

**METODI GEOFISICI INTEGRATI PER LA CARATTERIZZAZIONE NON-INVASIVA DI
DISCARICHE E SITI CONTAMINATI**

- M.Pipan, Università' di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,
Exploration Geophysics Group, via Weiss 1, 34127 Trieste, Italy
E-mail: pipan@units.it
- E.Forte, Università' di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,
Exploration Geophysics Group, via Weiss 1, 34127 Trieste, Italy
E-mail: emafor@hotmail.com
- I.Finetti Università' di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine,
Exploration Geophysics Group, via Weiss 1, 34127 Trieste, Italy
E-mail: finetti@units.it

SOMMARIO

Il lavoro illustra i risultati dello sviluppo e della sperimentazione di tecniche geofisiche per lo studio non-invasivo di volume e proprietà fisiche dei materiali in siti contaminati e discariche. Si utilizza il Ground Penetrating Radar in modalità common offset, multi-offset e multi-azimuth, integrato da tecniche tomografiche sismiche ed elettriche, e da metodi gradiometrici per discariche di inerti. Sono state sviluppate e sperimentate con successo tecniche basate sulla Wavelet Transform per identificare deboli transienti in condizioni di basso rapporto segnale-rumore, per incrementare la risoluzione verticale e per caratterizzare i materiali. Deconvoluzione, analisi di velocità, migrazione, analisi di ampiezza hanno consentito di studiare siti a struttura subsuperficiale caotica caratteristica di discariche e di terreni contaminati. Algoritmi di modelling 1-D e 2-D sono stati sviluppati ed applicati per studiare contatti tra suolo e materiali contaminati. I risultati ottenuti in quattro siti test presentano risoluzione adeguata alle richieste degli operatori del settore bonifica.

INTRODUZIONE

L'informazione sul sottosuolo è di importanza cruciale per la gestione ed il risanamento di siti contaminati e di discarica e per la protezione dell'ambiente e delle risorse idriche sotterranee in particolare. La fascia superficiale, con spessore medio non superiore in media ai 50 metri, è quella principalmente esposta al rischio di contaminazione e rappresenta quindi l'obiettivo degli interventi di risanamento. Dai primi studi di Nettleton [1] molte tecniche geofisiche [2, 3, 4, 5, 6] sono state utilizzate per lo studio di siti contaminati e di discarica. Tra queste, il GPR è la tecnica non-invasiva in grado di fornire la più elevata risoluzione, ai costi più bassi e con la possibilità di ottenere informazioni quantitative sulle proprietà elettromagnetiche dei materiali [7]. I limiti fisici per l'applicazione del GPR, in particolare la scarsa o nulla penetrazione in presenza di materiali conduttivi, ostacolano l'adozione di questo metodo come tecnica unica per le indagini in siti contaminati e di discarica ed incoraggiano l'integrazione del GPR con altre tecniche non-invasive. In questo studio vengono presentati nuovi metodi per l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini GPR [8, 9] che consentono di migliorare sostanzialmente il rapporto segnale-rumore rispetto a quelli convenzionali ed offrono inoltre la possibilità di ricavare informazioni quantitative sulle proprietà dei materiali (costante dielettrica e conduttività). Questi metodi vengono integrati da tecniche tomografiche elettriche e sismiche che offrono ulteriori vincoli per una ricostruzione controllata di struttura e proprietà del sottosuolo e da tecniche di gradiometria magnetica nel caso di discariche di inerti. I risultati ottenuti indicano che il limite di profondità medio del GPR per la ricostruzione di immagini e proprietà elettromagnetiche si aggira intorno ai 6 metri nei siti indagati. L'integrazione con le tecniche acustiche ed elettriche consente il superamento di tale limite e la ricostruzione non-invasiva di proprietà e struttura del sottosuolo sull'intero intervallo di profondità di interesse per le operazioni di risanamento e controllo della contaminazione.

METODO

Acquisizione dati

È stato utilizzato un sistema Ultra-Wide Band RAMAC (Malå Geoscience) equipaggiato con antenne schermate bow-tie (250, 500 MHz) e dipoli lineari non schermati e caricati con resistenze (50, 100, 200 e 400 MHz). Il campionamento spaziale costante (5 cm) è stato ottenuto grazie ad un odometro elettro-meccanico. L'accuratezza del posizionamento è superiore al 0.2 %. Le seguenti tecniche di acquisizione sono state utilizzate nei siti in esame:

Copertura singola (Single-Fold, SF): antenna trasmittente e ricevente vengono mantenute a distanza (*offset*) ed orientazione costanti durante l'acquisizione di profili e grigliati.

Copertura multipla lineare (Linear Multi-Fold, LMF): si utilizzano diversi *offset* tra antenna trasmittente e ricevente per l'acquisizione di profili e grigliati. L'orientazione delle antenne è costante. In questo modo, ogni punto del sottosuolo viene investito da radiazione elettromagnetica proveniente da angoli diversi nel piano verticale che contiene la traccia del profilo. La copertura media (numero di tracce per punto in profondità) è del 1200%.

Copertura multipla azimutale (Azimuthal Multi-Fold, AMF): si utilizzano *offset* ed azimuth diversi tra antenna trasmittente e ricevente per l'acquisizione di profili e grigliati. In questo modo, ogni punto del sottosuolo viene investito da radiazione elettromagnetica proveniente da angoli ed azimuth diversi. Si tratta quindi di un'acquisizione dati interamente tridimensionale. Per ogni punto, nel caso in esame, sono state effettuate misure lungo 12 azimuth (da 0° a 165° con passo di 15°) e 12 *offset*, compresi nell'intervallo tra 60 e 400 cm.

La tomografia sismica e' stata realizzata con un sistema a 24 canali (Geode, Geometrics), geofoni da 40 Hz, mazza da 12 kg su piastra di acciaio armonico come sorgente. L'esperimento e' stato condotto su una zona in rilievo a sviluppo tronco-conico posizionando due corone circolari di sorgenti e sensori a differenti quote (100, 250 cm dal piano di campagna) e con spaziatura angolare di 15°. Il posizionamento di sensori e sorgenti e' stato effettuato con teodolite laser.

La tomografia elettrica e' stata realizzata con un sistema a 16 elettrodi in configurazione dipolo-dipolo.

La gradiometria magnetica e' stata effettuata con magnetometro al cesio sui medesimi grigliati utilizzati per l'acquisizione dati radar. I sensori sono stati mantenuti a quote di 20 e 70 cm dal piano campagna ed il campionamento spaziale e' stato effettuato ad intervalli di 10 cm.

Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati a copertura singola e' basata sulla seguente sequenza di procedure:

- *De-wow*
- *Background removal*
- Analisi e correzione d'ampiezza
- Analisi spettrale e filtraggio passa-alta
- Deconvoluzione
- Filtraggio passa-banda

Sono state poi implementate e sperimentate tre differenti tecniche di deconvoluzione: a) predittiva [10] b) massima entropia [11] c) Q-deconvolution [12, 13]. I dati a copertura singola presentano un basso rapporto segnale/rumore (SNR) che e' probabilmente all'origine del limitato incremento di risoluzione verticale che si ottiene dopo l'applicazione delle tecniche proposte. Il collegamento tra incremento della risoluzione verticale e SNR e' verificato dai risultati ottenuti con una parte dei profili SF che presentano un incremento medio del SNR intorno a 10 dB. Su tali profili, la deconvoluzione a massima entropia produce una notevole compressione della forma d'onda, superiore a quella che si ottiene con metodi predittivi o Q. La deconvoluzione a massima entropia e' stata perciò utilizzata per il trattamento dei dati SF, LMF ed AMF.

Il trattamento dei dati a copertura multipla e' basato sulle seguenti procedure:

1. Analisi di ampiezza in funzione di Azimuth-offset
2. De-wow
3. Analisi e correzione d'ampiezza preliminare
4. Rimozione di background e rumore coerente tramite algoritmi basati sulla Hough Transform
5. Analisi di velocita'
6. Correzione di divergenza sferica
7. Deconvoluzione
8. Migrazione Pre-stack
9. *(alternativa) Stack e*
10. *Migrazione Post-stack*
11. Filtraggio passa-banda
12. Identificazione di target a debole energia in presenza di elevati livelli medi di rumore basata sulla Wavelet Transform (WT).

L'analisi di ampiezza in funzione di azimuth ed offset e' stata eseguita su dati AMF prima dell'acquisizione dati LMF in modo da selezionare l'orientazione del grigliato e l'intervallo di offset ottimali. La rimozione del background e' un punto cruciale della sequenza di elaborazione dati GPR per questo tipo di applicazioni in quanto il disaccoppiamento di impedenza tra antenna e cavo di alimentazione, che si puo' verificare su suoli contaminati o in discariche quando l'impedenza del terreno e' differente da quella ipotizzata in fase di progettazione dell'antenna. Questo problema deve essere affrontato prima di deconvoluzione, analisi di velocita' e stack. L'algoritmo originale per la rimozione di questo disturbo e' stato implementato nell'ambito di questo programma di ricerca ed e' basato sulle seguenti operazioni:

- a. Ottimizzazione statistica di tracce modello selezionate con campionamento irregolare lungo il profilo;
- b. Amplificazione delle tracce modello basate sulla trasformata di Hough;
- c. Rimozione del background tramite sottrazione della traccia modello.

L'algoritmo e' in grado di rimuovere efficacemente il background preservando il segnale primario, con un carico computazionale inferiore ad algoritmi convenzionali, come ad esempio il filtraggio FK o la trasformata di Karhunen-Loeve, attraverso una riduzione del segnale primario contenuto nella traccia modello. Il numero di tracce n che contribuiscono alla traccia modello in ogni punto della sezione viene calcolato da una funzione di correlazione $f(n)$ che si ottiene con i seguenti passaggi:

1)

$$\Psi_{ki}(n) = a_{ki} \frac{1}{n+1} \sum_{j=i-n/2}^{i+n/2} a_{kj} = \begin{cases} \Psi_{ki}(n) & \text{for } \Psi_{ki}(n) \geq 0 \\ 0 & \text{for } \Psi_{ki}(n) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

dove Ψ_{ki} e' il prodotto del k -esimo campione della i -esima traccia nella matrice di dati in ingresso con il valore medio degli n campioni situati su tracce adiacenti nella stessa posizione lungo l'asse dei tempi.

2)

$$\Phi_i(q, n) = \sum_0^q \Psi_{ji}(n) \quad (2)$$

$$\Phi_i(q, 0) = \sum_{-q/2}^{q/2} a_{ki}^2(n) = E_i(q) \quad (3)$$

dove q e' la dimensione della finestra temporale.

Valori elevati di $\Psi_{ki}(q, n)$ si ottengono in presenza di background coerente. Lo stack di $\Psi_{ki}(q, n)$ sulla finestra temporale selezionata, $\Phi_i(q, n)$, fornisce indicazioni sulla coerenza complessiva per la i -esima traccia nell'intervallo temporale di interesse in funzione del numero di tracce adiacenti n considerato per la somma. Variazioni in $\Phi_i(q, n)$ sono collegate a variazioni nella forma d'onda in funzione della posizione, ovvero dovute principalmente alle interazioni antenna-terreno.

3)

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{\Phi_i(q, n)}{\Phi_i(q, 0)} \quad (4)$$

$f(n)$ presenta due valori massimi: uno per $n=0$, il secondo per n_M , che e' il numero di tracce che corrisponde al massimo contenuto in energia coerente. Tracce modello ottenute con gruppi di tracce piu' grandi di n_M conservano l'energia locale e sono piu' indicate nei settori dove il background interferisce con segnale primario sub-orizzontale. Gruppi di dimensioni inferiori ad n_M tendono a rimuovere l'energia locale e possono essere utilizzati dove il segnale primario e' inclinato. L'analisi di $f(n)$ consente una valutazione quantitativa del numero di tracce ottimale da utilizzare per la rimozione del background. Il secondo passaggio della procedura e' un'amplificazione della traccia modello basata sulla Trasformata di Hough (HoT). Abbiamo utilizzato una retta orizzontale come curva parametrica per l'identificazione del background. In questo modo si ottiene uno spazio parametrico monodimensionale. La HoT cosi' ottenuta puo' essere direttamente utilizzata come funzione di amplificazione che enfatizza gli eventi orizzontali, ponendo quindi in ulteriore risalto il background nella traccia modello. Viene eseguita una pre-elaborazione che consiste nella convoluzione dei dati con modelli di ondate ottenute dal primo passaggio della procedura. Questa stessa procedura puo' essere utilizzata per la rimozione di eventi pendenti o iperboli di diffrazione.

Le operazioni di trattamento da (2) a (6) sono adatte da corrispondenti operazioni che si effettuano nel trattamento di dati sismici (vedasi ad es. [14]). Procedure di migrazione post-stack e pre-stack in tempo e profondita' sono state sperimentate a confronto. La complessita' delle condizioni subsuperficiali e le rapide variazioni laterali di velocita' di propagazione delle onde radar non permettono di ottenere risultati soddisfacenti con metodi post-stack. E' stato quindi adottato un algoritmo di Kirchhoff pre-stack che ha consentito di ricostruire immagini accurate in presenza di campi di velocita' variabili ed eventi a forte pendenza.

L'analisi di attributi istantanei basata sulla Wavelet Transform (WT) (procedura di elaborazione 7) e' una tecnica da noi sviluppata per l'individuazione di deboli transienti in condizioni di elevato rumore di fondo, una situazione comune nella parte piu' profonda del record radar e nei dataset ottenuti da siti di scarica o su terreni caotici. Si utilizzano wavelets del tipo Grossman-Morlet per calcolare i parametri istantanei (involuppo, fase, frequenza) della traccia radar [9]. Il metodo e' basato sull'ordina analitica $\alpha(t)$ che soddisfa la seguente condizione ammissibile:

$$C_y = \int_0^\infty \frac{|\mathbf{y}(\mathbf{w})|^2}{\mathbf{w}} d\mathbf{w} < \infty, \quad C_y \neq 0 \quad (5)$$

Dove $\mathbf{y}(\mathbf{w})$ e' la Trasformata di Fourier di $\mathbf{y}(t)$. La Wavelet Transform di $x(t)$ e' definita come

$$WT_x(a, \mathbf{t}) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \mathbf{y}^* \left(\frac{t-\mathbf{t}}{a} \right) dt = \langle x(t), \mathbf{y}_{at}(t) \rangle \quad (6a)$$

Dove a e' il fattore di scala e \mathbf{t} e' il parametro di traslazione. $\mathbf{y}_{at}(t)$ e' definita in base alla teoria delle wavelets (vedasi ad es. [15]) e si ottiene scalando e traslando un'ondina di base, selezionata attraverso test di diverse basi di ondine, del tipo Grossman-Morlet $\phi(t)$:

$$\mathbf{y}_{at}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \mathbf{y} \left(\frac{t-\mathbf{t}}{a} \right) \quad (6b)$$

Dalla teoria della Wavelet Transform [16], si deduce che la parte immaginaria di $WT_x(a, \tau)$ e' uguale alla trasformata di Hilbert della sua parte reale se $\phi(t)$ e' una funzione analitica ed $x(t)$ un segnale di energia. Si puo' quindi utilizzare la seguente equazione per ottenere il segnale analitico di $x(t)$ calcolato con il metodo WT:

$$w(t) = \frac{1}{C_y} \int_0^\infty WT_x(a, \mathbf{t}) \frac{da}{a} = x(t) + jH[x(t)] = w_r(t) + jw_i(t) \quad (7)$$

Si possono quindi calcolare inviluppo $[e_w(t)]$, fase $[\mathbf{q}_w(t)]$ e frequenza $[\mathbf{w}_w(t)]$ istantanee del segnale $x(t)$ con il metodo WT per mezzo delle seguenti equazioni:

$$e_w(t) = \sqrt{w_r^2(t) + w_i^2(t)} \quad (8)$$

$$\mathbf{q}_w(t) = \arctg \left[\frac{w_i(t)}{w_r(t)} \right] \quad (9)$$

$$\mathbf{w}_w(t) = \frac{d}{dt} [\mathbf{q}_w(t)] \quad (10)$$

Questo metodo e' meno sensibile al rumore dei metodi convenzionali basati sulla Trasformata di Hilbert perche' sfrutta una ricostruzione del segnale per mezzo di basi di ondine, che puo' essere considerate un'implicita operazione di filtraggio. La tecnica consente di individuare con successo deboli riflettori in condizioni di elevato rumore di fondo.

Analisi dei materiali

Questa parte dello studio e' basata sul confronto tra dati Common Mid Point (CMP) di campagna e dati sintetici ottenuti considerando due semi-spazi omogenei ed isotropi, proprieta' elettriche dipendenti dalla frequenza e presenza di effetti di attenuazione e dispersione [17]. Si utilizza un modello di Cole-Cole per descrivere le proprieta' dielettriche complesse e dipendenti dalla frequenza dei materiali. Il coefficiente di riflessione viene calcolato per un campo elettrico normale al piano di incidenza, come nel caso dei dati sperimentali in esame, dall'equazione:

$$R = \frac{\mu_2 k_1 \cos \mathbf{q} - \mu_1 \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \mathbf{q}}}{\mu_2 k_1 \cos \mathbf{q} + \mu_1 \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \mathbf{q}}} \quad (11)$$

dove θ e' l'angolo di incidenza, $\mu_{1,2}$ sono le permeabilita' magnetiche dei due semi-spazi e $k_{1,2}$ sono costanti di propagazione complesse espresse da (vedasi ad es. [18]):

$$k_{1,2} = k_{r,2} + ik_{i,2} \quad (12a)$$

dove

$$k_r = \mathbf{w} \sqrt{[(0.5) \mathbf{m} \mathbf{m} \mathbf{e}_r(\mathbf{w}) \mathbf{e}_0] \left(\sqrt{1 + \left[\frac{\mathbf{S}(\mathbf{w})}{\mathbf{e}_r(\mathbf{w}) \mathbf{e}_0 \mathbf{w}} \right]^2} + 1 \right)} \quad (12b)$$

e

$$k_i = \mathbf{w} \sqrt{[(0.5) \mathbf{m} \mathbf{m} \mathbf{e}_r(\mathbf{w}) \mathbf{e}_0] \left(\sqrt{1 + \left[\frac{\mathbf{S}(\mathbf{w})}{\mathbf{e}_r(\mathbf{w}) \mathbf{e}_0 \mathbf{w}} \right]^2} - 1 \right)} \quad (12c)$$

Gli effetti di attenuazione, dispersione e divergenza sferica $a(r)$, in funzione della distanza r vengono modellati dalla seguente equazione [17, 18]:

$$a(r) = e^{-k_i r} e^{-i(k_r r - \omega t)} \quad (13)$$

Il tempo di percorso t e' collegato ad r , distanza percorsa dalle onde radar nel semispazio inferiore, dalla velocita' intervallare, ottenuta dall'analisi di velocita' su CMP o su CRP (Common Reflection Point) nel caso della migrazione pre-stack. L'analisi e' stata effettuata nell'intervallo di angoli di incidenza compresi tra 0° e 30° , dove gli effetti del pattern di radiazione su ampiezza e fase possono essere considerati trascurabili a causa della limitata direttivita' di una sorgente che irradia in un semi-spazio a permittivita' dielettrica relativamente bassa. L'ingresso dell' algoritmo di simulazione e' l'ondina $w_i(t)$ ottenuta dai primi due semi-cicli del transiente che si ricava da esperimenti in trasmissione effettuati in trincea e su rilevato. Tale ondina puo' essere considerata con ottima approssimazione rappresentativa dell'ondina sorgente. L'ondina in uscita viene calcolata nel dominio delle frequenze. Un algoritmo di simulazione numerica FDTD (Finite Difference Time Domain) e' stato infine utilizzato per la simulazione 2D in un caso controllato (esperimento in sandbox).

Integrazione con altre tecniche geofisiche

I metodi radar proposti sono stati integrati con tecniche tomografiche acustiche ed elettriche e con gradiometria magnetica ad alta risoluzione nel caso di una discarica di inerti. Le tecniche di tomografia sismica sono state applicate in trasmissione al caso di siti in rilievo rispetto al piano di campagna. Il metodo e' di applicabilita' generale grazie alla possibilita' di sfruttare la geometria *cross-well* per indagini su volumi sepolti. La soluzione del problema tomografico e' stata affrontata, per il caso sismico, con un algoritmo SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, [19]) che inverte simultaneamente tutti i raggi utilizzati negli esperimenti condotti. La completa copertura angolare, ottenuta con l'esperimento in trasmissione effettuato su corone circolari a quota costante ed intervallo angolare tra i sensori e tra le sorgenti pari a 15° , garantisce una ricostruzione accurata del campo di velocita'. La velocita' di propagazione delle onde P ottenuta dalla ricostruzione tomografica viene poi correlata al campo di velocita' delle onde radar ottenuto coi metodi a copertura multipla. Quest'ultimo campo risente delle variazioni della costante dielettrica che sono primariamente legate, per sedimenti porosi, al contenuto in acqua. L'integrazione dei dati radar con i dati acustici consente quindi una mappatura ad altissima risoluzione del contenuto in fluidi dei volumi in esame, oltre a permettere una ricostruzione integrata della stratigrafia acustica ed elettromagnetica. Ulteriori vincoli al modello subsuperficiale si ottengono dalla tomografia elettrica, realizzata nel presente studio con un sistema a 16 elettrodi in configurazione dipolo-dipolo. Il parametro di interesse e' in questo caso la resistivita' che e' legata principalmente alla capacita' di conduzione elettrolitica del terreno e quindi alla porosita' ed alle proprieta' dei fluidi in esso contenuti. I dati elettrici sono stati invertiti in 2-D e 3-D per l'interpretazione integrata con i dati radar.

RISULTATI

La Fig. 1 illustra i risultati ottenuti in un sito di discarica dove ceneri industriali e rifiuti solidi urbani sono stati stoccati al di sopra di un substrato calcareo coperto da un suolo argilloso di spessore variabile tra i 50 ed i 200 cm. Analisi chimiche effettuate nel corso degli anni '90 sulle acque di una vicina sorgente termale hanno rivelato una forte contaminazione in metalli pesanti, compatibile con il tipo di rifiuti stoccati nell'area. Le perforazioni di controllo hanno confermato la presenza di uno strato argilloso impermeabile tra materiali di discarica e substrato calcareo. Le indagini GPR a copertura multipla rivelano che in alcuni punti il substrato si trova direttamente a contatto coi materiali di discarica (Fig.1) ed esistono quindi le condizioni per la percolazione di acque contaminate dal corpo di discarica al calcare poroso e fratturato. Zone ad elevata fratturazione sono inoltre messe in evidenza dall'analisi degli attributi istantanei.

La Fig.2 presenta un esempio di risultati ottenuti con tecniche integrate GPR copertura multipla (Fig.2a) e tomografia sismica (Fig.2b). L'inversione congiunta dei dati acustici ed elettromagnetici consente in questo

caso di ricostruire un modello del sottosuolo ad altissima risoluzione e con vincoli quantitativi sulle proprietà dei materiali. In particolare, è possibile identificare delle zone ad alta velocità delle onde acustiche (Fig.2b) orientate in direzione NW-SE che coincidono con zone a minima velocità delle onde radar e possono quindi essere associate ad incrementi localizzati della saturazione in acqua. Le caratteristiche dell'acqua, desunte dall'attenuazione delle onde radar e da misure in laboratorio su campioni della frazione solida, sono di resistività comprese nell'intervallo 0.1-0.5 S/m.

La fig.3 fornisce un esempio di integrazione GPR, gradiometria magnetica e tomografia elettrica. Precedenti studi in questo sito non erano stati in grado di determinare i parametri di interesse per la bonifica (volumetria, disposizione substrato, presenza eventuali corpi metallici) che sono stati invece ricostruiti con elevato dettaglio grazie all'integrazione delle tecniche proposte.

Infine la Fig.4 illustra la modalità di *modelling aided interpretation* di dati GPR, tecnica originale in corso di sviluppo ed applicazione per la ricostruzione simultanea della struttura e delle proprietà fisiche del sottosuolo. L'esempio è tratto da un esperimento controllato nella vasca di test (sandbox) realizzata dal Gruppo di Esplorazione Geofisica nell'ambito del progetto finalizzato del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici. La figura è organizzata come una matrice con colonne indicizzate da a, b e c e righe da 1, 2 e 3. Nella prima colonna (Fig.4a), è riportata la geometria del modello subsuperficiale riprodotto nella vasca. I risultati della simulazione numerica e dell'esperimento condotto in vasca con antenne da 800 Mhz sono riportati in Fig.4b e 4c rispettivamente. Nella righe della Fig.4 sono riportati i seguenti casi: tubo in PVC pieno d'aria (Fig.4.1), tubo metallico (Fig.4.2), tubo in PVC pieno d'acqua (Fig.4.3). Il modelling riproduce accuratamente le riverberazioni nel tubo pieno d'acqua e consente di verificare la correttezza dei parametri elettrici dei materiali. In particolare, è possibile verificare che i target α e β sono effetti di interferenza costruttiva dovuti a variazioni di velocità legate alla differente umidità delle sabbie poste nella vasca. In maniera analoga, l'iperbole di diffrazione generata dalla sommità dei tubi presenta una curvatura compatibile con un contenuto in acqua inferiore a quello stimato in base alle misure di resistività ed alla applicazione della legge di Archie.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dimostrano che le tecniche Ground Penetrating Radar a copertura multipla, integrate da misure acustiche, elettriche e magnetiche e da metodi di interpretazione *modelling aided* di nuova concezione, rappresentano una soluzione efficace, economica ed accurata per indagini in siti contaminati.

La presenza di acqua nell'aerato provoca variazioni delle velocità sismiche complementari a quelle delle onde radar e consente una ricostruzione vincolata e quantitativa del contenuto in fluidi di mezzi porosi, di primario interesse per le applicazioni ambientali allo studio di terreni contaminati e discariche.

L'integrazione della tomografia elettrica con le tecniche radar ed acustiche permette infine di discriminare ulteriormente le zone sature o parzialmente sature in base alla resistività dei fluidi. Questo è un aspetto di primario interesse nello studio della contaminazione e nelle applicazioni al monitoraggio ed alla protezione degli acquiferi. I metodi proposti possono essere utilizzati per interventi urgenti ai fini della caratterizzazione di siti contaminati e per una riduzione dei costi di campionamento, analisi, monitoraggio e bonifica.

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca del Gruppo di Geofisica di Esplorazione dell'Università di Trieste nel settore dei metodi geofisici applicati all'ambiente, con specifico riferimento allo studio della contaminazione di suoli ed acque, è finanziata dal *Progetto Finalizzato 37* del CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici. Un sentito ringraziamento va al Direttore della linea di ricerca, prof. Severino Zanelli per l'incoraggiamento ed il supporto. Gli autori ringraziano anche il dott. Giampaolo Fontana e la Dr. Francesca Gorjup, del Consorzio per lo Sviluppo Industriale di Monfalcone, per il supporto alle indagini ed ai test svolti nel sito delle Terme Romane di Monfalcone.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nettleton, L. L., 1972, Report - Underground waste management and environmental implications: Geophysics, 37, no. 03, 538-545.
- [2] Abbaspour, K., Johnson, C.A., 1999. A contaminated site investigation: comparison of information gained from geophysical measurements and hydrogeological modeling. Journal of Contaminant Hydrology, 40, 4, 365-380
- [3] Bernstone, C. and Dahlin, T., 1996. Electromagnetic and DC resistivity mapping of waste deposits and industrial sites - Experiences from southern Sweden. 61st Mtg. Eur. Assoc. Expl Geophys., Extended Abstracts, European Association Of Geophysical Exploration, Session M014

- [4] Frangos, W., Andrezal, T., 1994. IP measurements at contaminant and toxic waste sites in Slovakia. Expanded Abstr., Summer IP Workshop, Tucson.
- [5] Goupil, F., Paul, R. and Desjarlais, P., 1990, Seepage detection by integrated geophysics of a waste disposal site: Annual Meeting Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists, 458-459.
- [6] Green, A. G., Lanz, E. and Maurer, H., 1998, Refraction tomography over a buried waste disposal site: *Geophysics*, 63, no. 04, 1414-1433.
- [7] Grandjean, G., Gourry, J.C., Bitri, A., 2000. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, **45**, 3, 141-156.
- [8] Pipan M., Baradello L., Finetti I., Forte E. and Prizzon A., 1999. 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold Ground Penetrating Radar data: a case history from an archaeological site. *Journal of Applied Geophysics*, **41**, 2-3, 271-292.
- [9] Guangyou F., Pipan M., 2000. Recent Advances in Instantaneous Parameters Analysis of Ground Penetrating Radar (GPR) Signals for AP Mine Detection. Proceedings European Microwave Conference 2000 (CD ROM).
- [10] Robinson, E.A., 1967, Predictive decomposition of time series with application to seismic exploration, *Geophysics*, 32, 418-484
- [11] Burg, J.P., 1972, The relationship between Maximum Entropy Spectra and Maximum Likelihood Spectra, *Geophysics*, 37, 375-376
- [12] Turner, G., 1994, Subsurface radar propagation deconvolution, *Geophysics*, 59, 215-223
- [13] Turner, G., and Siggins, A.F., 1994, Constant Q attenuation of subsurface radar pulses, *Geophysics*, 59, 1192-1200
- [14] Yilmaz O. (1989) – Seismic data processing. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA
- [15] Grossman, A., and Morlet, J., 1984, Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM J. Math. Anal.*, 15, 723-736
- [16] Fofoula-Georgiou, E., and Praveen Kumar, E., 1994, *Wavelets in Geophysics*, Academic Press
- [17] Fechner, T., and Yaramanci, U., 1996, Influence of complex dielectric properties on the characteristics of radar reflections, *Eur.J.Env.Eng.Geoph.*, 1, 287-301
- [18] Ward, S.H., and Hohmann, G.W., 1987, *Electromagnetic theory for Geophysical Applications*, in *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*; v.1, Theory, Investigations in geophysics; v.3, Society of Exploration Geophysicists
- [19] McGaughey, W. J. and Young, R. P., 1990, Comparison of ART, SIRT, least squares, and SVD two-dimensional tomographic inversions of field data, 60th Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 74-77

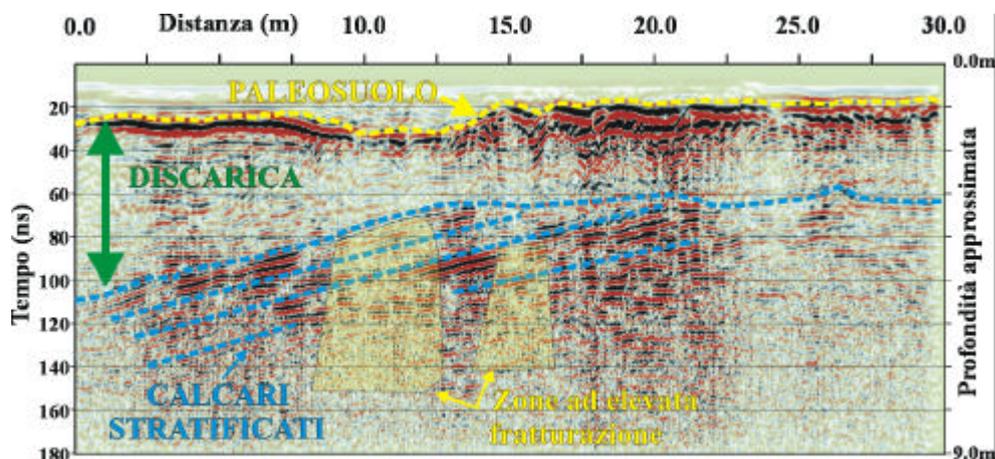


Fig.1 - Esempio di sezione Ground Penetrating Radar a copertura multipla da area di discarica mista (rifiuti industriali e solidi urbani)

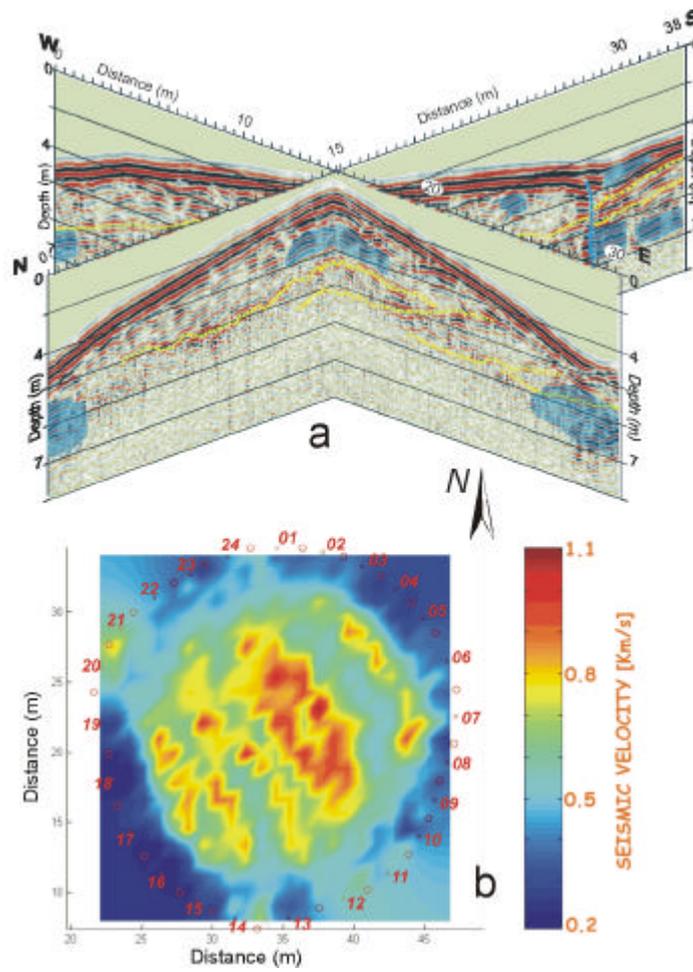


Fig.2 - Esempio di ricostruzione integrata a) Ground Penetrating Radar a copertura multipla 3-D e b) tomografia sismica in trasmissione su discarica in rilievo.

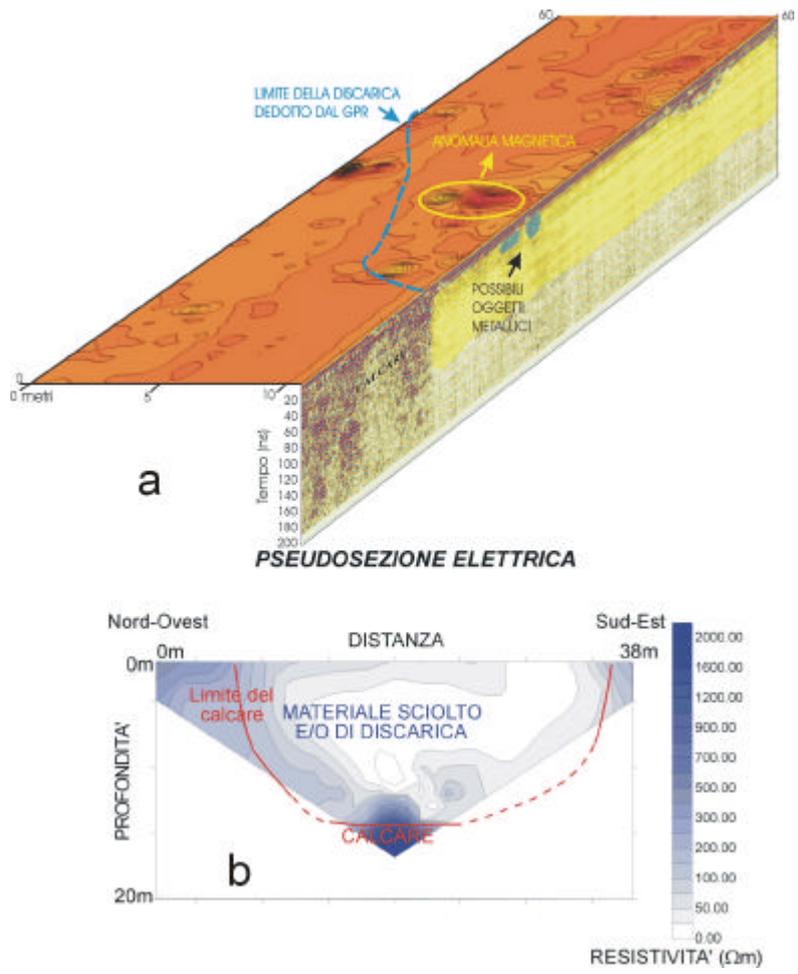


Fig.3 - Esempio di ricostruzione integrata a) Ground Penetrating Radar a copertura multipla e gradiometria magnetica e b) tomografia elettrica in modalita' dipolo-dipolo.

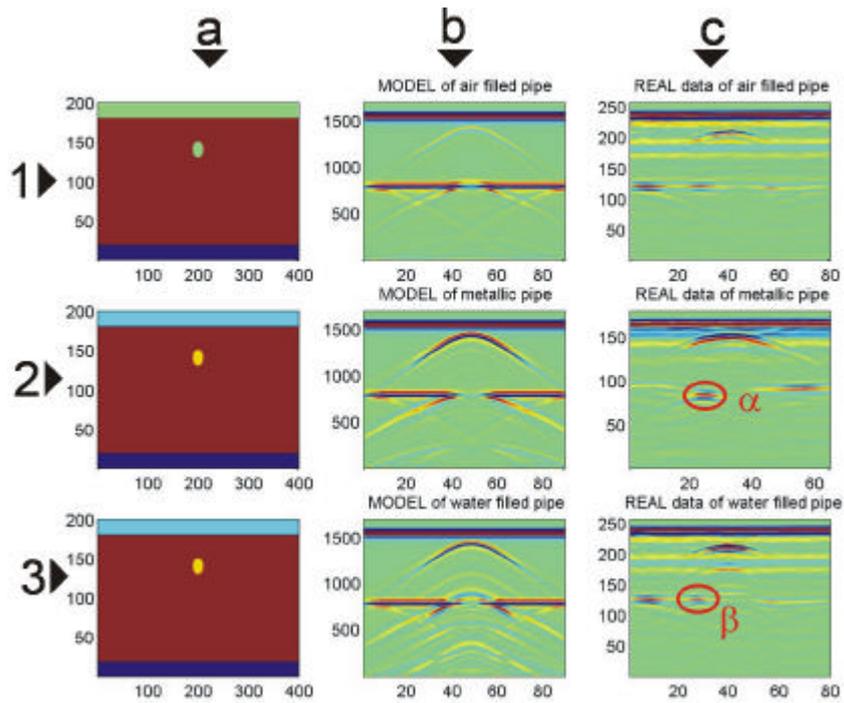


Fig.4 - Esempio di *modelling aided interpretation* su esperimento in vasca (*sandbox*) con [riga] 1) tubo in PVC riempito d'aria 2) tubo metallico 3) tubo in PVC riempito d'acqua; [colonna] a) modello b) dati radar sintetici c) dati radar reali.