



*Università degli Studi della Basilicata*



*Dipartimento delle Culture Europee e  
del Mediterraneo*

# ANALISI DI PERICOLOSITÀ E MONITORAGGI FINALIZZATI ALLA SALVAGUARDIA E FRUIZIONE DEL PATRIMONIO DELLE CIVILTÀ IPOGEE

*Prof. Giuseppe Spilotro*

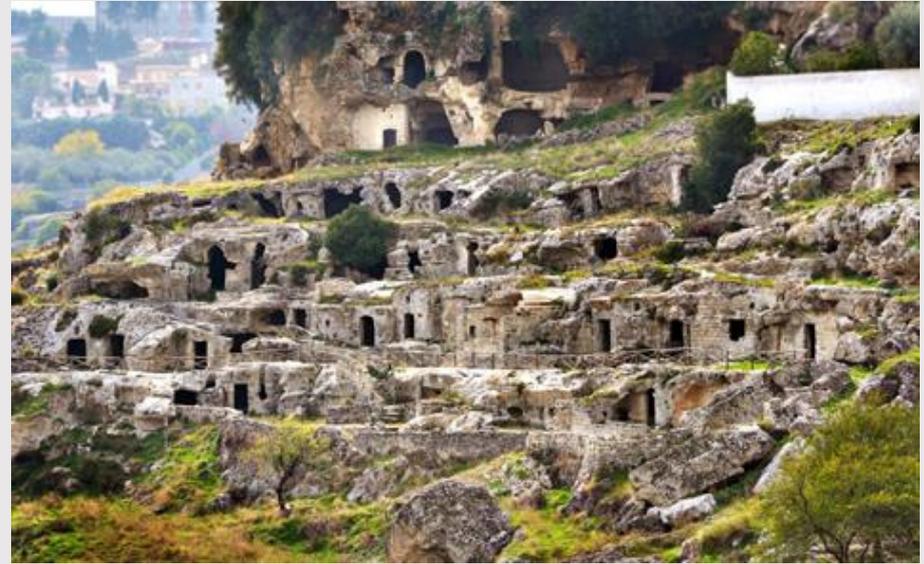
*Dr. Roberta Pellicani*

*Dr. Ilenia Argentiero*

# STATO DELL'ARTE – PATRIMONIO DELLE CIVILTÀ IPOGEE



*Sassi di Matera*



*Ginosa*

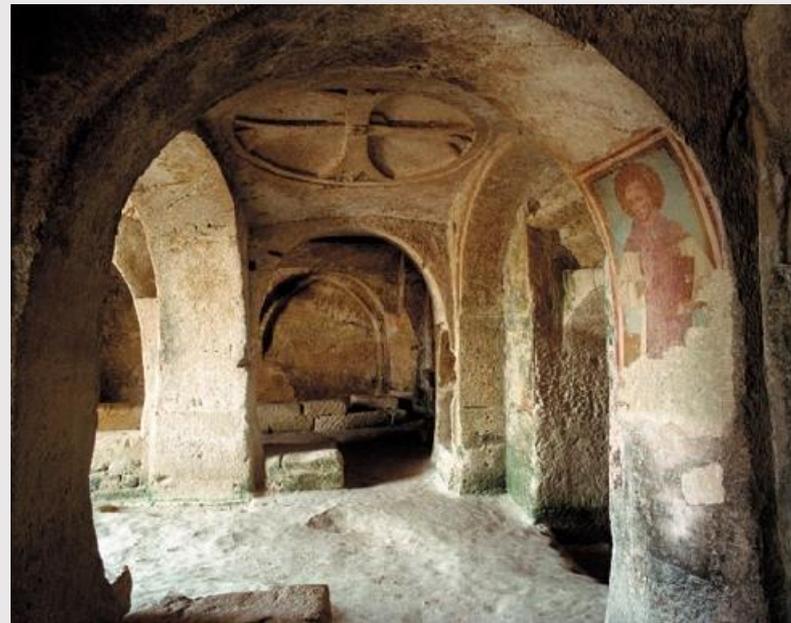


*Gravina in Puglia*

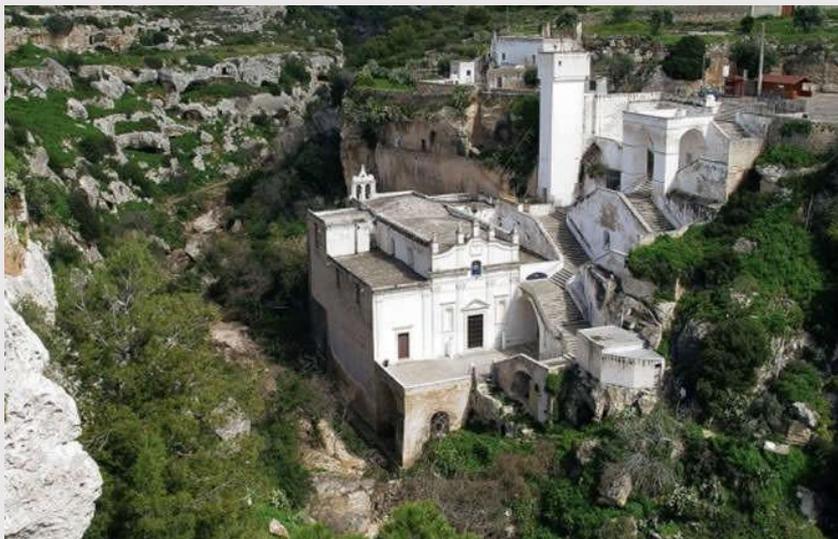
# STATO DELL'ARTE – CHIESE RUPESTRI



*Santa Maria dell'Idris, Matera*



*Convicinio di Sant'Antonio, Matera*

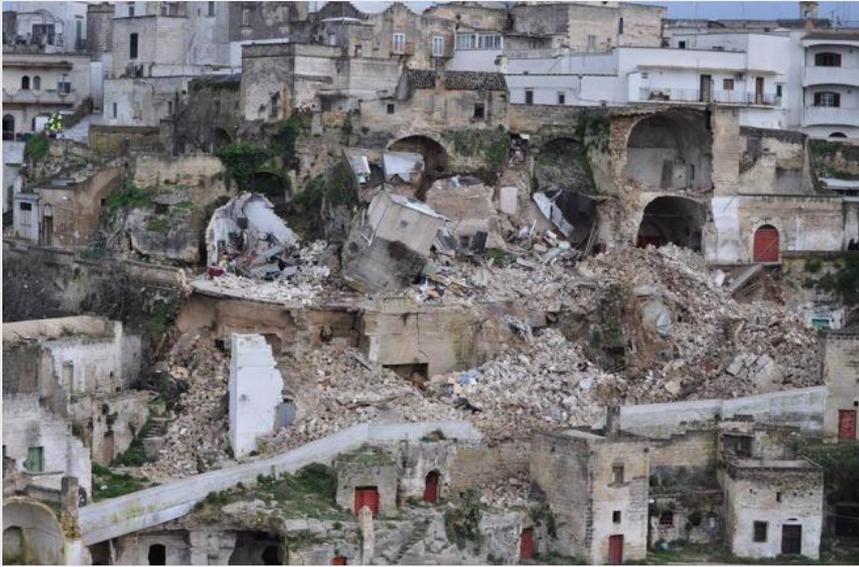


*Santuario Madonna della Scala, Massafra*



*Madonna della Buona Nuova, Massafra*

# STATO DELL'ARTE – PERDITA DEL PATRIMONIO CULTURALE E ARTISTICO



*Crollo Ginosa, 2014*

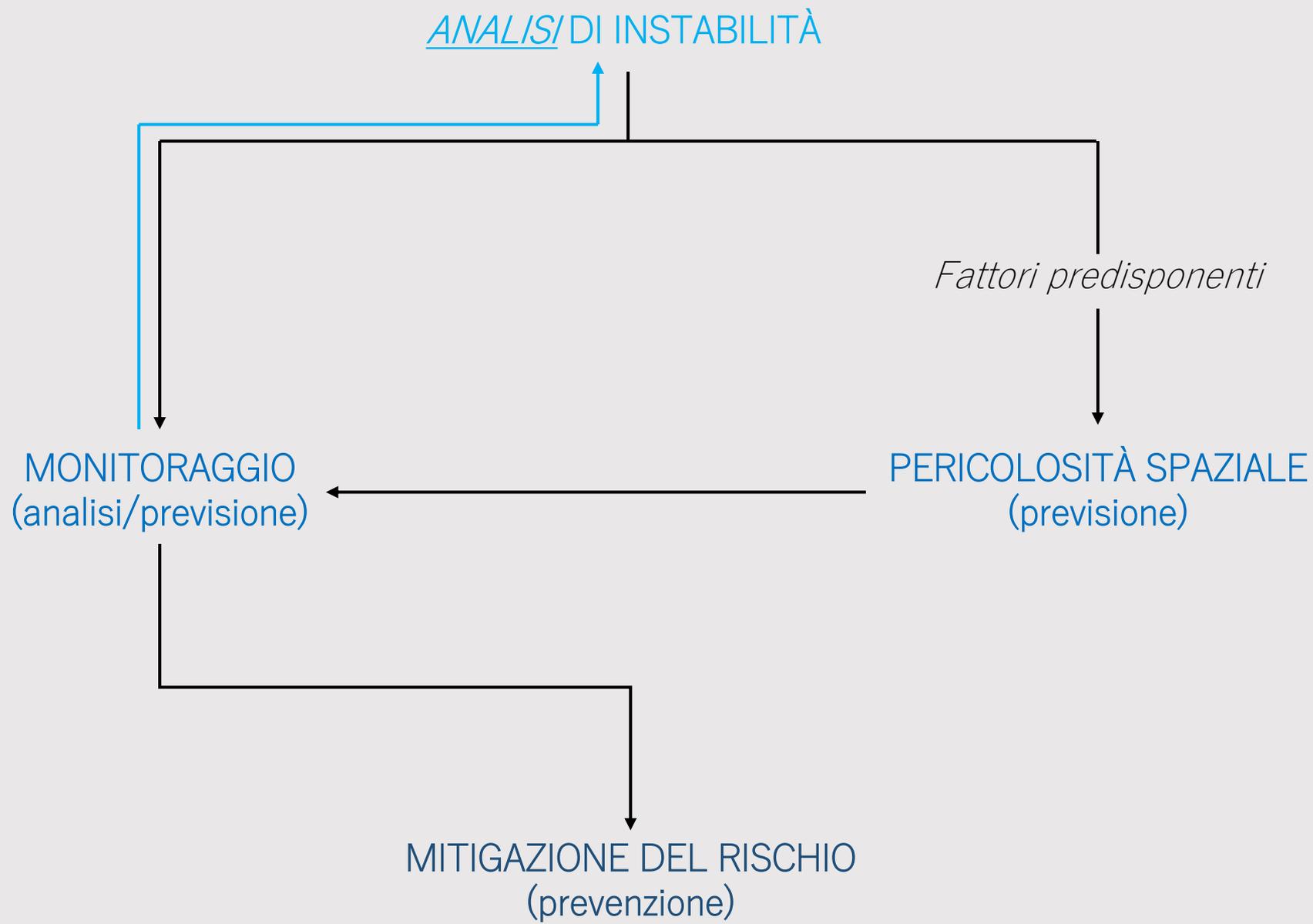


*Crollo Madonna della Buona Nuova,  
Massafra, 2017*



*Tipici crolli di  
chiese e  
insediamenti  
rupestri  
(Matera)*

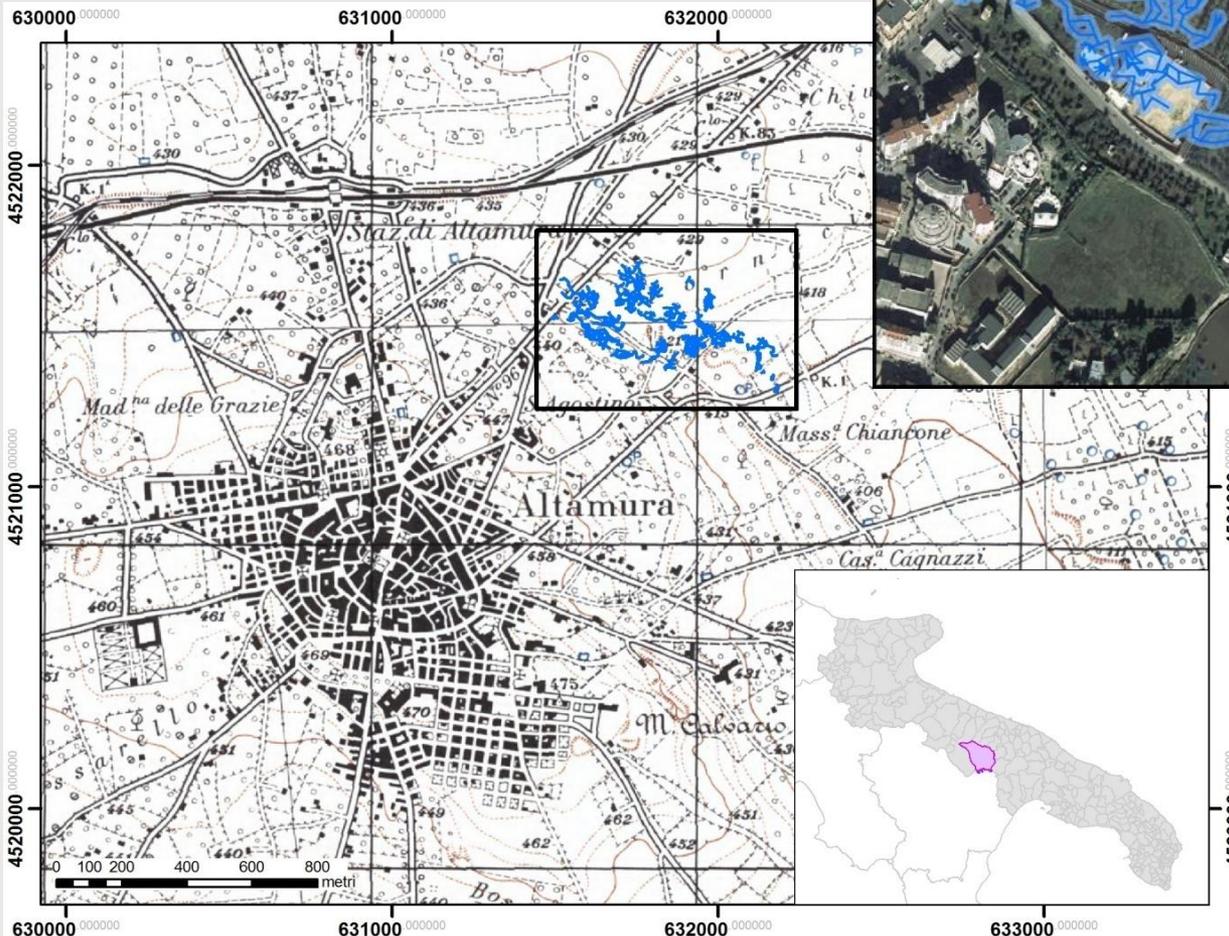
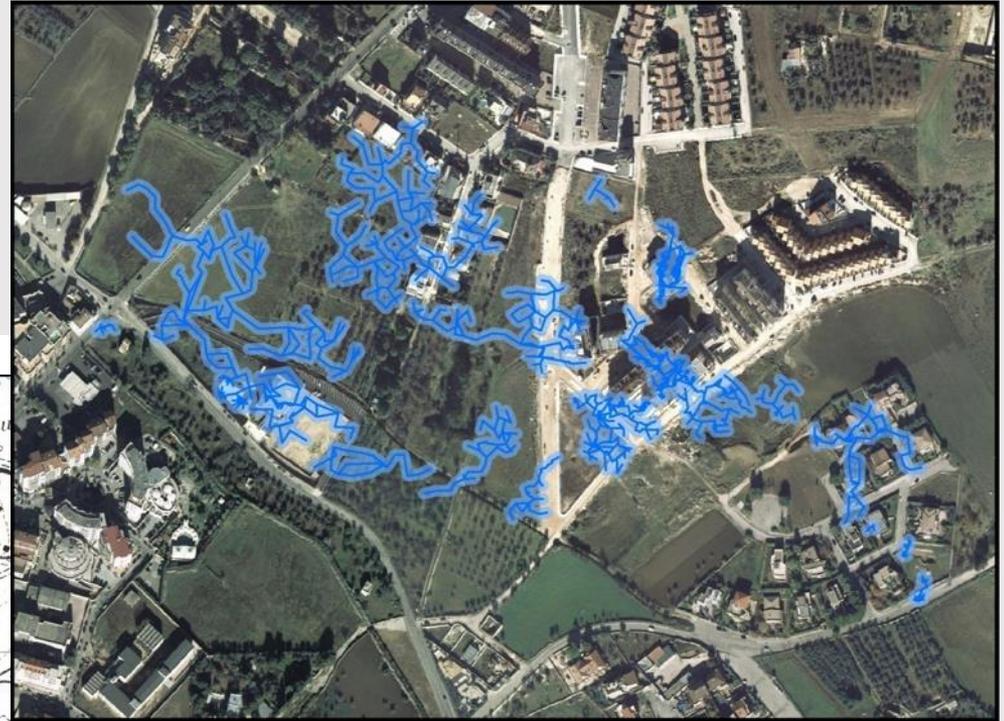
# ANALISI, PREVISIONE E PREVENZIONE DEL RISCHIO



# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE - SUSCETTIBILITÀ

## Caso di studio – Altamura

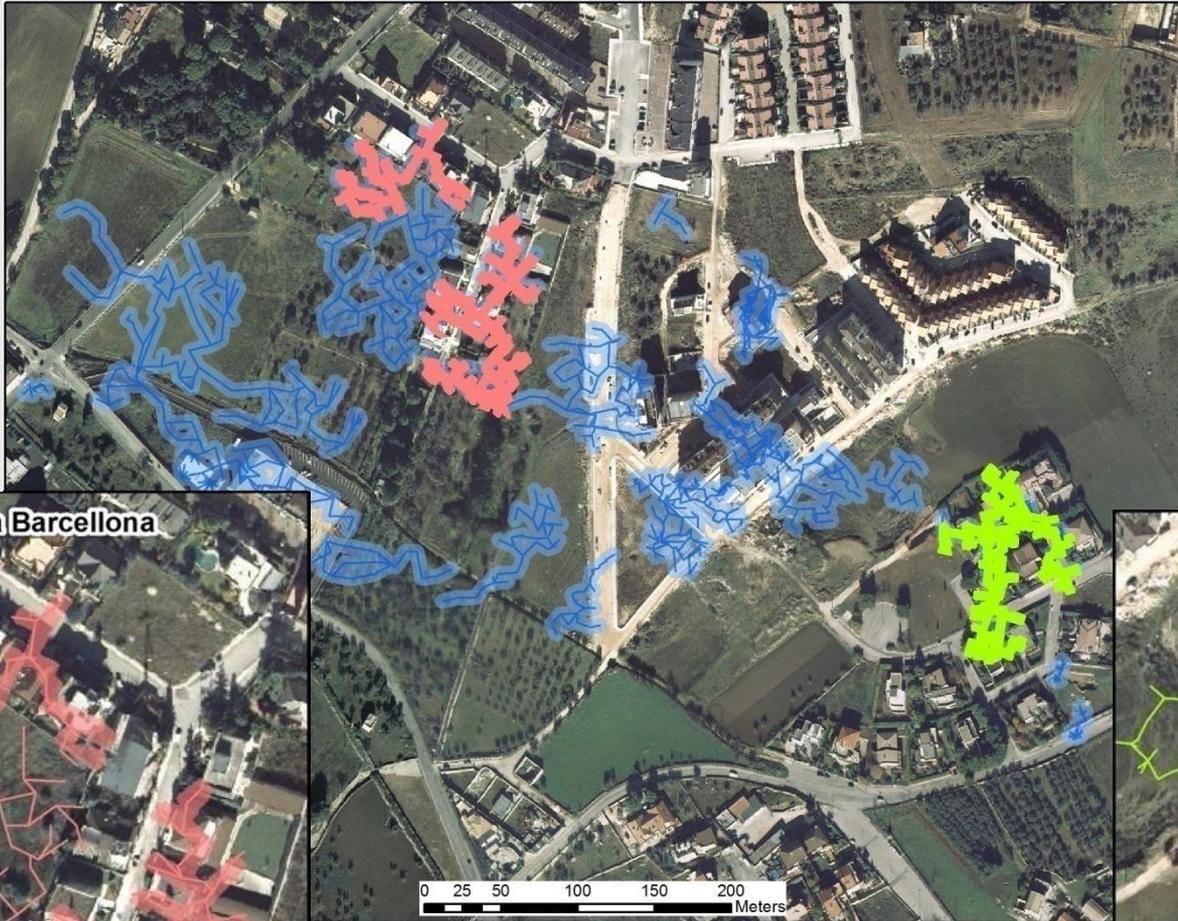
Cave di tufo in sotterraneo scavate secondo direzioni molto irregolari ad una profondità variabile da 5 a 25 metri dal piano campagna.



Le altezze e larghezze medie sono di circa 4-5 metri con punti che raggiungono sia in altezza che in larghezza i 10 metri.

Pellicani R., Spilotro G., Gutiérrez F. (2017) Susceptibility mapping of instability related to shallow mining cavities in a built-up environment. *Engineering Geology*, 217: 81-88. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.12.011.

# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE - SUSCETTIBILITÀ



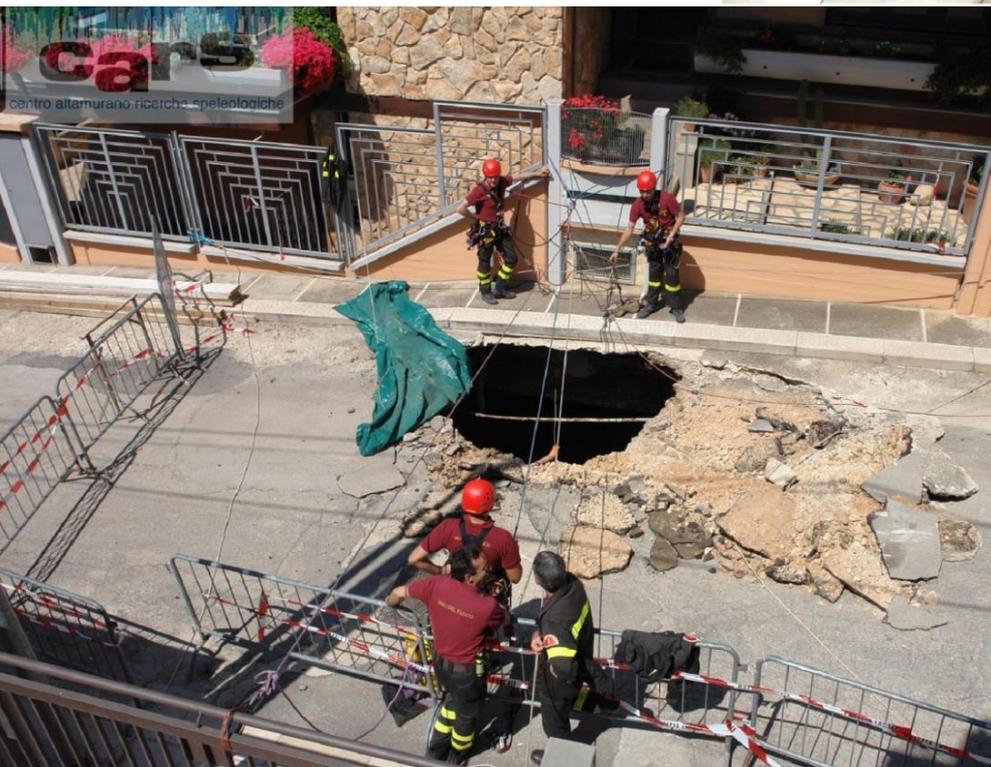
# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE – SUSCETTIBILITÀ

## TIPOLOGIE DI DISSESTO DELLA RETE CAVEALE

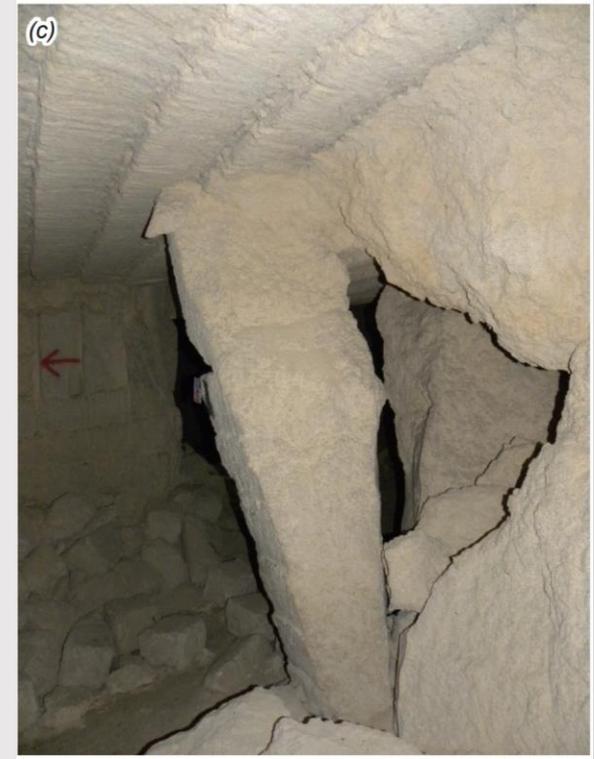


(a) Crolli con conseguente accumulo di materiale

(b) Distacco totale di lastre sub-parallele o inclinate verso l'alto dalle pareti



Sinkhole in Via Barcellona (2007)



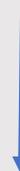
(c) Distacco di blocchi colonnari dalle pareti

# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE - SUSCETTIBILITÀ

*Probabilità che in una determinata area si possa verificare un fenomeno di dissesto nelle cavità, potenzialmente causa di sprofondamenti*



*Assetto stratigrafico  
Naturale degrado del materiale  
Attività antropiche di superficie  
Condizioni ambientali (allagamenti e saturazione igroscopica)*



*Mappatura della suscettibilità*

*Individuare le zone con maggiore potenzialità di dissesto, che richiedono un continuo monitoraggio o interventi di bonifica*

# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE – SUSCETTIBILITÀ

## MODELLI STATISTICI MULTIVARIATI

*Analisi  
Discriminante*

$$L = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots + B_mX_m$$

*L:* variabile dipendente  
(percentuale di dissesto);  
*X<sub>n</sub>:* variabili indipendenti (fattori  
predisponenti l'instabilità);  
*B<sub>n</sub>:* coefficienti di correlazione.

*Regressione  
Logistica*

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots + B_mX_m$$

*p:* variabile dipendente (probabilità  
spaziale di dissesto);  
*X<sub>n</sub>:* variabili indipendenti (fattori  
predisponenti l'instabilità);  
*B<sub>n</sub>:* coefficienti di correlazione.

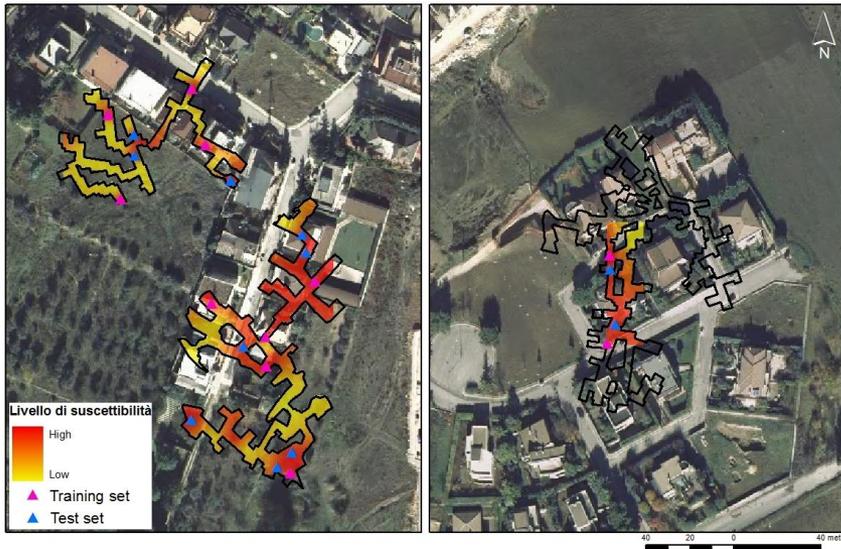
Coefficienti di correlazione relativi ai fattori di instabilità

Fattore	Variabile	Analisi Discriminante	Regressione Logistica
Geometrico	Altezza max	<b>-0.532</b>	<b>-0.735</b>
	Altezza min	-	0.824
	Larghezza max	-0.233	<b>-0.357</b>
	Larghezza min	-	-
	Estensione max	<b>-0.241</b>	-0.145
	Estensione min	0.004	0.313
Stratigrafico	Spessore calcarenite	0.127	-0.010
	Spessore argilla	-0.204	-0.098
	Spessore terreno misto	-0.111	1.000
	Spessore totale	0.101	-
Di carico	Fattore strutturale	<b>-0.460</b>	<b>-0.756</b>
	Fattore di carico	-0.130	-0.169
	Presenza edifici	<b>-0.642</b>	<b>-0.802</b>

# ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SPAZIALE – SUSCETTIBILITÀ

## MAPPATURA DELLA SUSCETTIBILITÀ

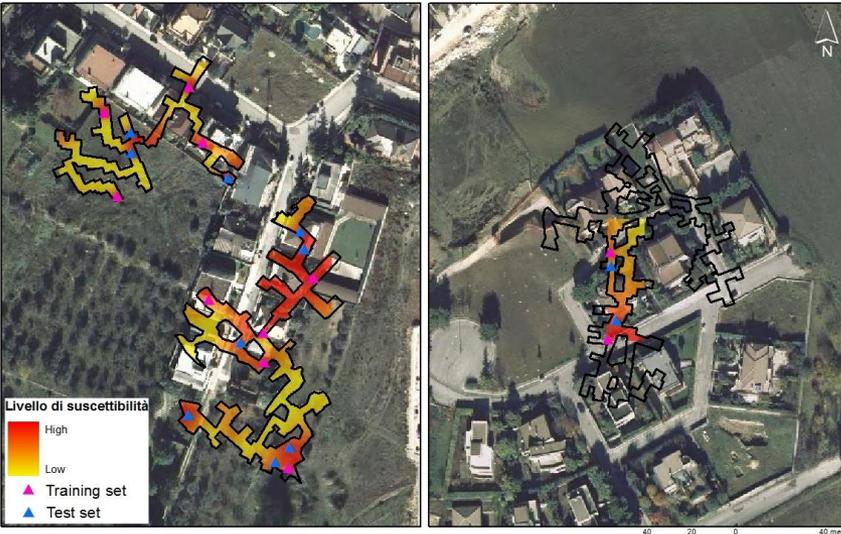
### Analisi Discriminante



Via Barcellona

Zona Parco Pepe

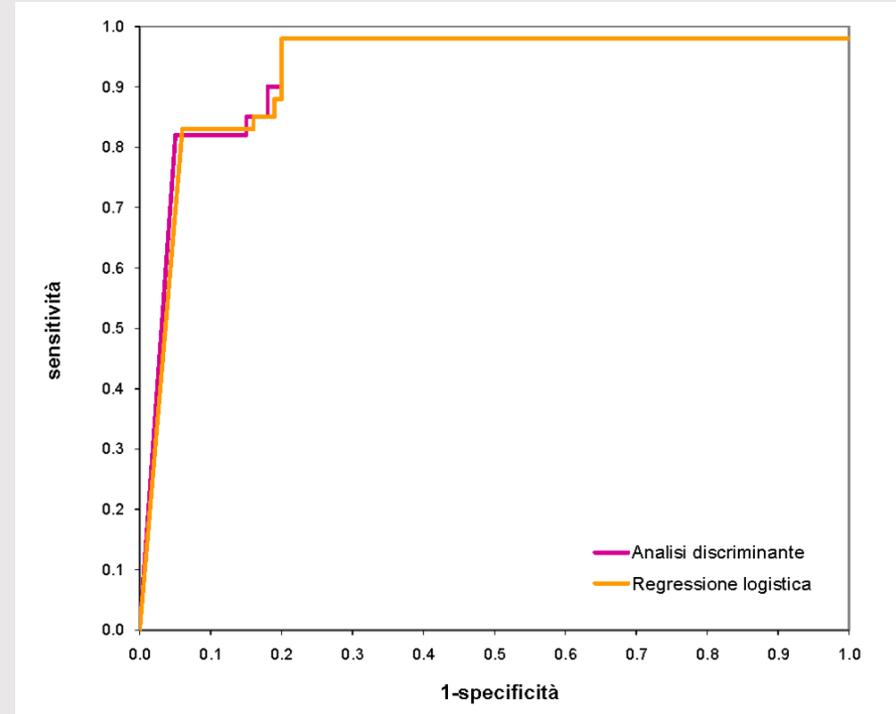
### Regressione Logistica



Via Barcellona

Zona Parco Pepe

### Valutazione delle performance ROC Curves



Modello	AUC	Error std	Intervallo di confidenza al 95% asintotico	
			Limite inferiore	Limite superiore
Analisi Discriminante	<b>0.970</b>	0.022	0.926	0.957
Regressione Logistica	<b>0.967</b>	0.022	0.923	0.947

↓  
*rappresentativa della qualità complessiva del modello*

# MONITORAGGIO INTEGRATO

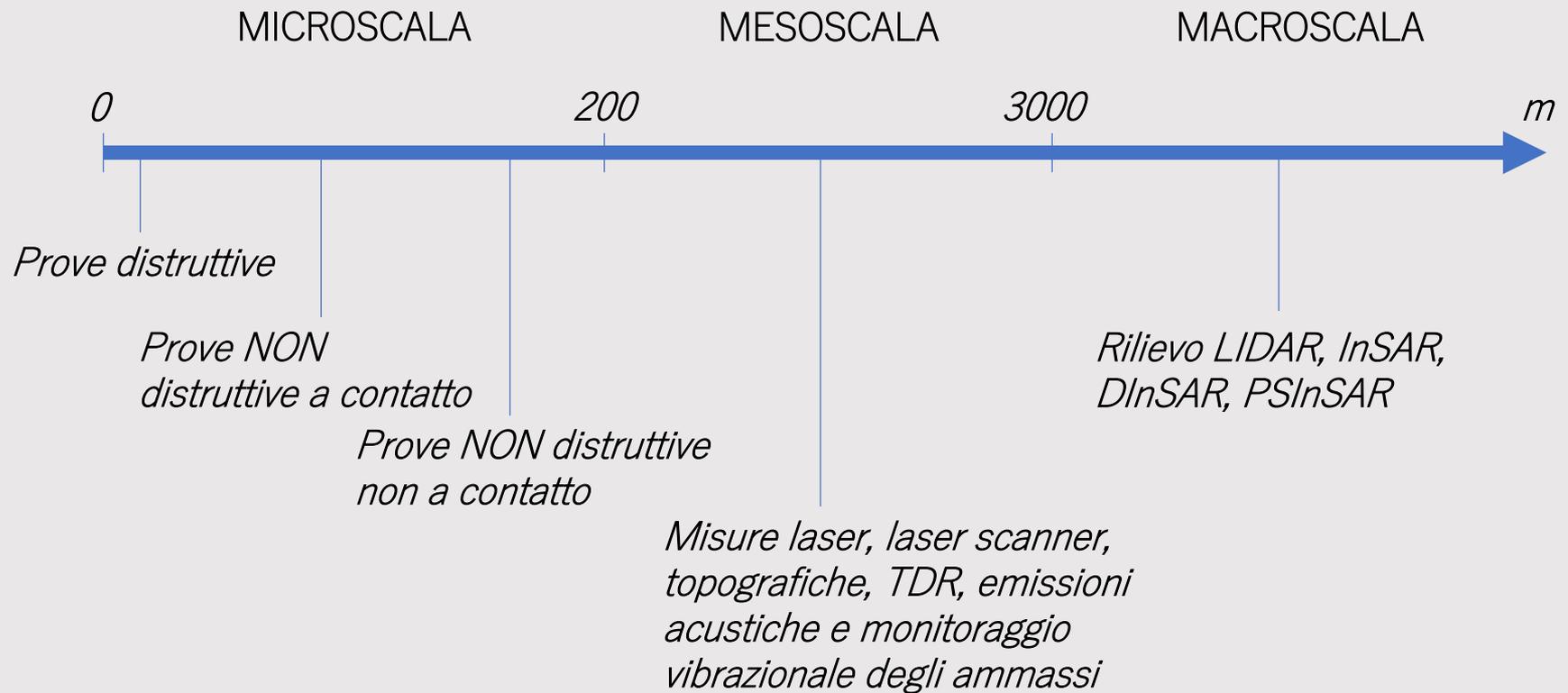
*Il buon funzionamento dei modelli previsionali proposti evidenzia la possibilità di **analisi della suscettibilità** su ampie aree in termini di **convenienza economica** e di **velocità di analisi**, rispetto a metodologie di modellazione deterministica, basate su costose caratterizzazioni geomeccaniche dei materiali coinvolti, necessariamente puntuali, di complessa estendibilità all'intero dominio di analisi.*



*Reti di monitoraggio*

*Integrazione di tecniche di monitoraggio  
per valutare la **vulnerabilità** strutturale delle cavità ipogee*

# MONITORAGGIO: TECNICHE E SCALA DI APPLICAZIONE



# MONITORAGGIO A MICROSCALA

## PROVE DISTRUTTIVE

Prelievo campioni

Analisi di laboratorio

$\gamma$ ,  $\phi'$ ,  $\mathcal{I}_f$ ,  $E'$ ,  $w$

Pull out test, flat jack, point load test

## PROVE NON DISTRUTTIVE

A contatto

Umidità, temperatura, velocità sonica e ultrasonica, ecc.

Rh, T,  $E_{din}$ , ecc.

NON a contatto

Termografia, umidità relativa dell'ambiente, ecc.

T, Rh, ecc.

Creazione di un database e ricerca di relazioni tra i parametri

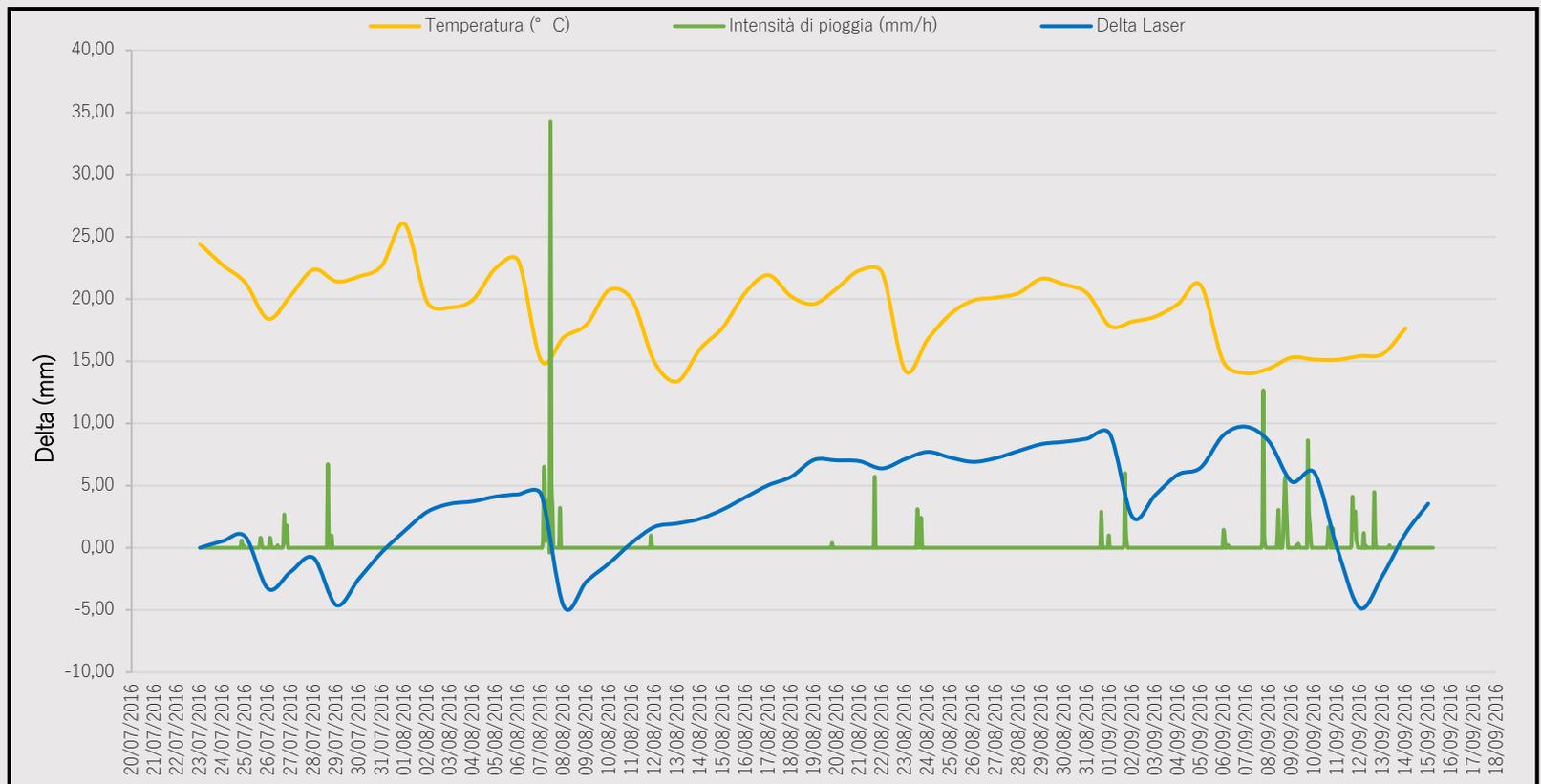
# MONITORAGGIO A MESOSCALA

## MULTI POINT SINGLE BEAM LASER SYSTEM



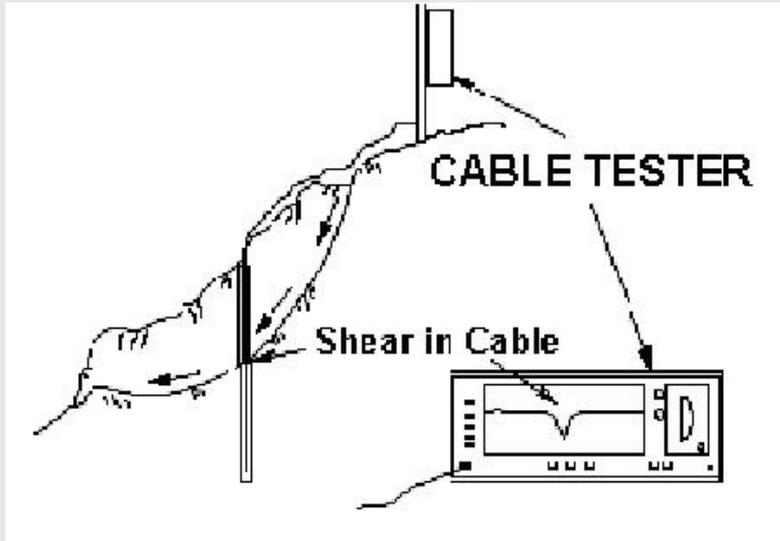
Laser e centralina utilizzati nel sistema di monitoraggio

Esempio di grafico ricavato dalle misure in continuo della centralina laser integrate con misure di temperatura e pioggia



# MONITORAGGIO A MESOSCALA

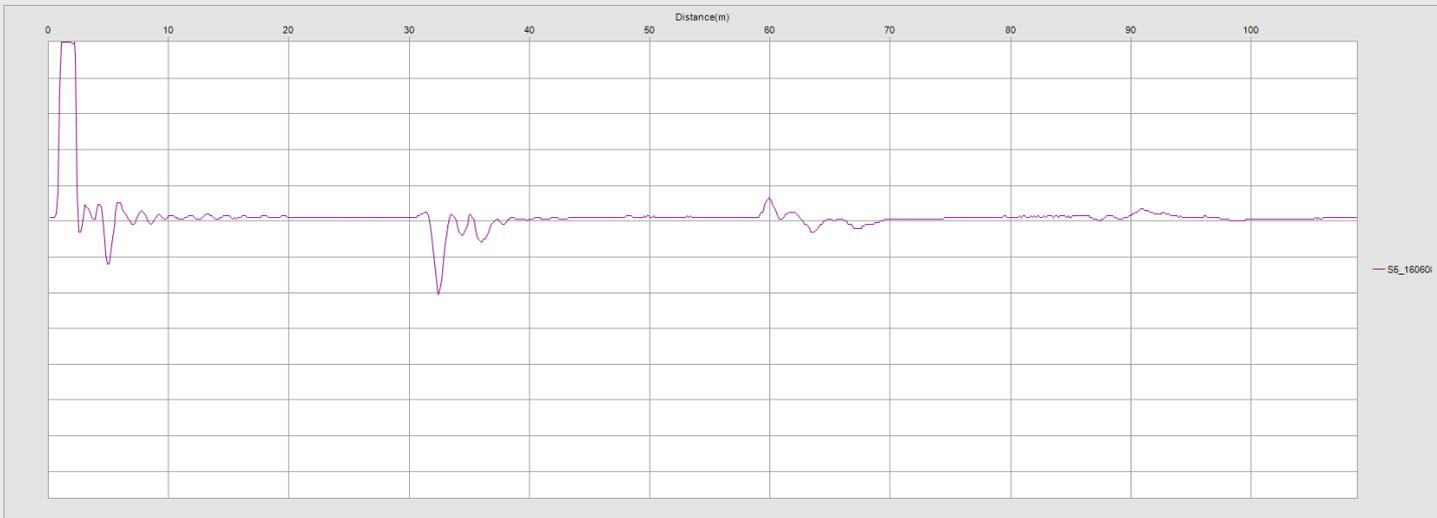
TDR (Time Domain Reflectometry)



Esempio di sistemazione di un cavo coassiale per letture TDR



Centralina TDR portatile



Tipica curva rilevata da una centralina TDR

# MONITORAGGIO A MESOSCALA

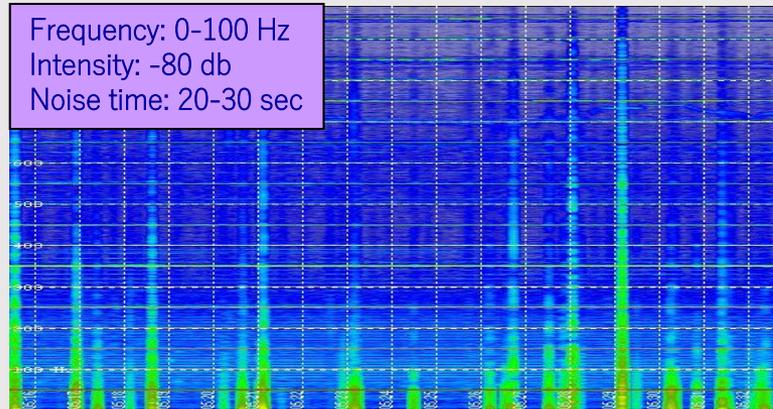
## AE (ACOUSTIC EMISSION)

- Registrazione e campionamento
- Analisi dei dati con FFT e analisi temporale
- Selezione del dato fisiologico da quello patologico

Sampling of different types of signals, relative to a specific source

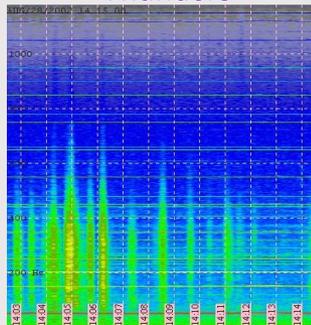
Characteristic acoustic emission of Aliano landslide

Frequency: 0-100 Hz  
Intensity: -80 db  
Noise time: 20-30 sec



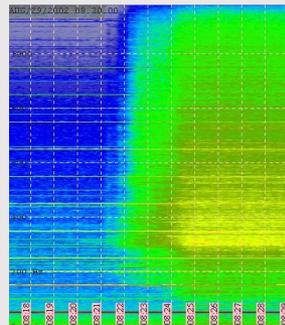
Signal characterized by a discrete series of single emissions, which show a low frequency spectrum (lower than 100 Hz)

Thunders



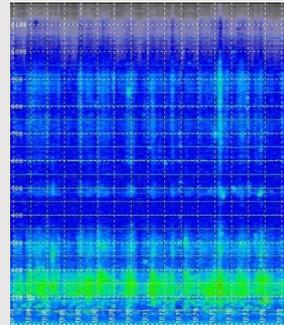
Frequency: 0-700 Hz  
Intensity: -60, 70 db  
Noise time: 10, 20 sec

Rainfall



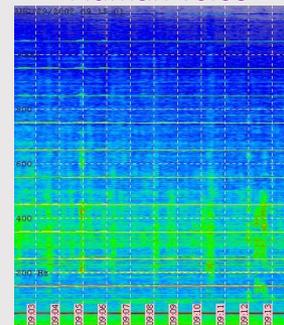
Frequency: 50-1200 Hz  
Intensity: -70, 45 db  
Noise time: variable

Traffic



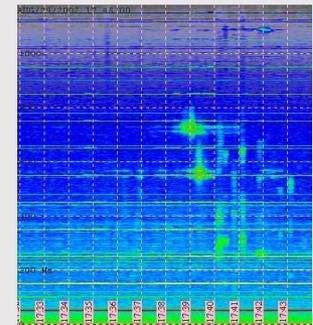
Frequency: 100-350 Hz  
Intensity: -90 db  
Noise time: variable

Human voice



Frequency: 50-550 Hz  
Intensity: -90 db  
Noise time: variable

Animals



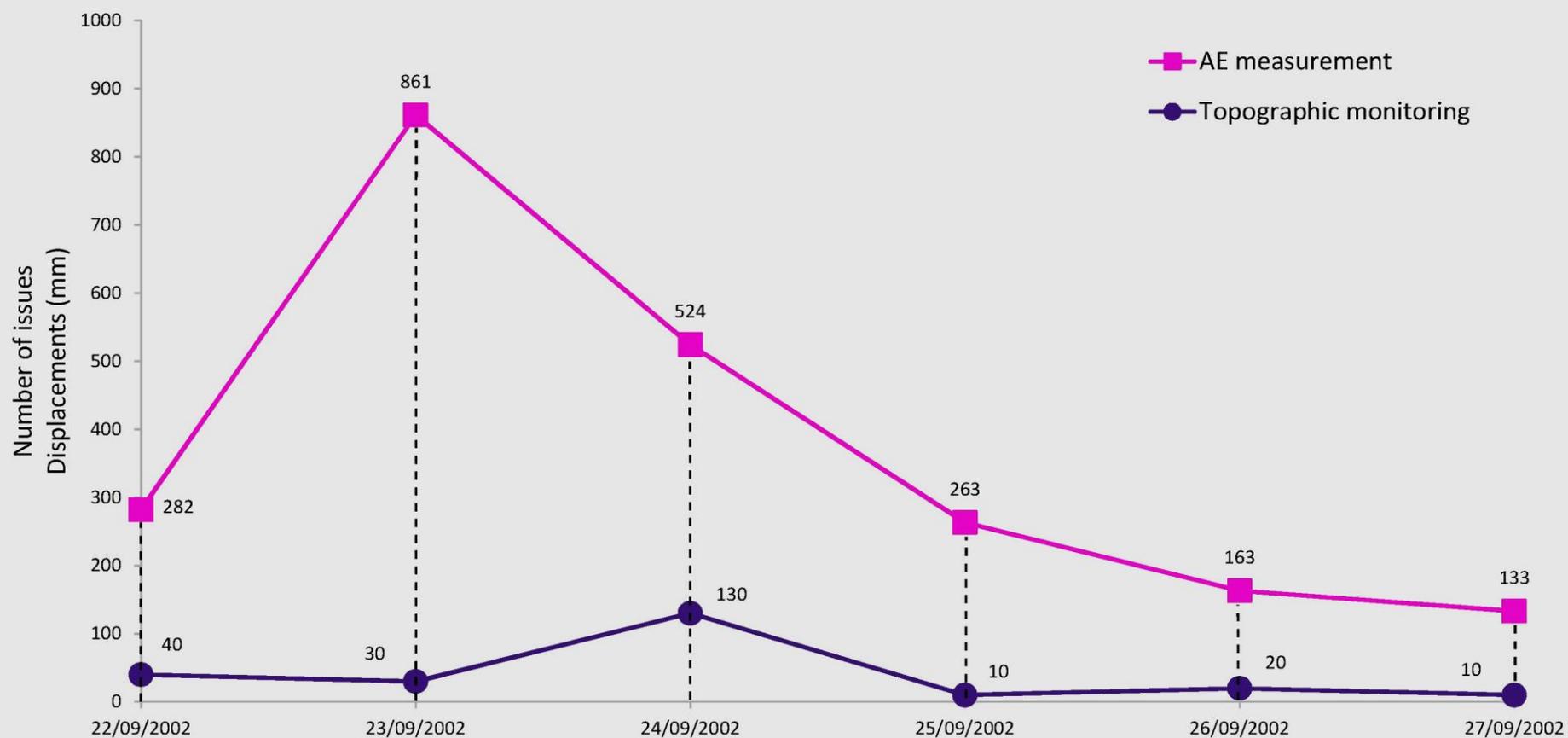
Frequency: 100-750 Hz  
Intensity: -90 db  
Noise time: variable

# MONITORAGGIO A MESOSCALA

## AE (ACOUSTIC EMISSION)

- Conta dei segnali di attenzione

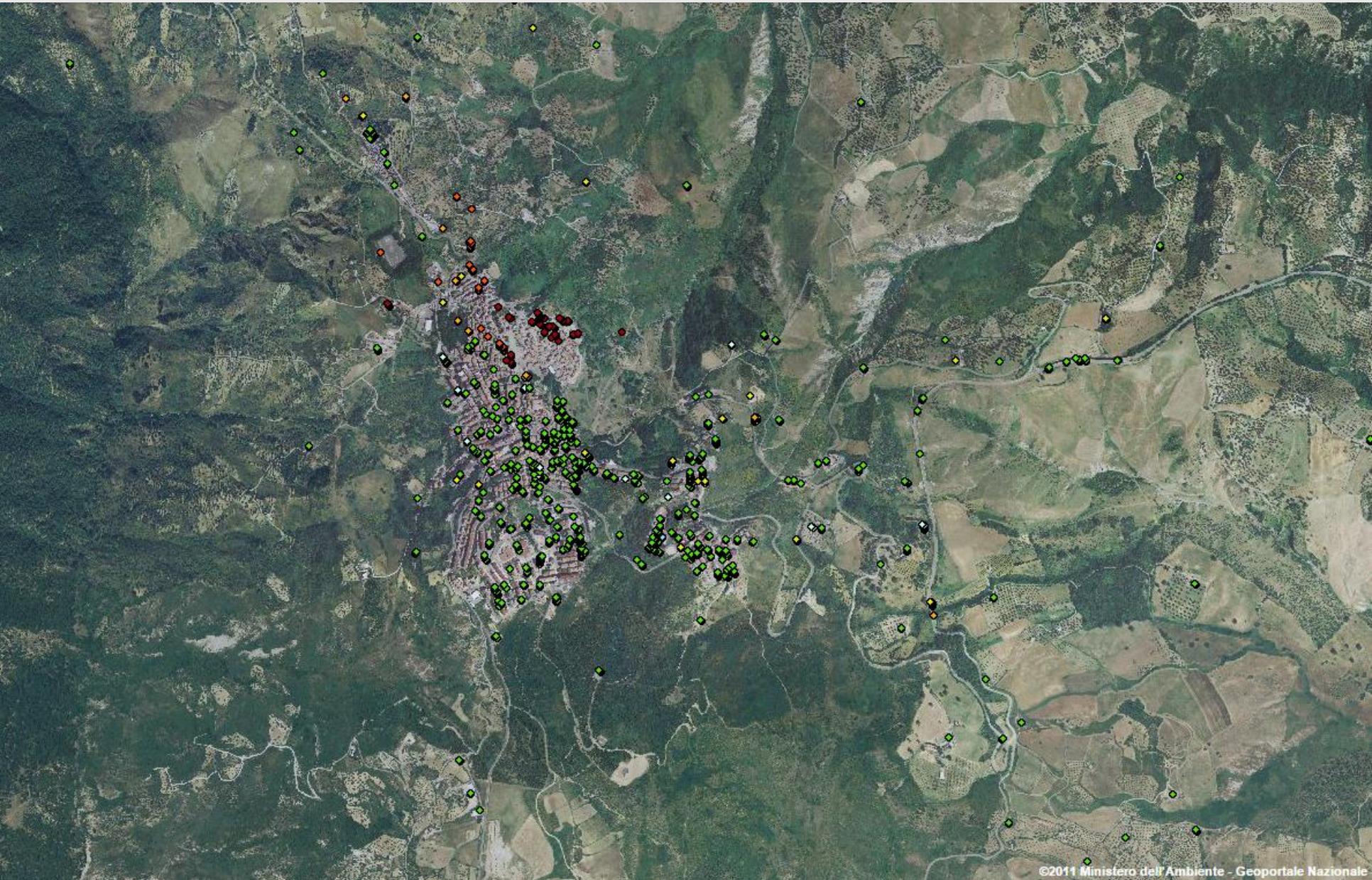
*Spilotro G., Pellicani R., Canora F., Allasia P., Giordan D., Lollino G. (2017) Evolution of techniques for monitoring unstable slope. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, vol. 1: 5-17. DOI: 10.4408/IJEGE.2017-01.0-01.*



# *MONITORAGGIO A MACROSCALA*

## *PSInSAR – PERSISTENT SCATTERERS INTERFEROMETRY*

Prodotti interferometrici ENVISAT ascending da Geoportale Nazionale, Ministero dell'Ambiente



## CONCLUSIONI

*L'analisi previsionale della probabilità che si verifichi in una determinata area un fenomeno d'instabilità può essere utilizzata come strumento di indirizzo per la progettazione di una rete di monitoraggio.*

*L'integrazione delle tecniche di monitoraggio «dalla micro alla macroscale» è utile per valutare la vulnerabilità strutturale ma anche per definire database e protocolli che permettano una più speditiva valutazione del rischio.*

*La valutazione del RISCHIO, associato, in questo caso, ad una doppia esposizione, ovvero l'esposizione del bene e di vite umane, è finalizzato alla salvaguardia, all'uso in sicurezza e alla riqualificazione del patrimonio culturale delle civiltà ipogee.*