ ” e “ $C_B$ ” sono gli elettrodi di corrente e E1, E2.....En, sono gli elettrodi di potenziale

Tabella 1 – IP timing riferito alla computazione Cole-Cole per la misura della Caricabilità. I tempi di campionamento sono espressi in ms.

TM 1/5	TM 6/10	TM 11/15	TM 16/20
10	20	40	60
20	30	40	60
20	30	50	70
20	30	50	80
20	40	50	90

In particolare, il profilo 1 e il profilo 4 seguono la linea di massima pendenza del sito, mentre il profilo 2 e il profilo 3 sono paralleli tra loro e seguono l'andatura meno acclive. La configurazione elettrodica utilizzata è stata del tipo Schlumberger reciproco. Il significato di “reciproco” è relativo alla posizione interna degli elettrodi di iniezione, rispetto alla classica matrice Schlumberger-Wenner. Questo permette di realizzare la seguente sequenza ottimizzata secondo la Figura 14.

È possibile impiegare in questo modo la configurazione quadripolare reciproca che consente l'ottimizzazione delle sequenze di misura, poiché a medesimi posizionamenti degli elettrodi di corrente corrispondono più posizionamenti degli elettrodi di potenziale (Figura 14). La Tabella 1 riporta invece i parametri di acquisizione della IP.

I profili sono stati acquisiti utilizzando un'interdistanza elettrodica di 2m. Il profilo 1 ha un orientamento WNW-ESE ed è stato acquisito utilizzando 96 elettrodi (lunghezza di 190 m), i profili 2 e 3 con orientamento NW-SE, e il profilo 4 orientato WNW-ESE, sono stati acquisiti utilizzando 48 elettrodi ed hanno una lunghezza di 94 m.

### 3.3. Risultati e discussione

I risultati ottenuti attraverso l'analisi multi-temporale delle ortofoto, presentano una serie di variazio-

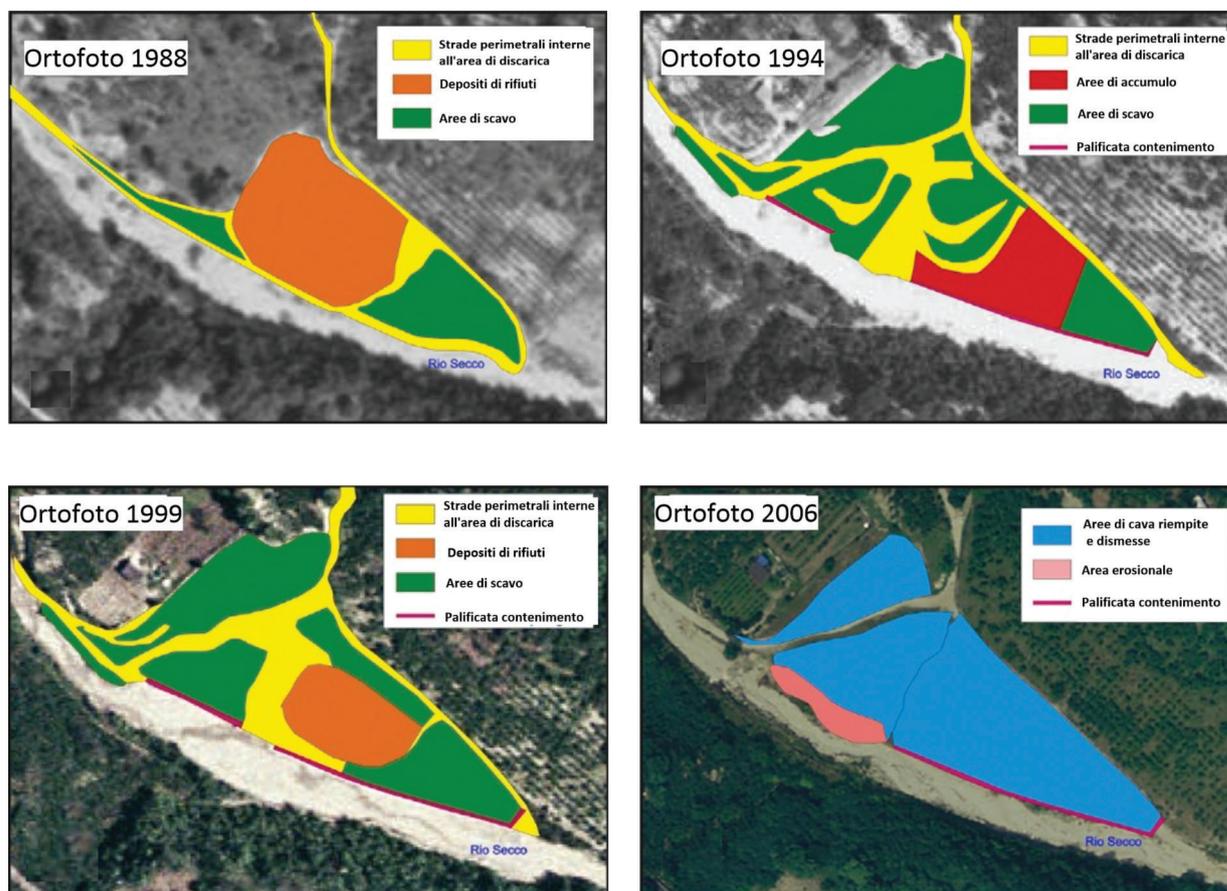


Figura 15 – Foto aeree su cui sono state mappate le variazioni morfologiche nel periodo dal 1988-2006 (da Di Fiore et al., 2017 modificata)

ni dell'area di cava. L'ortofoto del 1988 (Figura 15) mostra che la zona era costituita da un versante di montagna cavato accessibile dal letto del fiume Rio Secco attraverso una strada sterrata, sviluppatasi lungo il margine occidentale dell'alveo. Questa presenta una geometria a gradini, degradante verso valle (Piano regionale attività estrattive, Regione Campania 2006). L'immagine raffigura chiaramente un'area di accumulo di materiali e/o rifiuti (Figura 15). Sul lato destro della strada di accesso è presente un'area vegetata (Figura 15), forse rialzata nel rispetto dell'alveo, probabilmente interessata da movimentazione e stoccaggio di materiali. L'ortofoto del 1994 indica maggiori cambiamenti con la presenza di una vasca di forma quadrangolare (Figura 15) con fondo piatto e lati molto inclinati. Il colore scuro di quest'area indica probabilmente un possibile posizionamento di materiali di copertura, geotessili o altro. È anche possibile osservare una netta linea di demarcazione tra l'alveo e la zona della cava, ciò suggerisce la presenza di un'azione di contenimento mediante palificazione. L'ortofoto del 1998 (Figura 15) indica invece una scomparsa delle precedenti caratteristiche. Il bacino risulta pieno.

Infine, nell'immagine dell'ortofoto del 2006 (Figura 15) indica che tutte le zone, dove sono presenti scavi e movimentazioni sono completamente riempite.

I modelli di resistività, di caricabilità e di carica-normalizzata relativi ai profili P1 e P2 sono riportati rispettivamente in Figg. 16 e 17 (a pagina seguente).

Il profilo 1 di resistività (Figura 16a, a pagina seguente) presenta una zona centrale (distanza di 90-100 m) anomala con alti valori di resistività ( $>5000 \Omega\text{m}$ ) ad una profondità di circa 15 m. A partire dalla distanza di 100 m e fino ai 150 m si osserva una zona caratterizzata da bassi valori di resistività e di forma concava (circa  $100 \Omega\text{m}$ ). Il modello di caricabilità (Figura 16b) mostra valori significativi ( $> 10 \text{ mV/V}$ ) proprio in corrispondenza di questa zona. La Figura 16c riferita alla carica-normalizzata mostra anch'essa valori più elevati in quest'area, fino a  $0,7 \text{ mS/m}$ .

Il modello di resistività del profilo P2 (Figura 17a) mostra una vasta area conduttiva con valori di resistività bassi ( $20\text{-}150 \Omega\text{m}$ ) ad una distanza compresa tra 20 m e 54 m. In corrispondenza di questa

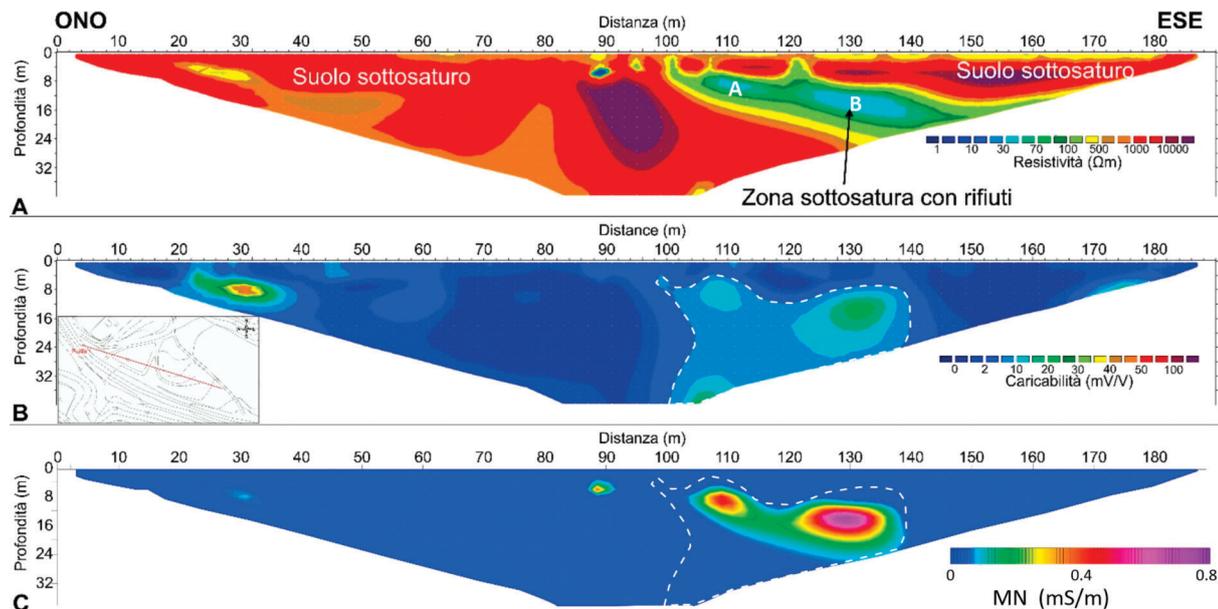


Figura 16 – (a) Profilo 'P1' ERT (b) di caricabilità (c) di caricabilità normalizzata ottenuti dal processo di inversione con indicazione delle zone esposte a rifiuti (da Di Fiore et al., 2017 modificata)

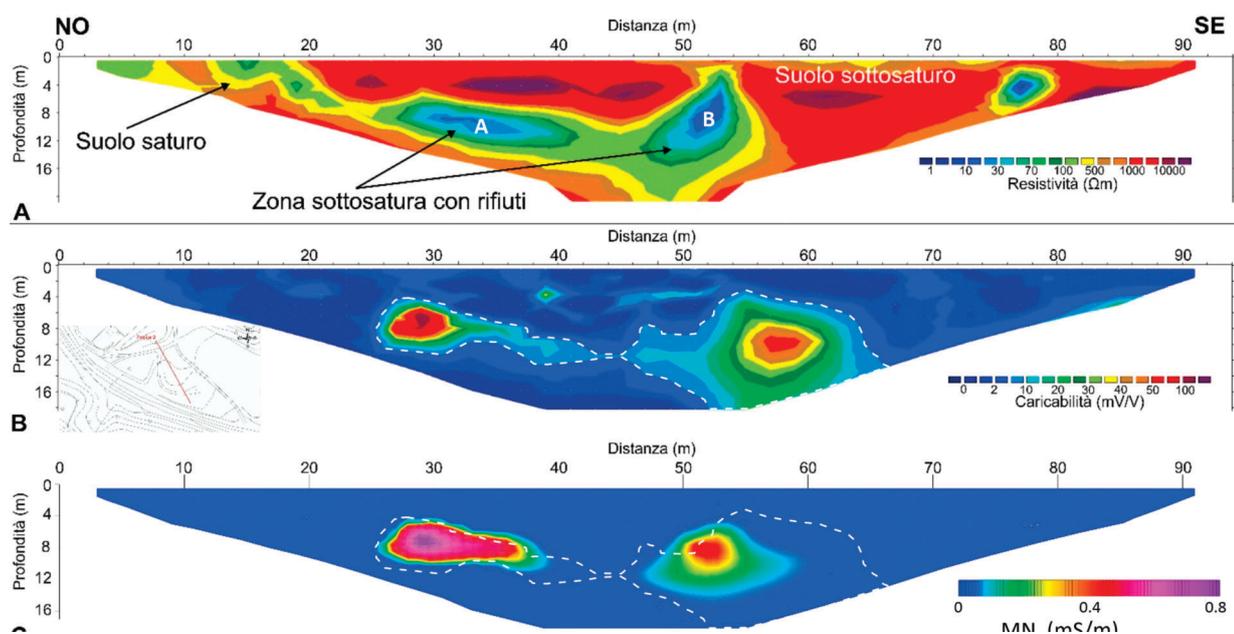


Figura 17 – (a) Profilo 'P2' ERT (b) di caricabilità (c) di caricabilità normalizzata ottenuti dal processo di inversione con indicazione delle zone esposte a rifiuti (da Di Fiore et al., 2017 modificata)

area i valori di caricabilità ottenuti con la PI presentano valori elevati (Figura 17b). Il modello di caricabilità normalizzata (Figura 17c) in quest'area mostra valori elevati fino a 5 mS/m.

Pertanto, è possibile definire le aree aventi alti valori di resistività (1000  $\Omega\text{m}$ ) e bassi di caricabilità ( $<20 \text{ mV}\text{V}^{-1}$ ) come libere da rifiuti. Le aree invece con resistività intermedia, alta caricabilità ( $>70 \text{ mV}\text{V}^{-1}$ ) e alti valori di caricabilità normalizzata, sono state interpretate come zone di accumulo di rifiuti in assenza di percolato.

La caricabilità normalizzata infatti, MN, permette di distinguere la diversa natura della polarizzabilità del suolo; gli effetti delle variazioni litologiche mostrano un incremento della MN rispetto agli effetti dell'inquinante. Nel nostro caso, sia per il profilo P1 (Figura 16) che per il profilo P2 (Figura 17), nelle zone A e B dove si evidenzia un valore più alto di MN, si riscontra un valore di resistività più basso ed un valore di caricabilità più elevato. Questo indicherebbe una conducibilità dipendente dalla litologia o comunque dal tipo di rifiuto (edi-

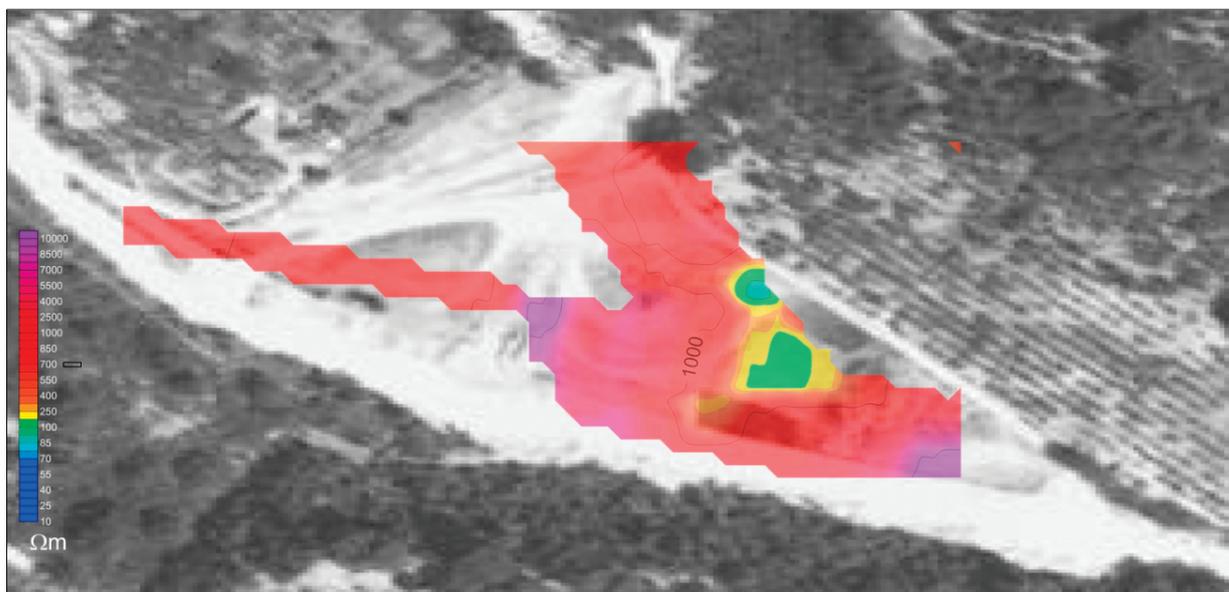


Figura 18 – *Coutour riferito alla ricostruzione 3D della resistività ottenuta dai profili P1-P4 alla profondità di 16 m dal p.c. In sottofondo si riporta la foto aerea del 1994 (da Di Fiore et al., 2017 modificata)*

lizio, scarti di cave ecc.) e non dalle proprietà dell'elettrolita (percolate, contaminante ecc.).

Le zone di bassa resistività sono state individuate proprio in corrispondenza della principale area di scavo (di forma quadrangolare) come visibile dall'immagine aerea del 1994 con una copertura di materiale a grana grossa (alta resistività, bassa caricabilità) di almeno 4 m.

In tutte le sezioni analizzate sono visibili aree a bassa resistività ( $<70 \Omega\text{m}$ ) confinate per lo più ad una profondità di circa 5-16 m sotto la superficie del suolo. La corrispondente caricabilità e carica normalizzata elevata colloca queste zone come zone di rifiuto senza percolato (assenza di fluidi salini).

In generale, queste aree a bassa resistività sono state ritrovate in aree quadrangolari corrispondenti all'area principale di scavo visibile nell'immagine aerea del 1994 (Figura 18).

La Figura 18 riporta una ricostruzione 3D dell'area suddetta in sovrapposizione alla foto aerea del 1994. Si noti la coincidenza in sovrapposizione tra l'area a bassa resistività con l'area di scavo utilizzata per lo sversamento dei rifiuti.

#### 4. CONCLUSIONI

Attraverso due casi studio è stato possibile definire le potenzialità diagnostiche di alcuni metodi geofisici per l'individuazione di discariche abusive, in cui è presente materiale sepolto a diverse profondità.

Nella prima parte del lavoro è stata verificata la risposta del metodo GPR con antenne a diverse frequenze (270 MHz e 100MHz) e delle misure magnetometriche in modalità gradiometrica, in terreni piroclastici dove sono stati interrati oggetti a piccole profondità. L'attività ha permesso di conseguire importanti informazioni sulla scelta della migliore frequenza di utilizzo delle antenne GPR in terreni piroclastici e sulla risposta che tale tecnica fornisce nell'identificazione di oggetti sepolti come fusti metallici e muretti in tufo a piccole profondità. L'integrazione con l'indagine magnetometrica con modalità gradiometrica ha permesso di ottenere ulteriori informazioni anche attraverso un'elaborazione in termini di gradienti. In quest'ultimo caso, infatti, è stato possibile non solo identificare la presenza di tali oggetti nel sottosuolo ma stimarne anche la profondità. In definitiva, è possibile osservare come in terreni di natura piroclastica e a profondità non superiori ai 3 m le tecniche GPR con una frequenza nominale dell'antenna di 270 MHz e l'indagine magnetometrica risultano essere la scelta ottimale al fine di individuare strutture e/o corpi sepolti nella parte più superficiale di una discarica.

La valutazione della presenza di una discarica abusiva a maggiore profondità, attraverso l'utilizzo di tecniche geofisiche come ERT e PI nel tempo, è stata invece realizzata nella seconda parte di questo lavoro. Inizialmente è stata effettuata un'analisi multi-temporale dell'evoluzione morfologica

dell'area in cui è ipotizzata la presenza di una discarica utilizzando foto aeree e satellitari, in quanto non erano presenti dati geologici e geofisici riferiti all'area di studio. Successivamente, sono state eseguite prospezioni geofisiche di superficie mediante metodi geoelettrici

La combinazione delle misure di resistività, di caricabilità e di caricabilità normalizzata ha ridotto le incertezze di interpretazione sulle sezioni, discriminando al meglio le zone in cui sono presenti rifiuti. Tutti i dati raccolti sul campo hanno supportato la ricostruzione della storia specifica del sito, e hanno permesso di definire la geometria reale della cava e la geologia del sito.

In definitiva, il lavoro svolto ha evidenziato come la scelta dei metodi geofisici utilizzati per l'individuazione di una discarica deve essere compiuta sia in base alla profondità delle strutture da investigare che al tipo di materiale che vogliamo caratterizzare. I metodi geofisici restano ad oggi il modo più efficace, rapido, non distruttivo e meno costoso per l'individuazione di discariche e dei materiali che le costituiscono provvedendo ad una riduzione del rischio ad esse associato.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Barrows L., Rocchio J.E. (1990) Magnetic surveying for buried metallic objects. *Ground Water Monit. Rev.* 10: 204-211.
- Belghazal H., Piga C., Loddo F., Stitou El Messari J., Ouazani Touhami A. (2013) Geophysical surveys for the characterization of landfills. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 4 (2): 254-263.
- Bichet V., Grisey E., Aleya A. (2016) Spatial characterization of leachate plume using electrical resistivity tomography in a landfill composed of old and new cells (Belfort, France). *Eng. Geol.* 211: 61-73.
- D'Alisa M.G., Armiero M., De Rosa S.P. (2014) Political ecology: rethink Campania's toxic-waste scandal. *Nature* 509 (7501): 427-427.
- Dahlin T., Rosqvist H., & Leroux V. (2010) Resistivity-IP for landfill applications. *first break*, 28(8): 101-105.
- Dawrea A., Zytner R. G., & Donald J. (2021) Enhanced GPR data interpretation to estimate in situ water saturation in a landfill. *Waste Management*, 120:175-182.
- De Carlo L., Perri M.T., Caputo M.C., Deianac R., Vurro M., Cassiani G. (2013) Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-a-la-masse method. *J. Appl. Geophys.* 98:1-10.
- De Donno G., & Cardarelli E. (2017) Tomographic inversion of time-domain resistivity and chargeability data for the investigation of landfills using a priori information. *Waste management*, 59: 302-315.
- Di Fiore V., Cavuoto G., Punzo M., Tarallo D., Casazza M., Guarriello S. M., Lega M. (2017) Integrated hierarchical geo-environmental survey strategy applied to the detection and investigation of an illegal landfill: A case study in the Campania Region (Southern Italy). *Forensic Science international* 279: 96-105.
- Di Fiore V., Punzo M., Pelosi N., Scotto di Vettimo P., Budillon F., Zeni G., Lirer F. (2019) Electromagnetic field evaluation and EMI on board during a marine geophysical data acquisition (COSMEI). *Measurement*, 147 (106889).
- Di Giambattista L., De Donno G., & Orlando L. (2016) Utilizzo di tecniche non distruttive per la localizzazione di biogas in discarica. *Ingegneria dell'Ambiente*, 3(3).
- Ferreira F.J.F., de Souza J., de B. Alessandra e S. Bongioiolo S., and de Castro L.G. (2011) Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78 (3).
- Gallas J.D.F., Taioli F., Malagutti Filho W. (2011) Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. *Environ. Earth Sci.* 63: 251-261.
- Gazoty A., Fiandaca G., Pedersen J., Auken E., Christiansen A.V., Pedersen J.K. (2012) Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 1793-1804.
- La Brecque D.J., Miletto M., Daily W., Ramirez A., Owen E. (1996) The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data. *Geophysics*, 61, 538-548.
- Marchetti M., Cafarella L., Di Mauro D., Zirizzotti A. (2002) Ground magnetometric survey and integrated geophysical methods for solid buried waste detection: a case study. *Ann. Geophys.* 45 (3/4): 563-573.
- Roberts R.L., Hinze W.J., Leap D.I. (1990) Data enhancement procedures on magnetic data from landfill investigations. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, S.H. Ward (Ed.), 261-266.
- Salem A., William S., Fairhead J., Smith R. (2007) Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivative. *The Leading Edge*, 26(12): 1502-1505.
- Schmidt P.W., and Clark D.A., (2000) Advantages of measuring the magnetic gradient tensor. *Preview*, 85: 26-30.
- Slater L., Lesmes D.P., (2002) IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, 67:77- 88, 2002.
- Triassi M., Alfano R., Ilario M., Nardone A., Caporale O., Montuori P. (2015) Environmental pollution from illegal waste disposal and health effects: a review on the triangle of death. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12: 1216-1236.
- Veryaskin A.V., (2001) Magnetic gradiometry: a new method for magnetic gradient measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 91(1-2): 233-235.
- Ustra A., & Elis V.R. (2018) Resistivity and induced polarization application for urban waste disposal site studies. In *Applied Geophysics with Case Studies on Environmental, Exploration and Engineering Geophysics*. IntechOpen.
- VV.AA. (2004) *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*. London, United Kingdom.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2021 è sostenuta da:

