



# Riepilogo della Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica

V. Ciulli

Dipartimento di Fisica  
Università di Firenze

# Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica in ambito multidisciplinare - GSRM2018

from Monday, 29 October 2018 at **09:00** to Tuesday, 30 October 2018 at **18:00** (Europe/Rome)  
at **Auditorium dell'Ente Cassa di Risparmio di Firenze**

Via Folco Portinari 5, Firenze

## Introduzione

*Breve descrizione delle tecniche e attività di radiografia muonica attualmente in opera e dei possibili sviluppi in ambito archeologico, geologico ed ingegneristico.*

Convener: Prof. Vitaliano Ciulli (Università degli Studi di Firenze e INFN, Sez. di Firenze)

11:00 **La radiografia muonica per assorbimento e le sue applicazioni 40'**

Speakers: Dr. Lorenzo Bonechi (Università degli Studi di Firenze e INFN, Sez. di Firenze), Prof. Giulio Saracino (Università degli Studi di Napoli "Federico II" e INFN, Sez. di Napoli)

11:40 **La tomografia muonica per diffusione multipla e le sue applicazioni 30'**

Speaker: Dr. Paolo Checchia (INFN, Sez. di Padova)

12:10 **Discussione 20'**

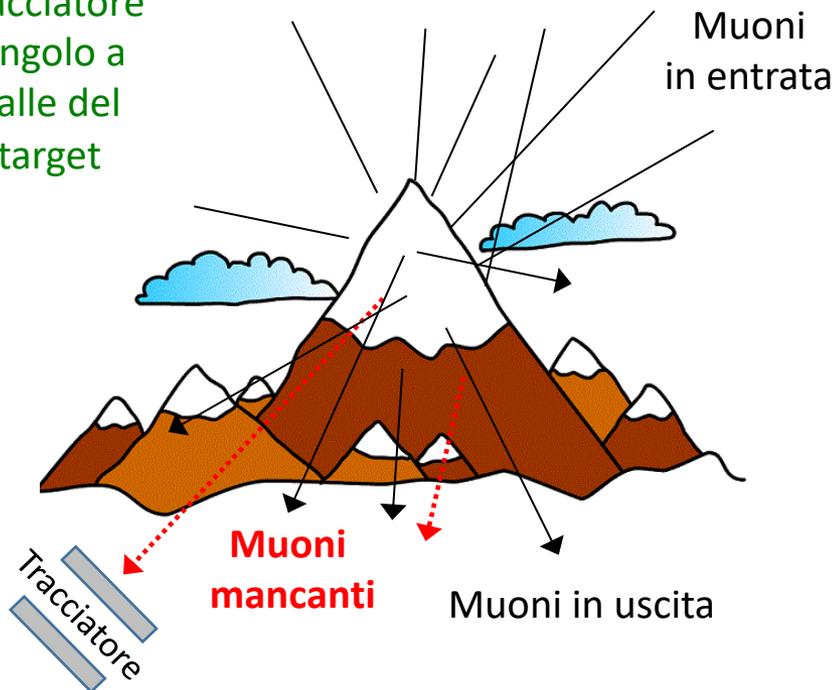
*Discussione sulle tematiche affrontate*

# Introduzione

## *L'imaging con muoni*

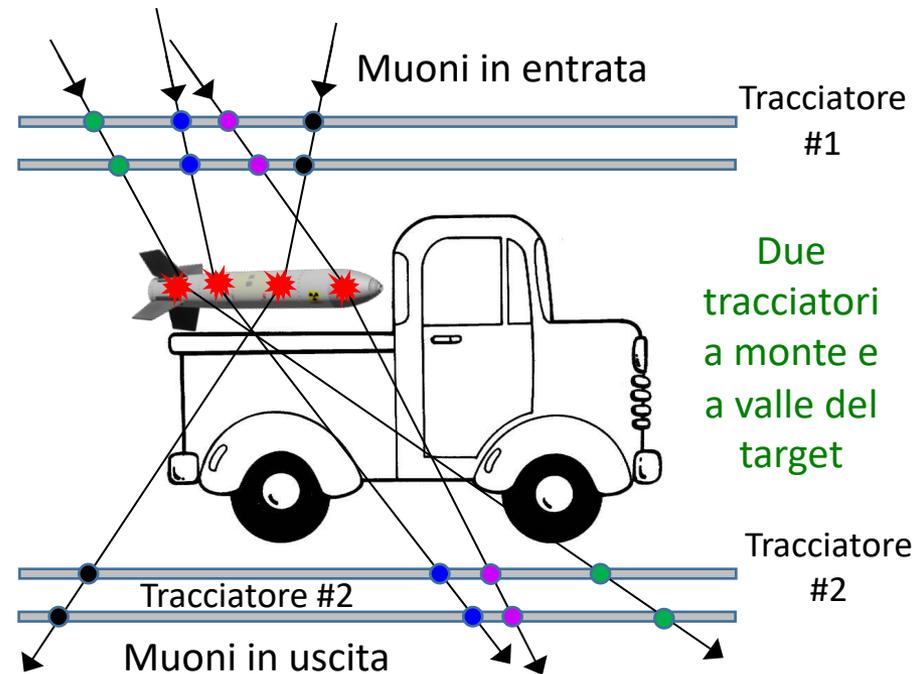
### Radiografia muonica per assorbimento (o trasmissione)

Tracciatore  
singolo a  
valle del  
target



Si basa sulla perdita di energia e sull'assorbimento dei  $\mu$  nei materiali. Appropriata per l'imaging di grandi volumi.

### Tomografia muonica per diffusione coulombiana



Due  
tracciatori  
a monte e  
a valle del  
target

Si basa sulla deflessione delle traiettorie dei  $\mu$  nei materiali ad alto Z. Appropriata per imaging di volumi medio-piccoli.

# Introduzione

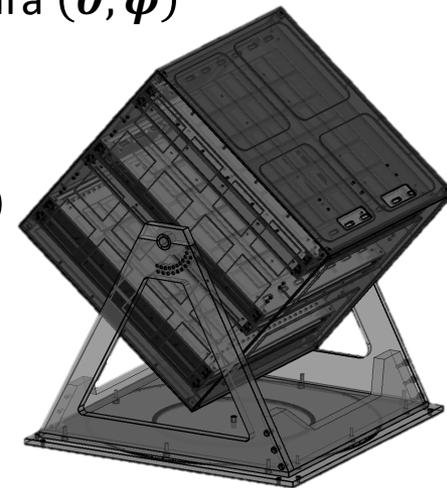
## Metodologia



### FASE DI MISURA

- **Sopralluogo** per definire il punto di misura e la direzione di misura ( $\theta, \varphi$ )
- **Installazione** del rivelatore e test
- **Misura I**: durata  $\Delta t_T$ ; di fronte al target (T=target)  $\rightarrow N_T(\theta, \varphi)$
- **Misura II**: durata  $\Delta t_{FS}$ , a cielo libero (FS=free sky)  $\rightarrow N_{FS}(\theta, \varphi)$
- Ricostruzione della **Trasmissione** dei muoni

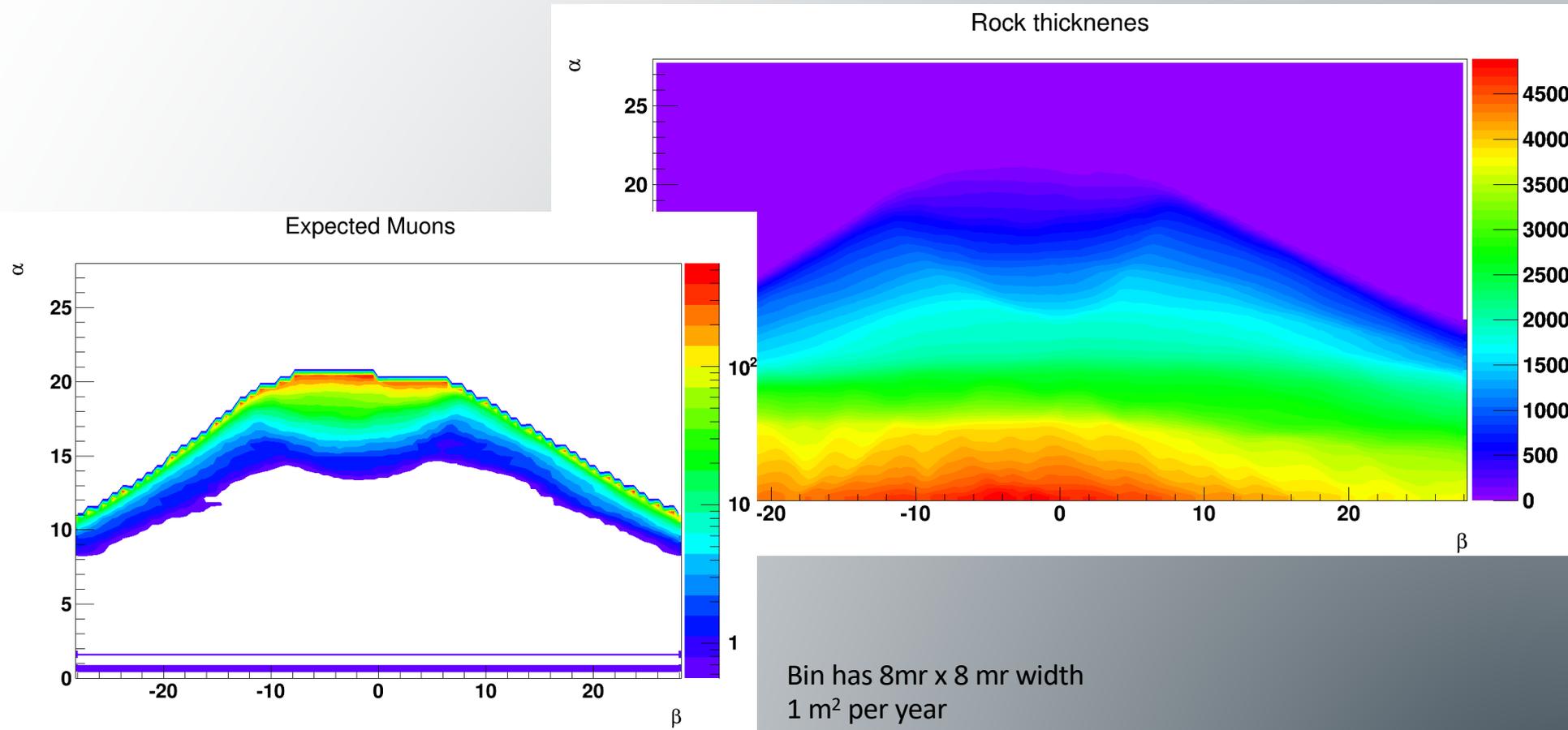
$$T_{\mu}(\theta, \varphi) = \frac{\varepsilon_{FS} \Delta t_{FS} N_T(\theta, \varphi)}{\varepsilon_T \Delta t_T N_{FS}(\theta, \varphi)}$$



### SIMULAZIONI e CONFRONTO

- **Modelli digitali del terreno**
- **Generatore di muoni**
- Integrazione delle mappe e del generatore di muoni nei SW di simulazione
- Confronto con simulazione a densità uniforme  $\rightarrow$  identificazione anomalie
- Confronto con simulazioni varie densità  $\rightarrow$  ricostruzione mappa densità

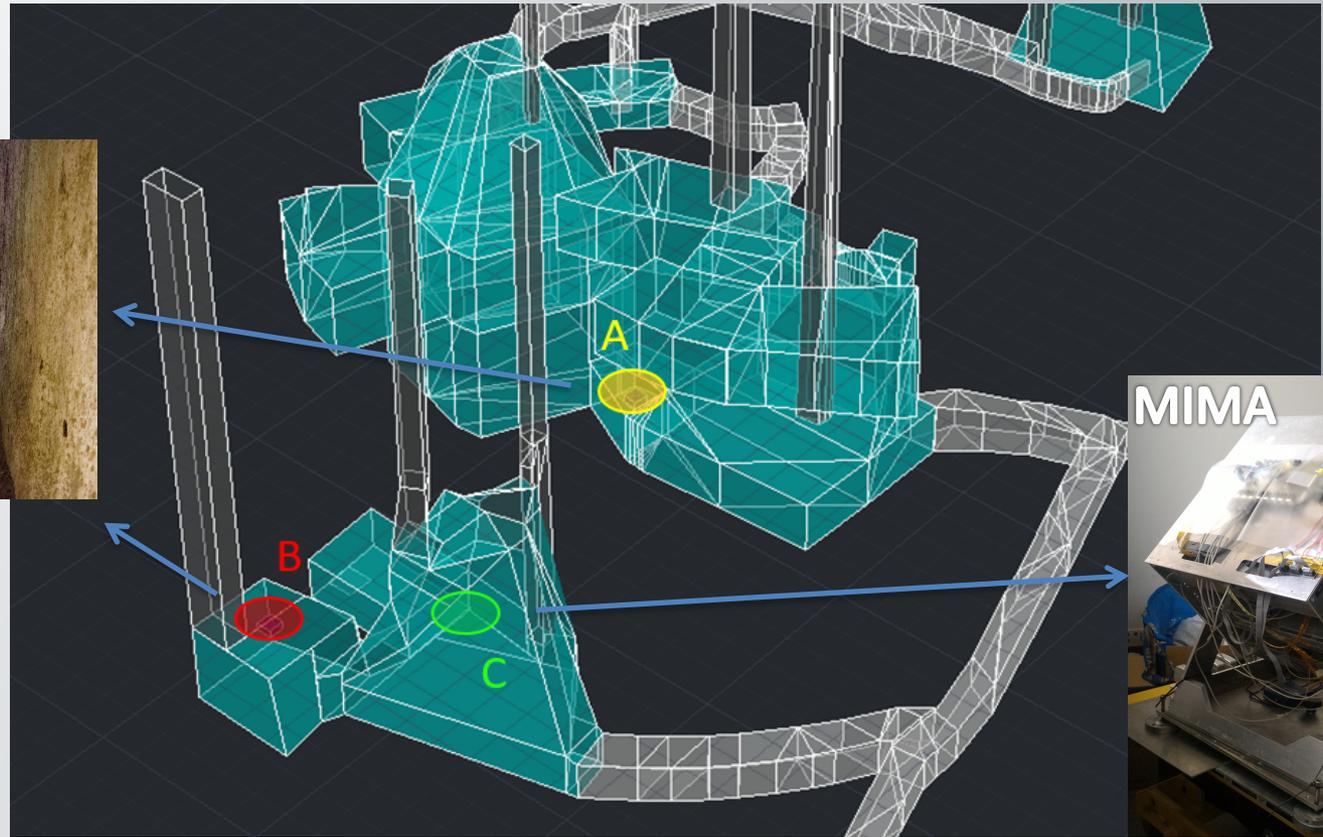
# VESUVIO: spessori e muoni attesi



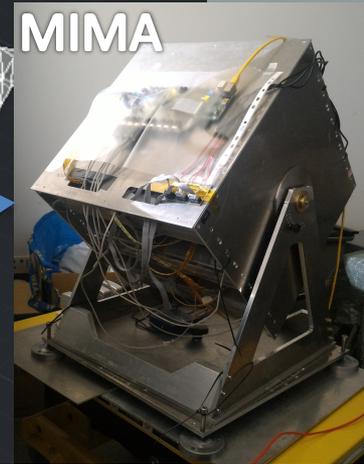
# Punti di osservazione



MURAY

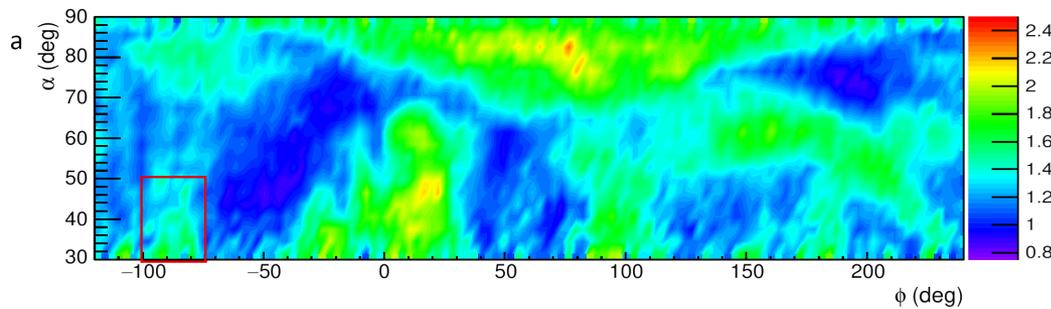


MIMA

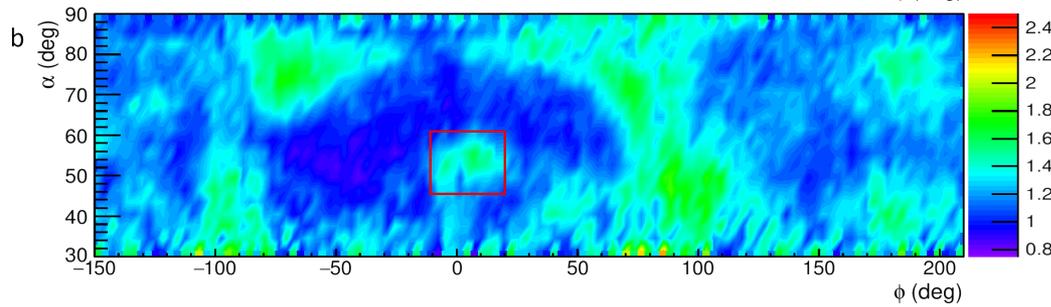


# SEGNALI DAI PUNTI DI OSSERVAZIONE

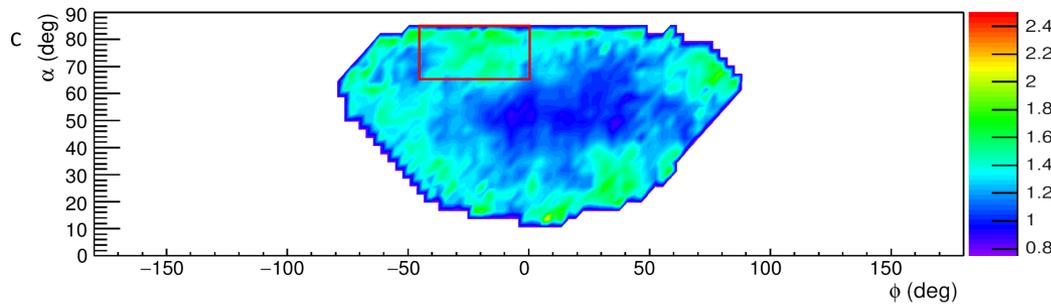
A



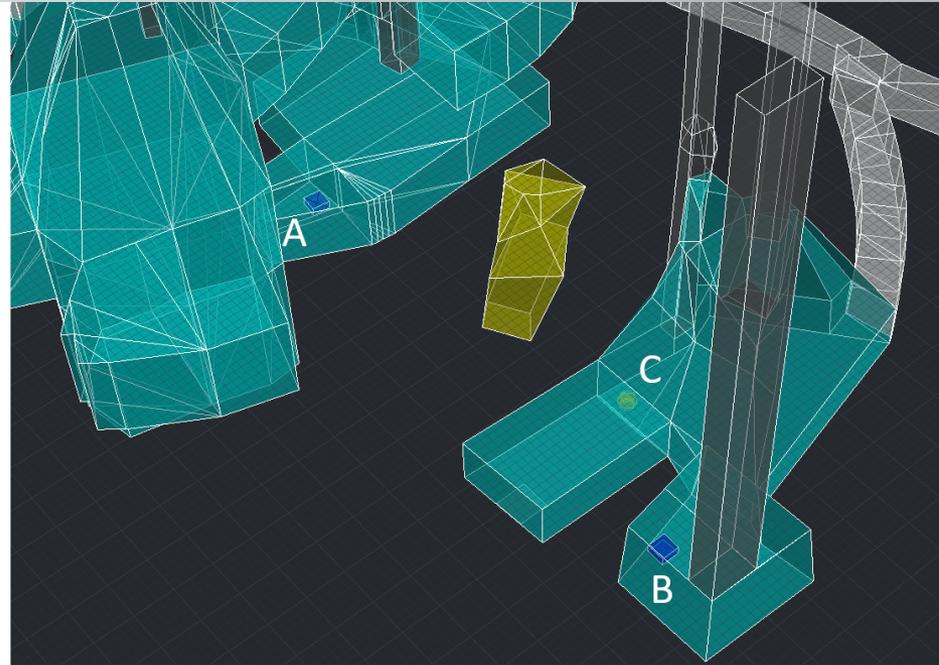
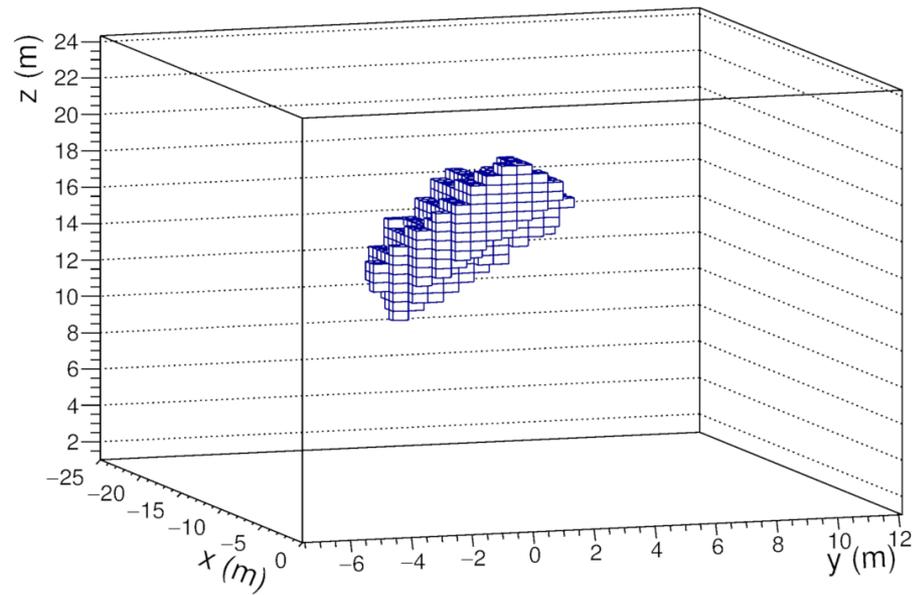
B



C



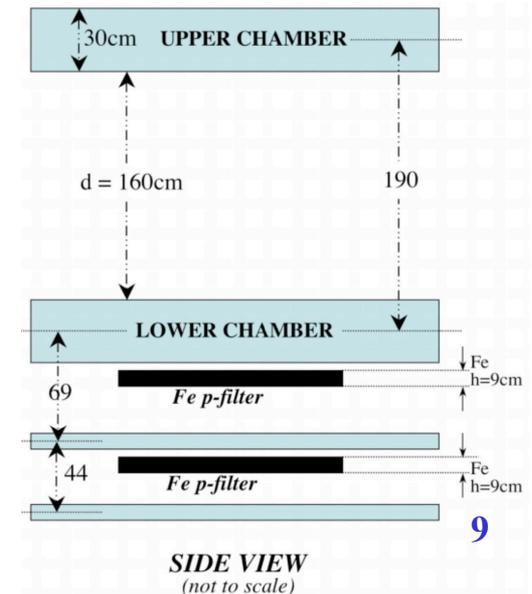
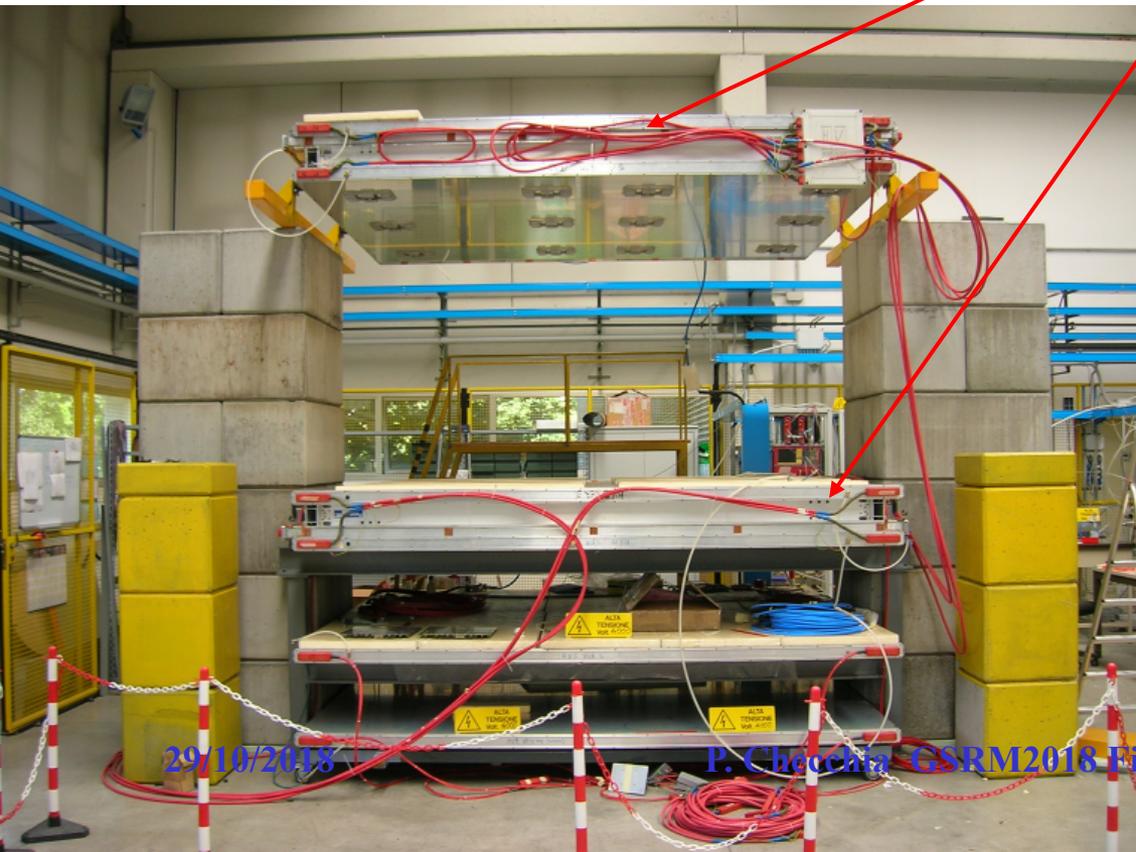
# RICOSTRUZIONE 3D



# Esempio di apparato sperimentale

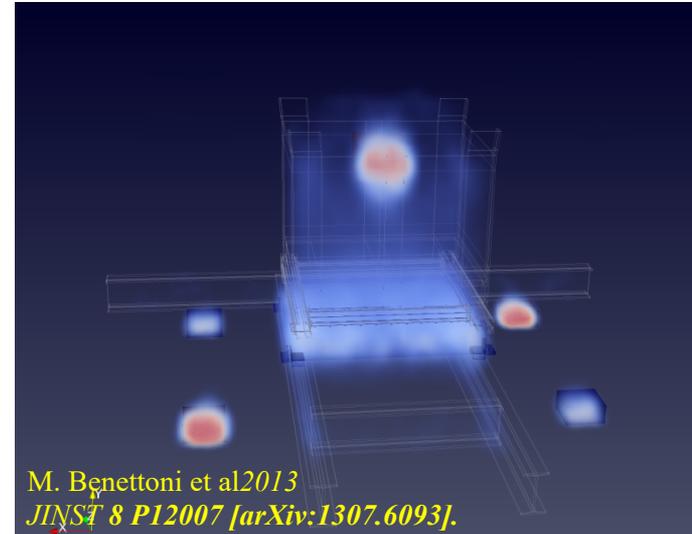
Ai Laboratori Nazionali di Legnaro (Padova) dell' **INFN** si è realizzato un **DIMONSTRATORE** per lo studio della tomografia muonica con due *Muon Chambers Detectors* di riserva prodotte per CMS (esperimento al LHC al CERN) usate nella **SCOPERTA del BOSONE di HIGGS**

- Due **Drift Chambers** (camere a deriva)  $2.5 \times 3.0 \text{ m}^2$
- Separazione tra le due camere: 160 cm: **vol.  $\approx 11.5 \text{ m}^3$**

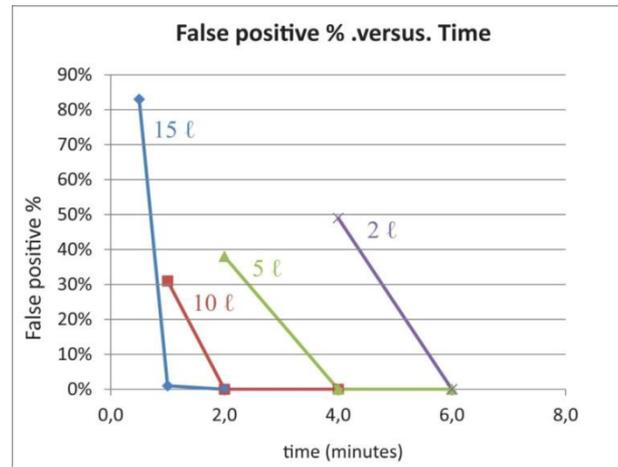


# Esempi di risultati

**Il programma è stato concluso con successo**

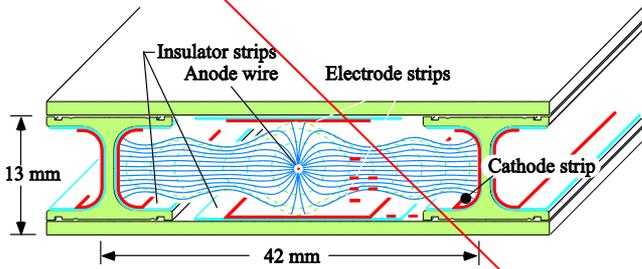


**Schermo: 21 Pb Simulata**  
**situazione reale in un portale in scala 1:1**  
**7 min di presa dati**

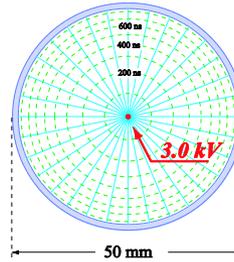


## Soluzioni più usate: rivelatori a gas...

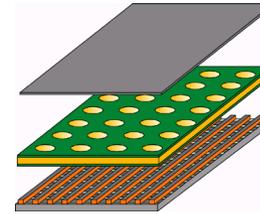
### Drift cell



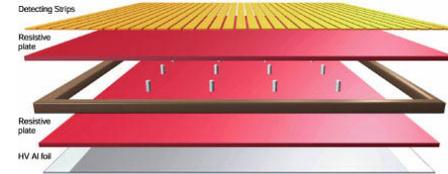
### Drift tubes



### GEM

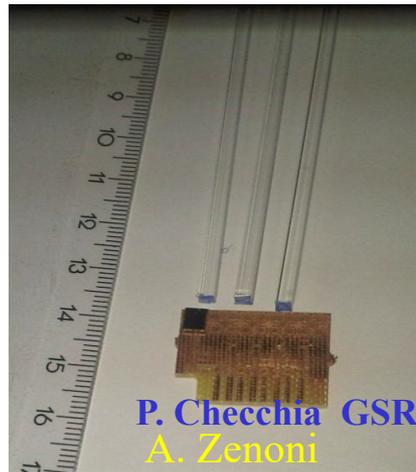


### RPC\*

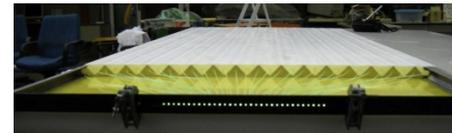


## ... e a scintillazione

### Scint. Fibers+SiPM\*



### Scint.+ WLS Fibers+SiPM\*



....anche emulsioni  
nucleari

# Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica in ambito multidisciplinare - GSRM2018

from Monday, 29 October 2018 at **09:00** to Tuesday, 30 October 2018 at **18:00** (Europe/Rome)  
at **Auditorium dell'Ente Cassa di Risparmio di Firenze**

Via Folco Portinari 5, Firenze

## Interessi e attività in ambito archeologico

*Descrizione delle tecniche di indagine in ambito archeologico e studio delle possibili applicazioni della radiografia muonica ad attività in opera nel settore.*

14:00 **Geophysical methods in cultural heritage applications 20'**

Speaker: Prof. Giovanni Florio (Università degli Studi di Napoli "Federico II")

14:20 **Dalla grotta al tumulo: analisi geofisiche pregresse e possibili casi di studio per l'applicazione della radiografia muonica in siti preistorici ed etruschi 20'**

Speakers: Dr. Luca Cappuccini (Università degli Studi di Firenze), Dr. Domenico Lo Vetro (Università degli Studi di Firenze), Prof. Fabio Martini (Università degli Studi di Firenze)

14:40 **Contesti minerari e funerari preistorici nel Parco Regionale della Maremma (GR): analisi geofisiche pregresse e possibili casi di studio per l'applicazione della radiografia muonica 20'**

Speakers: Dr. Giovanna Pizziolo (Università degli Studi di Siena), Prof. Lucia Sarti (Università degli Studi di Siena), Dr. Nicoletta Volante (Università degli Studi di Siena), Dr. Fabrizio Mazzarocchi (Università degli Studi di Siena)

15:00 **La mappatura geofisica completa della Valle dei Re a Luxor, Egitto 20'**

Speaker: Prof. Francesco Porcelli (Politecnico di Torino)

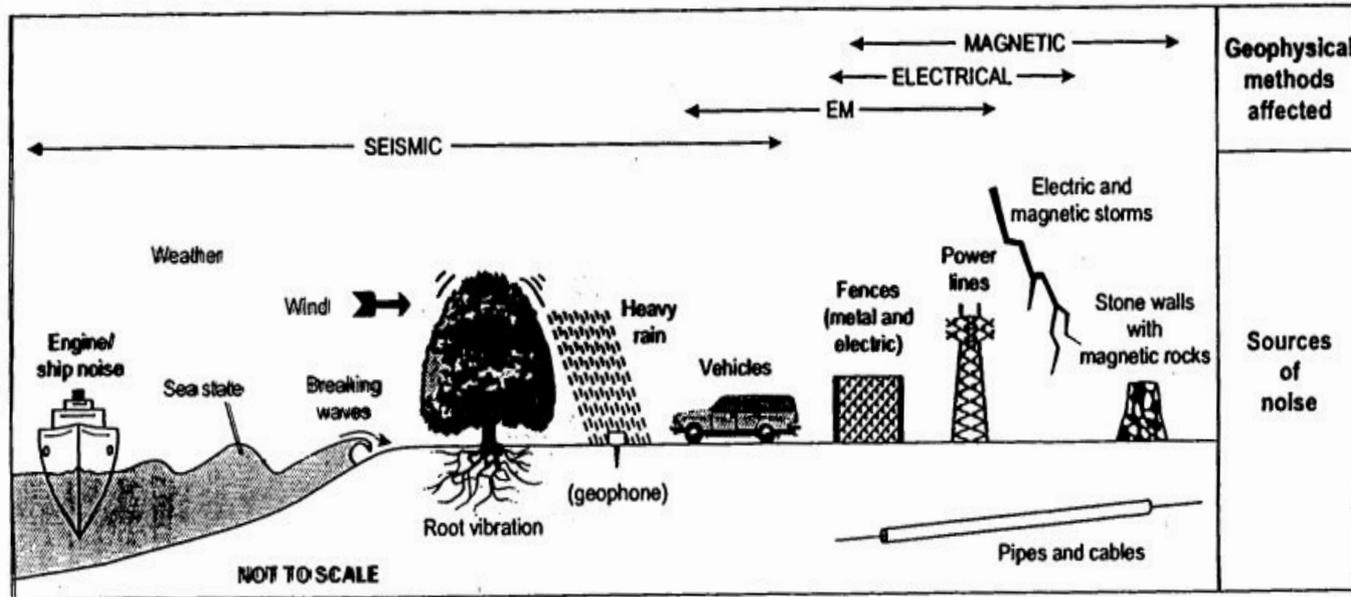
15:20 **La missione archeologica dell'Università di Pisa a Zawyet Sultan (Medio Egitto): tombe scavate nella roccia e piramidi incompiute 20'**

Speaker: Dr. Gianluca Miniaci (Università di Pisa)

15:40 **Discussione 20'**

*Discussione sulle tematiche affrontate*

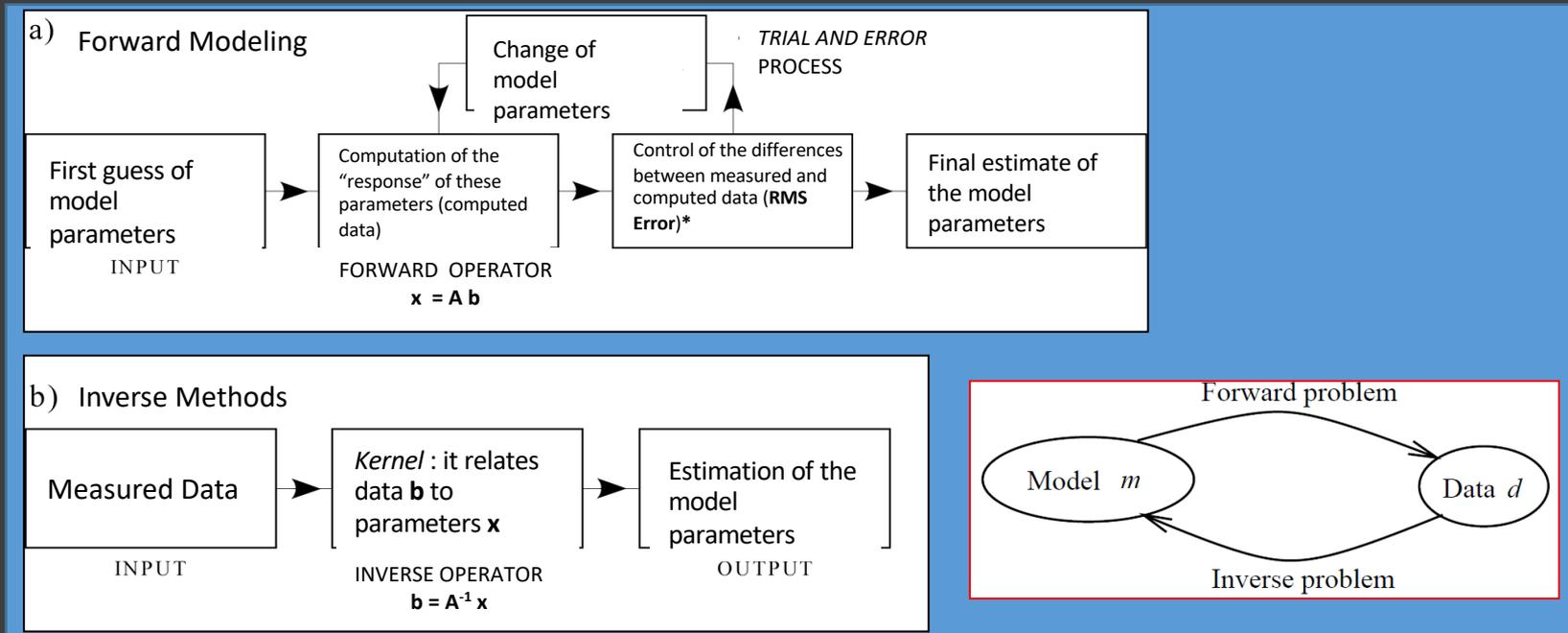
## METODI GEOFISICI E SORGENTI DI RUMORE



## Interpretazione dei dati geofisici

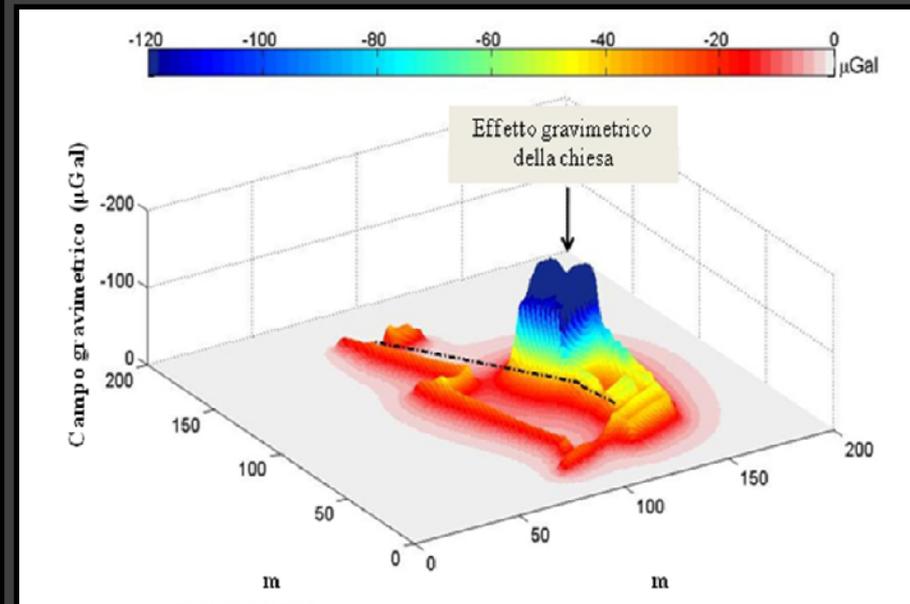
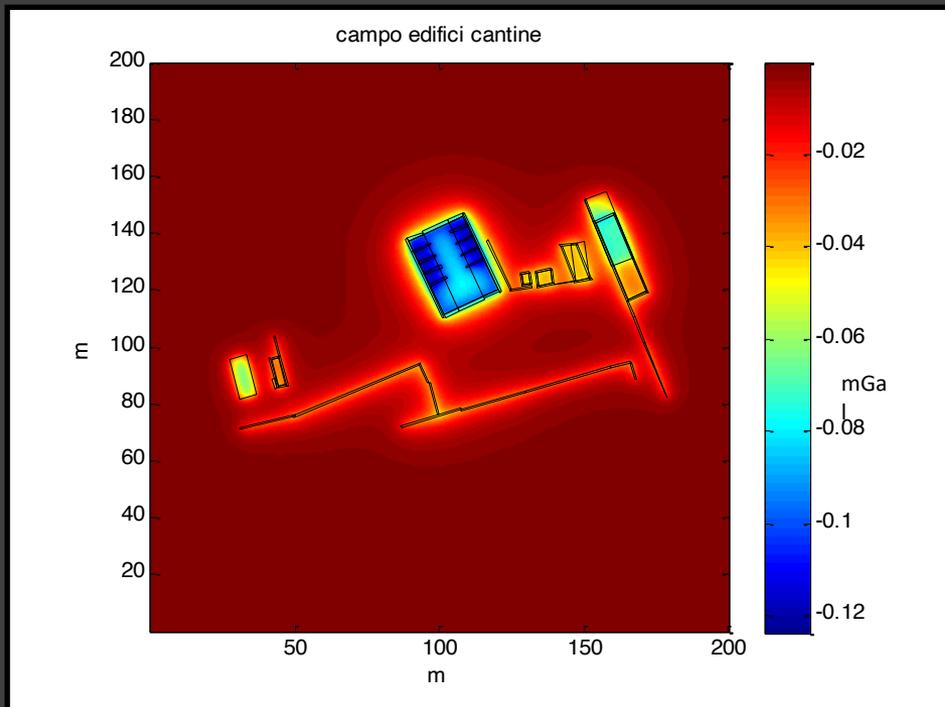
Problemi:

1. non univocità                      vincoli (di tipo geologico, geofisico, pozzi, etc...)
2. instabilità                         regolarizzazione (si cercano soluzioni con specifiche proprietà: 'smoothness' o 'compactness', limiti sulla variazione della proprietà fisica, etc...)

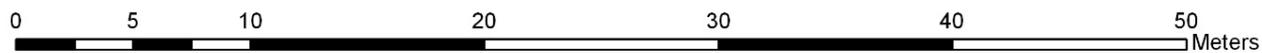
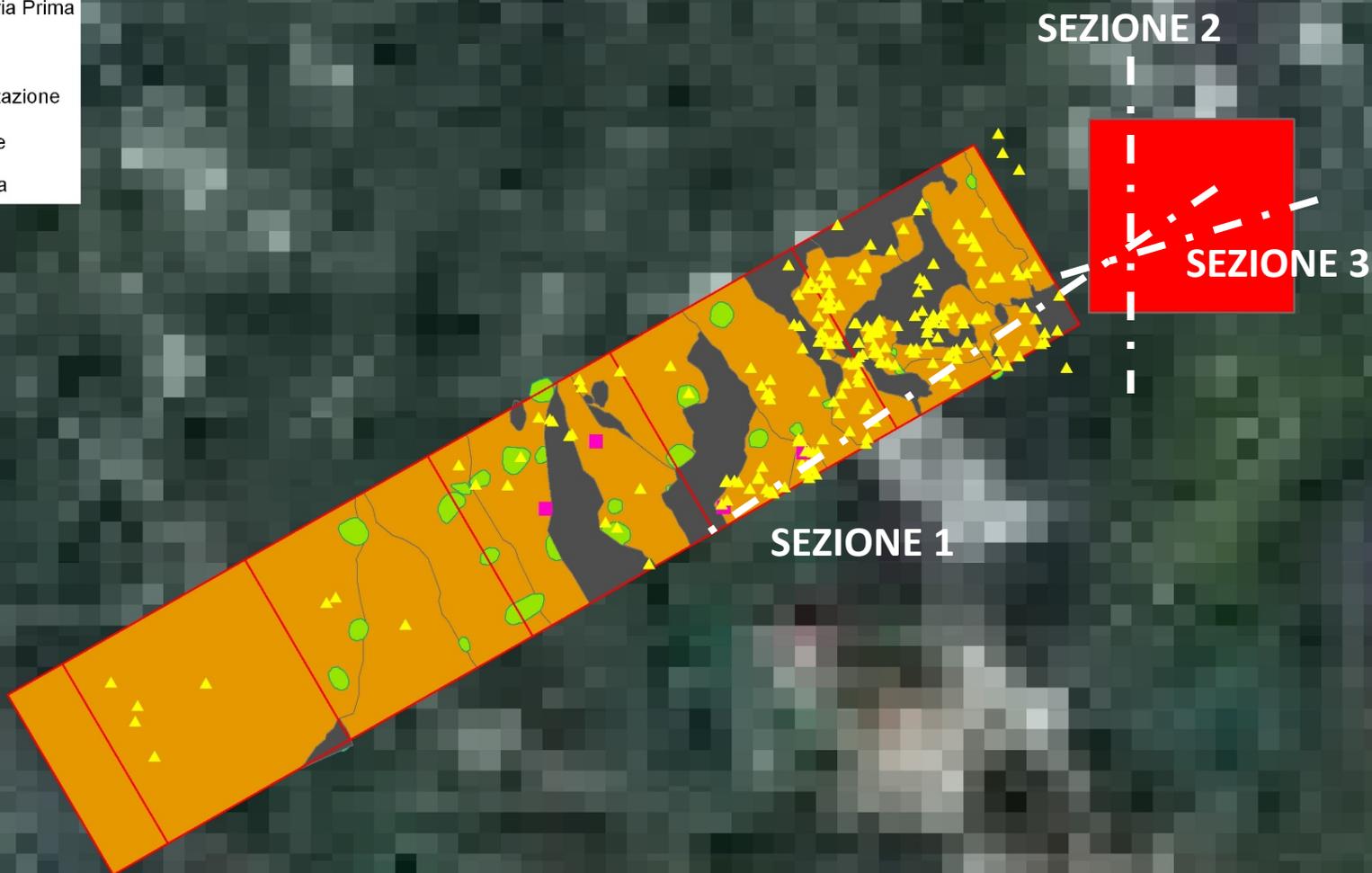


## Microgravimetria urbana: ricerca di cavità Cardito, NA

Effetto gravimetrico dei palazzi e delle cantine ubicate in vicinanza dei punti di misura  
(contrasto di densità  $-1.7 \text{ g/cm}^3$ )



# Nicoletta Volante - Poggio Spaccasasso



# INDAGINE SPERIMENTALE CON SISMICA A RIFRAZIONE

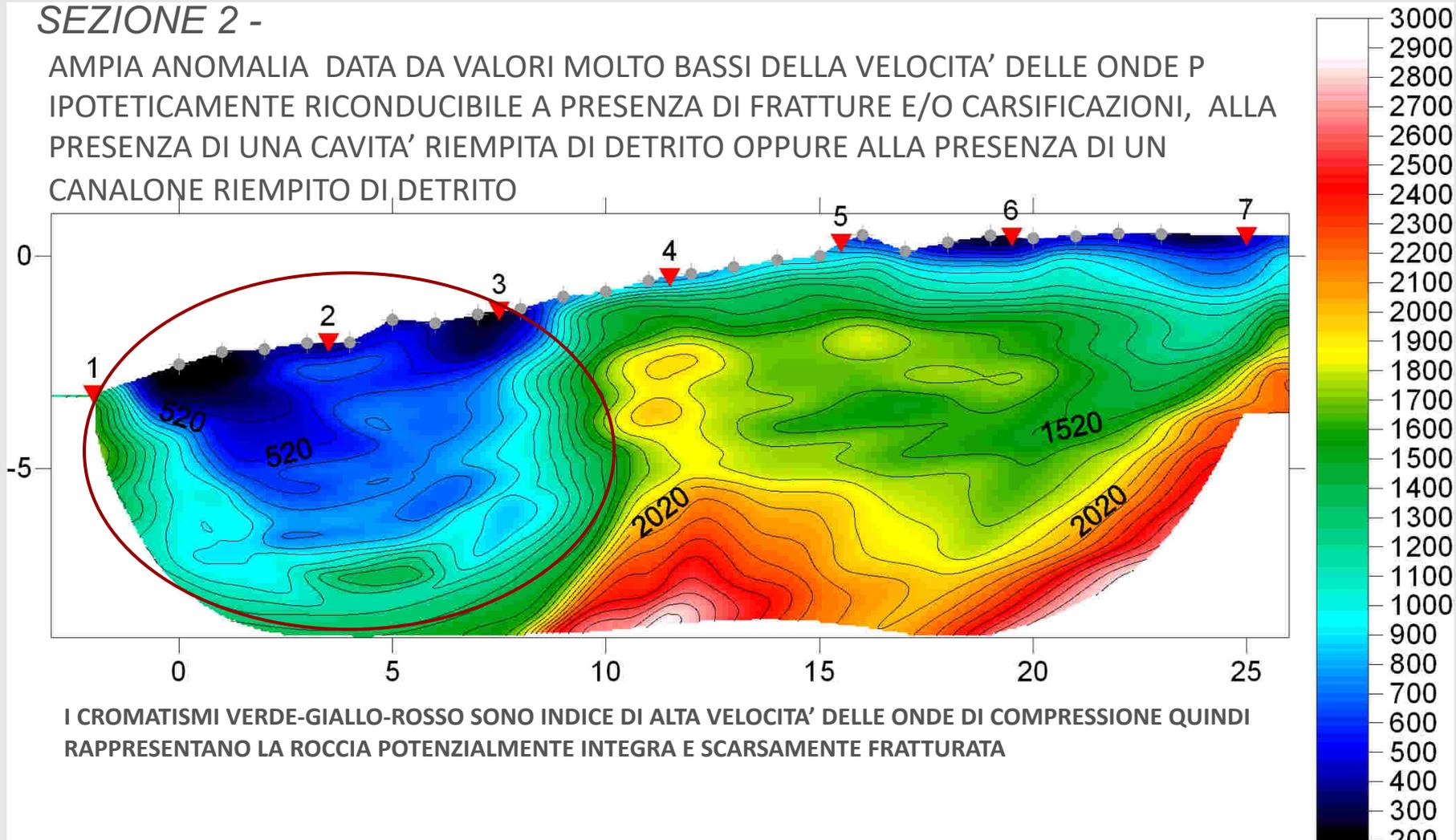
## TOMOGRAFIA SISMICA CON ONDE P

### GEOFONI VERTICALI A 4,5 HZ COLLEGATI AD UN SISMOGRAFO

«AMBROGEO ECHO2002 24 CANALI»

#### SEZIONE 2 -

AMPIA ANOMALIA DATA DA VALORI MOLTO BASSI DELLA VELOCITA' DELLE ONDE P IPOTETICAMENTE RICONDUCEBILE A PRESENZA DI FRATTURE E/O CARSIIFICAZIONI, ALLA PRESENZA DI UNA CAVITA' RIEMPITA DI DETRITO OPPURE ALLA PRESENZA DI UN CANALONE RIEMPITO DI DETRITO

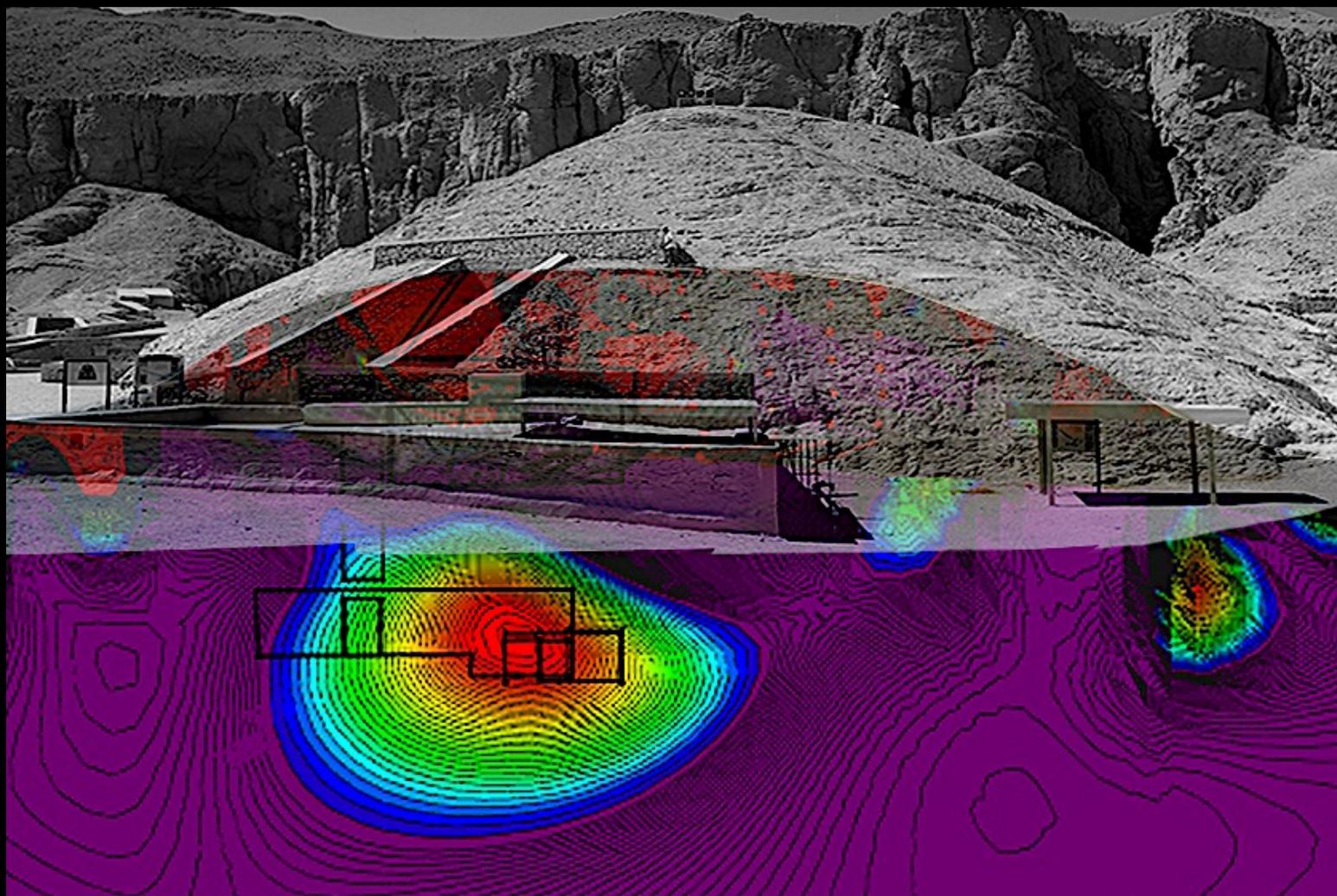


I CROMATISMI VERDE-GIALLO-ROSSO SONO INDICE DI ALTA VELOCITA' DELLE ONDE DI COMPRESSIONE QUINDI RAPPRESENTANO LA ROCCIA POTENZIALMENTE INTEGRATA E SCARSAMENTE FRATTURATA

# Electrical Resistivity Tomography Tomba di Tutankhamun



# Due anomalie Geofisiche molto interessanti

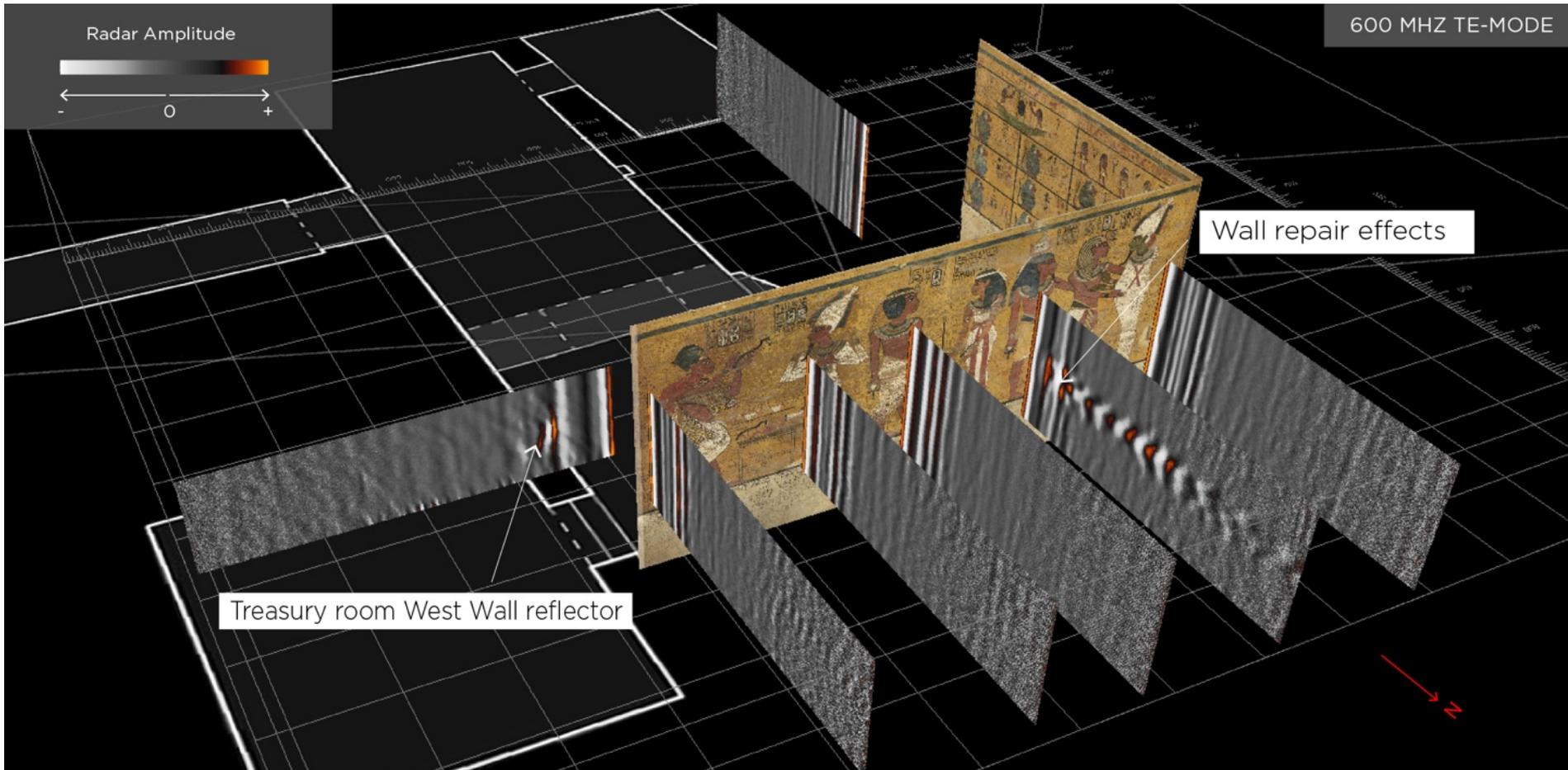


Geo Radar scan

IF Frequenza intermedia: 600 MHz

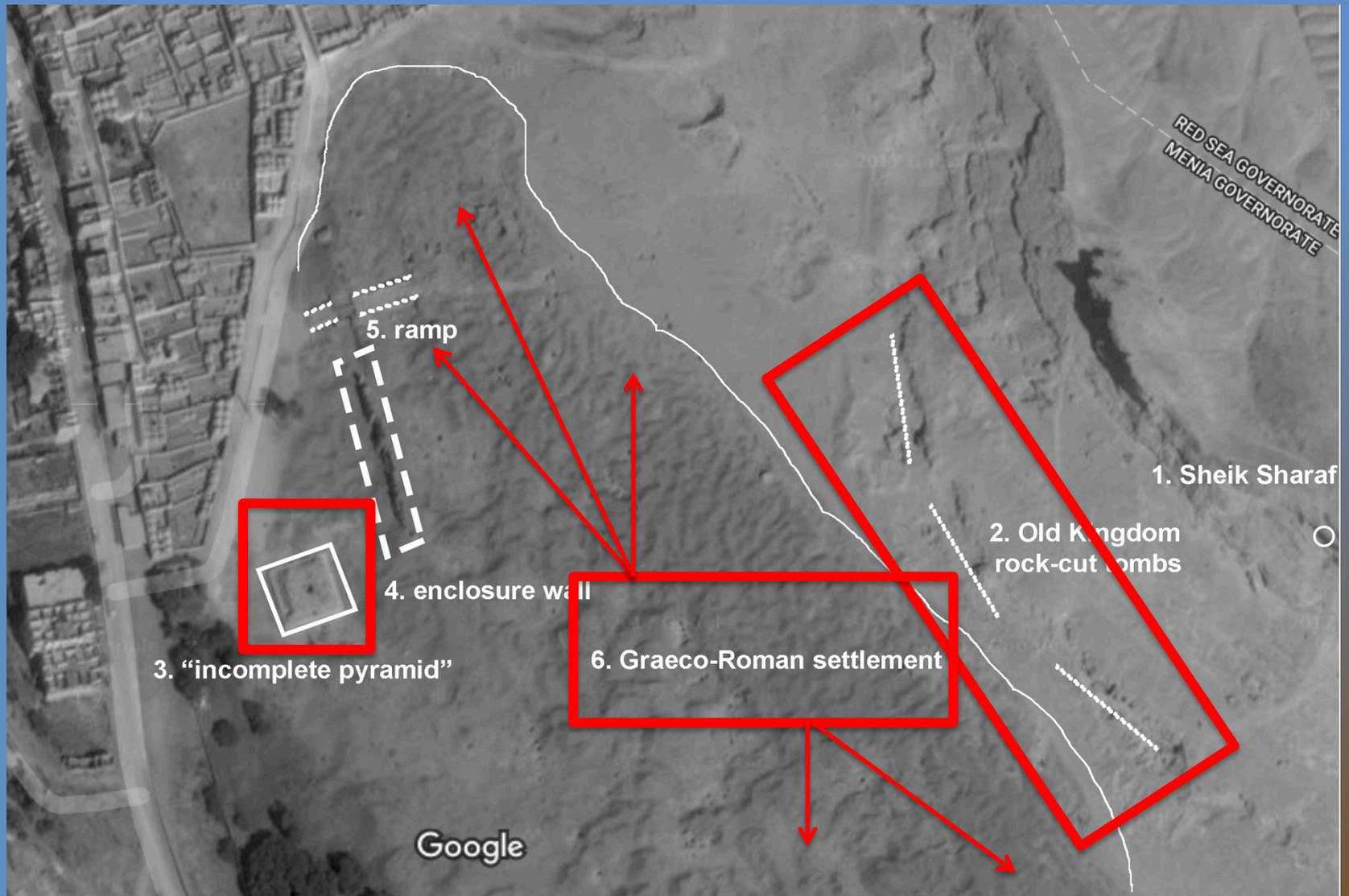


# Risultati – IF



# Missione archeologica a Zawyet Sultan (Medio Egitto) Tombe scavate nella roccia e piramidi incompiute

Gianluca Miniaci



# Stanze cerimoniali/di culto, in superficie (tomba di Khunes)

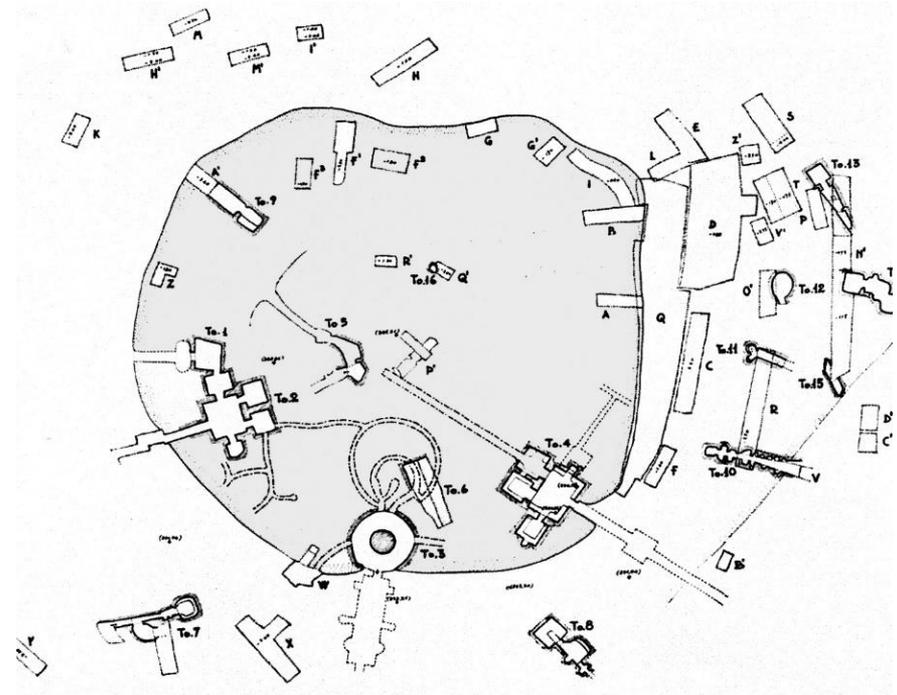


# Possibili casi di studio per l'applicazione della radiografia muonica in siti preistorici ed etruschi

Luca Cappuccini, Domenico Lo Vetro, Fabio Martini



Poggio Gaiella – Chiusi (SI)



Chiusi (SI) – Poggio Montollo



# Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica in ambito multidisciplinare - GSRM2018

from Monday, 29 October 2018 at **09:00** to Tuesday, 30 October 2018 at **18:00** (Europe/Rome)  
at **Auditorium dell'Ente Cassa di Risparmio di Firenze**

Via Folco Portinari 5, Firenze

## Interessi e attività in ambito geologico

*Descrizione delle tecniche di indagine in ambito geologico e studio delle possibili applicazioni della radiografia muonica ad attività in opera nel settore.*

Convener: Dr. Chiara Del Ventisette (Università degli Studi di Firenze)

16:30 **Metodi geofisici per l'analisi delle disomogeneità all'interno di un corpo arginale 20'**

Speaker: Dr. Veronica Pazzi (Università degli Studi di Firenze)

16:50 **Unveil the traces of ancient mining – The Archeological Mines Park of San Silvestro 20'**

Speaker: Dr. Debora Brocchini (Parchi Val di Cornia S.p.A.)

17:10 **Detecting crystal cavities in pegmatite rocks: a possible application of muon radiography in mining industry 20'**

Speaker: Dr. Andrea Dini (CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse)

17:30 **Prospettive di indagini dei sistemi carsici per mezzo di rilevatori muonici: il caso del Monte Corchia (Alpi Apuane, Toscana) 20'**

Speaker: Prof. Leonardo Piccini (Università degli Studi di Firenze)

17:50 **Discussione 20'**

*Discussione sulle tematiche affrontate*

## Miniere medievali



*Plan et coupe*  
**PLAN AND SECTION** *Temperino*  
 OF THE *Des mines de cuivre et fonderies de Cuivre (Toscane)*  
**COPPER MINING AND SMELTING WORKS**

at TEMPERINO IN TUSCANY.

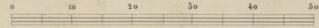
- C. Lime kiln. *Four à chaux d'affinage*
- D. Smelting furnace. *Fourneau*
- E. Cupola. *Four à manche*
- F. Horse whim shed for blowing engine. *Manège & soufflerie*
- G. Blowing engine. *Machine soufflante*
- H. Coal stores. *Magasins à charbon*
- K. Copper regulus furnaces. *Fourneaux à régule*



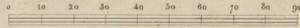
- A. Leopold shaft. *Puits Leopold*
- B. Fortuna shaft. *Puits Fortuna*
- C. Old shaft. *Ancien puits*
- D. Shaft in 15 fathoms level Fortuna. *Puits de la galerie Fortuna*
- E. Deudonné shaft. *Puits Desdorme*
- F. Shaft in Diomira level. *Puits de la galerie Diomira*
- L. Mitchel shaft. *Puits Michel*
- A. Fournel's level. *Galerie Fournel*
- E. Cross level Diomira No 1. *Crois-galerie Diomira N° 1*
- F. Cross level Diomira No 2. *D° N° 2*
- G. Cross level Diomira No 3. *D° N° 3*
- H. Cross level Diomira No 4. *D° N° 4*
- J. Fortuna cross level. *Galerie de traversée Fortuna*
- R. Fortuna road way shaft. *Descente Fortuna*
- G. Ore breaking shop. *Atelier de collage de minerais*
- H. Lodgings for Miners. *Logements de mineurs*
- I. Stables. *Écuries*
- K. Blacksmiths shop. *Atelier de forges*
- Y. Offices. *Bureaux*
- L. Assayers office. *Laboratoire*
- M. Ground floor store house. *Magasins de ses de charbon*
- N. Ore breaking shed. *Hangar pour le collage de minerais*
- P. Horse whim shed. *Manège et soufflerie*
- Q. Powder magazine. *Magasin à poudre*
- R. Shed for breaking large lumps of ore. *Hangar pour les gros cailloux de minerais*

6551

Scale of fathoms.



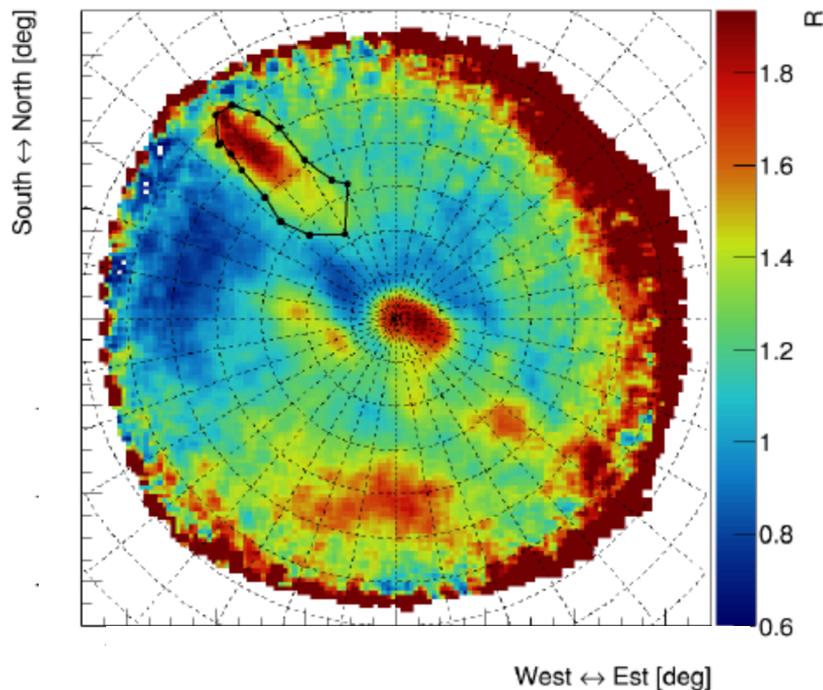
Échelle en Scale of Metres



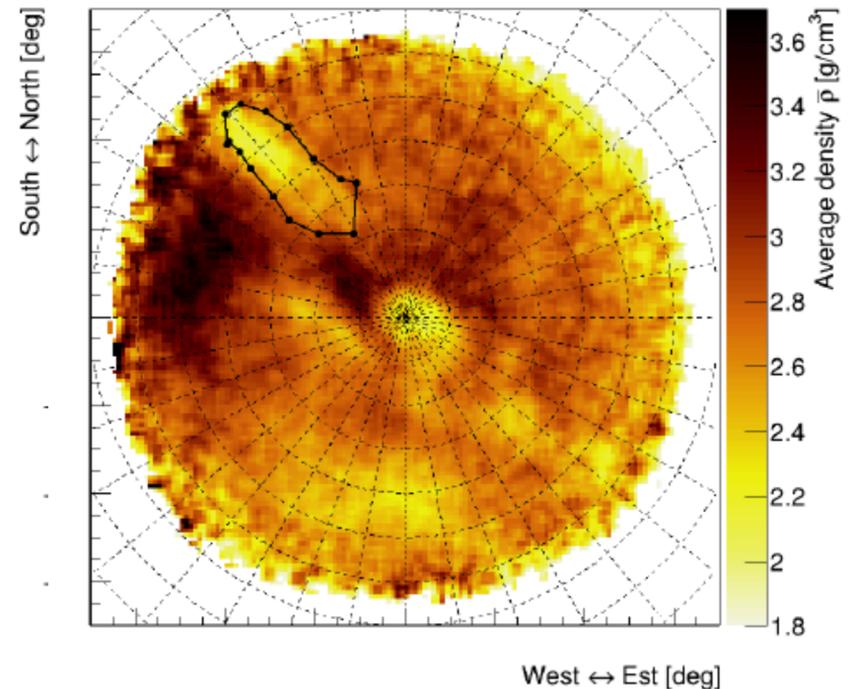
# Miniera del Temperino (Li)

Primi risultati (G. Baccani et al., proceedings di ICNFP 2018, Creta – in fase di pubblicazione su EPJ Web of Conference)

## Confronto con simulazione e mappa di densità



(a) *Relative transmission  $R$ .*



(b) *Average density  $\bar{\rho}$ .*

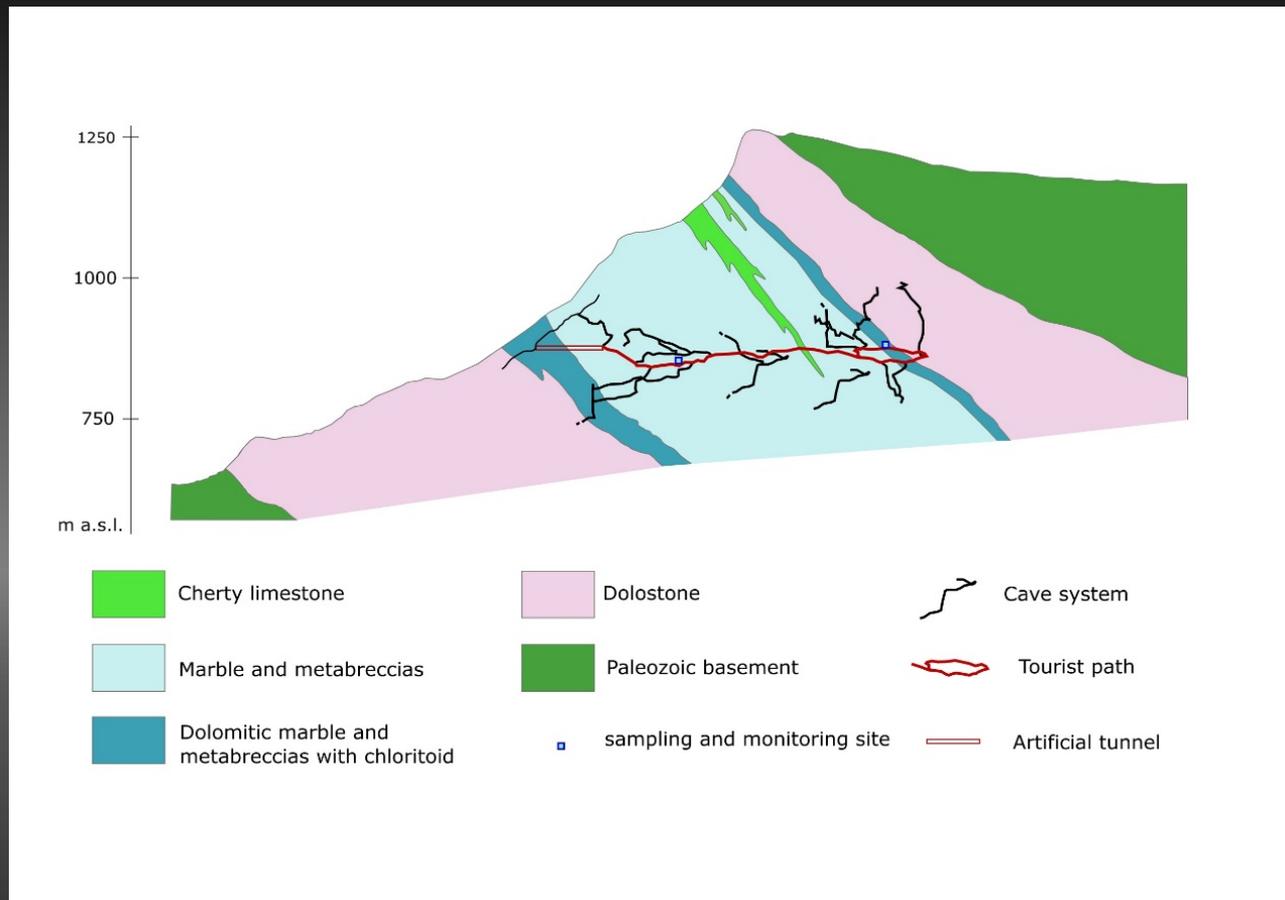
## PERCHE' MISURARE I MUONI AL CORCHIA?

Il percorso turistico offre diverse possibilità di posizionamento del rilevatore con la possibilità di inquadrare settori diversi caratterizzati da:

diverso spessore di roccia (da 100 a 400 m)

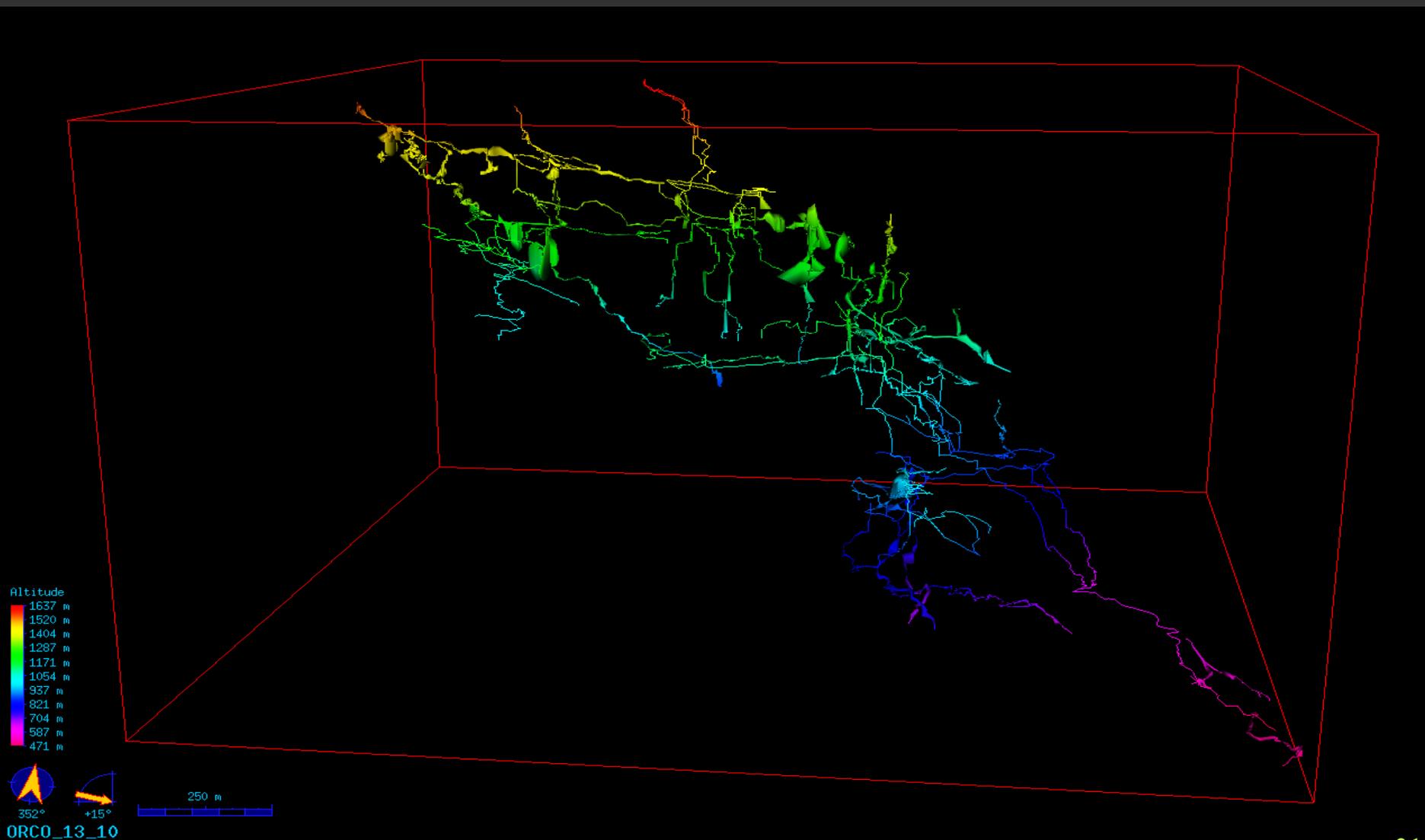
diverse caratteristiche litologiche (marmi, dolomie, basamento filladico)

diverso orientamento rispetto alle discontinuità litologiche e tettoniche.

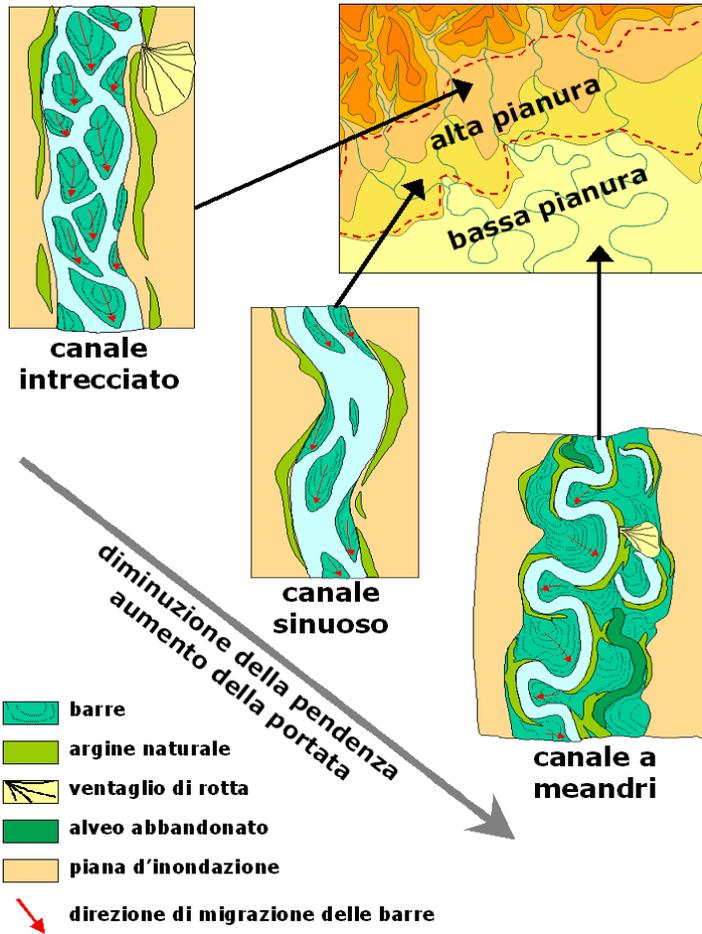


Leonardo Piccini

Il complesso carsico del Monte Corchia può essere considerato ben conosciuto e di esso esiste un modello tridimensionale di elevato dettaglio

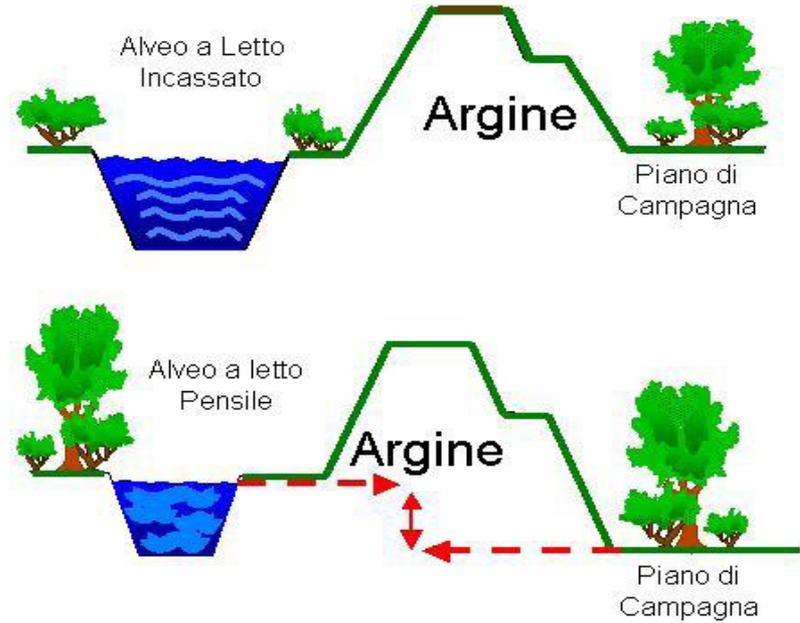


# Metodi geofisici per l'analisi di un corpo arginale - Veronica Pazzi

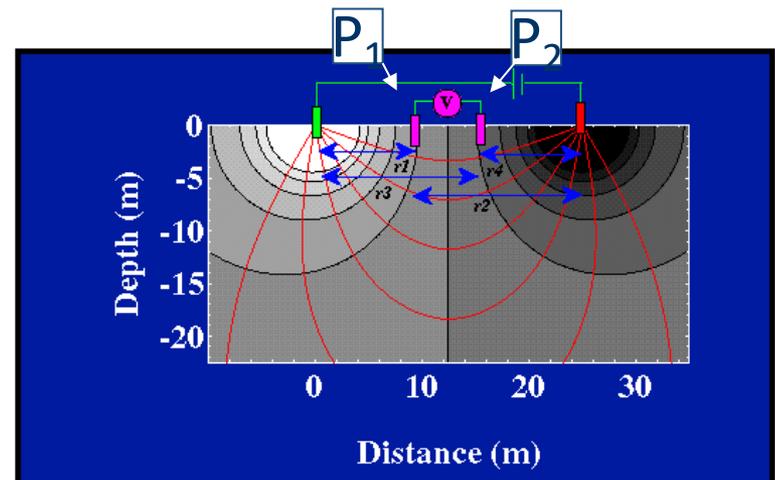


Argini naturali

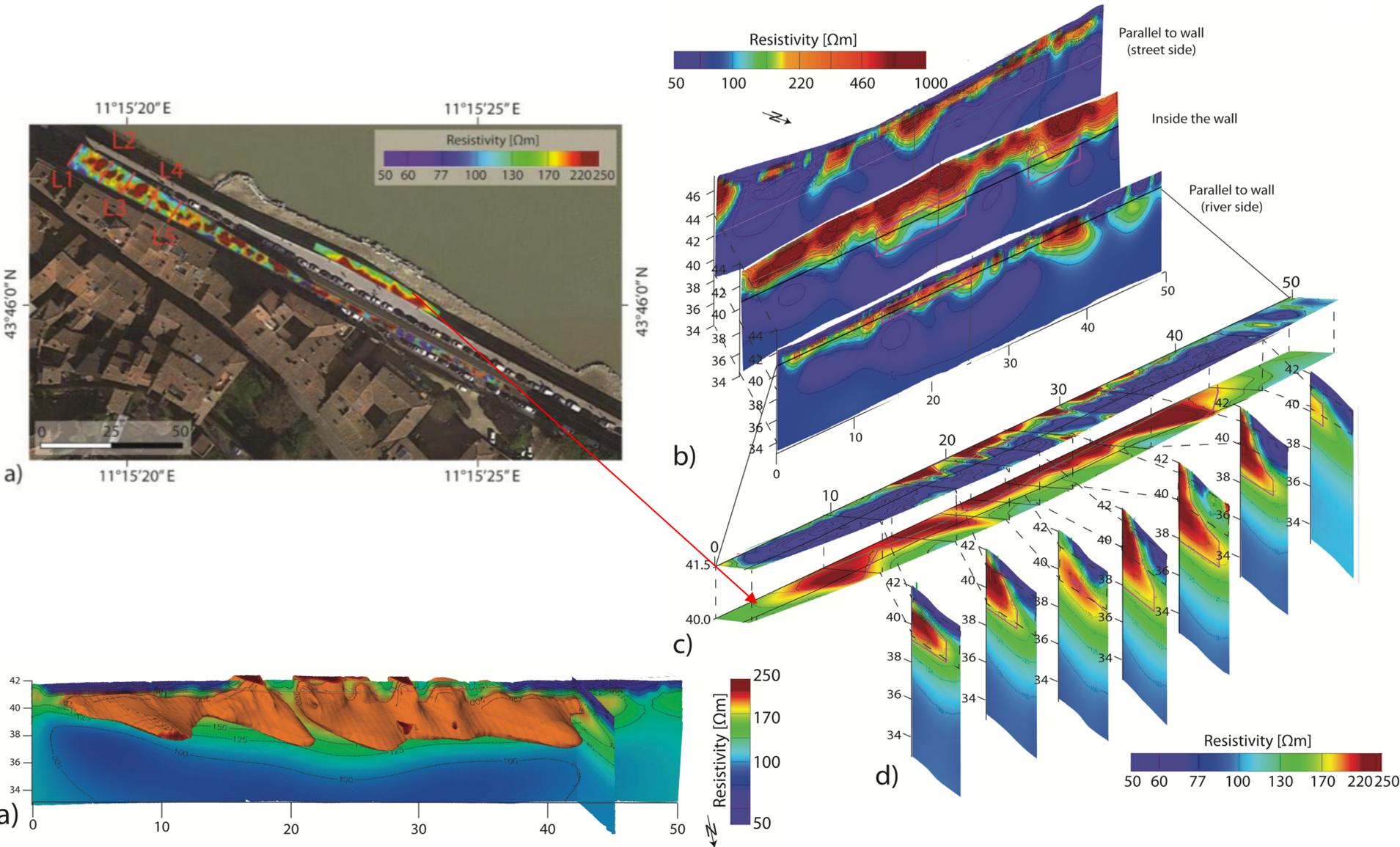
Indagine metodi geoelettrici



Argini artificiali



# Applicazione Lungarno Torrigiani (FI)

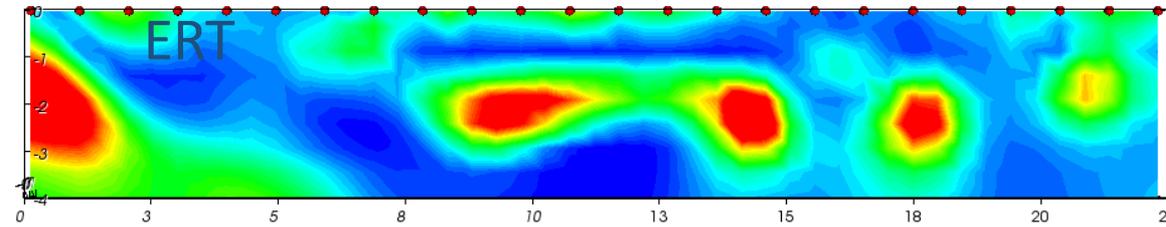


Morelli et al (under review). UNESCO World Heritage Sites coexisting with riverbank landslides: the challenge of conservation from past to future.

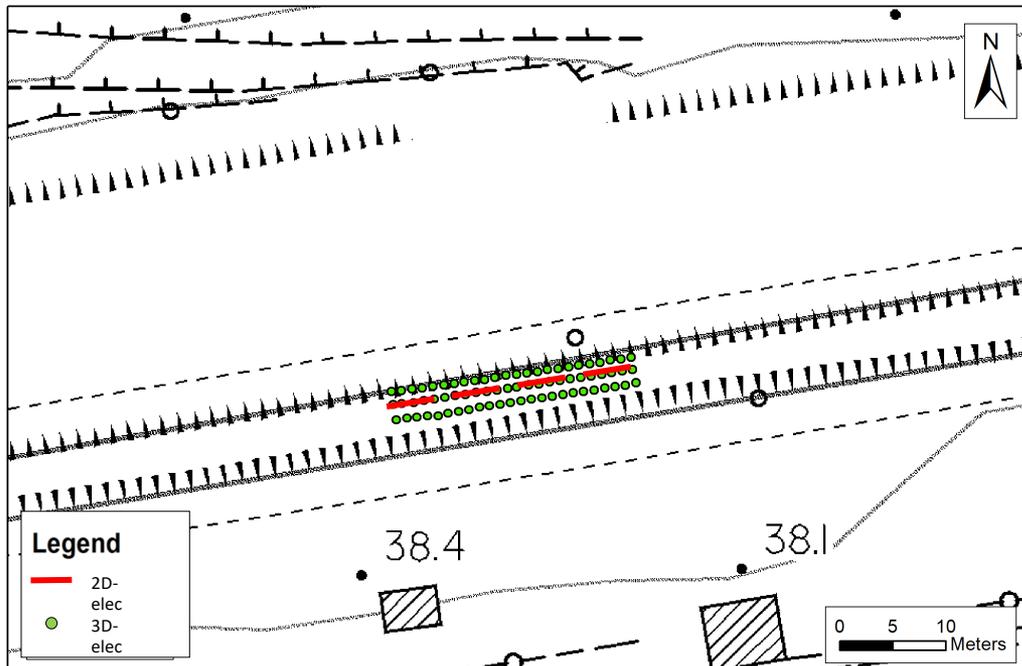
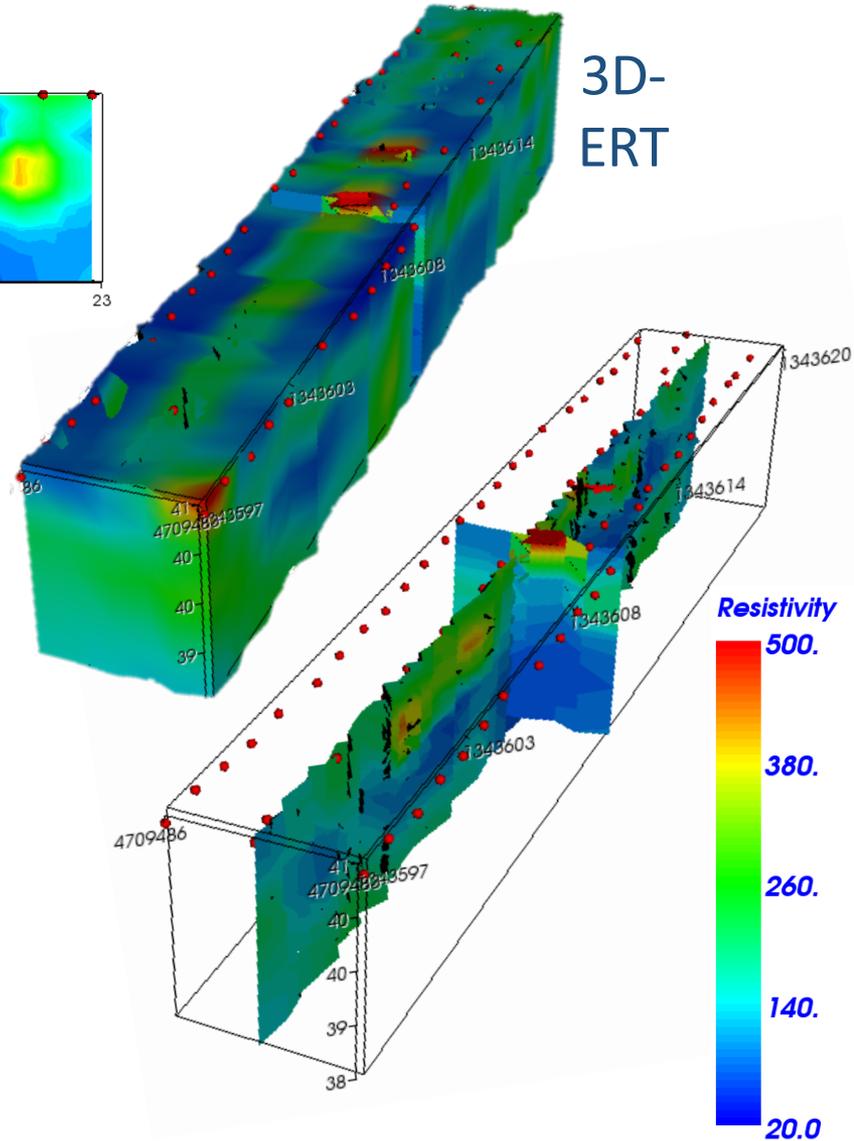
# Applicazione Argine Fiume Arno

(Località Mantignano- FI)

2D-ERT

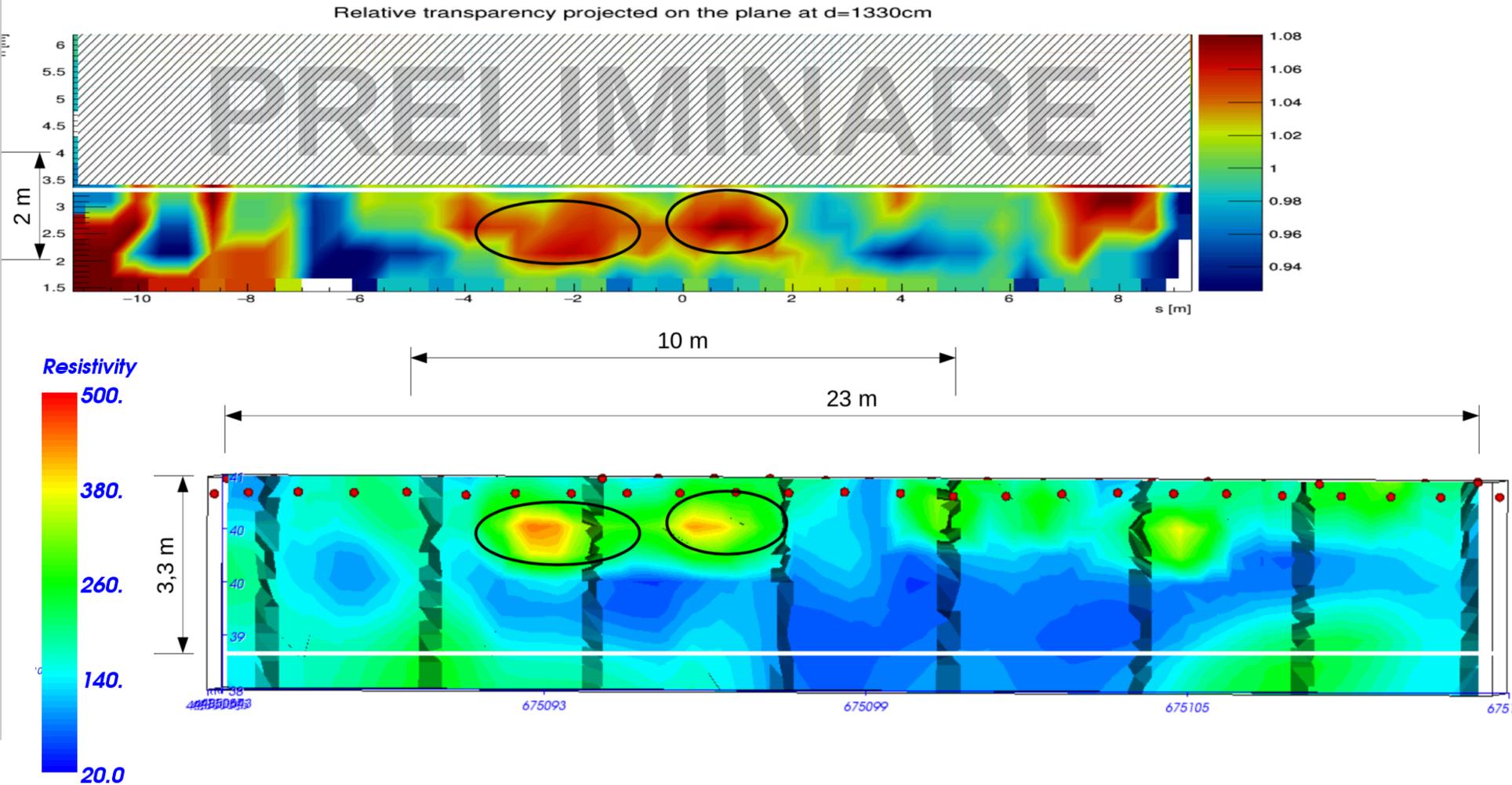


3D-ERT



# Applicazione Argine Fiume Arno

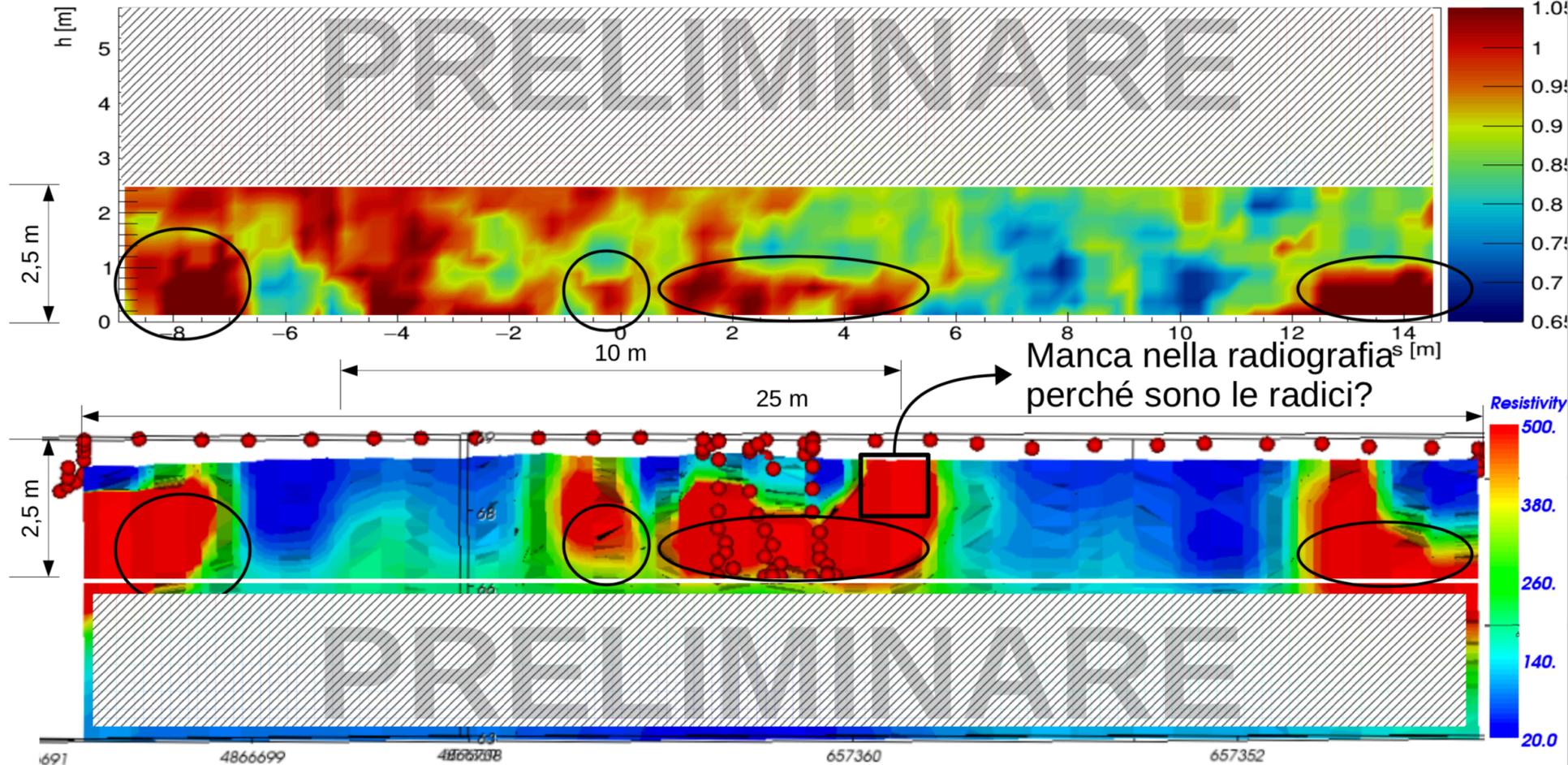
(Località Mantignano- FI)



# Applicazione Torrente Bure

(Località Ponte Nuovo - PT)

Measured transparency projected in a plane at  $d=1410\text{cm}$



# Giornata di Studio sulla Radiografia Muonica in ambito multidisciplinare - GSRM2018

from Monday, 29 October 2018 at **09:00** to Tuesday, 30 October 2018 at **18:00** (Europe/Rome)  
at **Auditorium dell'Ente Cassa di Risparmio di Firenze**

Via Folco Portinari 5, Firenze

## Interessi e attività in ambito ingegneristico

*Descrizione delle tecniche di indagine in ambito ingegneristico e studio delle possibili applicazioni della radiografia muonica ad attività in opera nel settore.*

Convener: Dr. Paolo Checchia (INFN, Sez. di Padova)

09:30 **La struttura della diga di Bilancino a Barberino del Mugello (FI) 20'**

Speaker: Dr. Filippo Landini (Ingegnerie Toscane S.r.l.)

09:50 **Possibilità di applicazione della radiografia muonica nello studio della struttura dei ponti 20'**

Speaker: Dr. Salvatore Giacomo Morano (Università degli Studi di Firenze)

10:10 **Possibilità di applicazione della radiografia muonica nello studio della cupola del Duomo di Firenze 20'**

Speaker: Prof. Raffaello D'Alessandro (Università degli Studi di Firenze e INFN, Sez. di Firenze)

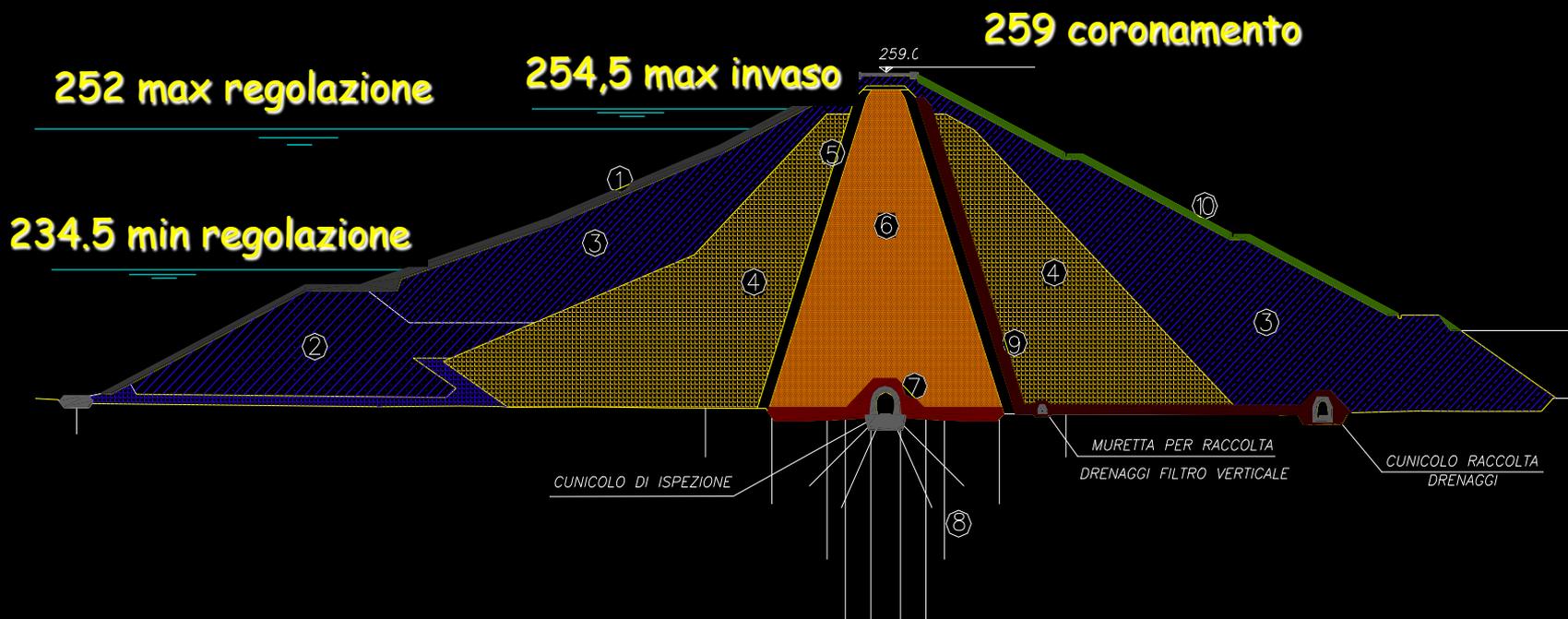
10:30 **Monitoraggio della stabilità degli edifici storici 20'**

Speaker: Prof. Germano Bonomi (Università degli Studi di Brescia e INFN, Sez. di Pavia)

10:50 **Discussione 20'**

*Discussione sulle tematiche affrontate*





- |   |                                   |   |   |
|---|-----------------------------------|---|---|
| ① | SCOGLIERA IN PIETREME CALCAREO    | ⑥ | NUCLEO ARGILLOSO IMPERMEABILE           |
| ② | AVANDIGA IN ROCKFILL DIABASICO    | ⑦ | SUOLA IN ARGILLA PLASTICA               |
| ③ | RINFIANCO IN ROCKFILL CALCAREO    | ⑧ | SCHERMO DI INIEZIONI IMPERMEABILIZZANTI |
| ④ | TRANSIZIONE IN GHIAIA SABBIOSA    | ⑨ | FILTRO DRENATE VERTICALE ED ORIZZONTALE |
| ⑤ | FILTRO DRENANTE SABBIOSO-GHIAIOSO | ⑩ | ALLUVIONE PROTETTIVA ED INERBIMENTO     |

# I ponti esistenti in C.A.P.

Salvatore Giacomo Morano

Il sistema infrastrutturale italiano, sviluppatosi per la gran parte a partire dal dopoguerra, è caratterizzato da un massiccio impiego del **Calcestruzzo Armato Precompresso** per la realizzazione delle travi da ponte.

Moltissimi ponti realizzati tra gli anni '50-'60 sono in C.A.P..

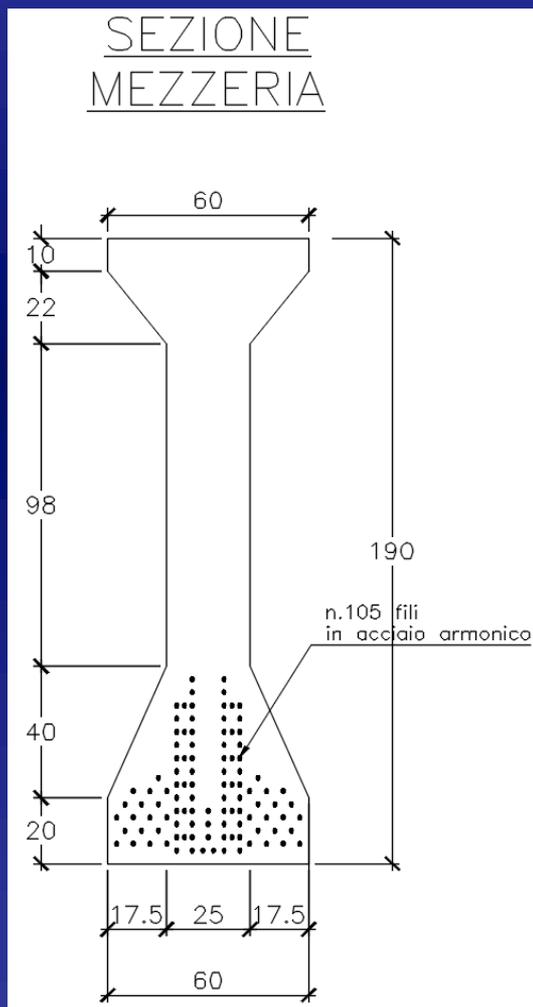
Tutti questi ponti, hanno oltre 60 anni di età e presentano problemi di «età».

Il problema di una corretta diagnosi dello stato della precompressione è un problema sensibile e ad oggi ancora non completamente risolto dai sistemi e dalle tecnologie a disposizione.

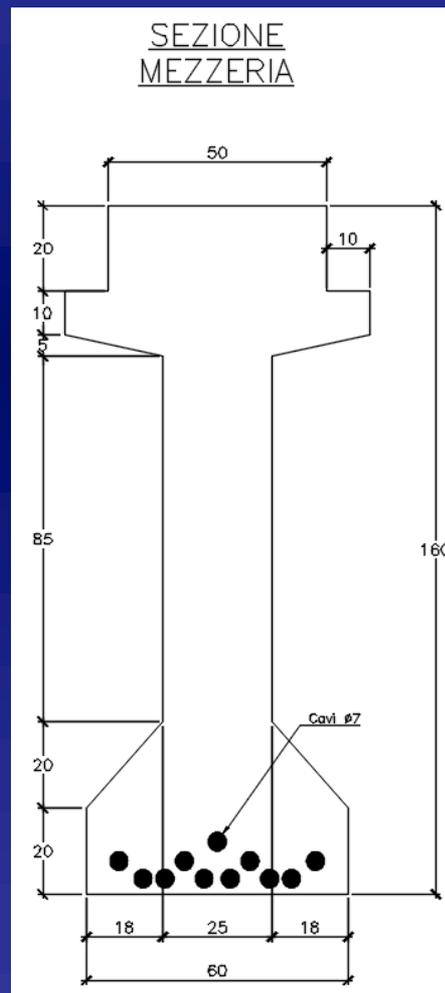


# I ponti esistenti in C.A.P.

Sezioni tipiche delle travi a « I » con altezza tra 1-2 m

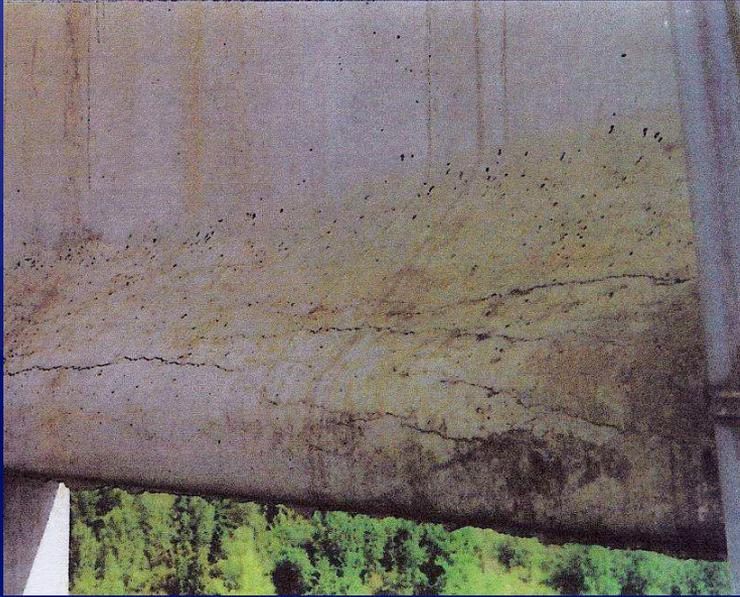


Precompressione a fili ADERENTI



Precompressione a fili SCORREVOLI

# Ammaloramenti



Precompressione  
a fili SCORREVOLI

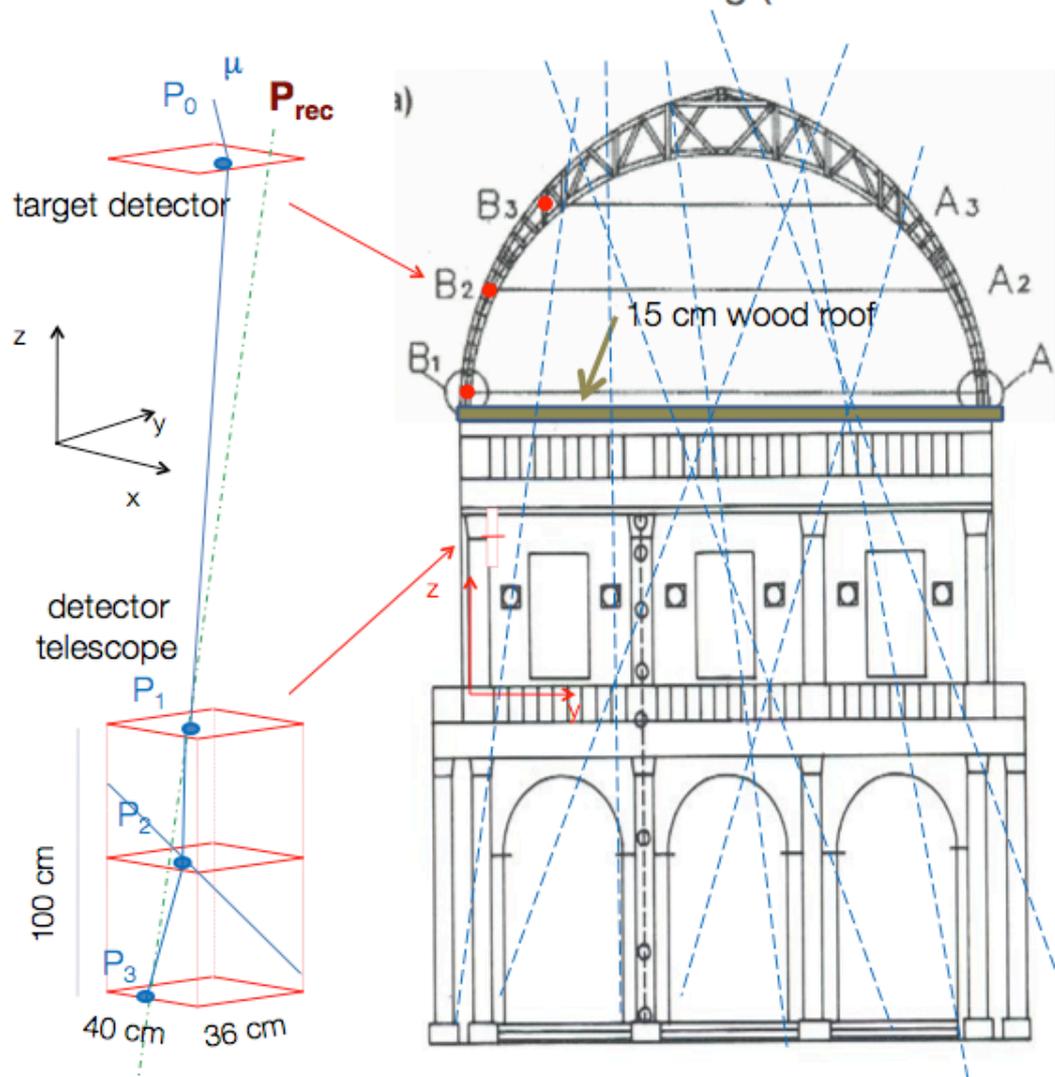


# Possibili applicazioni della radiografia muonica

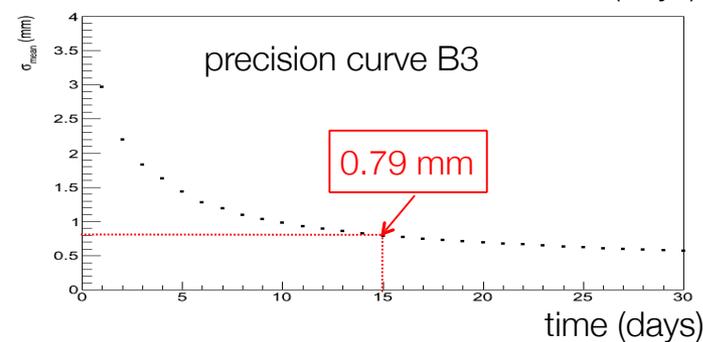
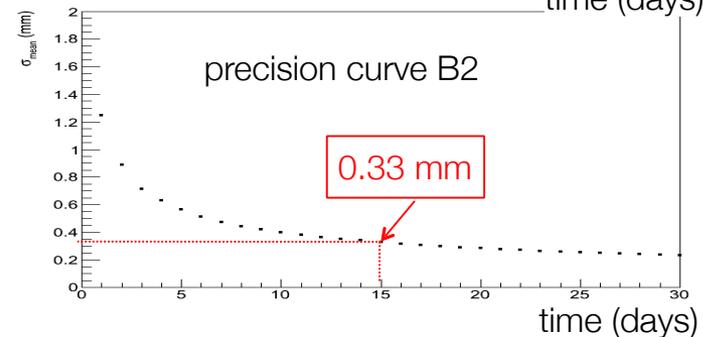
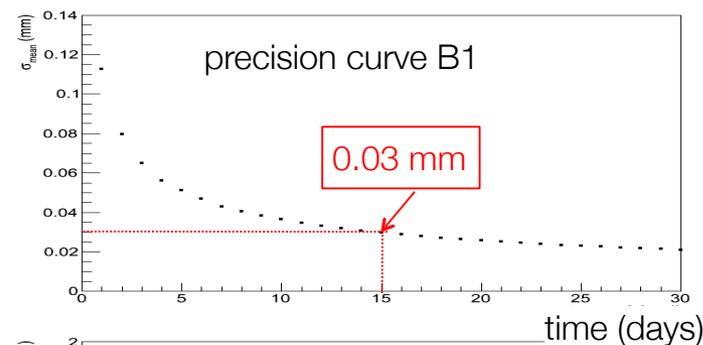
- Individuazione di cavità nelle guaine dovute a difetti di iniezione
- Individuazione del numero, della posizione e dell'integrità dei cavi di precompressione

# Simulation of a specific case: basic idea

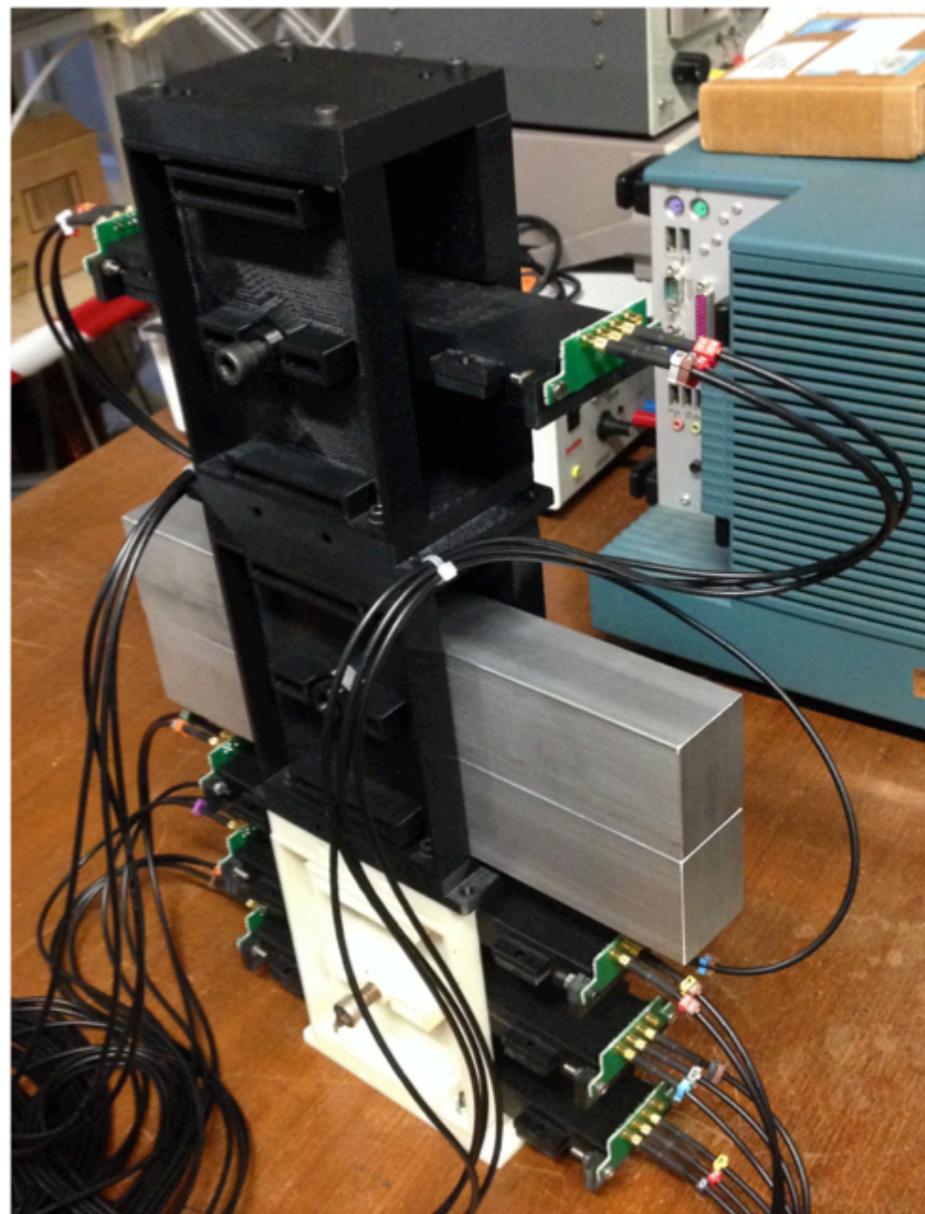
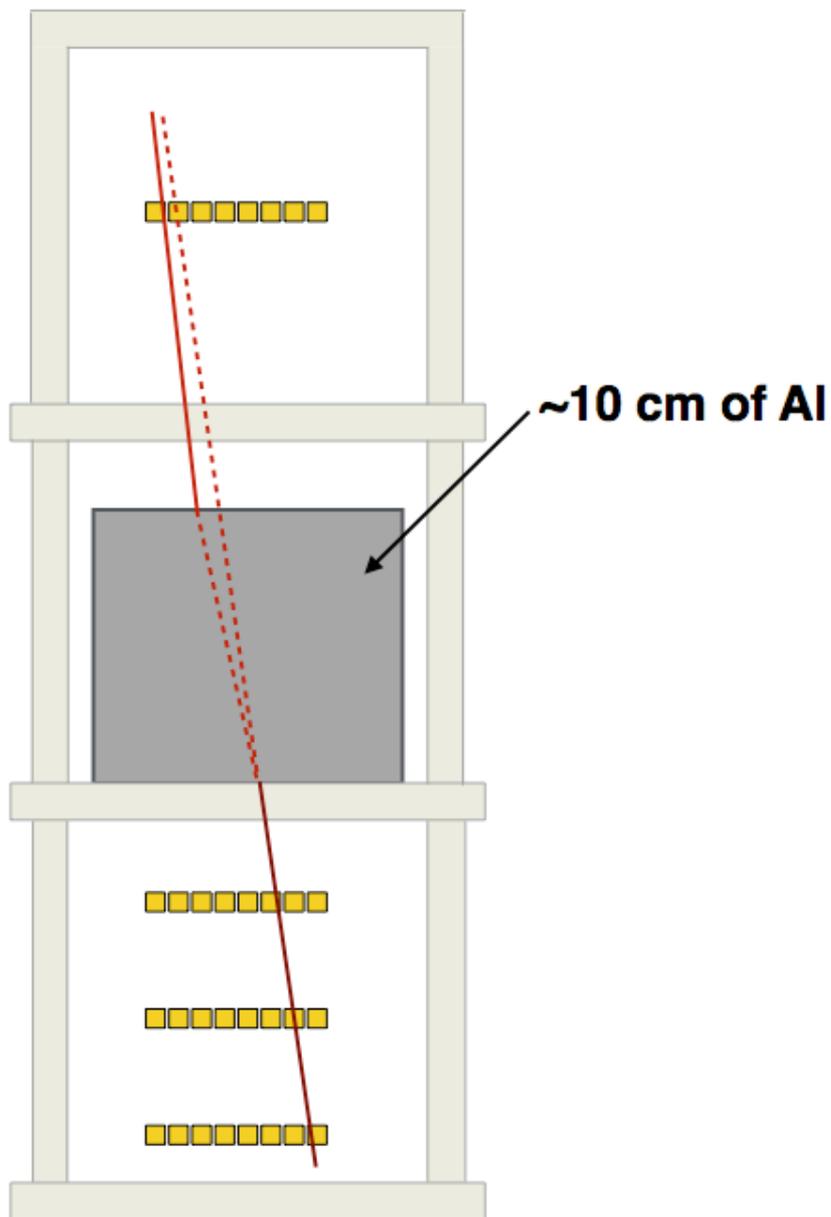
**Simulation:** it contains: a muon generator, the geometry and the materials of the detectors and also the relevant structure of the building (such as the 15 cm wood roof)



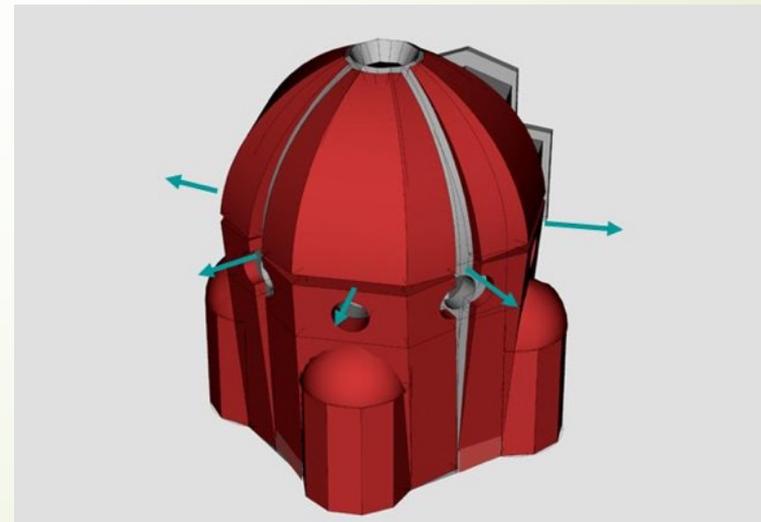
210000 muoni/s



# A possible detector design: experimental setup

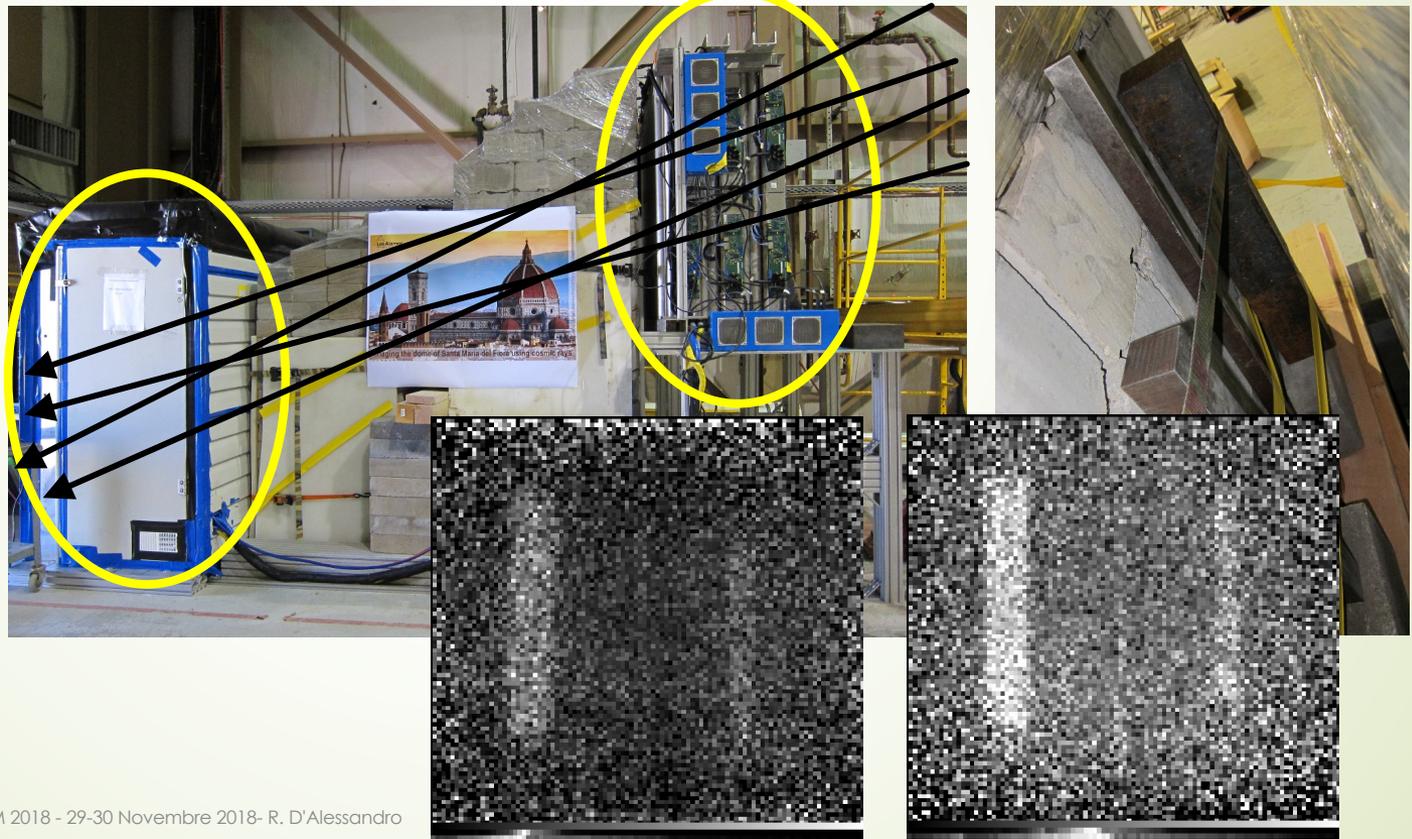


- **Preoccupazione: stabilità della Cupola**
- Prima di tutto una scansione della catena lignea con un 3D laser-scanner in maniera da valutare lo stato di degrado
- Verifica dell'efficacia della catena nel bilanciare e contrastare la spinta radiale della Cupola
- Alcuni studiosi ritengono che ci possano essere anche **catene in ferro**
- Usare la **radiografia muonica**
- Circa 2 metri di spessore
- Il ferro, se presente, "sottili" sbarre: 5-10 cm, forse anche 2 cm
- Usare muografia sia per scattering multiplo che per assorbimento



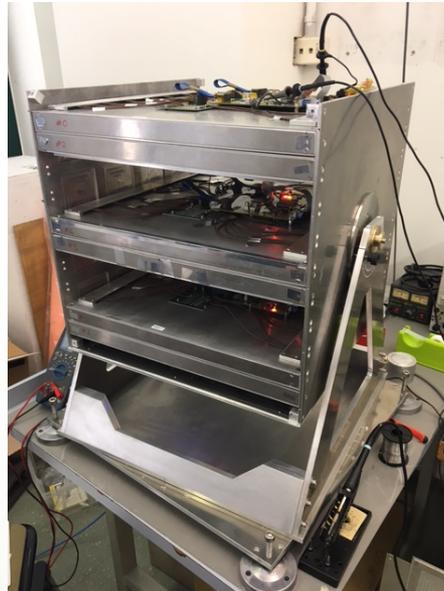
## Muografia scattering multiplo

- ▶ Los Alamos National Laboratories (LANL)
- ▶ Misura della deflessione del muone (dipende dallo Z del materiale)



# Muografia per assorbimento

- Rivelatore MIMA (INFN e Università di Firenze)
  - Faremo versione "allungata"
  - Finanziamento ECRF
- Scintillatori plastici
- Compatto
  - 50 cm x 50 cm x 50 cm
  - 10 mrad angular res.
  - Altazimutal mounting
- Basta un solo rivelatore



# Conclusioni

Measured transparency projected in a plane at  $d=1410\text{cm}$

- Radiografia muonica complementare alle altre tecnologie di indagine
- Molte situazioni in cui potrebbe essere applicata
- Altre tecnologie più avanzate nella parte di analisi e rendering 3D ma stiamo colmando il gap
- Importante trovare un «linguaggio» comune per scambiare informazioni in modo efficace

