

F. Ballerini • G. Censini • G. Gabbiani
A. Gargini • E. Pettinelli • S. Piro

APPLICAZIONI IDROGEOLOGICHE DELLA PROSPEZIONE GEOFISICA PER LA PROTEZIONE DELLE RISORSE IDRICHE: ALCUNI ESEMPI IN TOSCANA

Estratto da:

1
1996 3.1(1996)

QUADERNI DI TECNICHE
DI PROTEZIONE AMBIENTALE



Idrogeologia dei complessi carbonatici
dell'Italia Centrale



Vulnerabilità degli acquiferi



Frane e rischio da frane



Indagini geofisiche e geotecniche



Pitagora Editrice Bologna

Applicazioni idrogeologiche della prospezione geofisica per la protezione delle risorse idriche: alcuni esempi in Toscana

Pierluigi Ballerini⁽¹⁾, *Gianfranco Censini*⁽²⁾, *Giuliano Gabbani*⁽¹⁾,
Alessandro Gargini⁽¹⁾, *Elena Pettinelli*⁽³⁾, *Salvatore Piro*⁽⁴⁾

Riassunto. Nella presente nota vengono descritti i fondamenti di base, le caratteristiche generali della strumentazione e le possibilità applicative in Idrogeologia, particolarmente per la valutazione del grado di protezione degli acquiferi, di alcune tecniche geofisiche di superficie. Fra le tecniche illustrate, ci si sofferma in particolare su quelle venute all'attenzione della pratica idrogeologica in anni abbastanza recenti (polarizzazione indotta, induzione elettromagnetica, georadar); vengono comunque considerate anche quelle ben più note come la misura della resistività e la sismica a rifrazione. La descrizione viene integrata da varie referenze bibliografiche, con particolare attenzione alla risoluzione di problemi applicativi reali. Sono poi commentate alcune ricerche svolte in Toscana dagli autori, in sedimenti od in roccia, in cui sono confrontate le informazioni ottenibili da tecniche diverse.

[Parole chiave: *Geofisica applicata, Vulnerabilità degli acquiferi, Elettromagnetismo, Polarizzazione indotta, Conducibilità idraulica*].

Abstract. *The evaluation of the degree to which aquifers are protected from contamination is one of the most important aspects of applied geology. Of particular importance is the determination of the thickness and the permeability of the aquicludes or aquitards of the shallow*

aquifers cover in alluvial plains. Both this field and the contaminants prospecting in soil and groundwater for remediation, have seen a steady increase in the use of shallow depth geophysical techniques over the past few years. These techniques, which are for the most part electrical and electromagnetic, are used to analyze the hydrostructure of the cover, for the indirect hydrodynamic parametrization of both the cover and the aquifer, and to locate contaminants both in the vadose zone and in the ground water. The use of these techniques is widespread, so widespread that one can already speak of the birth of a new field, environmental geophysics. The obvious advantages offered by geophysical techniques (rapidity of investigation and high spatial resolution of the structures), combined with the considerable degree of sophistication that has been reached by the instruments, frequently lead one to forget the limitations inherent in their use and the need to follow up the geophysical study with a direct geological study that includes a sufficient number of in situ tests and analyses. The present paper describes the basic theory behind some superficial geophysical techniques, the characteristics of the instrumentation, and some of the possible hydrogeological problems to which the techniques can be applied. The authors also discuss some research projects or investigations they have conducted in Tuscany, designed to evaluate the degree of protection of shallow aquifers (in both unconsolidated sediments and rocks). Among the techniques discussed, special attention is paid to those that have only recently come to the attention of the hydrogeologic community (induced polarization, electromagnetic induction, georadar). The authors also discuss the much better known techniques, such as resistivity measurement and seismic refraction. The descriptions are accompanied by an exhaustive bibliography, compiled paying special attention to the description of actual case histories. Of the geoelectrical prospecting techniques, polarization measurement appears to offer

⁽¹⁾ Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.

⁽²⁾ Georisorse Italia s.a.s., Sinalunga (Siena).

⁽³⁾ Università La Sapienza (Roma), Facoltà di Ingegneria; Dipartimento Idraulica, Trasporti e Strade, Area Geofisica.

⁽⁴⁾ Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, ITABC-CNR (Roma).

especially promising new approaches for environmental geology research. In particular, the measurement of polarizability, or time-domain chargeability, combined with a sufficient number of parametric measurements, can be used to analyze the textural characteristics of the cover and to determine the hydrodynamic parameters of both the cover and the aquifers. Electromagnetic induction techniques offer analogous possibilities by the measurement of the electrical conductivity of superficial deposits; these techniques are also useful for the detection of contaminants in both the vadose zone and the ground water. With regards to geological radar, though its usefulness in the field of archaeology and in locating buried objects or structures is obvious, its applicability to hydrogeological problems is still limited, for the most part because of problems that arise in interpreting the data, and because of the absence of conceptual reference models. The paper ends with the descriptions of some actual cases in which the various methods were applied to aquifer protection studies. In addition to a study of electromagnetism and resistivity in an alluvial valley, and a combined seismic and electromagnetic study undertaken to determine the degree of fracturing in a rocky formation, we refer the reader to an interdisciplinary study undertaken in the Val di Pesa (Northern Tuscany) to compare the ability of the various prospecting techniques to carry out the hydrodynamic parametrization of the cover. Resistivity measurement and induced polarization prospecting appeared particularly devoted to this goal; electromagnetic prospecting was especially suited to locating protective horizons in the cover and variations in the transmissivity of the aquifer, while, though the effectiveness of geological radar was limited by the presence of superficial clay layers, it has proven able to locate the position of the water table with a good degree of accuracy.

[Key words: *Applied geophysics, Electromagnetism, Vulnerability, Induced polarization, Hydraulic conductivity*].

1. INTRODUZIONE

Per molto tempo la geofisica di superficie è servita all'idrogeologia soprattutto come supporto per la prospezione e la parametrizzazione di acquiferi, ai fini della ricerca d'acqua; negli anni recenti l'attenzione si è spostata, seguendo quella degli stessi idrogeologi, verso la protezione delle risorse esistenti, con il fine di investigare sia la presenza di inquinanti in falda (**acquifero** oggetto dell'indagine), sia la presenza degli stessi nel non-saturo o il grado di protezione dell'acquifero dall'inquinamento (**copertura** oggetto dell'indagine).

Per quanto concerne l'ultimo aspetto, è ben noto che la caratterizzazione litologica ed idrodinamica

dei terreni di copertura degli acquiferi poco profondi costituisce un obiettivo fondamentale negli studi di protezione delle risorse idriche di sottosuolo; la penuria, la scarsa affidabilità o l'elevato costo di acquisizione di dati idrogeologici diretti, rende sovente assai difficoltosa tale caratterizzazione, conferendo un carattere di approssimazione agli elaborati. Pertanto, l'impiego di tecniche geofisiche può rappresentare un valido supporto al fine di migliorare il grado di risoluzione spaziale delle idrostrutture sepolte, purché siano ben conosciuti i limiti di un tale impiego e la necessità di una continua verifica, tramite taratura rigorosa con i dati geologici diretti (KELLY & MARES, 1992).

Il presente lavoro trae spunto dall'esperienza degli autori nel campo dell'applicazione idrogeologica di alcuni metodi di prospezione geofisica di superficie per la caratterizzazione dei terreni di copertura di acquiferi alluvionali, in relazione alla composizione tessiturale ed alla permeabilità. Vengono commentati i risultati di alcune ricerche sul campo (svolte sia come indagine scientifica che come consulenza professionale) alla luce di considerazioni generali sui fondamenti teorici delle tecniche considerate.

I metodi di prospezione considerati sono quelli più comunemente impiegati nell'ambito dell'idrogeologia ambientale: metodi elettrici (misura della resistività, polarizzazione indotta, induzione), radar (radar geologico) e sismici; fra quelli non considerati nella presente nota, ricordiamo, per la loro utilità in specifiche problematiche di geologia ambientale: la gravimetria e la magnetometria (HINZE, 1992), la *mise-a-la-masse* (ARMANDO et al., 1993), la magneto-tellurica (BUSCH & DUPUIS, 1991; Vozoff, 1991), le indagini elettromagnetiche in bassissima frequenza *VLF* (MCNEILL & LABSON, 1992; ARMANDO et al., 1993; BOZZO et al., 1993) ed i *log* di pozzo (DANIELS & SCOTT KEYS, 1992).

2. PROBLEMATICHE GENERALI

Per un'indagine avente come oggetto il grado di protezione di un acquifero, la finalità principale della prospezione geofisica deve essere il riconoscimento e la ricostruzione dell'idrogeostruttura della copertura. Per idrogeostruttura intendiamo sia la disposizione spaziale ed i rapporti geometrici dei terreni, sia la loro composizione litologico-tessiturale, sia infine la loro attitudine a lasciarsi attraversare dall'acqua (e inquinanti) per infiltrazione.

A causa della sovente situazione di non-saturazione in cui tali terreni si vengono a trovare, e della

conseguente estrema variabilità spazio-temporale delle proprietà fisiche relative al sistema complesso «matrice solida-acqua-soluto-aria», la interpretazione delle prove geofisiche è resa più problematica e si fa ancor più forte l'esigenza di una taratura accurata con dati diretti.

La procedura di studio corretta è la seguente: si parte dal **dato geofisico grezzo** (proprietà fisica apparente frutto dell'integrazione dei contributi dei vari livelli investigati), si arriva tramite l'*interpretazione geofisica* al **parametro geofisico vero** rappresentativo di una unità idrogeologica a sè indipendente e, finalmente, tramite *interpretazione idrogeologica* si determina indirettamente il **parametro idrogeologico** di interesse (spessore, tessitura, porosità, permeabilità, concentrazione di contaminante etc.). Ovviamente, la determinazione finale ha sovente il valore di una stima di massima del valore desiderato, stima che però, inquadrata in una rete sufficientemente densa di dati diretti, permette di aumentare notevolmente il *potere risolvete* dell'indagine (MAZAC et al., 1989; KELLY & MARES, 1992).

Qui di seguito passeremo in rassegna i principi di base delle tecniche geofisiche considerate, soffermandoci in particolare su quelle in genere meno conosciute o utilizzate; verranno brevemente considerate le possibilità di applicazione nel campo dell'idrogeologia ambientale, sia per quanto concerne la protezione degli acquiferi sia l'individuazione di varie tipologie di contaminanti nella zona non-satura ed in falda; quest'ultimo aspetto ha un grande interesse per gli interventi di emergenza idrogeologica: detezione di *plume* inquinanti nel sottosuolo o di rifiuti abusivi sepolti, ottimizzazione delle reti di monitoraggio e/o bonifica di inquinamenti in atto etc. (BERETTA, 1992).

Nella seconda parte della nota verranno presentati casi reali di indagine, con riferimento esclusivo al problema della valutazione del grado di protezione degli acquiferi.

PARTE PRIMA

3. METODI ELETTRICI

I metodi elettrici qui presi in esame sono: **misura della resistività (R)**, **polarizzazione indotta (IP)** ed **induzione elettromagnetica (EM)**; anche quest'ultimo viene inserito fra i metodi elettrici, dato che sfrutta sostanzialmente la attitudine di condurre corrente elettrica da parte dei terreni, seppur indotta. Per una trattazione esauriente delle varie metodologie

rimandiamo ai testi specializzati (MARES, 1984; PARASNIS, 1986; MILSON, 1989; TELFORD et al., 1990; WARD, 1992).

3.1. Metodo della resistività

È il metodo geofisico più comunemente impiegato nella prospezione idrogeologica; riteniamo superfluo accennare, in questa sede, ai fondamenti teorici, universalmente noti (CARRARA et al., 1992). Ricordiamo che la resistività dei mezzi porosi è grandemente controllata dalla quantità di acqua nei pori, dalla porosità, dalla concentrazione dei solidi disciolti nella soluzione interstiziale e dalla tessitura; per quanto riguarda quest'ultima, il tenore e la composizione mineralogica dei minerali argillosi costituiscono il fattore di controllo principale (MCNEILL, 1980; WARD & FRASER, 1992).

Nel caso dei depositi macroclastici acquiferi saturi, la resistività del mezzo poroso è influenzata da quella del fluido attraverso la mediazione della sola porosità; tale legame può essere spiegato da relazioni analitiche semplici quali la *legge di Archie* (ARCHIE, 1942). La relazione è valida per macroclastiti, ma sono conosciute anche correlazioni valide per acquiferi con matrice (WORTHINGTON, 1976; KELLY & MARES, 1992). Sono riportate anche correlazioni fra la resistività e la composizione tessiturale, effettuate confrontando le interpretazioni di S.E.V. con le stratigrafie di sondaggi contigui (KOSINSKI & KELLY, 1981).

Nel caso dei depositi a dominante fine, invece, a causa del maggior numero di fattori che concorrono a determinare la relazione, non sono impiegabili leggi analitiche ma solo correlazioni empiriche di valore locale. Il passaggio della corrente tende a divenire un fenomeno di interfaccia (*surface conductance effect*), da fenomeno di volume (dei pori) che era nel mezzo poroso macroclastico, ed il contenuto di minerali argillosi diviene il principale parametro di controllo; è possibile mettere in relazione variazioni areali del valore di resistività con la variazione delle caratteristiche tessiturali del terreno di copertura (DE MOOR & DE BREUCK, 1976; OLSON & DOOLITTLE, 1985).

Un'interessante applicazione della prospezione elettrica (sia per quanto concerne le misure di resistività sia per quelle di polarizzazione indotta che verranno considerate più avanti) e quello della **parametrizzazione idrogeologica** dei sedimenti a porosità di interstizi, cioè della possibilità di derivare indirettamente grandezze quali la *permeabilità* ed il *tempo di infiltrazione per avvezione di un soluto conservativo* (in condizioni sature o non-sature) a

partire dalle proprietà elettriche, tramite correlazioni empiriche (ALESSANDRIELLO & LEMOINE, 1983; MAZAC et al., 1990; KELLY & MARES, 1992; KALINSKI et al., 1993). Storicamente, tale campo di ricerca ha avuto l'acquifero come oggetto di studio principale, con risultati non sempre convincenti (MAZAC et al., 1985); le particolari proprietà fisiche dei mezzi porosi a grana fine (conduzione elettrica di interfaccia controllata dalla tessitura ed effetti sulla resistività delle variazioni di contenuto d'acqua minori rispetto a quanto osservabile in depositi a dominante macroclastica) sembrano, invece, più consone per la costruzione di curve di correlazione di valore locale, con applicazioni interessanti nel campo della protezione degli acquiferi (GABBANI et al., 1990; KALINSKI et al., 1993) o di studio delle potenzialità di ricarica artificiale (CURTIS & KELLY, 1990).

Le suddette applicazioni, peraltro, possono risultare utili solo se inquadrare nei loro giusti limiti e quindi avere come obiettivo una stima di massima dell'ordine di grandezza del tempo d'arrivo o della ricarica o della valutazione della distribuzione spaziale dei medesimi; ad esempio al fine di individuare, in via preliminare, dei siti dove effettuare delle misure precise e dirette dei parametri di interesse. Fra i vari esempi di correlazione presenti in letteratura, ricordiamo quello fra conduttanza longitudinale e tempo di infiltrazione verticale (HENRIET, 1976) o fra conducibilità idraulica *satura* e resistività (GARGINI, 1994); da ricordare, anche se non ricadente nei metodi elettrici, la relazione fra gradiente geotermico e coefficiente di permeabilità mostrata da KELLY & MARES (1992). Nella seconda parte verrà considerato un esempio reale di applicazione della parametrizzazione idrogeologica.

Per quanto concerne la **detezione di contaminanti** nel sottosuolo, tutto è legato a come l'inquinante è in grado di far variare le proprietà elettriche della zona non-satura o della falda, se contaminate. Liquidi contaminanti come il percolato da discariche sono sovente altamente conduttivi e quindi in grado di generare anomalie di resistività ben evidenti (STOLLAR & ROUX, 1975; URISH, 1983; ZONGE et al., 1985; FOUNTAIN, 1986; BUSELLI et al., 1988); ed ancora, è nota la relazione fra concentrazione di spandimento di alcuni pesticidi e resistività della soluzione (CHUDACEK et al., 1982). Le complicazioni maggiori si hanno nella prospezione della zona non-satura, dove si può individuare qualche anomalia solo se il contributo fornito dal «mezzo inquinante» sovrasta nettamente il campo di variazione ragionevole degli altri. Per una revisione della capacità dei metodi geofisici di individuare vari tipi di inquinanti

nel terreno ed in falda, rimandiamo a KELLY & MARES (1992).

Va ricordato, comunque, che non tutti gli inquinanti in falda determinano anomalie negative di resistività; nel caso di inquinanti organici non solubili (*NAPL*), se fluenti in fase indipendente, vi è un aumento locale del valore di resistività (MAZAC et al., 1992). Da BENSON (1992) sono state trovate buone correlazioni fra zone a maggiore resistività e contenuto di *NAPL* in falda.

Nella prospezione geoelettrica di *plume* inquinanti, è comunque preferibile operare un monitoraggio nel tempo delle anomalie piuttosto che avvalersi di misure *una tantum* (MAZAC et al., 1989), per svincolarsi dall'effetto della componente idrogeologica (ad esempio presenza di livelli argillosi conduttivi).

3.2. Metodo della polarizzazione indotta

Fondamento teorico: se si energizza il terreno con corrente continua **I** attraverso 2 picchetti di corrente **A** e **B** e si interrompe improvvisamente l'immissione di corrente, si può osservare che la differenza di potenziale ΔV misurata fra due elettrodi di misura **M** e **N** non cade istantaneamente a zero, ma, dopo una caduta brusca iniziale, diminuisce gradualmente in modo tale che per un intervallo di tempo variabile assume valori non nulli (fig. 1); tale fenomeno di rilassamento del potenziale è detto **polarizzazione indotta**. Il fenomeno fu notato da SCHLUMBERGER un po' prima del 1920 ma fu iniziata una sistematica applicazione circa dal 1948.

Il fenomeno può essere studiato sia nel dominio del tempo (*time-domain*), come nel caso di fig. 1, che nel dominio della frequenza (*frequency-domain*); in quest'ultimo caso viene studiata la variazione della resistività al variare della frequenza della corrente immessa. Nel dominio del tempo è assimilabile alla scarica di un condensatore, nel dominio della frequenza alla variazione di impedenza di un circuito *RC* (BERTIN & LOEB, 1976; WARD, 1992).

Nel dominio del tempo, il fenomeno può essere quantificato da vari parametri. Fra i più usati abbiamo: la **polarizzabilità apparente** η (espressa in *millivolt per volt* o in %), pari al rapporto fra il potenziale residuo dopo un dato tempo t_i ed il potenziale immesso; la **caricabilità** (espressa in *millivoltsecondo per volt* o, semplificando, in *millisecondi*) pari al valore dell'area sottesa dalla curva di rilassamento del potenziale e normalizzata rispetto al potenziale di energizzazione a regime (fig. 1).

Nel dominio della frequenza si misura la resistività apparente a 2 frequenze (**F** e **f**). La polarizzazione

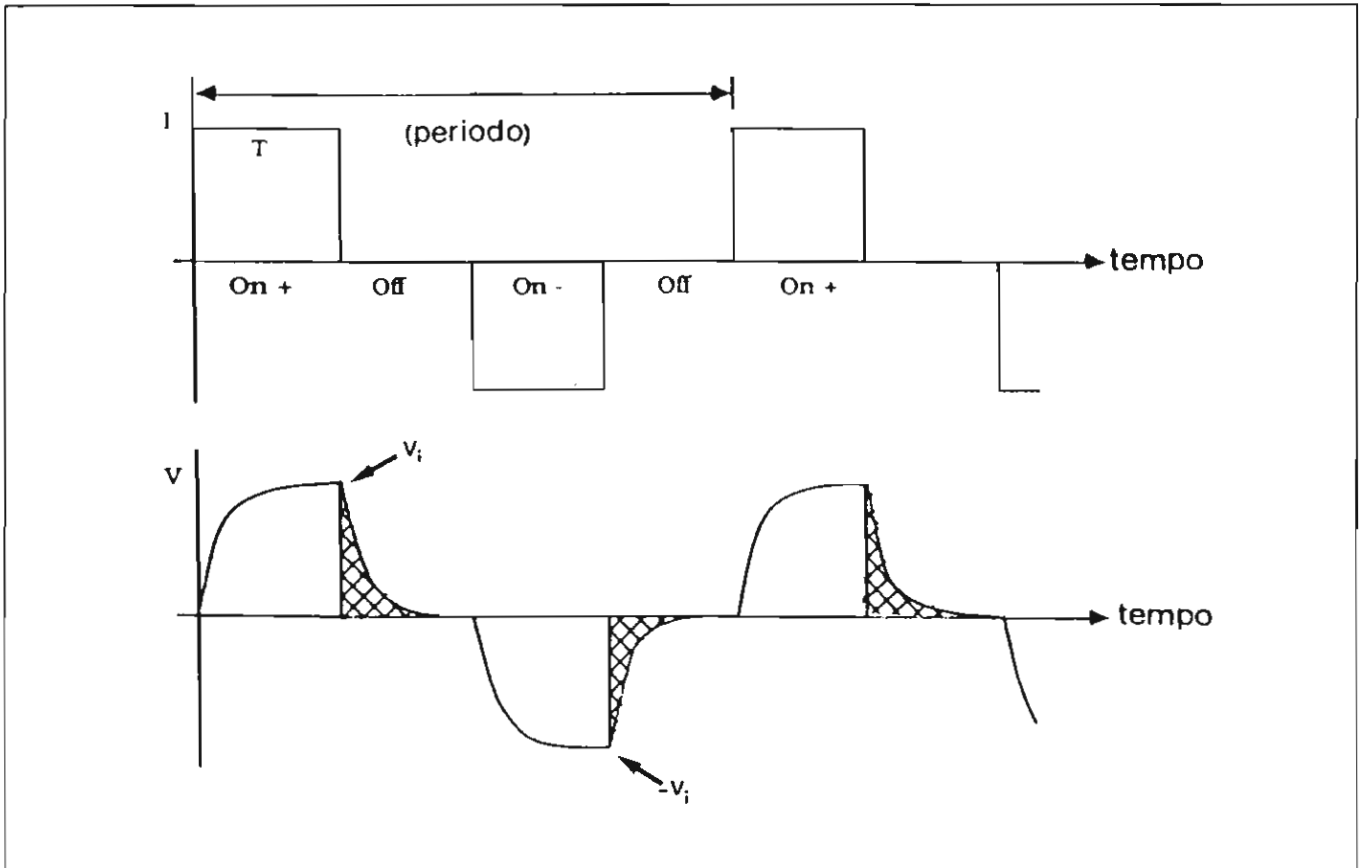


Figura 1. Impulso energizzante sotto forma di onda quadra alternata (in alto) e segnale ricevuto (in basso) nelle misure di IP nel dominio del tempo; T = tempo di energizzazione, V_i = potenziale di energizzazione a regime; il tratteggio indica l'area sottesa dalla curva di caduta del potenziale (da WARD, 1992; modificato).

Figure 1. Input pulse as alternating square wave (above) and received signal (below) in time-domain IP prospecting; T = time length of current immission, V_i = steady-state immission potential; areas with crossed diagonal lines are bordered upward by the potential relaxation curve (by WARD, 1992; modified).

indotta e espressa come $[(\rho_r - \rho_f)/\rho_r]$; si può esprimere come cambio percentuale rispetto a ρ_r . Generalmente f è nel range 0.05-0.5 Hz e F nel range 1-10 Hz.

Le misure di polarizzazione indotta vengono effettuate con la stessa tecnica delle misure di resistività (spesso, disponendo della strumentazione opportuna, possono essere effettuate contemporaneamente), quindi sia come *S.E.V.* sia come profili sia come mappe.

Origine del fenomeno: i maggiori effetti di polarizzazione indotta misurati nelle rocce sono spiegabili con il fenomeno detto della polarizzazione metallica (o elettronica o di elettrodo), dovuta all'azione esercitata da minerali metallici dispersi nella massa rocciosa; ciò spiega il perché il metodo sia stato sistematicamente utilizzato con successo nel campo minerario, per la ricerca di giacimenti metallici disseminati, a partire dal 1960.

Nel campo dell'applicazione idrogeologica, interessa la cosiddetta **polarizzazione di membrana**

(o non-metallica o elettrolitica), dovuta all'azione esercitata dai minerali argillosi; la superficie delle particelle argillose (sui bordi o sulle facce di clivaggio) ha cariche negative non bilanciate che attraggono una nuvola di ioni positivi dall'elettrolita circostante. Lo strato ionico così formato esercita il ruolo di una sorta di membrana che previene il movimento di ioni durante il flusso elettrico; in pratica, gli ioni negativi sono bloccati formando zone di concentrazione ionica di segno opposto agli estremi dei microdomini di mezzo poroso in cui c'è maggiore concentrazione di colloidali (fig. 2). Il ritorno di questi ioni ad una distribuzione di equilibrio, dopo che la corrente è cessata, costituisce una corrente residuale che rende conto degli effetti di polarizzazione (ANGORAN & MADDEN, 1977; WARD & FRASER, 1992).

Le anomalie di polarizzazione di origine puramente elettrolitica sono assai meno intense di quelle di origine metallica, ricadendo praticamente nel range del rumore di fondo nelle misure di quest'ultima. Il problema dello scarso sviluppo della polarizzazione

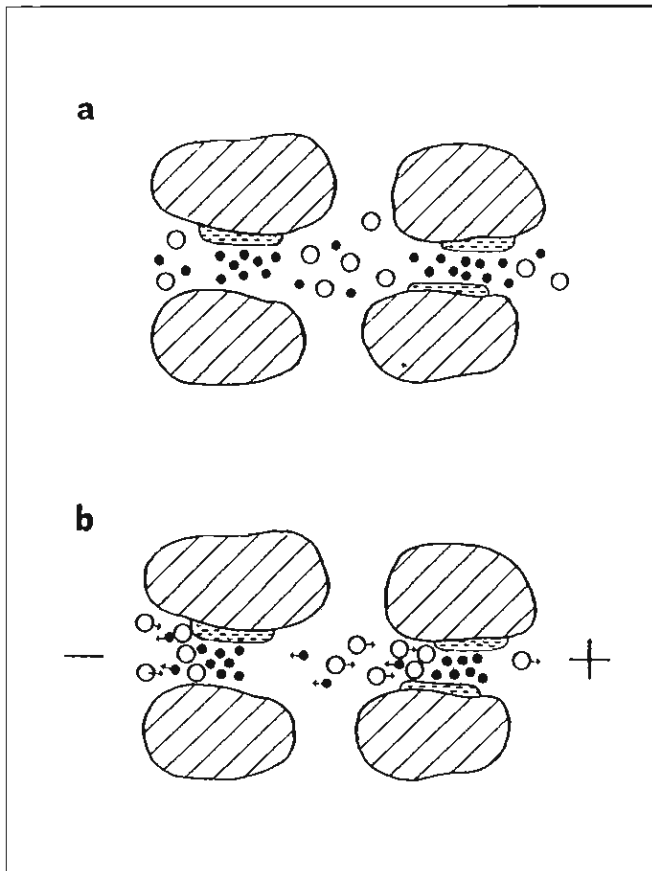


Figura 2. La polarizzazione di membrana in un mezzo poroso continuo; a) prima dell'energizzazione; b) dopo l'energizzazione. I cerchietti neri pieni sono cationi, quelli vuoti sono anioni; prima dell'energizzazione i cationi sono addensati in prossimità delle particelle argillose, dopo l'energizzazione i cationi addensati formano una sorta di barriera alla migrazione degli anioni; si creano pertanto delle zone rispettivamente di deficienza e di concentrazione ionica (da WARD & FRASER, 1992; modificato).

Figure 2. Membrane polarization in a continuous porous medium; a) Preceding current immission; b) Following current immission. Black dots are cations, empty circles are anions; before the current immission cations are more densely distributed near clayey particles, so afterward cations act as a barrier in respect to the migration of the anions; dominions with respectively deficiency or crowding of ionic charges form (by WARD & FRASER, 1992; modified).

indotta al di fuori del settore minerario è infatti dovuto al bassissimo rapporto segnale su rumore in depositi non metallici.

Solo negli ultimi anni, grazie all'aumentata sensibilità di misura della strumentazione da campagna disponibile, anche la misura della polarizzazione di membrana ha dischiuso interessanti potenzialità applicative.

Applicazioni: la prospezione di polarizzazione indotta è sensibile alla dispersione di un mezzo conduttivo senza continuità elettrica entro una matrice relativamente isolante; i vari domini conduttivi disseminati agiscono come tanti piccoli condensatori, fornendo così l'effetto capacitivo. Dato che il metodo della resistività e quello dell'elettromagnetismo registrano solo la presenza di corpi conduttivi estesi con continuità elettrica, le informazioni fornite dalla IP sono integrative a quelle ottenibili con gli altri due metodi (OGILVI & KUZMINA, 1972).

Un interessante esempio di applicazione è mostrato in BERTIN & LOEB (1976), dove, entro un deposito superficiale di ghiaie e sabbie, viene identificata una lente di ghiaie ricche di matrice argillosa che mostrano una evidente anomalia di polarizzazione indotta non segnalata assolutamente dalle misure di resistività; la finalità del lavoro era quella di individuare aree idonee alla ricarica artificiale. Altre possibilità applicative delle misure di polarizzazione indotta nel campo della **individuazione di sedimenti a differente tessitura** sono illustrate in OGILVI & KUZMINA (1972) e KELLY & MARES (1992).

Anche la polarizzazione indotta sembra avere buone possibilità di applicazione per quanto concerne la **parametrizzazione idrogeologica**; in particolare appare interessante la possibilità di correlare la caricabilità con le caratteristiche tessiturali e la permeabilità. I dati a disposizione, comunque, sono ancora troppo scarsi per arrivare a delle conclusioni definitive. In particolare il metodo sembra indicato per la individuazione di anomalie di permeabilità nell'ambito di terreni superficiali macroclastici con variabile percentuale di matrice fine (MAZAC et al., 1989; BALLERINI et al., 1995).

Sono note applicazioni del metodo per la **prospezione di discariche**, sia per la delimitazione del corpo dei rifiuti sia per la individuazione delle zone contaminate da percolato o di accumulo di bio-gas (ARMANDO et al., 1993; ILICETO et al., 1993), ed anche per l'**individuazione di idrocarburi** (TOWLE et al., 1985; STEMBERG & OEHLER, 1990). Per quanto concerne la individuazione di oggetti sepolti, vi è la possibilità di individuare corpi metallici (rottami, bidoni), data l'anomalia di polarizzabilità che forniscono.

3.3. Metodo elettromagnetico

Sotto la denominazione di metodi elettromagnetici sono comprese un vasto numero di tecniche assai usate per mappare le variazioni della conduttività elettrica nei terreni superficiali. Per una completa trattazione delle varie metodologie, con descrizione

di applicazioni nel campo della idrogeologia ambientale, rimandiamo a: SPIES & FRISCHKNECHT, 1991; WEST & MACNAE, 1991; McNEILL, 1992.

La differenza di potenziale indotta nel terreno facendo variare delle correnti elettriche (*principio dell'induzione*) costituisce un «rumore» per le prospezioni in corrente continua ma può essere usata direttamente per la prospezione di materiali conduttori.

Fondamento teorico: un campo elettromagnetico che varia nel tempo, tramite il passaggio di corrente alternata o impulsiva in una bobina trasmittente, induce correnti elettromagnetiche di bassa intensità nel terreno in modo tale che la loro ampiezza è linearmente proporzionale alla conduttività del medesimo. La bobina ricevente, posta a distanza dalla trasmittente, riceve sia il campo magnetico primario che quello secondario; il campo magnetico secondario è una funzione della spaziatura fra le bobine, della frequenza di energizzazione e della conduttività del terreno. In sostanza si può dimostrare che il semplice rapporto fra campo elettrico secondario e primario è proporzionale alla conduttività del terreno.

Le configurazioni strumentali possibili sono assai numerose; nelle figg. 3, 4, 5 è mostrata la disposizione della strumentazione impiegata per le ricerche presentate nella presente nota, disposizione convenzionalmente definita *SLINGRAM* (trasmittente e ricevente mobili a distanza costante). La profondità d'investigazione e funzione della distanza fra bobina trasmittente e ricevente (*intercoil*) e della posizione delle antenne. Nelle ricerche di seguito presentate è stata impiegata la sonda *Geonics EM-34*, con una profondità d'investigazione variabile fra 7,5 e 60 m.

Le informazioni ottenute con una prospezione **EM** sono le stesse ottenibili con una prospezione geoelettrica in corrente continua; le frequenze impiegate sono sufficientemente basse da non determinare un cambiamento sostanziale dei valori ottenuti rispetto a quelli misurati in corrente continua. L'enorme vantaggio è che, non essendoci un contatto diretto fra strumentazione e terreno, la prospezione è assai più rapida e permette di investigare ampie superfici con alta densità di punti misura; inoltre, la mancanza di contatto diretto permette di eseguire misure anche in quei casi in cui la elevata resistenza di contatto degli elettrodi con il terreno falserebbe i

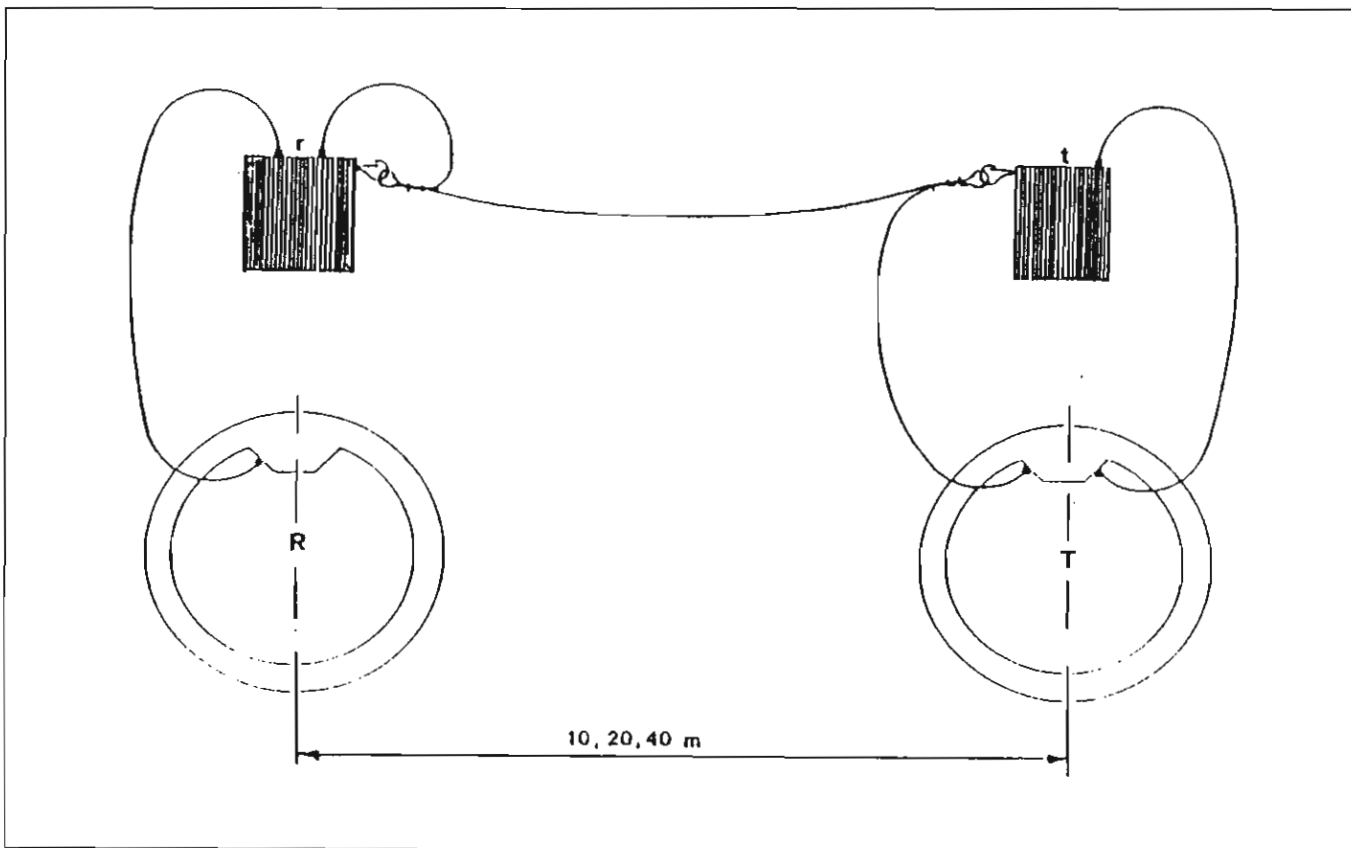


Figura 3. Schema di configurazione del conduttivimetro di campagna Geonics EM-34; R = bobina ricevente, T = bobina trasmittente, r = ricevitore, t = trasmettitore.

Figure 3. Configuration of terrain conductivity meter Geonics EM-34; R = receiving coil; T = transmitting coil; r = receiver; t = transmitter.



Figura 4. Operatore con sonda Geonics EM-34 (bobina ricevente e ricevitore).

Figure 4. Operator with terrain conductivity meter Geonics EM-34 (receiving coil and receiver).

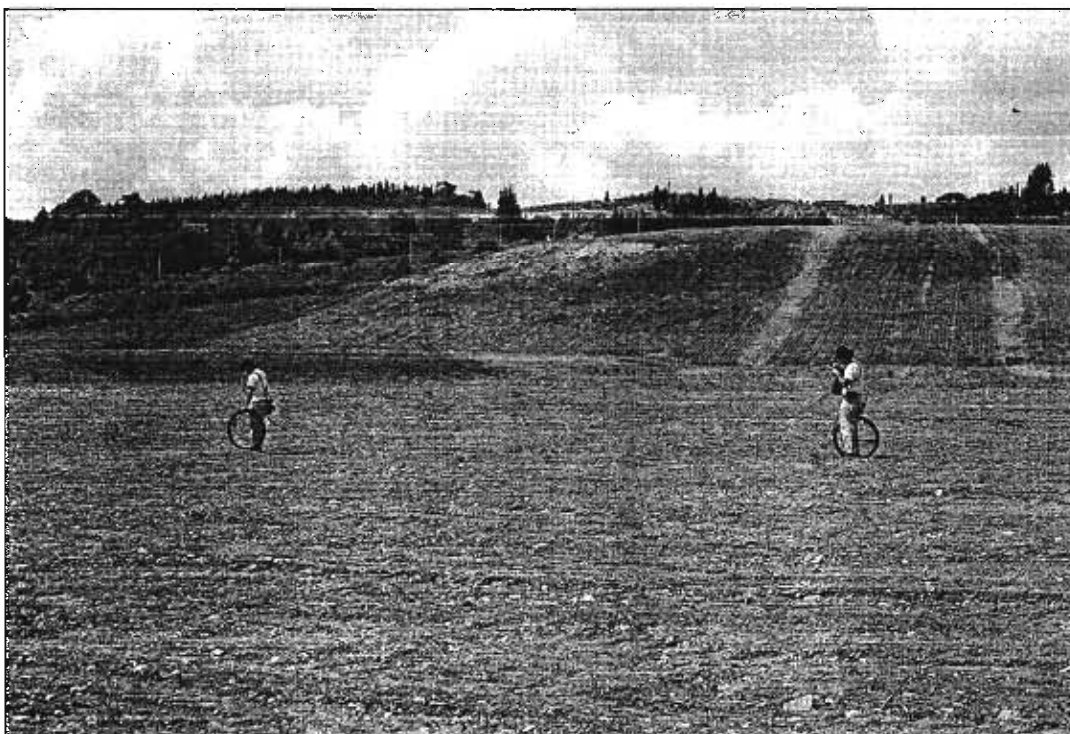


Figura 5. Indagine EM sul campo con la configurazione illustrata in fig. 3 (loc. Cerbaia, Firenze).

Figure 5. EM prospecting with the configuration shown in fig. 3 (loc. Cerbaia, Firenze).

risultati (aree aride, superfici rocciose affioranti etc.).

Il maggior limite è la scarsa o assente penetrazione del segnale in presenza di uno strato superficiale conduttivo.

Applicazioni: la possibilità di **individuare depositi superficiali a differente conduttività**, permette di rilevare la presenza di sedimenti limo-argillosi (conduttivi) o sabbioso-ghiaiosi (resistivi), con sicure ricadute nell'ambito della valutazione del grado di protezione degli acquiferi.

La prospezione è ovviamente sensibile a variazioni di salinità del terreno o di falde superficiali; per tale motivo vi è la possibilità di **individuare plume** sia nel non-saturo che in falda (GREENHOUSE & SLAINE, 1983; SNELGROVE; 1986) o comunque masse generatrici di anomalie di conduttività elettrica fra cui **rifiuti ed oggetti metallici** (BOZZO et al., 1993); la possibilità di fare investigazioni con differenti distanze inter-bobina permette di individuare la presenza di *plume* a diverse profondità.

4. METODI SISMICI

Si accenna per completezza ai soli metodi a rifrazione, dato che quelli a riflessione non sono molto indicati per la prospezione di terreni assai vicini alla superficie, quale è quella riguardante il grado di protezione degli acquiferi. Hanno comunque notevoli potenzialità applicative nel campo idrogeologico, anche se particolarmente sul versante della prospezione d'acqua. Per quanto concerne i

fondamenti teorici, sufficientemente noti, rimandiamo a SJOGREN (1984).

Si riscontra un'utilità di applicazione idrogeologica di tipo generale, nei casi in cui ci sia da definire l'andamento della superficie di discontinuità tra un terreno superficiale più lento (ad esempio alluvioni) ed un substrato più veloce (formazioni litoidi compatte ed impermeabili) oppure si debba individuare una fascia di fratturazione, sede preferenziale di circolazione idrica, nell'ambito di una formazione compatta.

5. RADAR GEOLOGICO

Il radar geologico (GPR, *Ground Probing Radar*) è uno strumento elettromagnetico finalizzato all'individuazione di discontinuità localizzate (oggetti sepolti) od estese (stratificazioni) nel sottosuolo (fig. 6).

Il primo tentativo di individuare la presenza di oggetti metallici sepolti utilizzando segnali elettromagnetici risale al 1904, mentre di poco posteriore è la descrizione della metodologia utilizzata (differente da quella convenzionalmente utilizzata oggi). Intorno alla metà degli anni '20 si scoprì che tale metodologia poteva individuare non solo l'esistenza di oggetti conduttori ma di qualsiasi contatto di tipo dielettrico presente nel sottosuolo (per contatto di tipo dielettrico si intende una superficie di separazione fra mezzi a differente capacità isolante nei confronti di una corrente).



Figura 6. Radar geologico OYO a slitta, durante una prospezione in località Cerbaia (Fi).

Figure 6. Ground Probing Radar OYO (sled type) (loc. Cerbaia, Firenze).

Negli ultimi 55 anni tale metodologia ha avuto un notevole sviluppo sia sotto il profilo tecnologico-strumentale che sotto quello applicativo; questo sviluppo ha permesso l'individuazione dei suoi campi di applicabilità e dei suoi limiti, offrendo nuove opportunità di indagine nel campo della geologia, dell'ingegneria e delle scienze dell'ambiente.

Fondamento teorico: sotto il profilo concettuale il metodo GPR è del tutto analogo alla sismica a riflessione monocanale. L'individuazione della presenza di discontinuità isolate o della stratificazione si basa sul contrasto delle proprietà fisiche esistente fra l'oggetto in questione ed il mezzo circostante o fra lo strato da individuare e gli strati che lo precedono e lo seguono in una successione continua (DAVIS & ANNAN, 1989).

La strumentazione utilizzata per effettuare questo tipo di prospezione è costituita da un generatore di impulsi elettrici che vengono trasformati in impul-

si elettromagnetici di breve durata (alcuni nanosecondi) da una antenna trasmittente la quale li invia nel terreno; gli echi di tali impulsi provenienti dalle riflessioni avvenute nel sottosuolo vengono ricevuti dalla stessa antenna, o da un'antenna simile alla trasmittente, che li invia ad un ricevitore che li trasforma nuovamente in impulsi elettrici e li invia, a sua volta, ad un oscilloscopio, ove possono essere osservati come singole tracce. Tali tracce possono essere immagazzinate e registrate in forma analogica su supporto magnetico od in forma digitale nella memoria di un computer e successivamente elaborate con opportuni *software* (fig. 7).

Il prodotto finale della prospezione è una pseudo-sezione bidimensionale, simile ad una sismosezione, nella quale le ascisse rappresentano il profilo lungo il quale si è effettuata la prospezione, e le ordinate i tempi di andata e ritorno degli impulsi elettromagnetici riflessi dalle varie discontinuità (fig.

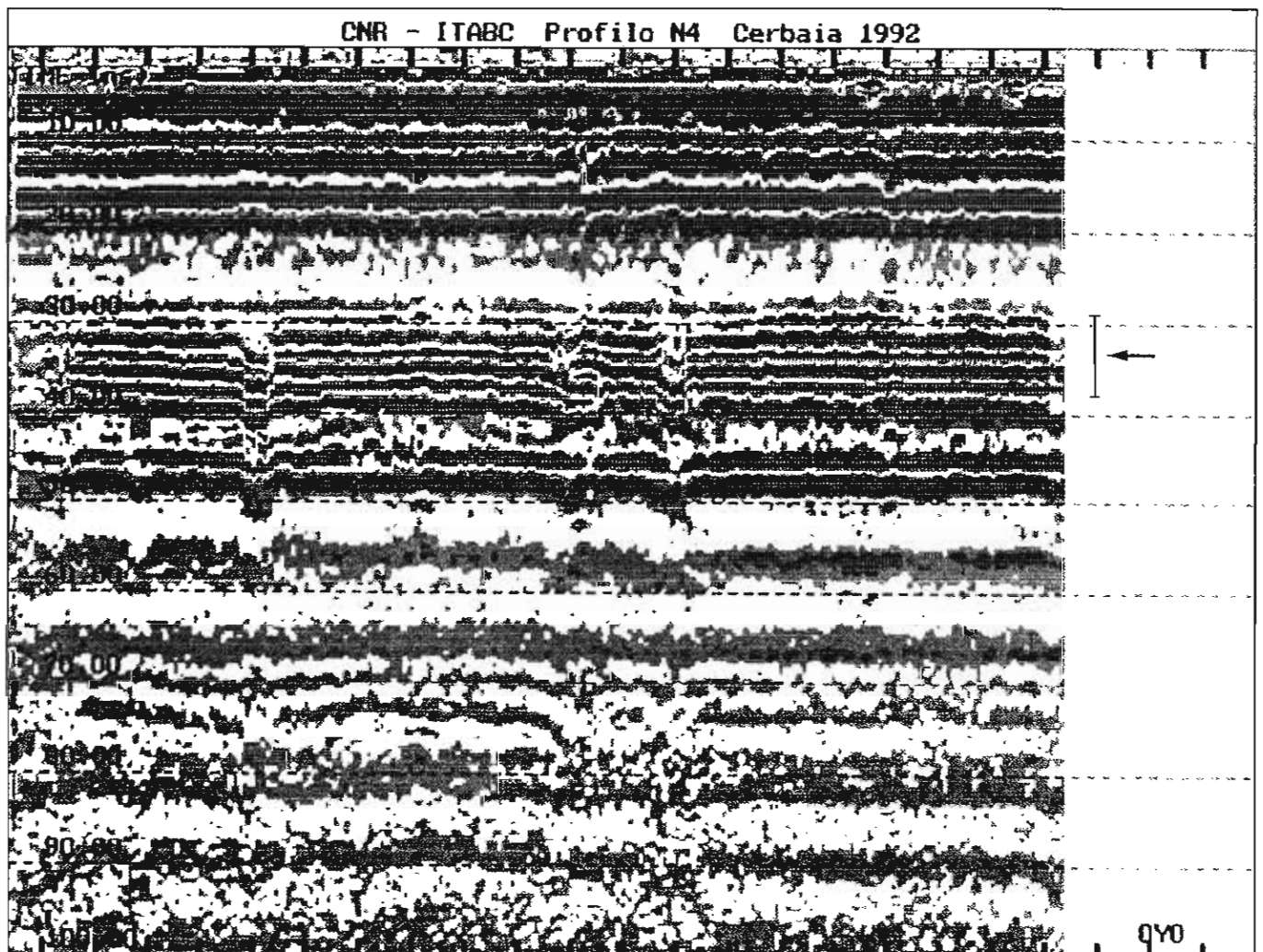


Figura 7. Profilo radar in depositi alluvionali (il range di riflessione indicato dalla freccia corrisponde alla tavola d'acqua).

Figure 7. GPR profile in alluvial deposits (the reflector range marked by the arrow is due to the water-table).

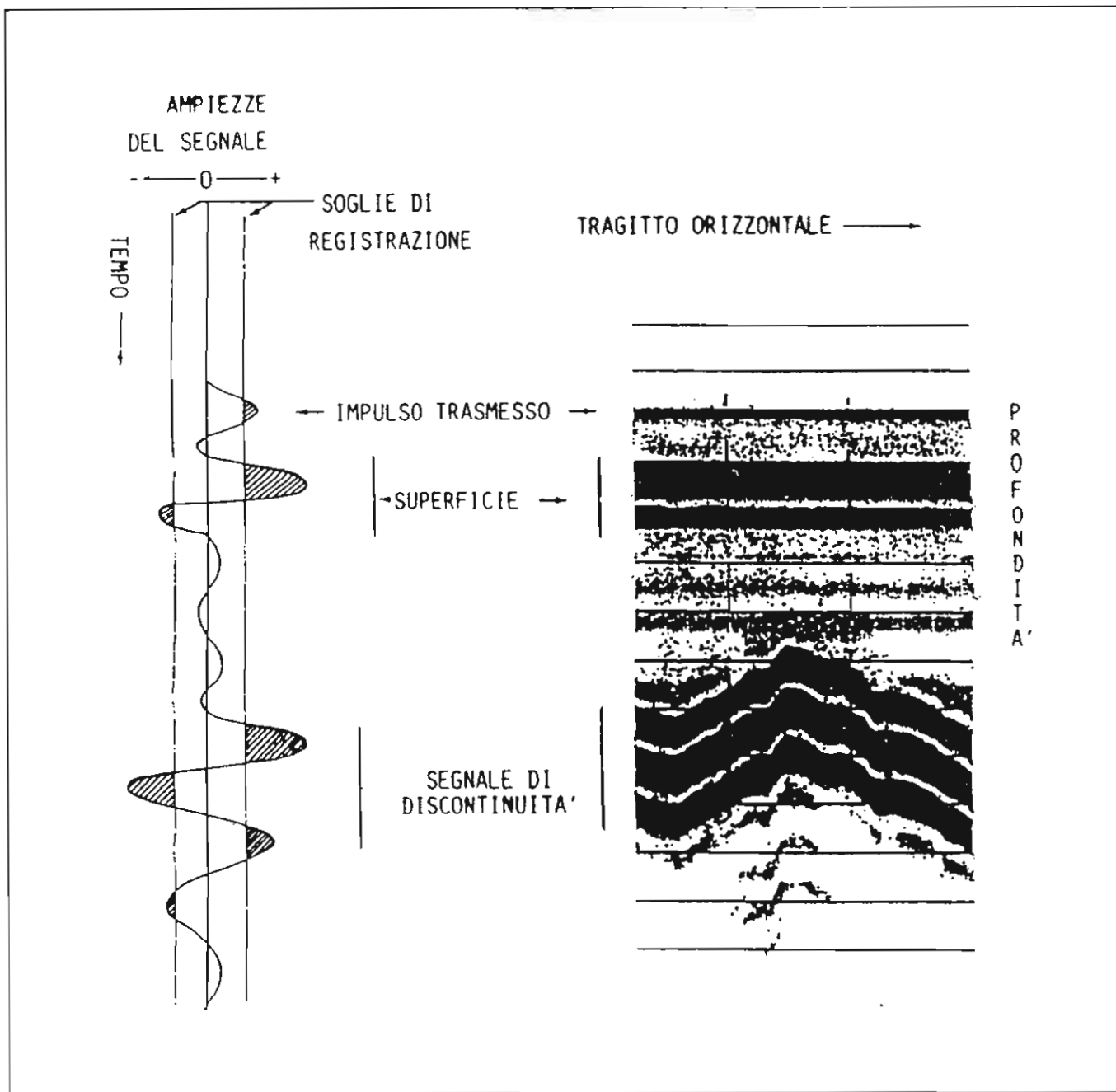


Figura 8. Forma d'onda relativa ad un impulso trasmesso ed un eco (a sinistra) e registrazione grafica equivalente (a destra) (da FINZI & PIRO, 1990).

Figure 8. Type of wave due to a transmitted pulse and an echo (left) with the corresponding graphic recording (right) (by FINZI & PIRO, 1990).

8). La conversione tempo-profondità, analogamente alla sismica, può essere effettuata solo conoscendo la velocità degli impulsi elettromagnetici all'interno dei singoli strati o per mezzo di carotaggi di taratura.

La profondità di investigazione è funzione delle caratteristiche di base dello strumento (potenza e frequenza delle antenne) nonché delle caratteristiche fisiche dei mezzi in cui si propagano gli impulsi. A parità di potenza e di caratteristiche fisiche del mezzo, tanto più alta è la frequenza e tanto minore è la

profondità di investigazione, anche se maggiore la risoluzione (fig. 9). In un mezzo avente proprietà conduttive gli impulsi elettromagnetici vengono subito assorbiti e la profondità di investigazione è piccola. In un mezzo avente caratteristiche dielettriche la profondità di indagine è maggiore. L'attenuazione degli impulsi così come la loro velocità di propagazione è, dunque, funzione delle proprietà elettromagnetiche delle rocce ed in particolare del loro contenuto d'acqua o di minerali argillosi, poiché sono

questi fattori che le rendono conduttive. A titolo esemplificativo la fig. 10 riporta i valori di 2 parametri elettromagnetici per alcune rocce misurati con una frequenza di 100 MHz; si noti come la presenza dell'acqua all'interno dello stesso tipo di roccia ne modifichi drasticamente i parametri.

Se da un lato la presenza in superficie dell'acqua (terreno saturo o fortemente umido) e di sedimenti argillosi (fra l'altro dotati di elevata capacità di ritenzione idrica) rappresenta un forte limite alla penetrazione degli impulsi elettromagnetici e quindi all'utilizzazione di tale metodologia, dall'altro le peculiari caratteristiche elettromagnetiche dell'acqua, intesa come acqua di falda, e delle argille non consolidate le rendono ben individuabili quando queste si trovino ad una certa profondità, ricoperte da rocce resistivo-dielettriche.

Applicazioni: la vasta letteratura in merito mette in evidenza come la metodologia GPR sia stata ampiamente utilizzata da numerosi autori per l'individuazione della profondità della tavola d'ac-

qua o **soggiacenza** (parametro di fondamentale importanza per la valutazione di vulnerabilità) in terreni sciolti ed in rocce compatte. Ad esempio SHI et al. (1986) hanno valutato la possibilità di individuare la profondità della tavola d'acqua in depositi fluvio-lacustri, in depositi eolici siltoso-limosi ed in suoli sabbiosi silicei contenenti materiali organici, confrontando i dati ottenuti con il GPR con la misura del livello dell'acqua in pozzi prospicienti l'area di indagine. JOHNSON (1989) ha utilizzato il GPR in depositi glaciali costituiti da alternanze di sabbie e ghiaie contenenti lenti di argille, siltiti, tilliti e blocchi di roccia, individuando la tavola d'acqua ad una profondità di 22,5 m.

Poiché l'intensità della riflessione dipende dal contrasto di proprietà dielettriche fra la zona satura e quella non-satura, nel caso di terreni a granulometria grossolana, dove non si ha risalita capillare, la tavola d'acqua si comporta come un riflettore elettromagnetico ben definito e viene ben individuata; in terreni a granulometria più fine, la frangia capillare

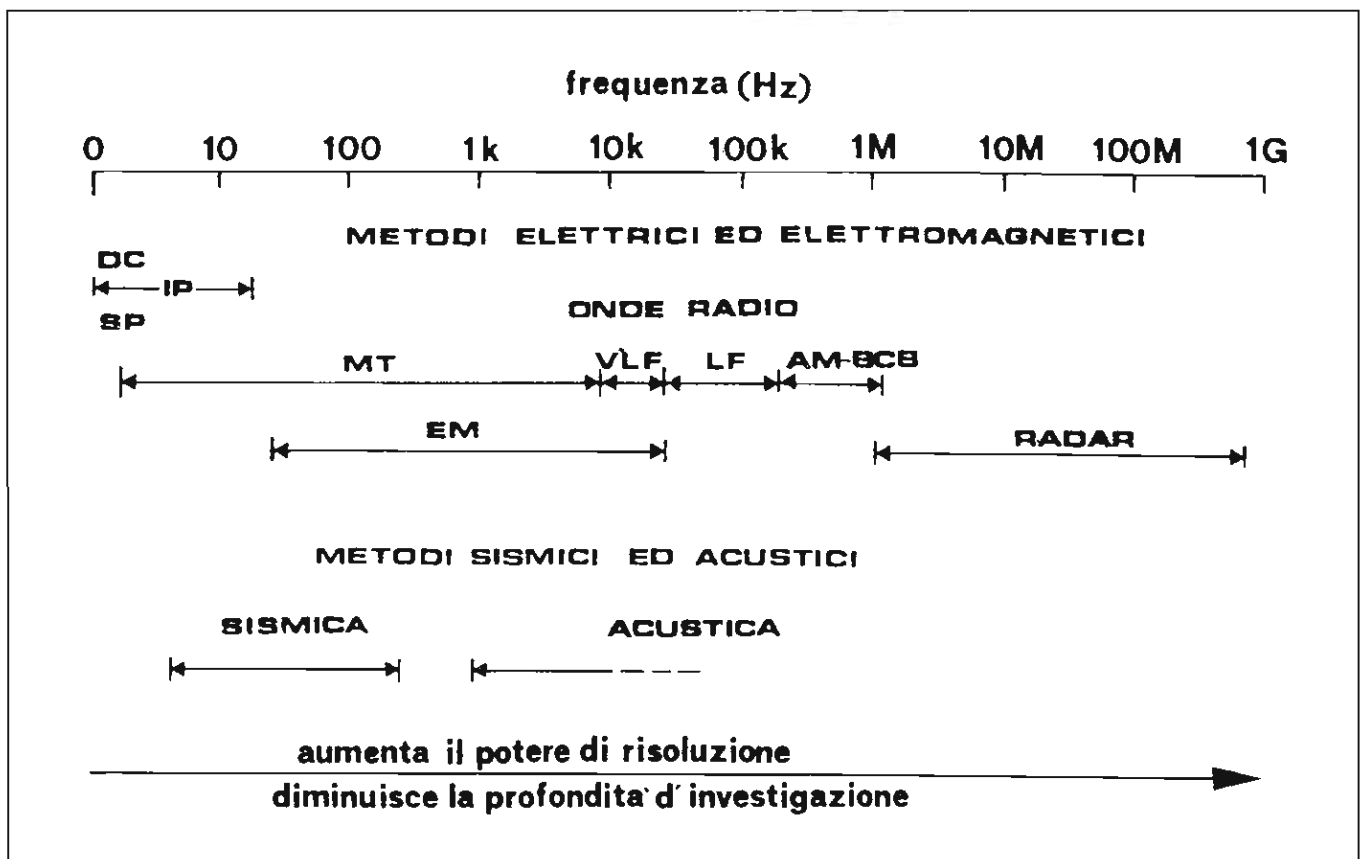


Figure 9. Tecniche geofisiche con range operativi di frequenza. DC: misura della resistività in corrente continua; IP: polarizzazione indotta; SP: potenziale spontaneo; MT: magnetotellurica; VLF: bassissima frequenza; LF: bassa frequenza; AM-BCB: modulazione di ampiezza; EM: induzione elettromagnetica.

Figure 9. Geophysical methods with corresponding frequency range of prospecting. DC: resistivity measurement in direct current; IP: induced polarization; SP: self potential; MT: magneto-tellurics; VLF: very low frequency; LF: low frequency; AM-BCB: amplitude modulation; EM: electromagnetic induction.

<i>Materiale</i>	σ	ϵ
Aria	0	1
Acqua distillata	10^{-3}	81
Acqua marina	4	81
Suolo sabbioso secco	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2,6
Suolo sabbioso umido	$6,9 \cdot 10^{-3}$	25
Suolo limoso secco	$1,1 \cdot 10^{-4}$	2,5
Suolo limoso umido	$5 \cdot 10^{-2}$	19
Suolo argilloso secco	$2,7 \cdot 10^{-4}$	2,4
Suolo argilloso umido	$5 \cdot 10^{-2}$	15
Ferro	10^6	1
Rame	$5,8 \cdot 10^7$	1
Basalto umido	10^{-2}	8
Granito umido	10^{-3}	7
Scisto umido	10^{-1}	7
Arenaria umida	$4,0 \cdot 10^{-2}$	6
Calcere umido	$2,5 \cdot 10^{-2}$	8

Figura 10. Conduttività σ (mhos/m) e costante dielettrica relativa ϵ (rispetto a quella dell'aria) per alcuni mezzi naturali (by FINZI & PIRO, 1990).

Figure 10. Electrical conductivity σ (mhos/m) and relative dielectric constant ϵ (respect to air) for some natural media (by FINZI & PIRO, 1990).

si comporta come una zona di transizione che impedisce la netta identificazione del livello della falda.

Altra possibilità è quella di misurare il **grado di saturazione** del terreno di copertura. La velocità degli impulsi elettromagnetici aumenta all'aumentare della porosità se i pori sono totalmente riempiti d'aria, mentre decresce se i pori sono riempiti d'acqua; per una miscela di aria e acqua, è possibile calcolare il grado di saturazione della roccia dal valore della sua costante dielettrica ricavata dalla velocità degli impulsi misurata con il **GPR** (McCANN et al., 1989).

Per quanto riguarda l'**individuazione di depositi argillosi** tramite **GPR**, la casistica è sicuramente

meno estesa, tuttavia un'interessante applicazione delle tecniche elettromagnetiche impulsive a questa problematica è riportata in un lavoro di LEGGIO et al. (1992), nel quale viene mostrato come le differenti proprietà attenuanti del granito e delle argille caoliniche, da questo derivate per alterazione, permettano l'individuazione e l'ubicazione di zone ad elevato contenuto di argille.

La notevole sensibilità delle tecniche elettromagnetiche alla presenza di una fase liquida in rocce porose ha permesso di estenderne l'applicazione all'**individuazione di inquinanti organici (NAPL)**. BENSON (1992) e WRIGHT et al. (1984) hanno applicato con successo la tecnica per evidenziare il movimento di contaminanti organici in depositi sabbiosi e ghiaiosi (il primo in combinazione con misure di resistività). È noto, infatti, (OLHOEFT, 1986) che le proprietà dielettriche di un sistema roccia-fase liquida cambiano se la fase liquida è costituita da un composto organico. Ad esempio, sia il *tetrachloroetilene* che il *toluene* hanno una ridotta solubilità in acqua, un elevato valore della resistività elettrica ed un basso valore della permittività, per cui la loro presenza nel terreno, *qualora la matrice rocciosa sia priva di argilla*, è ben evidenziabile per mezzo del **GPR**.

Un interessante esperimento, riguardo all'individuazione di contaminanti organici nel terreno, è in fase di sviluppo da alcuni anni presso il *Waterloo Groundwater Center* dell'Università di Waterloo (Ontario, Canada), dove è stata realizzata una vasca di terreno sabbioso al cui interno è stata simulata una contaminazione di un mezzo poroso acquifero con solventi organici. Lo scopo dell'esperimento è quello di valutare la capacità del **GPR** di evidenziare il movimento nel tempo di una colonna di liquido contaminante che si diffonde all'interno di un acquifero (BREWSTER et al., 1992). Alle misure di **GPR** sono state associate anche misure di riflettometria nel dominio del tempo e di conducibilità elettrica al fine di misurare le variazioni di permittività e di conducibilità dell'area contaminata in funzione della diffusione spaziale del contaminante nell'acquifero (REDMAN & ANNAN, 1992).

I risultati ottenuti nel corso di questo esperimento sono molto incoraggianti, soprattutto se si considera che le altre metodologie geofisiche come la polarizzazione indotta od i sondaggi elettrici convenzionali sono in grado di evidenziare con discreta risoluzione la presenza di soli contaminanti inorganici.

Infine va ricordata la notevole efficacia del **GPR** nell'**individuare oggetti interrati** quali serbatoi, fusti, relitti vari (BENSON et al., 1984).

Salvo casi particolari, comunque, la metodologia **GPR** non può essere risolutiva se impiegata da sola (se non in casi particolari), sia per i limiti di applicabilità evidenziati in precedenza e validi in modo particolare per le condizioni geologico-pedologiche italiane, che per la mancanza di un consolidato supporto teorico alla metodologia necessario per una corretta interpretazione dei dati di campagna in situazioni più complesse.

PARTE SECONDA

Sono qui illustrati alcuni esempi reali di prospezione geofisica finalizzata ad applicazioni idrogeologiche (parametrizzazione del mezzo poroso e protezione degli acquiferi). Una breve descrizione dell'indagine e dei suoi risultati è preceduta dalle abbreviazioni delle tecniche di prospezione impiegate (**R**: misura della resistività in corrente continua; **IP**: polarizzazione indotta; **EM**: induzione elettromagnetica; **GPR**: radar geologico; **RS**: sismica a rifrazione).

1) *Cerbaia (Val di Pesa, Firenze)*; **R + IP + EM + GPR** (BALLERINI et al., 1995).

Tale indagine rappresenta un esempio di applicazione di varie metodologie geofisiche su una medesima area test al fine di verificare le singole potenzialità di ognuna per la valutazione del grado di protezione degli acquiferi. La ricerca era inquadrata nell'ambito di una ricerca internazionale denominata *Progetto SAR-X SIR-C* (coordinatore geologico Prof. PAOLO CANUTI) sulle potenzialità applicative delle tecniche radar avioportato alla caratterizzazione dei terreni superficiali (CANUTI et al., 1992).

L'area test è ubicata sui terreni alluvionali recenti di fondovalle del torrente Pesa, affluente di sinistra dell'Arno. Grazie al confronto fra dati geofisici ed i parametri fisici del terreno misurati direttamente (struttura idrogeologica della copertura, tessitura, conducibilità idraulica) è stato possibile pervenire ai seguenti giudizi applicativi:

- il metodo **EM** si distingue per il buon grado di risoluzione laterale dell'idrogeostruttura della copertura, permettendo così l'individuazione di aree a diverso grado di vulnerabilità, di paleo-alvei sepolti e/o zone a maggiore trasmissività;

- i metodi **R** ed **IP** (per quest'ultima si tratta della misura della caricabilità elettrica nel dominio del tempo) hanno evidenziato la possibilità di parametrizzare le proprietà fisiche (percentuale di argilla, conducibilità idraulica) della copertura e dell'acquifero, sulla base di correlazioni empiriche di valo-

re locale;

- il metodo **GPR**, effettuato con un radar bistatico della *OYO* (modello YL-R2), con antenne da 600 MHz, e di cui è mostrato uno dei profili ottenuti in fig. 6, ha evidenziato la possibilità di individuare con precisione la profondità della tavola d'acqua, posta ad una profondità di 3,1 m. La presenza di una notevole percentuale di materiale fine all'interno dei sedimenti ha, tuttavia, limitato l'applicazione del **GPR** a zone circoscritte nelle quali si è registrato una resistività superficiale maggiore.

2) *Savalano (Toscana Marittima)*; **EM + R**.

Nell'area in oggetto è stata eseguita una indagine geofisica finalizzata alla valutazione dell'estensione di un acquifero alluvionale, e dei suoi rapporti spaziali con la copertura, in una piccola valle impostata su terreni argillosi Pliocenici.

La falda acquifera ha sede in un livello di ghiaie sottostanti una copertura di tipo prevalentemente limo-argilloso, di spessore variabile da 0 fino a circa 12-15 m. L'acquifero risulta protetto da tale copertura, laddove presente, come evidenziato dal *SEV* di fig. 11.

Il metodo **EM** è stato impiegato per la ricostruzione dell'andamento del paleo-alveo in base alla individuazione delle zone a resistività più elevata misurata con *intercoil* di 40 metri, corrispondente a circa 25-30 m di profondità d'investigazione (fig. 12). Le zone più resistive sono quelle più trasmissive e con un ridotto spessore della copertura.

3) *Rigutino (Val di Chiana)*; **EM + RS**.

In questa zona le indagini geofisiche sono state condotte con l'obiettivo di individuare le zone di maggior fratturazione della formazione arenacea nota come *Macigno*. L'individuazione di linee di fratturazione appare di notevole importanza anche ai fini della protezione di acquiferi in aree montuose.

In fig. 13 si mostra la concomitanza di informazioni interpretabili come dovute a linee di frattura: zone più conduttive lungo il profilo di conducibilità eseguito con il metodo **EM** (*intercoil* 20 m) e zone con tempi d'arrivo in ritardo sulle dromocrone del profilo sismico a rifrazione.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'impiego della prospezione geofisica al servizio dell'idrogeologia applicata è un settore in piena espansione; gli operatori del settore sono numerosi, la strumentazione disponibile sul mercato è in grado di fornire prestazioni tecniche di sempre più alto livello, i casi di contaminazione dei terreni e delle falde o la richiesta di studi ambientali per la pianifi-

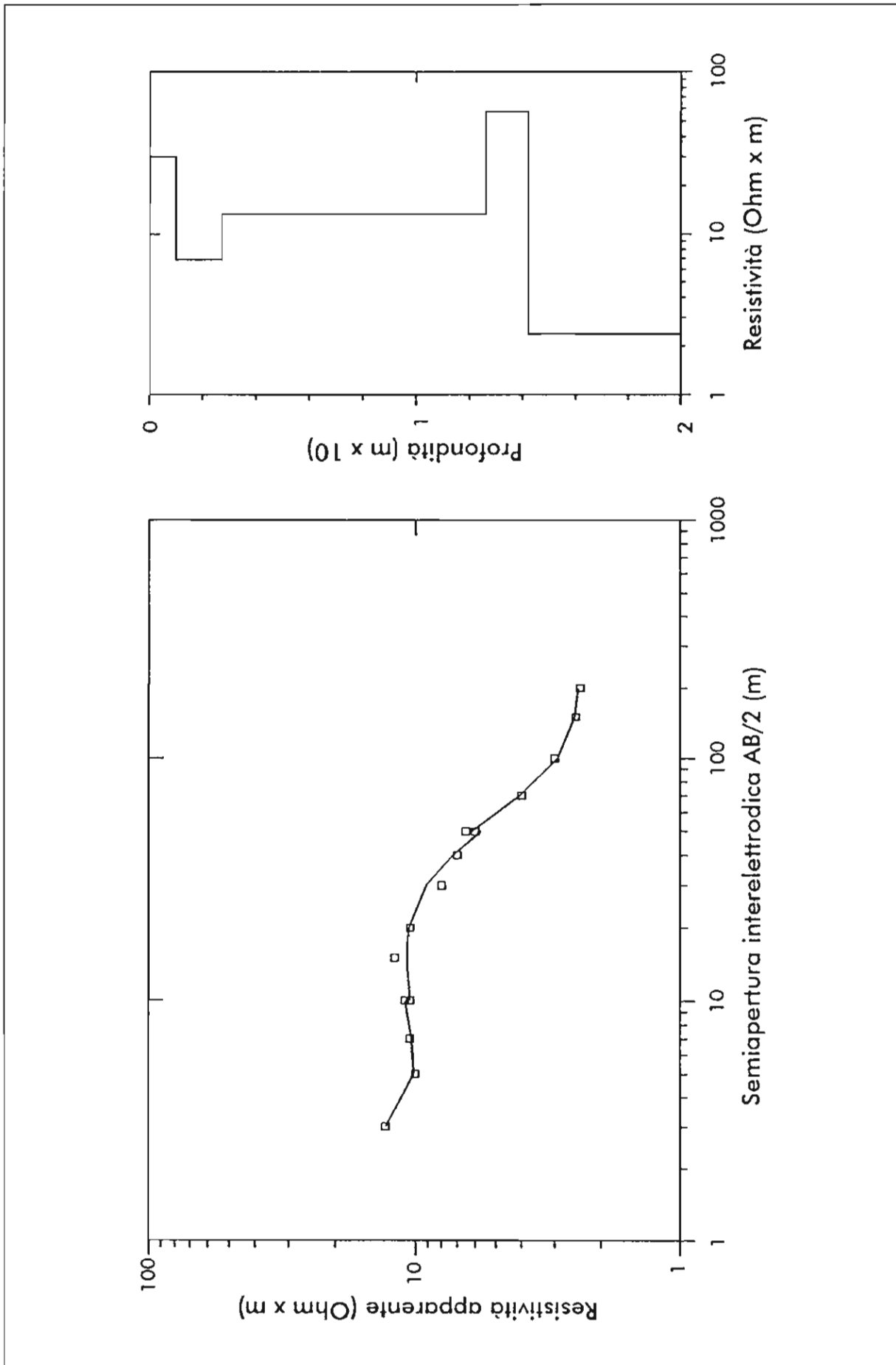


Figura 11. S.E.V. con modello interpretativo relativo all'area di Savalano; il tetto dell'acquifero è ad una profondità di 12 m dal piano-campagna.
 Figure 11. V.E.S. with interpretative model in the Savalano area; the upper limit of the aquifer is 12 m below ground level.

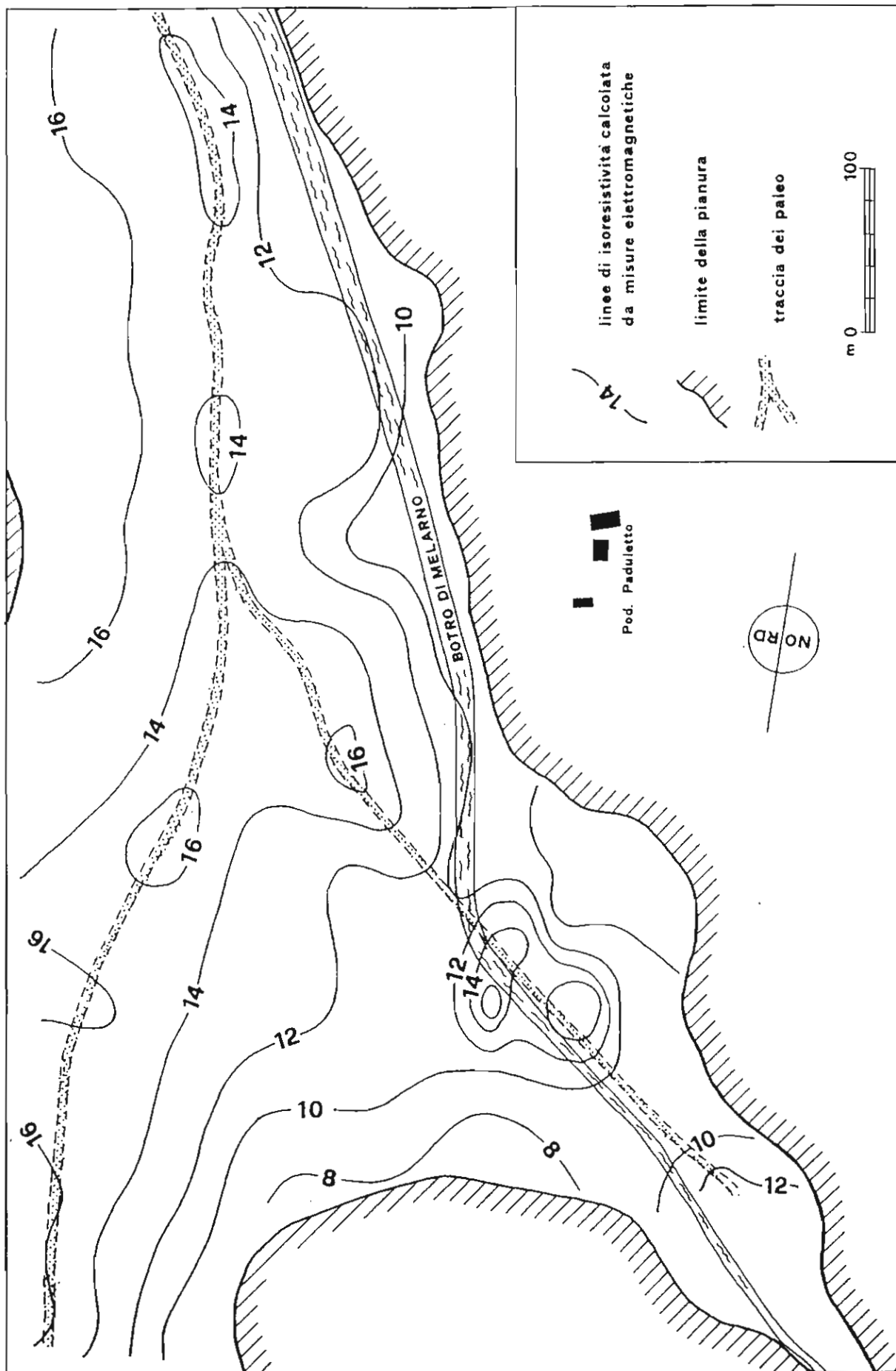


Figura 12. Carta della resistività apparente derivata da prospezione EM nell'area di Savallano; le aree più resistive indicano la presenza di un paleo-alveo superficiale.

Figure 12. Apparent resistivity map derived from EM prospecting in the Savallano area; more resistive zones mark a shallow paleo-river bed.

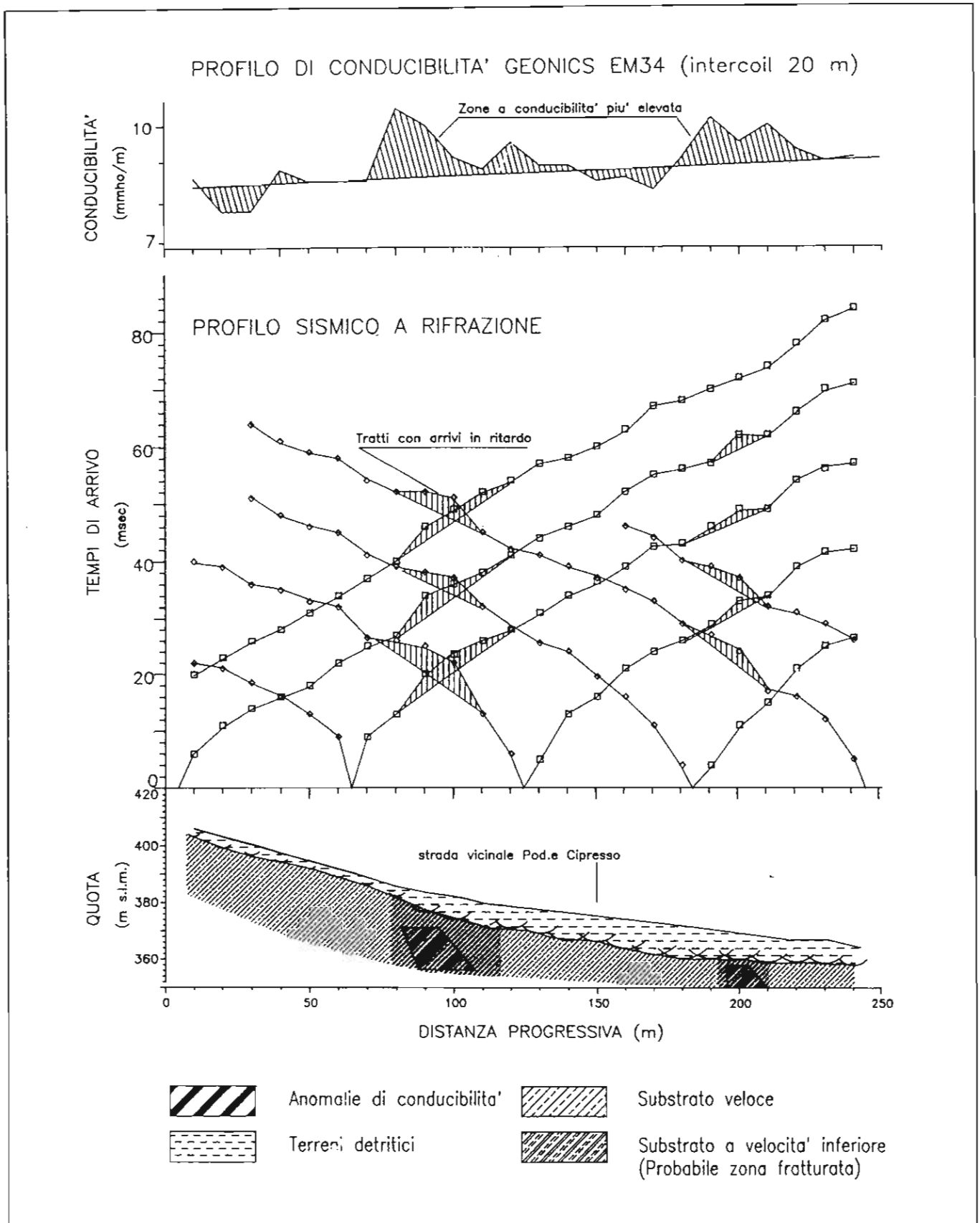


Figura 13. Individuazione di aree più fratturate nella formazione del Macigno con prospezione integrata EM e sismica a rifrazione (area di Rigutino).

Figure 13. Prospection for fractured zones in the «Macigno» arenaceous formation by an integrated use of EM and refraction seismics (Rigutino area).

cazione territoriale necessitano di indagini efficaci, veloci e non eccessivamente costose.

A fronte di ciò, non si è ancora sviluppata completamente, soprattutto nel nostro paese, una situazione di completa fiducia da parte dei geologi applicati nei confronti delle indagini geofisiche, in particolare di quelle effettuate con strumentazioni più sofisticate rispetto a quelle comunemente impiegate negli ultimi decenni (geoelettrica convenzionale, in particolare).

Se da un lato tale avversione appare in parte giustificata con la scarsa preparazione specifica di una parte degli operatori (che si affidano totalmente alle prestazioni ed alle automazioni della macchina, dimenticandosi dell'importanza dell'interpretazione), dall'altra essa è sicuramente derivata dalla scarsa importanza che viene generalmente indirizzata alla calibratura con dati geologici diretti e quantitativi ed, in generale, alla conoscenza geologica accurata del territorio come premessa fondamentale di un'indagine efficace.

Nel campo della valutazione del grado di protezione degli acquiferi, in particolare, la geofisica può costituire uno strumento efficace di supporto all'indagine purché i dati diretti siano numerosi, non si limitino alla descrizione qualitativa di stratigrafie o rilievi ma, in sostanza, costituiscano il punto centrale rispetto a cui orientare la ricerca.

CONTRIBUTI DEGLI AUTORI

PIERLUIGI BALLERINI si è occupato della caratterizzazione geotecnica dei terreni ed ha collaborato alla stesura degli aspetti geologici del lavoro.

GIANFRANCO CENSINI ha realizzato le prospezioni sismiche, elettromagnetiche e di polarizzazione indotta ed ha collaborato alla stesura degli aspetti geofisici del lavoro.

GIULIANO GABBANI ha realizzato le prospezioni geoelettriche, ha partecipato alla acquisizione ed elaborazione dei parametri idrogeologici ed ha collaborato alla stesura degli aspetti idrogeologici e geofisici del lavoro.

ALESSANDRO GARGINI si è occupato della caratterizzazione idrogeologica dei terreni e degli aspetti idrogeologici del lavoro, ha redatto il testo (in collaborazione con gli altri autori) ed ha curato la ricerca bibliografica.

ELENA PETTINELLI e SALVATORE PIRO si sono occupati della ricerca bibliografica, dei fondamenti teorici e della effettuazione ed interpretazione delle prospezioni con il georadar.

BIBLIOGRAFIA

ANGORAN Y. & MADDEN T.R. (1977) - *Induced Polarization - A Preliminary Study of its Chemical Basis*. Geophysics, **42**.

ALESSANDRIELLO L. & LEMOINE Y. (1983) - *Determination de la perméabilité des alluvions a partir de la prospection électrique*. Bulletin of International Association Of Engineering Geology, **26/27**.

ARMANDO E., GODIO A., MARCHISIO M., RANIERI G., SAMBUELLI L. & SOCCO L.V. (1993) - *Metodi geofisici per l'indagine di discariche di rifiuti solidi urbani*. Atti GEOENV'93, Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria ed Ambientale, Associazione Italiana di Geofisica Applicata, Roma.

ARCHIE G.E. (1942) - *The Electrical Resistivity Log as an Aid in determining some Reservoir Characteristic*. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng., **146**.

BALLERINI P., CENSINI G., GABBANI G., GARGINI A., MORETTI S. & PETTINELLI E. (1995) - *La prospezione geofisica come supporto alla valutazione del grado di protezione degli acquiferi superficiali: un'indagine sperimentale*. Geologica Romana.

BENSON A.K. (1992) - *Integrating Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Data to delineate Ground-water Contamination*. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi (Finlandia).

BENSON R.C., GLACCUM R.A. & NOEL M.R. (1984) - *Geophysical Techniques for sensing Buried Wastes and Waste Migration: an Application Review*. Atti di: Surface and Borehole Geophysical Methods in Ground Water Investigations, NWWA/EPA Conference, San Antonio, Texas (USA).

BERETTA G.P. (1992) - *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*. Pitagora Editrice (Bologna).

BERTIN J. & LOEB J. (1976) - *Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization*. Geopublication Associates, Geopublication Monographs, Gebruder Borntraeger.

BOZZO E., GAMBETTA M., LOMBARDO S. & MERLANTI F. (1993) - *Prospezione elettromagnetica per la delimitazione di una discarica abusiva di fusti contenenti materiali nocivi*. Atti GEOENV'93, Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria ed Ambientale, Associazione Italiana di Geofisica Applicata, Roma.

BREWSTER M.L., ANNAN A.P. & REDMAN J.D. (1992) - *GPR monitoring of DNAPL Migration in a Sandy Aquifer*. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi (Finlandia).

BUSCH D. & DUPUIS A. (1991) - *Exemples d'application de la radio MT aux problèmes de drainage en terrains sédimentaires*. Hydrogeologie, **2**.

- BUSELLI G., BARBER C. & ZERILLI A. (1988) - *The Mapping of Groundwater Contamination with TEM and DC Methods*. Exploration Geophysics, **19**.
- CANUTI P., D'AURIA G., PAMPALONI P. & SOLIMINI D. (1992) - *MAC 91 sull'area di Montespertoli: un esperimento per l'agro-idrologia*. Atti del V Convegno Nazionale Associazione Italiana Telerilevamenti, Milano, Editrice Progetti.
- CARRARA E., RAPOLLA A. & ROBERTI N. (1992) - *Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici*. Liguori Ed., Palermo.
- CHUDACEK S., LANDA I., MAZAC O. & CAHYNA F. (1982) - *Detection of Agricultural Pollution by Geoelectrical Methods*. International Symposium IAH, XVI, 1.
- CURTIS B. & KELLY W.E. (1990) - *Resistivity-Recharge Relationships-Field Study*. Journal of Hydrology, **118**.
- DANIELS J.J. & SCOTT KEYS W. (1992) - *Geophysical Well Logging for evaluating Hazardous Waste-Sites*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., II, Society of Exploration Geophysicists.
- DAVIS J.L. & ANNAN A.P. (1989) - *Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*. Geophysical Prospecting, **37**.
- DE MOOR G. & DE BREUCK W. (1976) - *Preparation of Semi-Detailed Lithologic and Hydrogeologic Maps for Land Management by means of a Geoelectric Survey*. Bulletin of International Association of Engineering Geologists, **14**.
- FOUNTAIN L.S. (1986) - *Detection and Location of Leaks in Geomembrane-Lined Liquid Waste Impoundments using an Electrical Technique*. Surface and Borehole Geophysics, Methods and Groundwater Instrumentation, National Water Well Association.
- GABBANI G., GARGINI A. & PRANZINI G. (1990) - *Un nuovo metodo di valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi*. Atti di I Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee, Marano sul Panaro (MO).
- GARGINI A. (1994) - *Le prove di permeabilità in situ su terreni non-saturi a grana fine: un contributo alla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Quaderni di Geologia Applicata, **1**, 225-240.
- GREENHOUSE J.P. & SLAINE D.D. (1983) - *The Uses of Reconnaissance Electromagnetic Methods to Map Contaminant Migration*. Ground Water Monitoring Review, **3**.
- HENRIET J.P. (1976) - *Direct Application of the Der Zarrouk Parameters in Groundwater Survey*. Geophysical Prospecting, **24**, 2.
- HINZE W.J. (1992) - *The Role of Gravity and Magnetic Methods in Engineering and Environmental Studies*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., Society of Exploration Geophysicist.
- ILICETO V., SANTARATO G., ARDIZZONI F., FINOTTI F. & MEROLA R. (1993) - *Possibilità di localizzazione di discariche di R.S.U. mediante misure di polarizzazione indotta*. Atti GEOENV'93, Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria ed Ambientale, Associazione Italiana di Geofisica Applicata, Roma.
- JOHNSON D.G. (1989) - *Use of Ground Penetrating Radar for determining Depth of the Water Table on Cape Cod*. Massachusetts.
- KALINSKI R. J., KELLY W. E., BOGARDI I. & PESTI G. (1993) - *Electrical Resistivity Measurements to estimate Travel Times through Unsaturated Ground Water Protective Layers*. Journal of Applied Geophysics, **30**.
- KELLY W.E. & MARES S. (1992) - *Applied Geophysics in Hydrogeological and Engineering Practice*. Elsevier.
- KOSINSKI W.K. & KELLY W.G. (1981) - *Geoelectric Soundings for predicting Aquifer Properties*. Ground Water, **19**, 2.
- LEGGIO P.J., GLOVER J.M. & WAJZER M.R. (1992) - *The Detection and Mapping of Kaolinitic Clay by Ground Probing Radar in the Cornish Granites of Southwest England*. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi (Finlandia).
- MARES S. (1984) - *Introduction to Applied Geophysics*. Reidel Publ. Co.
- MAZAC O., KELLY W. E. & LANDA I. (1985) - *A Hydrogeophysical Model for Relations between Electrical and Hydraulic Properties of Aquifers*. Journal of Hydrology, **79**.
- MAZAC O., KELLY W.E. & LANDA I. (1989) - *Surface Geoelectrics for Groundwater Pollution and Protection Studies*. Journal of Hydrology, **93**.
- MAZAC O., CISLEROVA M., KELLY W.E., LANDA I. & VENHODOVA D. (1990) - *Determination of Hydraulic Conductivities by Surface Geoelectrical Methods*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., II, Society of Exploration Geophysicists, 125-131.
- MAZAC O., BENES L., LANDA I. & MASKOVA A. (1992) - *Determination of the Extent of Oil Contamination in Groundwater by Geoelectrical Methods*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., Society of Exploration Geophysicist.
- MCCANN D.J., JACKSON P.D. & FENNING P.J. (1989) - *A Comparison of the Seismic and Ground Probing Radar Methods in Geological Surveying*. Radar and Signal Processing, IEE.
- MCNEILL J.D. (1980) - *Electrical Conductivity of Soils and Rocks*. Geonics Ltd.

- MCNEILL J.D. (1992) - *Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., Society of Exploration Geophysicist.
- MCNEILL J.D. & LABSON V. (1992) - *Geological Mapping using VLF Radio Fields*. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, M.N. Nabighian Ed., Investigations in Geophysics 3, Society of Exploration Geophysicists.
- MILSON J. (1989) - *Field Geophysics*. Geological Society of London Handbook, Open University Press & Halsted Press.
- OGILVI A.A. & KUZMINA E.N. (1972) - *Hydrogeologic and Engineering Geologic Possibilities for emphasizing the Method of Induced Potentials*. Geophysics, 37-5.
- OLHOEFT G.R. (1986) - *Direct Detection of Hydrocarbon and Organic Chemicals with Ground Probing Radar and Complex Resistivity*. Atti di: NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater-Prevention, Detection and Restoration. National Water Well Association.
- OLSON C.G. & DOOLITTLE J.A. (1985) - *Geophysical Techniques for Reconnaissance Investigations of Soils and Surficial Deposits in Mountainous Terrain*. Soil Science Society of America Journal, 49.
- PARASNIS D.S. (1986) - *Principles of Applied Geophysics*. Chapman & Hall.
- REDMAN J.D. & ANNAN A.P. (1992) - *Dielectric Permittivity Monitoring in a Sandy Aquifer following the Controlled Release of a DNAPL*. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi (Finlandia).
- SHIH S.F., DOOLITTLE J.A., MYHRE D.L. & SCHELLENTRAEGER G.W. (1986) - *Using Radar for Ground Water Investigation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112.
- SJOGREN B. (1984) - *Shallow Refraction Seismic*. Chapman & Hall (New York).
- SNELGROVE F.B. (1986) - *Electromagnetic Conductivity Mapping of Groundwater Contaminants*. Water Science and Technology, 18.
- SPIES B.R. & FRISCHKNECHT F.C. (1991) - *Electromagnetic Sounding*. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, M.N. Nabighian Ed., Investigations in Geophysics 3, Society of Exploration Geophysicists.
- STERNBERG B.K. & OEHLER D.Z. (1990) - *Induced Polarization Hydrocarbon Surveys: Arkoma Basin Case Histories*. Advances in Applications and Case Histories of Induced Polarization, Fink J. B. & McAlister E. O. Eds., Society of Exploration Geophysicists Special Publication.
- STOLLAR R. & ROUX P. (1975) - *Earth Resistivity Surveys - A Method for defining Groundwater Contamination*. Ground Water, 13.
- TELFORD W.M., GELDART L.P. & SHERIFF R.E. (1990) - *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- TOWLE J.N., ANDERSON R.G., PELTON W.H., OLHOEFT G.R. & LABRECQUE D. (1985) - *Direct Detection of Hydrocarbon Contaminants using the Induced-Polarization Method*. 55th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
- URISH D.W. (1983) - *The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-Water Pollution*. Ground Water, 21.
- VOZOFF K. (1991) - *The Magnetotelluric Method. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. M.N. Nabighian Ed., Investigations in Geophysics 3, Society of Exploration Geophysicists.
- WARD S.H. (1992) - *Resistivity and Induced Polarization Methods*. Geotechnical and Environmental Geophysics, S. Ward ed., Society of Exploration Geophysicist.
- WARD S.H. & FRASER D.C. (1992) - *Conduction of Electricity in Rocks*. Mining Geophysics, 2.
- WEST G.F. & MACNAE J.C. (1991) - *Physics of the Electromagnetic Induction Exploration Method. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. M.N. Nabighian Ed., Investigations in Geophysics 3, Society of Exploration Geophysicists.
- WORTHINGTON P.F. (1976) - *Hydrogeophysical Equivalence of Water Salinity, Porosity and Matrix Conduction in Arenaceous Aquifers*. Ground Water, 14.
- WRIGHT D.L., OLHOEFT G.R. & WATTS R.D. (1984) - *Ground Penetrating Radar Studies on Cape Cod*. Surface and Borehole Geophysical Methods in Ground Water Investigations, D.M. Nielsen ed., National Water Well Association.
- ZONGE K.L., FIGGINS S.J. & HUGHES L.J. (1985) - *Use of Electrical Geophysics to Detect Sources of Groundwater Contamination*. 55th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists.