

## CARLO BEGLIOMINI

GEOLOGO : S.A.FI. - SERVIZI AMBIENTALI  
AREA FIORENTINA S.p.A.  
EMAIL: CBGLIOMINI@SAFI-SPA.IT

## GIANFRANCO CENSINI

GEOLOGO - GEOFISICO : GEORISORSE  
ITALIA SAS - SOCIETÀ PER L'ESPLORAZIONE  
GEOFISICA DEL SOTTOSUOLO  
EMAIL: G.CENSINI@GEORISORSE.IT

# INDAGINI GEOFISICHE MULTIMETODOLOGICHE PER LA DEFINIZIONE DEL PROGETTO DI BONIFICA DELL'AREA LIMITROFA ALL'EX INCENERITORE IN LOC. LE SIBILLE, COMUNE DI SAN CASCIANO VAL DI PESA (FI)

## 1. INTRODUZIONE

Nel mese di Agosto 2000 è stata eseguita una prospezione geofisica nell'area limitrofa all'impianto di trattamento rifiuti solidi urbani di proprietà della S.A.FI. Servizi Ambientali Area Fiorentina S.p.A. in località Le Sibille, nel Comune di San Casciano Val di Pesa (FI). L'area in esame, che si sviluppa per una superficie di circa 18.000 mq, risultava interessata da smaltimenti non controllati di residui dell'attività di un preesistente inceneritore, affioranti in alcuni punti dell'area, mentre in altri erano stati messi in evidenza attraverso trincee esplorative. L'estensione dell'area interessata dallo smaltimento non controllato, tuttavia, non era ben definibile sulla base delle sole osservazioni di superficie, tanto da non consentire una stima attendibile delle superfici e dei volumi coinvolti. Per tale motivo è stata condotta una campagna di misure geofisiche, con la finalità di caratterizzare il sito nella prospettiva di una sua bonifica.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area S.A.FI. di Ponte alle Sibille si trova lungo il Fiume Greve, in destra idrografica del corso d'acqua, nel Comune di San Casciano Val di Pesa (FI); essa interessa una zona di pianura delimitata dall'alveo del Fiume stesso e dagli affioramenti di argilliti appartenenti al complesso caotico del Flysch Cretacico. L'area pianeggiante è caratterizzata invece dalla presenza di alluvioni grossolane, a matrice argillosa, di spessore noto inferiore alla decina di metri, dove ha sede una discreta falda acquifera, ricari-

cata dal subalveo del Fiume. Nell'area di interesse la superficie piezometrica staziona in effetti diversi metri al di sotto del livello del Fiume. Nell'area S.A.FI. e sulla sponda opposta esistono alcuni pozzi che sfruttano la suddetta falda.

## 3. INDAGINI GEOFISICHE

Le indagini geofisiche eseguite per la caratterizzazione e la bonifica dell'area di smaltimento incontrollato hanno comportato le seguenti fasi di lavoro:

1) Preparazione di una linea di fede, centrata sull'area di intervento, con picchetti a distanza di 10 m; oltre a questi punti sono stati posti altri picchetti secondo una maglia di 20 x 20 m o con minore regolarità in funzione delle possibilità logistiche e di visibilità dei punti. Tutti i picchetti sono stati identificati dalle rispettive coordinate metriche riferite ad uno zero arbitrario.

2) Esecuzione di misure di intensità del campo magnetico terrestre con magnetometro a protoni in corrispondenza di 354 stazioni poste secondo una maglia di 5 x 10 m.

3) Esecuzione di 325 misure di resistività del sottosuolo mediante il sistema Elettromagnetico GEONICS EM34 ai nodi di una griglia di 5 x 10 m.

4) Esecuzione di misure di Resistività e Polarizzazione Indotta lungo 10 profili ubicati in maniera da attraversare in modo sistematico tutta l'area di interesse secondo una direzione perpendicolare al corso del Fiume Greve, e lungo 3 profili ubicati parallelamente al fiume stesso. Tutti i profili sono stati eseguiti con una spaziatura degli elettrodi pari a 5 m, in modo da permettere una esplorazione di circa 20 m di profondità

in quanto, oltre alla individuazione delle zone di smaltimento, era motivo di interesse anche la ricostruzione dell'assetto geologico ed idrogeologico della zona.

L'area di indagine e l'ubicazione delle varie misure sono riportati nella Fig. 1.

### 3.1. METODO MAGNETOMETRICO

La prospezione magnetometrica consiste nella determinazione delle anomalie di intensità del campo magnetico terrestre, che possono essere dovute alla presenza di corpi magnetici nel sottosuolo. Le anomalie di intensità sono generalmente dipendenti, per la loro forma ed estensione, dalle caratteristiche geometriche e di magnetizzazione degli oggetti sepolti; la modellizzazione del corpo perturbante in base alla forma e all'entità dell'anomalia prodotta è generalmente complessa, mentre risulta più facile localizzare lo stesso.

Le anomalie magnetiche tendono in genere ad essere di tipo bipolare, caratterizzate cioè dall'affiancamento di un valore positivo (dove si verifica un aumento dell'intensità rispetto al valore medio naturale) e di uno negativo (dove il campo è minore di quello medio).

In caso di un corpo privo di magnetizzazione residua, alle latitudini della zona di interesse, l'anomalia mostra una componente positiva a Sud ed una negativa a Nord del corpo stesso; la presenza invece di magnetizzazione residua può alterare sensibilmente questo schema.

Nella progettazione di una campagna di indagini di carattere ambientale e nella successiva fase di interpretazione, si deve tener conto che gli oggetti magnetici superfi-

ciali tendono a determinare anomalie molto intense che possono oscurare quelle legate ad oggetti più profondi, e che solo l'esecuzione di misure su un'area sufficientemente vasta può portare alla distinzione di differenti livelli di anomalia.

Nel caso specifico è stato utilizzato un magnetometro a precessione di protoni Geometrics G856.

### 3.2. METODO ELETTROMAGNETICO

La prospezione elettromagnetica è stata applicata in quanto permette di evidenziare le variazioni della conducibilità nel sottosuolo (McNeill, 1980). La metodologia utilizzata rientra tra quelle operanti nel "frequency domain" con dispositivo Slingram; in particolare è stato impiegato il sistema GEONICS EM 34-3 che permette di indagare a varie profondità, comprese tra 5+7 m ed oltre 50 m dal p.c. Il sistema utilizzato sfrutta il fenomeno fisico dell'induzione elettromagnetica che si verifica nei corpi conduttori di elettricità, quando vengono attraversati da un'onda elettromagnetica (EM).

In particolare si può determinare la presenza del corpo conduttore nel sottosuolo, eseguendo misure in superficie con vari dispositivi; quello in questione opera secondo lo schema riportato nella Fig. 2: l'apparato trasmittente (Tx) invia nello spazio circostante, tramite un'antenna opportunamente orientata, un segnale a frequenza costante e di ampiezza grossomodo uniforme; l'apparato ricevente (Rx) posto ad una distanza predefinita (10, 20 o 40 m) riceve:

1) il segnale EM mediante una specifica antenna, orientata in accordo con quella trasmittente;

2) un segnale di riferimento, via cavo, che proviene direttamente dall'antenna trasmittente.

L'analisi dell'alterazione del segnale porta alla determinazione della conducibilità apparente dello spazio circostante che, nelle esplorazioni di superficie, può farsi coincidere con il semi-spazio inferiore, ovvero con il sottosuolo. Con tale sistema l'esplorazione del sottosuolo avviene con elevata velocità, dato che non è necessario il contatto diretto tra terreno e strumentazione; si evitano così tutti i problemi connessi con la realizzazione di un efficace contatto tra sensori e terreno, come nel caso dei metodi geoelettrici convenzionali.

### 3.3. PROSPEZIONE DI RESISTIVITÀ E POLARIZZAZIONE INDOTTA (TIME DOMAIN)

Le prospezioni di Resistività e di Polarizzazione Indotta (IP=Induced Polarization) vengono generalmente eseguite con lo stesso dispositivo e la stessa strumentazione; si tratta di tecniche di indagine di tipo geoelettrico che permettono di evidenziare situazioni elettricamente anomale nel sottosuolo, mediante l'analisi della distribuzione della resistività elettrica e mediante l'analisi di un particolare comportamento di alcuni terreni: l'effetto "capacitivo".

In entrambi i casi si studia l'andamento di un campo elettrico in superficie, con la differenza che, nel caso della resistività, si stu-

dia il campo generato dalla circolazione della corrente nel sottosuolo, durante i periodi di invio della corrente stessa; per le misure di IP, invece, si studia la variazione del campo elettrico dopo l'interruzione di corrente o in seguito a variazioni delle caratteristiche del segnale elettrico inviato.

Per quanto riguarda l'effetto capacitivo, si può dire che esso rappresenta l'attitudine di un determinato materiale ad accumulare cariche elettriche di polarità opposta (cioè a "caricarsi" come un condensatore elettrico) lungo la superficie di discontinuità tra mezzi a resistività diversa, durante l'invio di corrente nel sottosuolo, ed a permettere la "scarica" negli istanti immediatamente successivi all'interruzione della corrente. In termini pratici i terreni che presentano i maggiori effetti capacitivi, cioè una elevata "caricabilità", sono quelli in cui si ha la contemporanea presenza di parti molto conduttive, affiancate ad altre molto resistive, senza che si verifichi una marcata continuità delle prime. Tra queste situazioni sono da segnalare le zone con mineralizzazioni metalliche conduttive (es. solfuri) diffuse in rocce compatte e resistive, le alluvioni a granulometria grossolana con abbondante matrice fine, ed anche i contesti tipo discarica dove i liquami percolanti la massa di rifiuti, generalmente molto conduttivi, possono localmente esser confinati in zone elettricamente isolate o contenere barriere isolanti che, sebbene facilmente by-passabili, costituiscono zone di momentaneo accumulo di cariche elettriche.

Le misure, nel caso in esame, sono state eseguite con il sistema di acquisizione da-

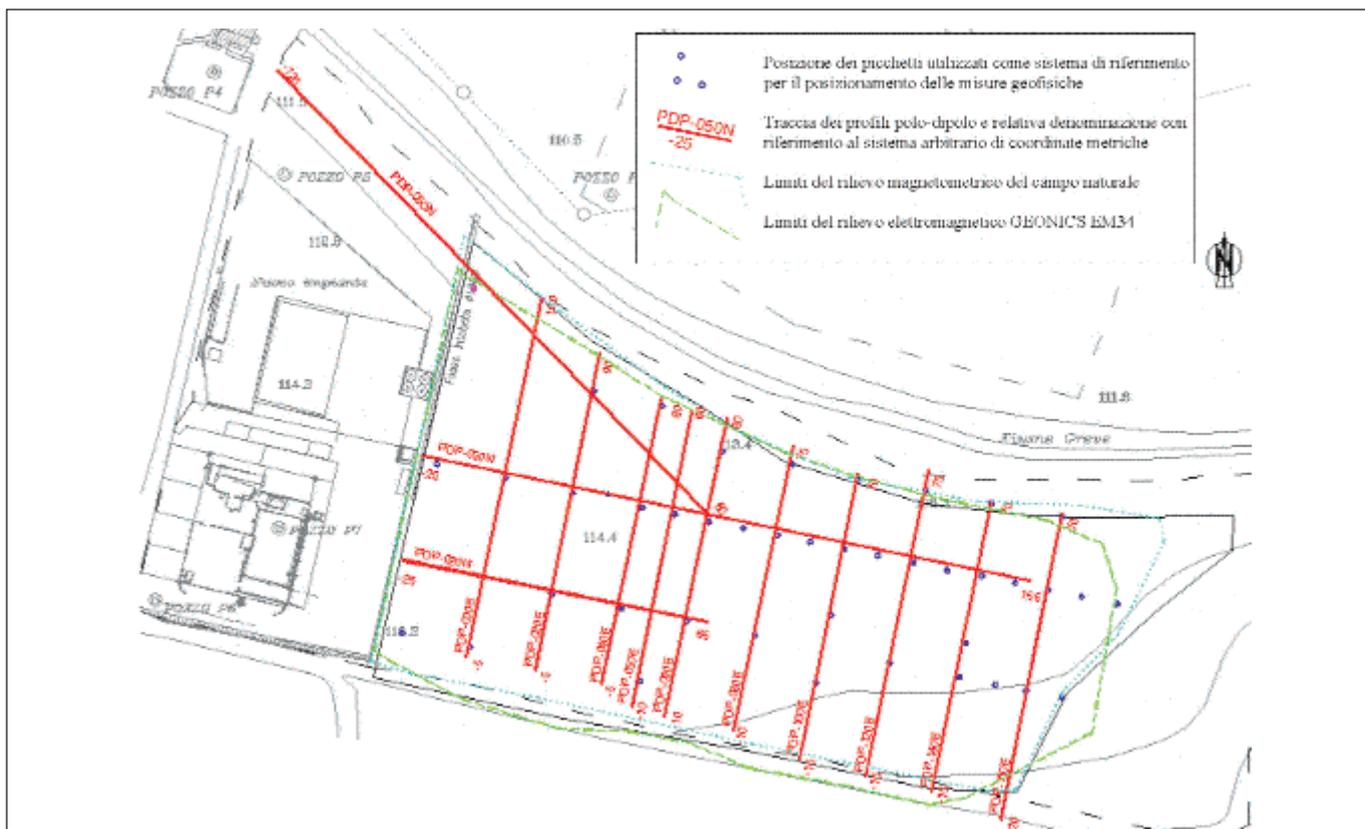


Fig. 1 - Ubicazione delle indagini geofisiche.

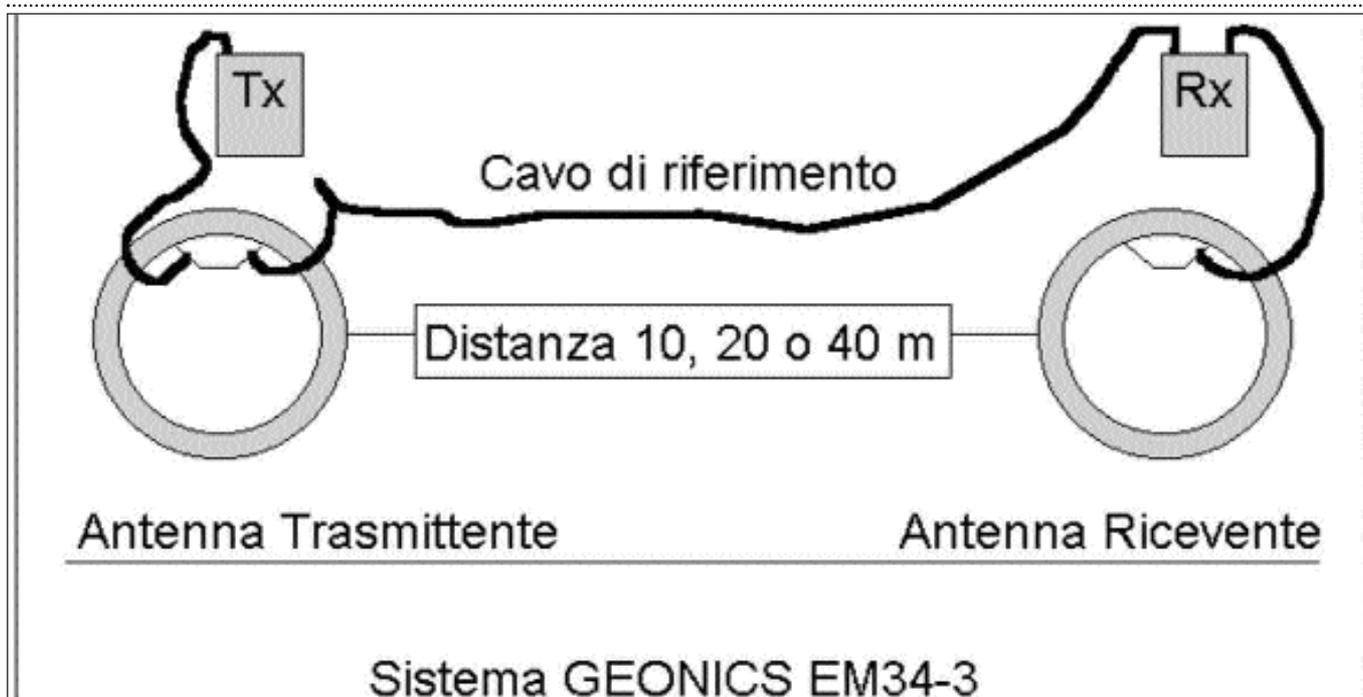


Fig. 2 - Schema di funzionamento della strumentazione FDEM.

ti SYSCAL R2E della BRGM di Orleans. Il sistema permette di operare con tempi di invio di corrente variabili; nel caso specifico è stato utilizzato un  $T=2$  sec. Operando con questo periodo, la misura della curva di scarica comincia dopo 120 msec dall'interruzione di corrente e il segnale viene campionato su 4 finestre aventi ampiezza progressivamente crescente: 120, 220, 420 e 820 msec. Nella Fig. 3 è riportato lo schema della modalità di campionamento della curva di scarica.

Il valore che viene misurato per ciascuna finestra è un numero puro in quanto è un valore di potenziale normalizzato rispetto alla differenza di potenziale durante l'invio di corrente (in genere indicato in mV/V), mentre il valore di caricabilità totale che caratterizza una curva di scarica è l'integrale che sottende la curva stessa. Questo valore è approssimato dalla sommatoria dell'area delle 4 finestre che, quindi, essendo il prodotto di un numero puro per un tempo

ha le dimensioni fisiche di un tempo (sec) oppure può esser trattato ancora come numero puro dividendolo per la lunghezza dell'intervallo di misura (1580 msec in questo caso).

La tecnica del Profilo Polo-Dipolo, utilizzata in questo lavoro, prevede l'uso di un elettrodo di corrente (convenzionalmente chiamato A) posto ad una distanza molto grande rispetto alla distanza dall'altro elettrodo di corrente (B) ed il centro (O) del dispositivo di misura del potenziale (MN). Per una determinata posizione di B si eseguono varie misure di tensione su Dipoli MN posti a varie distanze; i valori che si ottengono sono riferibili a profondità via via crescenti con l'aumentare della distanza OB. L'esecuzione di varie serie di misure relative a differenti posizioni dell'elettrodo B lungo un profilo, porta alla rappresentazione su una sezione delle variazioni della resistività nel sottosuolo.

L'elaborazione dei dati di questo profilo può portare alla semplice restituzione della pseudosezione, che da sola permette di evidenziare le variazioni significative della resistività apparente nel sottosuolo. Con l'impiego di specifici programmi di elaborazione (Loke e Baker, 1996; Loke 1999) è possibile, inoltre, effettuare una modellizzazione inversa: partendo dai valori misurati, viene creato un modello del sottosuolo composto da blocchi a caratteristiche diverse; sulla base del modello di partenza viene ricalcolata la pseudosezione ottenibile e confrontata con quella effettivamente ottenuta dalle misure. Il procedimento continua in modo iterativo, apportando progressivamente modifiche al modello, fino a minimizzare lo scarto tra la pseudosezione misurata e quella calcolata: quando tale scarto è minimo, si può ritenere che sia minima anche la differenza tra il modello ottenuto e la situazione reale.

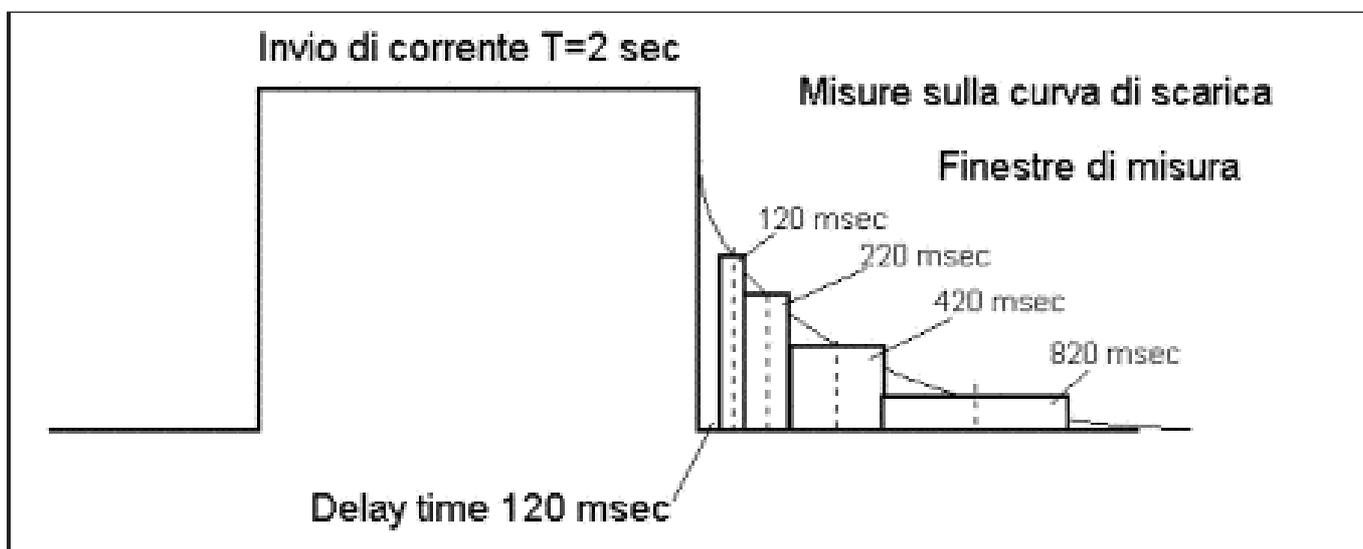


Fig. 3 - Modalità di campionamento della curva di scarica per l'acquisizione delle misure di caricabilità.

### 3.4. RISULTATI DELLE PROSPEZIONI

Le misure magnetiche sono state utilizzate per costruire la Carta delle anomalie magnetiche (Fig. 4), mediante linee isovalore con equidistanza di 20 nanoTesla (nT). Le anomalie positive sono state enfatizzate mediante tonalità rosse mentre quelle negative sono indicate dalle tonalità blu.

Le misure di conducibilità ottenute dal rilievo EM, successivamente trasformate in valori di resistività, sono state dapprima corrette tenendo conto della non linearità della risposta strumentale all'aumentare della conducibilità apparente, per poi essere restituite sotto forma di "Carta della resistività" (Fig. 5). Anche in questo caso sono state utilizzate linee isovalore per evidenziare le variazioni: l'equidistanza è in progressione logaritmica con 30 linee per decade. La scala cromatica associata alle variazioni dei valori è finalizzata ad una immediata interpretazione idrogeologica dei risultati: per le zone resistive (grossomodo più permeabili) si è scelto un colore azzurro-blu; le zone più conduttive sono evidenziate dalle tonalità rosse e possono associarsi a zone meno permeabili.

I risultati delle misure eseguite lungo i profili Polo-Dipolo sono presentati in forma di SEZIONI TOMOGRAFICHE di resistività e di caricabilità; in particolare, in Fig. 6, sono riportate le tomografie di resistività relative ai profili perpendicolari al Fiume Greve, mentre nella Fig. 7 si riportano le tomografie di caricabilità relative agli stessi profili. La restituzione affiancata delle tomografie otte-

nute permette una immediata correlazione tra le varie situazioni anomale individuate. La scala cromatica relativa alle tomografie di resistività è del tutto simile a quella della prospezione EM, per cui le tonalità rosse sono da associare a zone meno resistive (ovvero meno permeabili), mentre le azzurro-blu a quelle più resistive (quindi più permeabili, quali i paleo-alvei del Fiume Greve).

Per la caricabilità, invece, la scala cromatica parte da tonalità blu per i valori bassi (da zero fino a pochi millisecondi), indicativi di un contesto naturale senza particolari alterazioni, a tonalità rosse per i valori più elevati (oltre 30-40 msec).

La stima della probabilità di ritrovare rifiuti nel sottosuolo è stata quindi effettuata sulla base della ricorrenza delle anomalie evidenziate nella stessa posizione dai diversi metodi, con particolare riguardo alla Magnetometria ed alla Polarizzazione Indotta. L'analisi della forma, delle dimensioni e dello sviluppo delle anomalie possono, talora, contribuire ad una migliore identificazione delle cause all'origine delle anomalie stesse.

In particolare i risultati geofisici hanno permesso di delimitare i seguenti contesti (rif. Fig. 8):

a) Dalle misure di resistività, sia per via induttiva (EM) che per via diretta (profili Polo-Dipolo) si è messa in evidenza la situazione idrogeologica locale; essa può essere schematizzata con la presenza di un paleoalveo del Fiume Greve, che si sviluppa nella zona settentrionale dell'area esplo-

rata, con un andamento sub-parallelo all'attuale corso. Sia nelle tomografie di Fig. 6 che nella mappa di Fig. 5, si nota che il paleoalveo, a comportamento resistivo, potrebbe essere stato intercettato da una precedente attività di cava di materiali ghiaiosi e che la cavità formata potrebbe essere stata utilizzata per smaltire i residui dell'attività dell'inceneritore.

b) La zona del paleoalveo in prossimità dell'impianto è interessata dalle più marcate anomalie di tutti gli altri metodi: le più forti anomalie magnetiche, la zona più conduttiva indicata dall'elettromagnetismo e la zona con i massimi valori di caricabilità individuata dai profili. Particolarmente interessanti, a conferma dell'ipotesi della preesistenza di una zona di estrazione, sono le anomalie di caricabilità rilevate dai profili 50N (parallelo al fiume Greve) ed i profili 20E e 40E perpendicolari al corso d'acqua.

c) Oltre alla zona individuata come la probabile vecchia cava di materiali ghiaiosi, le anomalie si sviluppano su tutta la zona circostante, dove probabilmente si sono verificati smaltimenti più superficiali. Il limite delle anomalie magnetiche indicato in Fig. 8 rappresenta un limite oltre il quale la probabilità di ritrovamento di consistenti quantità di residui è estremamente basso; infatti non si hanno anomalie neppure dagli altri metodi. Il limite di residui nel sottosuolo coincide molto probabilmente con quello delle anomalie di caricabilità.

d) Nelle zone limitrofe all'attuale impianto sono state individuate molte anoma-

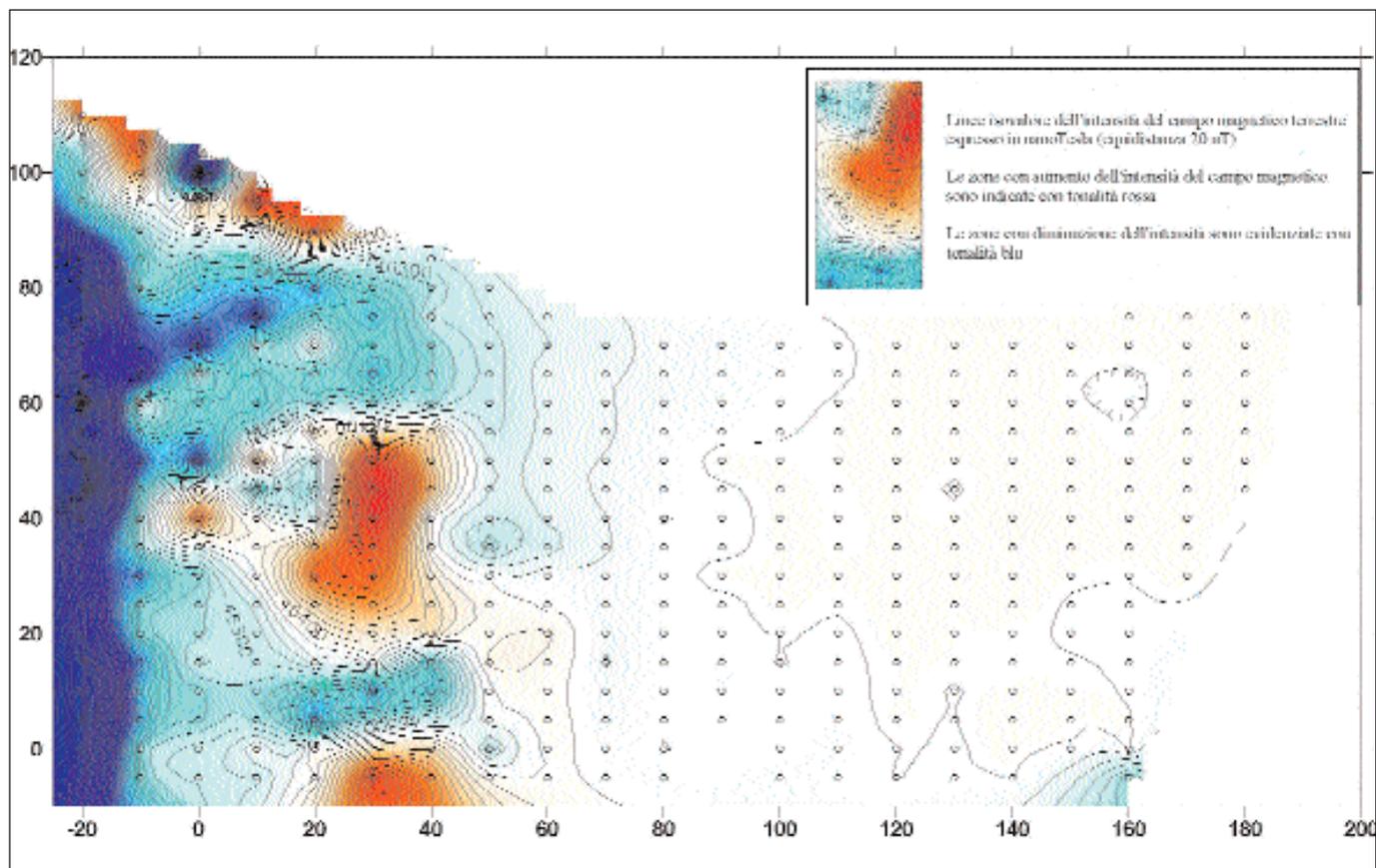


Fig.4 - Carta delle anomalie magnetiche.

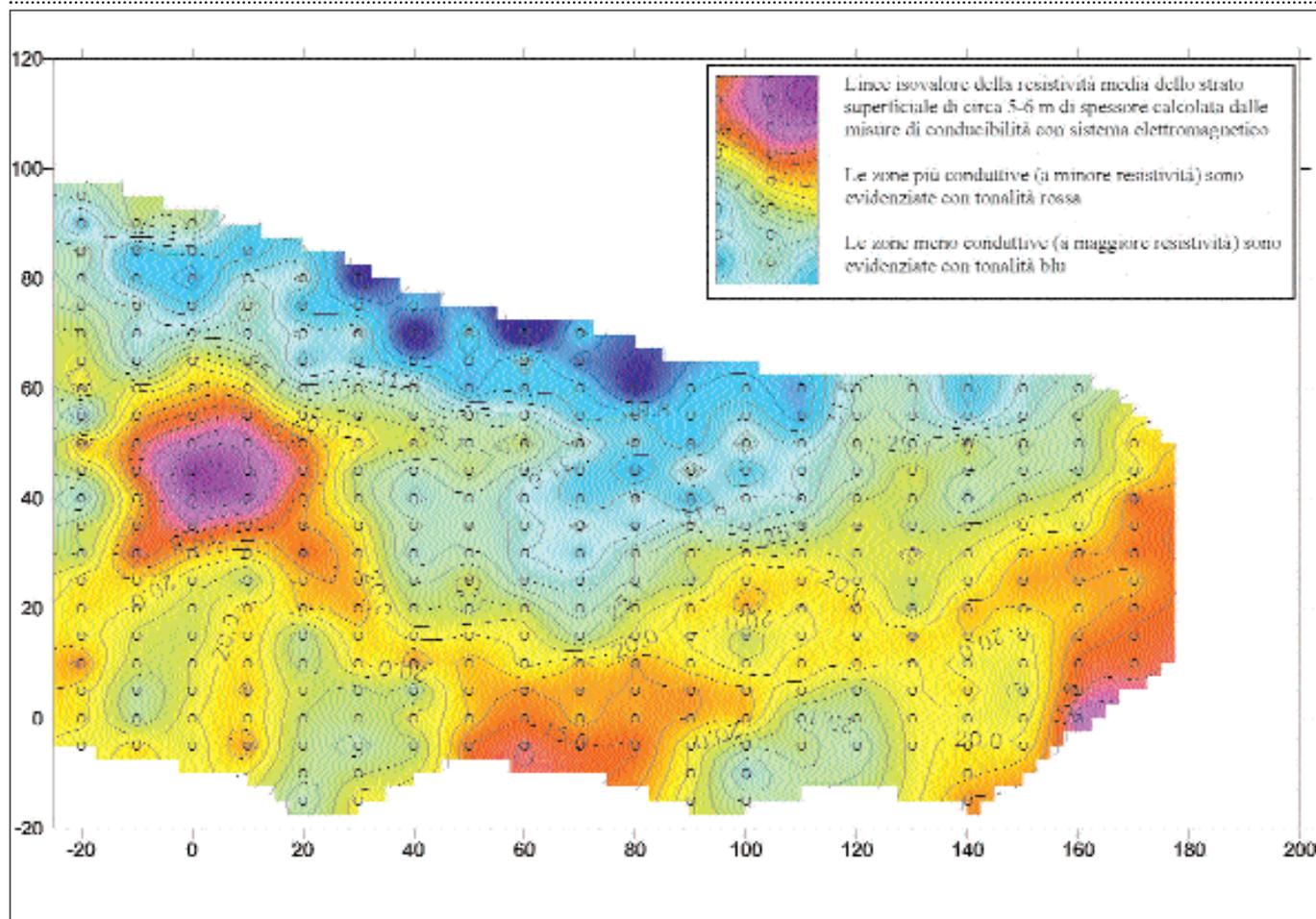


Fig.5 - Carta delle resistività.

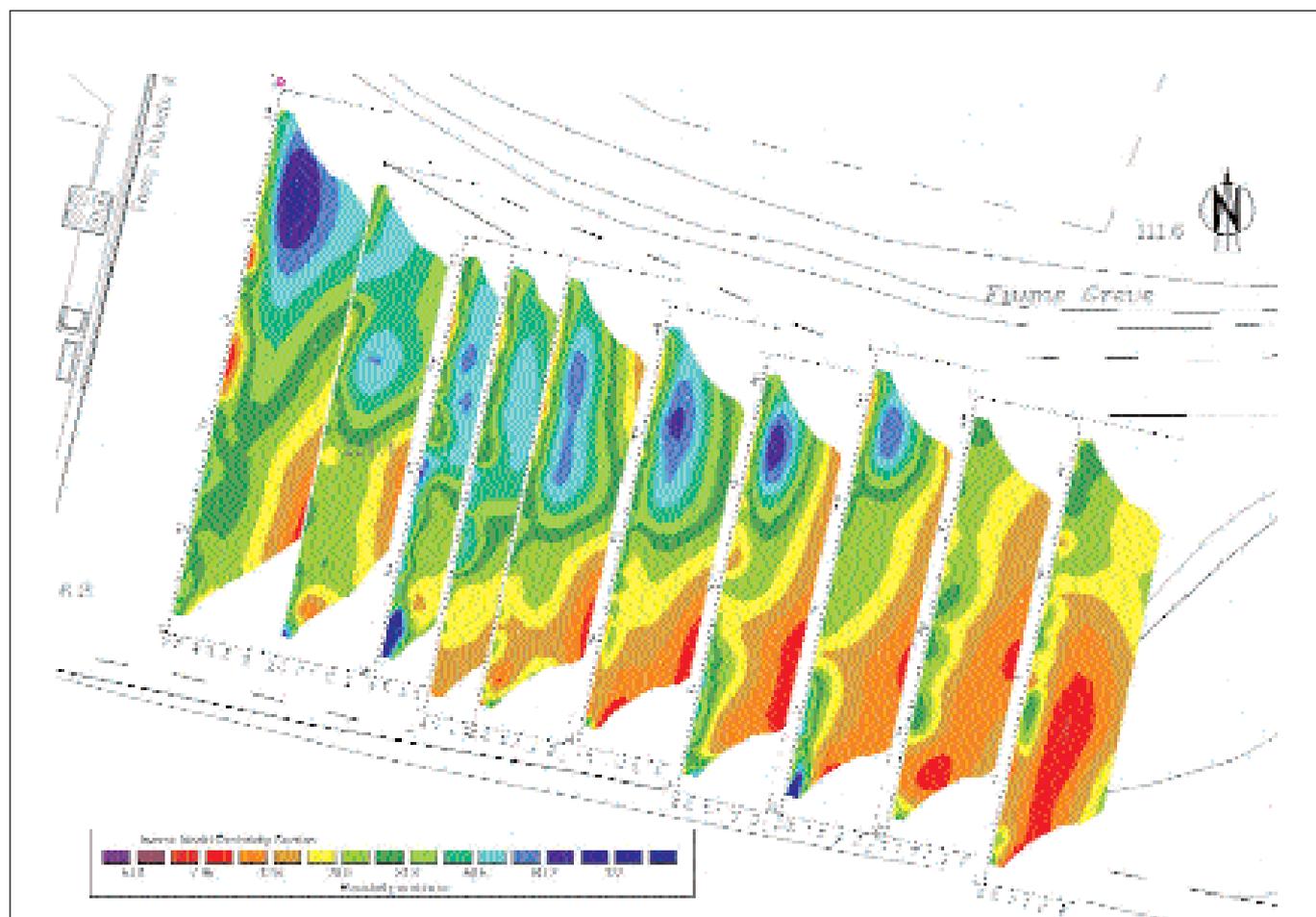


Fig.6 - Risultati dell'indagine di tomografia elettrica (valori di resistività).

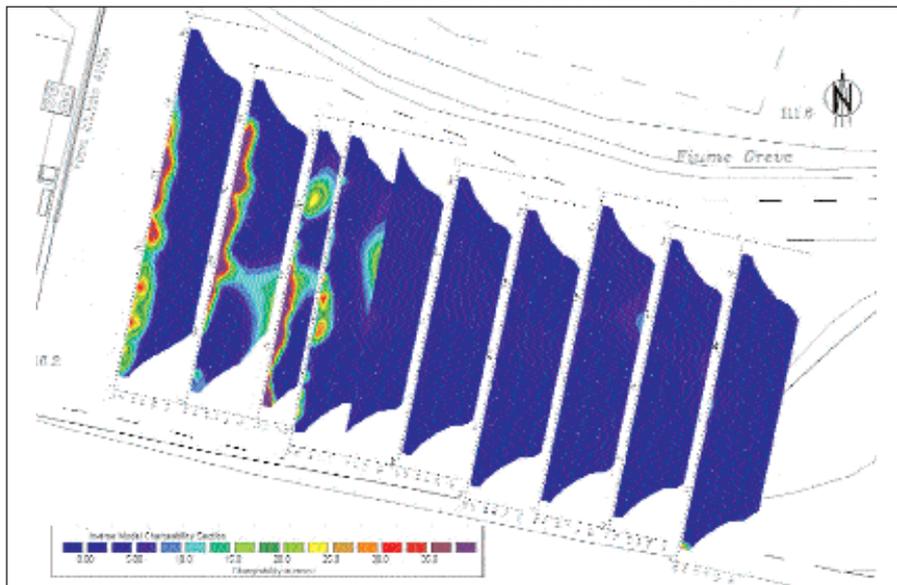


Fig. 7 - Risultati dell'indagine di tomografia elettrica (valori di caricabilità).

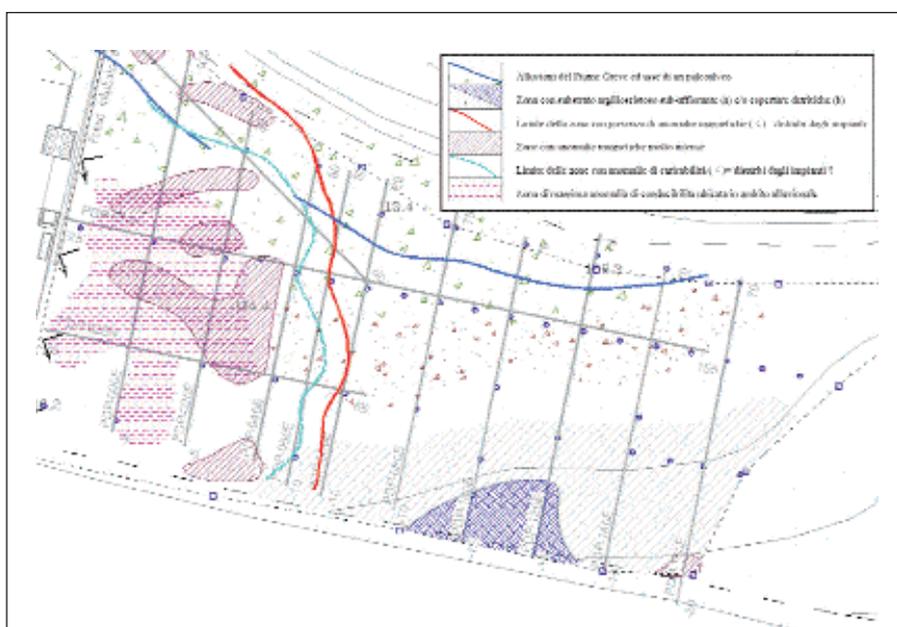


Fig. 8 - Carta di sintesi delle risultanze geofisiche.

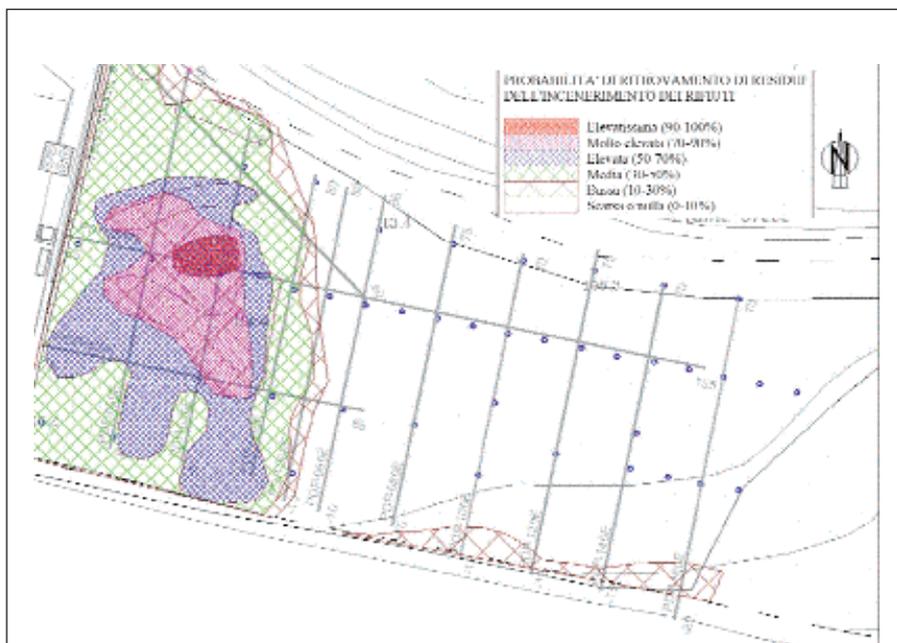


Fig. 9 - Carta della probabilità di ritrovamento dei rifiuti.

lie che possono avere una plausibile spiegazione con la presenza di disturbi prodotti dall'impianto stesso. Tuttavia si deve segnalare che una marcata anomalia di caricabilità è stata individuata lungo il profilo 110N (il più vicino al Fiume Greve) dove, oltre ai suddetti disturbi si potrebbero ipotizzare anche altre cause: il rifacimento di un tratto di sponda del Fiume, il possibile tracciato di una antica strada, e, non ultima, la presenza di materiali residui dell'attività dell'inceneritore. Purtroppo in questa zona non è stato possibile effettuare i rilievi con tutti i metodi, per cui l'interpretazione di questa anomalia è più dubbia.

e) Nella Fig. 9 si è riportata una valutazione probabilistica della presenza dei materiali residui dell'inceneritore, in base alla ricorrenza o meno di segnali anomali. Sulla base di queste valutazioni si ritiene che il piano di caratterizzazione debba prevedere una maggiore densità di accertamenti diretti nella zona occidentale, dove le probabilità sono stimate oltre il 30%. Nelle zone con probabilità compresa tra il 10 ed il 30% eventuali verifiche potranno escludere definitivamente la presenza di materiali scaricati. Per le aree in cui la probabilità è inferiore al 10%, eventuali verifiche dirette avranno solo la finalità di controllo dell'affidabilità dei metodi geofisici applicati.

## CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dai metodi geofisici applicati, tenendo conto della ricorrenza delle varie anomalie, hanno permesso di delimitare una zona di massima probabilità di presenza dei residui ed altre zone con probabilità via via decrescente, fino a ridurre, rispetto ai 18.000 mq iniziali, a soli 8.000 mq la superficie dove la probabilità supera il 30%.

Sulla base delle successive verifiche dirette, costituite da sondaggi geognostici e da trincee esplorative, l'area di intervento per la bonifica del sito è stata definitivamente delimitata per uno sviluppo di circa 7.500 mq; al di fuori della stessa è stata altresì accertata l'assenza di residui potenzialmente inquinanti, confermando la validità delle indicazioni fornite dalle indagini indirette effettuate con i vari metodi geofisici.

## BIBLIOGRAFIA

- MCNEILL J.D. (1980) - EM 34-3 SURVEY INTERPRETATION TECHNIQUES. TECHNICAL NOTE TN-8, GEONICS LIMITED.
- MCNEILL J.D. (1980) - ELECTROMAGNETIC TERRAIN CONDUCTIVITY MEASUREMENT AT LOW INDUCTION NUMBERS. TECHNICAL NOTE TN-6, GEONICS LIMITED.
- LOKE M. H. (1999) - RAPID 2D RESISTIVITY AND IP INVERSION USING THE LEAST-SQUARES METHOD. NOTE DEL PROGRAMMA RES2DINV VER. 3.41.
- LOKE M.H., BARKER R.D. (1996) - RAPID LEAST-SQUARES INVERSION OF APPARENT RESISTIVITY PSEUDOSECTION USING A QUASI-NEWTON METHOD. GEOPHYSICAL PROSPECTING, 44, 131-152.
- LOKE M.H., BARKER R.D. (1996) - PRATICAL TECHNIQUES FOR 3D RESISTIVITY SURVEYS AND DATA INVERSION. GEOPHYSICAL PROSPECTING, 44.