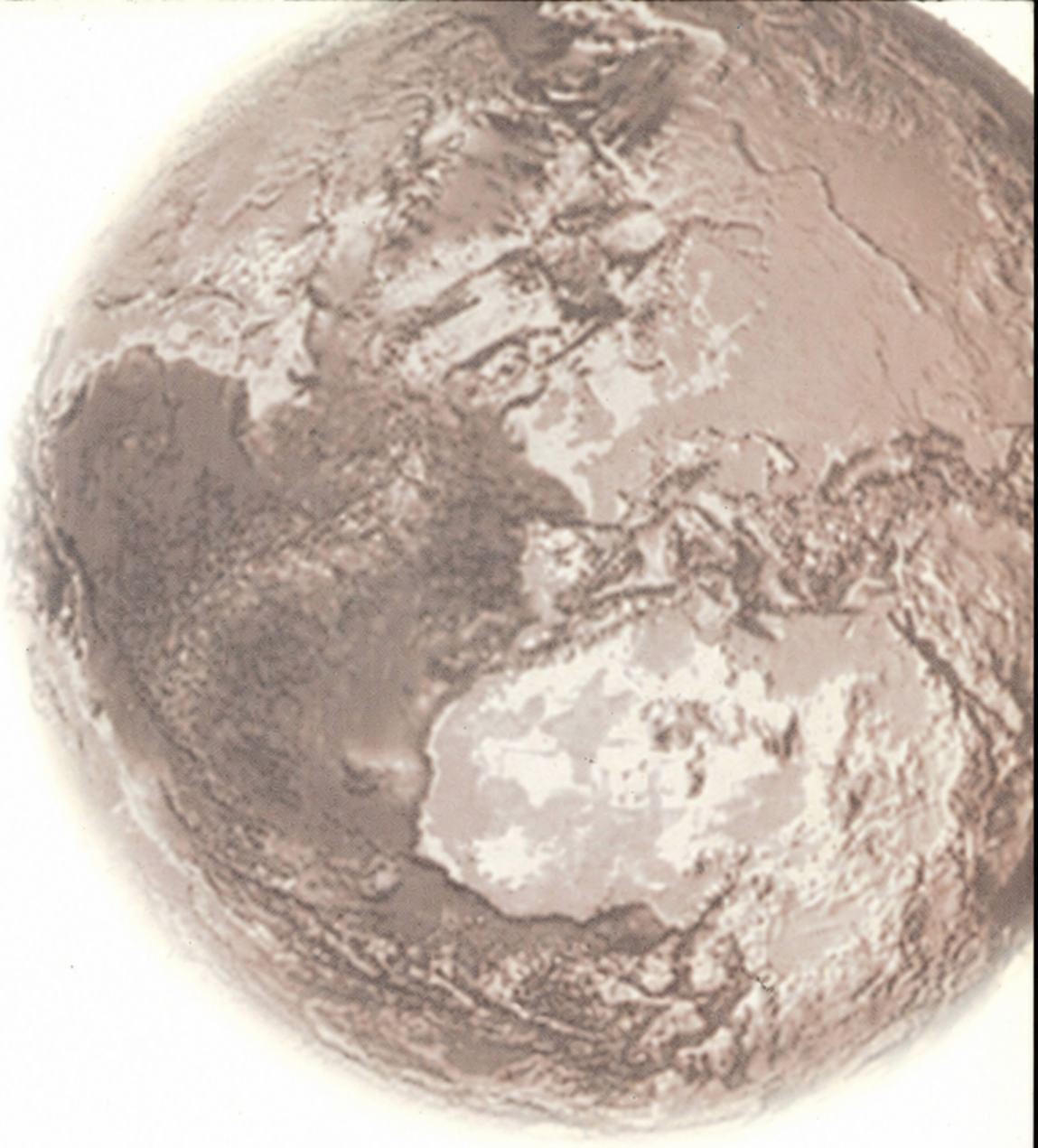
Rapporti Tecnici INGV



2002

Tecniche per lo studio e il monitoraggio del sottosuolo

M. Marchetti e A. Meloni

n. 1

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata 605 - 00143 Roma
tel. 06518601 • fax 065041181
www.ingv.it

LA GEOFISICA AMBIENTALE NELL'INGV

Tecniche per lo studio e il monitoraggio del sottosuolo

Marco Marchetti e Antonio Meloni

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma Italy

Maggio 2002

Prefazione

L'Istituto Nazionale di Geofisica, oggi Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha iniziato ad occuparsi delle applicazioni di alcune tecniche geofisiche per fini ambientali a partire dal 1994. Un gruppo di lavoro, costituito allora presso l'unità organica Geomagnetismo, ha cercato di soddisfare le richieste di intervento che pervenivano da parte di alcune Procure della Repubblica e dal Nucleo Operativo Ecologico dei Carabinieri. In numerosi siti sono state impiegate le tecniche magnetometriche di esplorazione del sottosuolo per la ricerca di fusti metallici sepolti (contenenti materiali tossici) e per la localizzazione di discariche abusive interrate. Si è creata in questo modo una collaborazione dove l'Istituto ha fornito alle forze dell'ordine il supporto tecnico-scientifico alle ricerche per fini ambientali. In pratica è stata messa a disposizione la strumentazione e l'esperienza maturata dall'INGV nel corso degli anni nelle prospezioni geologiche del territorio. Successivamente questa collaborazione si è estesa anche ad altre forze di polizia, come il Corpo Forestale dello Stato e la Polizia di Stato.

Nel Marzo 1998, con le Ordinanze del Ministero dell'Interno (n.2774 e n.2776) l'INGV è stato inserito tra gli istituti chiamati a fornire il proprio contributo, per le attività di individuazione e rilevazione delle discariche, ai Commissari delegati della Regione Campania e Puglia.

I numerosi siti sui quali si è intervenuti (a tutt'oggi circa 40) sono stati anche l'occasione per test fondamentali dove sperimentare ed affinare le tecniche di misura; si è arrivati così a formulare degli standard operativi ed interpretativi. Inoltre l'esecuzione di scavi nelle aree anomale ha consentito di associare i risultati geofisici alle masse presenti nel sottosuolo. Le numerose indagini effettuate e la possibilità di sperimentare queste tecniche in situazioni geologico-ambientali alquanto differenti, ha permesso al nostro gruppo di acquisire una notevole esperienza e capacità investigativa del sottosuolo testimoniata dagli ottimi risultati fin qui conseguiti, a volte riportati anche dagli organi di stampa. Vista la vocazione scientifica dell'Ente, sono state anche prodotte alcune pubblicazioni sull'argomento.

Tra le numerose attività collaterali svolte in questo campo, ricordiamo i Seminari riguardanti le indagini geofisiche per l'identificazione di rifiuti interrati tenuti in occasione dei Corsi di qualifica dell'Arma dei Carabinieri per addetti al N.O.E. (Roma, 1998-1999-2000) e del Corso di formazione ed aggiornamento professionale del personale del Corpo Forestale dello Stato, Cittaducale (RI), 1998.

Nella relazione conclusiva della Commissione parlamentare d'inchiesta sul ciclo dei rifiuti (XII legislatura) viene sottolineato tra l'altro che la crescente attenzione che caratterizza oggi, in sede investigativa e giudiziaria, il fenomeno dei traffici e degli smaltimenti illeciti di rifiuti(...) incontra rilevanti difficoltà connesse agli accertamenti di carattere tecnico tesi ad individuare i siti di smaltimento abusivo e identificare le diverse tipologie di rifiuti smaltite abusivamente.
Il crescente numero di richieste di intervento e l'esigenza per gli Organi Istituzionali di avere un interlocutore che si occupasse dal punto di vista scientifico e operativo del problema, ha fatto sì che con la nascita dell'INGV (a seguito della ristrutturazione conseguente al D.L. 381 del 29 settembre 1999) nella Sezione di Roma denominata Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale, fosse creata l'unità funzionale "Laboratorio di Geofisica Ambientale". Qui è stata raccolta l'eredità del precedente gruppo di lavoro e sono stati avviati in modo sistematico studi geofisico-ambientali, ampliando tra l'altro le tecniche di indagine per poter intervenire nella maggior parte dei casi relativi all'inquinamento sotterraneo.

Il presente fascicolo è stato realizzato (aggiornando precedenti versioni) in occasione della Giornata di Geofisica Ambientale che si è tenuta presso la sede di Roma dell'INGV il giorno 6 giugno 2002. Il fascicolo raccoglie idee, considerazioni e nuove esperienze maturate in questi anni nelle prospezioni del sottosuolo per fini ambientali. Nella sezione bibliografica sono segnalati alcuni articoli di approfondimento relativi alle applicazioni di tali metodologie.

Un sincero ringraziamento al Prof. Enzo Boschi, Presidente dell'INGV, per il costante incoraggiamento allo sviluppo della ricerca in questo settore.

Marco Marchetti e Antonio Meloni

Maggio 2002

Indice

1. Introduzione

2. L'impiego della geofisica in campo ambientale

3. Metodi geofisici e applicazioni

   a. Georadar

   b. Geoelettrica

   c. Magnetometria

4. Conclusioni

Bibliografia

1. Introduzione

L'esistenza sul territorio di numerose discariche abusive di rifiuti, lo smaltimento nel terreno di fluidi o sostanze tossiche e fusti metallici contenenti materiali pericolosi, sono l'indicazione evidente di un grave degrado ambientale. Tali attività criminose, svolte senza il minimo accorgimento di protezione del sottosuolo, comportano gravi ripercussioni sul territorio e sulla salute dei cittadini, mettendo a repentaglio, in primo luogo, le risorse idriche sotterranee. Generalmente i siti prescelti per lo smaltimento sono discariche abusive, cave abbandonate adibite a discariche, o semplici terreni incolti. In questi casi i problemi da affrontare sono numerosi: innanzitutto la localizzazione e mappatura di tali siti, la definizione dei limiti spaziali e della consistenza dei materiali stoccati, la loro caratterizzazione, l'individuazione di possibili fenomeni di inquinamento in atto e il controllo della loro evoluzione nel tempo.

Sono numerosi quindi i problemi relativi all'inquinamento sotterraneo che possono essere affrontati con metodologie geofisiche; è pertanto fondamentale fornire, a chi opera nel quadro delle indagini volte all'identificazione di discariche e interramenti abusivi, degli strumenti semplici, agevoli e soprattutto rapidi, per poter orientare l'accertamento diretto nel sottosuolo e per elaborare piani di intervento e di bonifica.

Le informazioni ricavate dai rilievi geofisici sono di notevole supporto alle indagini delle forze di polizia preposte al controllo del territorio e agli accertamenti di irregolarità nel settore, così come a tutti gli operatori che all'interno della Pubblica Amministrazione si occupano dell'ambiente e dello studio di possibili fonti di inquinamento sotterraneo.

2 . L'impiego della geofisica in campo ambientale

La geofisica è la scienza che si occupa dello studio della Terra e dello spazio che la circonda con i metodi della fisica. Tra i settori della geofisica che studiano la parte più superficiale della crosta terrestre per la ricerca mineraria, di acque sotterranee, per la definizione di strutture geologiche, ecc. la *geofisica ambientale* si occupa delle indagini finalizzate alle problematiche ambientali in senso lato. I metodi utilizzati sono di tipo indiretto, cioè la presenza di masse, strutture o fluidi nel sottosuolo viene evidenziata rilevando in superficie gli effetti da questi prodotti nell'ambiente circostante o misurando le variazioni di alcuni parametri fisici nel sottosuolo stesso. Ogni metodo ha proprie caratteristiche e può contribuire a risolvere specifici problemi: la scelta e la progettazione delle relative operazioni di campagna per l'esecuzione di un rilievo sono operazioni che vengono generalmente pianificate in fase preliminare, a volte anche mediante l'aiuto di modelli teorici. L'indagine geofisica viene programmata tenendo ben presente l'obiettivo della ricerca, analizzando le particolarità del sito e le condizioni al contorno.

Le indagini geofisiche, oltre ad impiegare metodi non invasivi, che consentono quindi di mantenere intatta la naturale disposizione del terreno (ad es. non compromettono l'integrità delle barriere geologiche), offrono il vantaggio di poter indagare rapidamente ed in modo economico vaste aree di territorio senza dover intervenire, almeno nella fase preliminare della ricerca, direttamente nel sottosuolo. I contributi della geofisica per la salvaguardia ambientale sono molteplici, e vanno dalla gestione alla tutela del territorio, sia nella fase di progettazione e valutazione di impatto ambientale, sia in quella di recupero di aree degradate o ad elevato rischio ambientale. Come esempio si possono citare gli studi sui siti da adibire a discarica controllata, alle ricerche per la localizzazione di discariche non autorizzate, dismesse o prive di presidi di difesa, alla definizione spaziale dei *plumes* inquinanti nei terreni circostanti le discariche, all'individuazione di fusti metallici interrati contenenti rifiuti pericolosi. Inoltre le informazioni ricavate dalle indagini geofisiche forniscono spesso strumenti efficaci per l'elaborazione di strategie di intervento per quanto riguarda l'impatto ambientale, lo studio per il ripristino di situazioni degradate, ed anche per il monitoraggio di situazioni ad elevato rischio ambientale.

E' possibile pianificare interventi sia per l'individuazione di masse anomale nel sottosuolo (fusti, serbatoi, ordigni, strutture sepolte) sia per verificare la presenza di inquinanti al fine di razionalizzare i successivi interventi di bonifica. A seguito dell'indagine geofisica gli scavi saranno eseguiti nelle aree anomale individuate con le misure eseguite in superficie, ed il prelievo di campioni (per la verifica del tipo e dell'entità dell'inquinamento) effettuato direttamente nei punti maggiormente significativi.

Le tecniche di indagine impiegate dalla geofisica ambientale sono in grado di delineare un quadro generale e sufficientemente preciso delle caratteristiche fisiche del terreno indagato. Negli ultimi anni l'impiego dei metodi geofisici si è molto diffuso sia per il grado di precisione raggiungibile con costi generalmente bassi, sia per i notevoli sviluppi dell'elettronica e dei *software* per l'elaborazione dei dati che consentono di realizzare un modello del sottosuolo a 2 dimensioni (2D), cioè lungo sezioni verticali e in alcuni casi a 3D. Si può arrivare così a conoscere ed analizzare con un buon dettaglio un fenomeno in atto come il propagarsi di inquinanti, siano essi percolati o idrocarburi, con la ripetizione delle osservazioni nel tempo, seguendone così l'evoluzione spazio-temporale nel sottosuolo. Inoltre risulta abbastanza agevole stabilire la localizzazione di serbatoi di stoccaggio interrati e verificare la possibilità di perdite (es. perdite di idrocarburi o sostanza chimiche), oppure individuare smaltimenti di fluidi o sostanze inquinanti.

Spesso la caratterizzazione di un sito inquinato avviene mediante l'esecuzione di sondaggi (eseguiti secondo una maglia più o meno regolare) ed il prelievo di campioni di suolo e acqua, cui seguono le analisi di laboratorio. Programmando opportune indagini geofisiche è possibile realizzare una mappatura dell'area inquinata e ricostruire la situazione ambientale del sito in tempi molto rapidi. Ciò risulta utile per programmare gli interventi di messa in sicurezza ed orientare le successive indagini di approfondimento mirandole ad alcune situazioni particolari. Il prelievo di campioni verrà così eseguito esclusivamente nelle aree di maggiore interesse (inquinate o a rischio) riducendone il numero e garantendo una maggiore significatività del dato.

Le tecniche geofisiche possono fornire informazioni utili per la scelta delle operazioni di bonifica più opportune e in alcuni casi offrire elementi per valutare l'efficacia di alcuni interventi (es. la tenuta di barriere impermeabilizzanti). Queste tecniche infatti consentono di individuare con una certa precisione la presenza di corpi o masse interrate e di fornire indicazioni per orientare lo scavo di verifica e ridurre il rischio di danneggiamento dei materiali presenti in fase di recupero. Inoltre tali tecniche possono essere usate anche per il controllo e il monitoraggio sotterraneo in corrispondenza di insediamenti industriali ad elevato rischio ambientale.

Tra i molti metodi geofisici esistenti per lo studio e l'esplorazione del sottosuolo, quelli che hanno una maggiore applicabilità nelle varie problematiche in campo ambientale sono i metodi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, spesso utilizzati insieme per aumentare il potere risolutivo.

Di seguito vengono presentate alcune metodologie di indagine impiegate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia in campo ambientale, che consentono di affrontare gran parte dei problemi legati all'inquinamento sotterraneo.

3. Metodi geofisici e applicazioni

a) Georadar



Il Georadar o GPR (dall'inglese Ground Penetrating Radar) è uno strumento che permette di sondare il sottosuolo con impulsi elettromagnetici di breve durata (nanosecondi). Gli impulsi, emessi da un'antenna, si propagano nel terreno e vengono riflessi quando raggiungono un'interfaccia tra materiali che possiedono differenti proprietà elettromagnetiche (resistività e costante dielettrica).

L'indagine si basa sulla osservazione delle ampiezze e sui ritardi temporali dell'onda riflessa, grandezze che vengono visualizzate e registrate mentre le antenne (trasmittente e ricevente) vengono spostate sulla superficie del terreno. Il risultato è una sezione continua del sottosuolo, dove l'ascissa corrisponde al percorso dell'antenna e l'ordinata ai tempi di andata e ritorno di propagazione delle onde elettromagnetiche nel terreno stesso. Se si conosce la velocità di propagazione nel mezzo si può calcolare la profondità dei riflettori. L'acquisizione lungo profili tra loro paralleli e la correlazione spaziale delle intensità di segnale riflesso consentono di ottenere delle rappresentazioni tridimensionali dei riflettori presenti.

L'impiego di antenne a frequenza diversa (da 15 a 1500 MHz) consente di sondare il sottosuolo a differenti profondità con differente risoluzione. Più è bassa la frequenza dell'antenna, maggiore è la penetrazione delle onde, mentre il potere risolutivo aumenta con la frequenza. Nel campo dei controlli non distruttivi, come l'analisi di murature antiche o recenti si utilizzano piccole lunghezze d'onda associate ad alte frequenze, generalmente 1 GHz o superiori. Nel campo della geologia e della geotecnica, nella meccanica delle rocce e nello studio delle discontinuità sotterranee, si utilizzano invece lunghezze d'onda più grandi associate alle basse frequenze (100 MHz o inferiori).

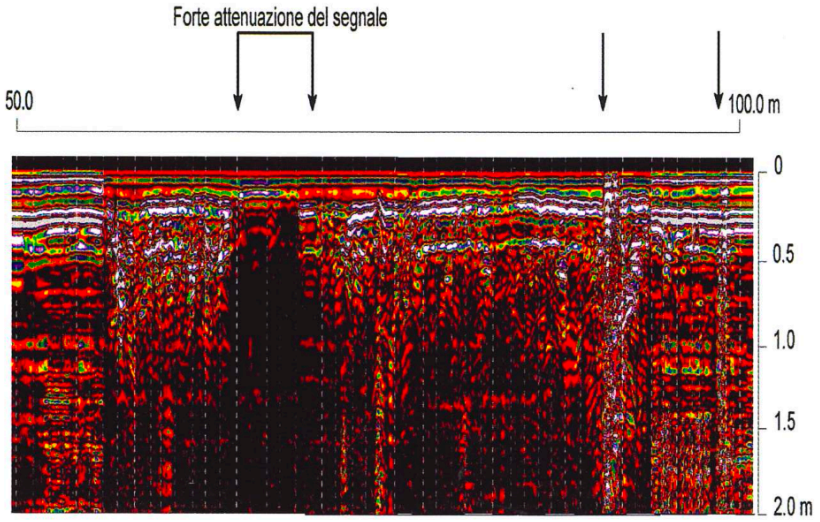
La limitazione principale dell'impiego del georadar è data dalla presenza di terreni a conducibilità elettrica alta che tendono ad assorbire notevolmente gli impulsi elettromagnetici (es. terreni argillosi); l'attenuazione dell'onda elettromagnetica per effetto della dissipazione sotto forma di calore è correlata alla conducibilità elettrica o alla costante dielettrica complessa. Pertanto le condizioni geoambientali ottimali per l'utilizzo del georadar sono i terreni a bassa conducibilità elettrica, le rocce compatte, l'acqua pura, i terreni asciutti che presentano piccoli valori di attenuazione e quindi consentono la propagazione del segnale anche a notevole profondità. La profondità di penetrazione, che dipende dalla conducibilità e dalla frequenza dell'onda trasmessa, può variare da pochi centimetri a circa 20-30 m in condizioni favorevoli.

La risoluzione, cioè la capacità di individuare un oggetto è invece legata alle caratteristiche del mezzo, al contrasto di impedenza caratteristica tra il mezzo e l'oggetto riflettente e alla profondità dell'oggetto all'interno della struttura che si vuole investigare. La risoluzione verticale in un mezzo omogeneo aumenta al diminuire della lunghezza d'onda e quindi all'aumentare della frequenza impiegata; nei mezzi naturali le alte frequenze si attenuano maggiormente delle basse frequenze e quindi per ottenere un'alta risoluzione si penalizza la profondità di indagine.

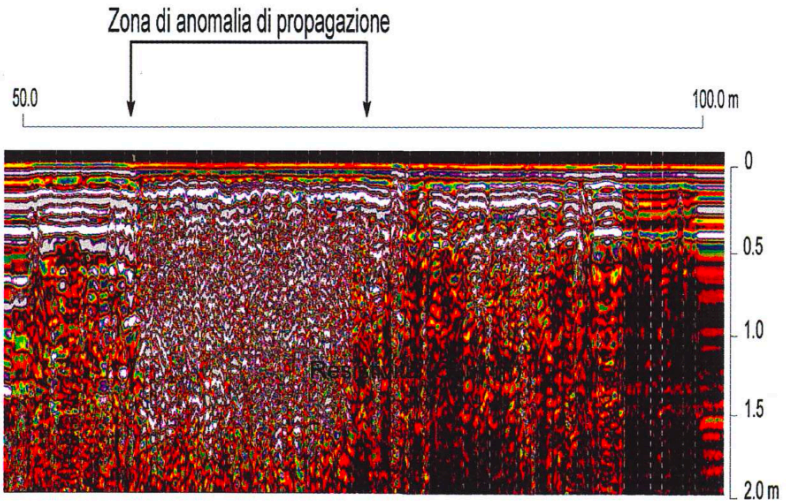
Alcune delle applicazioni ambientali tipiche del georadar riguardano l'individuazione nel sottosuolo di corpi come fusti, serbatoi, cisterne, strutture sepolte, oggetti interrati, depositi di rifiuti, cavità, disomogeneità nel terreno. Il georadar inoltre può consentire la definizione dei limiti delle discariche sepolte e la localizzazione di inquinanti (es. fluidi resistivi).

L'indagine elettromagnetica può rappresentare in alcuni casi una utile integrazione al rilievo magnetico; in aree caratterizzate da anomalie magnetiche, l'indagine radar può fornire i necessari *constraints* all'individuazione delle sorgenti. Ciò può essere utile anche per valutare l'opportunità di eseguire scavi mirati in situazioni complesse, consentendo inoltre di eseguire ricerche anche in aree antropizzate dove per esempio non è possibile impiegare la magnetometria (capannoni, edifici, aree industriali o urbane, ecc.).

Nell'esempio di seguito riportato, viene mostrata un'immagine radar prodotta dalle riflessioni in un terreno al di sotto di una pavimentazione di cemento di un'area industriale. Come si può notare, sono presenti alcune zone con forte attenuazione o anomala propagazione del segnale elettromagnetico all'interno di un mezzo abbastanza omogeneo: in questo caso ciò è un indizio di alcune operazioni di scavo e reinterro. Nei vari settori dell'area investigata dove sono emerse queste anomalie sono stati effettuati degli scavi che hanno messo in luce interramenti di amianto.

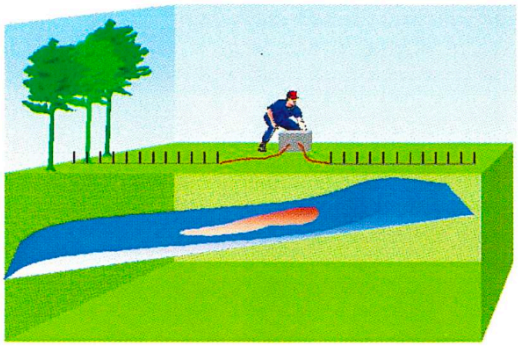


Sezione georadar che mostra una zona con forte attenuazione del segnale elettromagnetico, indice di una differente composizione del materiale presente in quel settore. Nella parte destra riflessioni dovute a sottoservizi.



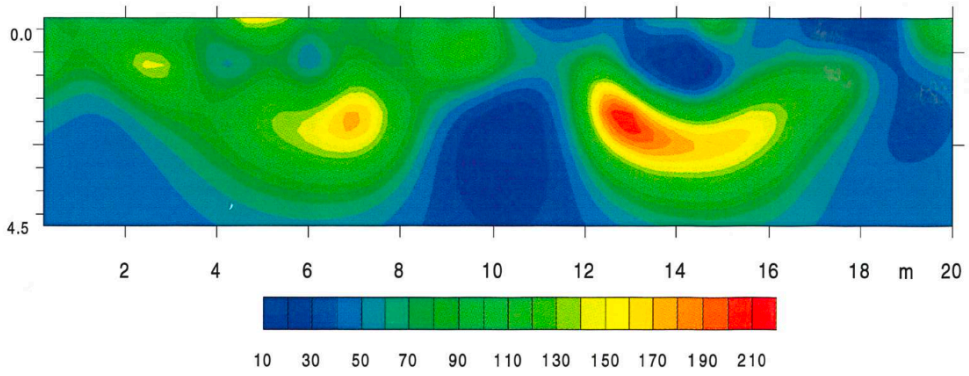
Sezione georadar che mostra un'ampia zona con evidente anomalia di propagazione del segnale elettromagnetico ad indicare un rimaneggiamento dei materiali sotto la pavimentazione di cemento.

b) Geoelettrica



Questo metodo si basa sullo studio della risposta del sottosuolo al passaggio di una corrente elettrica immessa in superficie. Le misure sono finalizzate quindi principalmente alla determinazione della resistività elettrica del terreno che dipende da molti fattori, e in particolare è funzione della quantità d'acqua contenuta nei pori e dal suo contenuto salino.

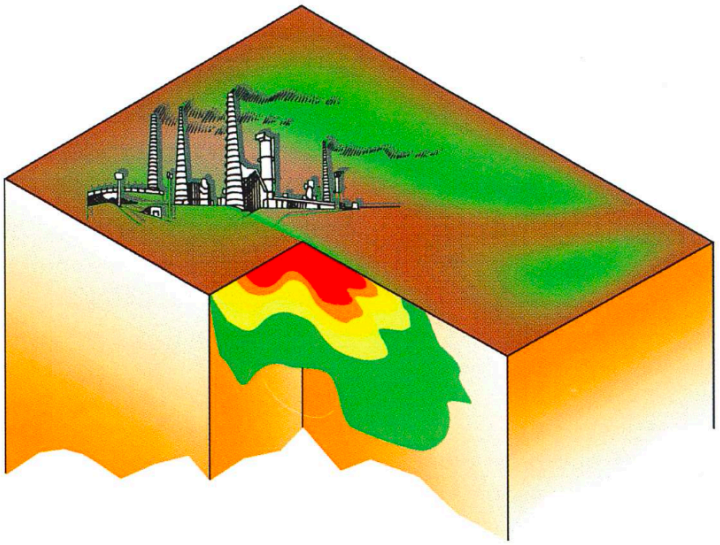
Mediante due elettrodi viene immessa nel terreno una corrente elettrica continua e tramite altri due elettrodi viene rilevata la differenza di potenziale. Nelle applicazioni ambientali, dove è richiesta una elevata risoluzione, si utilizza particolarmente la tecnica della tomografia elettrica dove l'indagine viene realizzata con dispositivi multielettrodo, cioè mediante un *set* di elettrodi distribuiti sul terreno in linea lungo profili. Questi elettrodi sono poi collegati tra loro e ad una unità di energizzazione ed acquisizione, funzionando alternativamente come elettrodi di corrente o di potenziale. Le misure sono eseguite automaticamente secondo una successione impostata dall'operatore, e si ricavano i valori di resistività apparente a differenti profondità lungo il profilo stesso. In pratica questa tecnica si basa sull'acquisizione di un elevato numero di misure elettriche effettuate su numerosi elettrodi posti in superficie. La ricostruzione tomografica viene realizzata discretizzando il terreno in un numero finito di celle ciascuna di resistività omogenea con dimensioni pari alla metà della spaziatura tra due elettrodi contigui. I valori di resistività da determinare sono quelli che caratterizzano ciascun elemento di cella e la cui determinazione avviene tramite l'applicazione di un algoritmo di inversione. L'elaborazione dei dati di campagna fornisce quindi una sezione con la distribuzione dei valori di resistività nel terreno al disotto degli elettrodi di misura. In questo modo si riesce a rappresentare con un buon dettaglio la situazione geoelettrica del sottosuolo ed identificare eventuali masse, orizzonti o settori anomali.



Sezione di tomografia elettrica. E' stata realizzata in corrispondenza di un'anomalia magnetica individuata da un rilievo precedente. Si notano due zone più resistive (in rosso) e una zona centrale più conduttiva (in blu). In questo settore centrale si ipotizza la presenza di alcuni fusti metallici frammisti a rifiuti vari.

Realizzando più profili paralleli, opportunamente distanziati e correlando tra loro orizzonti o settori con valori omogenei di resistività, si può ottenere una rappresentazione

tridimensionale del sottosuolo, con la localizzazione e la rappresentazione dell'estensione di eventuali inquinanti.



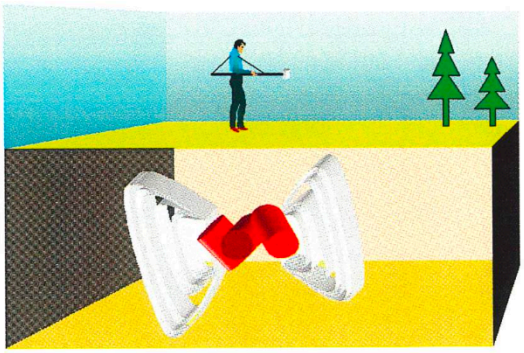
Ricostruzione tridimensionale del modello del sottosuolo. La distribuzione dei valori di resistività elettrica consente di individuare possibili fonti di inquinamento sotterraneo.

Mediante la collocazione di elettrodi sul terreno per lunghi periodi, le indagini di tomografia elettrica possono anche essere ripetute nel tempo, ad esempio per effettuare controlli specifici sulla diffusione di inquinanti. In questo modo avremo una sequenza temporale di immagini tomografiche della stessa sezione di terreno. La capacità di risoluzione del metodo dipende dal contrasto di resistività che i contaminanti presentano rispetto alla situazione "normale" del terreno e dell'acqua di falda pulita circostante.

I percolati, che hanno origine a seguito dei processi di biodegradazione nel corpo della discarica, presentano caratteristiche molto variabili, pertanto la loro individuazione è funzione del contrasto di resistività con il terreno naturale. Mediante il rilevamento sistematico dei parametri elettrici del sottosuolo è possibile riconoscere fenomeni di inquinamento in atto, definendone l'estensione e la dinamica con possibilità di seguirne l'evoluzione temporale (monitoraggio).

Le tecniche geoelettriche di investigazione del sottosuolo offrono quindi un ampio spettro di applicazioni in campo ambientale che vanno dalla localizzazione di inquinanti nel terreno all'osservazione dello stato di diffusione del percolato da una discarica, dal monitoraggio del sottosuolo allo studio delle discariche dismesse o abusive con definizione di spessore e perimetro, al controllo di tenuta delle discariche controllate. Caratterizzando il sottosuolo dal punto di vista della distribuzione delle resistività, tali tecniche consentono inoltre di guidare l'ubicazione dei sondaggi per il prelievo di campioni rappresentativi dello stato naturale e di fenomeni degenerativi in atto.

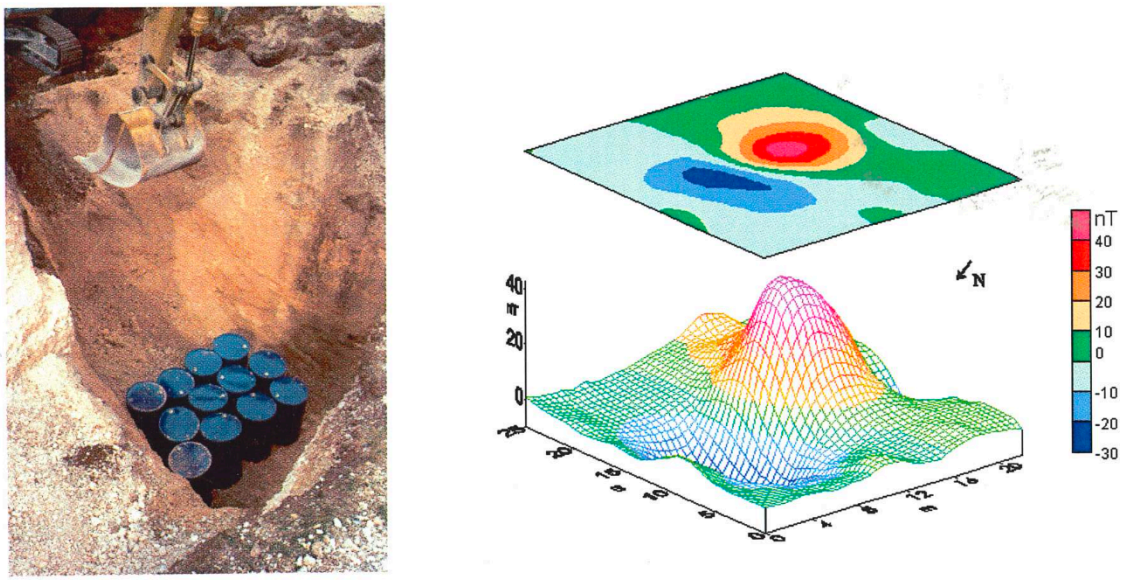
c) Magnetometria



Questa tecnica si basa sull'impiego di *magnetometri,* con i quali è possibile misurare le variazioni spaziali del campo magnetico terrestre. La presenza nel sottosuolo di masse con proprietà ferromagnetiche altera il valore del campo magnetico naturale ed è quindi possibile mettere in evidenza l'anomalia causata dalla presenza nel terreno di corpi magnetizzati.

L'anomalia magnetica (differenza tra il valore misurato in un punto ed il valore normale per quell'area) è in pratica l'effetto misurato in superficie dovuto ad un corpo presente nel sottosuolo. Oggetti o masse di natura ferrosa producono una deformazione del campo magnetico, tanto più intensa quanto maggiore è la massa del corpo sepolto e minore la distanza dal punto di osservazione. Gli interramenti di masse metalliche sono di norma poco profondi ed i terreni spesso presentano scarse proprietà magnetiche: in questi casi la risposta dell'indagine magnetica è particolarmente definita, essendo gli effetti misurabili in superficie ben evidenti.

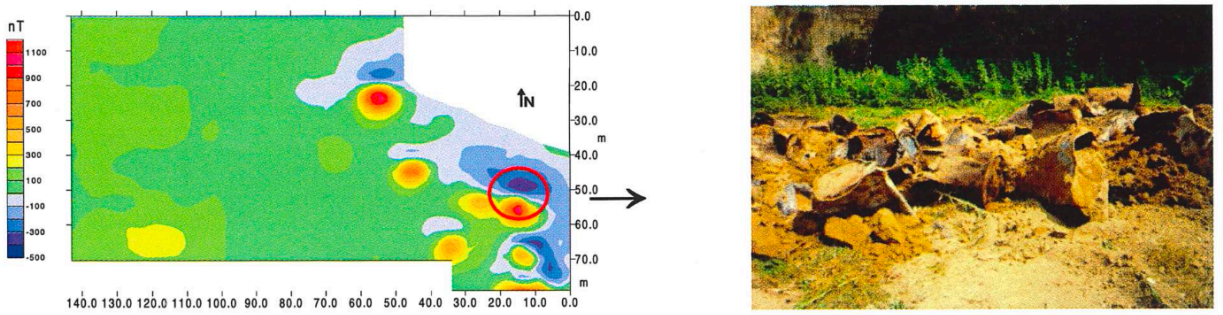
Alcuni anni fa il nostro gruppo ha realizzato un *test site* per osservare gli effetti magnetici prodotti da fusti interrati. In pratica è stato simulato un caso di interramento a 5 m di profondità di alcuni fusti metallici e sono stati misurati gli effetti da questi prodotti in superficie: ne è risultata un'anomalia magnetica ben definita, a carattere dipolare, differenziata nettamente dal terreno naturale inglobante (che nel nostro caso presentava scarse proprietà magnetiche). Tale studio ha permesso di conoscere in dettaglio l'entità e le caratteristiche spaziali delle anomalie magnetiche prodotte dai fusti metallici interrati, e di avere utili indicazioni sulla profondità di rilevamento di tali corpi. Queste indicazioni sono state utilizzate con successo nei numerosi interventi operati successivamente sul territorio.



Realizzazione del Test Site con interramento di 12 fusti metallici (foto a sinistra). Dopo aver ricoperto lo scavo, mediante misure eseguite dalla superficie del terreno è stata realizzata la relativa carta delle anomalie magnetiche (a destra, rappresentazione in pianta e in 3D).

Nei rilievi magnetici le misure vengono eseguite lungo profili paralleli, con spaziatura e passo di campionamento funzionali al dettaglio ricercato. I dati di campo magnetico acquisiti

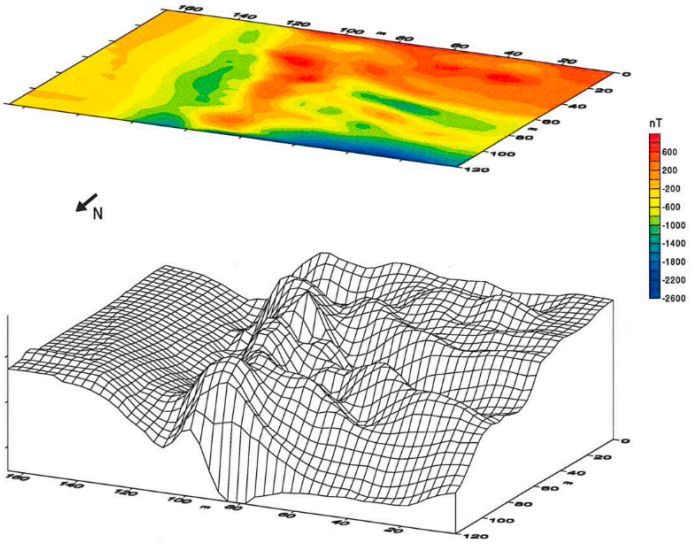
vengono successivamente processati e restituiti su carte dove le anomalie magnetiche individuate sono rappresentate mediante isolinee (cioè linee che uniscono punti di ugual valore) o bande di colore per ogni *range* di valori misurati. Lo studio di tali anomalie consente di individuare la distribuzione su una certa porzione di territorio di zone con presenza di masse ferromagnetiche interrate.



Anomalie magnetiche misurate in una ex cava di tufo. Sono chiaramente visibili cinque aree con evidenti anomalie. Gli scavi eseguiti in corrispondenza di ognuna di queste hanno portato alla luce 160 fusti contenenti materiali tossici. Nella foto il materiale estratto da uno scavo.

Tra gli obiettivi che si possono raggiungere con le prospezioni magnetometriche, va menzionata sia la ricerca e la localizzazione di materiale ferroso nel sottosuolo che l'esclusione della presenza di quest'ultimo. Nei casi in cui si abbiano dei sospetti di occultamenti, questo tipo di indagine può fornire in tempi brevi delle risposte senza dover intervenire con lunghi e costosi scavi specie se le aree da investigare hanno dimensioni rilevanti. I risultati ottenibili sono particolarmente enfatizzati nei casi in cui il terreno inglobante possieda deboli proprietà magnetiche e le masse ferrose siano consistenti o poco profonde.

Un'altra utile applicazione dell'indagine magnetometrica riguarda l'individuazione di discariche interrate, la definizione spaziale dei limiti degli ammassi di rifiuti, così come la ricostruzione delle dimensioni di vecchie discariche per le quali non si hanno più informazioni di posizione ed estensione.



Anomalie magnetiche misurate su una discarica di RSU (in alto) e relativa rappresentazione tridimensionale (in basso). Oltre ad una serie di anomalie magnetiche molto intense al suo interno, si nota chiaramente come l'intero corpo di discarica sia nettamente distinguibile magneticamente dal terreno naturale presente sul lato sinistro della figura.

A seguito di alcune indagini magnetiche effettuate in corrispondenza di discariche di R.S.U., è stato infatti osservato che in questi ammassi di materiali eterogenei, derivanti dalle produzioni urbane, sono in parte presenti materiali ferrosi (circa il 3-4 % in peso) che conferiscono all'intero corpo proprietà magnetiche. Questa caratteristica rende facilmente individuabile dalla superficie la discarica con la tecnica di prospezione magnetometrica. Estendendo le misure sufficientemente al di fuori dell'area di discarica, è possibile individuare il passaggio dai rifiuti al terreno naturale, potendo definire in questo modo i limiti spaziali della discarica stessa.

Recentemente, per velocizzare maggiormente questo tipo di rilevo, i magnetometri vengono impiegati congiuntamente a dei ricevitori satellitari GPS. Come è noto, il sistema di posizionamento satellitare GPS (Global Positioning System) consente di determinare con precisione la posizione di un punto sulla superficie terrestre; con la tecnica differenziale cinematica (uso contemporaneo di un ricevitore mobile ed uno fisso di riferimento) si può ricostruire con precisione centimetrica la posizione di un operatore in movimento sul terreno.

L'uso congiunto di magnetometri e di GPS permette di ottenere carte magnetiche ad alta risoluzione spaziale; vaste aree di territorio possono essere pertanto investigate in tempi molto rapidi in modo da avere in breve tempo informazioni sull'eventuale presenza di discariche interrate o di fusti metallici sepolti.

Le principali applicazioni della magnetometria in campo ambientale quindi riguardano l'individuazione di discariche, la definizione spaziale di discariche di R.S.U., la ricerca di oggetti ferromagnetici sepolti, la ricerca e la localizzazione di fusti metallici interrati. Importanti risultati si possono ottenere nella verifica dell'avvenuto completo ripristino ambientale, con la verifica ad esempio della rimozione dal sottosuolo di tutte le strutture ferromagnetiche esistenti negli insediamenti precedenti (sottoservizi, tubazioni, pozzi rivestiti ecc.).

E' naturalmente anche possibile eseguire rilievi magnetometrici da battello su bacini o corsi d'acqua per verificare la presenza sul fondo di rifiuti di natura ferromagnetica.

Un'altra classe di tecniche di indagine consolidate in geofisica è costituita da rilevamenti con sensori aerotrasportati. L'aerogeofisica infatti, ed in particolare l'aeromagnetismo, è una tecnica molto efficace per l'individuazione di *target* ferromagnetici sepolti a varie profondità. Tra i vantaggi più evidenti, vale la pena di citare quello di poter condurre rilievi aeromagnetici su aree molto vaste, in tempi brevi e a costi relativamente contenuti, senza trascurare il fatto che risulta in questo caso possibile indagare siti particolarmente contaminati o di difficile accesso.

L'aeromagnetismo fa uso di sensoristica montata su di una piattaforma aerotrasportata, che per diversi anni è stata prevalentemente collocata su aeromobili ma che ora è anche frequentemente montata su elicottero. All'interno del velivolo è posto il sistema di acquisizione, mentre all'esterno, trainato da apposito cavo certificato, è presente il sensore magnetico. Tale tecnica viene utilizzata in maniera estesa in molti paesi industrializzati, sia a fini ambientali che di esplorazione, e consente di ottenere rilievi con alta risoluzione spazio-temporale. Il posizionamento dinamico avviene attraverso una correzione GPS differenziale in tempo reale, permettendo così la ricostruzione delle linee del rilievo e la localizzazione dei corpi con estrema precisione.

4. Conclusioni

Numerosi sono i contributi che la geofisica può offrire in campo ambientale sia nelle ricerche nel sottosuolo che per le attività di studio e monitoraggio. In particolare, le tre metodologie geofisiche di indagine qui descritte e utilizzate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia coprono numerosi campi di interesse ambientale, soprattutto per gli studi che riguardano l'inquinamento sotterraneo. Infatti oltre a consentire l'individuazione di masse estranee al terreno naturale possono fornire utili informazioni sullo stato fisico-strutturale del sottosuolo stesso, fornendo informazioni su possibili fonti di inquinamento e sull'evoluzione nel tempo di tali fenomeni.

Queste tecniche di rilievo sono relativamente semplici da applicare, di rapida esecuzione e poco costose, e possono essere utilizzate singolarmente o integrate tra di loro, nei casi più complessi. Inoltre i rilievi a terra costituiscono un efficace strumento per la verifica e l'osservazione di dettaglio di alcune indicazioni fornite dalle immagini da satellite, da aereo o da ricognizione con elicottero. Come è noto il telerilevamento consente anche di individuare sul territorio le discariche abusive, le aree utilizzate come discarica o stoccaggio illecito di rifiuti oggi ricoperte e le possibili perdite di percolato da discariche di RSU. L'integrazione di dati provenienti dal telerilevamento con quelli ricavabili a terra mediante osservazioni puntuali consente un'analisi dettagliata di vaste porzioni di territorio, fornendo anche utili strumenti per prevenire o contrastare gli illeciti operati in questo settore.

Un particolare ringraziamento va ai colleghi Lili Cafarella, Domenico Di Mauro e Achille Zirizzotti per la loro preziosa collaborazione.

Bibliografia

ABU-ZEID, G.F. MORELLI E G. SANTARATO, 1998: Considerazioni sul significato di dati geofisici raccolti su discariche di Rifiuti Solidi Urbani. *Atti XVII Convegno Nazionale CNR-GNGTS, Roma.*

AMODIO M., SERANGELI S., 1994: Prospezione geoelettrica finalizzata all'individuazione di rifiuti sepolti. *Atti del Workshop Geoenv '93. Ingegneria sanitaria e ambientale n.1-2,101-106 Roma*

ANGELONI P., BONACINA E., CHIARAVALLI F.,GRUSZKA A.T., MANCINI O., MECCHIA M., 1994: La prospezione geoelettrica nello studio dell'inquinamento delle falde in relazione ai fenomeni di risalita del cuneo salino e di rilascio da discarica: casi di studio. *Atti del Workshop Geoenv '93. Ingegneria sanitaria ed ambientale n.3, 30-40 Roma*

ARMANDO E., GODIO A., RANIERI G., SOCCO L.V., MARCHISIO M., SAMBUELLI L., 1994: Metodi geofisici per l'indagine di discariche di rifiuti solidi urbani. *Atti del Workshop Geoenv '93. Ingegneria sanitaria ed ambientale n.1-2, 73-80 Roma*

BOZZO E., GAMBETTA S., LOMBARDO S., MERLANTI F., 1994: Indagine magnetometrica su un'area di discarica oggetto di successivo riutilizzo. *Atti del Workshop Geoenv '93. Ingegneria sanitaria ed ambientale n.1-2, 81-90 Roma*

BREINER S., 1973: Applications manual for portable magnetometers. *Geometrics*, 395 Java Drive, Sunnyvale, California 94086, 70.

COCHRAN, J.R. and DALTON, K.E., 1995: Using high-density magnetic and electromagnetic data for waste characterization. A case study. In: Bell R.S. (Ed.), *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Environm. and Engineering Geophysical Society, Orlando, Florida, 117.

DAHLIN T. and JEPPSSON H., 1995: Geophysical investigation of a waste deposit in Southern Sweden. In: Bell R.S. (Ed.), *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Environm. and Engineering Geophysical Society, Orlando, Florida, 97-105.

FINZI E., PIRO S., 1990: Metodo per impulsi elettromagnetici-Georadar. Atti del seminario Geofisica per l'archeologia. Quaderni dell'ITABC-CNR, 53-70

FOLEY J.E., 1994 STOLMS ™ Magnetic survey at Sandia National Laboratory Technical area 2 In: Bell, R.S., Lepper, C, M (Eds) Proceedings of the Symposium on the application of Geophysics to Engineering and Environmental problems, March 27-31,1994 Boston, Massachusetts, 895-907.

GASPERINI M., MONNA D., RAINONE M.L., SIGNANINI P., 1994: Nuove metodologie geofisiche applicate a problemi ambientali: alcuni esempi di prospezione per l'investigazione di aree di discarica. Atti del Workshop Geoenv '93. Ingegneria sanitaria ed ambientale n.3, 50-57 Roma

GIBSON P.J., LYLE P. and GORGE D.M., 1996: Environmental applications of magnetometry profiling. Environmental Geology, 27, 178-183.

GILKESON R. H., GORIN S. R., WESTON R.F. and LAYMON D.E., 1992: Application of magnetic and electromagnetic methods to metal detection, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental problems, April 26-29, 1992, Oakbrook, Illinois, 309-328.

GODIO A. E SAMBUELLI L., 1999 Applicazione del georadar nel campo dei controlli non-distruttivi e in campo geologico-tecnico. Quaderni delle acque sotterranee n.7 Geo-Graph s.n.c. - Segrate

ILICETO V., BONCI L., CESI C., EULILLI V., PULSINELLI C., GRESPAN A., SCHIAVON S., 1998: Definizione di forme naturali (paleoalvei) ed antropiche (discariche) nel primo sottosuolo mediante tecniche di Geoelectrical and I.P Imaging. Geologia Tecnica e Ambientale, n.4 Ottobre/Dicembre 1998

M.H. LOKE, 1999: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, Technical notes.

MARCHETTI M, A. MELONI, M. PIRRO, 1995: Indagine magnetometrica per l'individuazione di fusti metallici sepolti in un'area di discarica. Atti XIV Convegno Nazionale CNR-GNGTS, pp.535-544, Roma

MARCHETTI M., M. CHIAPPINI AND A. MELONI, 1996: Anomalie magnetiche generate da fusti metallici: gli effetti prodotti da un singolo fusto. *Atti XV Convegno Nazionale CNR-GNGTS, pp.5-12, Roma.*

MARCHETTI M., MELONI A., 1997: Il contributo della geofisica nella salvaguardia ambientale. Pubbl. Istituto Nazionale di Geofisica n. 586

MARCHETTI M., 1997: Applicazioni della magnetometria alle problematiche ambientali, in particolare alle discariche. Geologia dell'ambiente, periodico della Società Italiana di Geologia Ambientale, n.4/1997, pp.20-23.

MARCHETTI M. E MELONI A., 1997: Ricerche di corpi metallici sepolti con tecniche magnetometriche Atti XVI Convegno Nazionale CNR-GNGTS, Roma.

MARCHETTI M. E DI MAURO D., 1998: Individuazione di fusti metallici con tecniche magnetometriche:il caso di Riano Flaminio (Roma). *Atti XVII Convegno Nazionale CNR-GNGTS, Roma*

MARCHETTI M., CHIAPPINI M. AND MELONI A., 1998: A test site for magnetic detection of buried steel drums. *Annali di Geofisica*, Vol. 41, 3, 491-498.

MARCHETTI M., CAFARELLA L., ZIRIZZOTTI A., MORELLI G., 2000: Misure geofisiche integrate per l'individuazione di rifiuti sepolti. *Atti XIX Convegno Nazionale CNR-GNGTS.*

MARCHETTI M., 2000: Anomalie magnetiche in aree di discarica. Una breve rassegna. *Atti XIX Convegno Nazionale CNR-GNGTS.*

MARCHETTI M., CAFARELLA L., DI MAURO D. AND ZIRIZZOTTI A., 2002: Ground magnetometric surveys and integrated geophysical methods for solid buried waste detection. *Annali di Geofisica* (lavoro sottomesso).

ORLANDO L. AND MARCHESI E., 2001: Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits, *Journal of Applied Geophysics* 48, 163-174.

PIERCE D. AND DEREAMER J., 1993: Geophysical investigation for buried drums: a case study. In: R.S. Bell and C.M. Lepper editors. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Environmental and Engineering Geophysical Society, San Diego, California, 229-244.

VOGELSANG D., 1995: Environmental Geophysics. A practical guide. Springer-Verlag