



**Provincia  
di Milano**

**Linee Guida N.3**

# **La Prospezione Geofisica in campo ambientale**

**Provincia di Milano  
Direzione centrale ambiente  
Settore suolo e sottosuolo  
e industrie a rischio  
Servizio bonifiche siti contaminati**

**Realizzazione a cura di:**

<b>Andrea Zelioli</b>	<b>Funzionario Geologo Servizio Bonifiche siti contaminati</b>
<b>Simona Rizzi</b>	<b>Funzionario Geologo Servizio Bonifiche siti contaminati</b>
<b>Alberto Pagano</b>	<b>Geologo libero professionista</b>

---

Provincia di Milano  
Direzione centrale ambiente  
Settore suolo, sottosuolo e industrie a rischio  
Servizio bonifiche siti contaminati  
Corso di Porta Vittoria, 27  
20122 Milano  
Tel. 02.7740 3807 - Fax 02.7740 3856  
Sito web: <http://www.provincia.milano.it/ambiente/>  
© Copyright Provincia di Milano – marzo 2003

# **INDICE**

1. INTRODUZIONE
2. TOMOGRAFIA ELETTRICA  
[IMAGING DC RESISTIVITY, I.P.]
3. GEOELETTRICA  
[DC RESISTIVITY, Misé a la masse]
4. ELETTROMAGNETICO  
[EM RESISTIVITY]
5. MAGNETOMETRIA [M]
6. RADIAZIONI IONIZZANTI [ $\beta$ ,  $\gamma$ ]

PREZZIARIO

BIBLIOGRAFIA

## **PREMESSA**

La Provincia di Milano in adempimento alle proprie attività istituzionali ha negli anni, sviluppato un notevole bagaglio di conoscenze tecnico-scientifiche in materia di contaminazione del sottosuolo e delle acque sotterranee.

Sulla scorta di tale esperienza ed al fine di ottimizzare la tempistica di intervento dell'Ufficio ed uniformarne le scelte operative ispirandole ai medesimi standard tecnici, è stata predisposta e divulgata tramite il sito Internet della Direzione Centrale Ambiente la redazione di una serie di Linee Guida, anche al fine di permettere a tutti gli "addetti ai lavori" di trarne spunti nell'ambito delle proprie attività professionali.

Nell'ottica dello sviluppo ed approfondimento di quanto già presente negli allegati n. 2 e 4 del D.M. 471/99, sulla scorta delle esperienze maturate dall'Ufficio nell'ambito delle attività di controllo in materia di indagini e bonifiche di siti contaminati, l'Ufficio Bonifiche ha realizzato il presente documento di approfondimento in materia di geofisica ambientale, traendo peraltro ampiamente spunto dalla nutrita bibliografia esistente.

L'adozione di tecniche di indagine indiretta quali le prospezioni geofisiche in campo ambientale, permette di ottimizzare le risorse impiegate durante la caratterizzazione del sito finalizzata alla definizione del modello concettuale. Infatti le anomalie delle grandezze fisiche del terreno che vengono misurate in campo, possono essere compatibili, attraverso un'opportuna e strutturata interpretazione, con la presenza di oggetti o di strutture sepolte.

Risulta, in effetti, specifico compito della geofisica ambientale e dei suoi vari metodi d'applicazione, individuare ed indicare, quando possibile, tutte le ubicazioni di eventuali focolai di contaminazione. Per questo tipo di anomalie, indicate come "possibili", almeno là dove non ne venga espressa la certezza, rimane ovviamente risolutiva l'indagine diretta, ma è comunque compito precipuo della geofisica indicarne la localizzazione, la distribuzione e soprattutto le priorità della verifica.

L'esigenza di fornire un sintetico quadro delle varie metodologie di prospezione geofisica utilizzate in campo ambientale nasce anche dalla necessità di ricondurre tale materia ad un processo applicativo ben codificato, mediante il quale sia possibile, anche ai "non geofisici", comprendere, in fase di progettazione, le metodiche più adeguate alle caratteristiche specifiche del sito ed ai meccanismi di contaminazione preventivamente ipotizzati, nonchè controllare in modo efficace la correttezza delle modalità esecutive e l'affidabilità dei dati acquisiti.

In queste Linee Guida vengono illustrate, sotto forma di schede sintetiche, le tecniche di intervento maggiormente utilizzate in campo ambientale, che descrivono le relative applicazioni ed idoneità ai vari scopi, le condizioni ottimali di impiego in fase esecutiva ed eventuali controindicazioni in condizioni particolari.

Per alcune metodiche le schede sono accompagnate da approfondimenti scientifici che riguardano le relative grandezze in gioco ed i relativi principi fisici su cui si basano.

# LA PROSPEZIONE GEOFISICA IN CAMPO AMBIENTALE

## 1. INTRODUZIONE

Lo scopo principale della prospezione geofisica in campo ambientale è quello di dare un valido supporto nella definizione delle attività prioritarie per le verifiche dirette, nonché nell'individuazione delle indagini necessarie per la caratterizzazione dell'area e per la taratura del modello geofisico individuato.

Conviene ricordare che le anomalie riscontrate, ricondotte ad una variazione repentina nel terreno delle proprietà fisiche ed elettromagnetiche, possono essere compatibili, attraverso un'opportuna e strutturata interpretazione, con la presenza di oggetti o di strutture sepolte.

Nella letteratura scientifica è risultato statisticamente significativo ed efficace, ai fini di una interpretazione univoca, affiancare nella stessa area differenti metodi d'indagine.

Le esplorazioni geofisiche si basano sulla misura di differenti grandezze geofisiche quali:

- La resistività o conducibilità elettrica
- La permeabilità elettrica o costante dielettrica
- La permeabilità magnetica
- Le cariche elettriche degli elementi e dei composti, peso atomico e molecolare.

I metodi geofisici illustrati nelle schede sono i seguenti:

- Tomografia Elettrica & I.P. [R I.S. & I.P.]
- Geoelettrica [SEV, SEO]
- Georadar GPR
- Elettromagnetico EM
- Magnetometria M
- Rilevazioni Radiazioni Ionizzanti  $\beta$ ,  $\gamma$ .

## **2. TOMOGRAFIA ELETTRICA [IMAGING DC RESISTIVITY, I.P.]**

### **PRINCIPIO FISICO**

- Si applica al terreno una corrente elettrica “quasi” continua attraverso elettrodi infissi nel terreno. Si ricava la resistività del terreno dalla misura della corrente, del potenziale elettrico generato e dalle dimensioni del terreno energizzato. E’ l’evoluzione tecnologica della geoelettrica.
- La misura di “caricabilità” del terreno (I.P. Induced Polarization) consiste invece nella misura del tempo  $t$  di decadimento della carica elettrica applicata.
- Si ottengono cartografie che illustrano in sezione per isolinee la resistività elettrica.

### **APPLICAZIONI**

- Individuazione di superfici stratigrafiche orizzontali del sottosuolo per ricerche idriche, ambientali specie di profondità
- Individuazione della profondità dell’acquifero, degli spessori di depositi alluvionali acquiferi, del bed-rock, delimitazione di strutture artificiali (discariche, orizzonti antropizzati)
- Ricostruzione dei limiti e delle variazioni laterali di grandi strutture sepolte (discariche, accumuli sepolti), finalizzate al calcolo volumetrico degli ammassi sepolti
- Individuazione perdite da discariche, traccia di percolati e contaminanti in falda
- Profondità d’esplorazione: variabile a seconda del dispositivo e della risoluzione richiesta, es. fino a 5 m, fino a 10 m, fino a 30 m, fino a 50 m, fino a 100-200 m e oltre. La profondità d’esplorazione è mediamente  $1/6$  della lunghezza dello stendimento.

### **VANTAGGI E SVANTAGGI**

- Difficoltà d’interpretazione in zone accidentate morfologicamente o con numerosi sottoservizi
- Occorrono spazi aperti per lo stendimento dei cavi, occorre l’infissione di elettrodi nel terreno (possibile applicazione anche in aree asfaltate, urbanizzate con predisposizione di fori).
- Buona risoluzione stratigrafica in senso verticale e laterale ai fini della stima volumetrica degli ammassi sepolti.
- Per ottenere precisione, occorre una stratigrafia di taratura a riferimento
- Limitazioni per l’individuazione di contaminanti non conduttivi
- Utilissima per la discriminazione di materiali metallici, di argille/sabbie acquifere con I.P.

## MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Stendimento di cavi ed elettrodi (circa 12-64) lungo allineamenti di lunghezza dell'ordine delle decine/centinaia di metri
- Ottima applicabilità anche in condizioni di terreno sia umido che saturo d'acqua
- Occorrono spazi aperti per lo stendimento dei cavi, occorre l'infissione di elettrodi nel terreno (possibile applicazione anche in aree asfaltate, urbanizzate con predisposizione di fori)
- Ottima risoluzione stratigrafica in senso verticale e laterale
- Limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi

# **GEOELETTRICA**

## **[DC RESISTIVITY, Misé a la masse]**

### **PRINCIPIO FISICO**

- Si applica al terreno una corrente elettrica “quasi” continua attraverso elettrodi infissi nel terreno. Si ricava la resistività del terreno dalla misura della corrente, del potenziale elettrico generato e dalle dimensioni del terreno energizzato.
- Si ottengono stratigrafie interpretative dei livelli attraversati nel sottosuolo.

### **APPLICAZIONI**

- Individuazione di superfici stratigrafiche orizzontali del sottosuolo per ricerche idriche, ambientali specie di profondità nei casi in cui gli altri metodi non siano efficienti
- Individuazione della profondità dell’acquifero, degli spessori di depositi alluvionali acquiferi, del bed-rock, di strutture artificiali (discariche, orizzonti antropizzati)
- Individuazione perdite da discariche, traccia di percolati e contaminanti in falda
- Studio del cono di depressione di falda intorno a pozzi/sorgenti per la determinazione della direzione di scorrimento della falda, per il computo, dalla formulazione della velocità, della zona di salvaguardia ad “isocrona”.
- Profondità d’esplorazione: variabile a seconda del dispositivo e della risoluzione richiesta, es. fino a 5 m, fino a 10 m, fino a 30 m, fino a 50 m, fino a 100-200 m ed oltre. La profondità d’esplorazione è mediamente 1/5-1/6 della lunghezza dello stendimento.

### **VANTAGGI E SVANTAGGI**

- Da prediligersi in configurazione Tomografia Elettrica
- Difficoltà d’interpretazione in zone accidentate morfologicamente o con numerosi sottoservizi
- Scarsa attendibilità in terreni con variazioni laterali naturali/antropiche
- Occorrono spazi aperti per lo stendimento dei cavi, occorre l’infissione di elettrodi nel terreno (possibile applicazione anche in aree asfaltate, urbanizzate con predisposizione di fori).
- Buona risoluzione stratigrafica in senso verticale
- Scarsissima risoluzione laterale
- Per ottenere precisione, occorre una stratigrafia di taratura a riferimento
- Limitazioni per l’individuazione di contaminanti non conduttivi

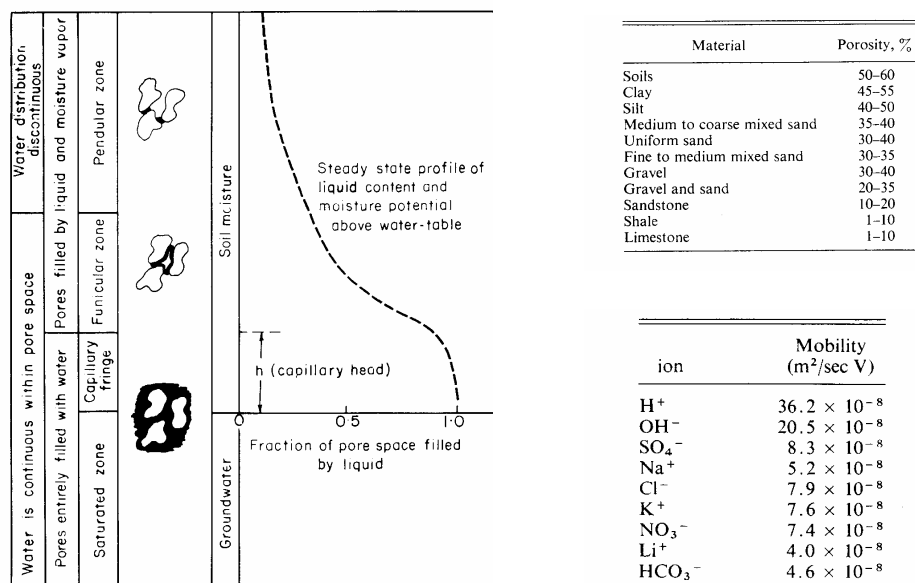
## MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Stendimento di cavi ed elettrodi (SEV e SEO n. 4 elettrodi) lungo allineamenti di lunghezza decametrica/centinaia metrica
- Ottima applicabilità anche in condizioni di terreno umido
- Difficoltà di contatto degli elettrodi su ghiaie grosse asciutte o macerie

## A. Metodo di Resistività e “caricabilità” in tomografia elettrica

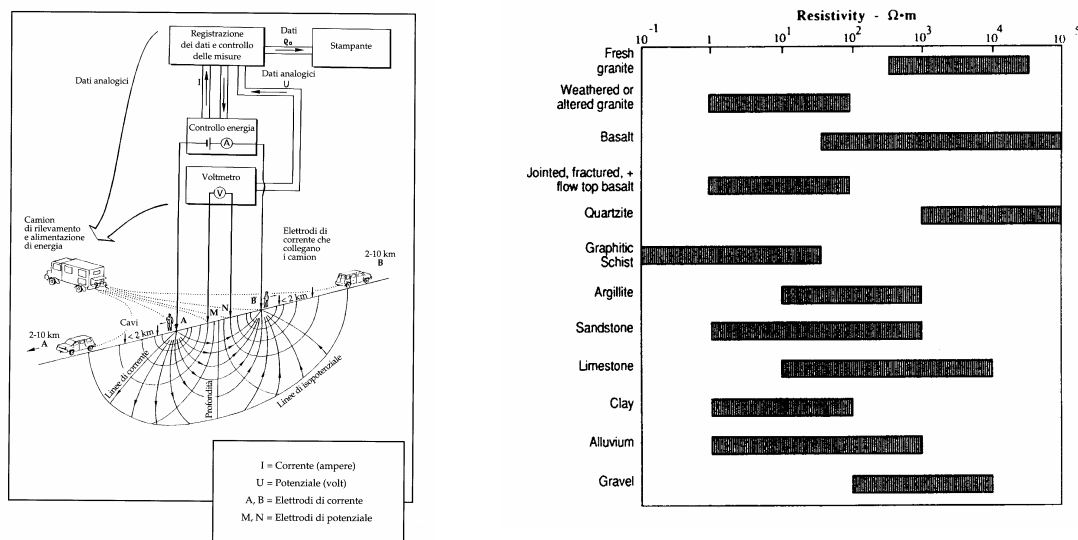
Le prospezioni *geoelettriche di resistività* (*Direct Current Resistivity sounding* o *Méthode des Résistivité*) si basano, in generale, sugli effetti sotterranei di una corrente elettrica, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale o di corrente.

I minerali costituenti le rocce, nella loro originaria fase solida, sono pressoché degli *isolanti* perfetti.



**FIG. A1.** La fase liquida nei terreni incoerenti (a sinistra). (da Meyboom, 1967) Intervalli di porosità delle rocce e principali ioni presenti naturalmente nei fluidi delle rocce (a destra). (da McNeill, 1980)

La *resistività* di un terreno, grandezza che esprime la sua attitudine all’attraversamento di una corrente elettrica, dipende dalla porosità, dal grado di imbibizione della roccia e dalla *resistività* dell’acqua o dei fluidi contenuti; quest’ultime, a loro volta, dipendono dalla temperatura e dal contenuto, dalla qualità e quantità dei sali disciolti. In definitiva la *resistività* di un terreno dipende da fattori che intervengono a strutturare e modificare le rocce, fattori di natura chimica e fisica costituenti le rocce ed i materiali.



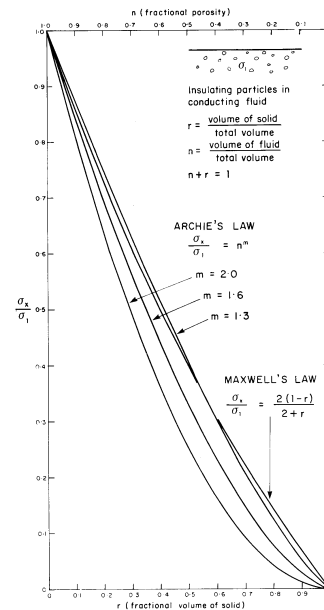
**FIG. A2.** Configurazione generale del metodo *geoelettrico di resistività* (a sinistra). (da Vogelsang, 1994). Intervalli tipici di *resistività* delle rocce (a destra). (da Culley *et al.*, 1975)

Con il metodo di *resistività* in corrente continua *D.C. Resistivity* (in realtà la tecnica attuale utilizza corrente in frequenza capace sia di escludere i notevoli disturbi della corrente di rete di 50 Hz sia di prevenire effetti di  *saturazione elettrica* del terreno che ne impediscono l'esplorazione in profondità) viene immessa nel sottosuolo, mediante due elettrodi (A, B), una corrente elettrica che determina una differenza di potenziale misurata mediante altri due elettrodi (M, N). Condizione fondamentale perché il metodo risulti efficace è che esista e sia elevato il contrasto di *resistività* tra gli oggetti dell'indagine.

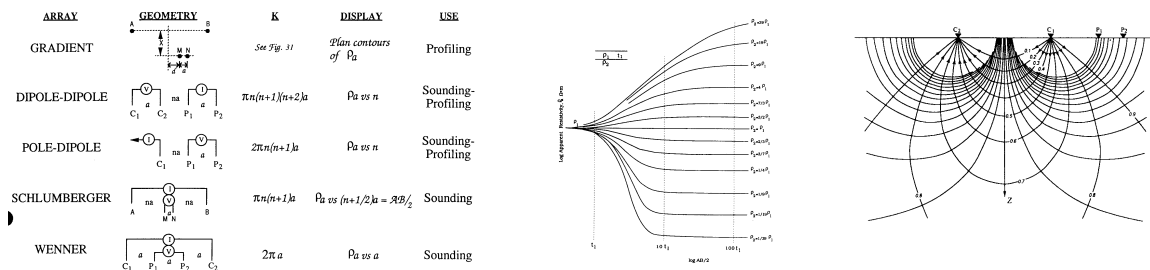
Dai valori noti di corrente erogata, dalla configurazione geometrica degli elettrodi e dalla differenza di potenziale misurata si calcola analiticamente la *resistività apparente* dei terreni indagati e del loro stato fisico.

Roccia/Materiale	Resistività (ohm•m)
Argille, marne, grasse	3 - 30
Argille, marne, magre	10 - 40
Argille sabbiose, sil	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 300
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000
Calcare, gesso	500 - 3500
Arenaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10.000
Gneiss	400 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Plume contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Olio esausto	150 - 700

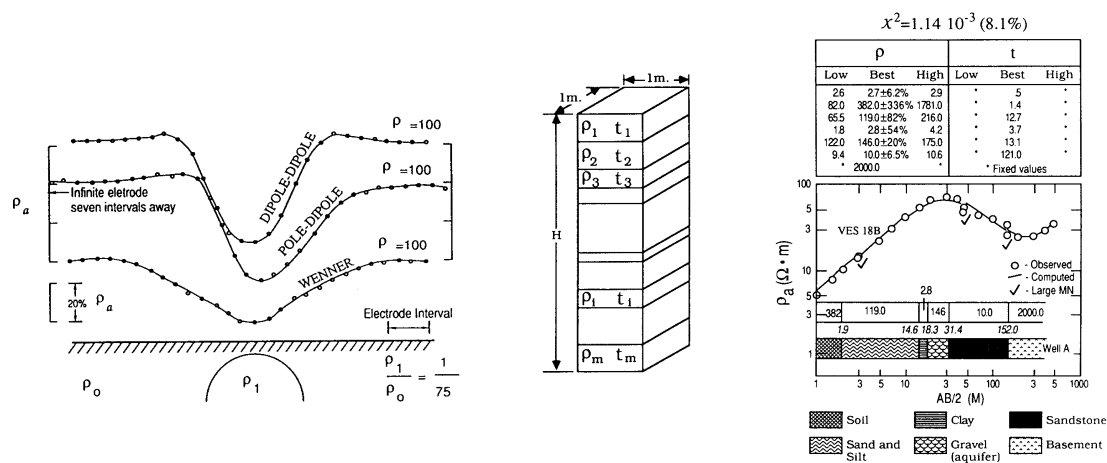
Clay Alteration	↕	Weathering	↕
Dissolution	↕	Induration	↕
Faulting	↕	Carbonate Precipitation	↕
Salt Water Intrusion	↕	Silicification	↕
Shearing	↕	Metamorphism	↕
↕ Decreases	↕ Increases	↕ Increases or Decreases	



**FIG. A3.** Intervalli tipici di resistività di terreni, di rocce e di materiali di discarica (a sinistra, alto). Processi geologici che influenzano la resistività delle rocce (a sinistra). (da Ward, 1990). Rappresentazione della legge di Archie e della legge di Maxwell che esprimono la conducibilità in funzione della porosità del terreno. (da McNeill, 1980)



**FIG. A4.** Le configurazioni elettrodiche più utilizzate nei rilievi di misura di resistività e di caricabilità del terreno (a sinistra). (da Ward, 1990). Esempificazione di master curves di resistività, Schlumberger, modello a due strati (al centro). (da Cagniard, 1953). Distribuzione della corrente e delle linee equipotenziali in un terreno omogeneo intorno a due elettrodi (a destra). (da Van Nostrand & Cook, 1966)

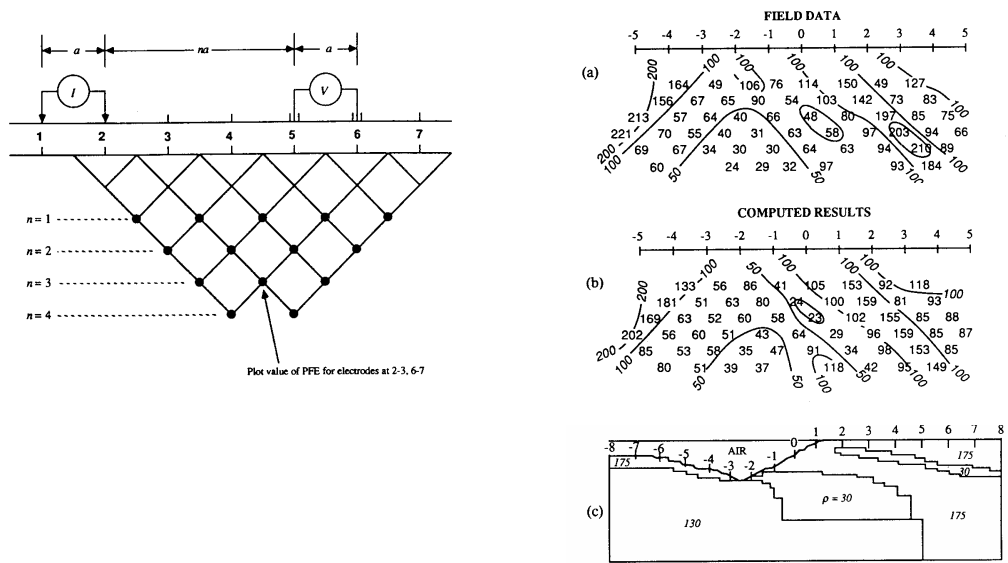


**FIG. A5.** Confronto tra profili di *resistività* ottenuti con configurazioni elettrode diverse su una sfera sepolta (a sinistra). (da Sumner, 1976). Modello teorico di terreno pluristratificato di *resistività*  $\rho$  e spessore  $t$  (al centro). (da Ward, 1990). Interpretazione a 7 strati di un Sondaggio Elettrico Verticale, tipo Schlumberger (a destra). (da Rijo *et al.*, 1977)

Le misure possono essere svolte sul terreno mediante due schemi generali: distanziando via via gli elettrodi e mantenendo grosso modo fisso il centro della configurazione per la misura del potenziale. Si ottiene in tale modo una profondità di esplorazione via via maggiore (Sondaggi Elettrici Verticali); oppure, mantenendo fissa una configurazione, essa viene spostata per intero sul terreno in modo da sviluppare dei profili nell'area d'indagine. In tal modo si ottiene una misura delle variazioni laterali di *resistività* (Sondaggi Elettrici Orizzontali). I valori calcolati di *resistività* apparente vengono opportunamente rappresentati graficamente ed elaborati attraverso *software* specifici per il confronto delle curve sperimentali con curve di *resistività* teoriche ("abachi delle curve di *resistività* tipo" o *master curves*) per l'interpretazione.

La combinazione dei due sistemi, *combined sounding and profiling*, adottando intervalli fissi di interdistanza tra gli elettrodi, consente di sviluppare un Profilo Elettrico Verticale, ossia una *tomografia* elettrica che si sviluppa lungo una determinata linea sul terreno.

Tale configurazione è particolarmente efficace per l'individuazione di discontinuità di *resistività* sia in profondità che laterali al terreno ed in condizioni di presenza d'acqua di falda. Consente quindi di delimitare, in sezione e quindi in volume, attraverso un'opportuna interpretazione dei valori, anomalie locali generate da strutture localizzate come corpi di discarica, tracce di dispersione di inquinanti, strutture in generale.



- Signal-to-noise ratio
- Electromagnetic coupling
- Sensitivity to lateral location
- Resolution of steeply dipping structures
- Resolution of horizontal structures
- Depth of exploration
- Sensitivity to depth of target
- Sensitivity to dip
- Sensitivity to surficial inhomogeneities, sounding
- Sensitivity to surficial inhomogeneities, profiling
- Sensitivity to bedrock topography
- Sensitivity to lateral effects
- Shielding by uniform conductive overburden
- Sensitivity to topography

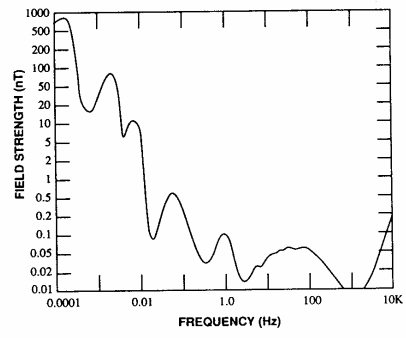
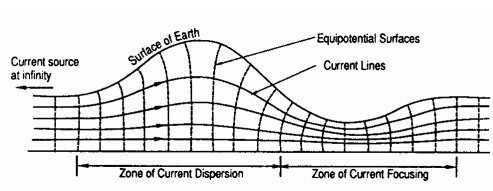


FIG. A7. Fattori che influenzano la scelta della configurazione elettroica nei rilievi di *resistività* e di *caricabilità* del terreno (a sinistra) (da Ward, 1990). Spettro del campo magnetico generale, *cultural noise* (a destra). (da Campbell, 1967)



Passive	Active
Fences	Power lines
Pipelines	Telephone lines
Power lines	Electrified rails
Telephone lines	Radio, TV, radar transmitters
Rails	

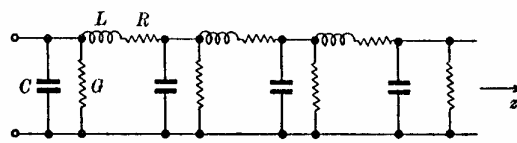
FIG. A8. Influenza della topografia sulla distribuzione delle *superfici equipotenziali* e delle *linee di corrente* (a sinistra). (da Fox *et al.*, 1980). Sorgenti di effetti d'interferenza d'origine antropica, *cultural noise* (a destra). (da Ward, 1990)

## B. Caricabilità o Polarizzazione Indotta

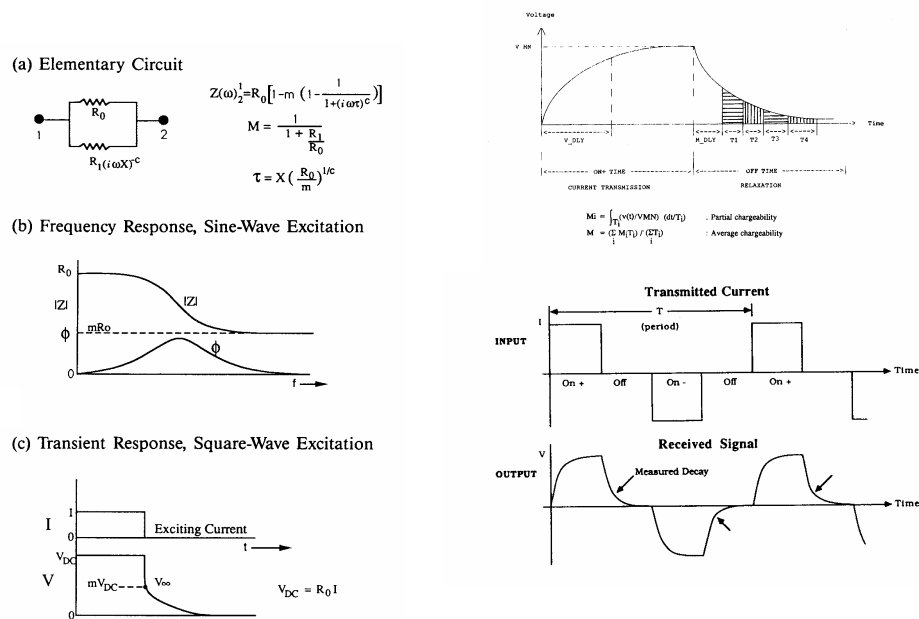
Il metodo della *polarizzazione indotta I.P. (Induced Polarization o Polarisation Induite)* si applica attualmente contemporaneamente al metodo della tomografia elettrica di resistività.

La Polarizzazione Indotta fu sviluppata dapprima per la prospezione di piccole concentrazioni di elementi metallici, disseminati in *layer*, nell'ambito di ricerche per l'esplorazione mineraria.

Le prime applicazioni in campo ambientale risalgono agli anni '70 (Angoran *et al.*, 1974; Towle *et al.*, 1985; Zonge *et al.*, 1985; Hughes *et al.*, 1986; Anderson *et al.*, 1988).



**FIG. B1.** Una porzione di terreno percorsa da *corrente elettrica in frequenza* può essere rappresentata schematicamente come una *linea di trasmissione a parametri distribuiti*. C = Capacità; L = Induttanza; R = Resistenza; G = Conduttanza; z = direzione dell'asse lungo il quale il mezzo risulta percorso da corrente. (disegno da Stratton, 1941)



**FIG. B2.** Modello di circuito semplificato di una porzione di terreno. (a) Circuito elementare; (b) applicazione di *corrente sinusoidale*: Z = ampiezza,  $\phi$  = fase; (c) applicazione di *corrente quadra*: V = tensione iniziale e residua di "caricabilità" (a sinistra). (da Pelton *et al.*, 1978). Forma dell'onda trasmessa Tx ed in ricezione Rx (a destra). (da Ward, 1990)

La *polarizzazione indotta* è un fenomeno generato dalla stimolazione di una corrente elettrica che viene osservata dopo l'applicazione di una tensione al terreno. Il metodo si basa sull'osservazione della curva di decadimento del potenziale, susseguente all'interruzione della corrente immessa, cioè sulla misura della "caricabilità" residua trattenuta dal mezzo d'indagine sottoposto a corrente.

Per un terreno omogeneo di dimensioni infinite, il tempo di decadimento è funzione della *resistività* del terreno e non cambia al variare della coppia dei punti tra i quali si misura la differenza del potenziale. Se nel terreno è incluso un corpo metallico o con proprietà analoghe, si verificano anomalie nel decadimento elettrico, in funzione del tempo. Lo stesso fenomeno si osserva anche per polarizzazione di contaminanti organici che possono eventualmente trovarsi nel terreno di un sito contaminato. La configurazione tipica per l'acquisizione dei dati di questo tipo varia in funzione di numerose variabili. Solitamente I poli elettrodi sono distanziati tra loro di un multiplo  $n$  ( $n^\circ$ ) di  $a$  (m). La profondità d'indagine è funzione della distanza tra i due poli ( $n \times a$ ). Sono generalmente utilizzati più valori di  $n$  consentendo di effettuare *pseudosezioni* di *polarizzabilità* del terreno.

I fenomeni che avvengono a livello microscopico nel materiale sottoposto a corrente elettrica sono globalmente di due tipi: *polarizzazione elettrodica* e *polarizzazione di membrana*.

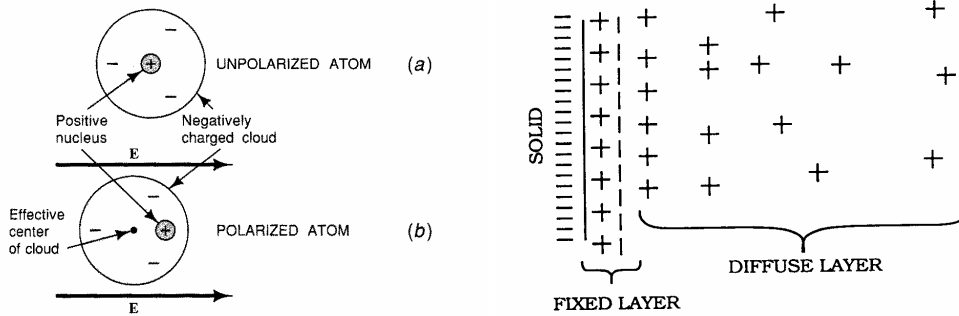
### **B.1 Polarizzazione elettrodica**

Ogni volta in cui cambia la modalità di conduzione di una corrente, per esempio da *ionica* a *metallica*, viene richiesta energia dal sistema affinché della corrente fluisca nella nuova interfaccia. Questa barriera costituisce una *impedenza elettrica* (Schelkunoff, 1938). Le superfici della maggior parte dei solidi possiedono attrazione molto modesta tra ioni e cationi. Nelle immediate vicinanze della superficie esterna del solido è presente uno strato di ioni, essenzialmente immobili, costituito da uno o da alcuni, in numero, strati molecolari di spessore.

Nelle immediate vicinanze di tale stratificazione c'è anche un gruppo di ioni relativamente mobili, di segno di carica uguale od opposto, conosciuto come strato di *diffusione*. Il numero di ioni anomali in questa zona decresce esponenzialmente verso l'esterno, a partire dallo strato verso la concentrazione ionica del liquido. La particolare distribuzione degli ioni illustrata è solo una tra quelle possibili; risulta essere però la più comune.

Mentre le cariche disposte sulla stratificazione fissa sono abbastanza stabili al movimento, le cariche sulla stratificazione diffusa sono funzione della temperatura, della concentrazione di ioni presenti nell'elettrolita allo stato normale (cioè non sottoposto a corrente elettrica), della valenza elettronica e della *costante dielettrica* del mezzo.

Ci sono due circuiti possibili per cui la corrente può essere trasportata attraverso le stratificazioni descritte, cioè attraverso l'elettrolita oppure per conduzione "metallica" (v. Fig. B1.1).

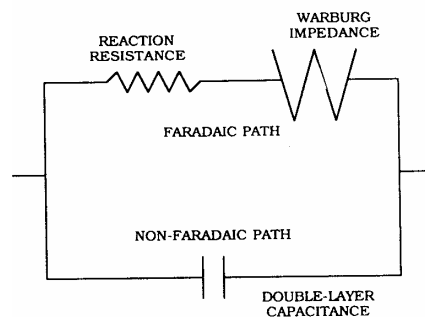


**FIG. B1.1.** (a) Atomo in equilibrio; (b) atomo polarizzato per applicazione di un *campo elettrico* (a sinistra). (Kraus, 1992). Teorica distribuzione anomala degli ioni all'interfaccia solido - liquido (a destra). (Ward, 1990)

Il percorso di tipo di *Faraday* e quello *non-Faraday*. Il passaggio di corrente nel tipo *Faraday* è il risultato di una reazione elettrochimica come l'ossidazione o la riduzione di alcuni ioni. Si può sviluppare la diffusione degli ioni dall'interfaccia. La carica viene fisicamente trasportata dal movimento degli elettroni.

Nel caso *non-Faraday*, le particelle cariche non attraversano l'interfaccia; piuttosto una corrente si genera dall'alternarsi dei processi di carica e scarica delle due stratificazioni. Questo processo si può rappresentare come un fenomeno di tipo *capacitivo*, con variazione di *impedenza* al variare della frequenza.

Nel tipo *Faraday*, l'*impedenza* associata al trasferimento elettrico è rappresentata da una reazione di *resistenza*. Il processo di diffusione di ioni non è invece rappresentabile così semplicemente come da una combinazione di resistori e di capacità. Esso è riferito ad una *impedenza* detta di *Warburg*, la cui intensità varia inversamente con l'inverso della radice quadrata della frequenza. L'*impedenza* d'interfaccia tra molti metalli - elettroliti può quindi essere generalmente descritta in tale maniera.



**FIG. B1.2.** Modello di circuito elettrico di rappresentazione dell'*impedenza interfacciale*. (Ward, 1990)

Per frequenze maggiori di 1000 Hz, la maggior parte delle *correnti* elettriche seguono un percorso di tipo *non-Faraday*; per cui l'*impedenza* di interfaccia cambia, al variare della frequenza, approssimativamente come l'inverso della frequenza. Diminuendo la frequenza, la maggior parte della corrente viene trasportata attraverso il circuito tipo *Faraday* e quindi l'*impedenza* di bassa frequenza varia con la frequenza ( $f$ ) in un intervallo che va da  $f^{-1/2}$  a  $f^0$ , a seconda dell'intensità di impedenza di rapporto *Warburg / Resistenza*.

Queste condizioni si applicano chiaramente ad modello ideale costituito da un *elettrodo* posto in un *elettrolita* puro. Gli stessi concetti sono tuttavia applicabili con buona approssimazione al modello costituito da terreno percorso da corrente, con le varianti per cui gli *elettrodi* (i grani minerali di semi-conduttori) ed *elettroliti* (soluzioni nei pori) sono tutt'altro che chimicamente puri.

Il circuito di (Fig. B1.2) illustra il fenomeno della *polarizzazione indotta*. Tale modello è noto come principio di *Cole-Cole* (1941), schematizzato secondo Pelton *et al.* (1978) nella relazione:

[con  $i = (-1)^{1/2}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $C$  = capacità;  $\tau$  = grandezza dipendente dall'induttanza  $L$  e dalla geometria del sistema]

$$Z(\omega) \cong R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{(1 + i\omega\tau)^C} \right) \right] \cong R - i\omega L$$

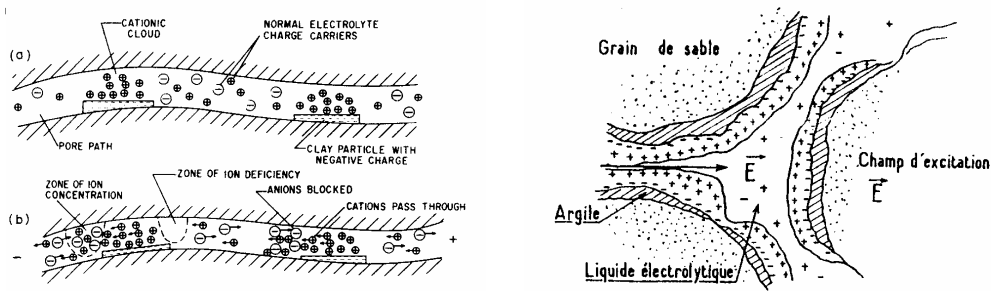
In un processo di *rilassamento*, la *fase* del circuito equivalente raggiunge il massimo nel punto in cui il valore assoluto dell'*impedenza*  $Z$ , attraverso il circuito, decade dalla resistenza  $R_0$  a  $m R_0$ , essendo  $m = (1, 2, 3, \dots)$  e mostra una inflessione nel picco di fase.

## B.2 Polarizzazione di membrana

La *polarizzazione di membrana* è particolarmente importante nelle rocce contenenti una bassa percentuale di argilla nella matrice. L'effetto di questo tipo di polarizzazione aumenta notevolmente in rocce porose in cui le particelle d'argilla bloccano parzialmente il passaggio alle soluzioni di ioni Fig. B2.1. La nuvola cationica di *diffusione* in vicinanza della superficie del minerale argilloso è caratteristica del sistema argilla-elettrolita.

Applicando un potenziale elettrico, le cariche positive si trasportano facilmente attraverso la nube cationica, tuttavia invece le cariche negative trasportate si accumulano (v. Fig. B2.1); esiste quindi una membrana ione-selettiva. All'eliminazione del potenziale elettrico, tutte le cariche ritornano nella loro posizione di equilibrio.

Di conseguenza, una quantità in sovrabbondanza sia di cationi che di anioni si genera ad una estremità della zona di membrana, mentre una carenza di essi si localizza nella parte opposta. Il numero totale delle cariche di un segno non è generalmente significativamente diverso da quelle di segno opposto.



**FIG. B2.1.** Rappresentazione della *polarizzazione di membrana* in roccia contenete minerali argillosi. (a) prima dell'applicazione di un *campo elettrico*; (b) dopo l'applicazione di un *campo elettrico* (a sinistra). (da Ward & Fraser, 1967). Rappresentazione della formazione di una *membrana elettrolitica* selettiva (argilla) per gli ioni della fase liquida generati dall'applicazione di un campo elettrico (a destra). (da Vacquier, 1956)

Questa concentrazione di ioni genera un gradiente opposto al flusso generale creando una generale diminuzione delle cariche mobilitate. Tale diminuzione è tanto più accentuata a variazioni di frequenza moderate (per esempio a 0.1 Hz) rispetto al tempo di diffusione degli ioni tra una zona di membrana e l'altra. Per variazioni rapide rispetto al tempo di diffusione (per esempio 1000 Hz) la mobilità ionica non si riduce sostanzialmente. Quindi la conducibilità elettrica del sistema membrana aumenta all'aumentare della frequenza della corrente.

La maggior parte delle cariche *adsorbite* adiacenti ad un'interfaccia è contenuta entro una distanza  $d$  dalla superficie, per cui (Grahame, 1947):

$$d = \frac{K_e kT}{[2ne^2 v^2]^{1/2}}$$

In cui

$n$  = concentrazione ionica dell'elettrolita allo stato naturale

$v$  = valenza elettronica degli ioni allo stato naturale

$e$  = carica elementare

$K_e$  = *permeabilità dielettrica relativa* del mezzo fluido

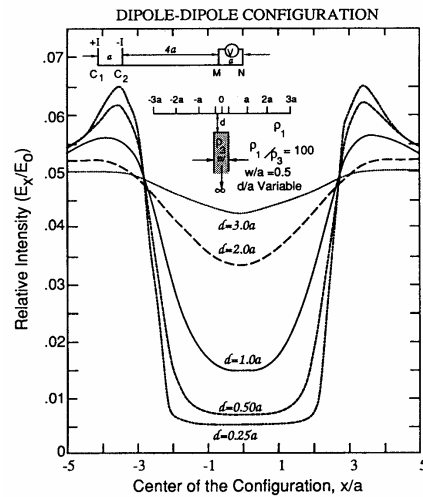
$k$  = costante di *Boltzman*,  $1.38054 \times 10^{-16}$  Erg/°K

$T$  = temperatura

Per l'esplorazione ambientale è importante notare come lo spessore  $d$  della stratificazione aumenti con la *permeabilità dielettrica* e con la temperatura e diminuisca invece con la concentrazione ionica e con la valenza degli elementi. In *plumes* di contaminanti del terreno e nelle dispersioni di agenti chimici, i fluidi sia tossici che non tossici possono notevolmente influenzare la distanza  $d$ .

Maggiore è il valore di tale distanza, maggiore è la probabilità che i pori del terreno possano essere bloccati da una stratificazione di diffusione. La polarizzazione indotta è quindi tanto maggiore quanto  $d$  risulta grande. Tale considerazione vale sia per la polarizzazione di membrana che per quella elettrodica.

	$\rho_a$	IP
Abandoned mineshafts—detection	X	X
Archaeological site—delineation	X	
Chemical waste disposal—contamination plumes	X	?
Cropland salinization and desalinization— changes with time and space	X	
Dams—integrity of foundation, status	X	X
Earthquake risk—evaluation of fault movement	X	X
Engineering geology—mapping	X	X
Faults—detection, delineation	X	X
Foundations—integrity, soil/bedrock interface	X	
Groundwater—delineation, evaluation, protection, contamination	X	X
Karst topography—soil/bedrock interface	X	X
Landfills—delineation, contamination plumes, drums	X	X
Landslides—delineation, water content	X	
Materials exploration—detection and delineation	X	X
Nuclear waste disposal—pre-site delineation	X	X
Oil shale retort monitoring	X	X
Permafrost—delineation of active layer and ice lenses	X	
Rippability—delineation of weathered rock	X	?
Road siting—soil/bedrock interface	X	X
Tunnels and cavities—detection and delineation	X	



**FIG. B2.2.** Campi di applicazione dei metodi di *resistività* e di *polarizzazione indotta* (a sinistra). (da Ward, 1990). Configurazione dipolo-ipolo. Profili di rappresentazione del rapporto dell'intensità del campo elettrico rispetto a quello primario  $E_0 = I\rho_1/6.25 \pi a^2$ , a varie profondità, su una struttura conduttiva verticale (a destra). (da Dey *et al.*, 1975)

Si ricorda infine come talora si possa incorrere in valori negativi di polarizzazione indotta, come anche di resistività, durante l'acquisizione dati. I valori negativi sono generati da condizioni complesse di strutturazione e configurazione del sistema terreno – strutture presenti – dispositivo. In genere occorrono misure negative a causa di “noise” elettromagnetico, presenza di conduttori nel terreno di forma geometrica particolare, coperture di terreno notevolmente conduttive.

# ELETTROMAGNETICO GEORADAR [GPR]

## PRINCIPIO FISICO

- Si trasmette nel terreno un'onda elettromagnetica di alta frequenza. Corpi, stratificazioni o strutture presenti nel terreno con diversa permeabilità elettrica (costante dielettrica) inducono rifrazioni e riflessioni del campo generando interferenza. Si ricava la velocità di propagazione dell'onda del terreno.
- Si ottengono diagrammi (velocità-tempi) illustranti la morfologia in sezione verticale delle strutture incontrate.

## APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di zone di discarica sepolta
- Individuazione di variazioni laterali del substrato
- Individuazione di dettaglio di cisterne in ferro/c.a. e fusti, di vuoti, di tubazioni ferro, PVC e cls
- Individuazione di dettaglio e mappatura della rete dei sottoservizi, di mura/setti in cls, c.a., muratura
- Studi per la caratterizzazione e la valutazione dello stato di conservazione di manufatti (individuazione fessurazioni, discontinuità, connessioni e giunti metallici, presenza di orizzonti d'alterazione, cavità)
- Profondità d'esplorazione: 0.3, 2, 4, 10 m a seconda del terreno, dell'oggetto da individuare e della configurazione strumentale adottata.

## VANTAGGI E SVANTAGGI

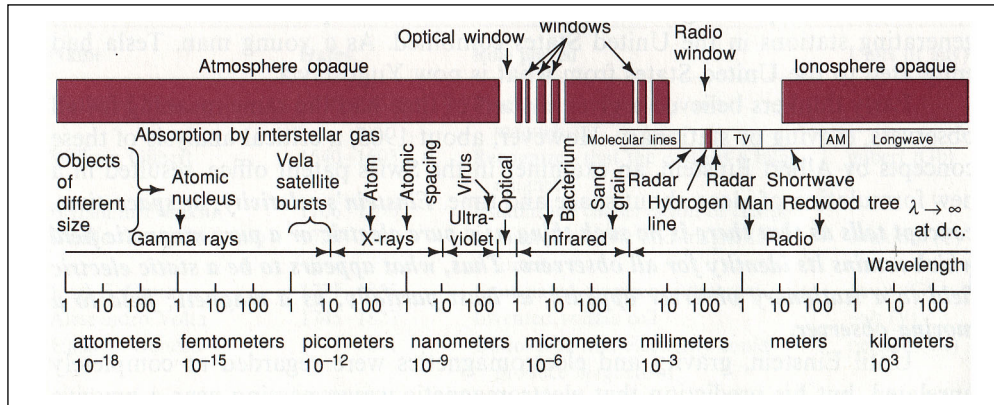
- In terreni di natura argillosa, conduttiva sensu latu, maggiormente ancora nei terreni anche saturi d'acqua, nel caso occorra una risoluzione dell'oggetto da individuare pari a  $\leq 0.5$  m, la profondità d'investigazione può limitarsi a soli 0.5-1.0 m. Perdita di dettaglio con l'aumentare della profondità e limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi
- L'indagine in terreni accidentati e caratterizzati da vegetazione richiede interventi di decespugliamento e preparazione della superficie
- Possibilità d'indagine in luoghi chiusi ed anche su pavimentazioni armate.

## MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti, grid. L'antenna trasmittente può essere trascinata o sospesa sul terreno, a seconda del dettaglio e dell'obiettivo d'indagine
- Scarsa applicabilità e limitazioni in condizioni di terreno umido.

## E. Metodo georadar [GPR]

Il metodo georadar [GPR *Ground Probing Radar*] impiega un dispositivo denominato *klinstron-reflex* per generare impulsi di onde elettromagnetiche (v. Fig. E1. *Spettro delle onde elettromagnetiche*). Le onde vengono irradiate nel terreno e contemporaneamente ricevute, al fine di determinarne alcune caratteristiche di interesse connesse alla presenza di discontinuità fisiche nel suo interno.



**Fig. E1.** *Spettro delle onde elettromagnetiche* (da KRAUS, *Electromagnetics*, 1992; modificata). [lunghezza d'onda  $\lambda = c \cdot f^{-1}$ , in cui:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ,  $f$ : frequenza (Hz)].

La strumentazione invia, attraverso l'antenna, un impulso multifrequenza nel mezzo d'indagine. Eventuali discontinuità fisiche interferiscono con i campi dello spettro primario generando fenomeni di diffrazione. Le onde elettromagnetiche secondarie, distorte sia in *frequenza* che in *fase*, vengono ricevute dallo stesso apparato (v. Fig. E2. *Rappresentazione schematica del metodo GPR*).

Per un mezzo a conduttività finita, nelle condizioni di frequenza impiegate, la *costante di propagazione*  $K$  risulta un numero complesso (parte *reale* + parte *immaginaria*). Essa vale:

$$k = \alpha + i\beta$$

trovandosi nella relazione fondamentale di propagazione di un'onda, per il vettore campo elettrico  $E$ ,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

la *costante di propagazione*  $k$  risulta quindi caratterizzata dalle seguenti variabili proprie di ciascun mezzo di propagazione:

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2\omega^2}} + 1 \right) \right]^{1/2}$$

$$\beta = \omega \left[ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2\omega^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

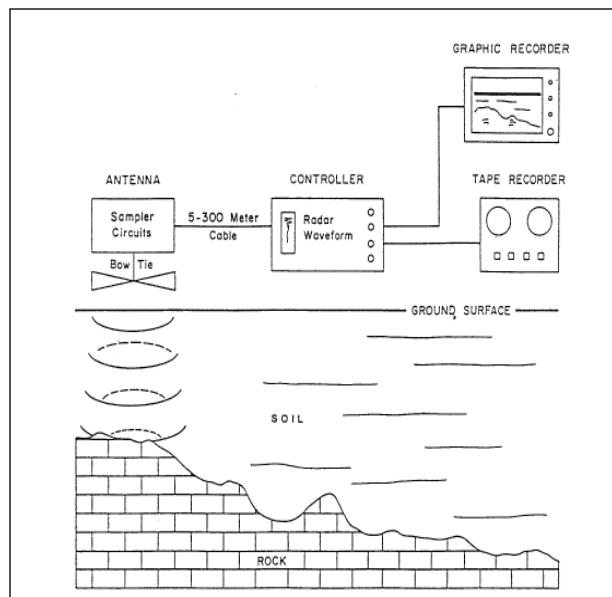
Essendo:

$\omega = 2\pi \cdot f$  (Hz), frequenza angolare

$\mu$  = permeabilità magnetica (H m - 1)

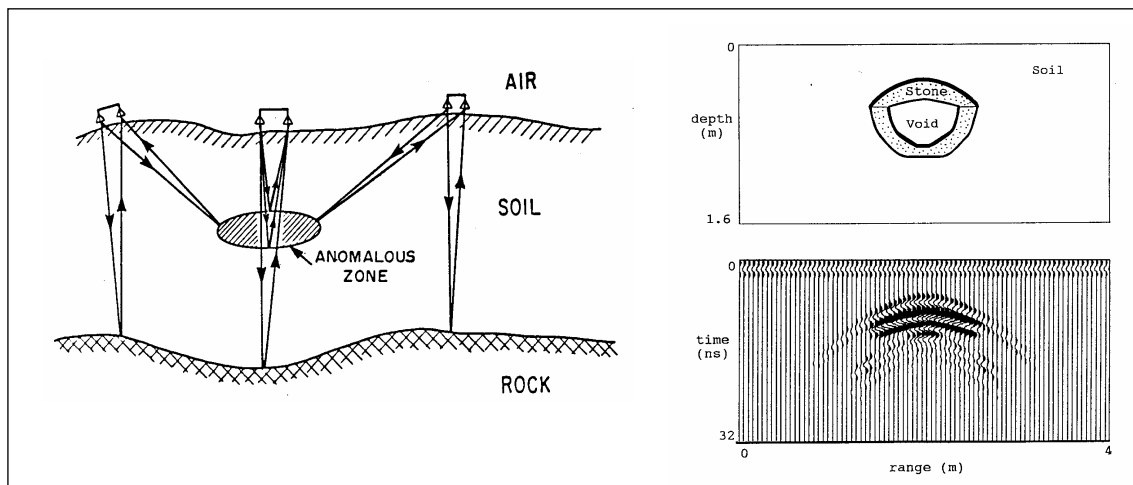
$\sigma$  = conducibilità elettrica (S m - 1)

$\varepsilon$  = permeabilità elettrica (F m - 1)



**Fig. E2.** Rappresentazione schematica del metodo Ground Penetrating Radar GPR.  
(da BENSON, GLACCUM & NOEL, *Project Report to U.S. E.P.A.*, 1982; modificata).

Il risultato dell'elaborazione strumentale è una serie di diagrammi, *spikes*, la cui intensità dipende da quella del contrasto tra gli orizzonti attraversati oltre che dall'impostazione strumentale; l'ubicazione dei radargrammi dipende dalla velocità di propagazione delle onde nei materiali.



**Fig. E3.** Rappresentazione schematica dei vettori d'onda in relazione ad un bersaglio nel terreno ed alla stratificazione, a sinistra. (da DAVIS J.L. & ANNAN A.P., *Geophysical Prospecting*, 1989). Simulazione GPR generata da una struttura tipo sepoltura, a destra. (da GOODMAN D., *Geophysics*, 1994)

Conoscendo le principali grandezze fisiche elettromagnetiche dei terreni attraversati è possibile trasformare la sezione distanze-tempi in una sezione distanze-profondità. La profondità massima di esplorazione risulta funzione della frequenza dominante del segnale emesso e della resistività elettrica del terreno.

L'unità di controllo e il *display* sono collegati mediante un cavo al trasduttore; i dati vengono visualizzati direttamente sullo schermo LCD a matrice attiva sotto forma di *radargrammi* a colori e registrati su *hard disk* interno, per poi essere trasferiti al computer di elaborazione.

Il successivo *processing* dei dati viene realizzato con *software* specifici. L'elaborazione consente di applicare ai segnali registrati funzioni matematiche utili per la *normalizzazione topografica* oppure per evidenziare le strutture individuate. Oltre a semplici funzioni di *filtraggio*, si applicano processi di *migrazione*, *deconvoluzione*, e *correzione statica*.

# ELETTROMAGNETICO

## [EM RESISTIVITY]

### PRINCIPIO FISICO

- Si trasmette nel terreno una corrente elettrica di bassa frequenza. Corpi conduttivi presenti nel terreno inducono campi secondari che interferiscono generando cambiamenti in fase ed in ampiezza del campo primario. Si ricava la conducibilità del terreno e lo sfasamento dell'onda elettromagnetica generata da corpi metallici.
- Si ottengono cartografie che illustrano in planimetria per isolinee la conducibilità elettrica e lo sfasamento dell'onda elettromagnetica.

### APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di zone di discarica sepolta, di zone di scavo del terreno al meglio se caratterizzati dalla presenza di materiali conduttivi, anche in debolissima concentrazione (composti inorganici con: metalli, metalli pesanti, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>=</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Oli Minerali contenenti metalli e/o solfati, melme bituminose acide, fanghi,...). Il metodo non si presta all'individuazione di dispersioni di gasolio, benzina, solventi, ecc. che non siano elettricamente conduttivi
- Individuazione di cisterne in ferro/c.a., fusti e latte metalliche, in plastica se pieni di materiale conduttivo, tubazioni ferro in profondità
- Individuazione di vuoti, macerie, materiali di riporto
- Individuazione del *plumen* di dispersione nel terreno
- Caratterizzazione planimetrica degli spessori di coperture di terreno, detritiche e di depositi alluvionali previa taratura con stratigrafie.
- Profondità d'esplorazione: 3, 5, 7, 10, 30 m a seconda della configurazione, della strumentazione adottata e della natura del terreno.

### VANTAGGI E SVANTAGGI

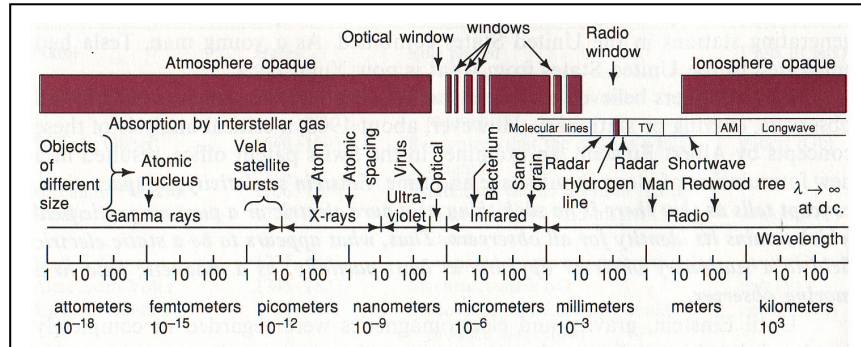
- Influenza di strutture quali recinzioni, tubazioni, c.a. e di edifici vicini posti a circa 5 m di distanza.
- Limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi
- Facile trasporto anche in terreni accidentati e velocità di acquisizione dati.

### MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti, grid 2x2/4x4 m; misurazione per punti lungo il tracciato o in continuo; possibilità di georeferenziazione con sistema GPS
- Si applica al meglio in condizioni di terreno asciutto. In terreno fortemente argilloso la profondità d'esplorazione si riduce del 30-40%
- Si può utilizzare anche su piazzali ad asfalto e calcestruzzo, purché il cemento non sia armato con rete metallica.

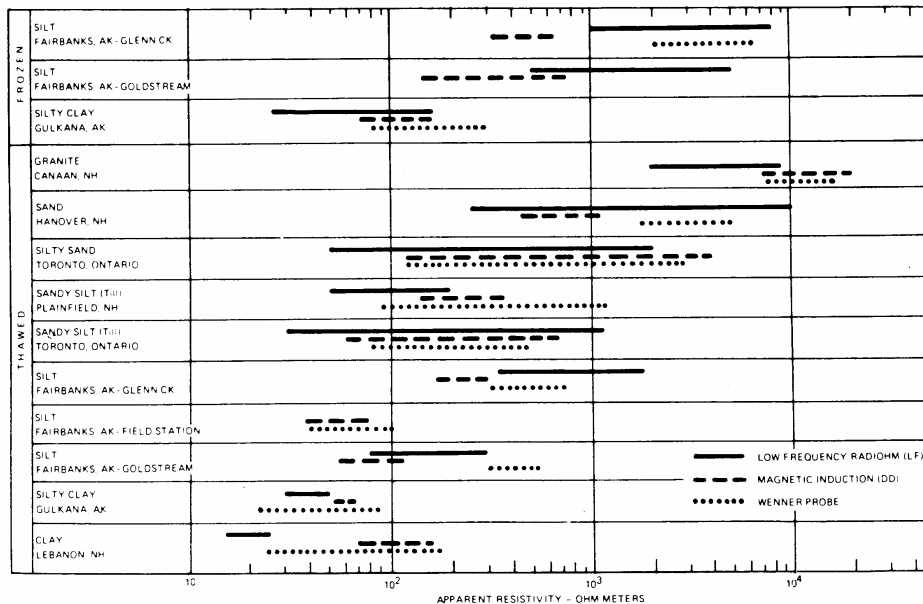
## D. Metodo elettromagnetico ad induzione EM-Resistivity

Il metodo elettromagnetico ad induzione EM-Resistivity impiega onde elettromagnetiche in radio frequenza che vengono trasmesse nel terreno.



**FIG. D1.** Spettro delle onde elettromagnetiche. [lunghezza d'onda  $\lambda = c \cdot f^{-1}$ , in cui:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ,  $f$ : frequenza (Hz)]. (da KRAUS, 1992; modificata)

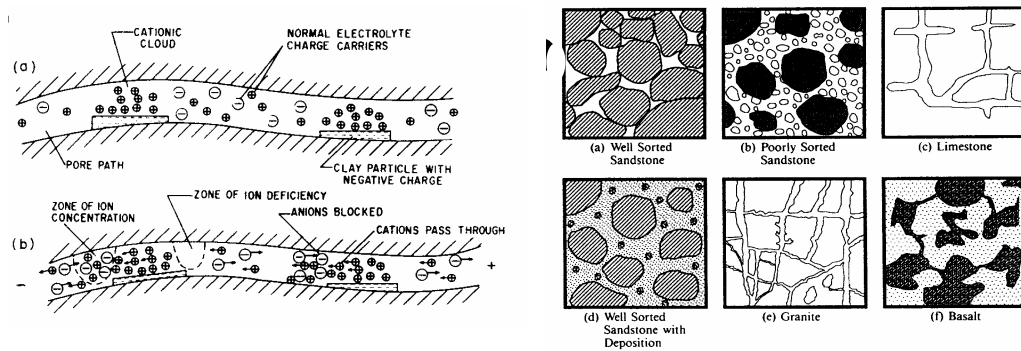
Il metodo utilizzato si configura tra quelli di carattere innovativo nella prospezione geofisica del terreno e viene attualmente impiegato sia per fini ambientali che geotecnici *sensu lato*.



**FIG. D2.** Intervalli tipici di variabilità della resistività di rocce e di suoli ottenuti con metodi diversi (a sinistra). (da Sellman *et al.* 1976). (da WARD & FRASER, 1967)

I principali vantaggi offerti dal metodo sono:

1. possibilità d'applicazione in aree topograficamente accidentate;
2. tempi di indagine sul terreno decisamente più brevi rispetto ai metodi tradizionali;
3. spiccata capacità di evidenziare discontinuità (superfici, strutture) a forte sviluppo verticale.

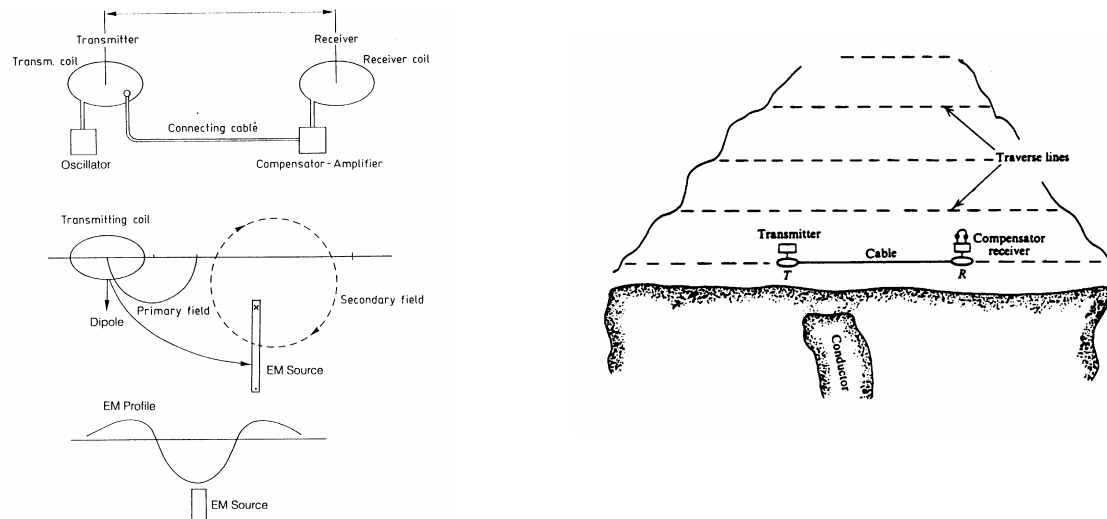


**FIG. D3.** Polarizzazione elettrica in una roccia contenente minerali argillosi. (a) Prima, (b) dopo l'applicazione di un campo elettrico (a sinistra); tessiture diversificate delle rocce (a destra). (da WARD & FRASER, 1967)

Clay Alteration	↕	Weathering	↕
Dissolution	↕	Induration	↑
Faulting	↕	Carbonate Precipitation	↑
Salt Water Intrusion	↕	Silicification	↑
Shearing	↕	Metamorphism	↕
↕ Decreases	↑ Increases	↕ Increases or Decreases	

**FIG. D4.** Principali processi geologici che influenzano la resistività delle rocce soprattutto se misurata con metodi elettromagnetici (da Ward, 1990).

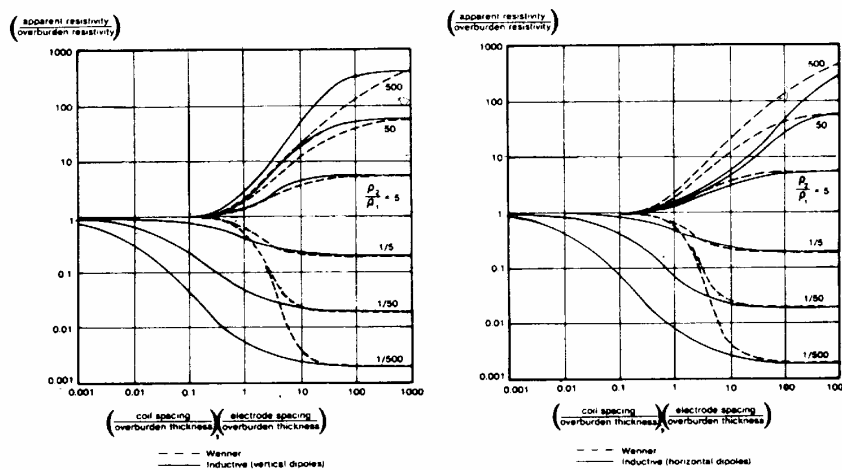
Il metodo adottato consiste nell'invio, attraverso un'antenna a dipolo, di un segnale elettromagnetico, in frequenza VLF (*Very Low Frequency*) verso il mezzo d'indagine. I segnali in uscita e in ingresso vengono elaborati nelle loro componenti fondamentali con restituzione della resistività elettrica "apparente" del mezzo alla propagazione.



**FIG. D5.** Principio di funzionamento dei metodi elettromagnetici (a sinistra). (da D. VOGELSANG, 1991). Modalità di realizzazione di un rilievo elettromagnetico tipo (a destra). (da W.M. TELFORD *et al.*, 1976)

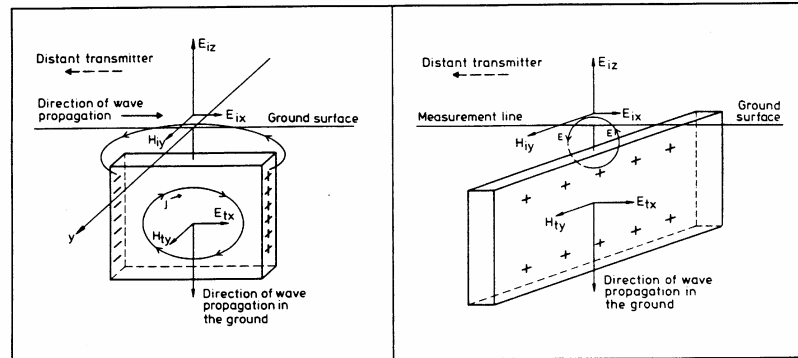
Eventuali discontinuità fisiche interferiscono con i campi dello spettro primario generando fenomeni di *dispersione* e di *diffrazione*. Le onde elettromagnetiche secondarie, distorte sia in *frequenza* che in *fase*, vengono ricevute dallo stesso apparato strumentale.

Come illustra la Fig. D7, i campi E elettrico ed H magnetico delle onde elettromagnetiche, per certe caratteristiche di configurazione di emissione, sono descritti, in un determinato istante  $t$ , da onde polarizzate verticalmente.



**FIG. D6.** Confronto tra curve di *resistività a due strati* ottenute con dispositivo D.C. Wenner, a sinistra, e ad induzione elettromagnetica, a destra. (da J.D. MCNEILL, 1980)

E' noto che, in prossimità del suolo, il campo  $E$  è inclinato, rispetto alla verticale, verso la direzione  $X$  di propagazione dell'onda. Questo avviene per gli effetti della propagazione di onde elettromagnetiche in prossimità della superficie di separazione tra un dielettrico ed un conduttore, ovvero sulla superficie terrestre (ZENNECK, 1908; BURROWS, 1936). L'angolo di inclinazione, come sarà descritto, dipende dalle caratteristiche elettriche del suolo.



**FIG. D7.** Configurazioni possibili del campo elettromagnetico rispetto alla disposizione geometrica di una struttura teorica. (da D.S. PARASNIS, 1972)

Al suolo, la componente orizzontale del campo elettrico, a causa della conducibilità elettrica propria del mezzo che è molto maggiore di quella dell'aria, dà luogo ad una corrente di conduzione. Essa è diretta lungo la direzione di propagazione dell'onda ed è sfasata rispetto al campo elettrico dell'onda incidente.

Le ampiezze dei vettori  $\mathbf{E}$  ed  $\mathbf{H}$  in ciascun mezzo sono legate fra loro dalla relazione [STRATTON, 1941, *Electromagnetic Theory*; SCHELKUNOFF S. A., 1938, *The Impedance Concept and Its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption*]:

$$\mathbf{H} = (k^{1/2} / \mu \omega) \mathbf{E} \quad (1)$$

dove  $k$  è il modulo del vettore d'onda di propagazione,  $\mu$  è la permeabilità magnetica del mezzo ed  $\omega$  la pulsazione angolare; per un mezzo conduttore, di conducibilità elettrica  $\sigma$  vale la relazione [STRATTON J. A., 1941]

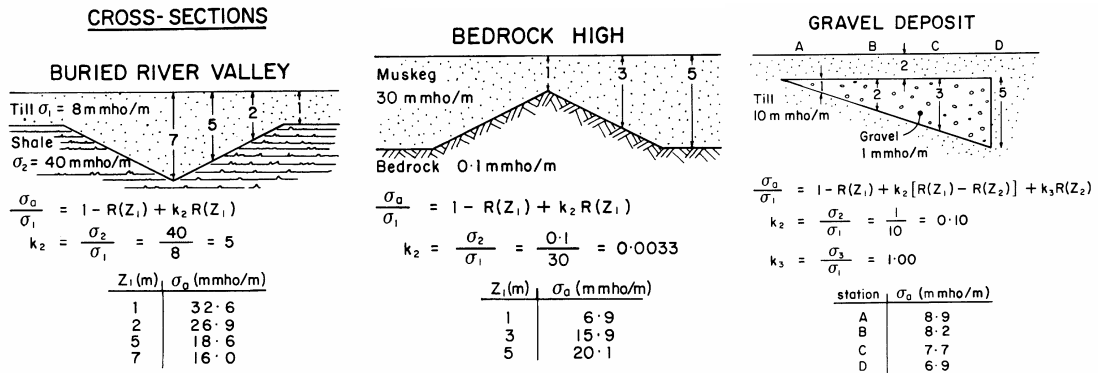
$$k^{1/2} / \mu \omega = (\sigma / \mu \omega)^{1/2}. \quad (2)$$

Poiché  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , ove  $\mu_r$  è la permeabilità magnetica relativa del mezzo e  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  ( $\text{H m}^{-1}$ ), la (2) può essere riscritta nella forma:

$$k^{1/2} / \mu \omega = 355.8 (\sigma / f \mu_r) \quad (3)$$

ove  $f = \omega / 2\pi$  è la frequenza dell'onda incidente.

La *resistività* descrive lo stato di *conducibilità* del terreno indagato, funzione principalmente della natura chimica ed elettrolitica del terreno stesso. I valori di *resistività* risultano fortemente variabili a seconda quindi dei materiali e della presenza di terreno e roccia, di vuoti al loro interno, di roccia con copertura detritica fine a spessore variabile, di roccia cataclastica frammista a terreno fine, in condizioni di diversa umidità (v. Figg. D4, D8).



**FIG. D8.** Le figure descrivono l'efficacia del metodo elettromagnetico EM-Resistivity nella risoluzione di strutture geologiche contraddistinte da discontinuità laterale di spessore. (da J.D. MCNEILL, 1980)

# MAGNETOMETRIA [M]

## PRINCIPIO FISICO

- Si basa sulla misura del Campo Magnetico Terrestre [unità gamma, Tesla]. In particolare sull'interferenza generata dagli oggetti ferromagnetici.
- Le misure possono essere riferite ad una stazione fissa sul sito oppure effettuate in configurazione gradiometrica al fine di escludere variazioni di campo dovute alle fluttuazioni naturali del Campo Magnetico Terrestre
- Si ottengono cartografie che illustrano in planimetria per isolinee il gradiente/Campo Magnetico Terrestre.

## APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di contenitori metallici ferrosi
- Individuazione di tubazioni in ferro e cavità o corpi contenenti materiali ferrosi
- Profondità d'esplorazione: singoli fusti fino a 5-6 m di profondità, ammassi di fusti fino anche a 20 m di profondità.

## VANTAGGI E SVANTAGGI

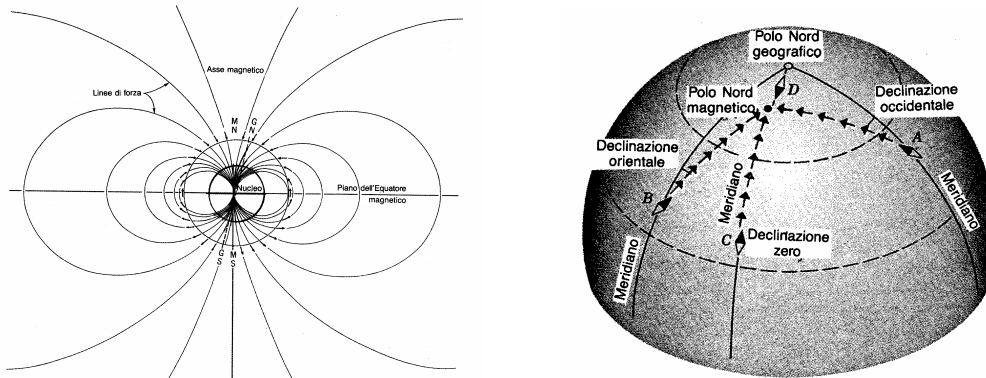
- L'indagine è limitata esclusivamente all'individuazione di materiali ferrosi (ferromagnetici)
- Limitazioni notevoli dovute alla interferenza con tubazioni, recinzioni o altri oggetti in ferro eventualmente presenti nell'area
- Il metodo è facilmente applicabile anche per indagini su bacini idrici attraverso l'impiego di un'imbarcazione.

## MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti (es. 2x2; 4x4 m grid), a seconda della risoluzione richiesta. Misure per punti o in continuo lungo i tracciati dei percorsi.
- La sonda è sospesa sul terreno. Possibilità di georeferenziazione con sistema GPS.

### C. Metodo Magnetometria

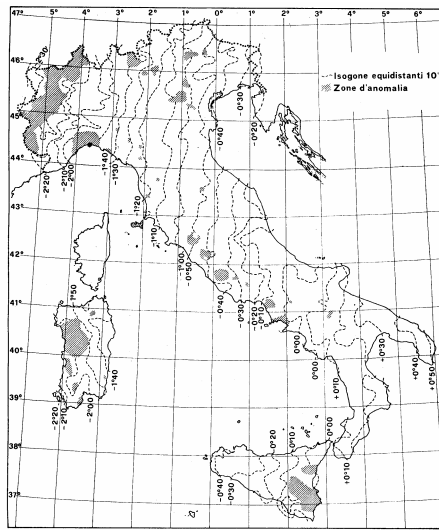
Le misure del campo magnetico terrestre sono utilizzate per l'individuazione di strutture geologiche a scala regionale e nell'esplorazione mineraria. Intensificando invece le misurazioni rispetto l'area d'indagine e soprattutto incrementando la sensibilità strumentale, si impiegano per la localizzazione di tubazioni, di siti archeologici, di materiali metallici e di discontinuità sepolte nella prospezione ambientale.



**FIG. C1.** Le linee di forza del campo magnetico terrestre (a sinistra). La declinazione magnetica relativa alla posizione dell'osservatore rispetto ai poli magnetici e geografici (a destra). (da Strahler, 1963)

Il magnetometro misura l'intensità del campo magnetico terrestre. La presenza di materiale *ferromagnetico* crea delle variazioni nel campo magnetico locale consentendo così l'individuazione di oggetti. La risposta di un magnetometro dipende dalla massa e dalla profondità a cui si trova l'oggetto metallico. Metalli *non-ferromagnetici*, quali l'alluminio, il rame e lo stagno, non inducono anomalie del campo magnetico.

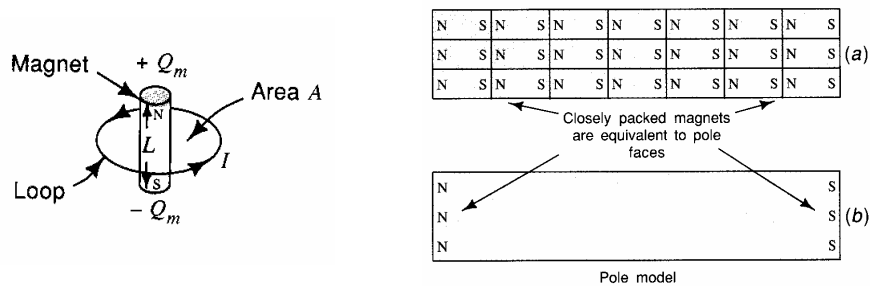
La forma delle linee di forza del *campo magnetico terrestre* sono simili a quelle che potrebbe creare una barra magnetica disposta verticalmente dal polo sud al polo nord. L'intensità del campo magnetico totale varia considerevolmente, attraverso ciascun continente. Alle nostre latitudini le variazioni possono avere valori di circa 50.000  $\gamma$  gamma (1 gamma  $\gamma = 1$  nanoTesla nT) e angoli d'inclinazione di circa 60-70° rispetto l'orizzontale. Esistono inoltre variazioni giornaliere dovute alle esplosioni della corona solare, *sunspots*, e a perturbazioni della ionosfera, tempeste magnetiche, che possono produrre anche rapide ed intense variazioni.



Material	Susceptibility $\times 10^3$ (SI)*
Air	$\sim 0$
Quartz	-0.01
Rock Salt	-0.01
Calcite	-0.001 - 0.01
Sphalerite	0.4
Pyrite	0.05 - 5
Hematite	0.5 - 35
Ilmenite	300 - 3500
Magnetite	1200 - 19,200
Limestones	0 - 3
Sandstones	0 - 20
Shales	0.01 - 15
Schist	0.3 - 3
Gneiss	0.1 - 25
Slate	0 - 35
Granite	0 - 50
Gabbro	1 - 90
Basalt	0.2 - 175
Peridotite	90 - 200

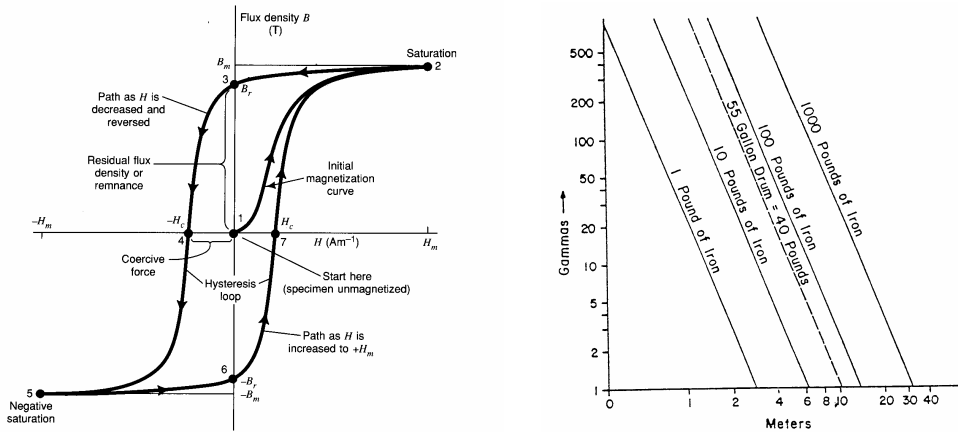
**FIG. C2.** La declinazione magnetica in Italia: carta isogonica d'Italia per il 1980 (a sinistra). (da Strahler, 1963). Valori tipici di suscettività magnetica  $\chi$  delle rocce.  $M = \chi \cdot H$  [in cui  $M =$  momento magnetico indotto per unità di volume;  $H =$  campo magnetizzante] (a destra). (da Parkhomenko, 1967)

Inoltre, nell'esplorazione di aree localizzate, le condizioni delle proprietà magnetiche diversificate dei terreni delle rocce e dei materiali inducono anomalie magnetiche. Una concentrazione di minerali ferrosi o di oggetti sepolti producono variazioni del campo magnetico locale che possono essere rilevate in superficie.



**FIG. C3.** Magnete elementare di momento  $Q_m L$  e corrente equivalente di momento  $I \cdot A$ . (a sinistra). Ogni singolo effetto di dipolo magnetico elementare di un magnete uniforme (a) produce un unico magnete con un unico polo sud e polo nord magnetici (b) (a destra). (da Kraus, 1992)

Generalmente le variazioni di campo magnetico che si registrano in ricerche di tipo ambientale vanno da 1 a qualche centinaia di unità gamma  $\gamma$  per piccole localizzazioni a diverse profondità. Accumuli di fusti possono creare anomalie da 100 a 1.000  $\gamma$  e oltre.

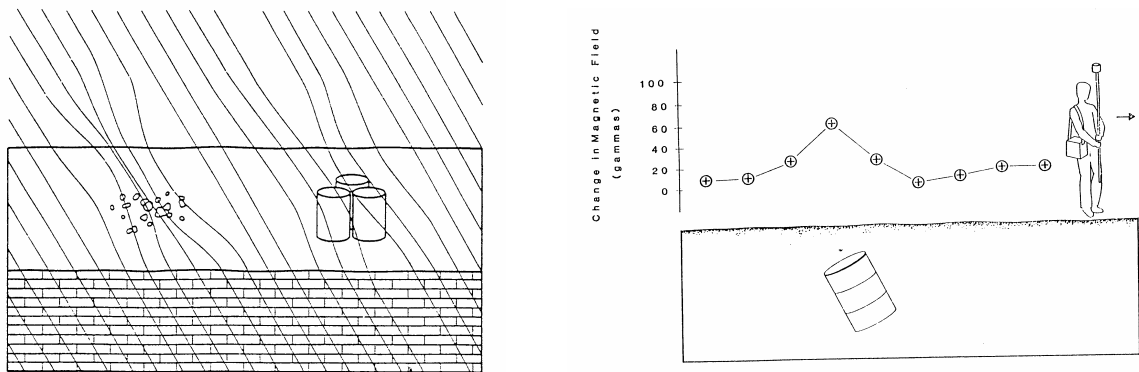


**FIG. C4.** La Curva d'isteresi magnetica illustra la variazione di magnetizzazione  $B = \mu_0\mu_r \cdot H$  di un materiale ferromagnetico sottoposto a campo magnetico  $H$  variabile in intensità e verso nel tempo ed essendo  $\mu_r$  la permeabilità magnetica relativa del mezzo e  $\mu_0$  quella del vuoto (a sinistra). (da Kraus, 1992). Campo magnetico totale espresso in unità  $\gamma$ , registrato con un magnetometro relativamente ad oggetti di diversa massa e diversa profondità nel terreno (a destra). (da Benson *et al.*, 1982)

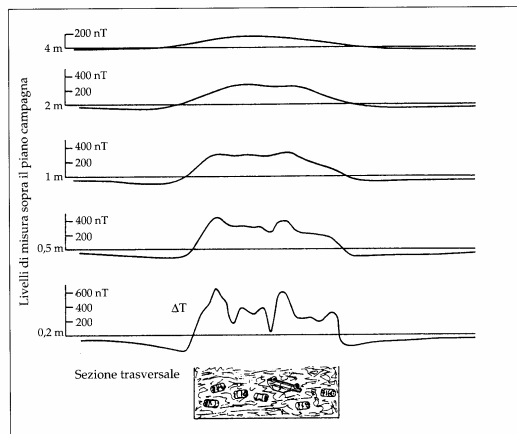
Esistono molti tipi diversi di magnetometri. In campo ambientale vengono utilizzati generalmente due tipi: il magnetometro *fluxgate* ed il magnetometro a protoni. Nel magnetometro *fluxgate* il sensore è costituito da un nucleo ferromagnetico che subisce variazioni di saturazione di magnetizzazione con l'ambiente circostante. Tali variazioni sono proporzionali all'intensità del campo. Elettronicamente le variazioni vengono amplificate e registrate. Il *fluxgate* è molto sensibile a variazioni d'inclinazione dello strumento cosicché viene accoppiato con un *gradiometro* per l'orientazione, oppure vengono combinati due *fluxgate* insieme con un *gradiometro*.

Nel magnetometro a protoni viene generato un campo magnetico intorno ad un fluido di una sostanza particolare. Il campo creato produce una orientazione dei protoni del fluido. Quando il campo magnetico viene annullato, il movimento di *spin* dei protoni si orienta secondo il campo magnetico totale. La loro precessione nucleare genera un segnale la cui frequenza è proporzionale all'intensità del campo. Viene così misurata direttamente l'intensità del campo magnetico locale.

Parecchi fattori influenzano la risposta di un magnetometro in particolare la massa e la profondità. Se si usa un gradiometro si registrano elevatissime variazioni, a causa della elevata sensibilità strumentale. Un altro fattore rilevante è l'influenza dovuta a materiale dotato di magnetizzazione residua che può innalzare o diminuire la risposta totale dell'oggetto al campo magnetico terrestre che risulta di difficile interpretazione. Inoltre, anche la forma e l'orientazione dell'oggetto metallico influenzano l'intensità e la forma dell'anomalia risultante.



**FIG. C5.** Distorsione delle linee di forza del campo magnetico terrestre dovuta a concentrazioni di ossidi di ferro naturali nel terreno e ad oggetti in ferro sepolti (a sinistra). Profilo delle misure d'anomalia magnetometrica dovuta ad un fusto sepolto (a destra). (da Benson *et al.*, 1982)



	TOTAL FIELD MEASUREMENTS		GRADIENT MEASUREMENTS		Typical Sensitivity
	Station	Continuous	Station	Continuous	
FLUXGATE	NA	NA	YES	YES <sup>1</sup>	0.1 gammas/meter to 20 gammas/meter gradient
PROTON	YES <sup>1</sup>	NO <sup>2</sup>	YES	NO	.1 gammas total field .1 gammas/meter gradient

NA - Not applicable  
 1 - Commonly used mode of operation  
 2 - Maximum sample time for portable proton ground magnetometers presently range from 2 to 4 seconds.

**FIG. C6.** Anomalie magnetiche registrate a differenti altezze dalla superficie (a sinistra). (da Vogelsang, 1994). Rappresentazione schematica delle principali caratteristiche dei magnetometri *fluxgate* e *a protoni* (a destra). (da Benson *et al.*, 1982)

Solitamente, per ricerche ambientali sensibilità elevate del tipo di 0.1  $\gamma$  per misure d'intensità totale e 0.05  $\gamma/m$  di gradiente sono difficilmente efficaci, producendo eccessive variazioni nei profili di misura che sono strumentalmente non controllabili.

L'interpretazione delle misure risulta molto spesso esclusivamente di tipo semi quantitativo, consentendo di determinare la località e l'estensione di eventuali oggetti in ferro senza però fornire indicazioni sulla quantità del ritrovamento.

# RADIAZIONI IONIZZANTI [ $\beta$ , $\gamma$ ]

## PRINCIPIO FISICO

- Si basa sulla misura quantitativa delle radiazioni ionizzanti ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) emesse da elementi attivi/attivati. La misura si effettua mediante Contatore Geiger (Rontgen/hora)
- Si ottengono cartografie che illustrano in planimetria per isolinee la radiazione misurata.

## APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di sorgenti radioattive
- Profondità d'esplorazione: dipende dall'intensità di emissione.

## VANTAGGI E SVANTAGGI

- L'indagine è limitata esclusivamente all'individuazione di elementi e composti sorgenti di radioattività.

## MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti (es. 2x2; 4x4; 10x10 m grid), a seconda della risoluzione richiesta. La sonda è sospesa sul terreno.

## PREZZIARIO

[I seguenti prezzi sono indicativi. I prezzi possono variare sulla base della superficie totale d'indagine e delle condizioni morfologiche ambientali di lavoro]

- ⇒ 1. Geoelettrica [SEV, SEO] = 1,00 – 4,00 €. / m lineare di stendimento
- ⇒ 2. Tomografia Elettrica & I.P. [R I.S. & I.P.] = 5,00 – 10,00 €. / m lineare di sezione
- ⇒ 3. Elettromagnetico EM = 0,20 – 0,35 €. / m<sup>2</sup> superficie
- ⇒ 4. Georadar GPR = 1,00 – 3,00 €. / m lineare d'indagine
- ⇒ 5. Magnetometria M = 0,25 – 1,0 €. / punto di misura
- ⇒ 6. Analisi gas interstiziali SGS = 100,00 €. / composto, misura
- ⇒ 7. Rilevazioni Radiazioni Ionizzanti  $\beta, \gamma$  = 1,00 – 3,0 €. / punto di misura

## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON R., BELL P. & REYNOLDS R. (1990) - *Induced polarization used for highway planning*, Advances in applications and case histories of induced polarization, Fink J.B. and McAllister E.O., Eds.; SEG special Publication.
- ANGORAN Y.E., FITTERMAN D.V. & MARSHALL D.J. (1974) - *Induced polarization: a geophysical method for locating cultural metallic refuse*, Science, **184**, 1287-1288.
- BENSON R. C., GLACCUM R. A., & NOEL M. R. (1982) - *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*, Project Report to U.S.E.P.A., Office of Research and Development, under Contract no. 68.03.3050 Technos Inc., Miami, FL.
- BURROWS C. R. (1936) - *Proc. Inst. Radio Engrs.*, **25**, 219.
- CAGNIARD L. (1953) - *Basic theory of the Magneto-Telluric method of geophysical prospecting*, Geophys., **18**, 605-635.
- CAMPBELL W.H. (1967) - *Geomagnetic Pulsation, in Physics of geomagnetic phenomena*, Matsushita S. and Campbell W.H., Eds. Academic Press 822-890.
- CERRO A., MOGNASCHI E. R. & PAGANO A. (1997) - *Determinazione della resistività apparente di terreni alluvionali con il metodo elettromagnetico a radiofrequenza.*, **39**, Atti Tic. Sc. Terra, 79-84.
- CULLEY R. W., JAGODITS F.L., MIDDLETON R.S. (1975) - *E-Phase System for Detection of Buried Granular Deposits*. Symposium on Modern Innovations in Subsurface Exploration, 54<sup>th</sup> Annual Meeting of Transportation Research Board.
- DOBRIAN M. B. (1960) - *Introduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill, New York.
- FOX R.C., HOMANN G.W., KILLPACK T.J. & RIJO L. (1980) - *Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys*, Geophysics, **45**, 75-93.
- GREENHOUSE J. P., MONIER-WILLIAMS M. E., ELLERT N. & SLAINE D. D. (1987) - *Geophysical Methods in Groundwater Contamination Studies*, Exploration '87 Proceedings.
- HOHMANN G.W. (1982) - *Numerical Modeling for electrical geophysical methods*, Proc. Int. Symp. Appl. Geophys. Trop. Reg., Univ. Do para, Belem, Brazil 308-384.
- HUGHES H.J., EINER D.R., FIGGINS S.J., ZONGE K.L., KUHN M.V., BENTLEY H.W. & TINLIN R.M. (1986) *Applications of two electrical geophysical techniques in mapping groundwater contamination*, Proc. Surface and Boreholes Geophys. Methods and Groundwater Instrumentation, Nat. Water Well Assn., Conf. And Expos., 65-86.
- KRAUS J. D. (1992) - *Electromagnetics*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.
- LASFARGUES P. (1957) - *Prospection Électrique*, Masson & Cie Éditeurs, 120 Boulevard Saint-Germain, Parigi.
- MCNEILL J. D. (1995) - *The application of electromagnetics techniques to environmental geophysical surveys*, unpublished.
- MCNEILL J. D. (1994) - *Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies*, **1**, Review and Tutorial, Geotechnical and Environmental Geophysics, Ed. by Stanley H. Ward, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 147-190.
- MCNEILL J. D. (1980) - *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Number*, Technical Note TN-6, Geonics Limited, Ontario.
- MCNEILL J. D. (1980) - *Electrical Conductivity of Soils and Rocks*, Technical Note TN-5, Geonics Limited, Ontario.
- MEYBOOM P. (1967) - *Hydrogeology*. Groundwater in Canada Ch. 2. Brown I.C., Ed. Geol. Survey Canada, Econ Geol. Rept. 24.
- MISAC N., NABIGHIAN & CHARLES L. ELLIOT (1976) - *Negative IP effects from layered media*, 41, No 6A, Special Electromagnetic Supplement, Geophysics.
- MÜLLER I., STIEFELHAGEN W. & INTCHI R. A. M. (1995) - *Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration hydrogéologique des aquifères karstiques (Grotte De Milandre, Jura, Suisse)*, **118**, Bulletin De La Société Neuchâtoise Des Sciences Naturelles, 109-119.
- NAGATA T. (1956) - *Rock-Magnetism*, Maruzen Co., Ltd., Tokio.
- PAGANO A. (1998); *Applicazioni dei Metodi VLF-EM/R, con una strumentazione prototipo e calcolo della Pseudo-Resistività Elettrica Apparente VLF per semplificazioni dell'interpretazione geologica*, Tesi di Dottorato di Ricerca X Ciclo, Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Pavia, inedita.
- PAGANO A. (1996); *Indagini VLF per la caratterizzazione di aree sede di discarica abusiva sepolta nel territorio dell'Oltrepo pavese*, Progetto di Ricerca: Gestione del territorio e smaltimento dei rifiuti tossici e nocivi, Convenzione Università degli Studi di Pavia - Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Regione Lombardia.
- PARASNIS D. S. (1972) - *Principles of Applied Geophysics*, Chapman and Hall, London.
- PARASNIS D. S. (1971) - *Physical Property Guide for Rocks and Minerals*, ABEM Geophysical Memorandum 4/71.
- PARKHOMENKO E. I. (1967) - *Electrical Properties of Rocks*, Plenum Press, New York.
- PEHME P. E., GREENHOUSE J. P. & MCNEILL J. D. (1992) - *Mapping and monitoring organic contaminants with terrain conductivity measurements*, Conference of the Canadian National Chapter, International Association Of Hydrogeologists, May 11-13, Hamilton, Ontario.
- PELTON W.H., WARD S.H., HALLOF P.G., SILL W.R. & NELSON P.H.. I. (1978) - *Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP*, Geophysics, **43**, 588-609.
- RIJO L., PELTON W.H., FEITOSA E.C. & WARD S.H. (1977) - *Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande Do Norte, Brazil*, Geophysics, **42**, 811-812.
- SCHELKUNOFF S. A. (1938) - *The Impedance Concept and Its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption*, **17**, Bell System Tech. J., 17-48.
- SELLMANN P.V., ARNONE S.A., DELANEY A. (1976) - *Preliminary Evaluation of New LF Radiowave and Magnetic Induction Resistivity Units - Over Permafrost Terrain*, Natl. Res. Council Canada Tech. Mem. 119, Proc. Symposium on Permafrost Geophysics, 12 Oct.
- STRAHLER A. N. (1984) - *Geografia Fisica*, Piccin Nuova Libreria, Padova.
- STRATTON J. A. (1941) - *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York.
- SUMNER J.S. (1976) - *Principles of Induced Polarization for Geophysical exploration*, Elsevier Scientific Pub. Co.
- TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E., KEYS D. A. (1976) - *Prospection géophysique*, E. R. G. Maurecourt, France.
- TOWLE J.N., ANDERSON R.G., PELTON W.H., OLHOEFT G.R. & LABREQUE D.D. A. (1985) - *Direct detection of hydrocarbon contaminants using the induced-polarization method*, 55<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 145-146.

- TODD D.K. (1964) – *Groundwater*, Handbook of Applied Hydrology, Ch. 13 Chow V.T., Ed. McGraw Hill, New York.
- VAN NOSTRAND R.G. & COOK K.L. (1966) – *Interpretation of Resistivity Data*, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 499.
- VACQUIER V., KINTZINGER P.R., HOLMES C.R., FRISCHE R.H. (1956) – *Prospecting for groundwater by Induced Electrical Polarization*, New Mexico Institute of Mining and Technology Research and Development Division; Socorro.
- VOGELSANG. D. (1994) – *Environmental Geophysics. A practical Guide*, Springer-Verlag, Berlino.
- ZENNECK J. (1908) - *Ann. Phys.*, **23**, 846-866.
- ZONGE K.L., FIGGINS S.J. & HUGHES L.J. (1985) – *Use of electrical geophysics to detect sources of groundwater contamination*, 55<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 147-148.
- WARD S. H. (1990) – *Geotechnical And Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- WARD S. H. & FRASER D.C. (1967) – *Conduction of electricity in rocks*, Mining Geophysics, **2**, Soc. Explor. Geophysics, 197-223.
- SOILTEST, INC. (1968) - *Earth Resistivity Manual*, Soiltest, Inc. Subsidiary of Cenco Instruments Corporation, Evanston, Illinois, U.S.A.