



# QUADERNI di GEOFISICA

La geoelettrica capacitiva.  
Una tecnica speditiva per l'esplorazione  
geofisica del sottosuolo



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

166

**Direttore Responsabile**

Valeria DE PAOLA

**Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)  
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)  
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)  
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)  
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)  
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)  
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)  
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)  
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)  
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)  
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)  
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)  
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)  
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)  
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

**Redazione e Produzione editoriale**

Francesca DI STEFANO - Coordinatore  
Rossella CELI  
Barbara ANGIONI  
Massimiliano CASCONI  
Patrizia PANTANI  
Tel. +39 06 51860068  
redazione@ingv.it

**REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO**

© 2014 INGV Istituto Nazionale  
di Geofisica e Vulcanologia  
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI  
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

# QUADERNI di GEOFISICA

La geoelettrica capacitiva.  
Una tecnica speditiva per l'esplorazione  
geofisica del sottosuolo

*The capacitive-coupled resistivity method.  
A fast tool for subsurface geophysical exploration*

Marco Marchetti, Valerio Materni, Vincenzo Sapia

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale

Accettato 14 ottobre 2020 | Accepted 14 October 2020

Come citare | How to cite Marchetti M. et al., (2020). La geoelettrica capacitiva. Una tecnica speditiva per l'esplorazione geofisica del sottosuolo. Quad. Geofis., 165: 1-36, <https://doi.org/10.13127/qdg/166>

In copertina Immagine satellitare dell'area di intervento e profili geofisici | Cover Satellite image of the survey area with the trace of the geophysical profiles

166



# INDICE

<b>Riassunto</b>	<b>7</b>
<b><i>Abstract</i></b>	<b>7</b>
<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>1. La tecnica</b>	<b>8</b>
1.1 Lo strumento	8
1.2 Modalità operative	10
1.3 Profondità di indagine	11
1.4 L'accoppiamento capacitivo	12
<b>2. Casi di studio</b>	<b>14</b>
2.1 Territorio	14
2.1.1 Parco dell'Appia Antica	14
2.1.2 Cavità a Roma	16
2.1.3 Centro Storico di Firenze	20
2.1.4 Mappatura di Faglie	21
2.2 Archeologia	24
2.2.1 Individuazione di necropoli	24
2.3 Ambiente	25
2.3.1 Analisi discariche	25
<b>3. Limiti di impiego</b>	<b>27</b>
3.1 Difficoltà operative	27
3.2 <i>Noise</i> in ambito urbano	28
<b>4. Confronti con ERT</b>	<b>30</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>30</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>31</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>31</b>



# Riassunto

Negli ultimi anni la notevole crescita scientifico-tecnologica nel settore della geofisica applicata è stata indubbiamente favorita dalla marcata innovazione strumentale che ha permesso di sviluppare tecniche speditive e migliorare la qualità dei dati acquisiti.

La tomografia elettrica capacitiva (CCR) è una tecnica di prospezione geofisica che consente di ottenere, in tempi rapidi, dati sulla resistività elettrica del sottosuolo. La sua principale caratteristica è quella di non impiegare elettrodi infissi nel terreno per l'energizzazione rendendo possibile l'esecuzione del rilievo in tempi piuttosto ridotti e ottenendo rapidamente informazioni sulla presenza di cavità o altre discontinuità nel sottosuolo di natura antropica (muri, tombe, pavimenti) ma anche di origine geologica (faglie).

I modelli di resistività ottenuti con questa tecnica sono in molti casi pienamente confrontabili con quelli ricavati dalla tomografia elettrica classica, che richiede però tempi di esecuzione più lunghi.

In questo lavoro vengono presentati alcuni risultati ottenuti impiegando la tecnica CCR in contesti differenti, (archeologico, geologico, ambientale, urbano) e descritti i vantaggi e i limiti di tale metodologia riscontrati nei vari ambiti di applicazione.

## Abstract

*In recent years, the remarkable technological growth in the field of applied geophysics has undoubtedly been favored by the marked instrumental innovation that allowed the use of fast and easy-deployable techniques as well as to improve the quality of the measured data.*

*Capacitive-coupled resistivity tomography (CCR) is a geophysical prospecting technique that rapidly provides the electrical resistivity distribution of the subsoil along 2D acquisition profiles, as no galvanic contact is needed and sensors can be dragged over the surface. In this work, we present a series of results required by applying this technique in various contexts ranging from archaeological studies and geological and environmental applications also in urban contexts. We also show that recovered resistivity models are comparable with those obtained with the more laborious galvanic electrical measurements. We will explore not only the advantages of the technique in providing useful subsurface information but also the disadvantages and its main limitations.*

Keywords Tomografia elettrica capacitiva; OhmMapper | Capacitive-coupled resistivity tomography; OhmMapper

---

## Introduzione

Come è noto, la geofisica applicata si avvale di tecniche non invasive per l'esplorazione a differenti profondità del sottosuolo per studi archeologici, geologico-strutturali e ambientali.

Nella geofisica di esplorazione piuttosto superficiale, conosciuta come *near surface geophysics*, i metodi maggiormente applicati sono quelli magnetici, geoelettrici, elettromagnetici, sismici e gravimetrici. Ogni metodologia di indagine ha uno specifico campo di applicazione e richiede tempo per la progettazione, l'esecuzione del rilievo e la successiva elaborazione dei dati.

Spesso è necessario però avere informazioni sui primi metri del sottosuolo in tempi rapidi. In

questi casi può venire in aiuto la tecnica elettromagnetica a impulsi, il georadar, sicuramente veloce ma con limitazioni nella profondità di indagine legate alla presenza di umidità, ai terreni argillosi e ai riporti in area urbana.

Una nuova tecnica, che negli ultimi anni si sta diffondendo è la geoelettrica capacitiva (CCR) che permette di eseguire, in modo speditivo, tomografie di resistività fino ad una profondità di circa 10 metri del tutto confrontabili a quelle ottenute dalla geoelettrica tradizionale ad accoppiamento galvanico. Tale metodologia risulta anche particolarmente utile quando utilizzata come propedeutica alle successive indagini geofisiche di dettaglio.

In questo lavoro vengono descritte la metodologia di indagine, le caratteristiche strumentali e operative, i limiti di applicazione, i risultati ottenibili e presentati casi di studio e di impiego in ambiti molto differenti, da quello archeologico alla sicurezza in area urbana, dal monitoraggio del territorio alla geologia strutturale.

## 1. La tecnica

### 1.1 Lo strumento

Il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo descritto in queste pagine è l'*OhmMapper* (figura 1), prodotto dalla Geometrics, che permette di misurare in modo speditivo la resistività apparente del sottosuolo fino a una profondità di 10 metri.

Come è noto, la maggior difficoltà pratica con la quale bisogna cimentarsi nell'effettuare misure con gli strumenti ad accoppiamento galvanico consiste nella disposizione degli elettrodi nel terreno, operazione che richiede del tempo e che può risultare piuttosto laboriosa in presenza di suoli compatti. Nel caso poi di indagini in aree urbane si aggiunge la difficoltà di dover praticare fori di opportuno diametro nell'asfalto per raggiungere il terreno sottostante e assicurare un buon contatto elettrico, fino all'impossibilità di realizzarli in presenza di pavimentazioni storiche. Queste problematiche possono essere efficacemente superate con l'impiego dell'*OhmMapper* che, a differenza dei comuni georesistivimetri, non prevede il posizionamento di elettrodi nel terreno.

Le misure infatti sono eseguite tramite un cavo, costituito da un *array* di dipoli di cui uno, il trasmettitore, energizza il terreno e gli altri ricevono il segnale trasmesso mentre il sistema viene trascinato sul sito da investigare.



Figura 1 Immagine dello strumento *OhmMapper* (modificata dal manuale *OhmMapper*, Geometrics).  
Figure 1 *OhmMapper* instrumentation (modified from Geometrics *OhmMapper* manual).



Le antenne dello strumento sono costituite da un cilindro di 50 cm realizzato in materiale plastico resistente all'usura dove alloggiano le batterie e l'elettronica, agli estremi del quale si collegano i dipoli di lunghezza 5 o 10 metri. Queste vengono poi collegate tramite un cavo ottico a un'apposita centralina, una *console* della *Geometrics*.

I dati acquisiti sono georeferenziati per mezzo di GPS collegato al sistema in modo da avere la posizione planimetrica dei tracciati. Il sistema opera ad una frequenza di 16.5 kHz e l'acquisizione dei dati può spingersi fino a una lettura al secondo.

Pertanto, oltre ad avere un rilievo continuo della resistività del terreno, si ha una maggiore velocità di acquisizione e si eliminano i disturbi generati dalle resistenze di contatto terreno-picchetto, a volte particolarmente elevate e fastidiose. Ovviamente il trascinarsi del sistema di antenne (dipoli) risulta particolarmente agevole in città o in terreni piuttosto lisci, mentre può presentare difficoltà in presenza di asperità del piano campagna, nei terreni arati o con stoppie, arbusti e vegetazione infestante.

Tutti questi fattori possono dar luogo a segnali rumorosi, che generalmente vengono attenuati tramite accurate tecniche di elaborazione e filtraggio dei dati. Poiché non è possibile avere informazioni dirette sull'incertezza associata a ogni singola misura, la qualità dei dati è stimata sulla base del numero dei valori fuori scala osservati e dal residuo ottenuto a seguito dell'inversione dei dati (*Root Mean Square*, RMS espresso in %).

La configurazione elettrodica utilizzata è assimilabile a un classico dipolo-dipolo, quindi con il sistema di energizzazione esterno e posto lateralmente rispetto a quello di misura. Campionando alla frequenza di 1 secondo si ottiene una densità dei dati piuttosto alta.

Variando la lunghezza dei dipoli (trasmettente e riceventi) e soprattutto la loro distanza reciproca (5-10-15 metri) si riesce a rilevare la distribuzione della resistività a differenti profondità che dipende, oltre che dalla geometria elettrodica adottata, dalla resistività media del terreno. Inoltre con l'esecuzione di profili paralleli è possibile realizzare ricostruzioni tridimensionali del sottosuolo e mappe di resistività.

La modalità di misura di tipo dipolo-dipolo risulta efficace per rilevare le variazioni orizzontali delle proprietà elettriche del terreno. Pertanto il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo ottiene migliori risultati nel rilevare le strutture antropiche che si sviluppano in verticale, come muri, fondazioni e tombe o le discontinuità geologico-strutturali, come cavità e faglie.

Da ricordare che nelle misure di geoelettrica non esiste una corrispondenza biunivoca tra valore di resistività misurato e il tipo di terreno, poiché questa è influenzata da numerosi fattori e, pertanto, l'interpretazione di un modello del sottosuolo va condotta cercando di vincolare e integrare quest'ultimo con informazioni sulla stratigrafia e sulla struttura geologica del sito in esame.

L'allestimento in campo dell'*OhmMapper* prevede la realizzazione di un *array* costituito dal trasmettitore, posizionato in coda, separato dai ricevitori tramite una corda non conduttiva di lunghezza proporzionale a quella delle antenne. Il sistema è gestito per mezzo di una *console* sostenuta da una cintura e resa solidale all'operatore tramite cinte (figura 2).

Durante l'acquisizione il ricevitore prossimo all'operatore, e a cascata tutti gli altri, sono collegati alla *console* attraverso una fibra ottica e un cavo isolante. Tutto il dispositivo a terra è fissato alla cintura tramite un gancio che impedisce sforzi di trazione sulla boccola di collegamento con la *console* stessa.

Lo strumento viene trascinato lungo una linea, materializzata a terra da traguardi fissi posizionati a distanza regolare, mentre le misure sono acquisite e memorizzate in funzione del tempo. In questo modo, presupponendo che la velocità dell'operatore sia costante è possibile definire le posizioni lungo la linea percorsa e acquisire in continuo dati di resistività apparente del sottosuolo.

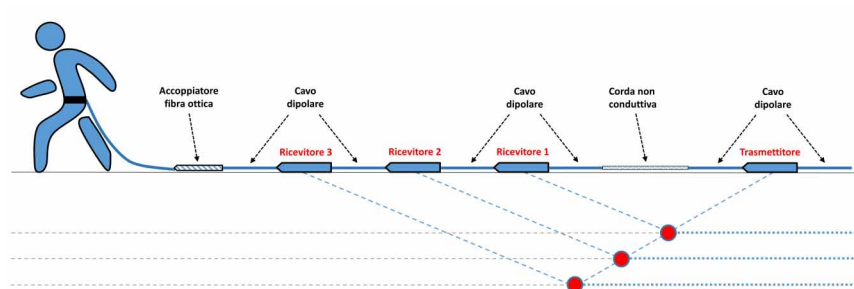


Figura 2 Configurazione array di misura equipaggiato con tre ricevitori.

Figure 2 Measurement array configuration equipped with three dipolar receivers.

Generalmente il tracciato di acquisizione viene ripetuto più volte adottando configurazioni differenti sia aumentando la lunghezza della corda di separazione che la lunghezza dei dipoli stessi; in questo modo la misura di resistività viene realizzata a profondità crescenti, in modo simile al progressivo distanziamento degli elettrodi di corrente e di potenziale nella geoelettrica tradizionale.

I dati raccolti sono esportati su un pc per mezzo di un software dedicato e successivamente elaborati. Per ciascun rilievo il risultato finale consiste in una sezione con un modello che rappresenta la distribuzione della resistività nel sottosuolo.

La produttività in termini di rapporto superficie indagata/tempo del sistema è maggiore rispetto a quella ottenibile da un georesistivimetro a corrente continua e accoppiamento galvanico. Inoltre, poiché le misure sono acquisite in continuo, al ritmo di una al secondo, la densità di queste lungo la linea di indagine non dipenderà dalla distanza tra gli elettrodi ma dalla velocità di trascinarsi dell'operatore.

Ovviamente acquisire profili lungo singole linee e utilizzare algoritmi di inversione 2D comporta l'implicita assunzione che la resistività del terreno sia costante nelle direzioni ortogonali e che le sue variazioni avvengano soltanto lungo il profilo e con la profondità. Nella realtà però, le correnti scorrono nelle tre dimensioni dello spazio e la presenza di anisotropie e disomogeneità laterali sia sulla superficie sia sepolte, influenzano il pattern elettro-stratigrafico della sezione e non consentono una ricostruzione univoca del sottosuolo.

## 1.2 Modalità operative

Dopo aver osservato e valutato le condizioni logistiche del sito si stabiliscono i profili da eseguire e si procede all'assemblaggio dei dipoli collegando i cavi ai lati dei cilindri. Si possono utilizzare fino a 5 dipoli riceventi.

Pertanto la lunghezza del dispositivo da trascinarsi sul terreno varia in funzione della configurazione geometrica adottata (Tabella 1)

Tabella 1 Lunghezza degli array più frequentemente utilizzati in campagna.  
Table 1 Arrays' length most frequently used in the field.

n° ricevitori	Lunghezza Dipoli (metri)	Lunghezza corda di separazione (metri)	Lunghezza totale array (metri)
3	5	5	23
5	5	10	33
5	10	10	53

Si verifica poi sia il corretto accoppiamento dei ricevitori con il terreno che la comunicazione tra tutte le componenti del sistema attraverso la lettura di una codifica binaria luminosa (lampeggi di *led* posti su ricevitori e trasmettitore), riscontrando la corrispondenza con il codice riportato sulla *console* di acquisizione. Questa procedura di verifica si applica anche per stabilire la lunghezza massima possibile della corda non conduttiva, dipendente dalle caratteristiche elettriche del sottosuolo e che sostanzialmente condiziona la massima profondità di indagine.

La corda viene posizionata tra il dipolo trasmittente e quello ricevente più vicino, mentre la fibra ottica tra il ricevitore e il cavo dipolare di collegamento alla *console*.

Prima di iniziare l'acquisizione devono essere impostati i parametri geometrici della configurazione adottata.

Va quindi specificata:

- la distanza tra l'operatore e la fibra ottica;
- la lunghezza del dipolo trasmittente e dei dipoli riceventi;
- la lunghezza della corda non conduttiva di collegamento fra trasmettitore e ricevitori.

I dati acquisiti, registrati e graficati in tempo reale sulla *console*, sono poi trasferiti ad un *notebook* utilizzando il software *MagMap 2000* [Geometrics Inc, 2001].

Dopo aver inserito le informazioni sulla geometria dell'*array* adottata, si procede all'elaborazione utilizzando un *software* di inversione della tomografia elettrica che impiega codici di calcolo dedicati. Tali algoritmi si basano sul concetto di minimizzare la differenza tra dato misurato e modello, quantificata tramite lo scarto quadratico medio. Il programma *Res2Dinv* (*Geotomo software*) in particolare usa un metodo iterativo chiamato "*smoothness constrained*" [deGroot-Hedlin and Constable, 1990].

### 1.3 Profondità di Indagine

La profondità di indagine dipende dalla geometria di acquisizione, cioè dal numero di dipoli utilizzati, dalla loro lunghezza, dalla distanza reciproca tra il trasmettitore e i ricevitori nonché dalle caratteristiche del terreno investigato.

Nei rilievi effettuati con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico e configurazione elettrodica di tipo dipolo-dipolo è la distanza tra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale che determina la profondità investigata. Nel caso dell'*OhmMapper* invece è la spaziatura tra il ricevitore e il trasmettitore, che però è condizionata dalla capacità di ricezione e decodifica del segnale trasmesso.

Infatti, poiché l'attenuazione di quest'ultimo è maggiore in un mezzo conduttivo rispetto a uno resistivo (effetti di *skin depth*, descritti nel paragrafo successivo), il ricevitore sarà in grado di rilevare i segnali trasmessi a distanze maggiori in un terreno sufficientemente resistivo ottenendo così un sondaggio più profondo. Nei casi in cui sia addirittura presente acqua stagnante durante la misura si può determinare una caduta di corrente uniforme lungo il cavo. Se parte di questo è a contatto con acqua quindi il calcolo dei valori di resistività apparente  $\rho_a$  può esserne influenzato.

Usualmente la profondità di investigazione con il sistema *OhmMapper* è dell'ordine dei 10 metri.

## 1.4 L'accoppiamento capacitivo

Come sottolineato nei paragrafi precedenti, la tomografia elettrica capacitiva differisce da quella classica a contatto galvanico per le modalità di energizzazione del terreno e di acquisizione del dato misurato. Tale metodologia sfrutta il fenomeno fisico dell'accoppiamento capacitivo, ovvero il fluire di una carica da un conduttore a un altro, prossimo al primo, applicando una tensione alternata.

Il trasmettitore utilizza la capacità di un antenna per accoppiare un segnale nel terreno iniettando corrente e analogamente il ricevitore, sfruttando lo stesso fenomeno, rileva le tensioni dal suolo. Quest'ultimo è quindi caricato per induzione e non per contatto.

Nelle misure convenzionali di resistività a contatto galvanico il dispositivo elettrodico di misura è costituito da quattro elettrodi (figura 3) e permette di determinare la resistività apparente ( $\rho_a$ ) in termini della corrente iniettata ( $I$ ) e della tensione osservata ( $\Delta V$ ).

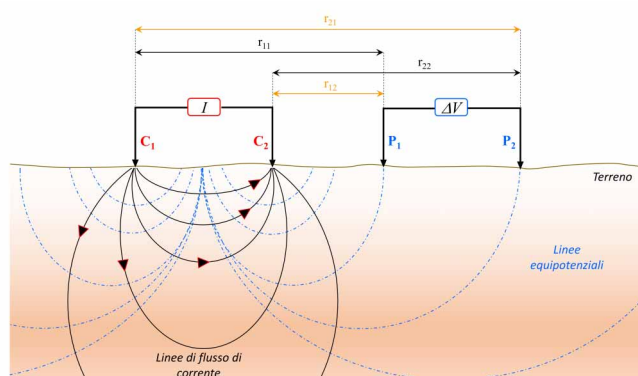


Figura 3 Disposizione geometrica dei quattro elettrodi utilizzata per misure di resistività a contatto galvanico (modificata dopo [Kuras 2006]).

Figure 3 Dipole-dipole array for galvanic electrical resistivity measurements (modified after [Kuras et al., 2006]).

La resistività, che viene definita come apparente  $\rho_a$  (valore dovuto al volume di sottosuolo investigato che è generalmente molto eterogeneo ed anisotropo dal punto di vista elettrico) può così essere espressa:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K^{DC} \quad (1)$$

dove con  $K^{DC}$  si definisce il fattore geometrico

$$K^{DC} = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{22}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} \right]} \quad (2)$$

Nel caso di un semispazio omogeneo, la resistività apparente  $\rho_a$  è uguale alla resistività del sottosuolo  $\rho$  ed è costante per qualsiasi geometria elettrodica e valore di corrente.

Nello strumento CCR l'antenna è un cavo coassiale e il segnale è trasmesso ad una frequenza di 16.5 kHz. La capacità del cavo è determinata principalmente dalla sua lunghezza; in generale

più è lungo, maggiore è la sua capacità e quindi “accoppia” più corrente nel terreno. I conduttori presenti nel cavo rappresentano l’armatura di un condensatore, il terreno la seconda armatura mentre la guaina del cavo il materiale isolante (figura 4).

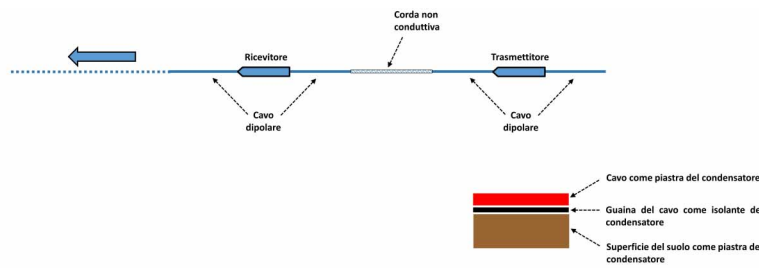


Figura 4 Schema dell'accoppiamento capacitivo cavo-terreno (modificata dopo [Bottacchi, 2009]).

Figure 4 Capacitive coupling scheme between the cable and the ground (modified after [Bottacchi, 2009]).

In regime di tensione a corrente alternata (AC) si hanno variazioni di potenziale per le quali le “armature”, per induzione elettrostatica, si caricano e si scaricano in continuazione, generando una corrente variabile che circola poi nel terreno.

Il ricevitore di uno strumento ad accoppiamento capacitivo è equivalente ad un voltmetro per corrente alternata. Il voltaggio misurato è proporzionale alla resistività del terreno che separa i due dipoli e alla corrente emessa dal trasmettitore. La corrente trasmessa e la tensione ricevuta sono funzioni integrali sull’intera lunghezza dei dipoli.

Le misure ottenute con la tecnica CCR sono convenzionalmente considerate analoghe a quelle misurate con sistema galvanico nell’ipotesi che l’acquisizione avvenga rispettando determinate condizioni fisiche ovvero in assenza di accoppiamento magnetico tra sensore e terreno, meglio nota come condizione di basso numero di induzione (B).

Il numero di induzione B è così definito [McNeil, 1980]:

$$B = \frac{s}{\delta} \tag{3}$$

con s distanza tra il centro del trasmettitore e il centro del ricevitore e dove

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \tag{4}$$

è la *skin depth*, definita come la distanza per cui il campo primario viene attenuato di un valore pari ad 1/e (nello specifico ρ è la resistività elettrica, μ la permeabilità magnetica nel vuoto e f la frequenza).

In condizioni operative normali infatti, il campo magnetico può essere ignorato fintanto che la distanza trasmettitore-ricevitore si trova entro un fattore pari allo *skin depth* (δ).

La condizione di basso numero di induzione comporta quindi delle restrizioni sia sulle dimensioni massime dell’array sia sulla resistività minima del terreno. Nello specifico, la condizione di basso numero di induzione è soddisfatta quando B risulta essere un numero molto piccolo (B << 1). Come si evince dalla formula (3), ciò avviene sempre quando la distanza (s) tra dipolo ricevente e dipolo trasmittente è inferiore allo *skin depth*, ovvero in tutte quelle situazioni dove la resistività del terreno è molto elevata, posti che siano bassi i valori di frequenza f con cui viene trasmesso il segnale AC.

Quanto sopra descritto pone un limite alla profondità di investigazione ottenibile con i metodi CCR. Infatti, in terreni molto resistivi, la tensione creata da una data corrente che scorre nel sottosuolo sarà grande rispetto alla tensione causata dall'induttanza del suolo stesso, quindi l'effetto *skin depth* non rappresenta un problema per questo tipo di terreni e sarà quindi soddisfatta la condizione riportata in equazione (3).

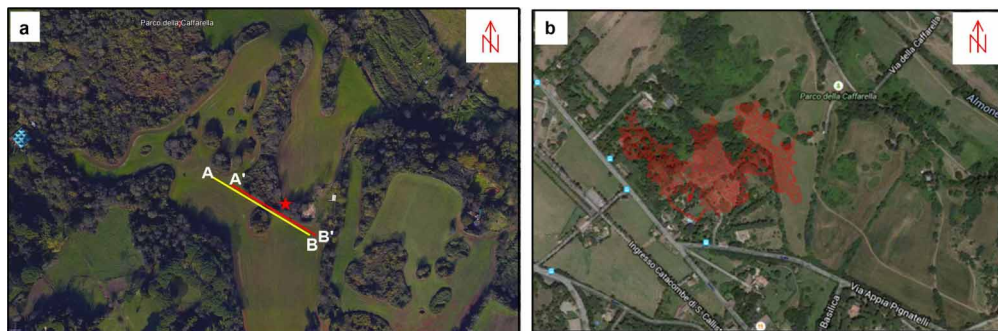
Tuttavia, nel caso di terreni conduttivi, la tensione creata dall'induttanza può essere abbastanza grande da ridurre la corrente che scorre in profondità nel terreno, violando pertanto la condizione di basso numero di induzione. Da ciò si deduce quindi che i mezzi piuttosto resistivi come, ghiaie, sabbie asciutte o asfalto consentono un buon accoppiamento capacitivo mentre quelli maggiormente conduttivi come argille, acqua salata o strutture metalliche ostacolano la trasmissione del segnale in profondità.

## 2. Casi di studio

### 2.1 Territorio

#### 2.1.1 Parco dell'Appia Antica

Tra le attività a carattere sperimentale condotte con l'*OhmMapper* viene qui descritta quella relativa allo studio geofisico di cavità presenti nell'area parco dell'Appia Antica a Roma (figura 5) dove è presente un reticolo di gallerie piuttosto articolato che si sviluppa fino a qualche metro di profondità rispetto al piano campagna (figura 5b).



**Figura 5** a) Immagine satellitare con ubicazione dell'area di indagine nel Parco dell'Appia Antica (RM); in rosso la traccia del profilo di tomografia elettrica classica. In giallo la traccia del profilo *OhmMapper*. La stella rossa indica l'ingresso ad una cavità sottostante. b) Reticolo delle gallerie.

**Figure 5** a) Satellite image of the survey area located in the Parco dell'Appia Antica in Rome (Italy). Solid red line indicate the trace of the ERT profile, yellow line show the *OhmMapper* profile. The red star indicate the position of the entrance of a known burial. b) Mapped galleries.

In particolare è stata messa a confronto la geoelettrica capacitiva con quella ad accoppiamento galvanico su una di queste cavità (figura 6).

Sono stati pertanto realizzati con entrambe le tecniche due profili paralleli a pochi metri di distanza l'uno dall'altro, in prossimità di una rilievo al di sotto della quale si sviluppa la galleria. Il rilievo CCR è stato effettuato utilizzando una configurazione a tre ricevitori con dipoli da 5

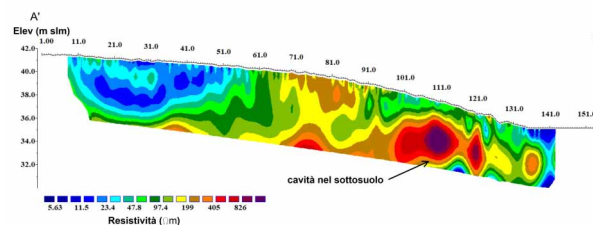
metri e lunghezza della corda variabile tra 5 e 15 metri, raggiungendo una profondità di indagine di circa 6 metri. Mediante un GPS interfacciato con lo strumento è stato anche ricavato il relativo profilo topografico.



**Figura 6** Ingresso principale della galleria.

*Figure 6* Gallery main entrance.

Il modello di resistività ottenuto mostra chiaramente un'area, tra le progressive 100 m e 120 m, caratterizzata da elevati valori di resistività ( $\rho > 700 \Omega\text{m}$ ) corrispondente all'ingresso della galleria (figura 7). Come si nota dalla sezione, pressoché alla stessa quota sono presenti altri settori resistivi che possono essere messi in relazione allo sviluppo di altre cavità.

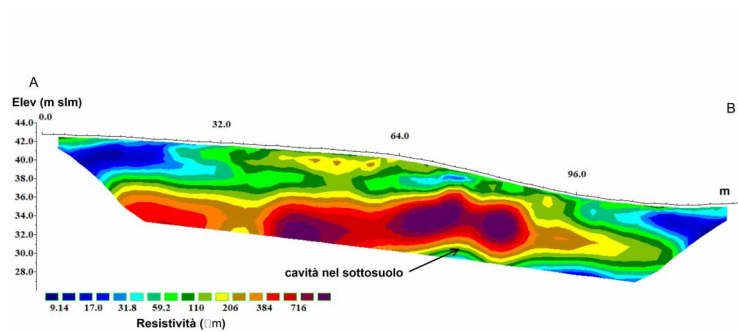


**Figura 7** Sezione 2D di resistività ottenuta con il sistema *OhmMapper*. La freccia nera indica l'ubicazione nel modello della cavità nota nel sottosuolo.

*Figure 7* 2D resistivity section as derived from the *OhmMapper* survey. Solid black arrow indicate the position of the already known burial.

Le misure di tomografia elettrica classica sono state acquisite utilizzando un Syscal R2 (*Iris Instruments*) disponendo sul terreno 64 elettrodi con passo elettrodico 2 m e misurando in configurazione dipolo-dipolo, cioè impiegando lo stesso tipo di *array* adottato dalla geoelettrica capacitiva. La profondità raggiunta è stata di circa 8-9 metri.

Nella sezione mostrata in figura 8 si ritrovano sostanzialmente le stesse variazioni di resistività nel sottosuolo osservate con la precedente metodologia, un ottimo riscontro delle geometrie e delle profondità dei corpi resistivi anche se ovviamente questo ultimo modello risulta molto più dettagliato e preciso e con una percentuale di errore nel calcolo più bassa.



**Figura 8** Sezione 2D di resistività ottenuta con la tomografia di resistività elettrica classica. La freccia nera indica l'ubicazione nel modello della cavità nota nel sottosuolo.

**Figure 8** 2D resistivity section as derived from traditional electrical resistivity tomography system. Solid black arrow indicate the position of the already known burial.

### 2.1.2 Cavità a Roma

Come è noto, ogni anno nella città di Roma si verificano numerosi cedimenti del manto stradale con apertura di voragini più o meno estese che impattano profondamente sulla viabilità e sulla sicurezza stradale.

Tali sprofondamenti sono riconducibili al crollo della volta di cavità artificiali (cunicoli, catacombe, fungaie, cave in sotterraneo, ecc.) e possono avvenire a piccola o media profondità dal piano campagna.

La causa di tali dissesti è da attribuire alla conformazione geologica del sottosuolo romano costituita da terreni incoerenti di natura vulcanoclastica, come tufi e piroclastici o di origine fluviale come sabbie e ghiaie, alle differenti proprietà geotecniche dei materiali e agli spessori dei materiali di riporto.

Altre tipologie di crolli sono quelli collegati a perdite idriche da tubazioni, dalla rete fognaria o a intense precipitazioni. In alcuni casi questi eventi si manifestano in modo del tutto improvviso, repentino, in altri lentamente con segnali premonitori più o meno evidenti. La viabilità ma anche gli edifici prossimali possono essere messi a dura prova dal verificarsi di questi fenomeni.

È fondamentale pertanto avere a disposizione degli strumenti di intervento per caratterizzare e definire quanto più possibile l'assetto del sottosuolo in modo rapido in occasione del verificarsi di tali emergenze.

Inoltre controlli a carattere preventivo possono essere eseguiti su quelle situazioni maggiormente a rischio, con attività finalizzate al monitoraggio di una singola strada o alla mappatura di un'area più estesa, relativa per esempio a un quartiere.

In questi contesti il vantaggio nell'utilizzo della tecnica CCR consiste nell'aver rapidamente informazioni su rilevanti discontinuità nel sottosuolo e sulla possibile presenza di cavità, integrabili se necessario con tomografie elettriche tradizionali.

La prima necessità di carattere logistico è la chiusura della strada interessata dal fenomeno e l'interdizione al traffico veicolare per tutto il tempo necessario all'esecuzione dei rilievi, che nel caso di un crollo viene di fatto attuata per la sicurezza veicolare, mentre nel monitoraggio di una strada a rischio andrà adottata e garantita.

Una volta realizzato l'array di dipoli, il tempo necessario per il monitoraggio di una strada è quello richiesto dal trascinamento del dispositivo lungo il profilo da realizzare e della ripetizione dello



stesso dopo aver modificato la lunghezza della corda. I dati acquisiti sono georeferenziati così da avere la posizione dei tracciati nell'area di indagine.

Dall'elaborazione di quest'ultimi si ottiene un'immagine geofisica del sottosuolo fino ad una profondità di circa 10 metri al di sotto del manto stradale, nella quale ricercare le anomalie nella distribuzione della resistività associabili a cavità o settori a rischio sprofondamento.

Recentemente è stata condotta un'attività di sperimentazione che ha visto coinvolti l'ENEA e l'INGV per determinare il potere risolutivo della geoelettrica capacitiva congiuntamente al georadar lungo alcune strade di Roma, per le quali è sufficientemente conosciuta la presenza di cunicoli e gallerie a differenti profondità.

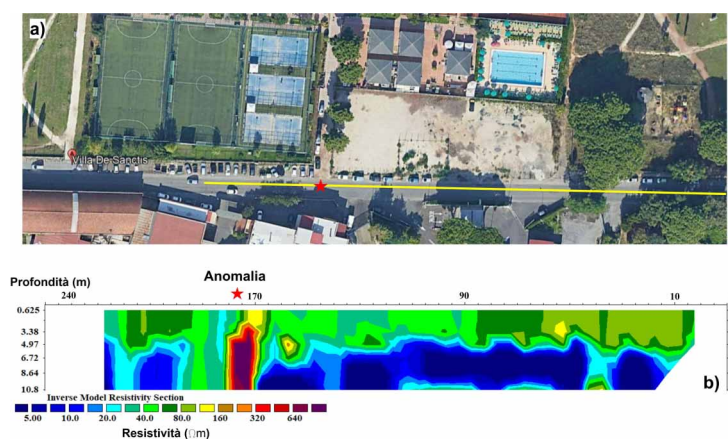
Di seguito viene riportato uno dei test effettuati relativo ad un profilo CCR lungo circa 240 metri e che ha interessato una strada del quadrante Est della città (figura 9a). Il rilievo è stato realizzato combinando diverse configurazioni nella lunghezza dei 5 dipoli (5 e 10 m) e in quella relativa alla corda di separazione, anch'essa pari a 5 e 10 metri.

Con l'impiego dei dipoli di 10 metri si è verificata più volte la perdita di segnale tra ricevitori e trasmettitore, probabilmente a causa della presenza di numerosi sottoservizi.

I dati sono stati elaborati rimuovendo anomalie, introducendo fattori correttivi di calibrazione e invertiti utilizzando metodi iterativi.

Il profilo tomografico che ne è scaturito è riportato in figura 9b, dove si osserva una distribuzione delle resistività piuttosto regolare nel sottosuolo con una fascia (40-80  $\Omega\text{m}$ ) che si sviluppa fino ai 4 metri di profondità e una più profonda, fino a circa 10 metri, con valori compresi tra 4 e 10  $\Omega\text{m}$ . Questo assetto è interrotto in corrispondenza della progressiva 170 metri (stella rossa in figura 9a), caratterizzata da una zona piuttosto resistiva ( $\rho > 500 \Omega\text{m}$ ) a sviluppo prevalentemente verticale riferibile a una possibile cavità o galleria che si estende al di sotto della sede stradale. Inoltre alla progressiva 40 m si osserva un'altra interessante interruzione nella fascia più conduttiva.

Le suddette criticità sono state successivamente confermate da misure di tomografia elettrica classica commissionate dagli Uffici della Protezione Civile di Roma Capitale così come l'intero assetto elettro-stratigrafico dell'area.



**Figura 9** a) Immagine satellitare dell'area di studio. b) Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati acquisiti. La linea gialla indica l'ubicazione del profilo mentre la stella rossa indica la posizione dell'anomalia principale rilevata al di sotto del manto stradale.

*Figure 9 a) Satellite image of the survey area located. b) 2D resistivity section as derived from the inversion of the OhmMapper data. Solid yellow line indicate the trace of the OhmMapper profile while the solid red star show the location of the main subsurface resistivity anomalies.*

Un'altra interessante attività svolta sempre a Roma riguarda un intervento geofisico effettuato con carattere di estrema urgenza su un marcato cedimento della sede stradale verificatosi nel quartiere Celio. Su richiesta della Protezione Civile di Roma Capitale sono state eseguite delle indagini geofisiche il giorno successivo al verificarsi dell'evento per definire e caratterizzare l'area interessata dal dissesto per la quale non risultavano cavità preesistenti già censite o quantomeno notizie storiche di fenomeni pregressi.

Da un primo esame visivo, nel tratto di marciapiede interessato dal cedimento, emergevano segni di sottoescavazione dovuti a una probabile perdita d'acqua della rete idrica pubblica. A titolo precauzionale era stato anche sgomberato l'intero fabbricato adiacente al cedimento stradale in attesa di verifiche sulla stabilità.

In tale contesto i rilievi geofisici richiesti erano volti a caratterizzare rapidamente il sottosuolo e verificare l'eventuale presenza di grosse cavità che potessero mettere in pericolo l'intera sede stradale.

Pertanto il giorno successivo si è intervenuti sul posto realizzando, lungo la parte centrale della strada, un profilo di tomografia elettrica capacitiva della lunghezza di circa 80 metri, impiegando lo strumento *OhmMapper* e array realizzato con 5 ricevitori, un trasmettitore e corda, tutti da 5 metri. Contemporaneamente sono stati eseguiti, sette profili georadar equidistanti 1 m e di lunghezza 60 metri lungo la strada interessata dal cedimento, utilizzando uno strumento HiMod della IDS equipaggiato con antenna da 200 MHz (figura 10).

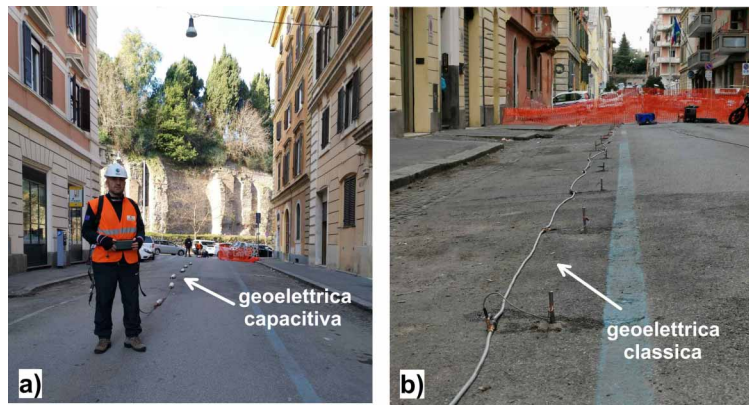


**Figura 10** Immagine satellitare dell'area di intervento e profili geofisici effettuati (le linee in verde indicano le tracce GPR, la linea in giallo la traccia della geoelettrica capacitiva mentre le linee in rosso le tracce della tomografia elettrica tradizionale).

**Figure 10** Satellite image of the area (green lines indicate the trace of the GPR profiles, solid yellow line show the capacitive-coupled resistivity profile and the solid red line indicate the ERT profiles traces).

Data la logistica e le condizioni del terreno ottimali per la tecnica, le misure di geoelettrica capacitiva (figura 11a) sono stato eseguite in meno di mezz'ora e i dati acquisiti elaborati preliminarmente sul campo. Visti i risultati, la buona risposta del terreno alla metodologia geoelettrica, associati a quelli del georadar (ancorché preliminari), si è deciso di procedere nel pomeriggio dello stesso giorno con la tomografia elettrica di dettaglio per definire meglio le eterogeneità osservate.

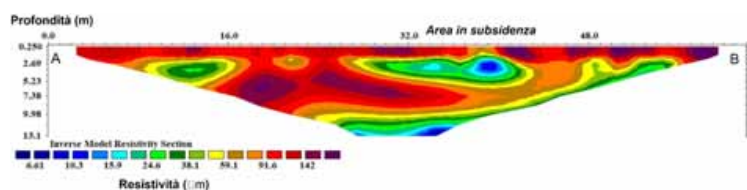
Dopo aver concordato l'intervento e ricevuto il supporto operativo per eseguire i fori nell'asfalto per il posizionamento degli elettrodi di misura, sono stati eseguiti due profili di ERT (figura 10) paralleli ai lati della strada mediante un georesistivimetro Syscal R2 della *IRIS Instruments* con 32 elettrodi e configurazione dipolo-dipolo e *Wenner-Schlumberger*.



**Figura 11** a) Immagine dell'operatore durante le fasi di acquisizione con sistema *OhmMapper*.  
b) Immagine degli elettrodi infissi nell'asfalto per l'acquisizione della tomografia elettrica galvanica.

**Figure 11** a) Geophysical field operation with the image of the *OhmMapper* system, which we deployed to map the subsoil. b) Image of the hammered steel electrodes in the asphalt road prior to set up the galvanic electrical resistivity tomography measurements.

La sezione relativa al profilo AB mostra con un ottimo dettaglio l'assetto del sottosuolo fino a una profondità di circa 13 metri. Si osservano due zone limitate arealmente con resistività inferiori al contesto (progressive 10 e 16 metri e tra 28 e 42 metri). Quest'ultima, più estesa ed evidente, con resistività media di circa  $25 \Omega\text{m}$ , è ubicata in corrispondenza del cedimento stradale. In figura 13 è riportato il radargramma relativo al profilo più vicino alla sezione di tomografia elettrica capacitiva che permette anche di confrontare i risultati provenienti dalle due tecniche. Il profilo radar, che ha raggiunto una profondità di poco inferiore ai 3 metri, ha evidenziato un netto riflettore, compreso tra le progressive 20 e 55 metri legato a un contrasto di costante dielettrica fra due mezzi con caratteristiche fisiche differenti (linea nera in figura 13). Questo riflettore è ubicato in corrispondenza del cedimento stradale.



**Figura 12** Sezione 2D di resistività ottenuta con la tomografia di resistività elettrica tradizionale.

**Figure 12** 2D resistivity section as derived from galvanic electrical resistivity tomography data.

Nella sezione geoelettrica ottenuta dal profilo CCR si individua chiaramente una regione, a forma concava, compresa tra le progressive 35 e 55 metri, che presenta un valore di resistività medio di  $20\text{-}25 \Omega\text{m}$  (terreno umido) ed è ubicata proprio in corrispondenza del cedimento dell'asfalto. Qui è stato accertato che una perdita d'acqua ha causato progressivamente l'imbibizione e il dilavamento del terreno circostante.

Da sottolineare l'ottima corrispondenza tra i risultati delle due tecniche sia per quanto riguarda la geometria di questo settore così come la profondità del riflettore.

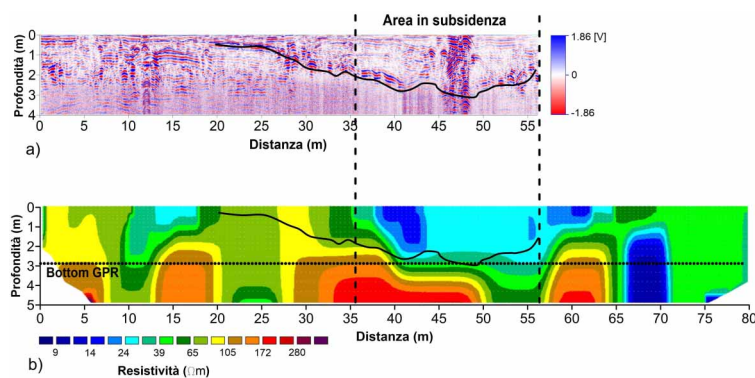


Figura 13 a) Radargramma relativo al profilo GPR. b) Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati OhmMapper.

Figure 13 a) GPR radargram. b) Recovered 2D resistivity section from the OhmMapper profile.

Le tecniche geofisiche applicate non hanno evidenziato anomalie compatibili con la presenza di estesi vuoti nel sottosuolo (almeno entro i primi metri di profondità), ma hanno permesso di valutare le dimensioni e le caratteristiche del cedimento. In base a questi risultati e non osservando ulteriori criticità nella porzione di sottosuolo indagata è stato consentito l'accesso ai mezzi meccanici per le successive verifiche e interventi.

Una volta rimossi gli strati superficiali del manto bituminoso, a poca profondità è stata effettivamente rinvenuta una perdita d'acqua da una vetusta tubazione adduttrice delle abitazioni, che è stata prontamente sostituita. Veniva anche confermata la perdita di funzionalità della rete di smaltimento delle acque meteoriche sull'intero tratto della via. L'intero sistema drenante delle acque meteoriche presentava caditoie completamente ostruite e quindi l'acqua in eccesso si disperdeva seguendo le pendenze, ristagnando per giorni dopo eventi meteorici fino all'assorbimento nel terreno. Entrambi i fattori sono stati responsabili del cedimento della sede stradale.

La seconda anomalia di dimensioni minori della precedente, individuata con la geofisica e ubicata in corrispondenza delle progressive 12-14 metri è stata verificata essere anch'essa riconducibile a una dispersione d'acqua nel sottosuolo.

La tomografia elettrica capacitiva ha permesso di ottenere rapidamente informazioni sul sottosuolo in modo non invasivo e con una buona profondità di indagine (caratteristiche queste fondamentali per interventi in tali contesti). Ha evidenziato con buona definizione le discontinuità presenti nel sottosuolo, confermate e definite con maggiore dettaglio con la ERT galvanica, escludendo la presenza di cavità di grandi dimensioni in corrispondenza del cedimento del manto stradale.

### 2.1.3 Centro storico di Firenze

Questo studio è stato effettuato nell'area del Museo Nazionale del Bargello a Firenze, nell'ambito di un progetto di ricerca volto all'analisi della vulnerabilità sismica dei palazzi storici del centro storico della città e del patrimonio culturale in essi contenuti.

Questo è appunto uno di quei contesti in cui risultano di difficile applicazione sia le indagini dirette (perforazioni e prove in situ) che le misure geofisiche solitamente utilizzate per la caratterizzazione dei parametri sismici del terreno (*down-hole*, rifrazione sismica, etc.).

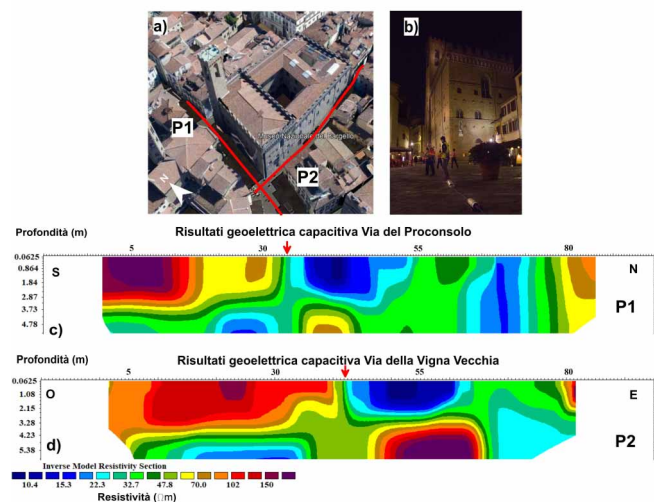
Precedenti studi dell'area hanno evidenziato la presenza in quest'area di una forte variabilità dei

parametri sismici dovuta alla presenza di terreni alluvionali a diverso stato di compattazione [Coli et al., 2013]. In generale però, l'assetto del sottosuolo nell'area del Museo Nazionale del Bargello non è ben noto.

Per cercare di aggiungere ulteriori informazioni è stata applicata quindi la tomografia elettrica capacitiva che ben si presta a operare in un ambito così particolare.

Sono stati eseguiti quattro profili di misura lungo il perimetro del Museo percorrendo, nello specifico, le vie che circondano il palazzo: Via di Vigna Vecchia, Via del Proconsolo (fronte Museo), Via Ghibellina e Via dell'Acqua per uno sviluppo lineare di circa 500 metri complessivi. Le misure sono state acquisite utilizzando una configurazione a cinque ricevitori dipolari da 5 metri di lunghezza e una distanza tra trasmettitore e ricevitore variabile tra 5 e 10 metri rispettivamente. In questo modo si è raggiunta una profondità d'indagine di circa 8 metri. A causa della scarsa copertura del segnale GPS dovuta alla presenza dei palazzi, non è stato possibile acquisire le quote topografiche del tracciato.

In figura 14 sono mostrati i risultati relativi a due profili CCR eseguiti, in particolare quello relativo a Via del Proconsolo e a via delle Vigne Vecchie. I valori di resistività osservati variano da un minimo di circa 10  $\Omega\text{m}$  a un massimo di 200  $\Omega\text{m}$  in tutte le sezioni, con una distribuzione piuttosto eterogenea e presenza di contrasti elettrici sia verticali che laterali. I valori a minore resistività possono essere facilmente riconducibili alla presenza di terreni fini a matrice sabbioso-argillose mentre i valori a maggior resistività a terreni più sabbiosi e con presenza di ghiaie alluvionali. Comunque un assetto piuttosto variabile dal punto di vista elettrostratigrafico.



**Figura 14** a) Immagine satellitare del Museo Nazionale del Bargello nel centro storico di Firenze (Italia). Le linee rosse indicano la traccia dei due profili *OhmMapper*. b) Immagine dello strumento durante le operazioni di acquisizione sul campo. c) Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati acquisiti lungo Via del Proconsolo (P1). d) Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati acquisiti lungo Via di Vigna Vecchia (P2). Le frecce rosse l'ubicazione di un netto contrasto elettrico nel modello di resistività.

**Figure 14** a) Satellite image of the Museo Nazionale del Bargello in the city center of Florence (Italy). Solid red lines indicate the traces of the *OhmMapper* profiles. b) Geophysical field operation with the image of the *OhmMapper* system. c) 2D resistivity section results of Via del Proconsolo profile (P1). d) 2D resistivity section results of Via di Vigna Vecchia profile (P2). Solid red arrows show the location of the main subsurface resistivity anomalies.

Inoltre, non avendo informazioni su evidenze archeologiche in questo specifico settore, non è stato possibile individuare segnali riferibili alla eventuale presenza di strutture antropiche sepolte.

Con questo lavoro sono state ulteriormente testate le potenzialità ma anche i limiti di applicazione di questa tecnica innovativa. Alcuni fattori logistici e la presenza diffusa, in alcune zone, di infrastrutture ne hanno condizionato l'efficacia, restituendo dati molto rumorosi. In alcuni casi sono stati applicati opportuni filtraggi dei dati in fase di *post processing*, mentre in altri non è stato possibile discriminare e sopprimere le sorgenti di rumore. Nonostante ciò, l'indagine ha consentito di ottenere in tempi rapidi e totalmente non invasivi modelli riguardanti l'assetto del sottosuolo che però in questo caso sono da interpretare con estrema cautela e richiedono una integrazione con altre informazioni sia di natura geologica che archeologica.

#### 2.1.4 Mappatura di faglie

Altra applicazione in cui la geoelettrica capacitiva ha fornito risultati molto interessanti è la mappatura delle faglie finalizzata alla caratterizzazione superficiale di strutture tettoniche attive e di supporto a studi paleosismologici in aree a elevato rischio sismico.

Come è noto, lo scopo della paleosismologia è quello di individuare il numero di eventi sismici che sono stati generati da una faglia in un determinato intervallo temporale, l'età di occorrenza e la magnitudo.

Attraverso leggi di regressione empiriche, note come leggi di scala, in base alla stima della deformazione superficiale lungo il piano di faglia è possibile determinare con un certo grado di approssimazione la magnitudo di un evento sismico avvenuto in passato. Per la datazione invece è necessario un record sedimentario adatto, come ad esempio la presenza di sedimenti molto fini o di colluvi di detrito ricchi di matrice organica che generalmente si formano alla base delle scarpate di faglia dopo un evento sismico importante [McCalpin, 1996].

Per osservare in dettaglio queste strutture si realizzano perciò delle trincee, cioè scavi profondi generalmente dai 3 ai 5 metri. Risulta fondamentale quindi individuare nel sottosuolo non solo la posizione delle principali discontinuità strutturali come faglie e fratture, ma anche la presenza di tali depositi fini per stabilire l'ubicazione più idonea per lo scavo paleosismologico.

Da anni le tecniche geofisiche maggiormente utilizzate per questo scopo sono la sismica a riflessione, la tomografia di resistività elettrica (ERT) e il Georadar (GPR).

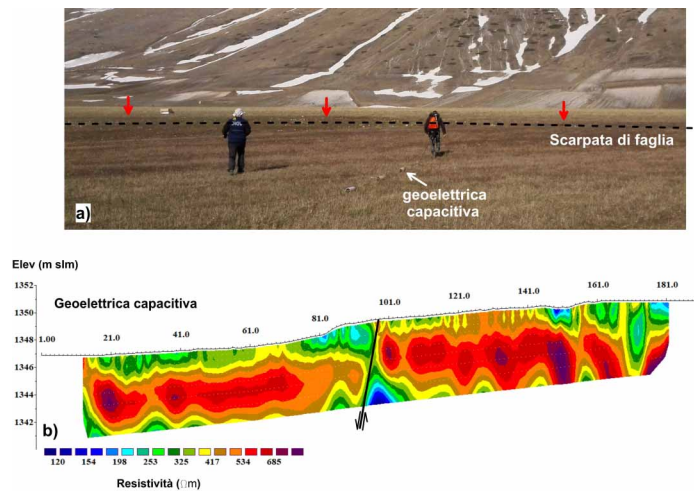
La tomografia elettrica in particolare risulta molto efficace nell'individuare la presenza di eterogeneità laterali connesse alla presenza di una faglia ma anche di sedimenti a granulometria fine, potenzialmente più ricchi in materiale organico databile e caratterizzati da bassi valori di resistività.

Per studiare le potenzialità e il contributo della geoelettrica capacitiva in questo specifico campo di applicazione, sono state eseguite due campagne di misura nell'area epicentrale della sequenza sismica 2016-2017 dell'Italia Centrale.

Il primo rilievo era volto alla caratterizzazione di una faglia attiva nella Piana di Castelluccio di Norcia (terremoto del 30 ottobre 2016  $M_w$  6.5) già precedentemente studiata mediante tomografia elettrica classica [Villani and Sapia, 2017]. Le misure sono state eseguite lungo un profilo di circa 180 m con l'impiego di 5 ricevitori e corda di separazione di 5 e 10 metri, per ottenere una profondità di investigazione di circa 8 metri confrontabile con quella ottenuta mediante la tomografia elettrica tradizionale.

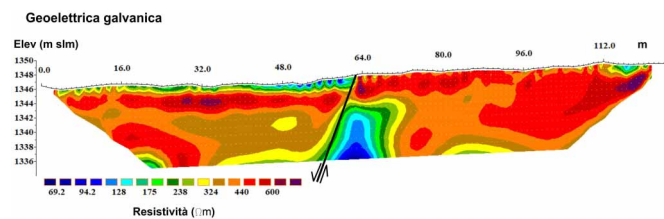
Nella figure 15 e 16 sono mostrate le sezioni relative alle misure CCR e alla tomografia ERT. Il confronto risulta essere eccellente. Si individuano chiaramente la zona di frattura superficiale, lo spostamento e la presenza di depositi a grana fine (cunei colluviali) accumulati lungo il piano di faglia.

Da sottolineare che i tempi per i due tipi di acquisizione sono stati molto differenti, circa mezzora per la geoelettrica capacitiva e di oltre 2 ore per quella classica. Il sito però non aveva nessuna complicazione logistica e pertanto si prestava molto bene al trascinarsi dei sensori.



**Figura 15** a) Immagine dell'operatore durante le fasi di acquisizione con sistema *OhmMapper* nella Piana di Castelluccio di Norcia (Italia). b) Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati *OhmMapper* acquisiti ortogonalmente alla scarpata di faglia.

*Figure 15* a) Geophysical field operation with the image of the *OhmMapper* system in the Castelluccio di Norcia basin (Central Italy). b) 2D resistivity section as derived from the inversion of the *OhmMapper* data across the surface rupture. Dashed black line and solid red arrows delineate the fault scarp. Solid black line indicate the displacement along the fault plane.



**Figura 16** Sezione 2D di resistività ottenuta con la tomografia di resistività elettrica acquisita sulla scarpata di faglia.

*Figure 16* 2D resistivity section as derived from galvanic electrical resistivity tomography data across the surface rupture.

In condizioni logistiche favorevoli quindi questa tecnica ha mostrato enormi potenzialità nel rilevare discontinuità elettriche associabili alla presenza di faglie superficiali.

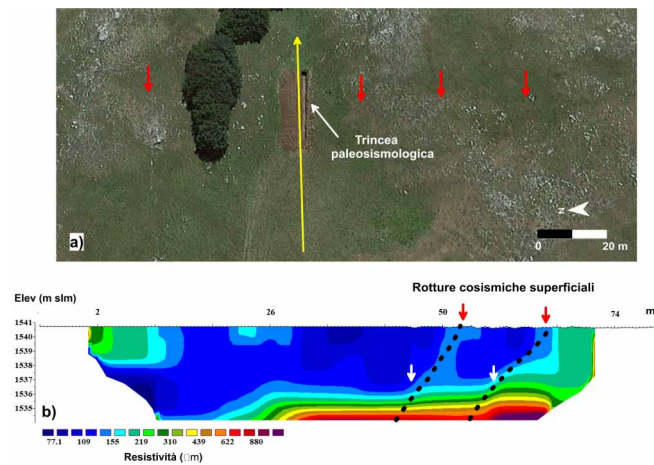
Il secondo rilievo era finalizzato alla caratterizzazione del sottosuolo in un'area con presenza di rotture cosismiche al fine di definire la loro espressione sepolta e individuare il settore più idoneo per la realizzazione di una trincea paleosismologica.

Lo studio è stato eseguito nell'area di Forca di Presta, un valico stradale dell'appennino umbro-marchigiano situato ai piedi del M. Vettore che è stato interessato da fagliazione superficiale a seguito del terremoto di Norcia.

Il profilo, di circa 100 metri, è stato realizzato con l'*OhmMapper* ortogonalmente alle suddette rotture con l'impiego di 5 ricevitori e ha raggiunto una profondità di investigazione dell'ordine dei 7 metri (figura 17).

La sezione di resistività ottenuta mostra molto chiaramente la presenza di uno strato più superficiale di spessore variabile, con valori fino a circa 100 Ωm che ricopre uno strato con  $\rho > 300 \Omega\text{m}$ .

Quest'ultimo mostra chiaramente due piccole inflessioni (evidenziate con frecce bianche in figura 17b), che sono coerenti con la posizione di due scarpate minori presenti in superficie (frecce rosse in figura 17a) dovute alla presenza di due faglie, immergenti verso ovest.



**Figura 17** a) Immagine satellitare dell'area di studio dove è stato eseguito il profilo CCR (linea gialla) e ubicazione della trincea paleosismologica effettuata successivamente [Cinti et al., 2019]. Le frecce rosse indicano la posizione della scarpata di faglia. b) Sezione di resistività ottenuta dall'inversione dei dati. La linea gialla indica la traccia del profilo *OhmMapper*. Le frecce bianche indicano la presenza di due inflessioni nel substrato resistivo. Le linee nere tratteggiate indicano l'ipotetica traccia delle fratture che si sviluppano fino in superficie.

*Figure 17 a) Satellite image of the survey area with the location of the Hope trench, which is still visible [Cinti et al., 2019]. Solid red arrows indicate the fault scarp. b) 2D resistivity section as derived from the inversion of the OhmMapper data acquired across the fault scarp. Solid yellow indicate the trace of the OhmMapper profile. Solid white arrows highlight the presence of two visible inflections in the resistive substratum. Dashed black lines delineates the inferred position of the subsurface fractures.*

Il modello di resistività descritto ha trovato un'ottima corrispondenza con le osservazioni dirette ottenute con la trincea realizzata successivamente [Cinti et al., 2019]. Lo strato superiore è risultato essere costituito da un deposito colluviale e detriti a grana fine con presenza di materiale organico, mentre quello inferiore dalla parte più superficiale e fratturata del substrato roccioso.

Le indicazioni fornite dal rilievo geofisico hanno efficacemente orientato l'ubicazione della trincea in un settore che ha restituito numerose informazioni di carattere sismologico.

## 2.2. Archeologia

### 2.2.1 Individuazione di necropoli

Un interessante impiego della geoelettrica capacitiva riguarda il campo archeologico, in particolare la localizzazione di cavità riferibili a tombe, sebbene in letteratura i casi di studio riportati non sono ancora molti [Bottacchi et al., 2009; Sapia et al., 2017]. Viene di seguito illustrata una sperimentazione effettuata in collaborazione con la Soprintendenza Archeologica per l'Etruria meridionale nella necropoli di Vigna La Piazza nel comune di Grotte di Castro (VT) che si sviluppa su un terrapieno che sovrasta la strada comunale. Alcune tombe di varie dimensioni sono visibili



dalla strada, dalla quale si sviluppano i *dromos* di accesso alle varie camere. In quest'area sono state eseguite delle indagini geofisiche applicando metodologie di indagine differenti.

In particolare viene qui riportato uno dei profili di geoelettrica capacitiva realizzati con l'*OhmMapper*, particolarmente interessante perché intercetta una tomba visibile, quindi con posizione e dimensioni note e utile come taratura dei dati geofisici (figura 18).

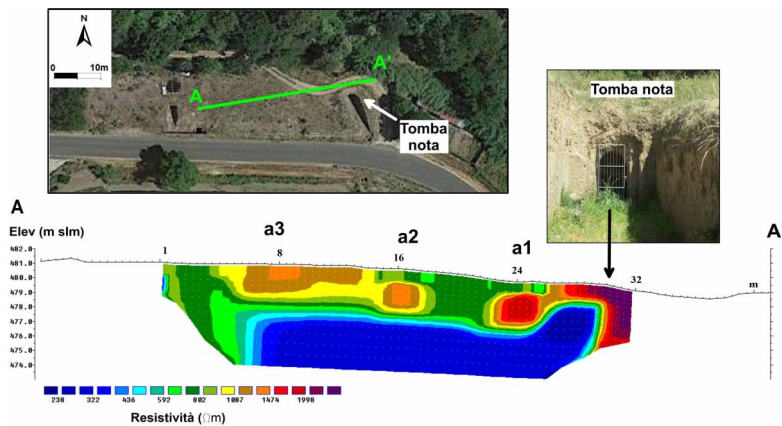


Figura 18 Ubicazione del profilo CCR eseguito e sezione di tomografia ottenuta.

Figure 18 CCR profile location and relative tomography section.

Il profilo, lungo complessivamente 31 metri ha raggiunto una profondità di circa 7 metri. Nella sezione di figura 18 si osserva da destra verso sinistra una zona ad alta resistività ubicata in corrispondenza della tomba nota e altri tre settori sempre piuttosto resistivi e con differenti dimensioni (a1, a2 e a3), attribuibili a ulteriori camere di sepoltura orientate probabilmente in modo differente e con sviluppo articolato (in particolare la a3). Segue uno strato litologico più conduttivo a sviluppo orizzontale piuttosto costante.

Questi risultati, ottenuti con pochi minuti di attività in campo sono stati confermati da ulteriori misure geofisiche eseguite sull'area.

La metodologia di prospezione si è rivelata quindi piuttosto efficace nell'individuare cavità e ambienti sotterranei attribuibili a sepolture. Pertanto potrebbe essere particolarmente utile nelle ricerche su ampie porzioni di territorio dove si ipotizza la presenza di una o più necropoli, con il grosso vantaggio dei tempi estremamente ridotti nell'esecuzione delle misure soprattutto se i terreni da investigare presentano una morfologia pianeggiante e condizioni del suolo favorevoli.

## 2.3 Ambiente

### 2.3.1 Analisi discariche

Un'interessante applicazione della geoelettrica capacitiva in campo ambientale è stata quella relativa a una simulazione di un rilievo speditivo su una discarica di rifiuti eterogenei per verificarne l'applicabilità in tale contesto e confrontare i risultati con quelli ottenuti dalla tomografia elettrica tradizionale.

La discarica in esame (Monte Pagliaro, Isola di Ponza) era stata infatti precedentemente studiata mediante tecniche geofisiche convenzionali, usualmente utilizzate in questo ambito e cioè la magnetometria e la tomografia elettrica.

Il rilievo magnetometrico aveva come obiettivo l'individuazione di eventuali masse ferrose interrate di una certa consistenza riferibili a rifiuti vari. La geoelettrica era invece finalizzata allo studio delle variazioni di resistività nel sottosuolo legate ai materiali di riempimento e ai rifiuti messi a dimora, alla definizione degli spessori e dei rapporti di questi con le litologie sottostanti.

Le misure magnetometriche sono state eseguite con un magnetometro a pompaggio ottico *Geometrics* mod. G858; quelle di ERT sono state realizzate mediante un georesistivimetro della *IRIS Instruments* modello Syscal R2 dotato di sistema multinodo a 64 elettrodi con configurazione elettrodica *Wenner-Schlumberger*. Tramite queste indagini quindi è stato ricostruito l'assetto strutturale dei primi metri del sottosuolo e fornito indicazioni sui materiali interrati.

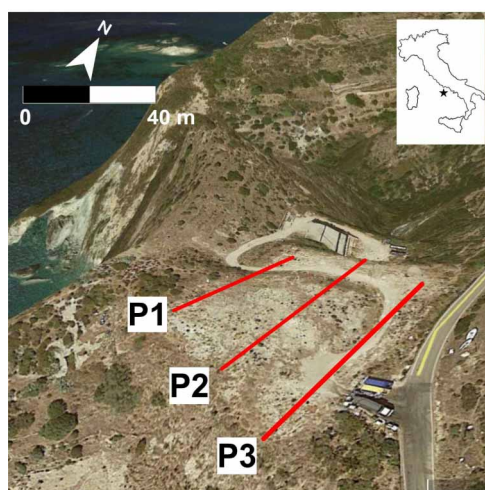
Dalla magnetometria, in un settore specifico dell'area è emersa una concentrazione di anomalie dovute alla presenza di materiali ferromagnetici.

Dalla tomografia elettrica è stato individuato uno strato superficiale più resistivo costituito dal materiale di riempimento che con spessori differenti ricopre una morfologia preesistente, il substrato geologico originario a resistività più bassa [Sapia et al., 2017].

Se da un lato le indagini ERT e la magnetometria sono tra i metodi maggiormente utilizzati in questo tipo di applicazioni [Marchetti et al., 2002; Chambers et al. 2006], sono molto meno diffusi in letteratura casi di studio analoghi in cui è stata impiegata la geoelettrica capacitiva. Pertanto in questo sito sono stati eseguiti tre profili impiegando il sistema *OhmMapper* (figura 19) e utilizzando 3 ricevitori dipolari da 5 m e due diverse lunghezze della corda di separazione, rispettivamente di 5 e 10 metri.

I risultati dell'*OhmMapper* sono mostrati in figura 20. In particolare, avendo investigato fino ad una profondità di circa 5-6 metri quello che si osserva nelle varie sezioni è il corpo dei rifiuti con valori di resistività piuttosto variabili e differenti anche nelle varie sezioni, e ciò dovuto all'eterogeneità dei materiali che caratterizzano il corpo di discarica.

I modelli ottenuti dalle due tecniche geoelettriche hanno trovato conferma nelle informazioni ricavate dagli accertamenti diretti eseguiti successivamente dall'ARPA Lazio, con una buona corrispondenza tra le resistività osservate e i materiali presenti.



**Figura 19** Immagine satellitare della discarica di Monte Pagliaro nell'isola di Ponza. Le linee rosse indicano la traccia dei tre profili *OhmMapper* eseguiti all'interno della discarica (P1, P2 e P3).

**Figure 19** Satellite image of the Mt. Pagliaro landfill in the Island of Ponza. Solid red lines show the location of the *OhmMapper* profiles (P1, P2 and P3).

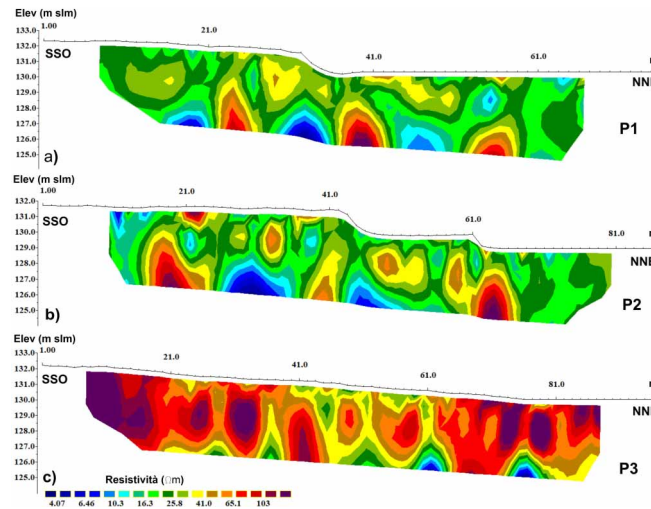


Figura 20 Sezione 2D di resistività ottenuta dall'inversione dei dati OhmMapper profili P1, P2 e P3.

Figure 20 2D resistivity sections as derived from the inversion of the OhmMapper data from profile P1, P2 and P3.

Le trincee e i sondaggi eseguiti fino a 3 metri di profondità, hanno infatti campionato rifiuti grossolani di diversi tipi (plastica, vetro, scarti di mattoni e vari materiali da costruzione) misti a terreno asciutto, che rappresentano per l'appunto la sorgente del segnale a maggiore resistività osservata nei modelli.

Da sottolineare a riguardo che per effettuare i profili di geoelettrica capacitiva sono state impiegate meno di due ore di lavoro in campo, che equivale al tempo necessario per realizzare uno stendimento di tomografia elettrica ERT di piccole dimensioni.

Inoltre la geoelettrica capacitiva è risultata essere molto efficace per ottenere rapidamente informazioni sull'assetto superficiale del sottosuolo utili anche per la progettazione delle indagini con tomografia elettrica classica, sicuramente più accurate ma anche più laboriose.

Se da un lato la tecnica si presta molto bene a essere impiegata per un rapido screening dei primi metri di sottosuolo, dall'altro bisogna tenere conto di alcune limitazioni e problematiche tecniche che spesso possono presentarsi in contesti come quelli di una discarica.

### 3. Limiti di impiego

#### 3.1 Difficoltà operative

Come già riportato precedentemente, i terreni resistivi come rocce, ghiaie, sabbie asciutte consentono un buon accoppiamento capacitivo tra i sensori e il terreno mentre la presenza di forti conduttori impedisce la trasmissione del segnale in profondità. Nel caso di una discarica di rifiuti eterogenei, uno dei problemi principali invece è costituito dagli oggetti metallici nel sottosuolo, molto frequenti in tali ambienti e che, se presenti in grosse quantità, possono compromettere l'efficacia della tecnica.

In generale un corpo metallico funge da "barriera" alla propagazione per induzione di una corrente elettrica alternata generata da un trasmettitore a bassa frequenza violando il principio di basso numero di induzione su cui si basa la teoria dell'accoppiamento capacitivo [McNeill, 1980]. In tali condizioni ai ricevitori non si ricevono valori di potenziale.

Un'altra limitazione di tale tecnica è rappresentata dalle condizioni logistiche del sito. La superficie sulla quale si opera deve essere piuttosto pianeggiante, senza significativi dislivelli. Percorrendo terreni in pendenza infatti si assiste spesso allo scivolamento dei sensori con importanti deviazioni rispetto ad una traiettoria rettilinea. Inoltre, la presenza di ostacoli quali, ad esempio, vegetazione diffusa, solchi o massi sparsi sul terreno rappresentano un impedimento al trascinamento. Nei casi più sfortunati si può arrivare a un danneggiamento vero e proprio della strumentazione stessa.

Tutto ciò si riflette negativamente sull'accoppiamento capacitivo tra dipoli e terreno e quindi sull'accuratezza delle misure, con i dati che risultano generalmente più rumorosi. Sebbene spesso sia possibile operare dei filtraggi, i modelli interpretativi sull'assetto del sottosuolo possono in questi casi presentare maggiori margini di incertezza.

In ambito urbano, operando su strade asfaltate, caratterizzate quindi da un'elevata resistività, la tecnica si presta molto bene a indagini speditive permettendo di misurare i parametri elettrici del sottosuolo anche per lunghi tratti. Di contro la presenza diffusa di sottoservizi, pavimentazioni con sottofondo in rete elettrosaldata, veicoli o altri oggetti metallici in superficie possono influire negativamente sul segnale acquisito. E' possibile avere quindi una discontinuità nei dati, a volte lunghi tratti con mancanza di informazioni nella porzione di sottosuolo interessata dalla sorgente di rumore elettromagnetico.

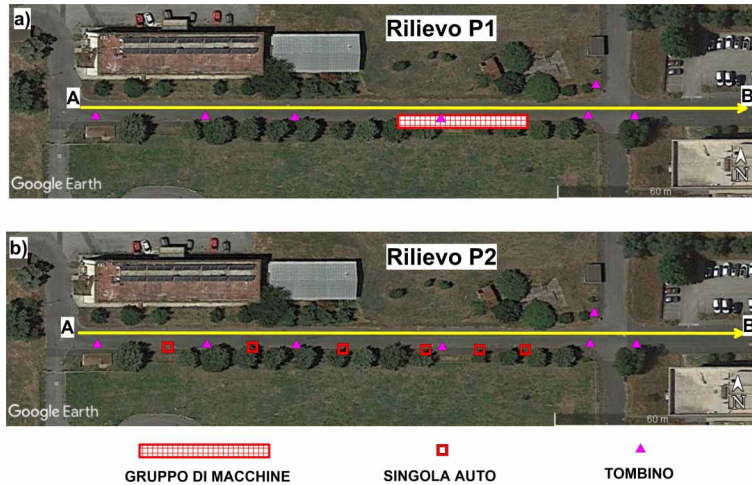
### 3.2 *Noise in ambito urbano*

Operando in ambito urbano, se da un lato il trascinamento dei sensori risulti facilitato per la presenza dell'asfalto così come l'accoppiamento capacitivo con il terreno, dall'altro le misure possono risultare piuttosto rumorose a causa di notevoli fonti di disturbo. Per comprendere meglio tali fenomeni sono state eseguite delle osservazioni lungo una strada asfaltata, ubicata all'interno del centro di ricerche dell'ENEA alla Casaccia (RM), con posizione e tipologia dei sottoservizi nota e possibilità di muovere a piacimento le autovetture in sosta (figura 21). Sono stati quindi eseguiti due rilievi CCR impiegando tre ricevitori e una lunghezza della corda pari a 5 metri. Il primo rilievo (P1) è stato eseguito dopo aver disposto in modo ravvicinato alcune automobili in un preciso settore della strada (figura 21a); il secondo (P2) distribuendo le stesse auto in maniera casuale (figura 21b).

In figura 22 sono riportati i dati grezzi acquisiti da ogni singolo ricevitore lungo il profilo. Nel rilievo P1 sono evidenti tre picchi che ricadono in corrispondenza di un tombino (a1) e del raggruppamento delle auto (a2 e a3), in particolare all'inizio e alla fine di quest'ultimo. Nel rilievo P2 non si evidenziano marcati disturbi in corrispondenza della auto parcheggiate lungo la strada bensì è presente un solo picco ricadente in corrispondenza di a4, probabilmente legato a una eterogeneità nel sottosuolo.

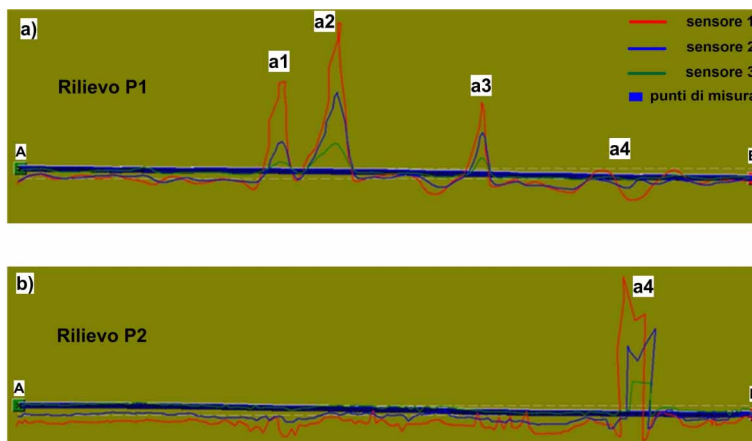
Sembra quindi che le auto parcheggiate ai lati delle strade possano costituire una fonte di disturbo sulle misure CCR se posizionate adiacenti l'una all'altra, mentre poco influenti se distanziate di almeno 5 metri.

Le tubazioni in metallo e i tombini, essendo forti conduttori, sono sicuramente una fonte di disturbo. Ma durante il test è stato anche osservato che se i sensori, e soprattutto il trasmettitore non transitano proprio in corrispondenza di questi, non viene prodotto un effetto particolarmente rilevante sulla misura (picco a1 non presente in P2). Da tenere presente questa informazione quando si opera in area urbana, cercando quindi, per quanto possibile, di non far scorrere i dipoli sopra ai tombini in ferro.



**Figura 21** Immagine satellitare dell'area di studio dove è stata effettuata la sperimentazione. a) Traccia del profilo P1 (auto raggruppate). b) Traccia del profilo P2 (auto disposte casualmente). I triangoli viola indicano la posizione dei tombini, mentre la linea gialla la traccia del profilo effettuato.

*Figure 21* Satellite image of the survey area where our test took place located. a) Trace of the profile P1 acquired along the asphalt road where several cars have been grouped at the roadside (solid red and white rectangle indicate the position of the cars). b) Trace of the profile P2 acquired along the asphalt road where several cars have been parked randomly at the roadside (solid red rectangle indicate the position of the cars). Purple triangles locate the position of the manholes. Solid yellow line indicate the trace of the OhmMapper profile.



**Figura 22** Rappresentazione dei dati grezzi acquisiti (espressi in Volt) relativi a ogni singolo ricevitore. a) Profilo P1 e b) profilo P2.

*Figure 22* Plot of the acquired raw data (expressed in Volt) as recorded by each OhmMapper receiver sensor. a) Profile P1 and b) profile P2.

## 4. Confronti con ERT

In generale è possibile affermare che i risultati ottenuti con la geoelettrica capacitiva risultano molto spesso sovrapponibili a quelli prodotti dalla tomografia elettrica tradizionale sia in termini di definizione delle strutture che nei valori di resistività. Nei casi in cui è stato possibile eseguire misure sullo stesso profilo con entrambe le metodologie infatti sono stati messi a confronto i rispettivi modelli del sottosuolo.

A parità di condizioni logistiche però ci sono delle differenze sostanziali tra le due metodologie che riguardano principalmente la qualità del dato misurato e la diversa risoluzione superficiale. Per quanto concerne il primo punto, come abbiamo più volte descritto nei paragrafi precedenti, i dati prodotti da sistemi capacitivi in movimento sono tendenzialmente più rumorosi di quelli ottenuti con sistemi statici di tipo galvanico. Il motivo è legato sostanzialmente alle asperità del terreno, all'effetto del trascinarsi dei dipoli e al rumore elettromagnetico dell'area oggetto del rilievo. I residui dell'inversione infatti risultano più alti di quelli ottenuti con la tomografia elettrica classica.

Nella geoelettrica tradizionale invece le fonti di disturbo possono derivare dalle elevate resistenze di contatto tra elettrodo e terreno o da potenziali spontanei intensi ed estremamente variabili.

Per quanto riguarda le differenze nella risoluzione superficiale, questa è legata sostanzialmente alla spaziatura dei sensori sul terreno: minore è la loro distanza e maggiore risulta la capacità di risolvere strutture superficiali. Stabilendo un'opportuna disposizione elettrodica, con la tomografia elettrica galvanica è possibile quindi individuare strutture ubicate anche entro il primo metro di sottosuolo.

Per l'*OhmMapper* la dimensione dei dipoli è fissa (5 o 10 metri) e l'unica distanza variabile è la lunghezza della corda non conduttiva. Questo significa che risulta difficile "illuminare" strutture con dimensioni inferiori ai 2 metri o ubicate a questa profondità (la risoluzione è pari a circa la metà della dimensione stessa del dipolo di acquisizione). Sebbene i moderni codici di inversione permettano di utilizzare delle celle di calcolo molto piccole in modo da ottenere una buona discretizzazione del modello, laddove non vi siano dati misurati questo risulta prodotto da un'estrapolazione matematica.

Tuttavia grazie alle varie esperienze maturate in campo abbiamo potuto riscontrare degli ottimi risultati nel risolvere *targets* come faglie, tombe o piccole cavità anche se ricadenti nei primi 3 metri di profondità soprattutto nei casi dove i contrasti elettrici tra gli strati geologici o tra il manufatto e il terreno inglobante erano più marcati.

## Conclusioni

La tomografia elettrica capacitiva è una tecnica di prospezione geofisica che utilizzando dei dipoli che vengono trascinati sul terreno permette di acquisire piuttosto velocemente informazioni sulla resistività elettrica del sottosuolo.

Sono state osservate le potenzialità di tale tecnologia in campi differenti, dall'ambiente allo studio del territorio all'archeologia e i limiti di impiego nei vari ambiti.

Il confronto con la tomografia elettrica di tipo galvanico è risultato eccellente nei vari contesti in cui sono state applicate le due tecniche, rivelandosi come valida alternativa nei casi dove, per motivi logistici, non vi è la possibilità di usare elettrodi classici.

Ha dimostrato la sua validità negli studi preliminari di aree piuttosto ampie fornendo informazioni propedeutiche per successive indagini geofisiche di approfondimento e di dettaglio.

Negli studi di paleosismologia si è dimostrata molto utile per individuare le aree più idonee per l'esecuzione di trincee esplorative e per la costruzione di un modello 3D del sottosuolo con

tempi notevolmente inferiori a quelli che richiederebbe la tomografia elettrica galvanica. In campo ambientale, nello studio di discariche o di smaltimenti illeciti di rifiuti nel sottosuolo può fornire informazioni sullo spessore e sull'estensione dei materiali interrati.

Nelle ricerche di cavità in area urbana la metodologia riesce a individuare forti anomalie resistive ed evidenziare in modo speditivo possibili criticità nel sottosuolo in corrispondenza di sedi stradali a rischio crollo.

In ambito archeologico la tecnica si è rivelata particolarmente efficace per individuare rapidamente strutture legate a sepolture e quindi localizzare e definire anche l'estensione di una necropoli.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano i colleghi dell'INGV Fabio Giannattasio, Igino Coco, Fabio Villani, Paola Baccheschi, Riccardo Civico, Matteo Migliari e Luca Miconi per il supporto tecnico nell'acquisizione dei dati geofisici in campagna; i dottori Stefano Urbini (INGV) e Vittorio Rosato (ENEA) per le attività sperimentali eseguite nella città di Roma; il dott. Gianluca Ferri del Dipartimento di Protezione Civile di Roma per il supporto tecnico e logistico durante le acquisizioni effettuate a Via Gordiani e a Via Marco Aurelio; i proff. Marco Tanganelli e Stefania Viti della Facoltà di Architettura dell'Università di Firenze per il supporto tecnico logistico durante le acquisizioni presso il Museo Nazionale del Bargello nel centro storico di Firenze, la dott.ssa Maria Letizia Arancio della Soprintendenza Archeologica per l'Etruria meridionale e la dott.ssa. Maria Flavia Marabottini, Direttrice Museo di Grotte di Castro.

Si ringrazia Massimo Mari (INGV) per aver progettato ed eseguito miglie tecniche alla strumentazione GPR utilizzata in molti dei casi di studio presentati in questo lavoro.

## Bibliografia

- Bottacchi M.C., (2009). *Studio dell'efficacia dell'OhmMapper (Geometrics Inc.) per indagini geoelettriche in contesti archeologici*. Tesi di Dottorato
- Bottacchi M.C., Colonna T., Mantovani F. and Medri M., (2009). *Application of the OhmMapper resistivity-meter to detect the theatre of Sentinum Roman town by using 3D resistivity model*. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 33 (suppl.), 267-269.
- Chambers J.E., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., Hollands J., (2006). *Electrical resistivity tomography applied to geological, hydrogeological and engineering investigations at a former waste disposal site*. *Geophysics*, 71, B231-B239.
- Cinti F.R., De Martini P.M., Pantosti D., Baize S., Smedile A., Villani F., Civico R., Pucci S., Lombardi A.M., Sapia V., Pizzimenti L., Caciagli M. and Brunori C.A., (2019). *22-kyr-Long Record of Surface Faulting Along the Source of the 30 October 2016 Earthquake (Central Apennines, Italy), From Integrated Paleoseismic Data Sets*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 9021-9048.
- Coli M., Rubellini P., (2013). *Geological anamnesis of the Florence area, Italy*. *German Journal of Geoscience*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany, 581-589.
- Coli M., Tanganelli M., Materni V., Giannattasio F., Marchetti M. and Sapia V. (2019). *No-dig investigation around Palazzo Vecchio, Florence - Italy*. In: *Proc. 37<sup>th</sup> International Conference and Exhibition, International No-Dig, 30<sup>th</sup> September – 2<sup>nd</sup> October 2019*.
- DeGroot-Hedlin C., Constable S., (1990). *Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data*. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Geometrics Inc., (2001). *Data Map OhmMapper User Guide 29006-01*. Rev 3.0, pp. 55.

- Groom D., (2008). *Common misconceptions about capacitively-coupled resistivity (CCR): what it is and how it works*. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*. Environmental and Engineering Geophysical Society, pp. 1345–1350.
- Kuras O., Beamish D., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., (2006). *Fundamentals of the capacitive resistivity technique*. *Geophysics*, 71, G135–G152.
- Loke M.H., Barker R., (1996). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*. *Geophysical. Prospection*, 44, 131–152.
- Marchetti M., Cafarella L., Di Mauro D., Zirizzotti A., (2002). *Ground magnetometric surveys and integrated geophysical methods for solid buried waste detection: a case study*. *Annals of Geophysics*, 45, 563–573.
- Mc Calpin J.P., (1996). *Paleoseismology, 2nd Edition*, In: Academic Press, p. 629
- McNeill J.D., (1980). *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. In: *Geonics Limited Technical Note, TN-6*, pp. 6–15.
- Neukirch M., Klitzsch N., (2010). *Inverting capacitive resistivity (line electrode) measurements with direct current inversion programs*. *Vadose Zone Journal*, 9, 882–892.
- Niu Q., Wang Y.H., (2013). *Theoretical and experimental examinations of the capacitively coupled resistivity (line antenna) method*. *Geophysics* 78, E189–E199.
- Oldenborger G.A., LeBlanc A.M., (2013). *Capacitive resistivity inversion using effective dipole lengths for line antennas*. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 229–236
- Sapia V., Baccheschi P., Villani F., Taroni M. and Marchetti M., (2017). *Multidisciplinary geophysical approach to map a disposal site: The Ponza island case study*. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 264-274.
- Sapia V., Florindo F., Marchetti M. and Di Nezza M., (2017). *Fast geophysical prospection to map the archaeological site of Cocciano: preliminary results*. *Annals of Geophysics*, 60.
- Shima H., Sakashita S., Kobayashi T., (1996). *Developments of non-contact data acquisition techniques in electrical and electromagnetic explorations*. *Journal of Applied Geophysics*. 35, 167–173.
- Timofeev V.M., Rogozinski A.W., Hunter J.A., Douma M., (1994). *A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics*. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*. Environmental and Engineering Geophysical Society, pp. 701–715
- Timofeev V.M., (1974). *The Employment of Capacitively-coupled Sensors in Engineering and Geological Studies*. (Ph.D. thesis). University of Moscow.
- Villani F. and Sapia V., (2017). *The shallow structure of a surface-rupturing fault in unconsolidated deposits from multi-scale electrical resistivity data: The 30 October 2016 Mw 6.5 central Italy earthquake case study*. *Tectonophysics*, 717, 628-644.





# QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

# RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

# MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

[http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html](http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html/)

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

**Progetto grafico e impaginazione**

Barbara ANGIONI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2020

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia  
Via di Vigna Murata, 605  
00143 Roma  
tel. +39 06518601

[www.ingv.it](http://www.ingv.it)



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

