

Geofisica Applicata  
Scienze Geologiche  
LM  
Geoelettrica  
AA 2018-2019

# Il metodo geoelettrico parte 1b

# indagini geoelettriche – sviluppo

- 1800 ⇒ giacimenti minerali possiedono potenziali naturali (ma possono anche fungere da condensatore in caso di creazione di campi elettrici artificiali ⇒ fenomeno della POLARIZZABILITA')

Schlumberger

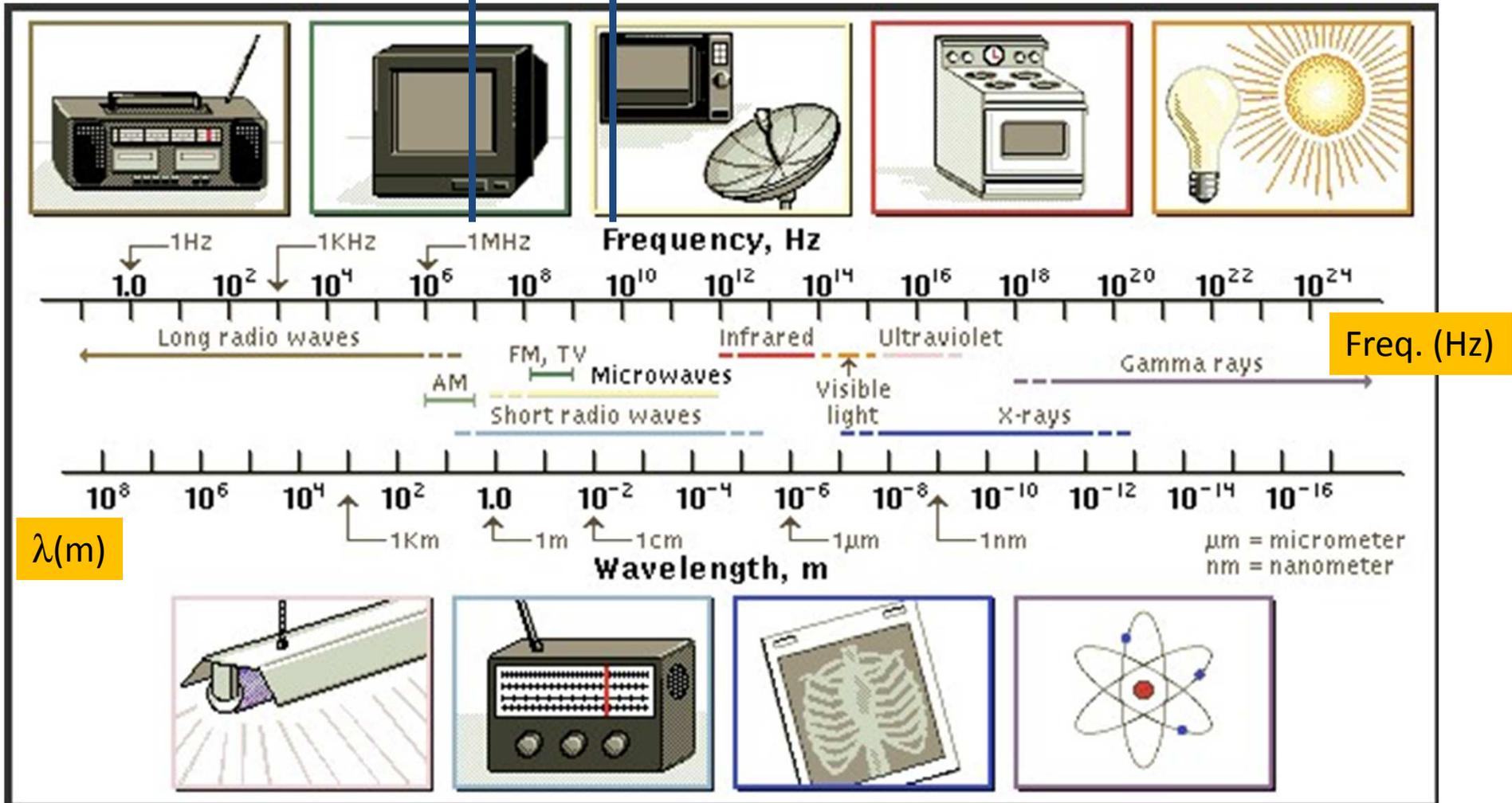
- 1900/1920 ⇒ Elettrodi infissi nel terreno per inviare corrente nel sottosuolo
- 1960 → ⇒ Bobine per produrre corrente nel sottosuolo (induzione elettromagnetica)  
cioè filo di rame
- ↓ ↓ ⇒ Bobine portate da aereo
- ⇒ Bobine portate da un operatore

Metodi Elettromagnetici ad induzione

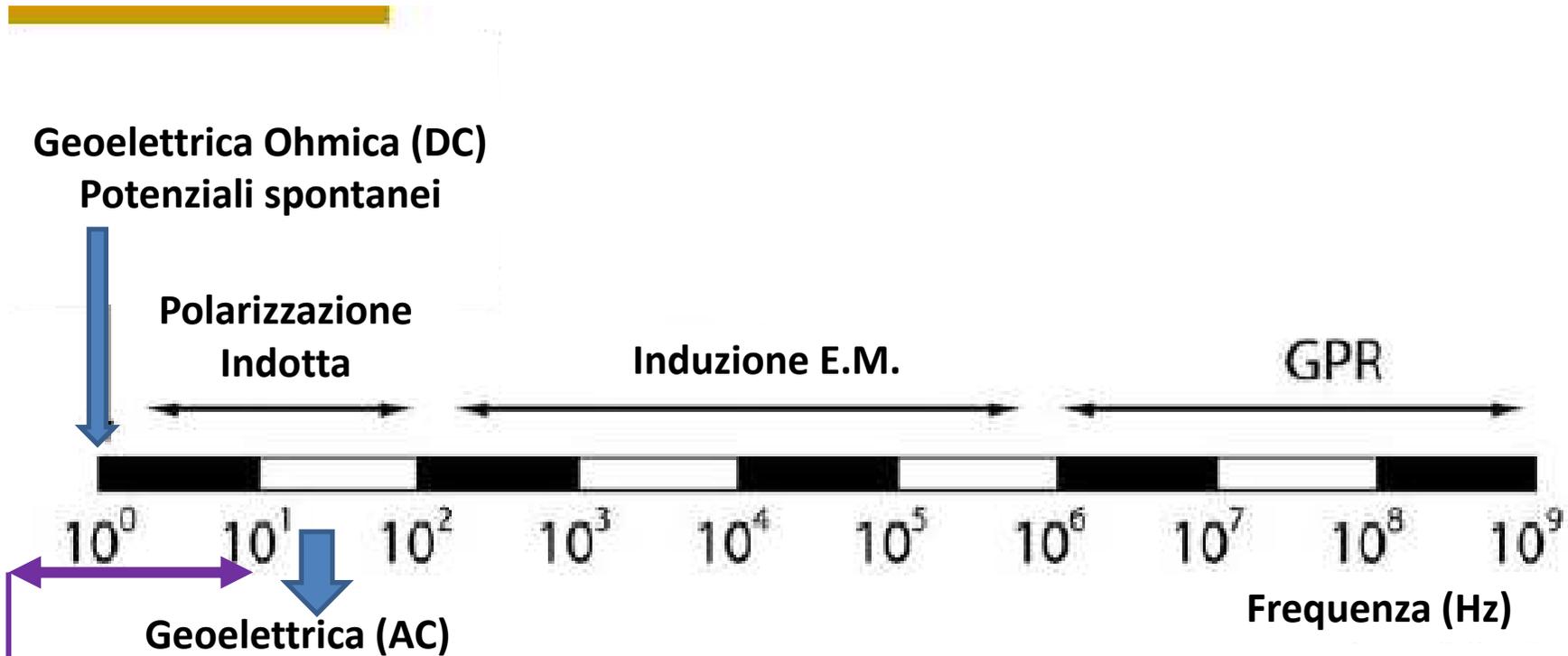
# Geoelettromagnetismo: spettro onde elettromagnetiche

**EM-TDEM-MT**  
~mHz - 30 kHz

**GPR**  
 $2 \times 10^9$  (2 GHz)



# Metodi geoelettromagnetici – frequenza segnali



Questo range di frequenze permette di **investigare** il **sottosuolo a profondità differenti** proporzionali all'inverso della frequenza; in contrasto la **risoluzione** si comporta in maniera inversa.

↓ Banda di frequenza dei segnali tellurici: 0.1 Hz-10 Hz. Prodotte dalle variazioni del campo magnetico. La loro ampiezza può raggiungere alcuni volts in **terreni conduttivi** e costituiscono un rumore per le misure di Polarizzazione Indotta

indagini geoelettriche – sviluppo – altre tecniche che si basano sulla proprietà fisica della resistività:

metodi E.M.

con il vantaggio di non aver bisogno di avere il contatto fisico con il terreno per indurre correnti nel sottosuolo

- [Qualche mHz-1 KHz] – Time Domain EM – usano corrente AC
- [15 – 25KHz] – Very Low Frequency EM – segnali EM prodotti da sorgenti artificiali lontani
- [ $\sim$ mHz – 1KHz] – Magnetotellurica MT - campi naturali

**Sottosuolo profondo. Target generalmente conduttivi (bassa resistività elettrica)**

- [Qualche Hz-40 KHz] - Frequency Domain EM – usano corrente AC
- Metodi geoelettrici galvanici o Ohmici

di uso per l'esplorazione del sottosuolo vicino

## Inizio della geoelettrica: Conrad Schlumberger

Potenziali Spontanei 'PS' è un metodo passivo con variante attiva

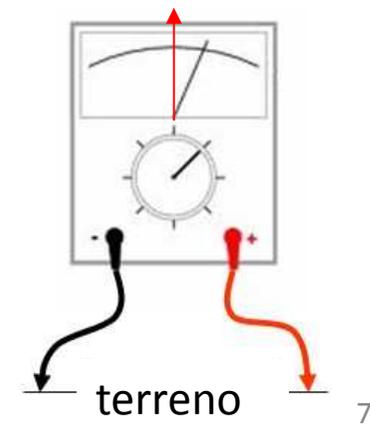


<http://www.slb.com/about/history.aspx>

elettrodo

È stato il primo a:

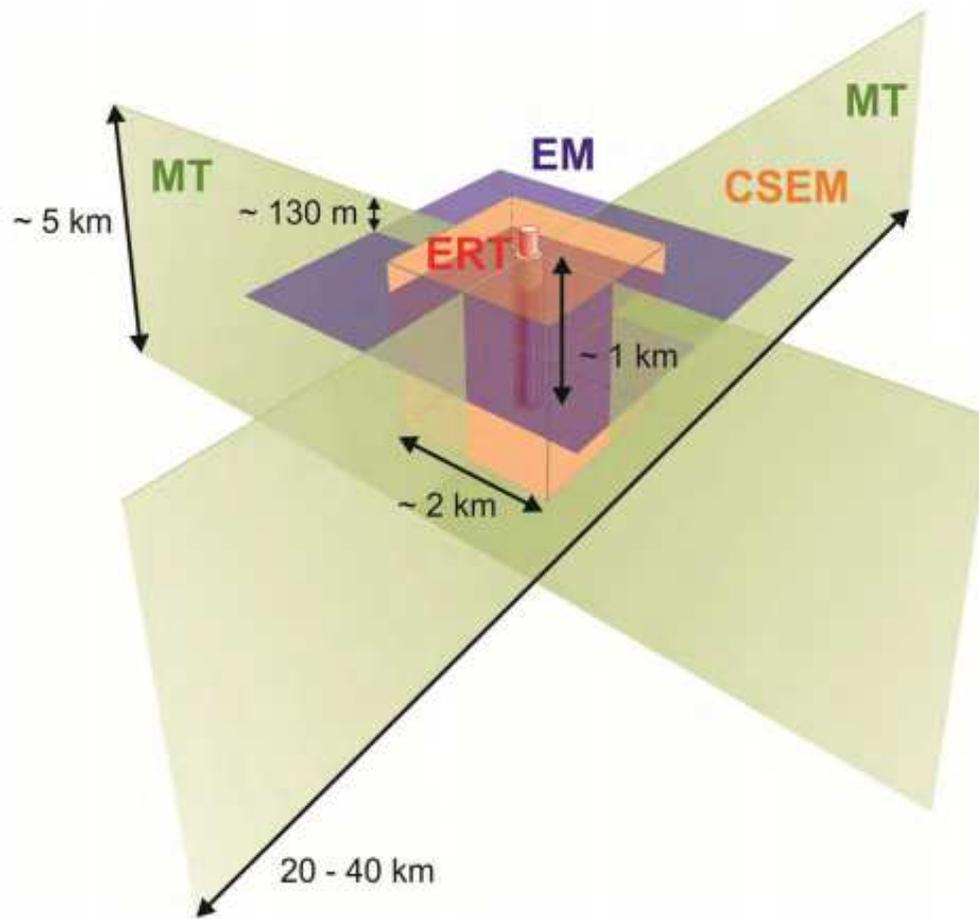
- Effettuare misure di **potenziali spontanei** in una località 'Caen', zona orientale della **Normandia**.
- A riconoscere l'effetto della **polarizzazione indotta** che l'aveva chiamata come:
  - "provoked polarization»



# (Metodi Geo-elettromagnetici)

Attivi e Passivi

stimano la resistività elettrica a diversa scala di profondità



## A scala regionale:

Magnetotellurica (MT)  
Metodi EM a sorgente controllata (CSEM)

## A scala sub-regionale:

Time Domaine EM (TEM o TDEM)

## A scala locale:

Tomografia della Resistività Elettrica (ERT) e della Polarizzazione Indotta (PI)

## Strumenti geofisici aereo-portati



Metodi elettromagnetico nel dominio  
del tempo “**TDEM**”

Misurano la resistività elettrica del  
sottosuolo vicini

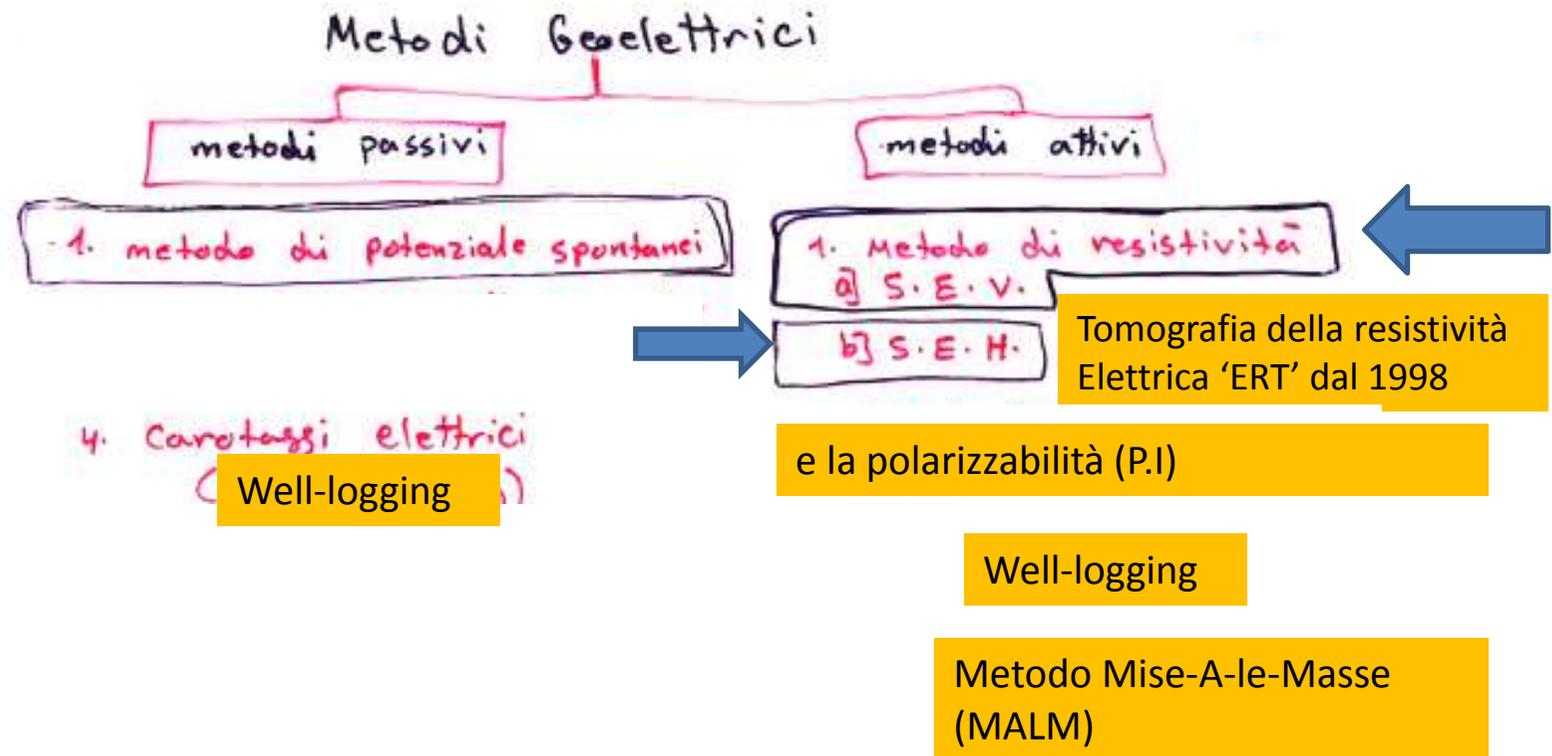
Sistema “SkyTEM”

fa parte delle tecniche  
geo-elettromagnetiche che misurano la  
resistività elettrica nel sottosuolo,

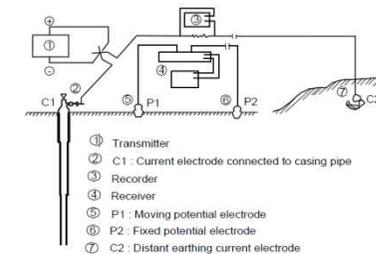
Per indagini a scala regionale

(<http://skytem.com/>).

# indagini geoelettriche – attivi - passivi

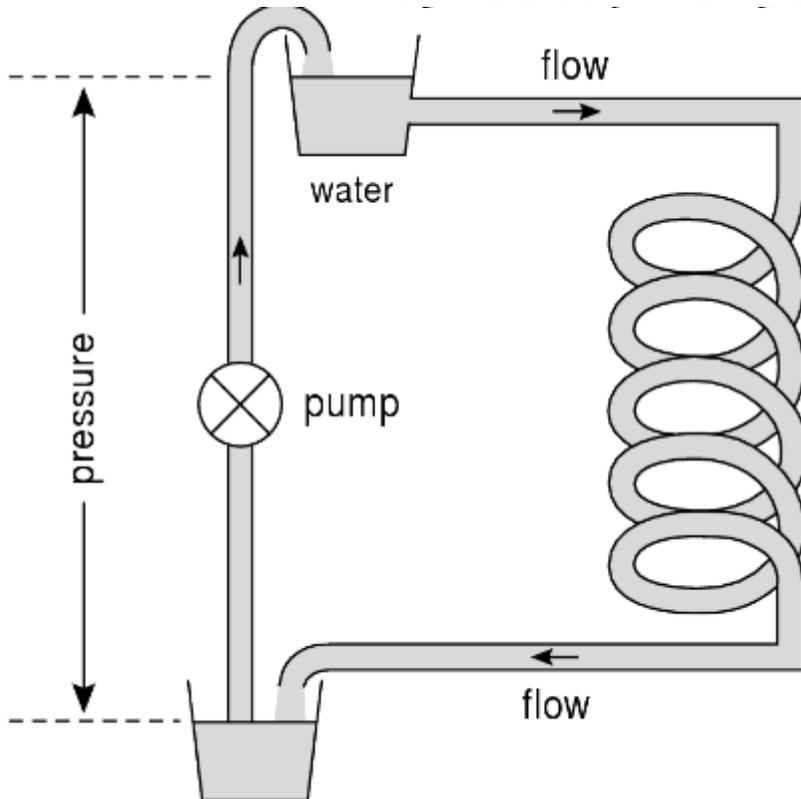


la resistività elettrica ( $\rho$ ) dei materiali è funzione della resistività elettrica dei costituenti

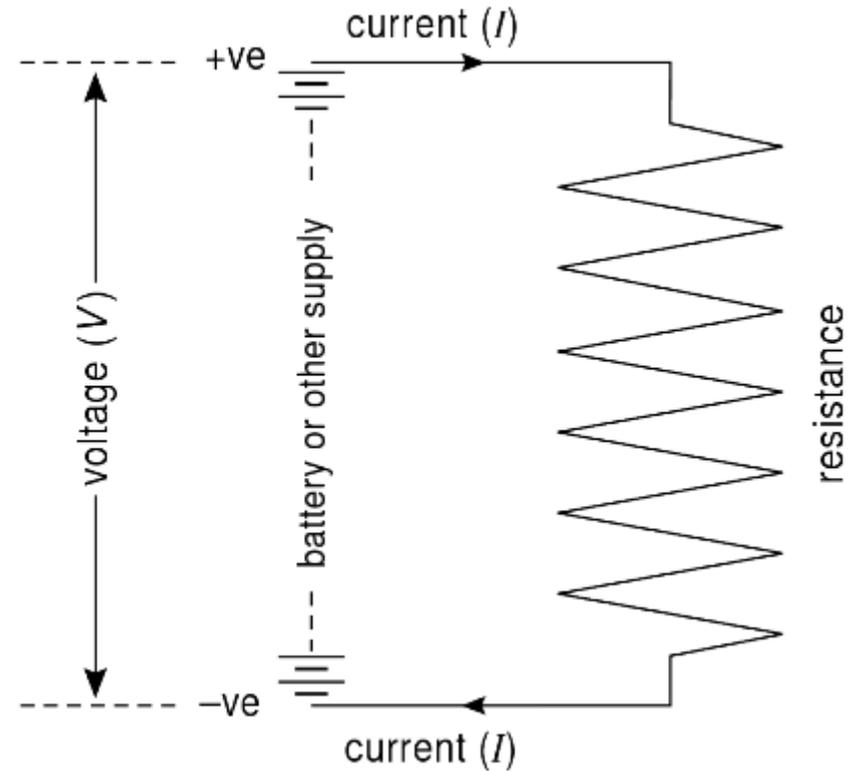


# indagini geoelettriche – attivi – concetti fisici analogia con altri campi potenziali

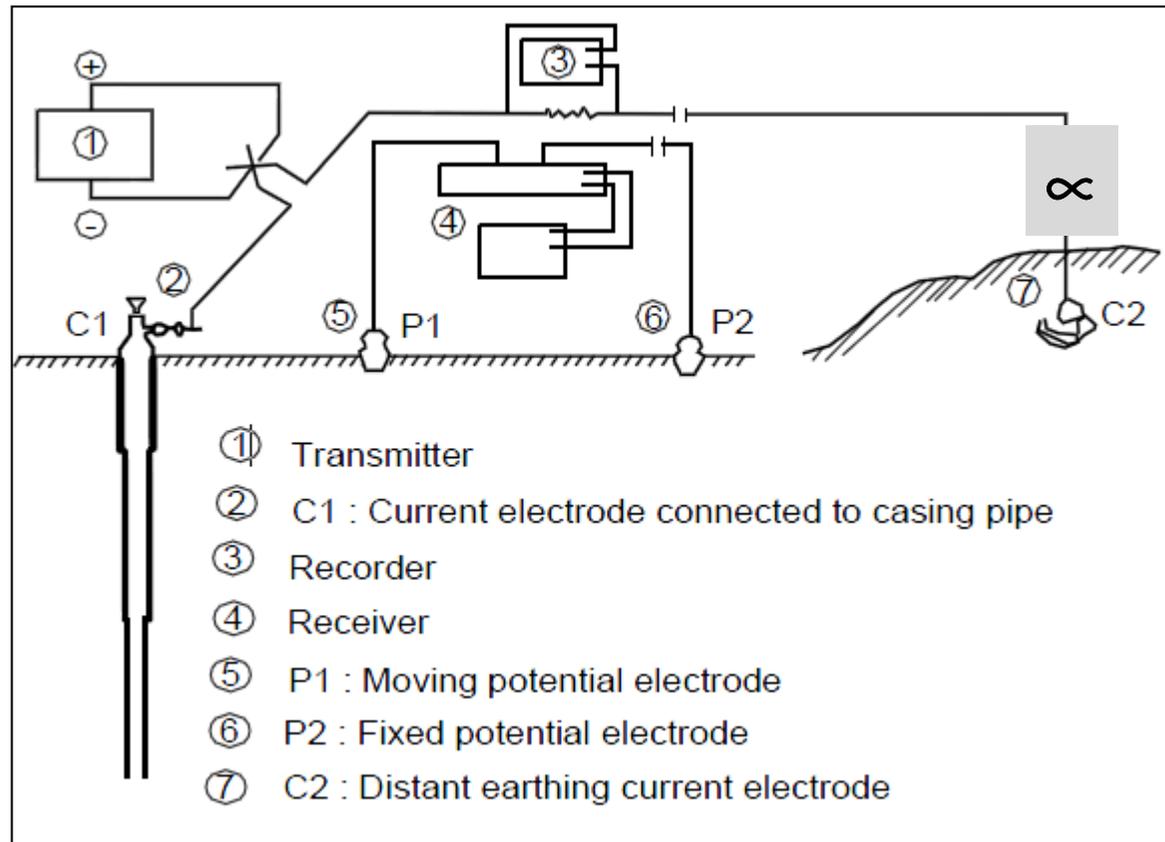
flusso idrico  
variazione di pressione (energia potenziale)



flusso di corrente elettrica  
variazione di potenziale elettrico



indagini geoelettriche – Metodo MALM – attivo- poco noto  
ma è utile nella soluzione di alcuni problemi ingneristici/ambientali



Metodo Mise-A-le-Masse  
(MALM)

**Misura** la **differenza di potenziale** del campo elettrico generato tramite l'emissione della **corrente direttamente nel corpo** da individuare: **mineralizzato**, **flusso preferenziale d'acqua sotterranea** (corpi di frana, infiltrazione all'interno dei corpi arginali,..)

## Legge di OHM: esempio sperimentale

- se si disegna una linea con la matita (grafite: conduttivo)
- si misura la resistenza con un voltmetro in funzione della distanza 'L'
- si costruisce un grafico (resistenza misurata in funzione della distanza 'L')
- si otterrà una figura come quella riportata sotto



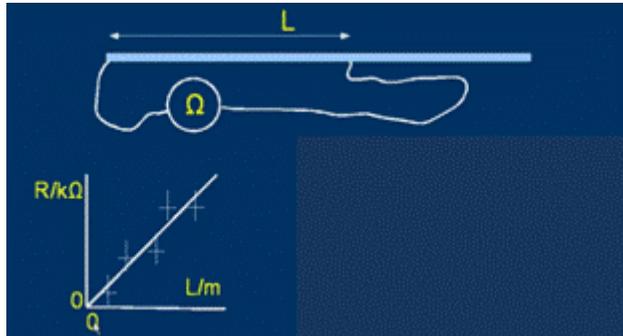
Se il gradiente =  $7.5 \text{ KOHM/m}$   
Resistività grafite =  $20 \text{ micro-Ohm.m}$

**Calcola la sezione della mina  
della matita?**

**Calcola lo spessore della mina?**

## Legge di OHM: esempio sperimentale

- se si disegna una linea con la matita (grafite: conduttivo)
- si misura la resistenza con un voltmetro in funzione della distanza 'L'
- si costruisce un grafico (resistenza misurata in funzione della distanza 'L')
- si otterrà una figura come quella riportata sotto



Se il gradiente= 7.5 KOHM/m  
Resistività grafite= 20 micro-Ohm.m

Calcola la sezione della mina della matita?  
Calcola lo spessore della mina?

$R/L = \text{gradiente} = 7.5 \times 10^3 \text{ Ohm/m}$   
Resistività grafite=  $20 \times 10^{-6} \text{ Ohm.m}$

$$\frac{R}{L} = \frac{\rho}{S}$$
$$\frac{7.5 \times 10^3}{m} = \frac{20 \times 10^{-6} \Omega \cdot m}{S (m)}$$

$$S = 2.67 \times 10^{-2}$$

$$S = 2\pi r^2 = 2.06 \times 10^{-5} m$$
$$= 0.02 mm$$

soluzione



# indagini geoelettriche – attivi – passivi – resistività elettrica specifica

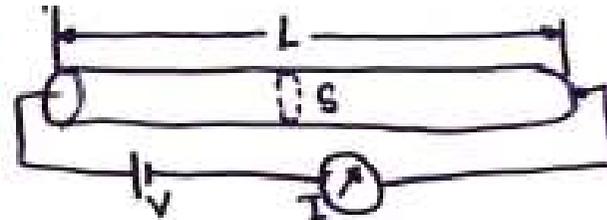
Prima legge di  
Ohm  
1827

$$V = I * R$$

quindi la resistività di tale roccia dipende dalla resistività di vari componenti che lo costituiscono.

Seconda legge  
di Ohm

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (\text{v.m})$$



$$\text{con } R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\Omega)$$

Terza legge di  
Ohm

$$P = V * I = R * I^2$$

R dipende sia {  
La geometria del conduttore  
La resistività di esso

la resistività elettrica ( $\rho$ ) condiziona il passaggio e la distribuzione della corrente nel sottosuolo

=> quindi può fornire informazioni circa la natura e geometria dei corpi ivi presenti

## indagini geoelettriche: tipo conduttori

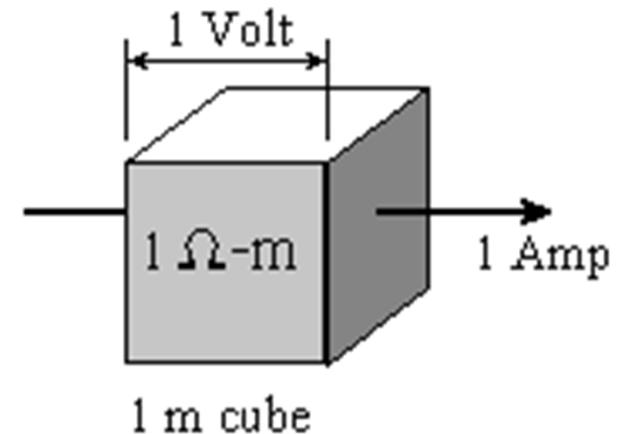
Metallica (metalli)	$\rho \sim 1 \times 10^{-8} \text{ Ohm.m}$
Semi-conduttori	$\rho \sim 1 \times 10^{-3} - 10^5 \text{ Ohm.m}$
isolanti	$\rho > 1 \times 10^6 \text{ Ohm.m}$

## indagini geoelettriche: tipo conduttori

isolanti	$\rho > 1 \times 10^6 \text{ Ohm.m}$
legno	$10^3 - 10^4$
Acqua deionizzata	$10^{10}$
Quarzo fuso	$10^{17}$

## indagini geoelettriche – definizione della resistività elettrica di un corpo in 3D (situazione reale del sottosuolo)

La resistività  $\rho$  elettrica è una proprietà intrinseca dei materiali. È definita come la resistenza al passaggio della corrente di un cubetto di lato unitario in presenza di un campo elettrico artificiale. Il campo genera flusso di corrente,  $dI$ , in accordo con la nota legge di Ohm.



dalla prima e seconda legge di Ohm, possiamo scrivere:

$$dI = dV/R = dV/(\rho \cdot dl/dl^2), \quad \text{divedi per } dl^2 \text{ avremo,}$$

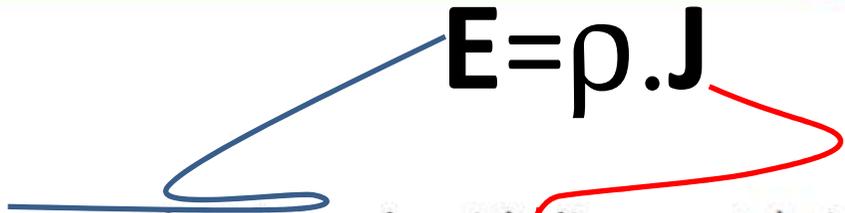
$$dI/dl^2 = dV/\rho \cdot dl. \quad \underline{\text{eq. 1}}$$

Posto  $dl^2 = dS$  e ricordando che  $dI/dS = J$ : densità di corrente e che  $dV/dl = E$  campo elettrico, la (1) si può infine scrivere:

$$E = \rho \cdot J, \quad \underline{\text{eq. 2}}$$

che è la formulazione vettoriale della legge di Ohm.

# Resistività e seconda legge di Ohm

$$\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J}$$


$\rho$  (rapporto tra campo elettrico e densità di corrente) si dice **resistenza specifica** o **resistività**; essa *dipende solo dalla sostanza del campione e dalla temperatura, ma non dalla sua forma o estensione*. La resistività è dunque una grandezza intensiva, a differenza della resistenza che è estensiva

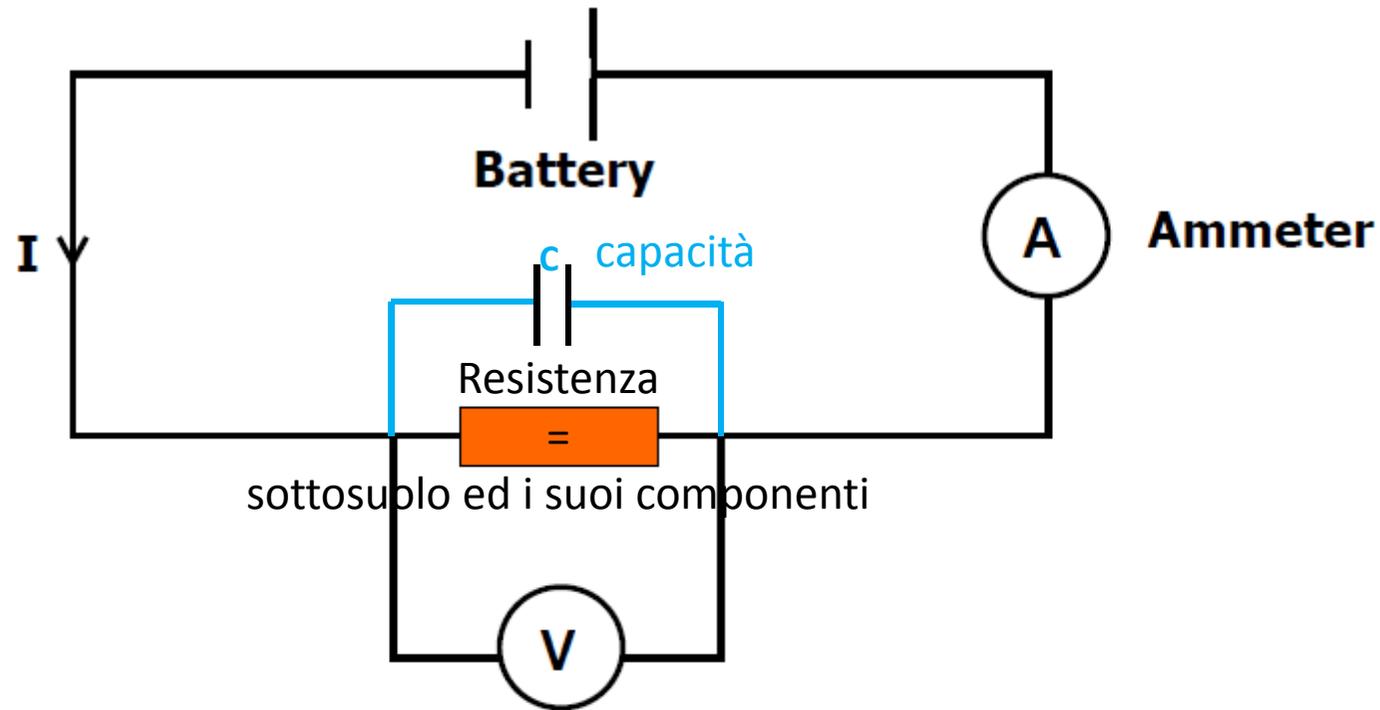
la forma vettoriale significa che il modulo del vettore  $\mathbf{J}$  non dipende dalla direzione ovvero il materiale è omogeneo ed isotropo. Come conseguenza il valore di  $r$  è a tutti gli effetti un valore scalare.

In presenza di anisotropia la formulazione vettoriale diventa **TENSORIALE** cioè la resistività assume valori differenti in direzione  $x, y, z$   
«una matrice composta da 9 elementi  $3 \times 3$   
**Come si scrive la legge di Ohm in forma tensoriale?**

Forma tensoriale della legge di Ohm:  
Descrive la variazione della

$$\begin{aligned}j_x &= \sigma_{xx} \cdot E_x + \sigma_{xy} \cdot E_y + \sigma_{xz} \cdot E_z \\j_y &= \sigma_{yx} \cdot E_x + \sigma_{yy} \cdot E_y + \sigma_{yz} \cdot E_z \\j_z &= \sigma_{zx} \cdot E_x + \sigma_{zy} \cdot E_y + \sigma_{zz} \cdot E_z\end{aligned}$$

# Resistività elettrica ( $\rho$ ) (circuito equivalente)



**Ohm's Law –  $V = I R$**

where  **$V$  = voltage**

**$I$  = current**

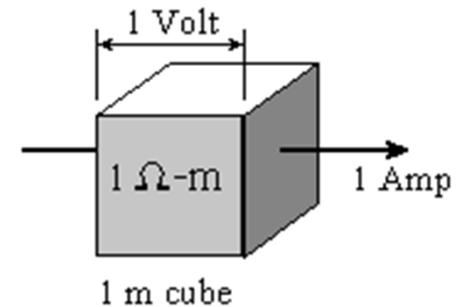
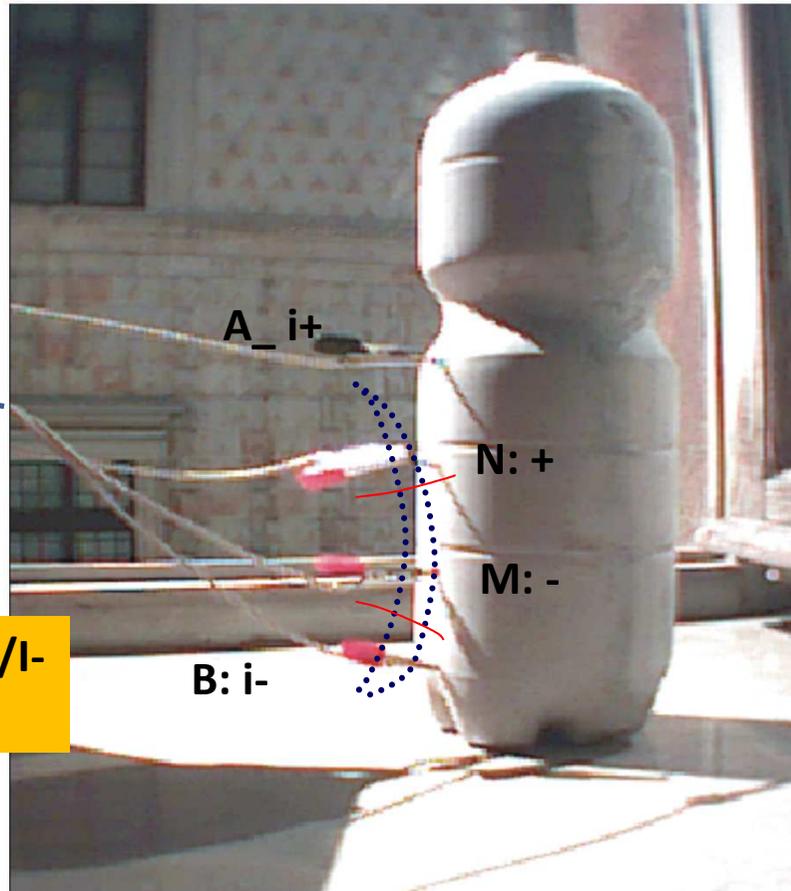
**$R$  = resistance**

# Come si misura la resistività in laboratorio?

Tramite l'utilizzo di una quaterna di elettrodi saldamente fissati al campione si fa circolare corrente e si misura la d.d.p.

strumentazione  
georesistivimetro

**A, B: dipolo di corrente I+/I-**  
**M, N: dipolo di potenziale**



indagini geoelettriche – quali problemi possono essere affrontate

• **Ricostruzione del modello geo-idrogeologico concettuale**

- Geometria
- Dimensionalità: 1D, 2D, 3D, 4D
- Litologia  $\longleftrightarrow$  permeabilità
- Qualità della risorsa acqua
- Profondità degli acquiferi
- Estensione spaziale a livello locale, regionale o nazionale
- Vulnerabilità (V) della risorsa idrica

Modellistica numerica e sviluppo tecniche per l'elaborazione dei dati geofisici

indagini geoelettriche – quali problemi possono essere affrontate

- **Modelli di idrogeologici di flusso**

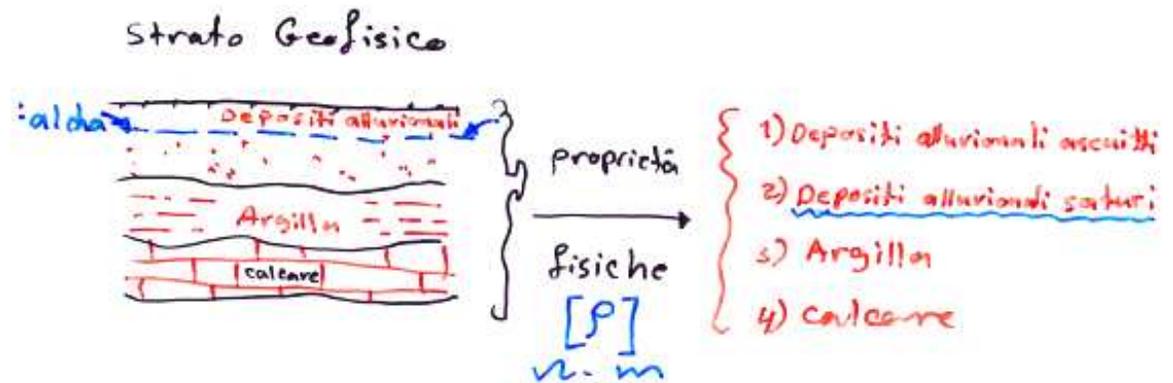
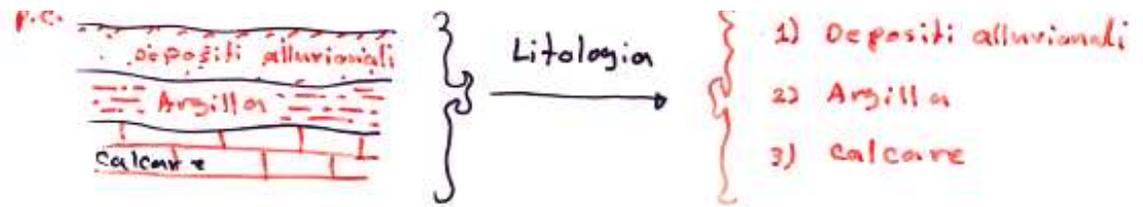
- Oltre alla geometria del sottosuolo, le indagini geofisiche, geo-elettromagnetiche e sismiche, possono supportare la scelta dei punti di monitoraggio diretto e Non solo

- **Interventi antropici**

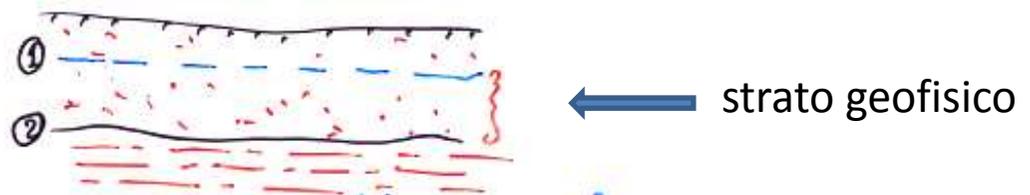
- Opere di difesa idraulica
- Opere di messa in sicurezza
- In generale opere di natura ingegneristiche che coinvolgono il sottosuolo
- **Riduzione del Rischio Sismico** (liquefazione e cedimenti)



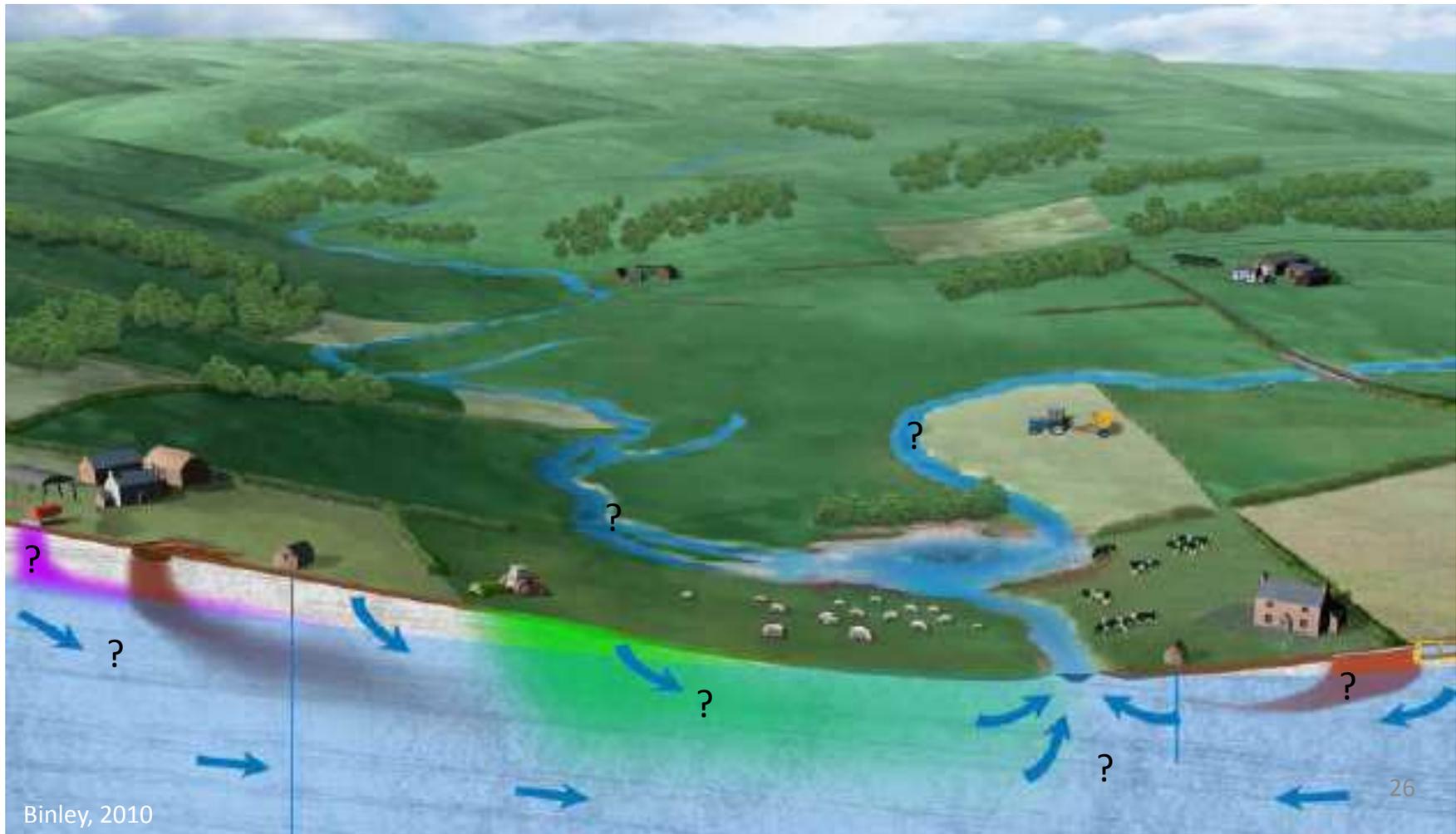
# indagini geoelettriche – concetto strato geologico e strato geofisico



- (1) livello falda, p.es. sabbia
- (2) strato geologico = geofisico



**indagini geoelettriche: resistività e polarizzazione indotta ampio spettro di applicazioni geologia convenzionale, geologia specifica, risorse minerarie e materiali inerti, problemi ambientali, archeologia, idrogeologia =====> si parla di tecniche che si adattino alle diverse scale di investigazioni**

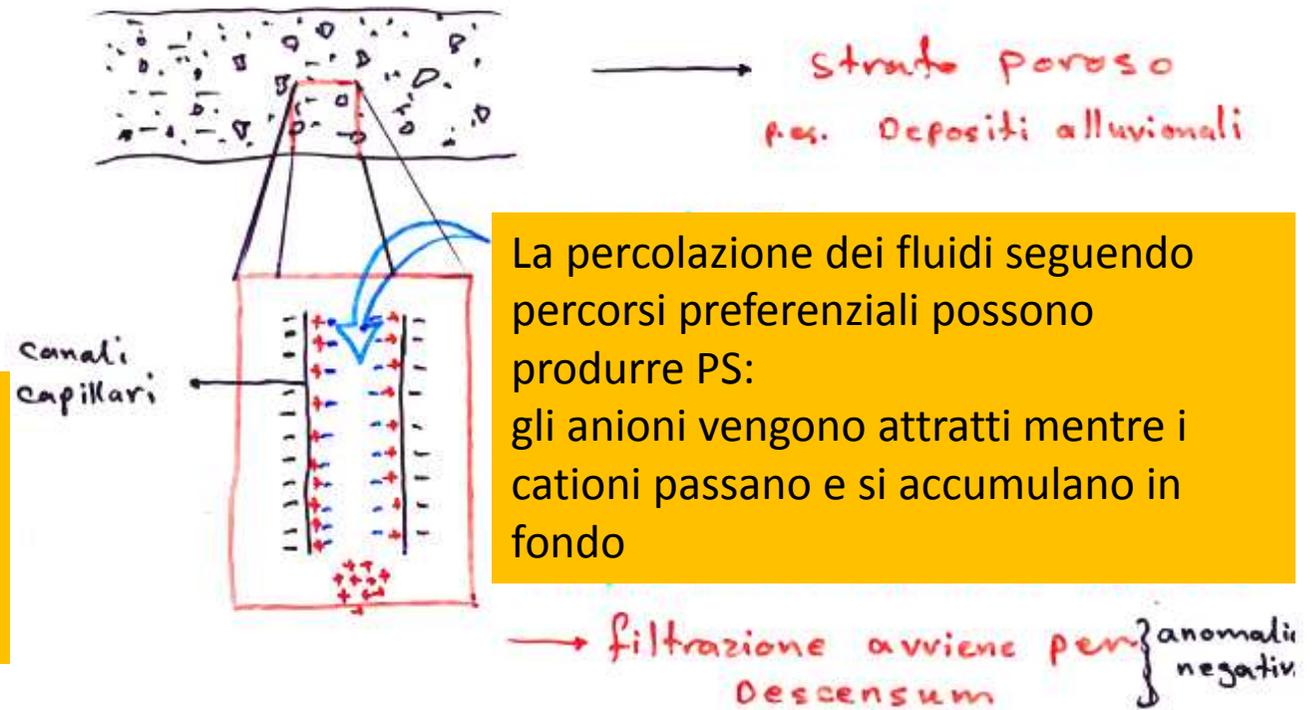


## Geoelettrica: passiva – Potenziale Spontaneo 'PS'- Origine

1. potenziali di elettrofiltrazione
2. potenziali di ossido-riduzione
3. potenziali elettrochimici (o di membrana)

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP)

Potenziale di elettrofiltrazione (in mVolt)



\* Se la filtrazione avviene per Ascensum } anomalia positiva

$$E_h = - \frac{\phi \Delta P \epsilon \rho}{4 \pi \eta} \quad \begin{matrix} \text{(electrokinetic potential)} \\ \text{(streaming potential)} \end{matrix}$$

$\phi$ : adsorbimento (potenziale),  $\Delta P$ : differenza di pressione  
 $\epsilon$ : costante dielettrica della soluzione

È di minore importanza  
 È ascrivibile a variazioni topografiche

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP)

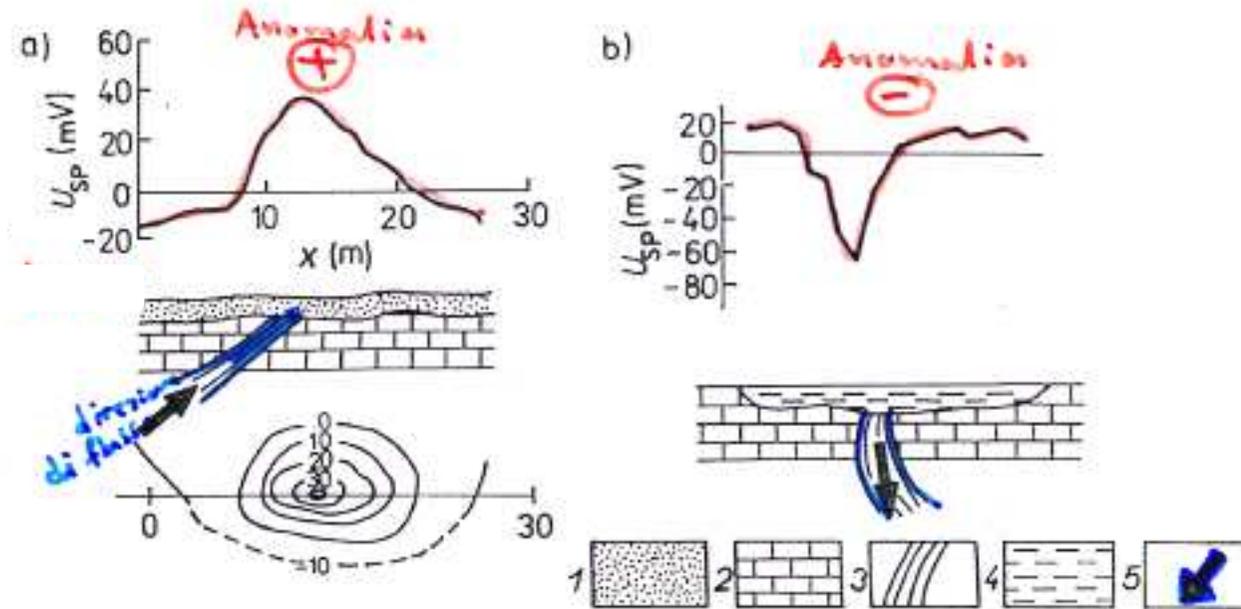


Figure 3.14 Examples of SP anomaly above a fault zone with ground-water flow. (a) Outflow of ground water (Stenzel and Szymanko, 1973). (b) Site of infiltration (Ogilvi, 1962). 1 — cover deposits, 2 — limestone, 3 — fault zone, 4 — water reservoir, 5 — direction of water flow along the fault zone.

Percorsi preferenziali di fluidi dovuti a:

- Carsismo superficiali
- Movimenti franosi (p.es. frana del Tèssina, BL)

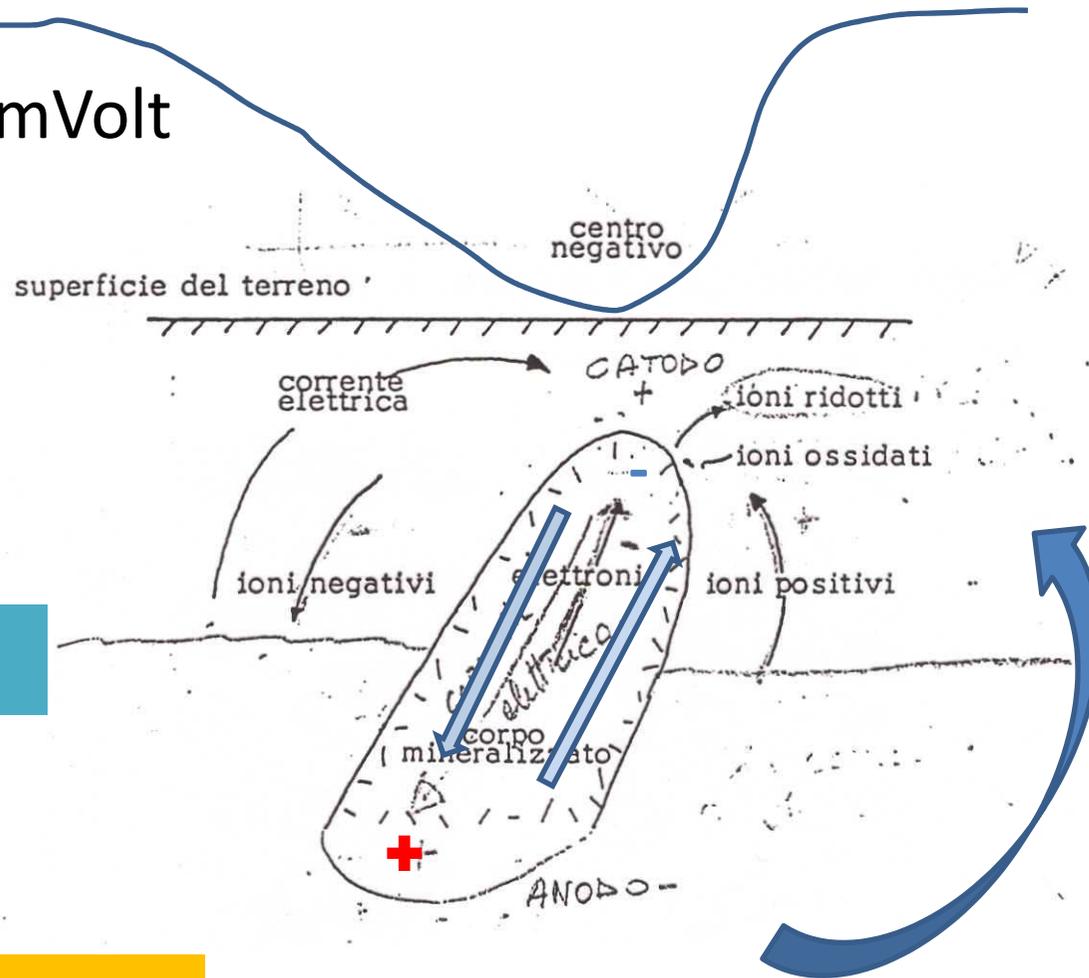
Potenziale di elettrofiltrazione  
(in mVolt)<sup>29</sup>

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP)

Potenziale di mineralizzazione

in mVolt

falda

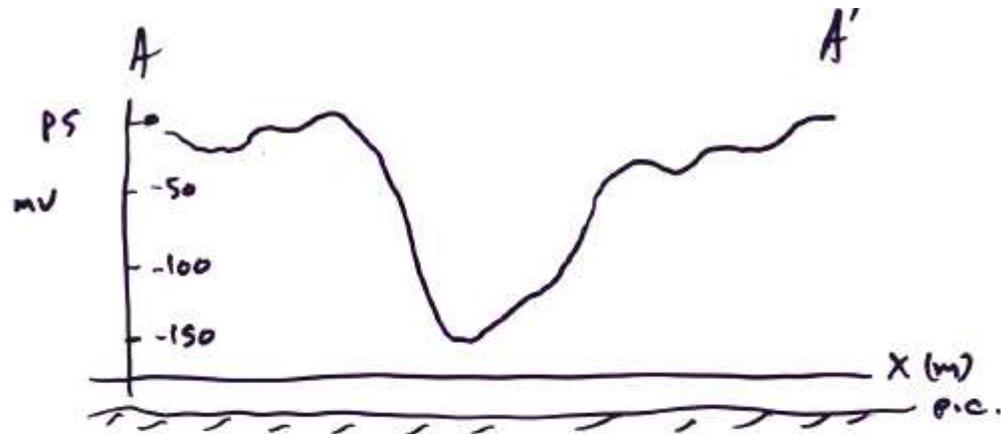


p.es.  
pirite, calcopirite, grafite, ecc..

conduzione  
elettrolitica  
(ionica)



# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – modello teorico di un cilindro inclinato e polarizzato



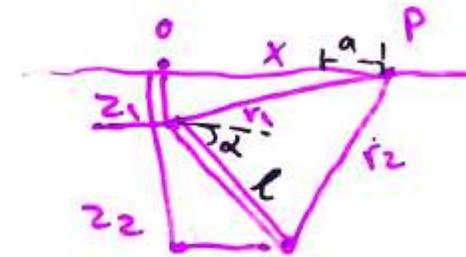
minerale  
Sulfida



• il potenziale  $V$  è dato da

$$V = q \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$q$ : carica  $\pm$



$$r_1 = \sqrt{x^2 + z_1^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x-a)^2 + z_2^2}$$

$$a = l \cos \alpha$$

$$V = q \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + z_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + z_2^2}} \right]$$

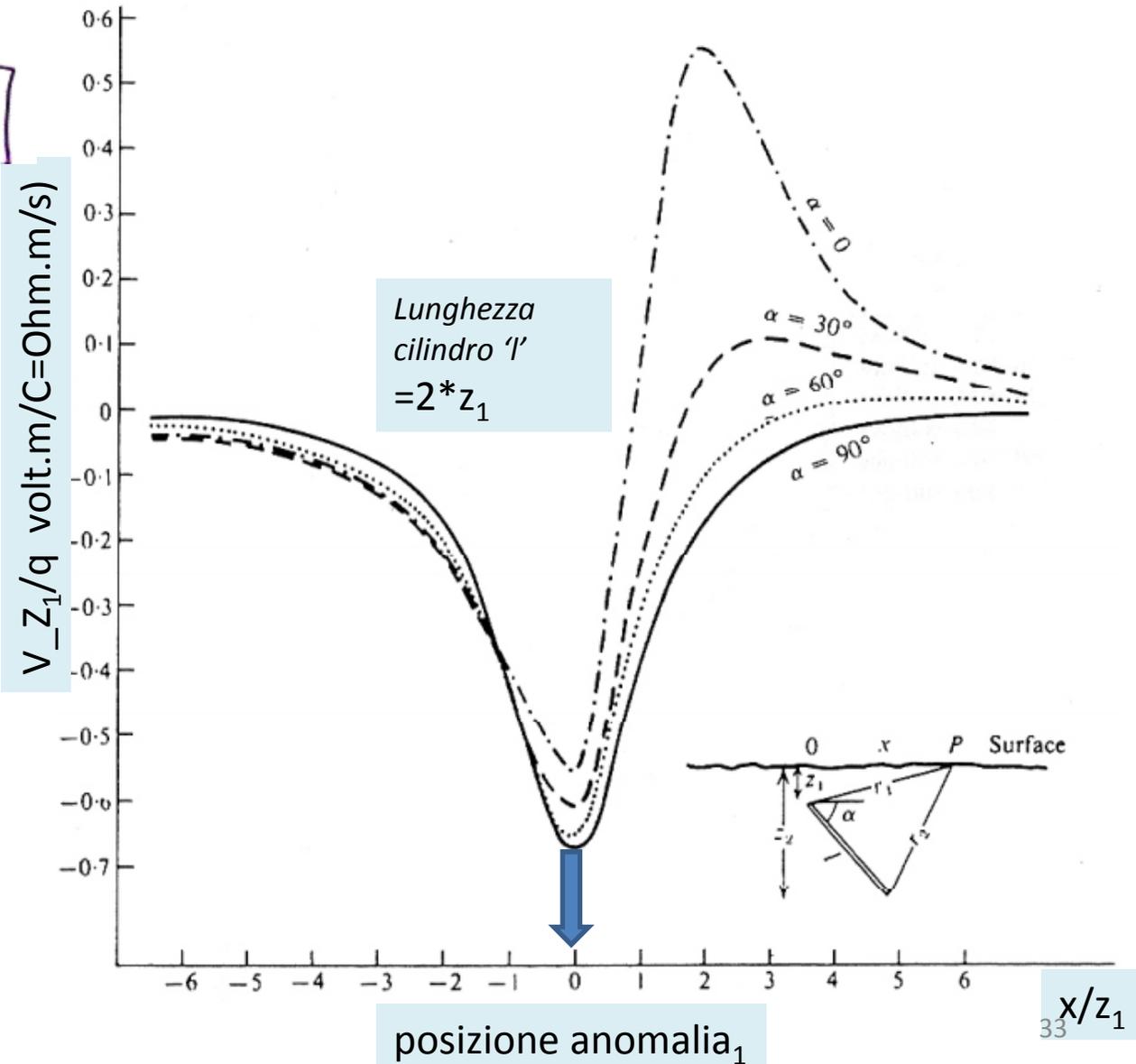
Profondità d'indagine  
 $\sim 30 - 60 \text{ m}$

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – modello teorico di un cilindro polarizzato e diversa inclinazione

$$V = \rho \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + z_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + z_1^2}} \right]$$

## Esercizio n. 1:

Programmare il foglio Excel per produrre lo stesso grafico

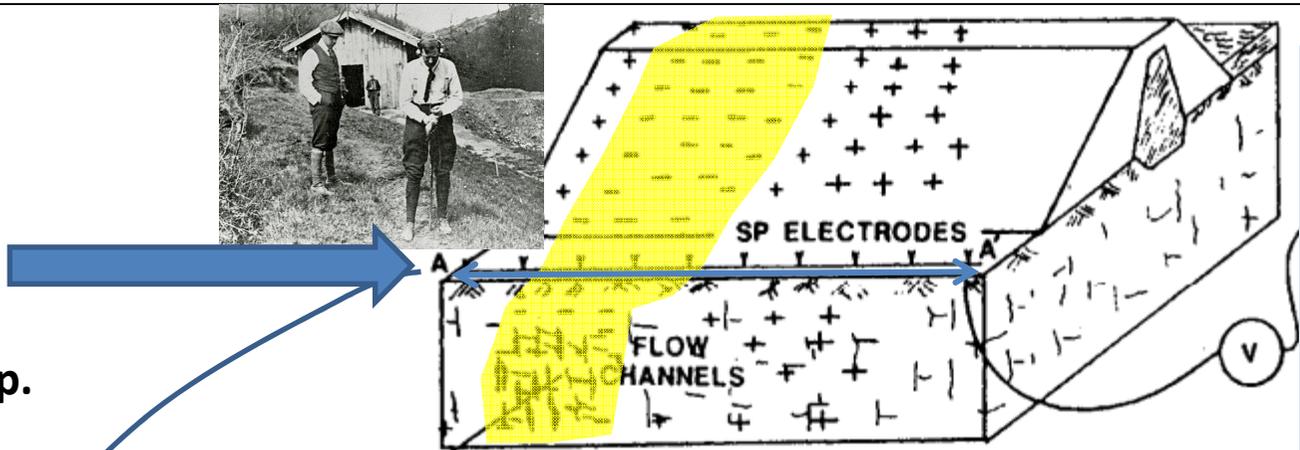


1 coulomb = 1 ampere \* secondo  
1 C = 1 A s

Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – *localizzazione perdita in un corpo arginale*  
**Misure PS effettuati con 2 elettrodi: uno funge da riferimento (di solito ubicato al di fuori del corpo da investigare) e l'altro rover per la misura della d.d.p.**

corpo arginale  
diga in terra

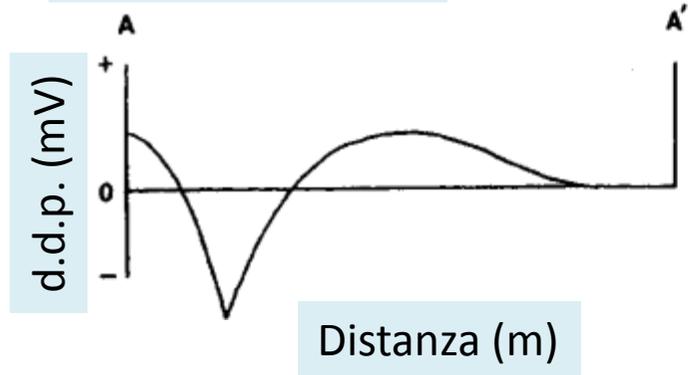
NB: segno d.d.p.



Elettrodo impolarizzabile di riferimento per la misura della d.d.p. Post all'infinito (circa 5 volte Lunghezza area d'ingaine)

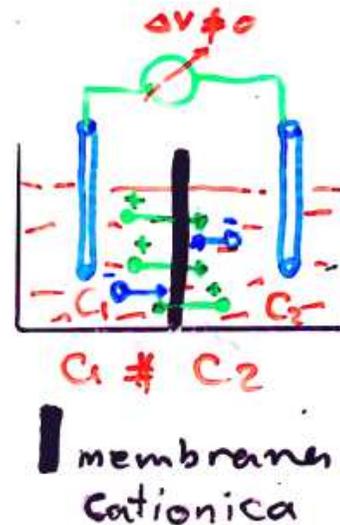
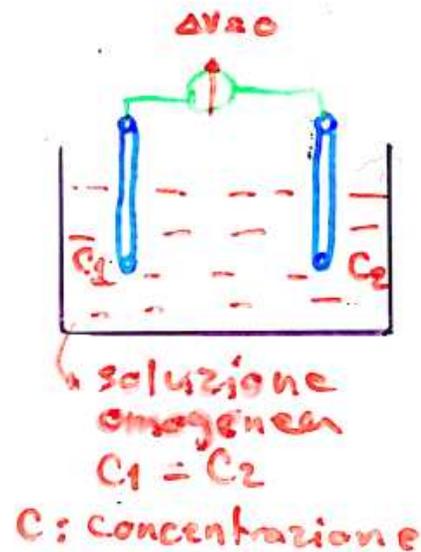
direzione di flusso

Sezione AA'

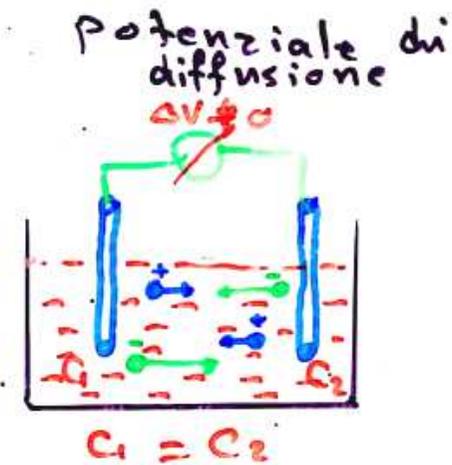


# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP)

## 3. Potenziale di membrana (in mVolt)



$$E_s = -59.1 \log_{10} (C_1/C_2)$$



La mobilità degli anioni (-) non è identica a quella degli cationi (+)

$$E_d = -11.6 \log_{10} (C_1/C_2)$$

# Metodo geoeletttrico passivo: Potenziali Spontanei vs possibile **origine geologica**

## Tipo PS

## Segno e valore di anomalia PS

### *Mineral potentials*

Sulphide ore bodies  
(pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite,  
sphalerite, galena)  
Graphite ore bodies  
Magnetite + other electronically  
conducting minerals  
Coal  
Manganese

Negative  $\approx$  hundreds of mV

Quartz veins  
Pegmatites

Positive  $\approx$  tens of mV

### *Background potentials*

Fluid streaming, geochemical reactions,  
etc.

Positive + / - negative  
 $\leq 100$  mV

Bioelectric (plants, trees)  
Groundwater movement

Negative,  $\leq 300$  mV or so  
Positive or negative,  
up to hundreds of mV

Topography

Negative, up to 2 V

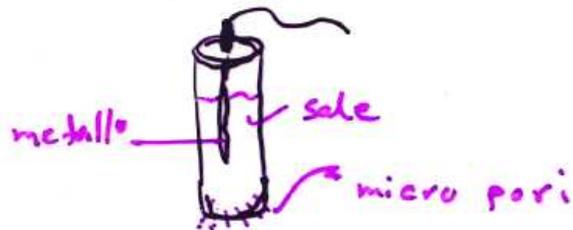
# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – elettrodi impolarizzabili?

- elettrodi impolarizzabili

metallo immerso in una soluzione salina dello stesso metallo

p. es. Cu in  $CuSO_4$   
Zn in  $ZnSO_4$

} altri  
Pb immerso in una miscela solida di gesso e cloruro  $PbCl_2$



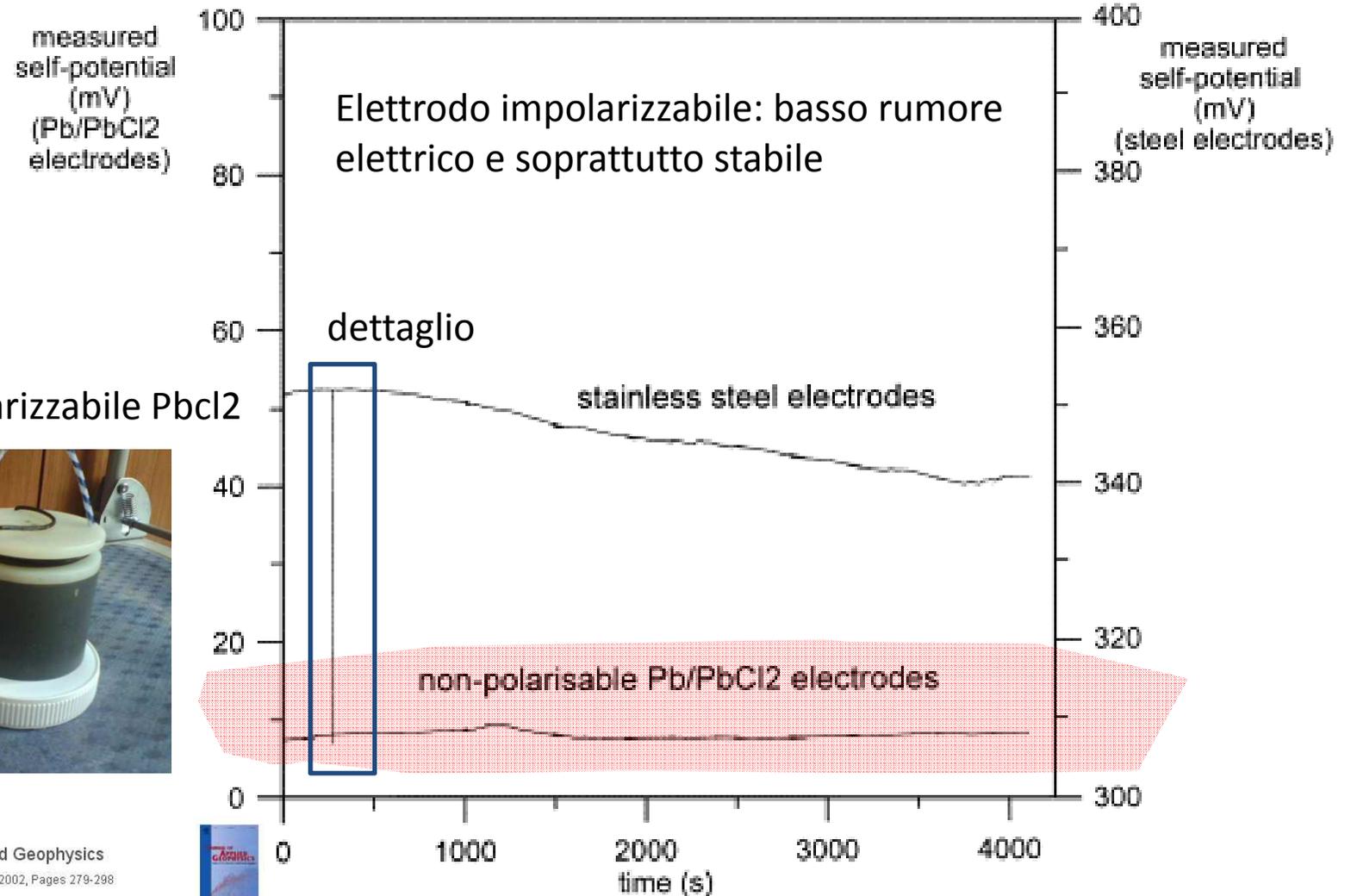
- misure di compagnia

- con elettrodo fisso ed un altro mobile
- con 2 elettrodi separati da una distanza ( $d_s$ )
- voltmeter con impedenza d'ingresso  $> 10^8 \Omega$

sono necessari per la misura dei potenziale spontanei<sup>37</sup>

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – elettrodi impolarizzabili vs elettrodi ordinari in acciaio inox

Elettrodo impolarizzabile PbCl<sub>2</sub>



Journal of Applied Geophysics  
Volume 50, Issue 3, June 2002, Pages 279-298



## Measuring techniques in induced polarisation imaging

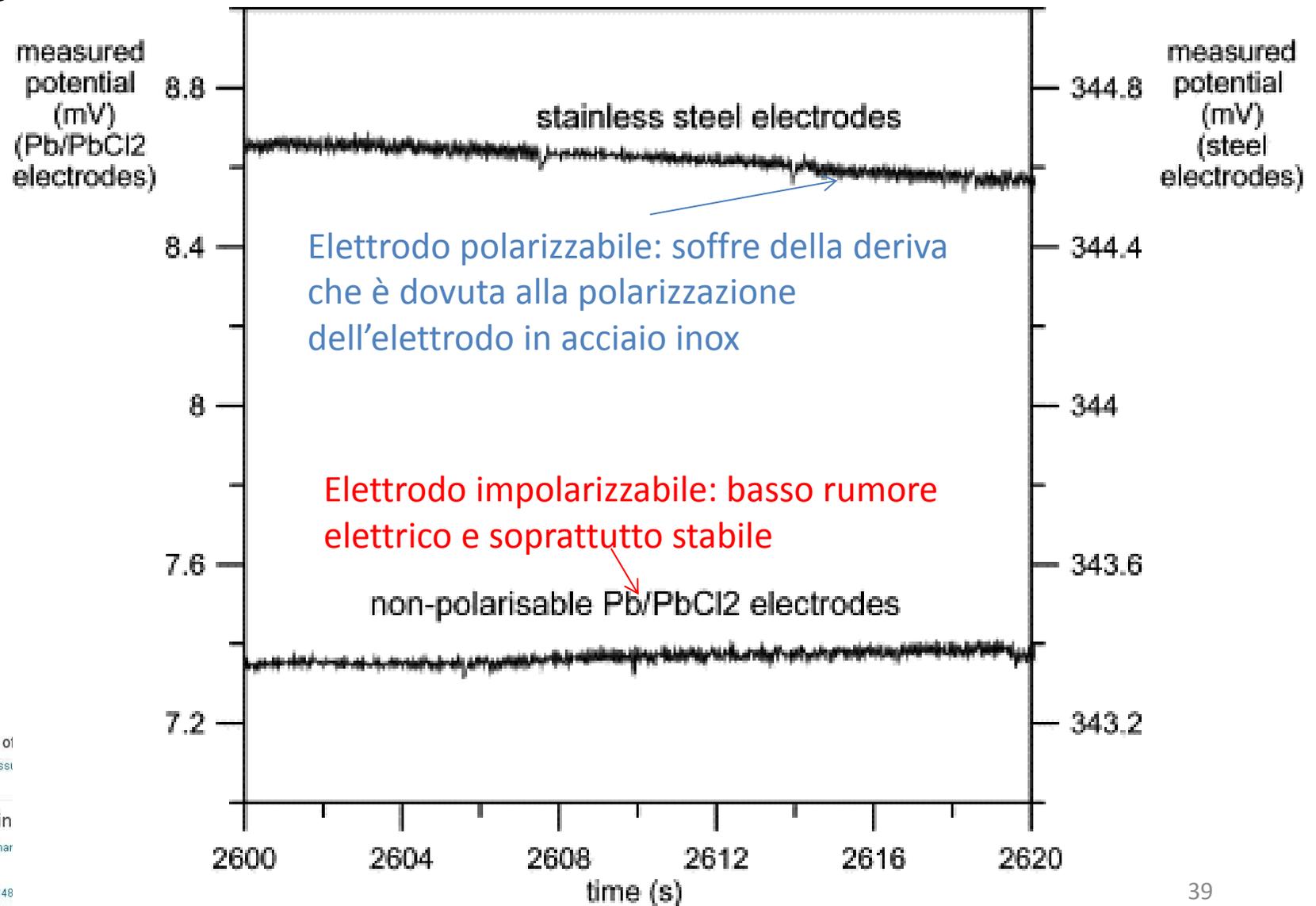
Torleif Dahlin<sup>a, \*</sup>, Virginie Leroux<sup>a</sup>, Johan Nissen<sup>b, 1</sup>

Show more

[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00148-9)

Get rights and content

# Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – elettrodi impolarizzabili vs elettrodi ordinari - dettaglio



Journal of  
Volume 50, Issue

Measuring techniques in in

Torleif Dahlin<sup>1,2</sup>, Virginie Leroux<sup>2</sup>, Johar

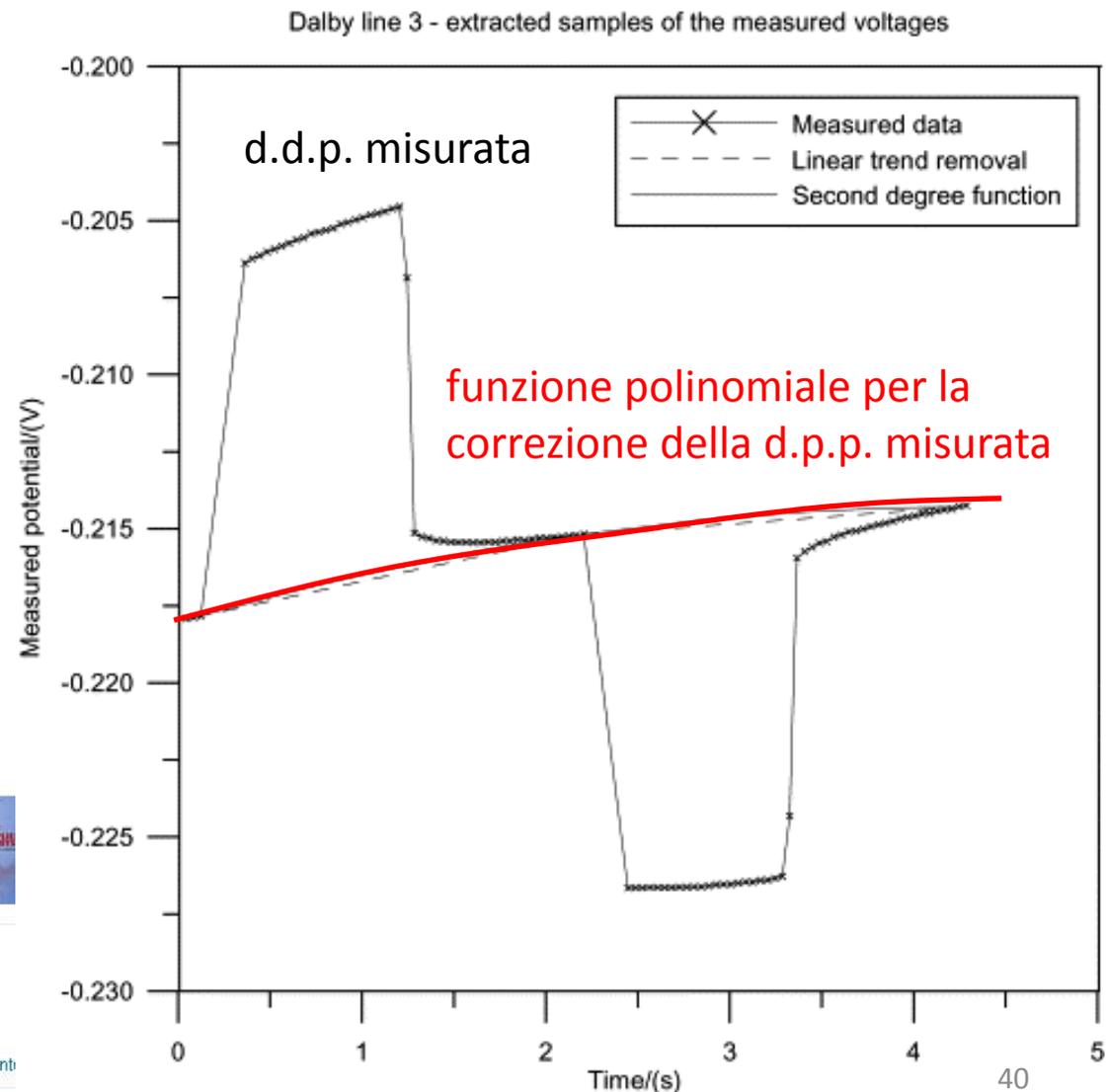
Show more

[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00148](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00148)

Abstract

Metodo geoelettrico passivo: Potenziali Spontanei (PS) – self potential (SP) – correzione dei PS in automatico durante l'energizzazione degli elettrodi per la trasmissione

Della corrente nel Sottosuolo: metodi Ohmici o galvanici



Journal of Applied Geophysics  
Volume 50, Issue 3, June 2002, Pages 279-298



Measuring techniques in induced polarisation imaging

Torleif Dahlin<sup>a</sup>, Virginie Leroux<sup>a</sup>, Johan Nissen<sup>b, 1</sup>

Show more

[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00148-9)

Get rights and content

Abstract

Elettrodo impolarizzabile 'Pbcl<sub>2</sub>' per la misura della d.d.p. adatto per misure su qualsiasi tipo di terreno ma spesso serve per effettuare misure in ambiente pavimentato



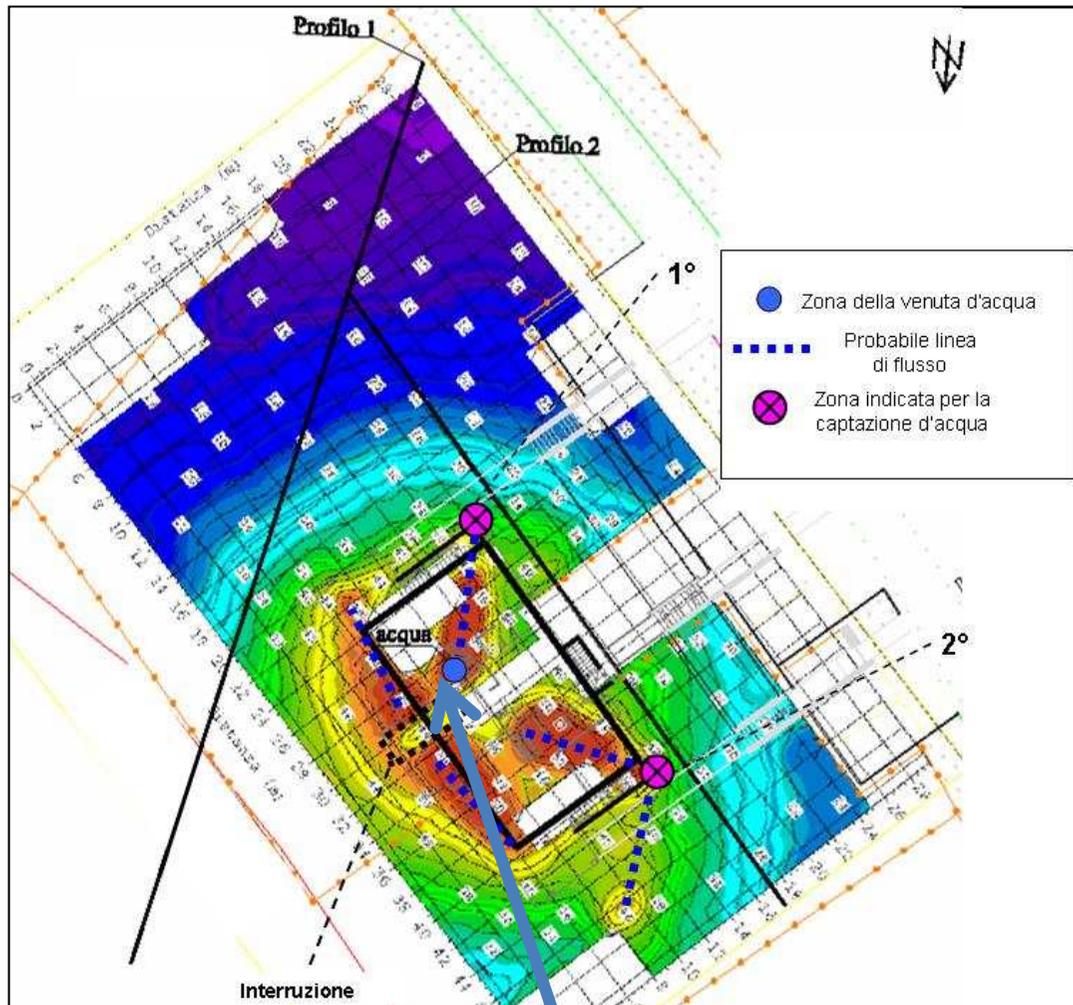
# Metodo geoelettrico attiva: ERT 2D e **mise-a-la-masse** (MALM)

Individuazione dei percorsi preferenziali di flusso idrico sotterraneo può essere effettuato mediante tecniche geoelettriche attive tipo la mise-a-la-masse energizzando (elettrodo A) l'acqua in un punto (nel caso specifico: zona allagata nei nel seminterrato) e misurando la d.d.p. con elettrodi impolarizzabili



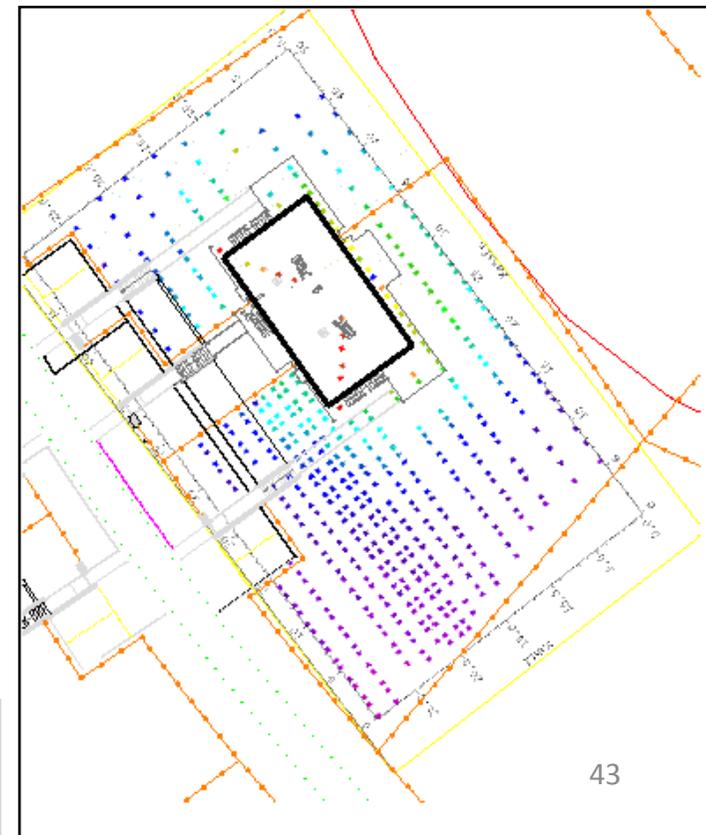
# Metodo geoelettrico attiva: **mise-a-la-masse** - Risultato

Individuazione dei percorsi preferenziali di flusso idrico sotterraneo può essere effettuato mediante tecniche geoelettriche attive tipo la mise-a-la-masse energizzando (elettrodo A) l'acqua in un punto (nel caso specifico: zona allagata nei nel seminterrato) e misurando la d.d.p. con elettrodi impolarizzabili



posizione elettrodo di corrente A. le zone rosse indicano i possibili percorsi preferenziali. **Interruzione**: posizione perforazione effettuata per intercettare il flusso d'acqua pre indagine geofisica

**Distribuzione dei punti di misura della d.d.p. con elettrodi impolarizzabili (punti colorati)**



Il metodo geoelettrico  
fine parte 1b