

Tra geologia e geofisica – Museo Civico di Rovereto XII Workshop in geofisica  
Rovereto, 4 dicembre 2015

METODI GEOFISICI A SUPPORTO DEL MODELLO GEOLOGICO E DEL  
MODELLO GEOTECNICO

**Approccio geofisico multi-metodologico per la  
modellazione geologica e geotecnica del sottosuolo**

Mario Naldi - [info@techgea.eu](mailto:info@techgea.eu)  
Diego Barbero - [diego-barbero@libero.it](mailto:diego-barbero@libero.it)  
Gabriella Forno - [gabriella.forno@unito.it](mailto:gabriella.forno@unito.it)

# LE PROBLEMATICHE DELLA MODELLAZIONE DEL SOTTOSUOLO DA DATI GEOFISICI

La definizione di un ragionevole modello geologico a partire dalla distribuzione quantitativa di una o più proprietà fisiche misurate con un'indagine geofisica può essere definito come «PROBLEMA INVERSO»

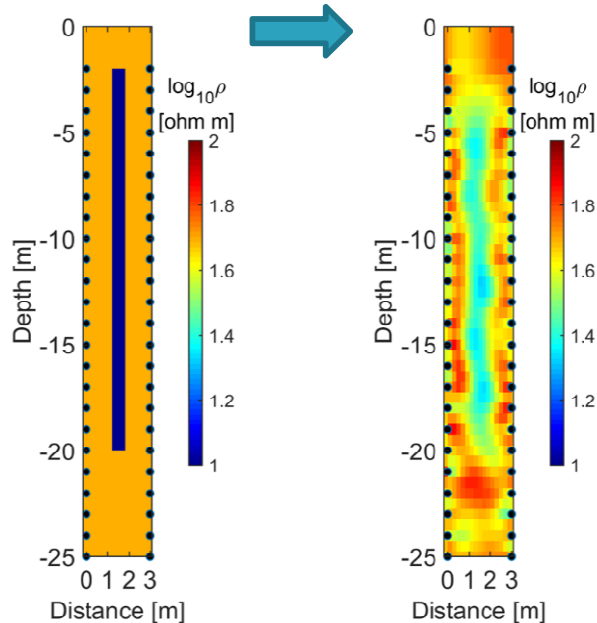
A differenza della diagnostica medica per immagini o della diagnostica di strutture (che valutano differenze rispetto ad un modello noto «a priori» con un modello parametrico deterministico), la diagnostica geofisica del sottosuolo deve fornire un modello geologico credibile e realistico a partire da un modello di inversione numerica che raramente può riferirsi ad un modello di riferimento

I dati di calibrazione del modello finale non sono sempre disponibili o hanno costi elevati e difficoltà realizzative (accessibilità per perforazione di sondaggi geognostici)

L'ottimizzazione del modello geofisico attraverso un'analisi multi-parametrica (multi-metodologica) consente di ridurre notevolmente l'incertezza interpretativa

# IL PROBLEMA INVERSO

Calcolo deterministico



Modello deterministico → calcolo delle variazioni da un modello noto per la verifica di anomalie (**modello di riferimento di un diaframma bentonitico con inversione numerica di dati geoelettrici cross-hole**)

Modello di resistività

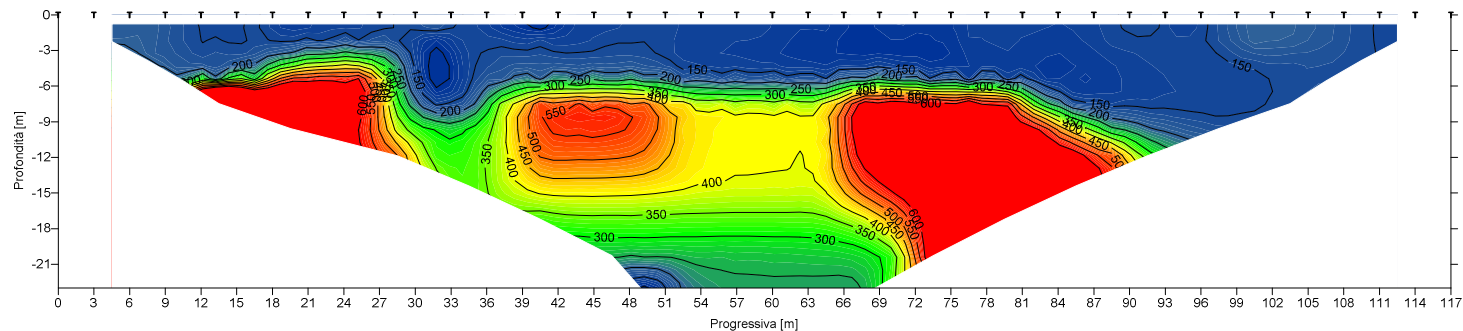
Risultato inversione dati modellati  
(con rumore casuale gaussiano 5%)

Modello di inversione → modello di distribuzione di un parametro fisico da cui definire un modello geologico (**PROBLEMA INVERSO – modello tomografico di resistività elettrica**)

Inversione numerica

?

Senza una calibrazione del  
sottosuolo è impossibile  
definire un modello geologico



Per definire un modello geologico realistico a partire da un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo occorre ridurre la «**ambiguità interpretativa**» mediante calibrazione con:

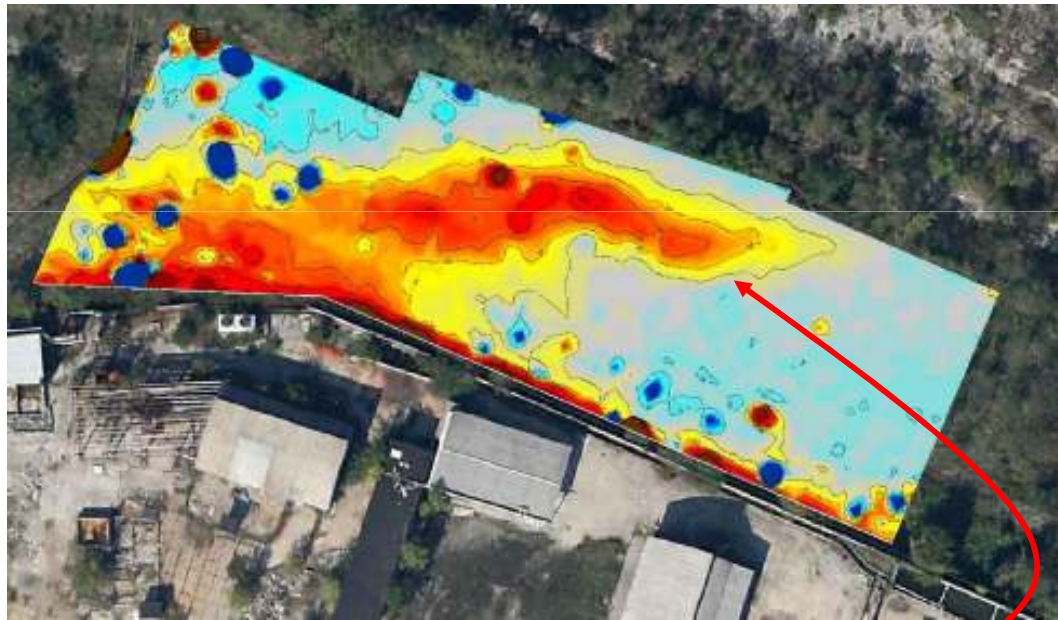
- **Sondaggi geognostici** (funzione della disponibilità economica, della accessibilità ai mezzi d'opera, ecc.)
- **Geologia di superficie** (funzione del grado di affioramento)
- **analisi geofisica multiparametrica** → Utilizzo combinato di metodi geofisici differenti (funzione dei contrasti attesi dei principali parametri fisici):
  - ✓ Resistività elettrica
  - ✓ IP
  - ✓ Velocità delle onde di compressione
  - ✓ Velocità delle onde di taglio
  - ✓ Suscettività magnetica
  - ✓ Eccetera..

# UTILIZZO DI METODI GEOFISICI DIFFERENTI → LA CORRELAZIONE INCROCIATA (1)

Il confronto tra diversi metodi di indagine (ovvero tra diversi parametri fisici) riduce il grado di incertezza sia per ESCLUSIONE (**marker negativo**) e sia per INCLUSIONE (**marker positivo**)

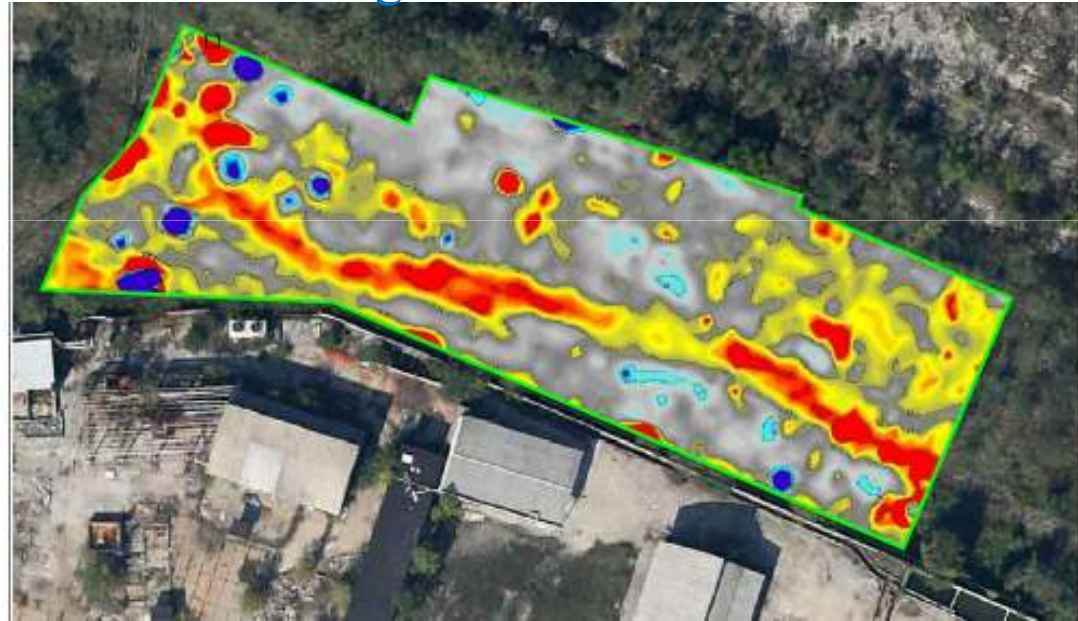
Indagine EM a fianco di sito industriale

Conducibilità elettrica

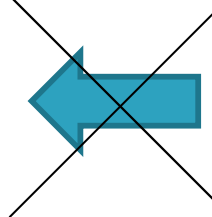


Forte anomalia di conducibilità elettrica  
(inclusione)

Suscettività magnetica



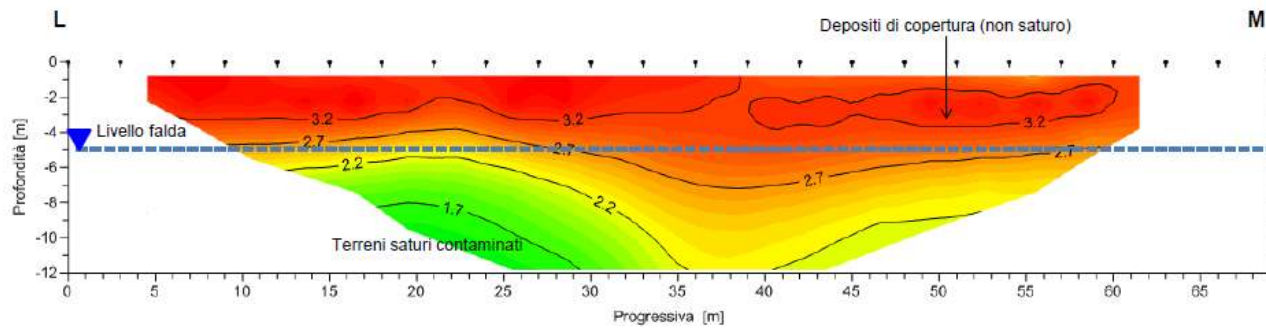
Anomalia di suscettività magnetica determinata dal sottofondo in ciottoli di serpentinite di una strada sterrata  
Incrocio negativo con anomalia di conducibilità elettrica (esclusione)



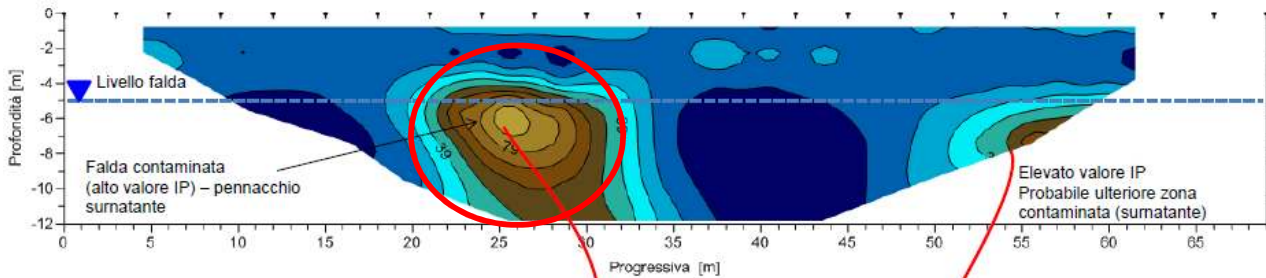
# UTILIZZO DI METODI GEOFISICI DIFFERENTI → LA CORRELAZIONE INCROCIATA (2)

I dati non sono sufficienti a definire un modello realistico del sottosuolo

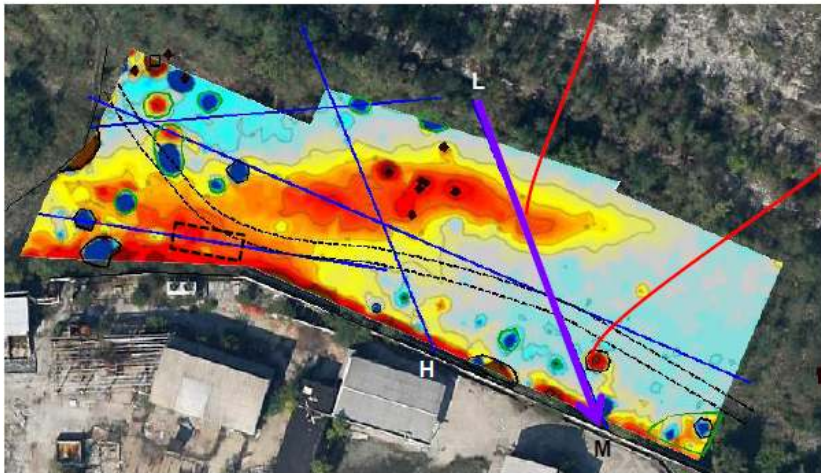
IMPLEMENTAZIONE DI ALTRI PARAMETRI FISICI



Sezione di resistività elettrica

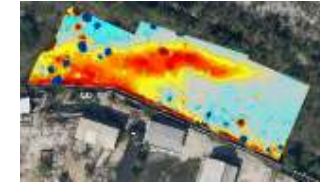


Sezione di polarizzazione indotta

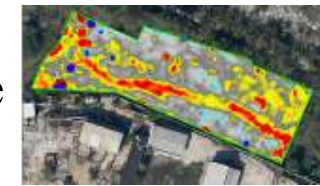


# ANALISI LOGICA DEL CONFRONTO INCROCIATO

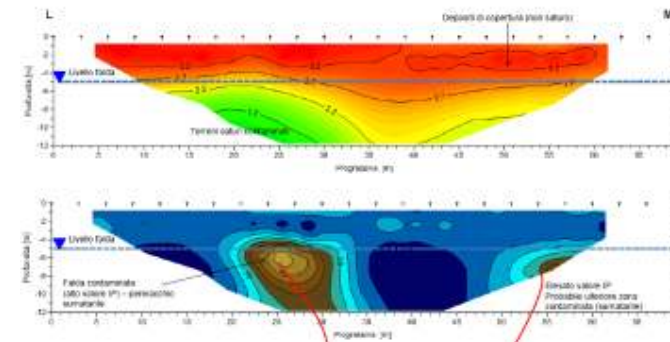
1. Conducibilità elettrica apparente (mappa X-Y) → **marker attivo** che individua una struttura allungata ad elevata conducibilità elettrica



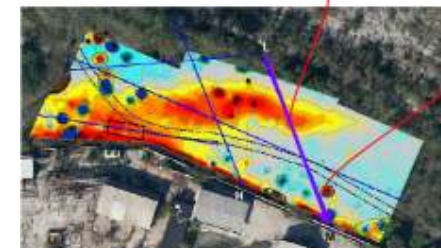
2. Suscettività magnetica (mappa X-Y) → **marker sterile** che esclude la correlazione con il corpo conduttivo



3. Resistività elettrica (sezione X-Z) → **marker attivo** che individua una zona a bassa resistività elettrica sotto il livello di falda. Valori di resistività elettrica incompatibili con la stratigrafia attesa del sottosuolo (ghiaie e sabbie)



4. Polarizzazione indotta (sezione X-Z) → **marker attivo** che individua una anomalia localizzata in corrispondenza del livello di falda. Valori di IP incompatibili con la stratigrafia attesa del sottosuolo (ghiaie e sabbie)



## Risultati indagine multiparametrica (correlazione incrociata)

RISULTATO → Notevole alterazione di alcune proprietà fisiche del sottosuolo (IP e conducibilità elettrica apparente) → assetto geologico omogeneo, ghiaie e sabbie, incompatibile con valori IP e di conducibilità elettrica misurati



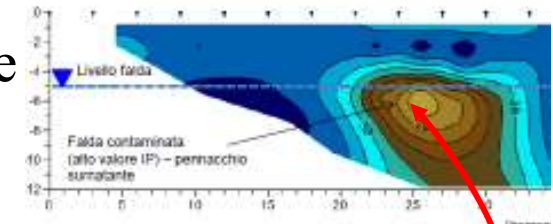
## Verifica diretta (scavo → calibrazione modello)

→ LOCALIZZAZIONE PRODOTTO LIBERO SURNATANTE (alterazione IP per biodegradazione e elevato contenuto ionico)



## Modello interpretativo (back-analysis)

→ PENNACCHIO DI CONTAMINAZIONE in falda determinato da idrocarburi (oli) in parte degradati (→ elevato contenuto ionico → elevati valori di IP)

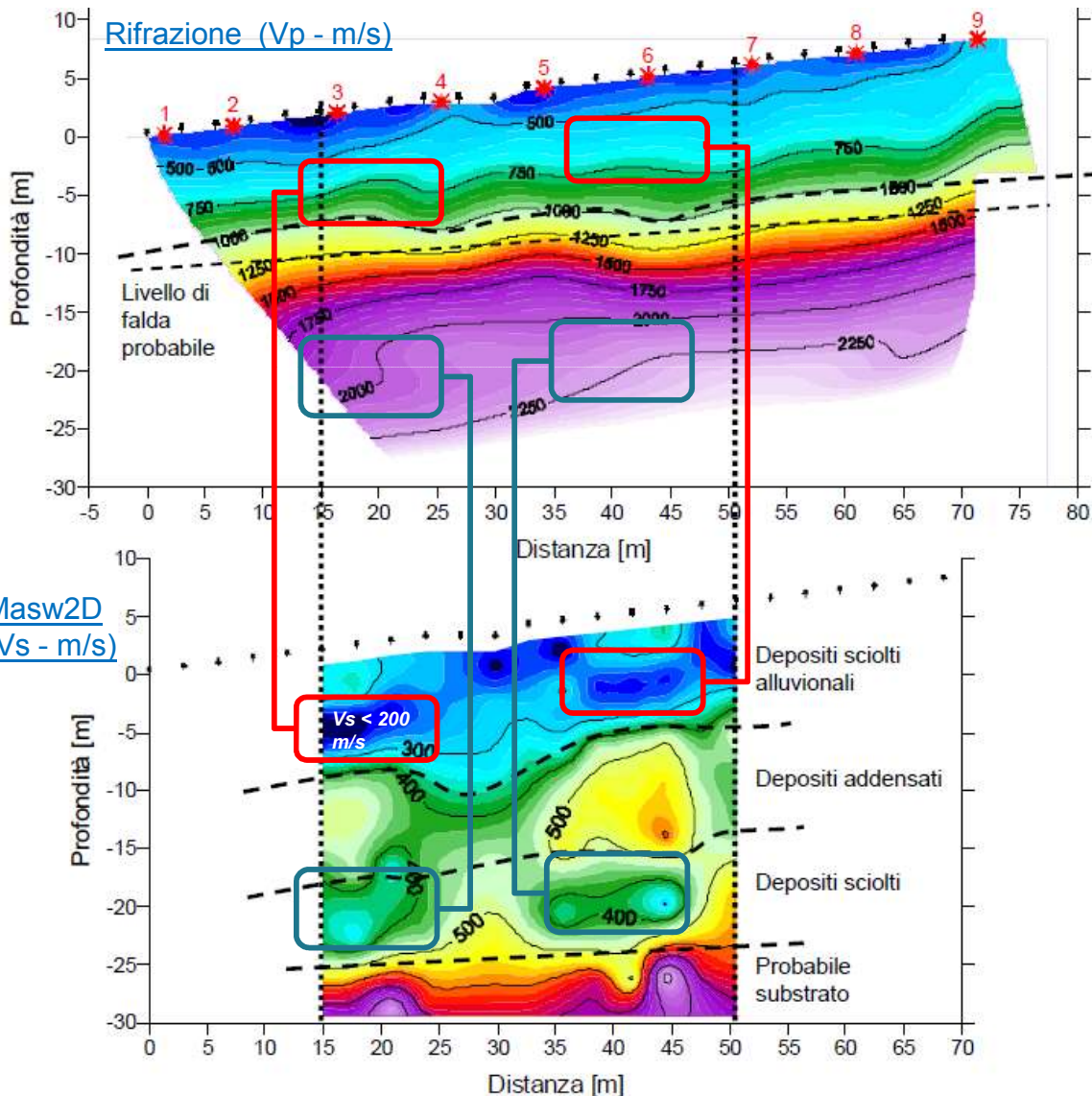




# Analisi geofisica multi-parametrica

## Esempi di caratterizzazione geologica e geotecnica

### ESEMPIO 1 – modello geologico per scavo parcheggio interrato - Confronto Vp - Vs



#### Obiettivo di indagine:

verificare la profondità del substrato lapideo metamorfico in relazione a scavi per parcheggio interrato (max profondità scavo = 10 m)

Entrambe i metodi di indagine escludono la presenza del substrato lapideo entro i 10 m di profondità, perché:

- $V_p < 1200$  m/s
- $200 < V_s < 300$  m/s

La combinazione dei due metodi permette di ottenere ulteriori risultati:

- Il metodo sismico a rifrazione individua a circa 10 m un gradiente elevato delle isotache → probabile falda
- il metodo MASW2D individua
  - delle zone «lente» ( $V_s < 200$  m/s) nelle zone di scavo, con caratteristiche geotecniche scadenti
  - il substrato lapideo a circa 25 m di profondità ( $V_s > 800$  m/s)

# Analisi geofisica multi-parametrica

## Esempi di caratterizzazione geologica e geotecnica

### ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana

Confronto tra tre parametri ( $V_p$ ,  $V_s$  e  $\rho$ ) e taratura con sondaggio geognostico



#### Parametri fisici valutati:

1. Presenza d'acqua  $\rightarrow$  resistività elettrica
2. Profilo stratigrafico  $\rightarrow$  resistività elettrica
3. Addensamento del terreno (rigidità)  $\rightarrow$  profilo MASW ( $V_s$ )/sismica a rifrazione ( $V_p$ )

#### Obiettivo di indagine:

1. Valutare le cause di un dissesto di versante con crollo di un muro di sostegno ( $L = 80$  m;  $H = 4$  m)
2. Definire il modello geologico e geotecnico per gli interventi di consolidamento



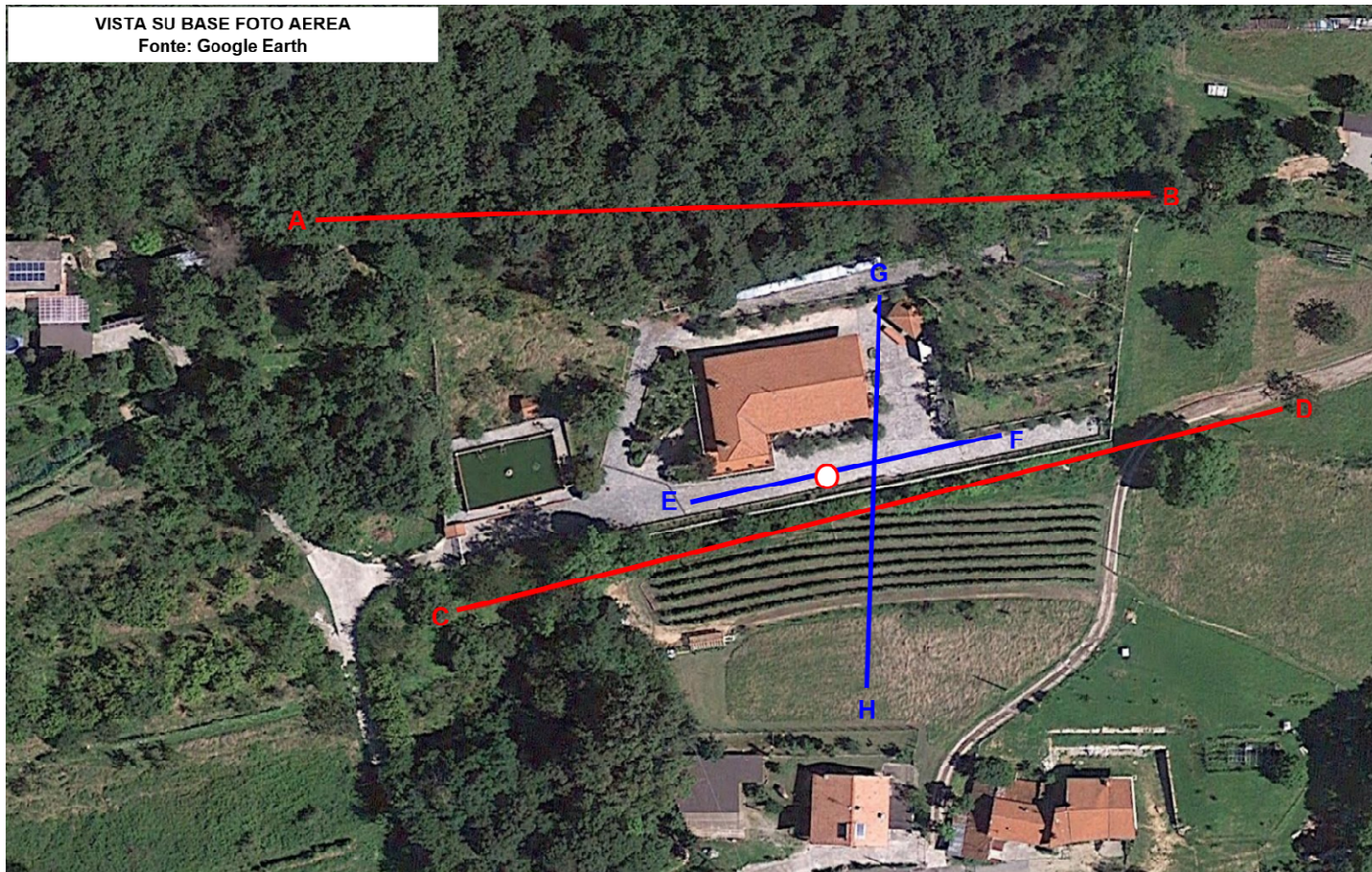
# Analisi geofisica multi-parametrica

## Esempi di caratterizzazione geologica e geotecnica

### ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana

#### Progettazione indagine

VISTA SU BASE FOTO AEREA  
Fonte: Google Earth

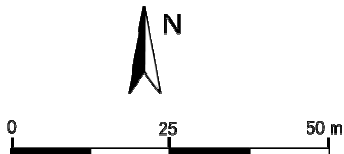


#### Dettaglio indagini:

1. N° 2 sezioni geoelettriche trasversali ai possibili deflussi idrici sotterranei (deflussi canalizzati)
2. N° 2 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione disposte a croce nella zona di massimo dissesto
3. Un profilo MASW nella zona di massimo dissesto su cui è stato posizionato un sondaggio geognostico

#### LEGENDA

- Sezione Geoelettrica
- Sezione Sismica a rifrazione
- Posizione sondaggio geognostico e centro prova MASW (profilo velocità onde di taglio)

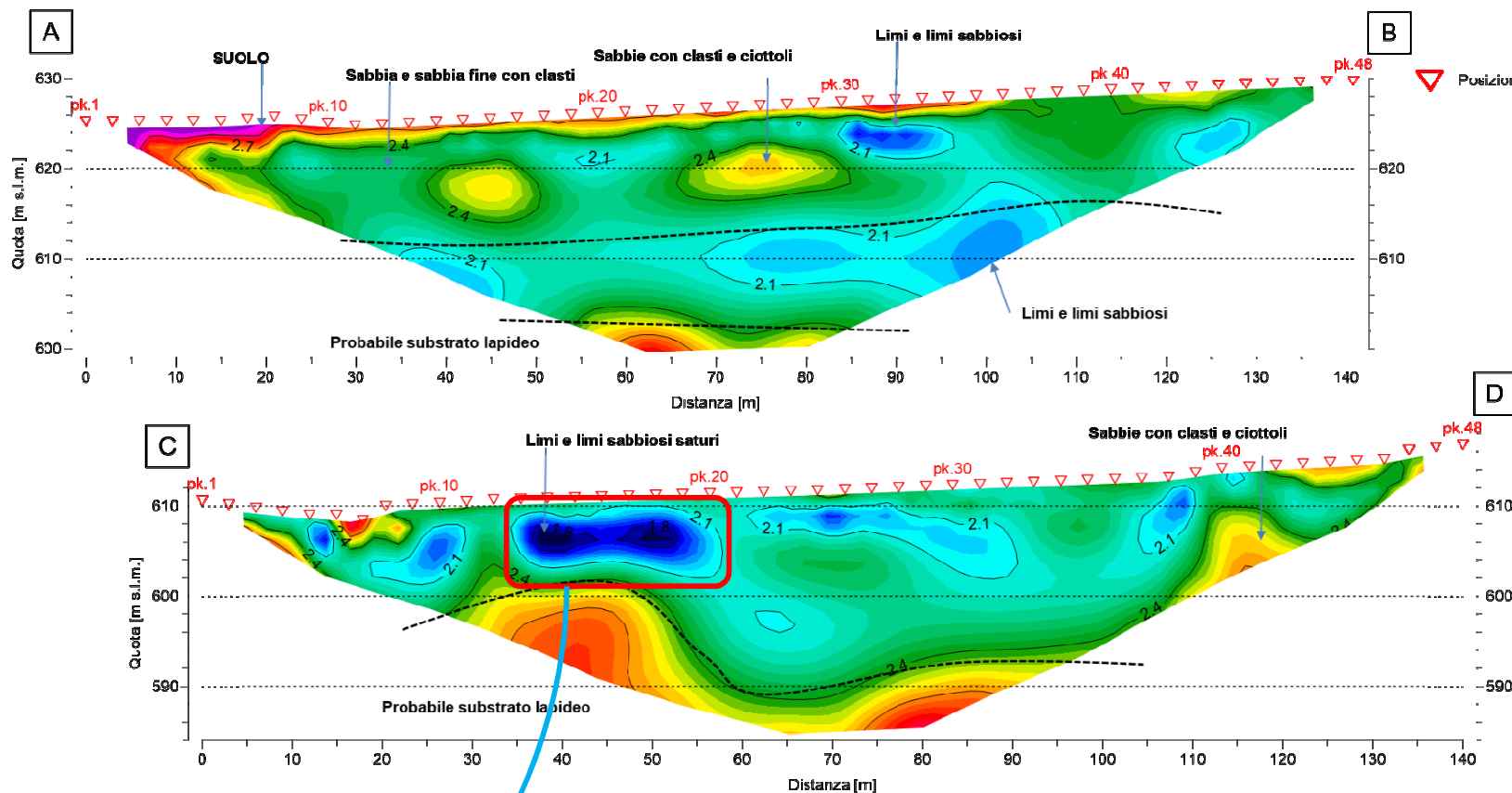


# Analisi geofisica multi-parametrica

## Esempi di caratterizzazione geologica e geotecnica

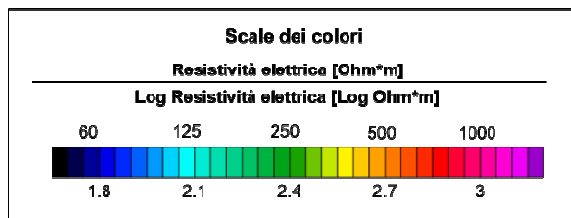
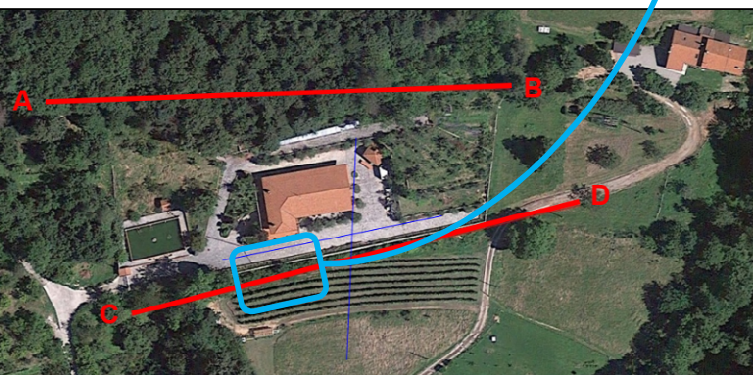
### ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana

Indagini geoelettriche → resistività elettrica per 1) caratterizzazione idrogeologica; 2) caratterizzazione stratigrafica



### Risultati:

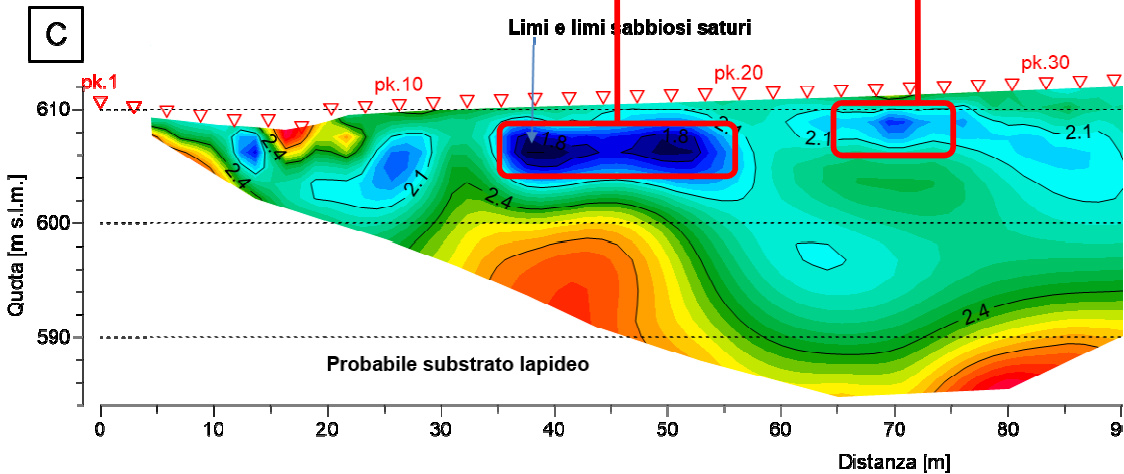
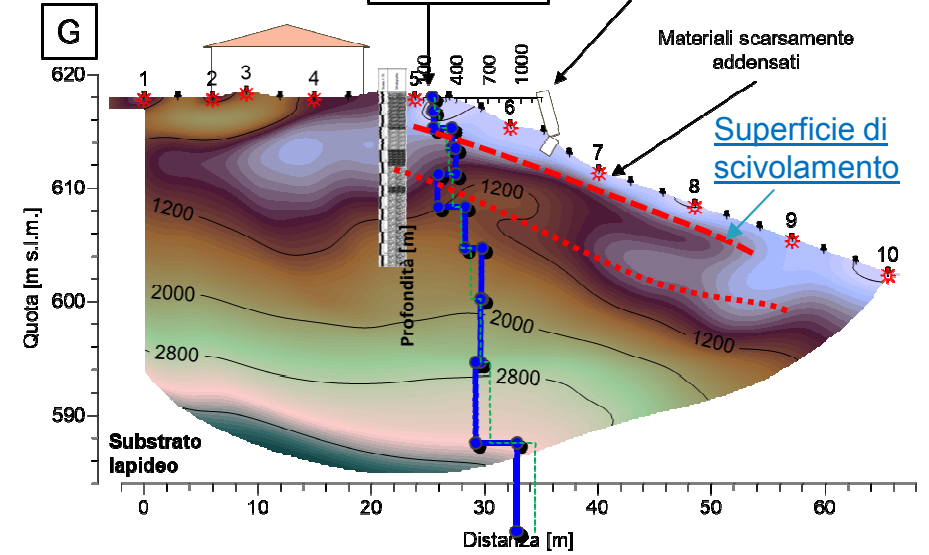
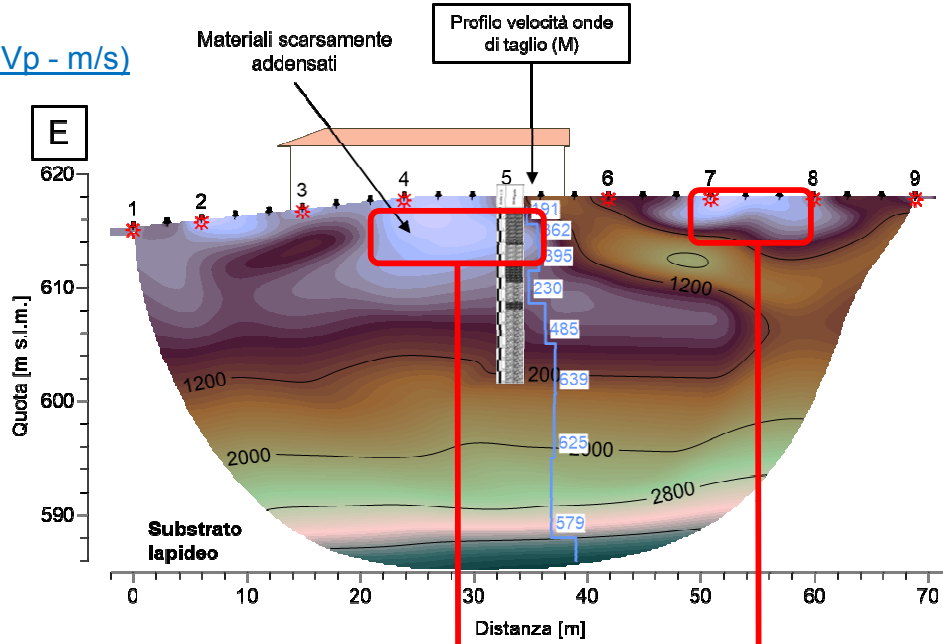
1. STRATIGRAFIA  
 Alternanza di strati sabbioso-ghiaiosi e limosi. Probabile substrato a 10-20 m (sezione di valle) → **INCERTEZZA (RESISTIVITA' ELETTRICA SIMILE ALLE SABBIE/GHIAIE)**
2. IDROGEOLOGIA  
 Lenti di limi saturi tra 3 e 5-6 m



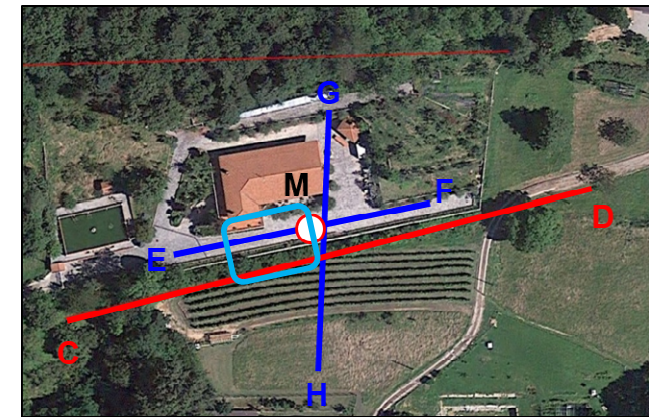
## ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana

Indagini sismiche → Velocità onde di compressione  $V_p$  e Onde di taglio  $V_s$  (localizzazione zone allentate)

Rifrazione ( $V_p$  - m/s)

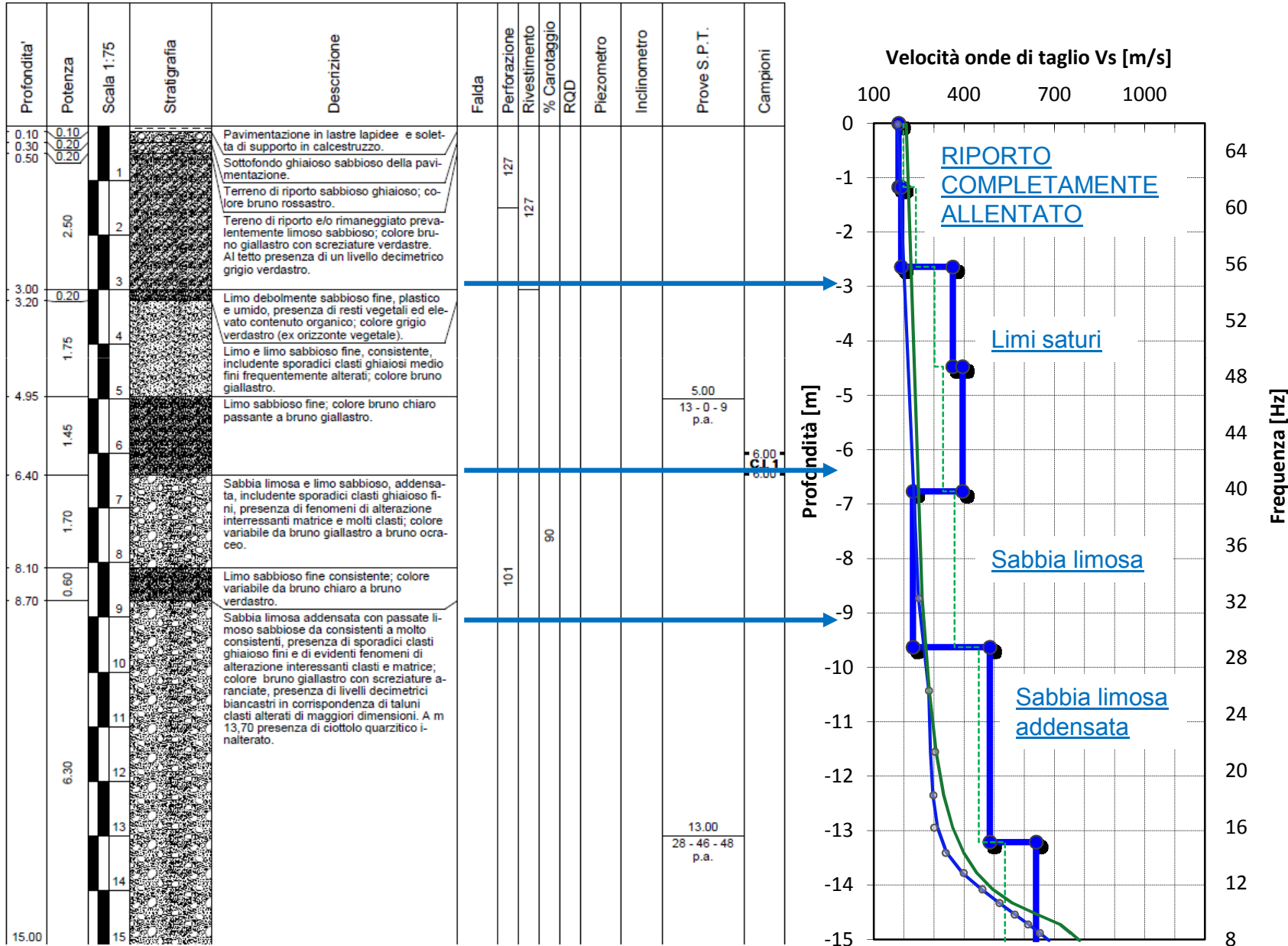


Stralcio sezione geoelettrica per confronto

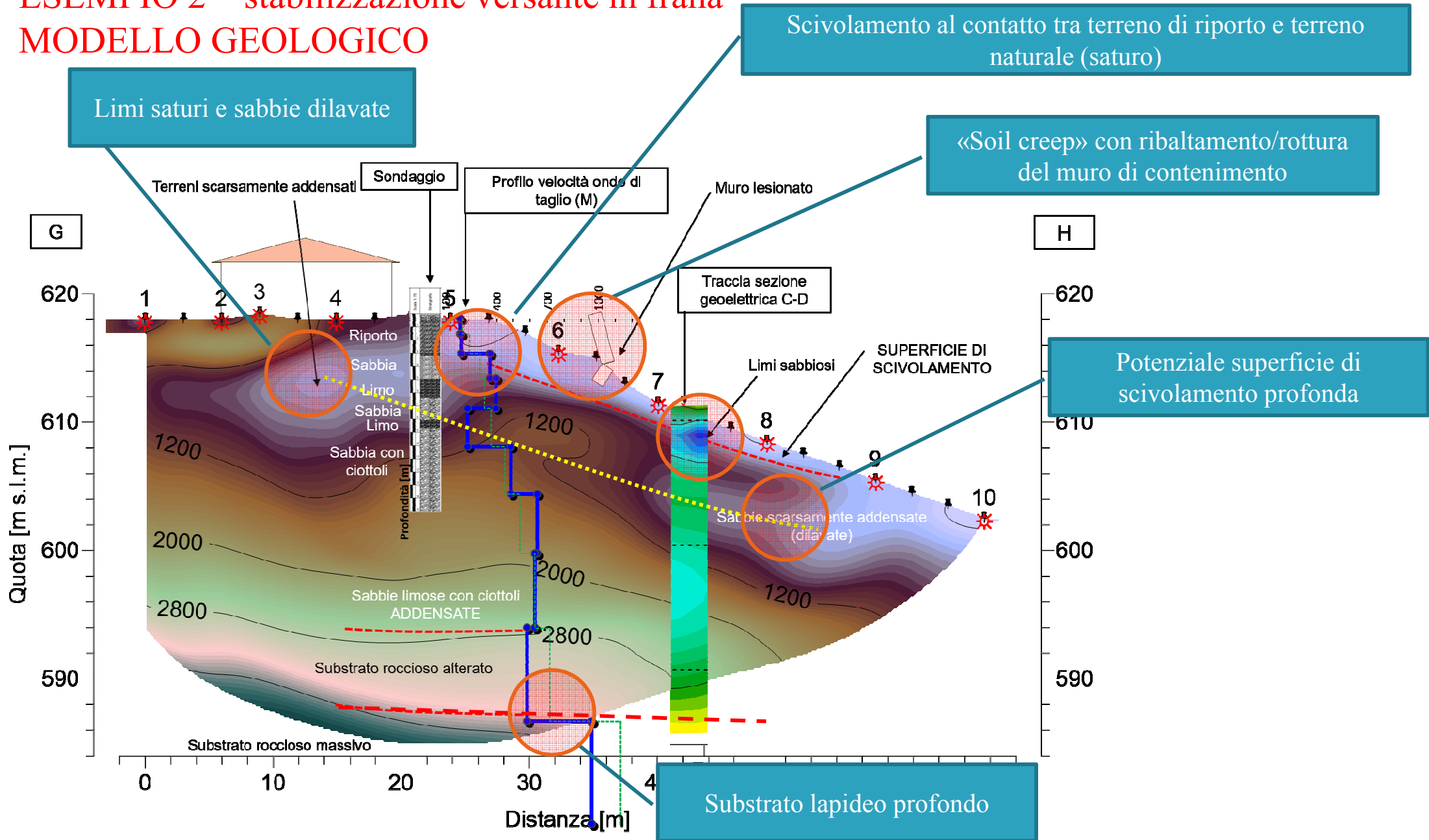


## ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana

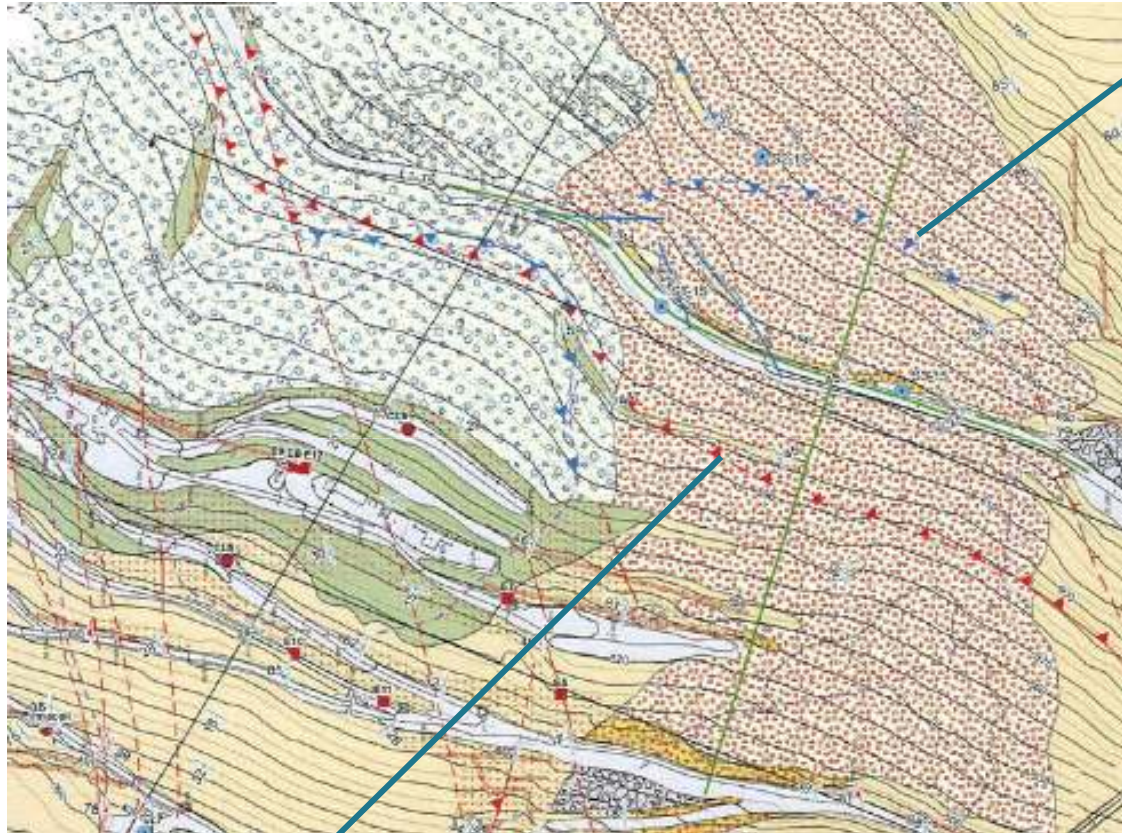
### Calibrazione con il sondaggio geognostico - Confronto con il profilo di rigidità (MASW)



ESEMPIO 2 – stabilizzazione versante in frana  
MODELLO GEOLOGICO



## ESEMPIO 3 – caratterizzazione delle principali strutture geologiche di un versante in frana di grandi dimensioni



Nicchia di distacco (frattura di trazione)

Il versante è stato oggetto in passato di diversi fenomeni di smottamento di varia entità: quello più recente e consistente è avvenuto nel novembre 2010 coinvolgendo un volume di circa 23.000m<sup>3</sup>.

Il sito è oggetto di monitoraggio geologico e distometrico costante: dal 2004 in avanti i dati derivanti dal controllo di estensimetri in foro, estensimetri di superficie, inclinometri e TDR sono stati sistematicamente raccolti ed elaborati.

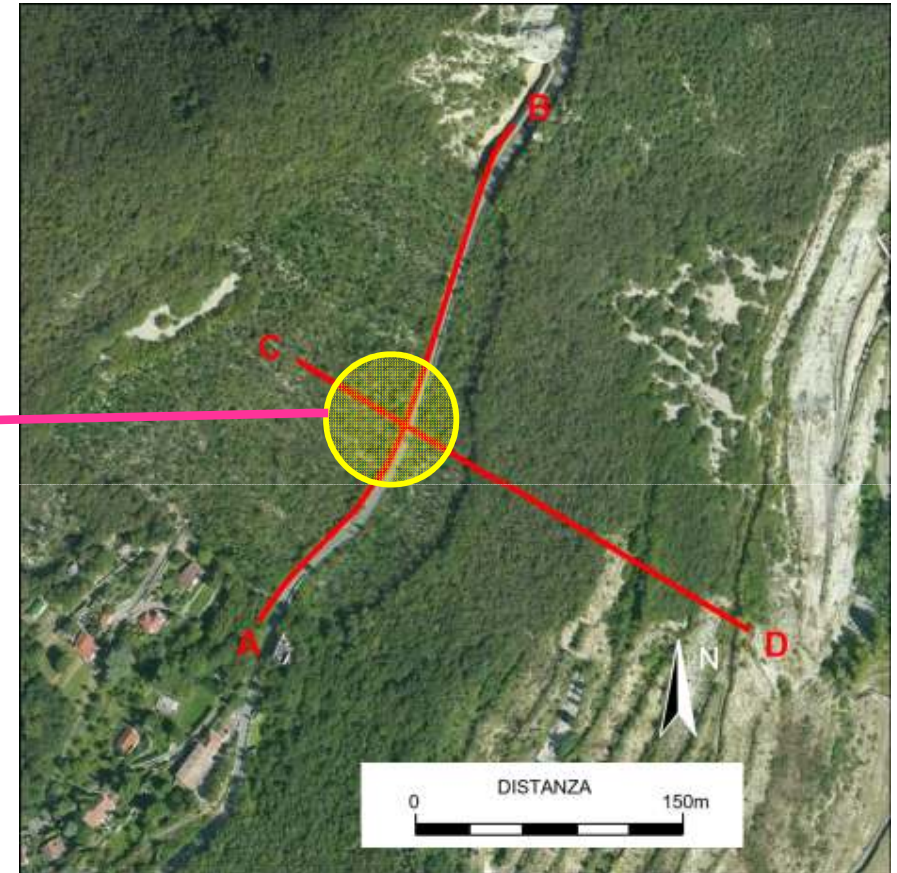
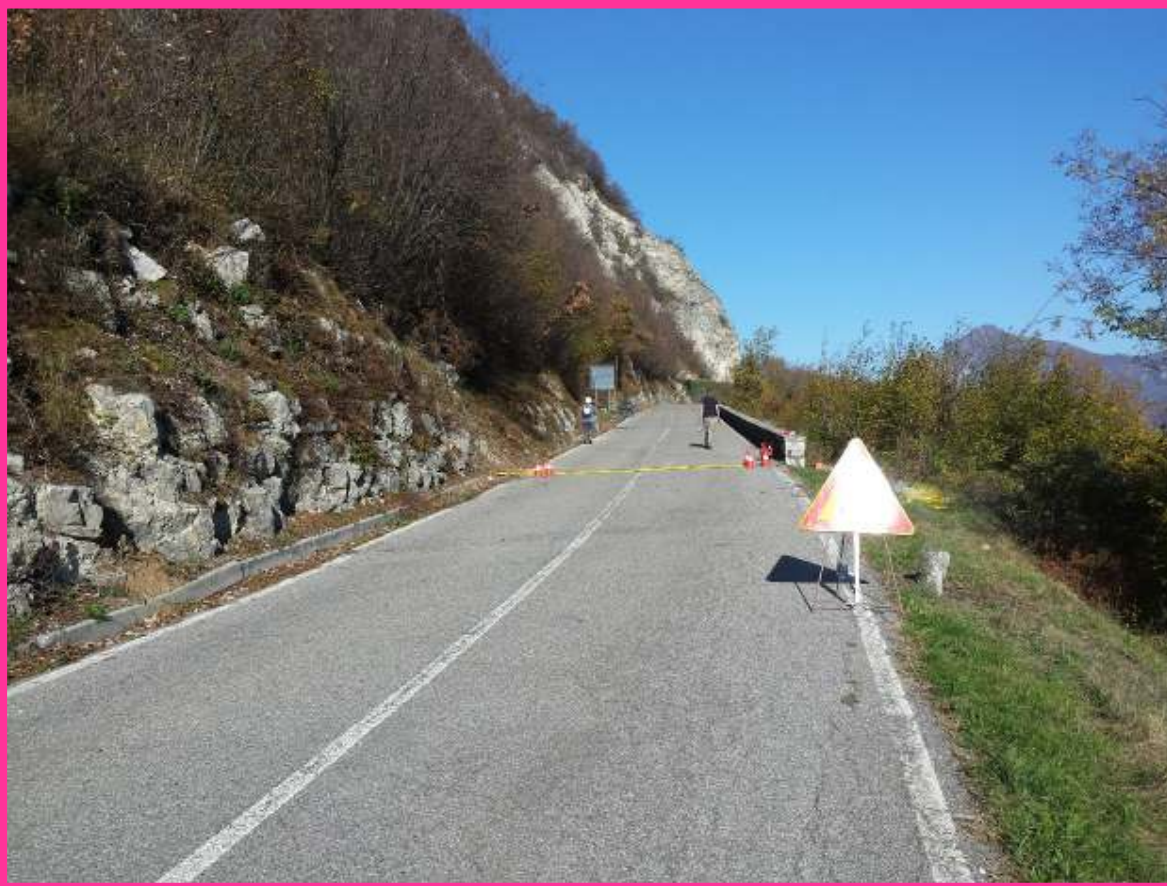
Dal giugno 2010 è inoltre attivo un sistema di monitoraggio distometrico continuo da Stazione Robotizzata, con letture a frequenza oraria di circa 30 prismi ottici distribuiti sull'area.

L'intero versante è infatti soggetto ad un continuo e relativamente lento scivolamento verso Est, con entità di spostamento dell'ordine dei 15-20mm/anno. Tale movimento comporta importanti interferenze con due tratti di pubblica viabilità.

Sovrascorrimento  
tettonico



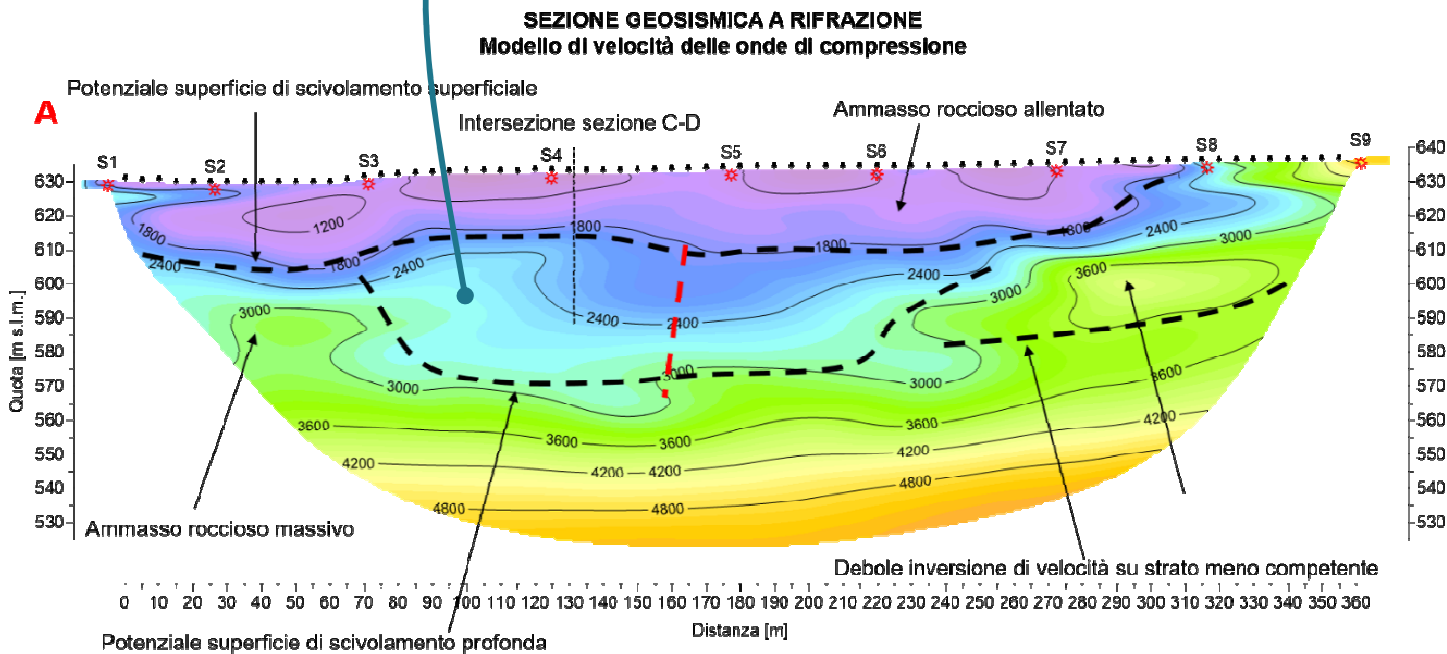
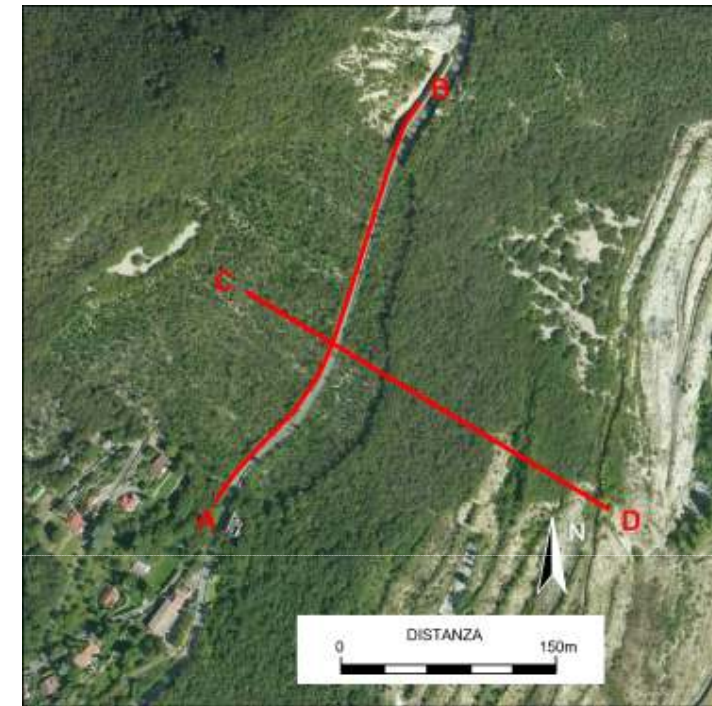
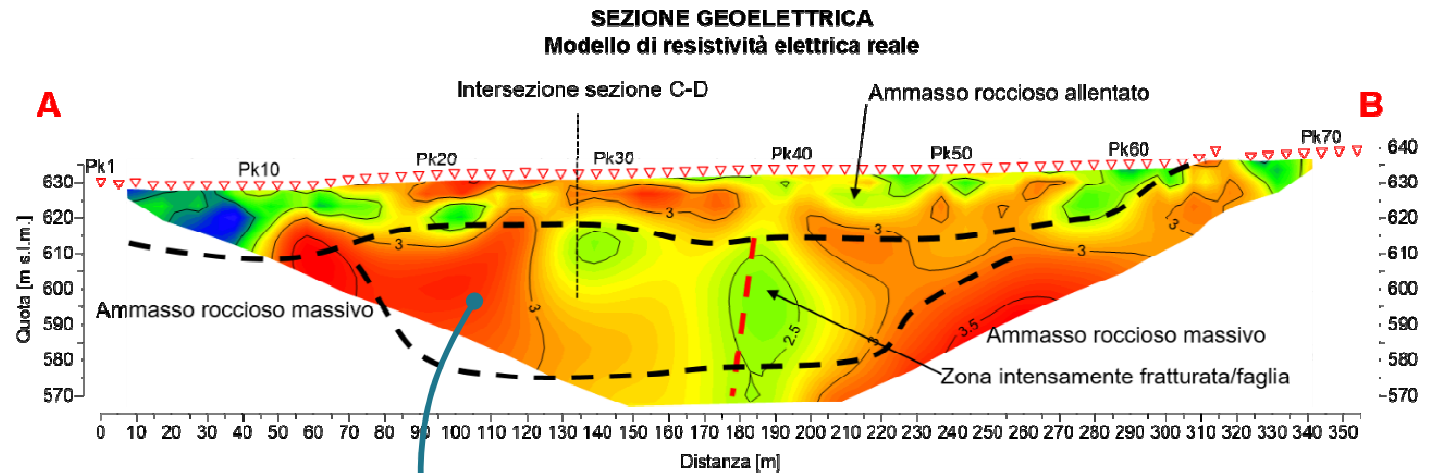
## ESEMPIO 3 – caratterizzazione delle principali strutture geologiche di un versante in frana di grandi dimensioni – Progettazione indagine



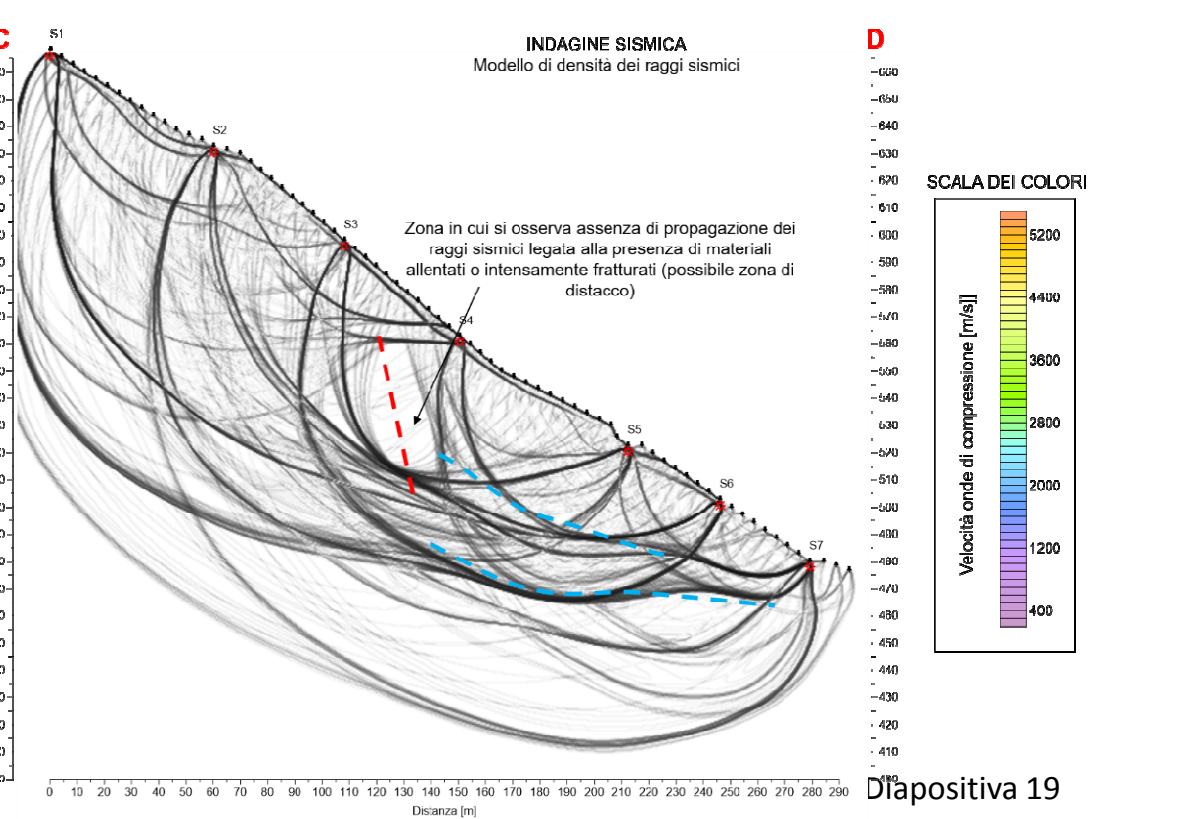
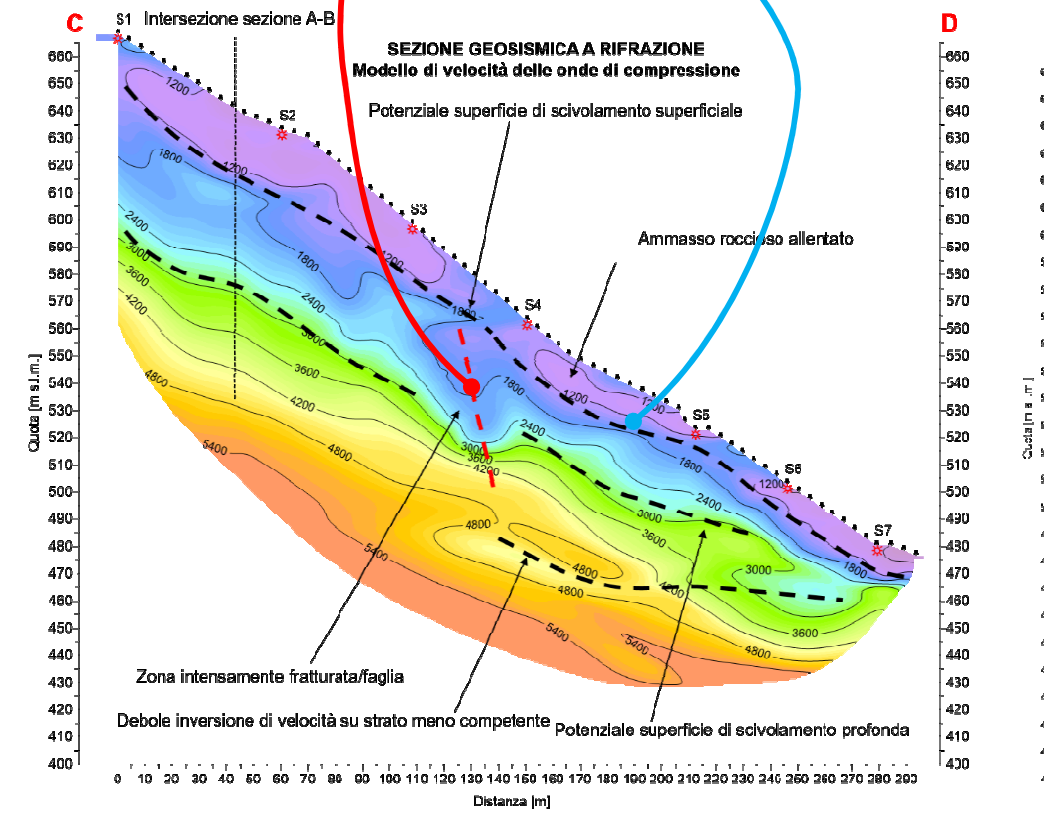
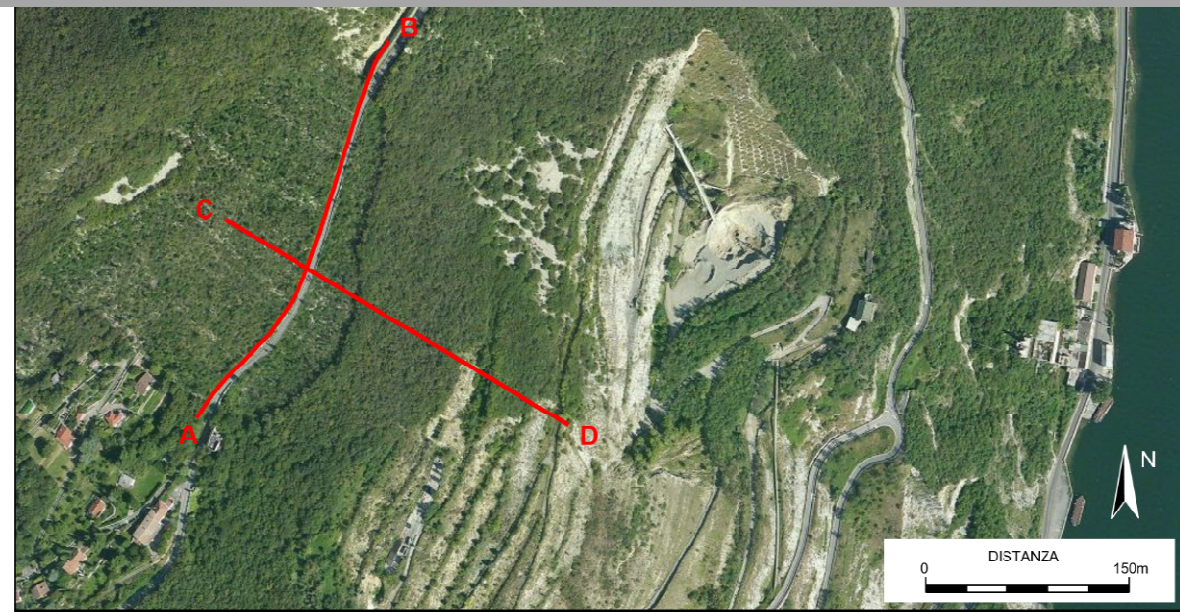
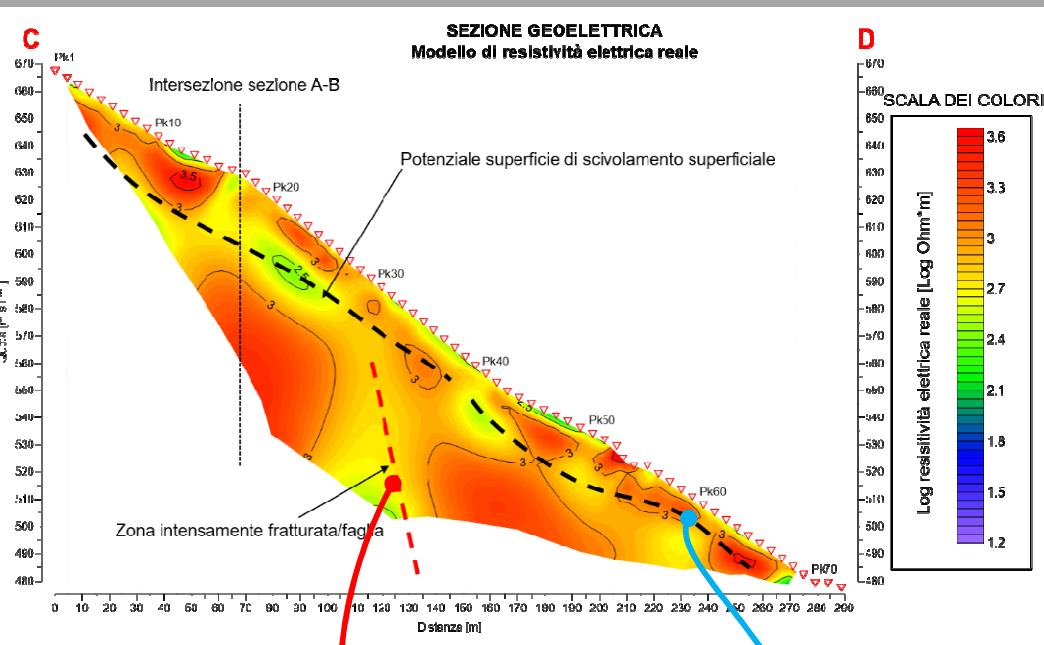
### Dettaglio indagini:

1. N° 2 sezioni geoelettriche trasversali associate a N° 2 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione disposte a croce nella zona di distacco.
2. Linee a 72 sensori (geofoni e elettrodi) per una lunghezza di linea pari a 355 m
3. Energizzazione sismica con esplosivo

ESEMPIO 3 – caratterizzazione delle principali strutture geologiche di un versante in frana di grandi dimensioni – Linea trasversale al corpo di frana



# Analisi geofisica multi-parametrica per caratterizzazioni geologiche (3)

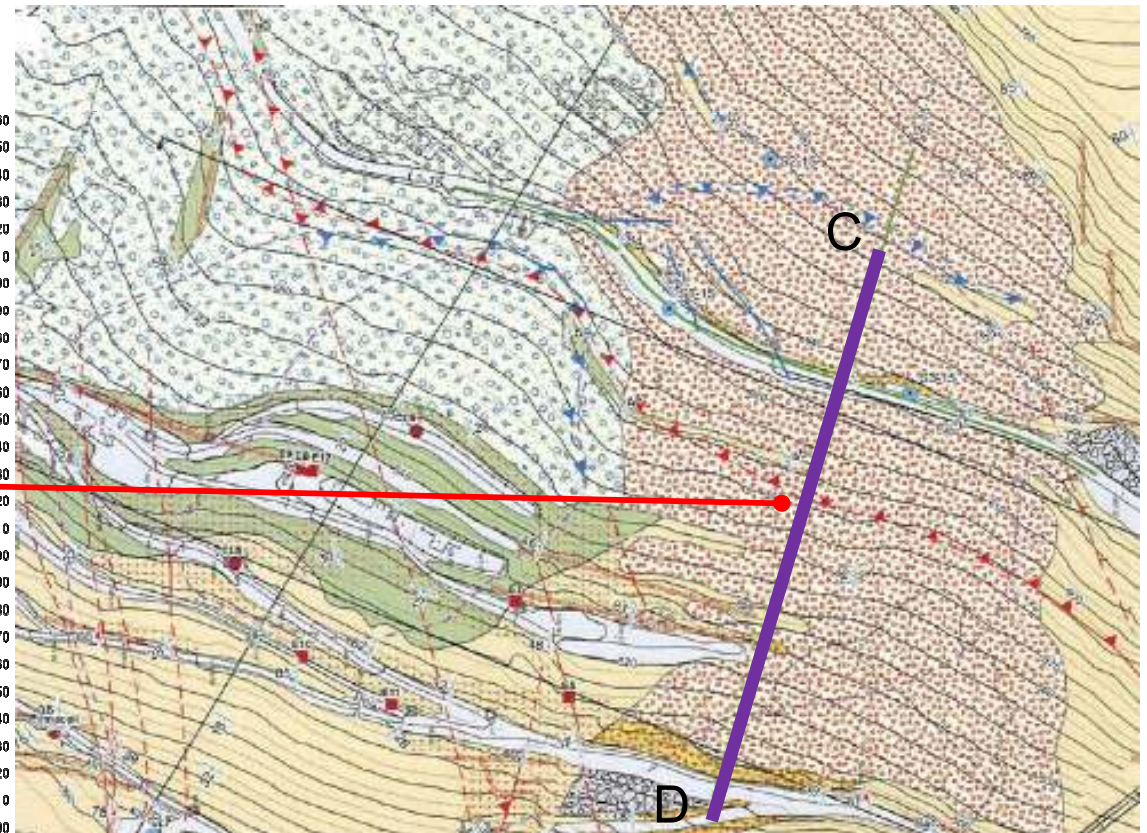
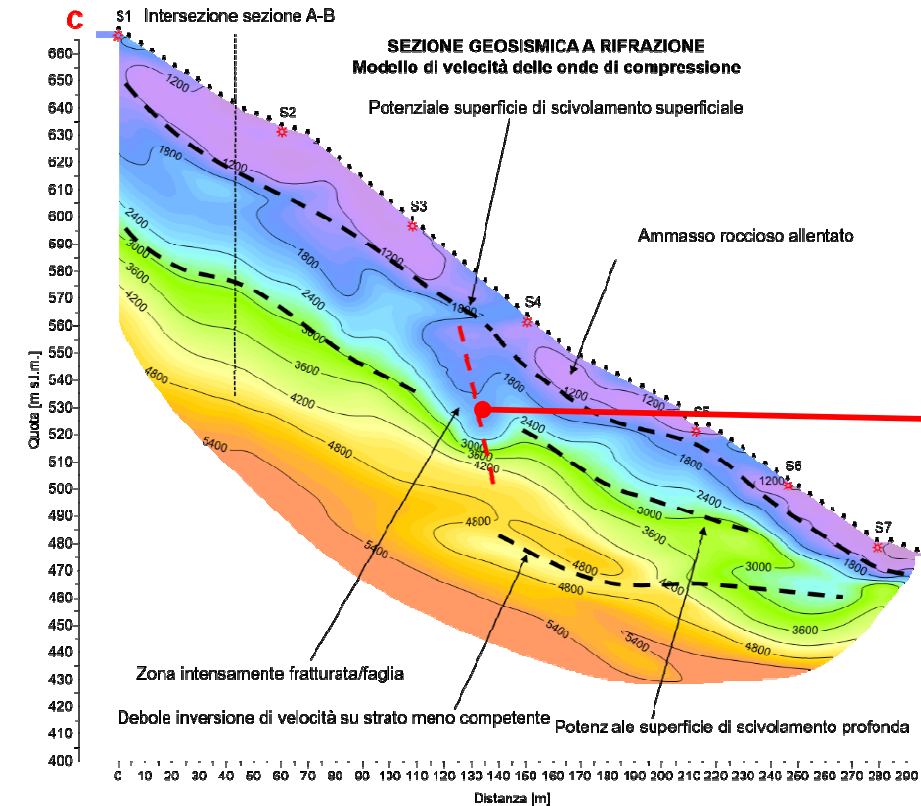
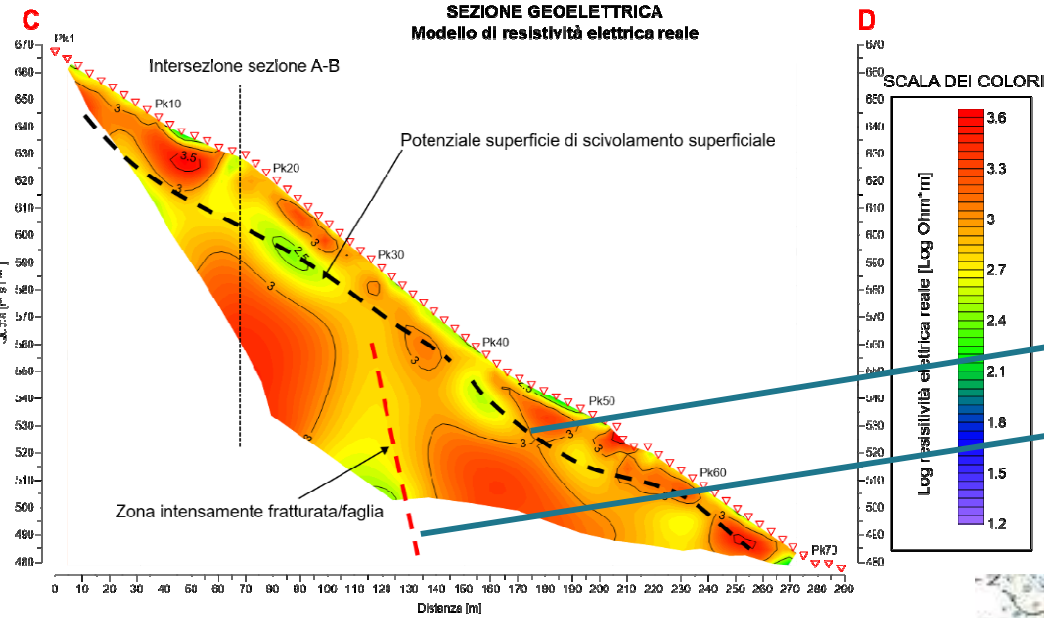


# Analisi geofisica multi-parametrica per caratterizzazioni geologiche (3)

## Risultati:

Il confronto incrociato tra l'indagine geoelettrica ha consentito una interpretazione del modello geologico con un minor grado di incertezza. In particolare:

- La superficie di scivolamento della frana superficiale (20-25 m)
- Una struttura di potenziale svincolo dell'ammasso roccioso su superficie di scivolamento profonde



## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi

### PROBLEMA

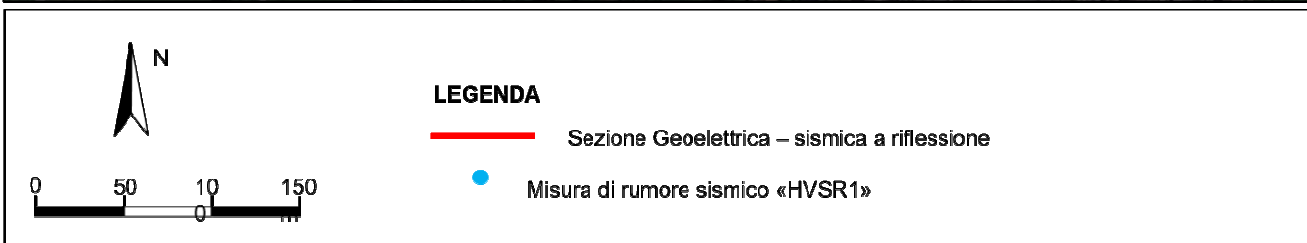
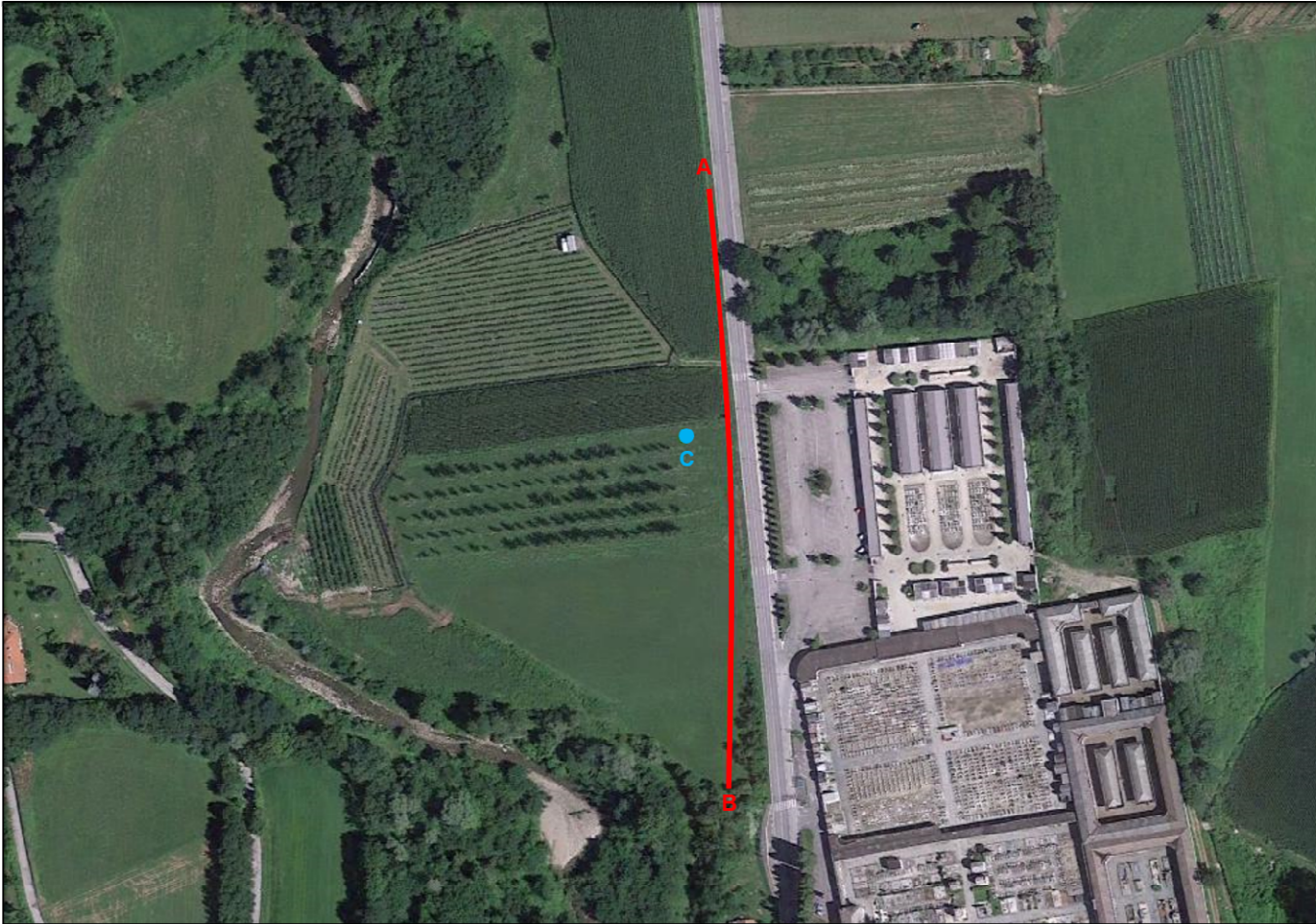
La posa di dispersori di corrente nel sottosuolo ha efficacia solo in presenza di terreni a bassa resistività elettrica (conduttivi).

Il caso in esame riguarda il posizionamento di un dispersore anodico in zona pedemontana (Pinerolo) per la posa di un nuovo gasdotto (DNG, Gruppo Acea Pinerolese).

Dopo vari tentativi senza risultato (perforazioni che hanno intercettato il substrato lapideo a bassa profondità → 20-30 m) è stata condotta una campagna di indagini geofisiche per individuare un orizzonte «dispersivo» sufficientemente potente (almeno 50-60 m)

## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi

VISTA SU BASE ORTOFOTO  
Fonte: Google Earth



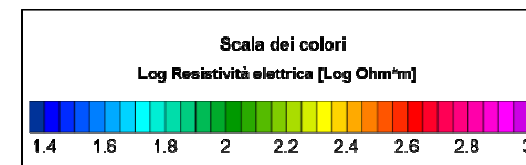
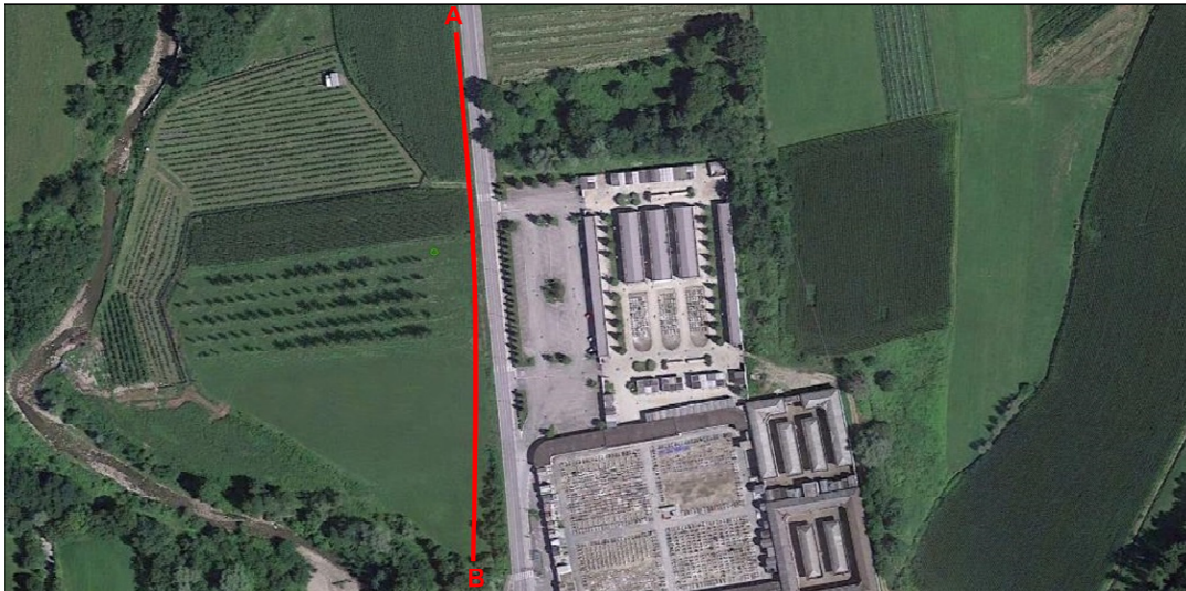
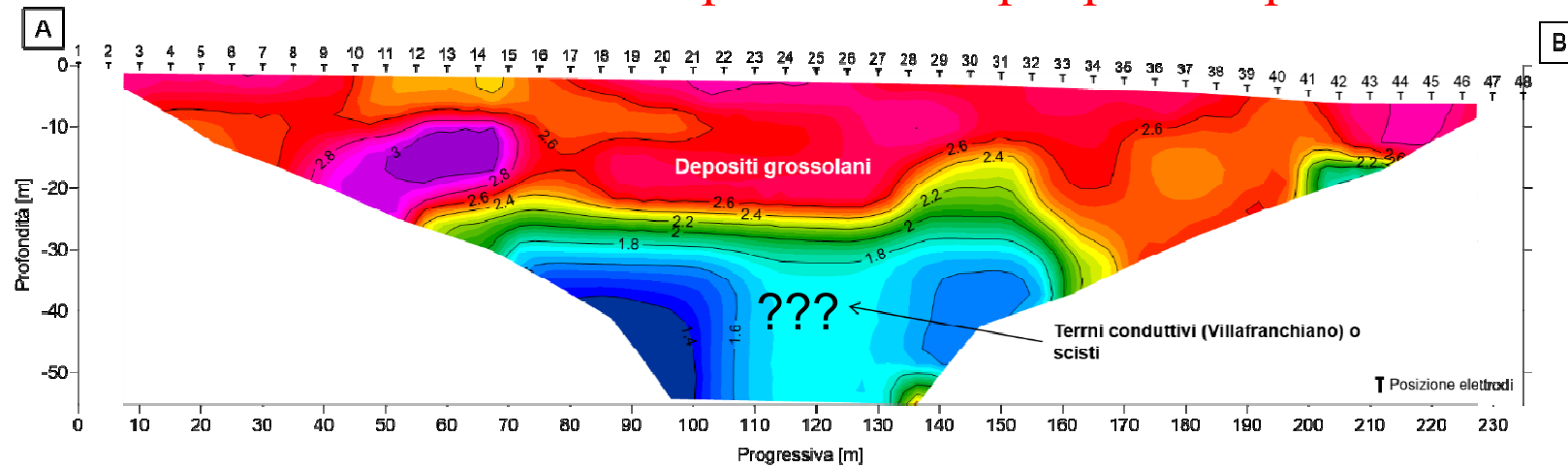
### PROGETTAZIONE

Bersaglio di indagine → depositi «Villafranchiani» a matrice limosa compresi tra i depositi alluvionali recenti (ghiaia e ciottoli) e il substrato lapideo (scisti)

Parametri fisici caratterizzanti  
Resistività elettrica (alluvioni → alta; Villafranchiano → bassa; substrato (scisti) → bassa)

Come distinguere il substrato (scisti) dal Villafranchiano (depositi argillosi)? →  
Prova HVSR (contrasto di impedenza profondo)  
Sezione sismica a riflessione → geometrie delle strutture sedimentarie

## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi

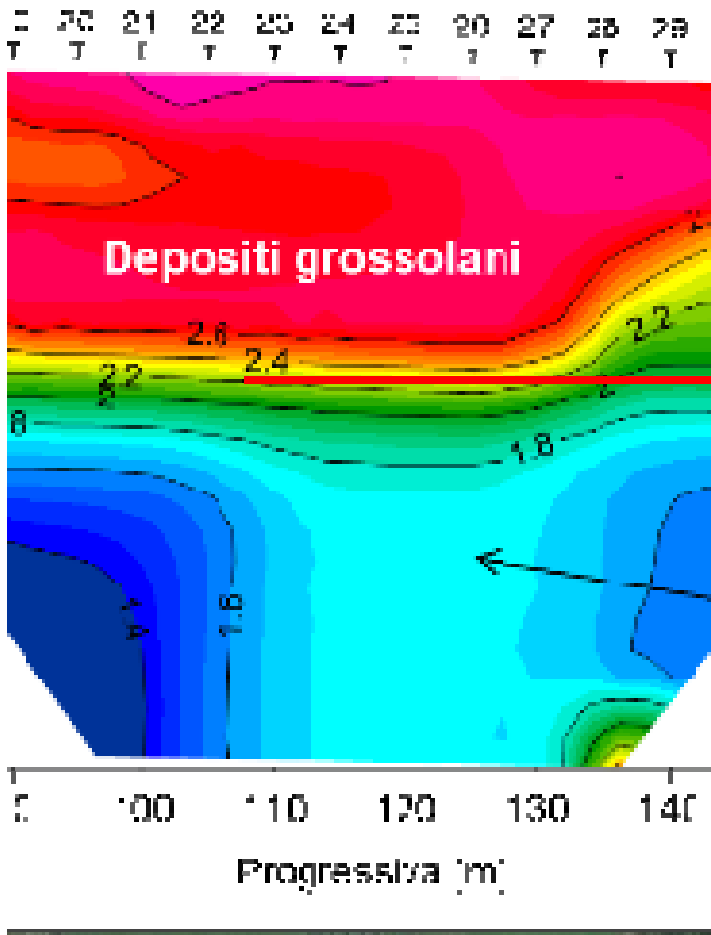


### Indagine geoelettrica

Individuazione dell'orizzonte alluvionale superficiale ghiaioso-sabbioso

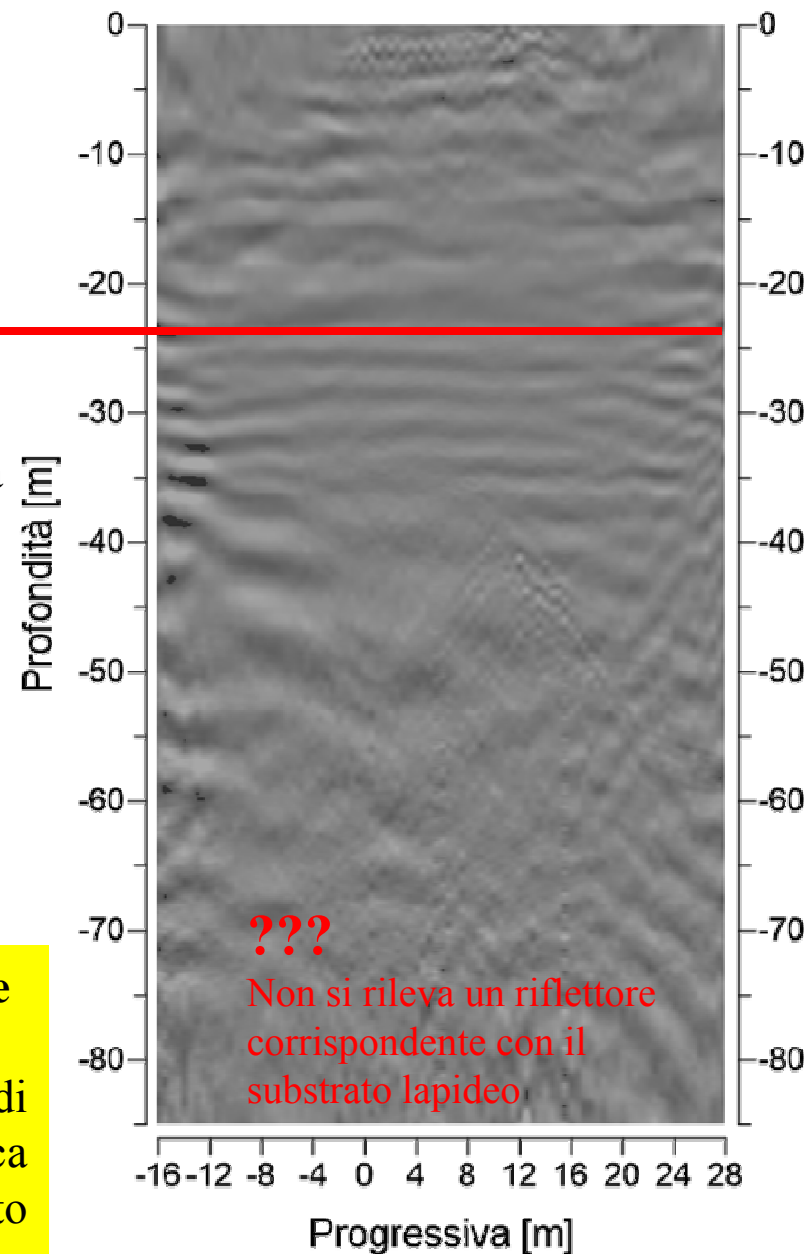
Rimane l'incertezza sulla formazione sottostante: Villafranchiano (il nostro bersaglio) o substrato lapideo (scisti)?

## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi



Alluvioni grossolane

Depositi stratificati (limi lacustri - varve) passanti a alternanza di livelli sabbioso-ghiaiosi e livelli argillosi



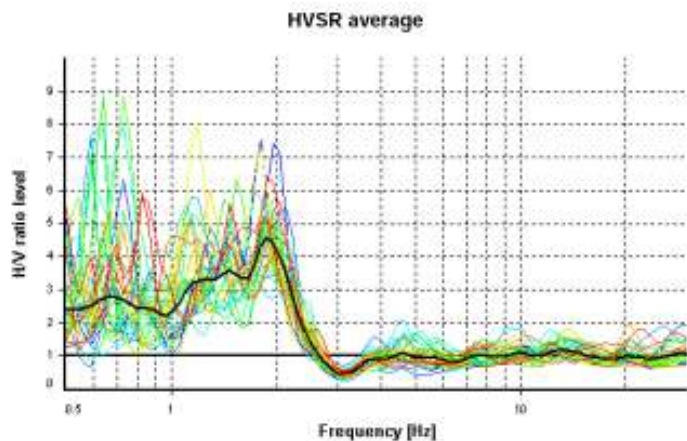
### Confronto indagine geoelettrica con indagine sismica a riflessione

Individuazione dell'orizzonte alluvionale superficiale

Individuazione di uno strato finemente stratificato (varve lacustri) e di probabili depositi alluvionali (Villafranchiano). Non si è identificata una superficie di riflessione assimilabile al contatto con il substrato lapideo

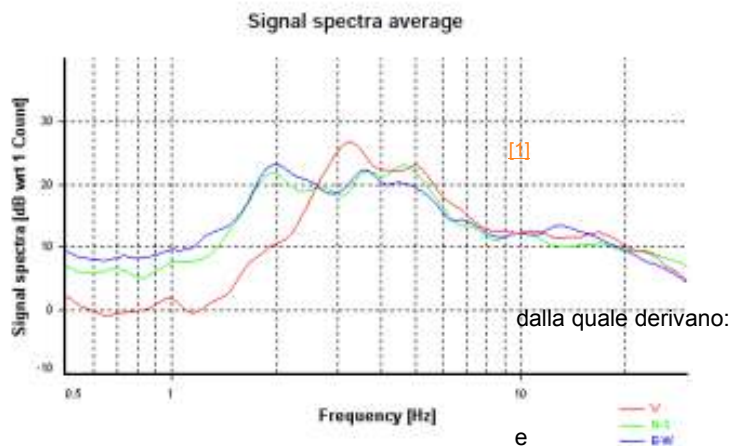
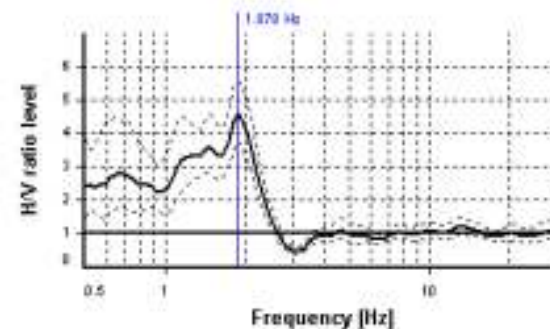


## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi



### SESAME CRITERIA

Selected  $f_0$  frequency  
 1.878 Hz  
 $A_0$  amplitude = 4.583  
 Average  $f_0 = 1.762 \pm 0.237$



Mediante l'applicazione della relazione che lega la frequenza di risonanza alla velocità (valutata secondo tre diverse ipotesi) ed alla profondità (11) si ricavano i valori elencati nella seguente tabella.

	Velocità onde di taglio [m/s]	Profondità interfaccia risonante [m]
A	500	67
B	550	73
C	600	80

$$v_0 = \frac{\hat{V}_s}{4H} \quad \hat{V}_s = \frac{4H}{v_0} \quad H = \frac{\hat{V}_s * v_0}{4}$$

### Indagine HVSr

Profondità del «substrato sismico» compresa tra 67 e 80 m → probabile contatto con il substrato lapideo

# ANALISI LOGICA DEL CONFRONTO INCROCIATO

## ESEMPIO 4 – individuazione corpi conduttivi per posa dispersori elettrici profondi Confronto incrociato

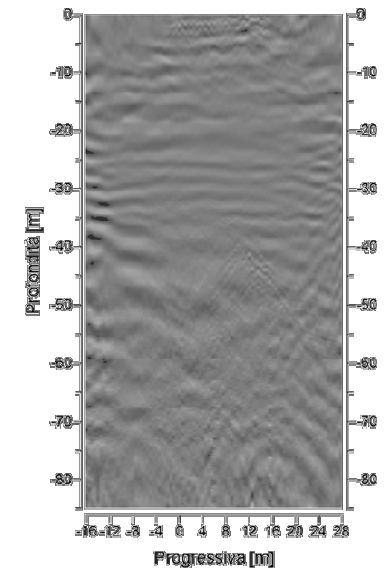
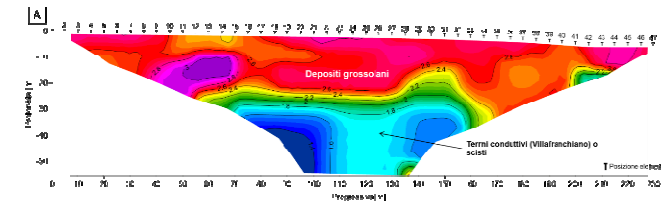
**Tomografia elettrica** → spessore depositi alluvionali 25-30 m sopra Substrato (scisti) o depositi fluvio-lacustri (Villafranchiano)



**Sismica a riflessione** → spessore depositi alluvionali 25-30 m sopra depositi fluvio-lacustri (Villafranchiano) **NON SI RICONOSCE IL SUBSTRATO** (profondità massima raggiunta = 80 m)



**HVSR** → Frequenza caratteristica = 1.87 Hz. Per un intervallo di velocità di onde di taglio compreso tra 500 e 600 m/s (velocità tipiche Villafranchiano) si ottiene una profondità di substrato compresa tra 67 e 80 m



	Velocità onde di taglio [m/s]	Profondità interfaccia risonante [m]
A	500	67
B	550	73
C	600	80

**Esito indagine → perforazione di pozzo per posa dispersore con localizzazione substrato a 78 m. Depositi villafranchiani da -25 a -78 m.**  
**ESITO POSITIVO**



**Grazie per l'attenzione**