



*Mitigazione dei rischi naturali per la sicurezza e la mobilità  
nelle aree montane del Mezzogiorno*

Politecnico di Bari

# **ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEL MECCANISMO DI FRANA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO**

**Federica Cotecchia**

***Vito Tagarelli, Marianna Stragapede***

22-23 Giugno 2023



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



*Ministero dell'Università  
e della Ricerca*



Estratto da: Secondo convegno annuale del progetto MITIGO - 22-23 Giugno 2023 - Sommari degli interventi e presentazioni

© 2023 Università degli Studi della Basilicata

Editrice Universosud – Potenza

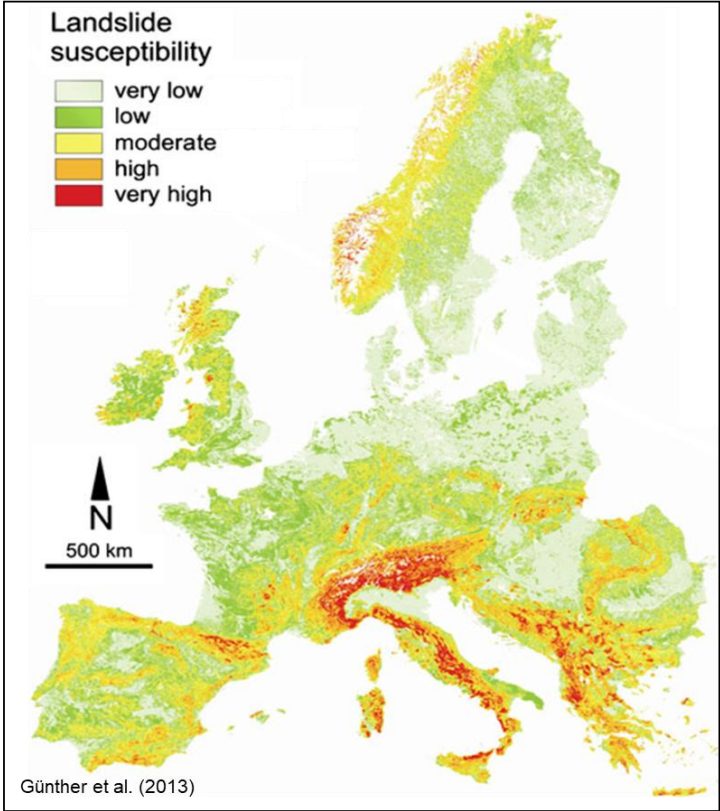
ISBN 9791281551008



Pubblicazione realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea – FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

[www.ponricerca.gov.it](http://www.ponricerca.gov.it)

L'Italia è uno dei paesi avanzati con la più alta suscettibilità da frana



*Linee Guida AGI-ISPRA*

# **PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA**

**Capitolo 4**

**ANALISI E CARATTERIZZAZIONE  
IN FASE DI PROGETTO**



*Mitigazione dei rischi naturali per la sicurezza e la mobilità  
nelle aree montane del Mezzogiorno*

Politecnico di Bari

**ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEL MECCANISMO DI FRANA  
PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO**

**Federica Cotecchia**

***Vito Tagarelli, Marianna Stragapede***

22-23 Giugno 2023

**INDAGINI  
E  
ANALISI**

Cap. 4 LG AGI-ISPRA

**DIAGNOSI**

**PRIORITÀ  
DI INTERVENTO**

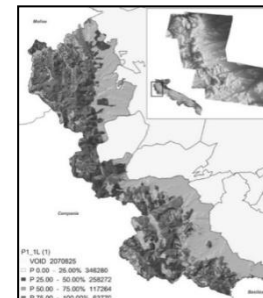
**PROGRAMMAZION  
E**

**AREA VASTA**

SCALA MEDIA O REGIONALE

**PENDIO**

SCALA DI SITO



Ceppi et al., 2013

**FATTORE  
SICUREZZA, F**  
CAMPO DI  
SPOSTAMENTI

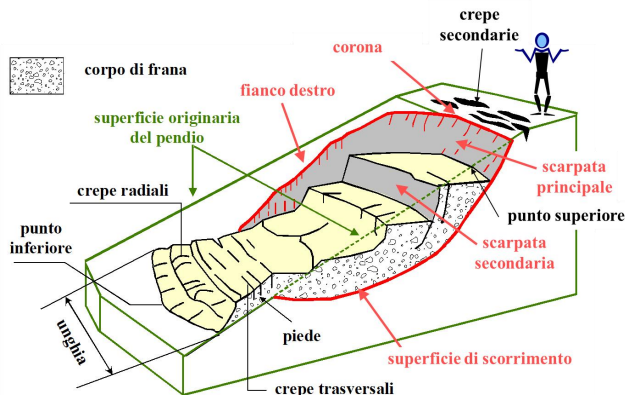
**STRATEGIA DI  
MITIGAZIONE  
(SE F=1)**

**SUSCETTIBILITÀ DA  
FRANA**

Probabilità d'occorrenza spaziale di un evento franoso, dato un insieme di condizioni territoriali e ambientali

**PERICOLOSITÀ DA  
FRANA (H)**

Probabilità di accadimento in un determinato lasso di tempo, ed in un determinato luogo di un evento franoso di una determinata intensità



Material	ROCK	DEBRIS	EARTH
<b>FALLS</b>	<p>Scar Rock fall Rock fall debris</p>	<p>Scar Debris fall Scree Debris cone</p>	<p>Scar Colluvium Debris cone</p>
<b>TOPPLES</b>	<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple Debris cone</p>	<p>Cracks Earth topple Debris cone</p>
<b>SLIDES</b>	<p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	<p>Crown Head Scarp Minor Scarp Multiple rotational slide</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
<b>SPREADS</b>	<p>Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Thinning of beds Plane of dislocation Competent substratum Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge structure (formed off by erosion) e.g. cambering and valley bulging</p>		<p>Earth spread</p>
<b>FLOWS</b>	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>
<b>COMPLEX</b>	<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>

Cruden & Varnes, 1996

- Quale è/potrà essere il **cinematismo di frana**?
- Quali sono **le cause**?
- Quale è **l'evoluzione nel tempo**?

Quale è il **MECCANISMO DI FRANA**?

### SUSCETTIBILITÀ DA FRANA

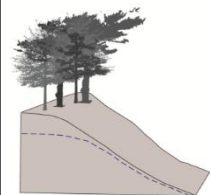
Probabilità d'occorrenza spaziale di un evento franoso, dato un insieme di condizioni territoriali e ambientali

### PERICOLOSITÀ DA FRANA (H)

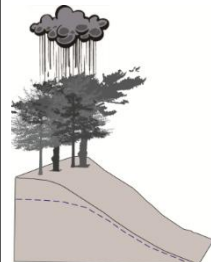
Probabilità di accadimento in un determinato lasso di tempo, ed in un determinato luogo di un evento franoso di una determinata intensità

- 1) IL MECCANISMO DI FRANA; EQUAZIONI CHE GOVERNANO IL CAMPO DEGLI SPOSTAMENTI DI UN PENDIO
- 2) DIAGNOSI A SCALA DI SITO: DALLA MODELLAZIONE CONCETTUALE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA
- 3) ATTIVITÀ CLIMA-INDOTTA DI FRANE LENTE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE





Condizione di stabilità



Variazione dell'equilibrio

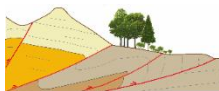


Rottura progressiva



Processo franoso

**Meccanismo di frana**



## FATTORI INTERNI

- Assetto geologico: *litostratigrafia, morfologia, strutture tettoniche*
- Comportamento meccanico:
  - *Proprietà dei terreni*
  - *legge costitutiva, parametri*

Elasto-plasticità

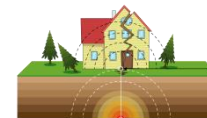
$$\sigma'_{ij} \leftrightarrow \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$$



- Comportamento idraulico:
  - *funzione di conducibilità idraulica*
  - *curva di ritenzione*

## FATTORI ESTERNI

- Agenti climatici: *pioggia, temperature, radiazioni, umidità relativa, nuvolosità, vento*
- Agenti antropici: *carico, scarico, variazioni delle condizioni idrauliche al contorno*
- Azioni sismiche: *cicli di carico/scarico ad alte frequenze*
- Naturale evoluzione geomorfologica: *carico, scarico, weathering*



(Terzaghi, 1950; *Tabella 4.1, Linee guida AGI-ISPRA*)

Totalmente saturo

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}$$



Parzialmente saturo

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij}$$

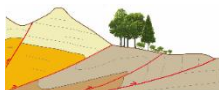


EQUILIBRIO e CONGRUENZA

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{jz} = 0 \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_h \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

FILTRAZIONE TRANSITORIA - BILANCIO DI MASSA LIQUIDA

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$



## FATTORI INTERNI

- Assetto geologico:  
*litostratigrafia, morfologia, strutture tettoniche*

- Comportamento meccanico:

- *Proprietà dei terreni*
- *legge costitutiva, parametri*

$$\sigma'_{ij} \leftrightarrow \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$$

- Proprietà idrauliche:

- funzione di conducibilità idraulica*
- *curva di ritenzione*



## FATTORI ESTERNI

- Agenti climatici:

*pioggia, temperature, radiazioni, umidità relativa, nuvolosità, vento*

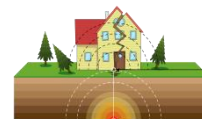


- Agenti antropici:

*carico, scarico variazioni delle condizioni idrauliche al contorno*

- Azioni sismiche:

*cicli di carico/scarico ad alte frequenze*



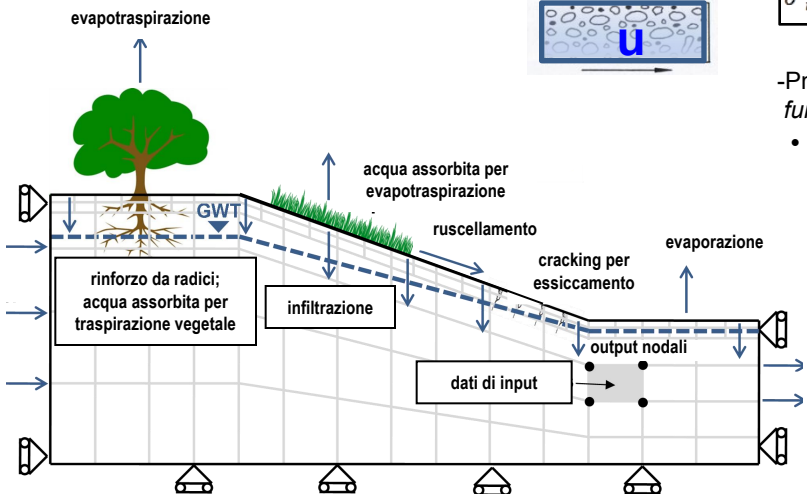
- Naturale evoluzione geomorfologica:

*carico, scarico, weathering*

(Terzaghi, 1950; *Tabella 4.1, Linee guida AGI-ISPRA*)

Condizioni al contorno (laterale) idrauliche e meccaniche

Condizioni al contorno (laterale) idrauliche e meccaniche



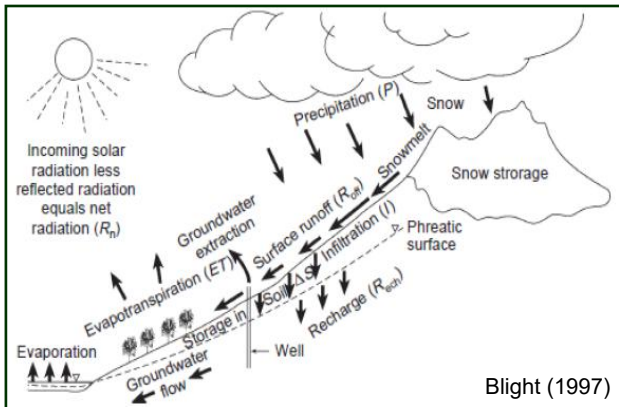
Condizioni al contorno (di base) idrauliche e meccaniche

## EQUILIBRIO e CONGRUENZA

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{jz} = 0 \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_h \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

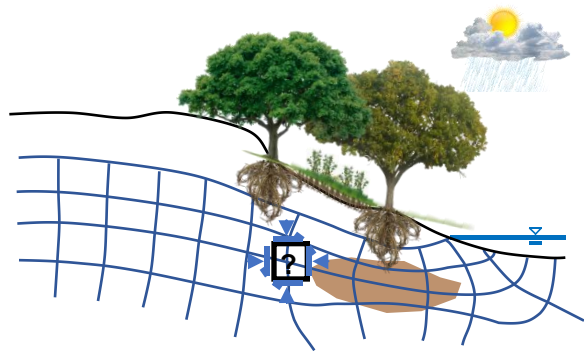
## FILTRAZIONE TRANSITORIA - BILANCIO DI MASSA LIQUIDA

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$



## Gli effetti dell'interazione suolo-vegetazione-atmosfera: INTERAZIONE PENDIO-VEGETAZIONE-ATMOSFERA

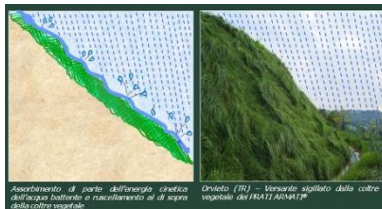
**INFILTRAZIONE =**  
**Pioggia –**  
**(Intercettazione fogliare +**  
**Evapotraspirazione + Ruscellamento)**



Tagarelli & Cotecchia (2022) - RIG



Rinforzo dovuto all'apparato radicale



Impatto del ruscellamento



Intercettazione fogliare



Attenuazione delle crepe da essiccamento

**MODELLO  
CONCETTUALE**

**MODELLO  
QUANTITATIVO**

## A) Interpretazione fenomenologica

(Terzaghi, 1950)

### FATTORI INTERNI

- Assetto geologico: *litologia, morfologia, strutture tettoniche, condizioni al contorno*
- Comportamento meccanico: *composizione, parametri di resistenza, legge costitutiva*
- Proprietà idrauliche: *permeabilità, curva di ritenzione*

### FATTORI ESTERNI

- Clima: *pioggia, temperatura, irraggiamento, umidità relativa, vento*
- Attività antropiche: *carichi, scarichi, cambiamenti delle condizioni idrauliche al contorno*
- Sisma: *carichi e scarichi ciclici ad alta frequenza*
- Evoluzioni morfologiche: *carichi, scarichi, weathering*



## B) Analisi col metodo dell'equilibrio limite

$$\text{Fattore di Stabilità} = \int_S \tau_f ds / \int_S \tau_m ds$$



## C) Modellazione numerica

Equilibrio e Congruenza

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \gamma \delta_{jz} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{hk}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ih}}{\partial x_k \partial x_j} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kj}}{\partial x_i \partial x_h}$$

Filtrazione transitoria

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_w k_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_w \frac{e S_r}{1 + e} \right)$$

1 Parziale saturazione

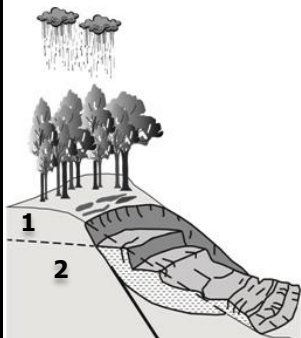


2 Totale saturazione



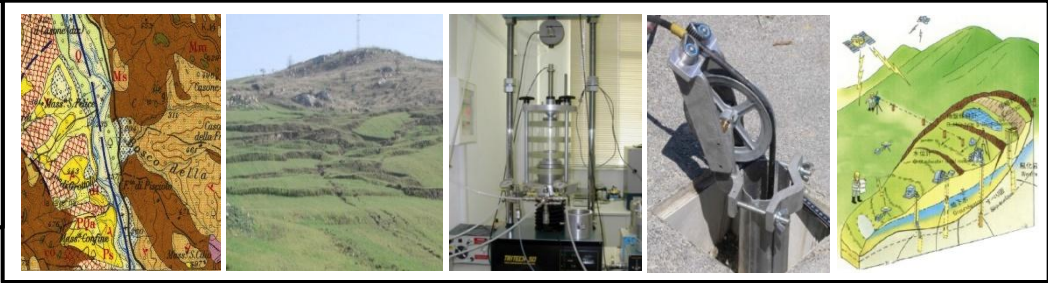
$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij}$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}$$



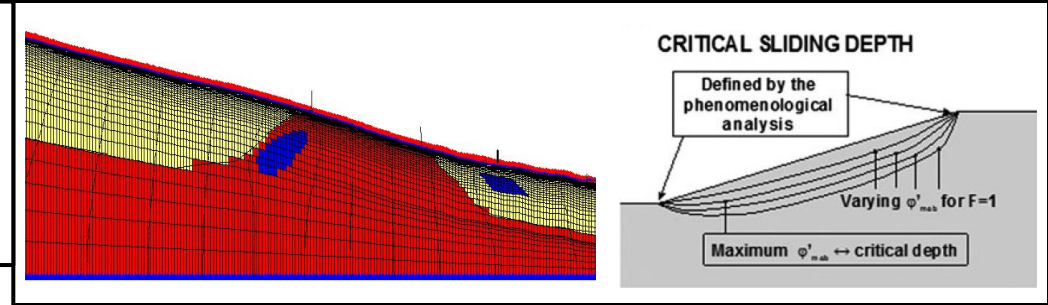
**A)**  
Fenomenologico

*Analisi fenomenologica dello stato del pendio, livello di stabilità, pericolosità da frana*



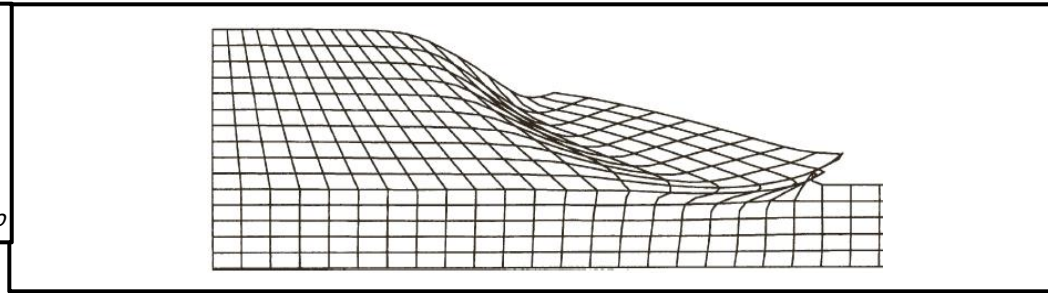
**B)**  
Analitico  
semplificato

*Analisi quantitative che considerano le sole condizioni di equilibrio del pendio (Equilibrio Limite)*



**C)**  
Modellazione  
numerica avanzata

*Analisi quantitative per la modellazione dello stato tenso-deformativo del pendio*



## Avanzamento scientifico nelle indagini e nelle elaborazioni dati

**Sistema di monitoraggio da remoto**

satellite  
drone

Stazione totale robotizzata

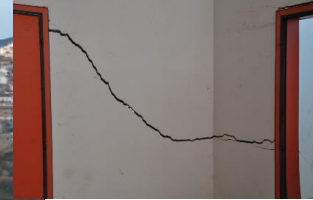
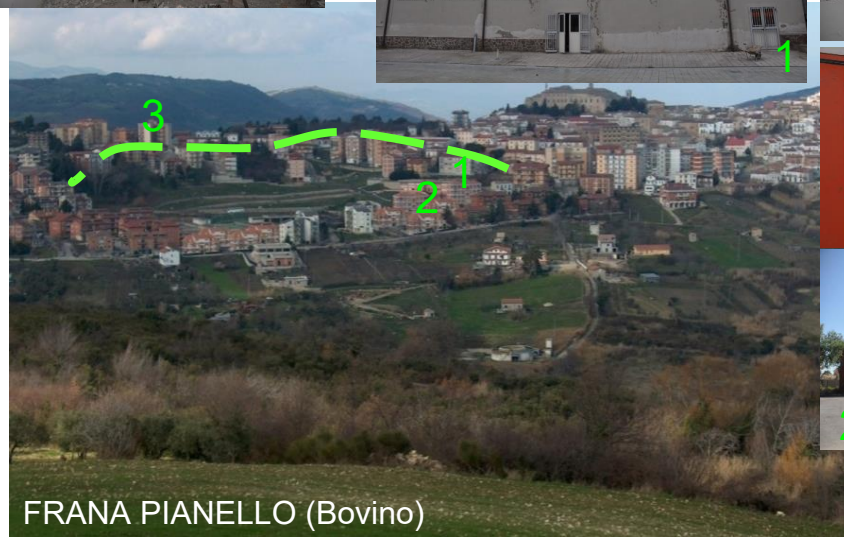
Laser

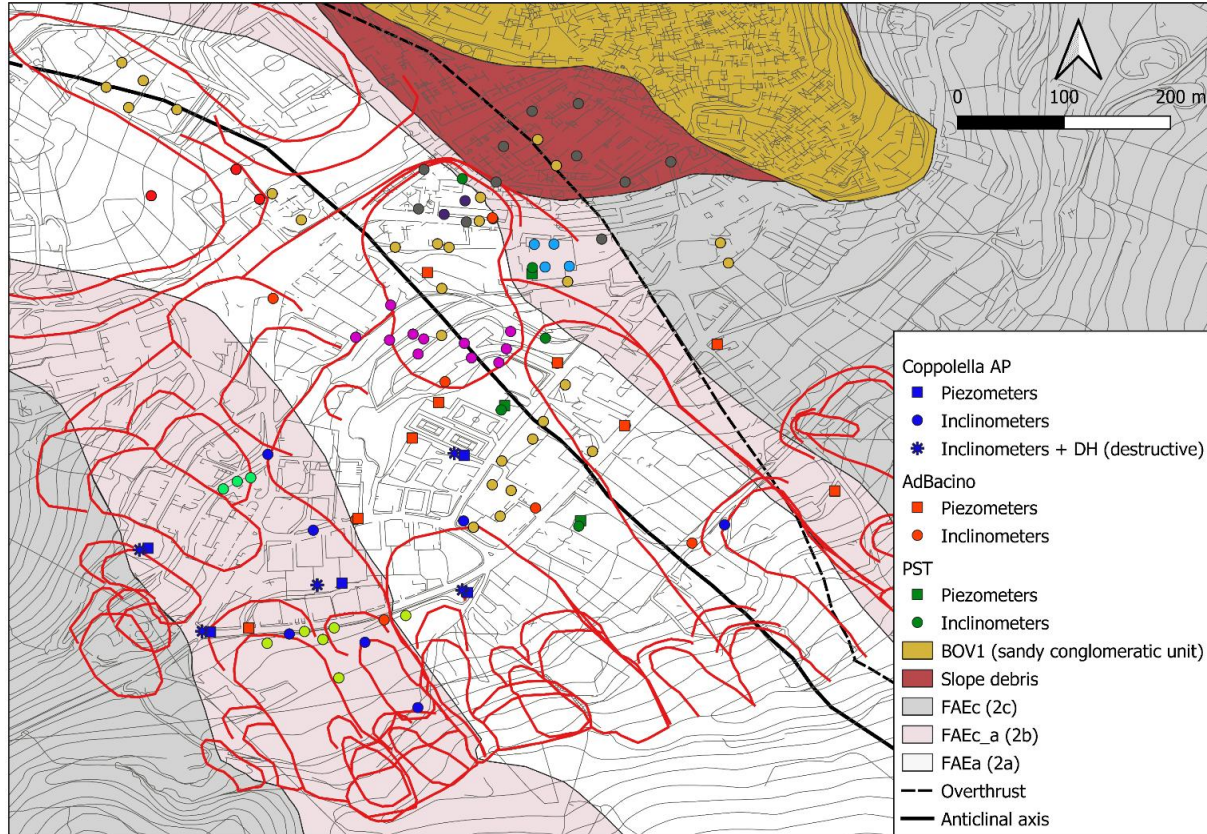
Inclinometro automatizzato

Inclinometri fissi

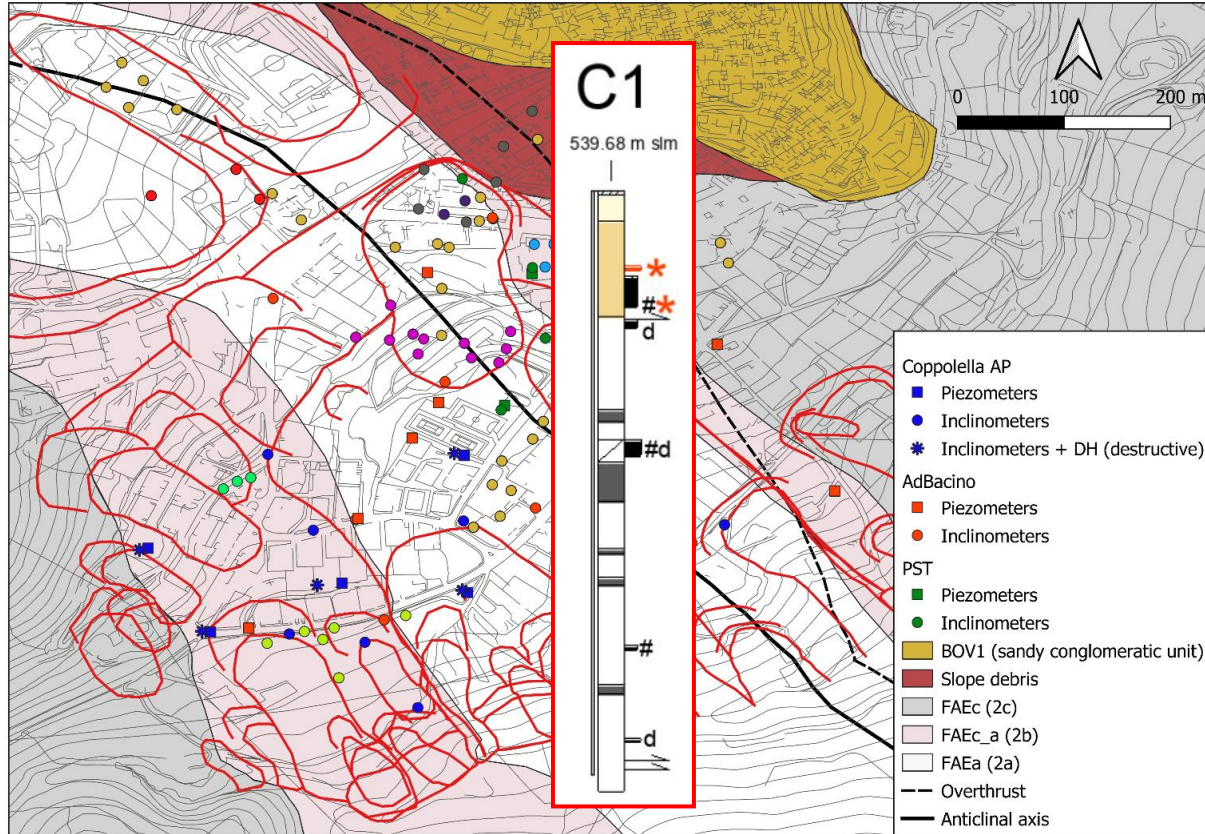
Sonda inclinometrica removibile

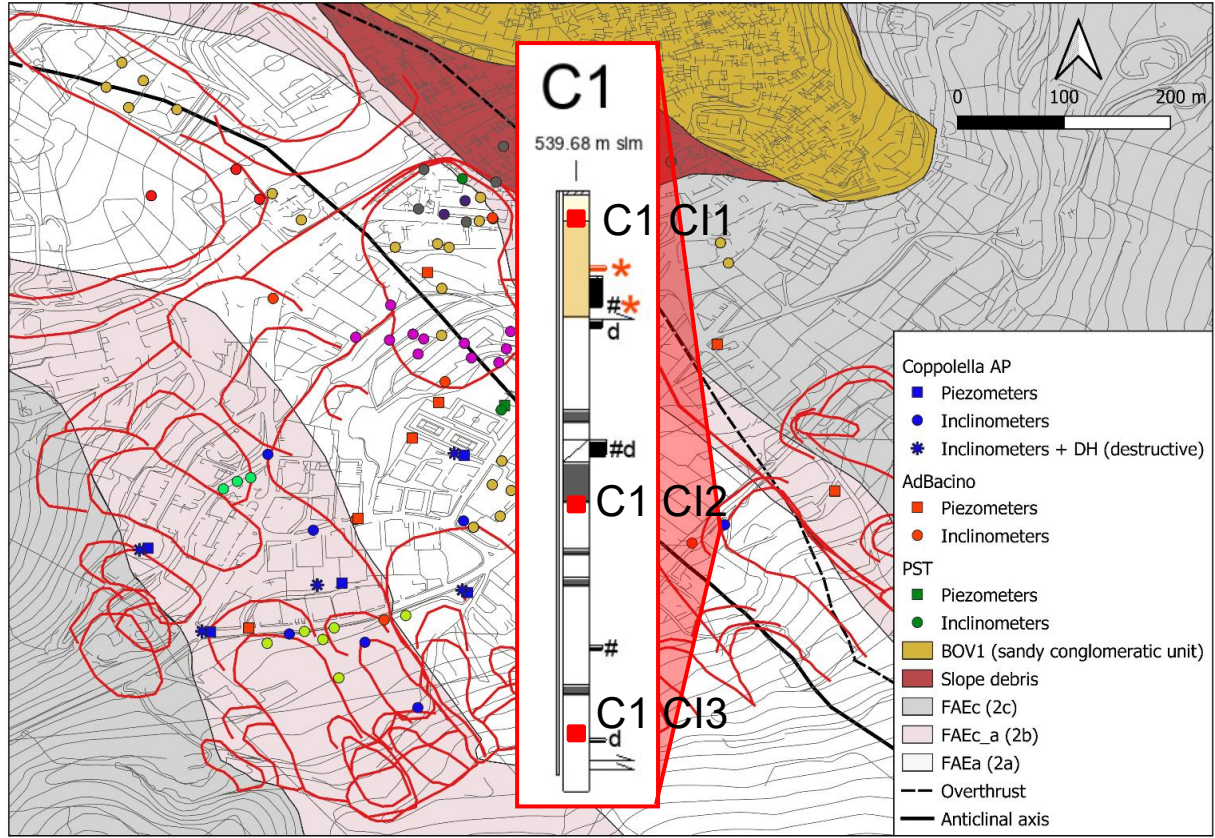
ERT 2012 GEOPLANTS - ARRAY DIPOLO-DIPOLO (0-60m)

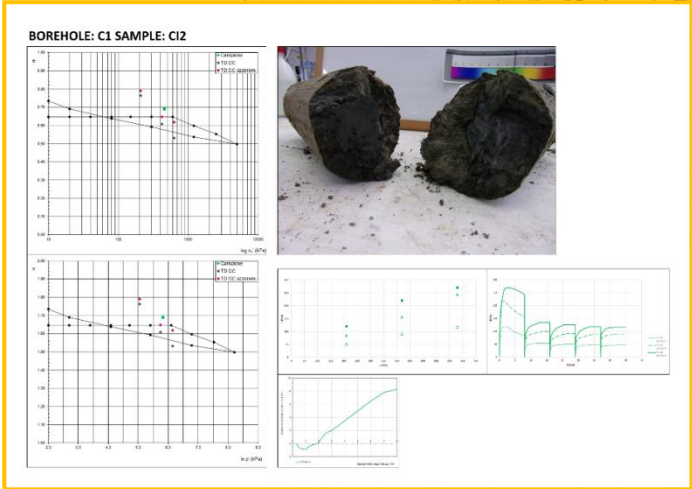
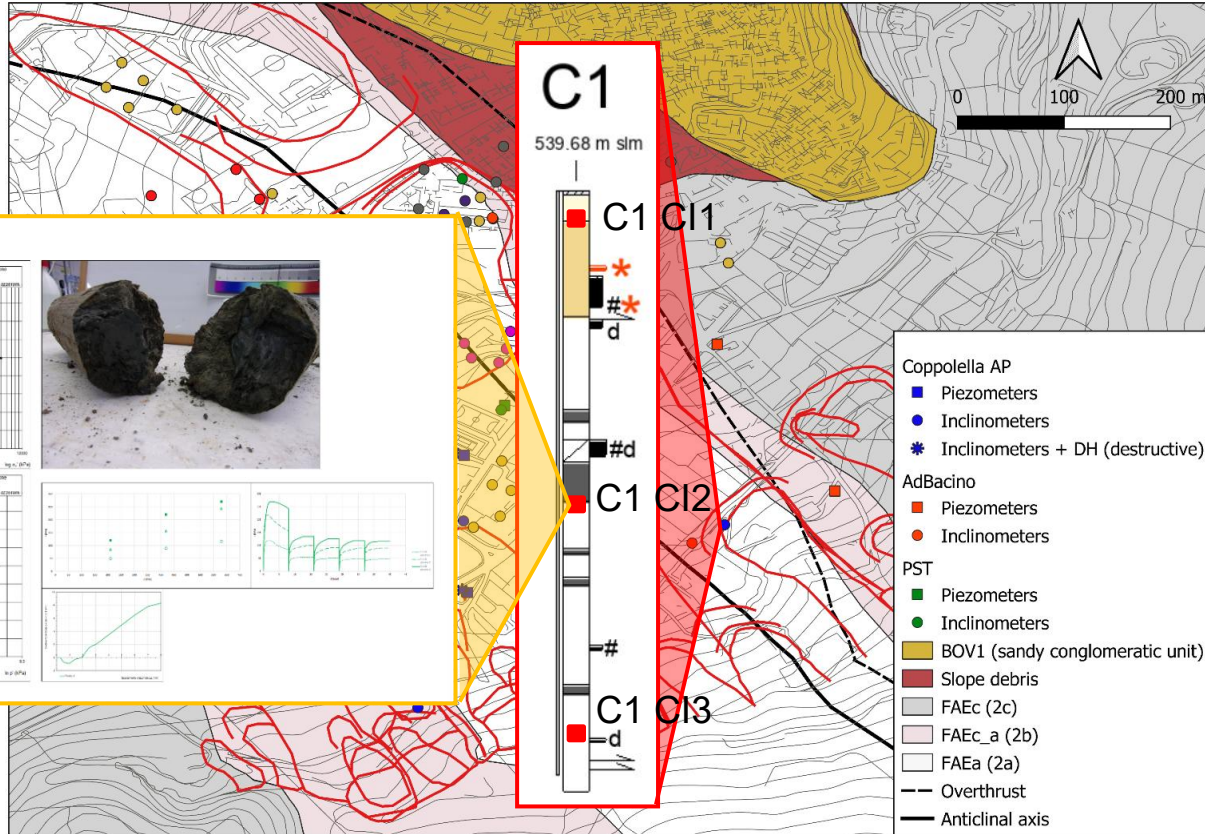


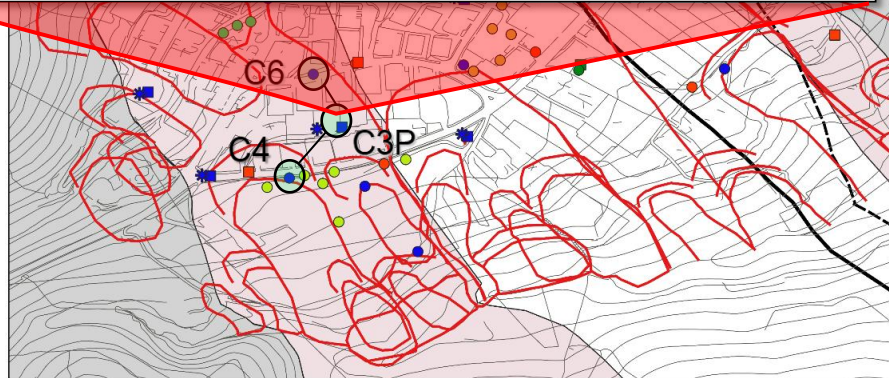
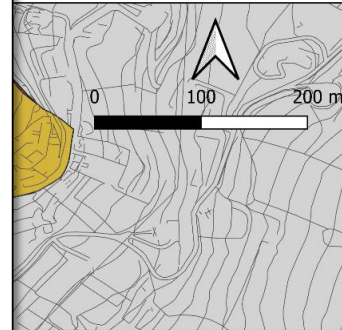
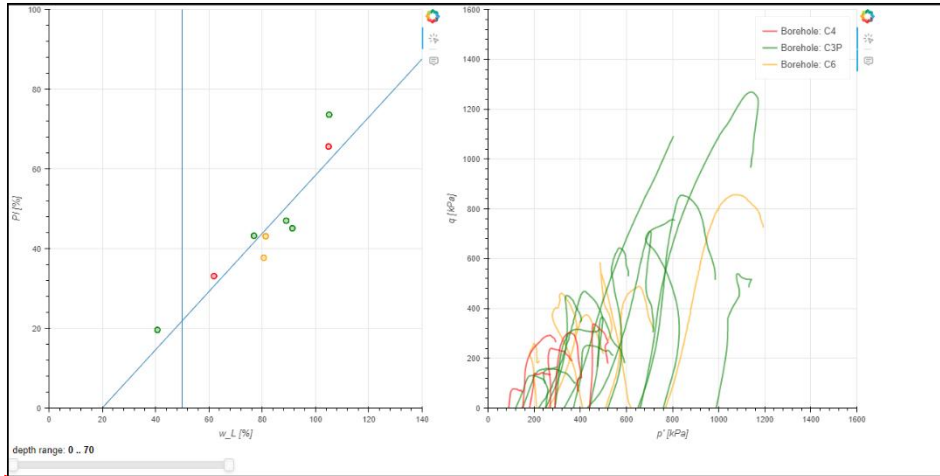




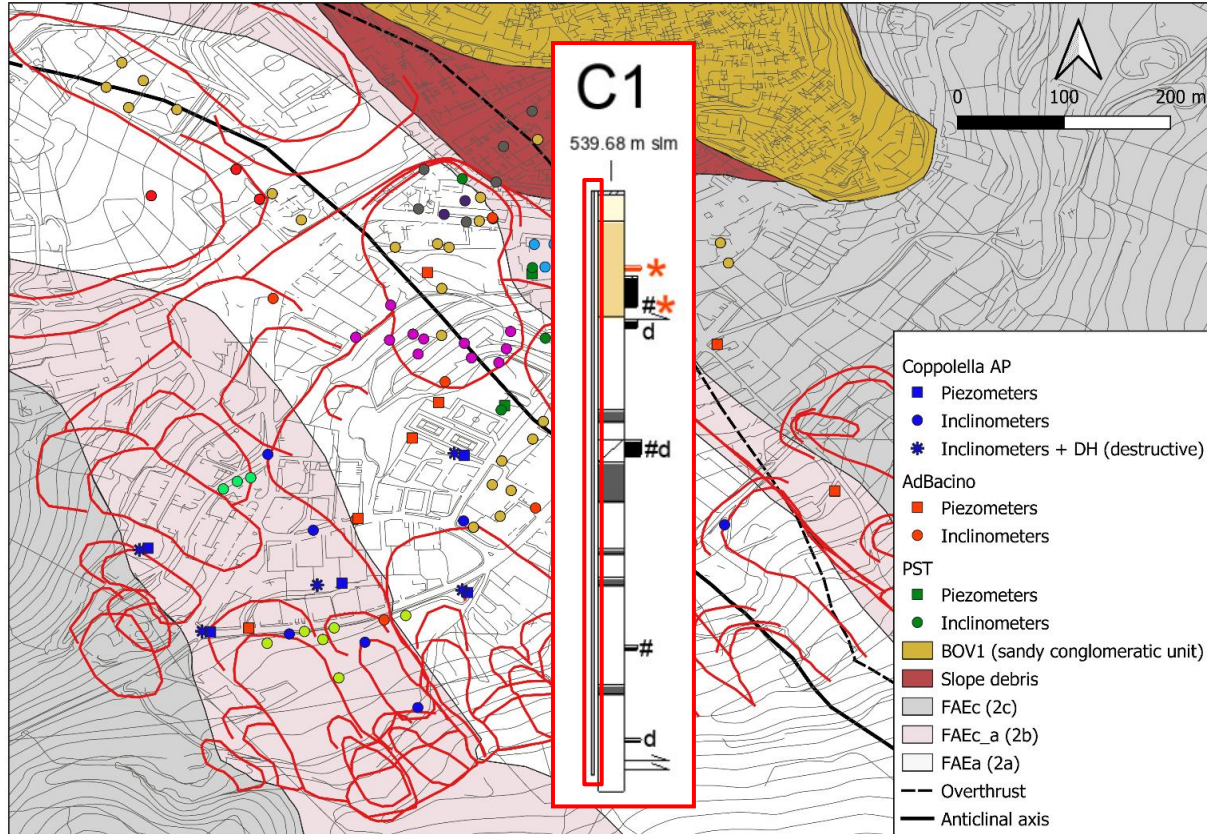




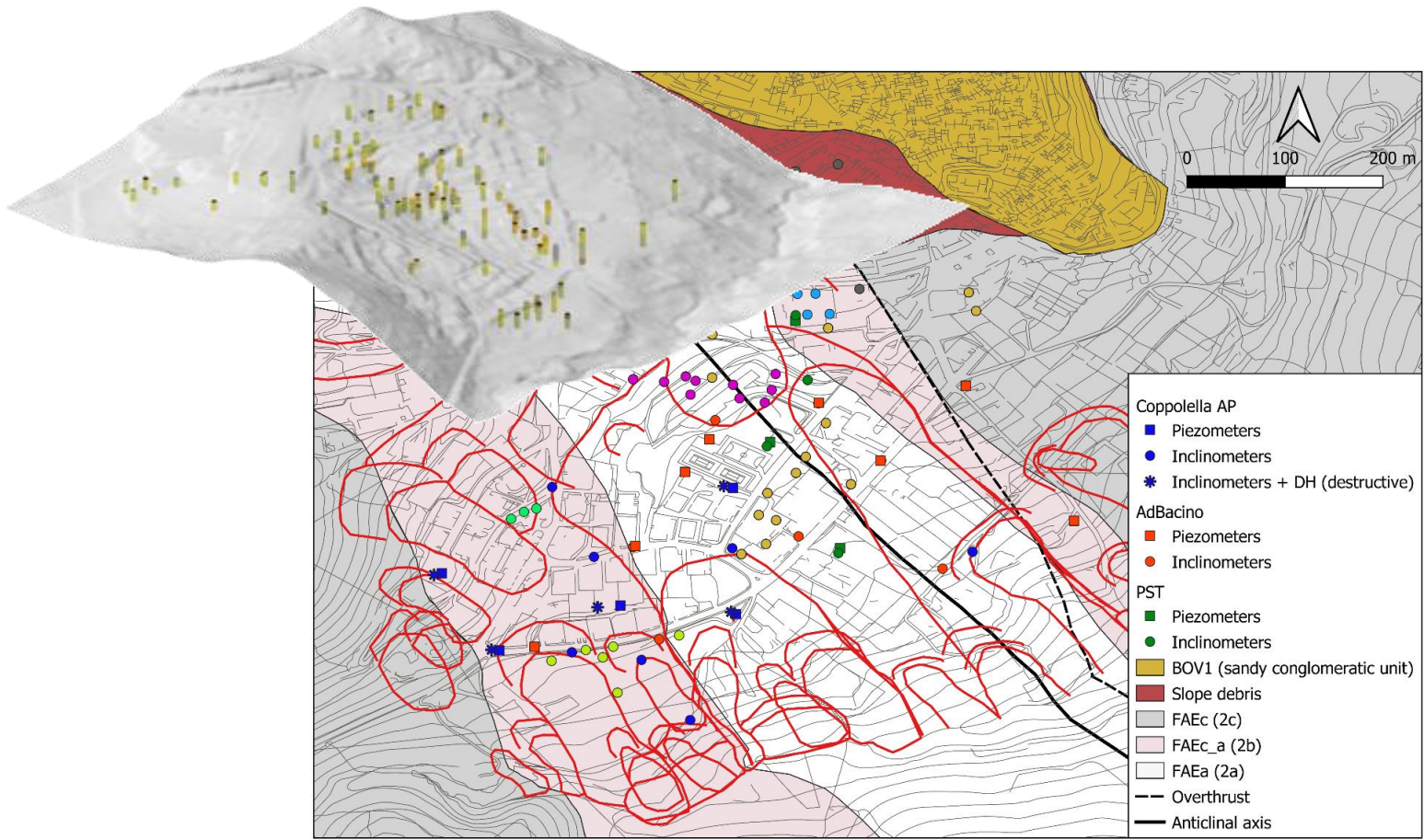


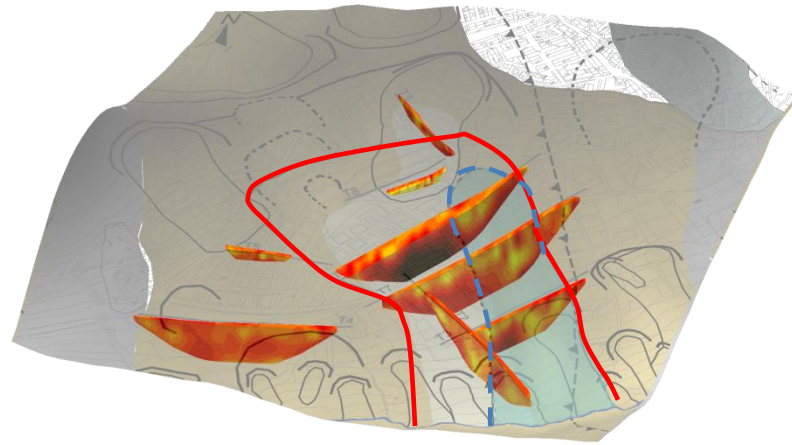
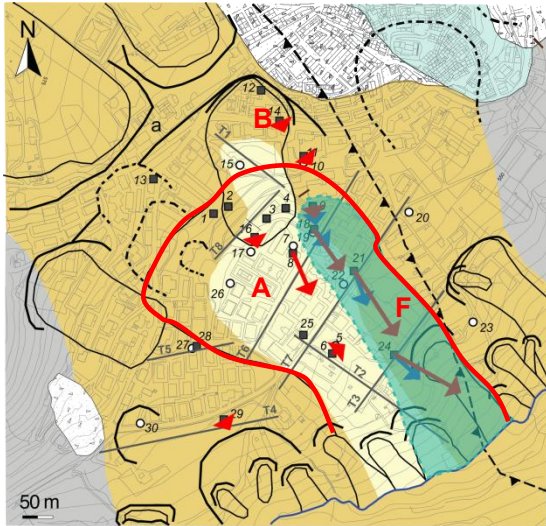


- Coppolella AP**
  - Piezometers
  - Inclinometers
  - ★ Inclinometers + DH (destructive)
- AdBacino**
  - Piezometers
  - Inclinometers
- PST**
  - Piezometers
  - Inclinometers
- BOV1 (sandy conglomeratic unit)**
- Slope debris**
- FAEC (2c)**
- FAEC\_a (2b)**
- FAEa (2a)**
- Overthrust**
- Anticlinal axis**

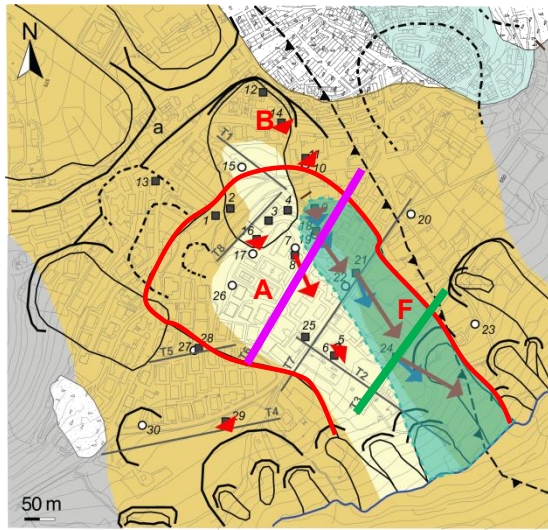




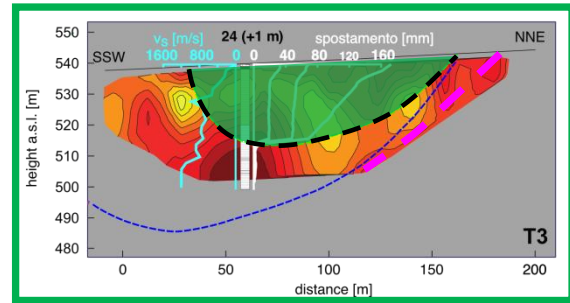
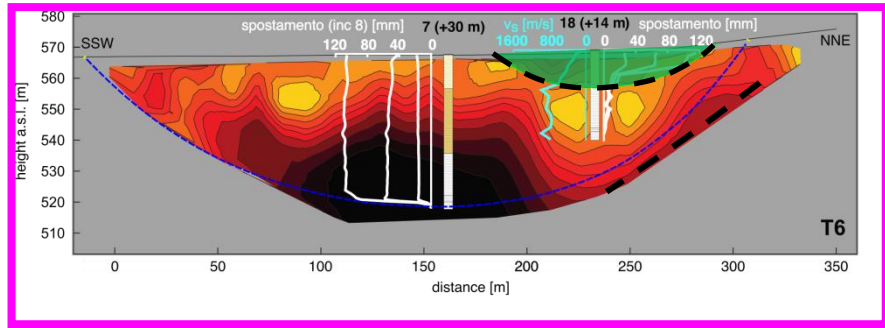
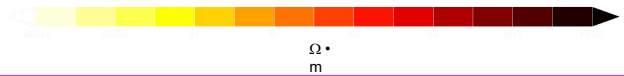


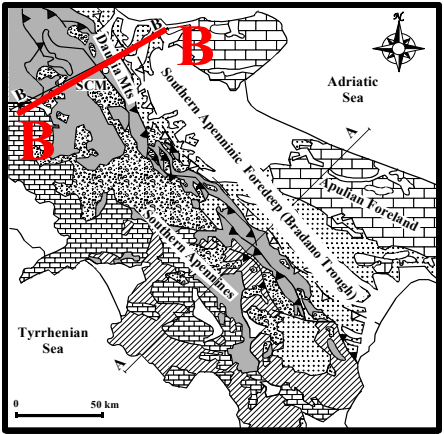




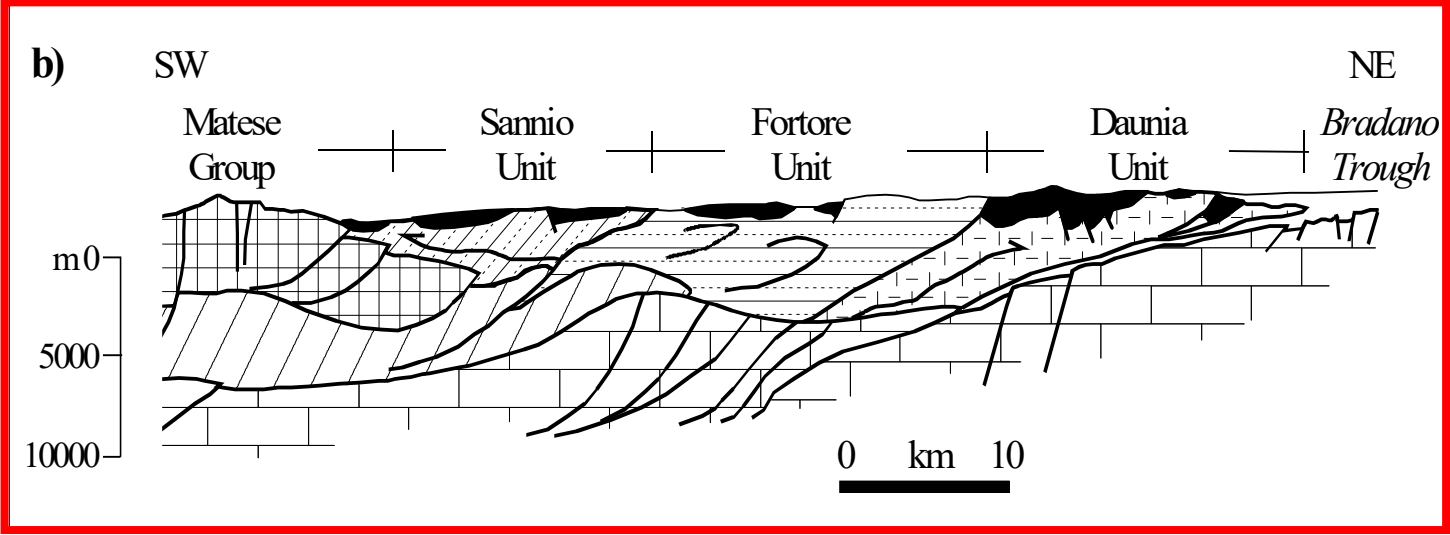


■ inclinometro  
 ○ piezometro  
 traccia prospezione geoelettrica  
 spostamenti (2008-2016)  
 → superficiali  
 → profondi  
 100 mm









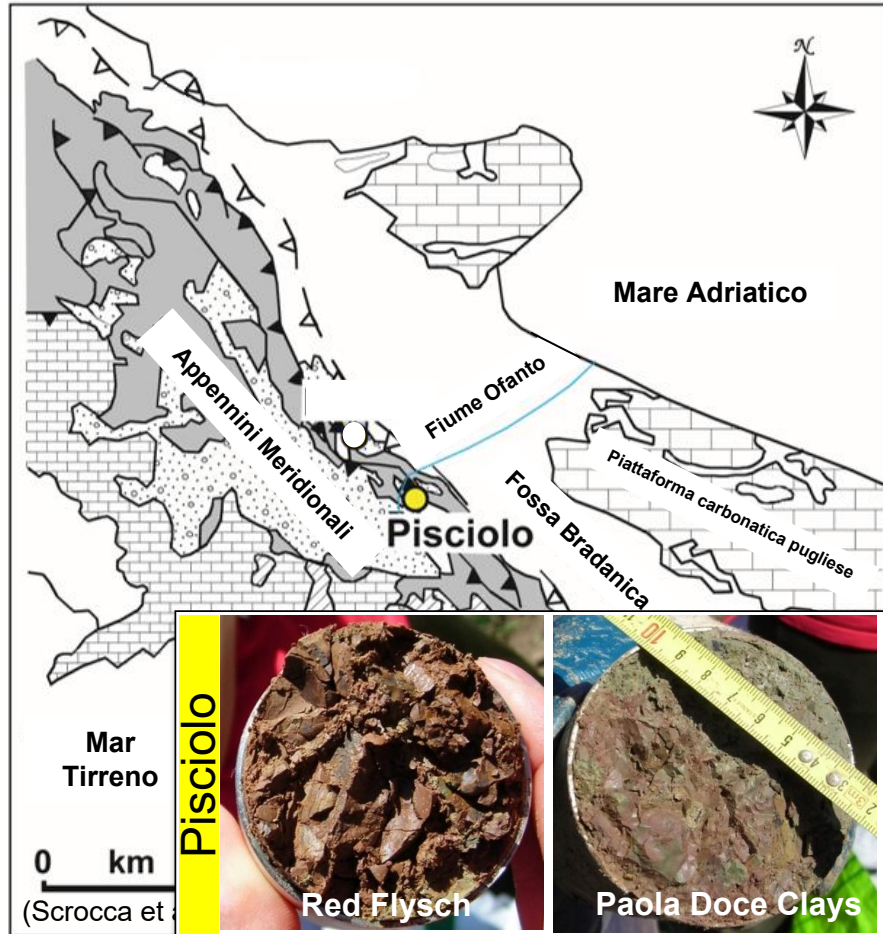


## Sezione B

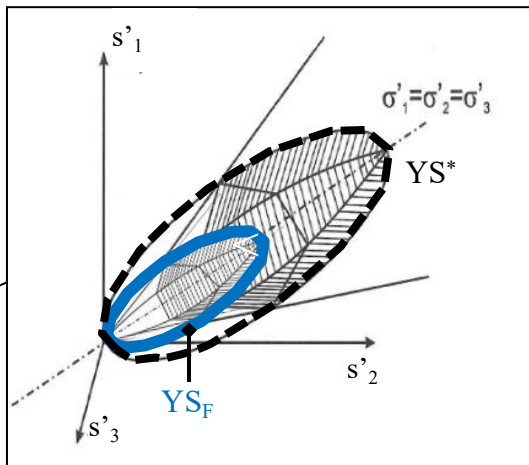
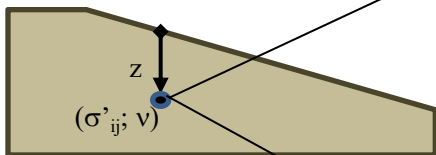


il principale **fattore di pendio predisponente** il processo di frana è la **debolezza della matrice argillosa dei flysch**

-  Depositi marini, vulcanici e continentali (Pliocene Medio-Olocene)
-  Depositi marini (Tardo Tortoniano-Tardo Pliocene)
-  Sedimenti terrigeni dell'Appennino Interno (Liguridi and Sicilide Units)
-  Piattaforma carbonatica appenninica
-  Sedimenti terrigeni dell'Appennino Esterno (Unità Lagonegresi-Molisane)
-  Piattaforma carbonatica pugliese



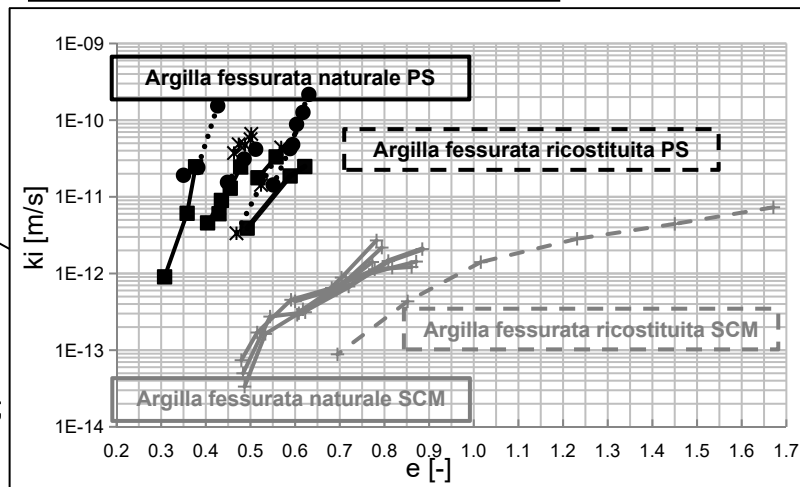
## Comportamento Idro-Meccanico di Argille Fessurate

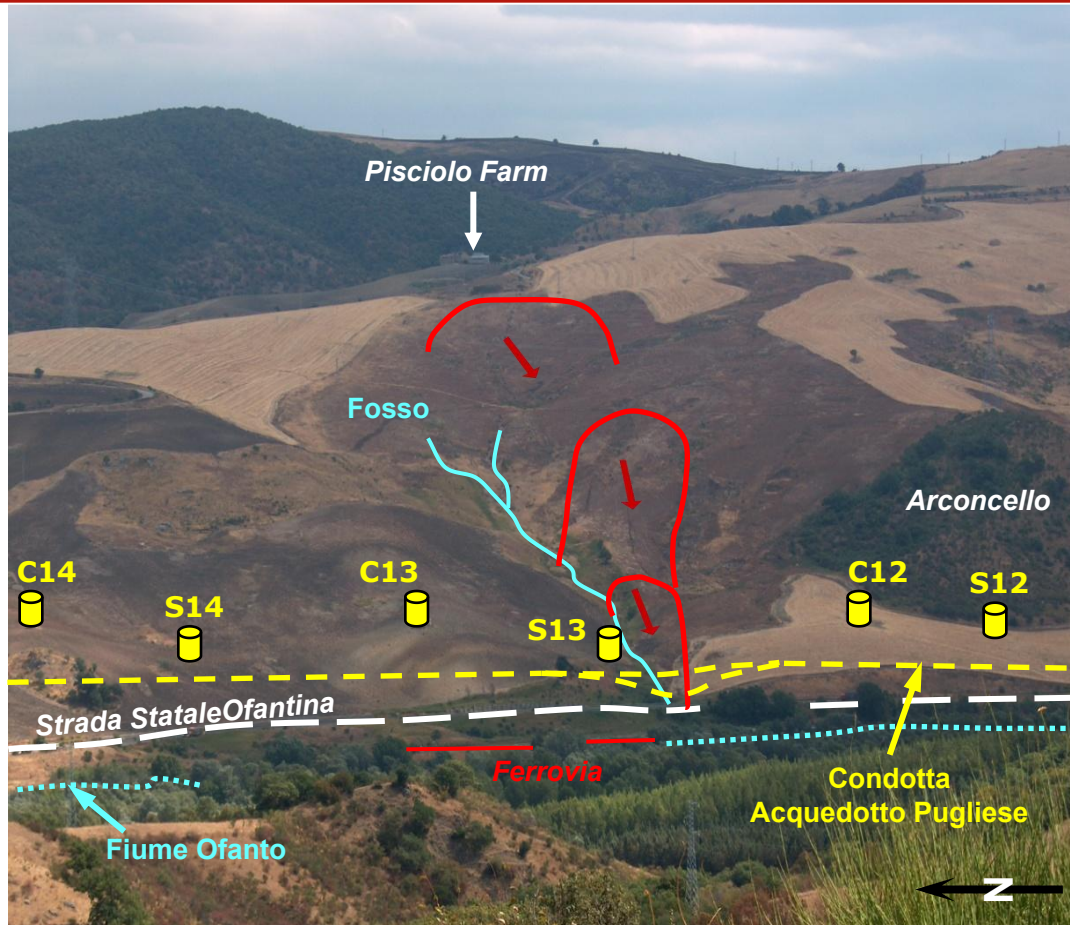


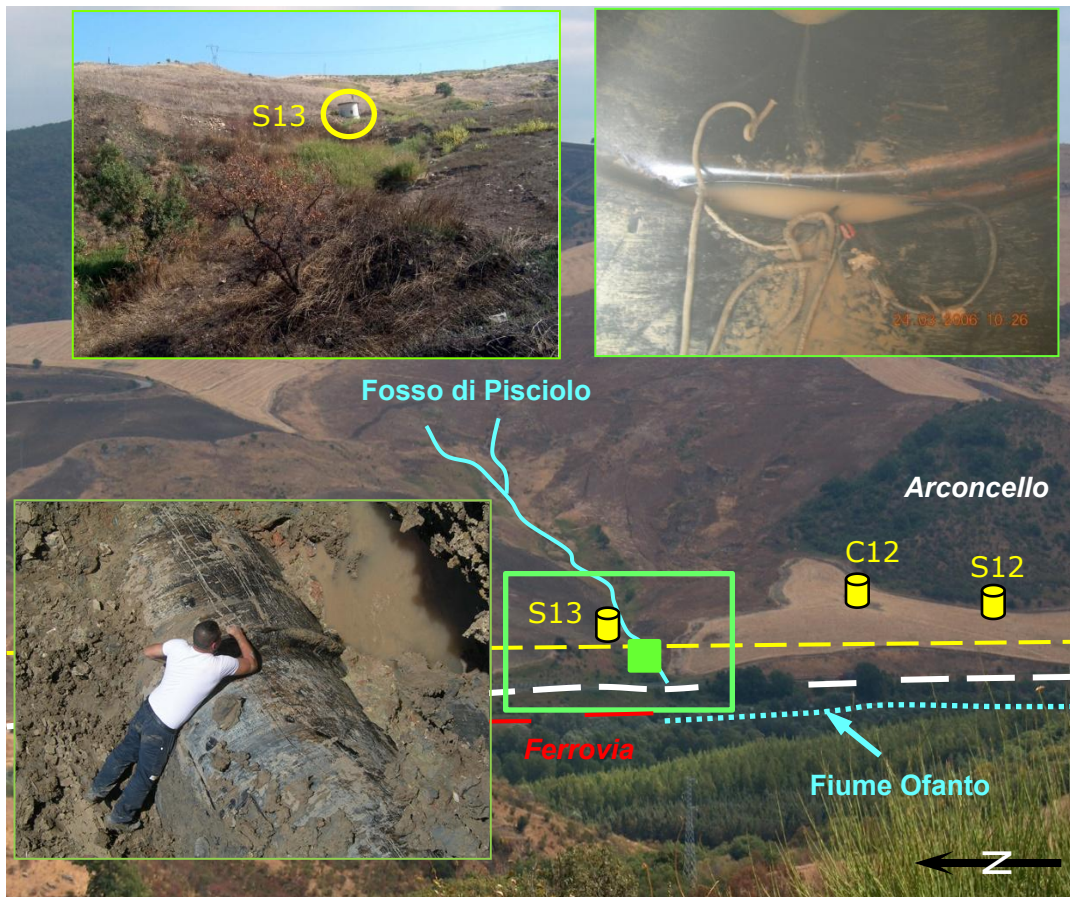
Vitone & Cotecchia,  
Geotechnique, 2011

Cotecchia, Pedone, Bottiglieri,  
Santaloia, Vitone, *Italian  
Geotechnical Journal*, 2014

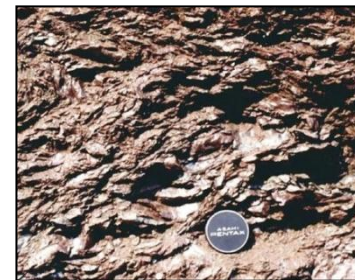
(Vitone, Guglielmi, Pedone, Cotecchia;  
*Geotechnique Letters*, 2019)

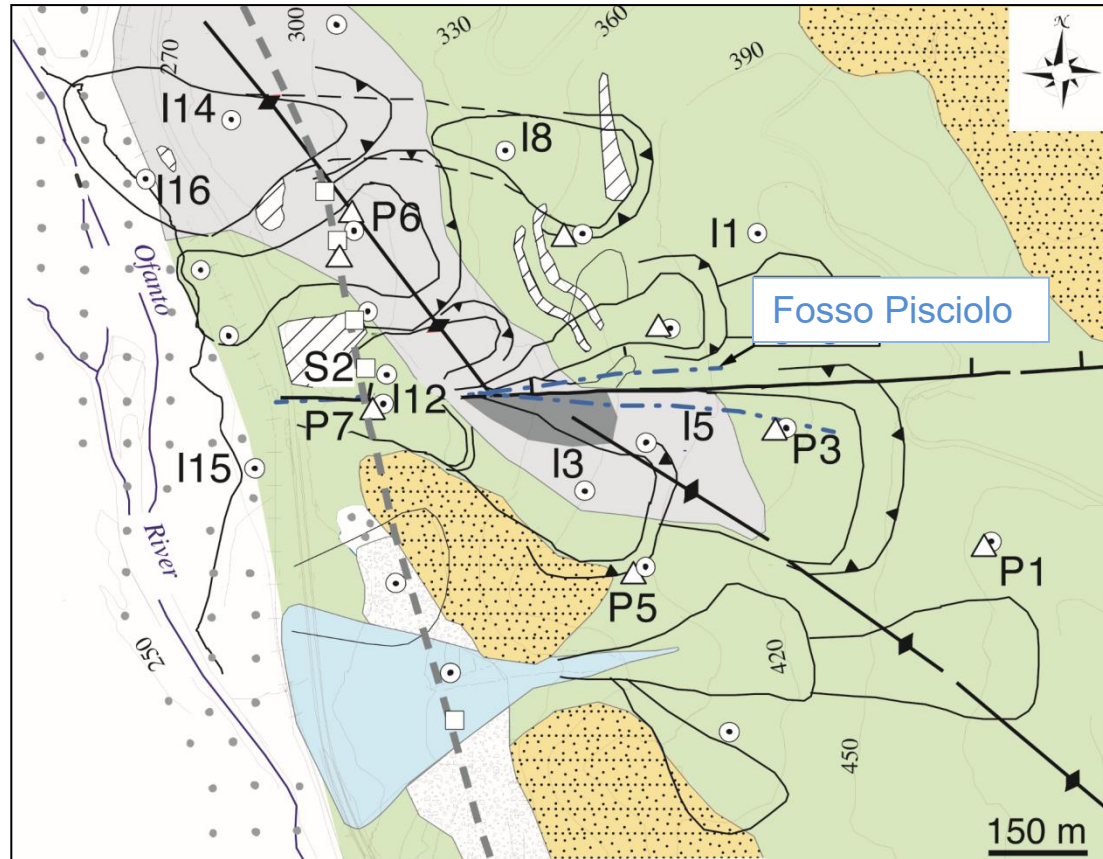


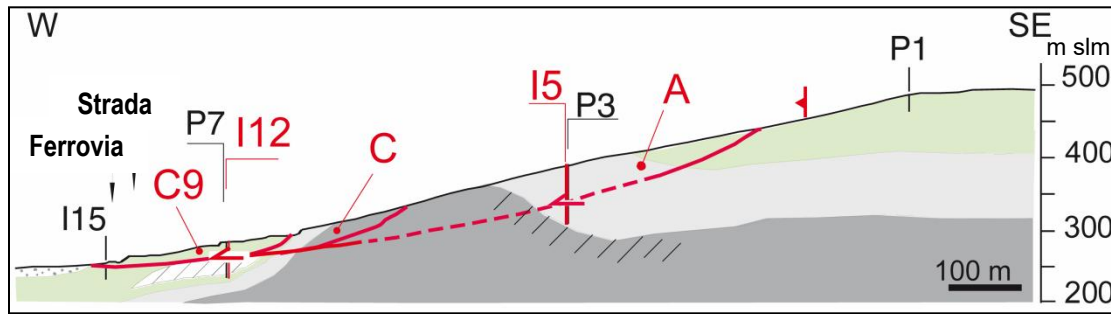
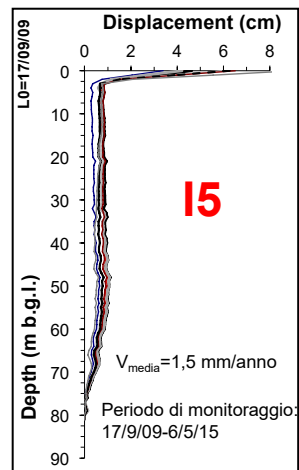
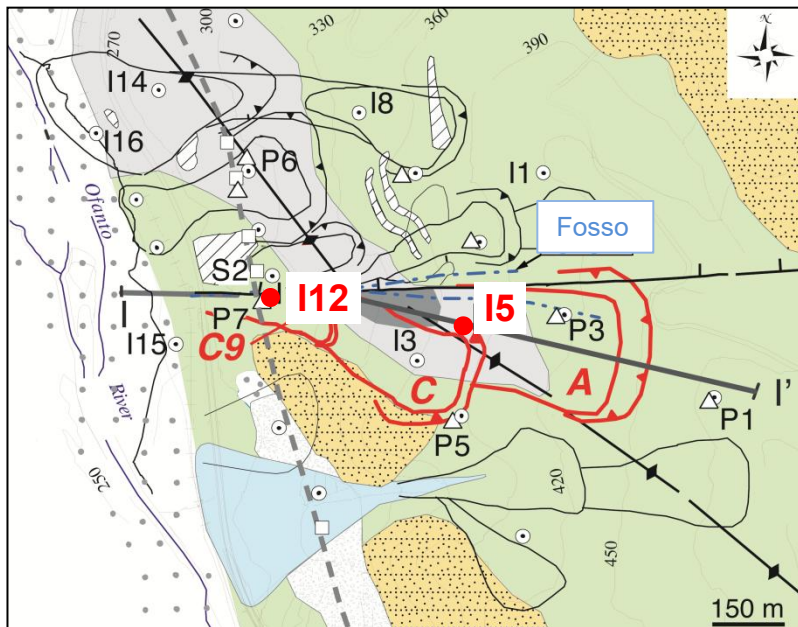
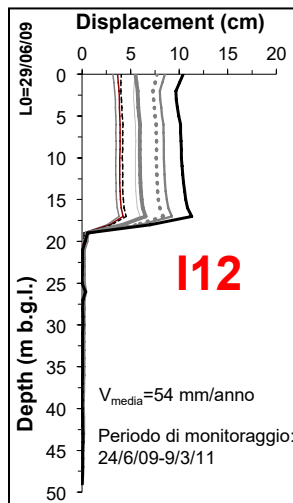




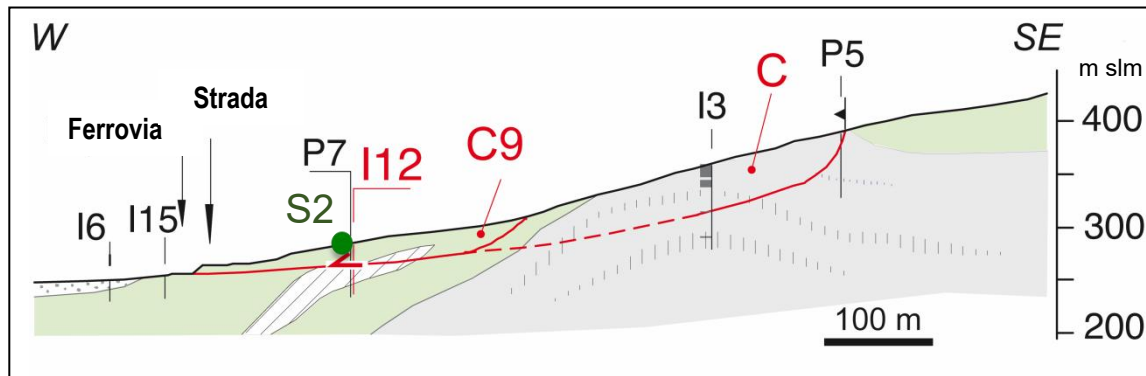
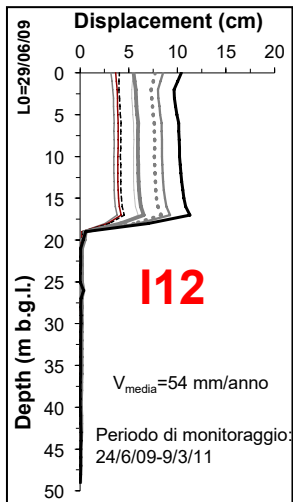
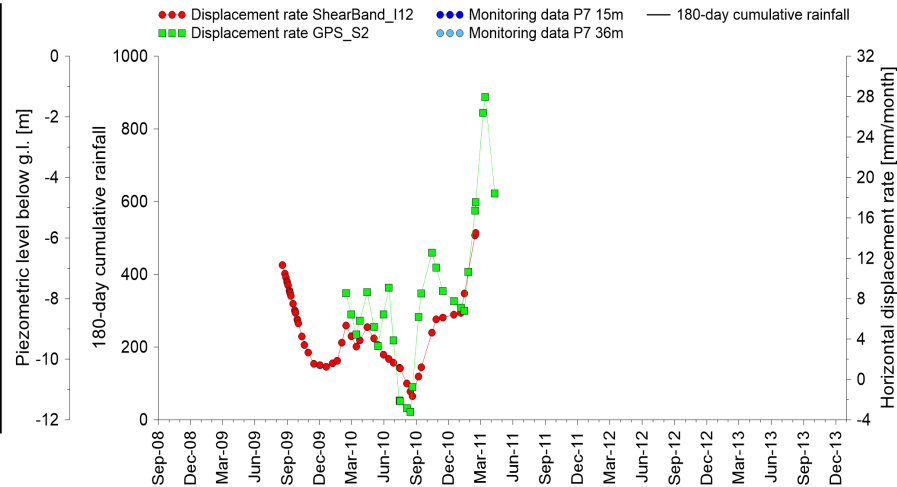
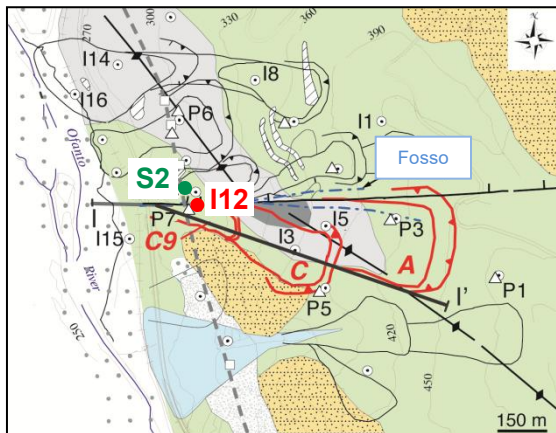
**Danni alle infrastrutture**

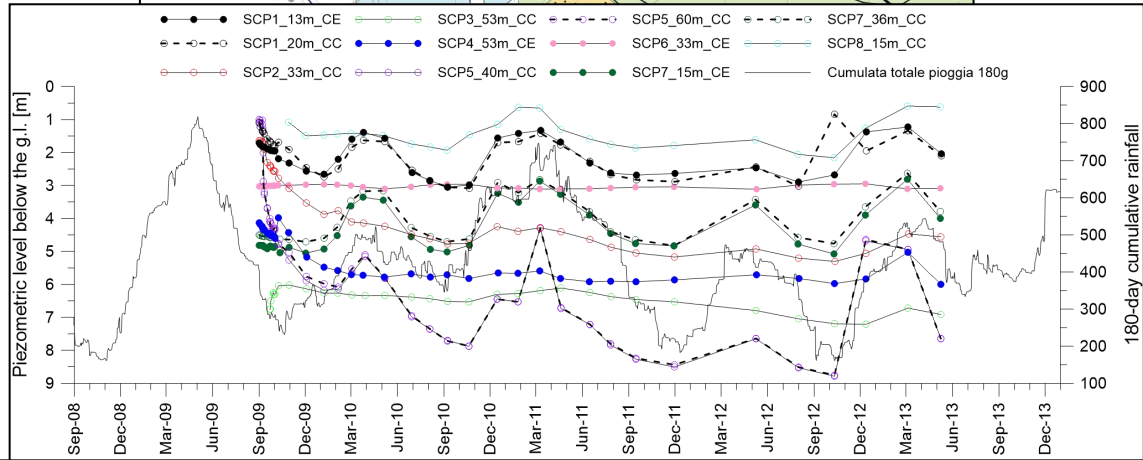
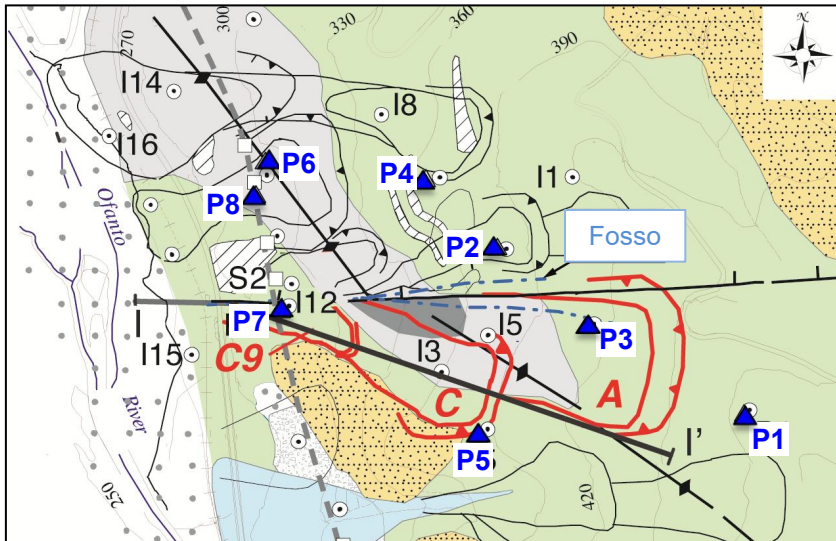


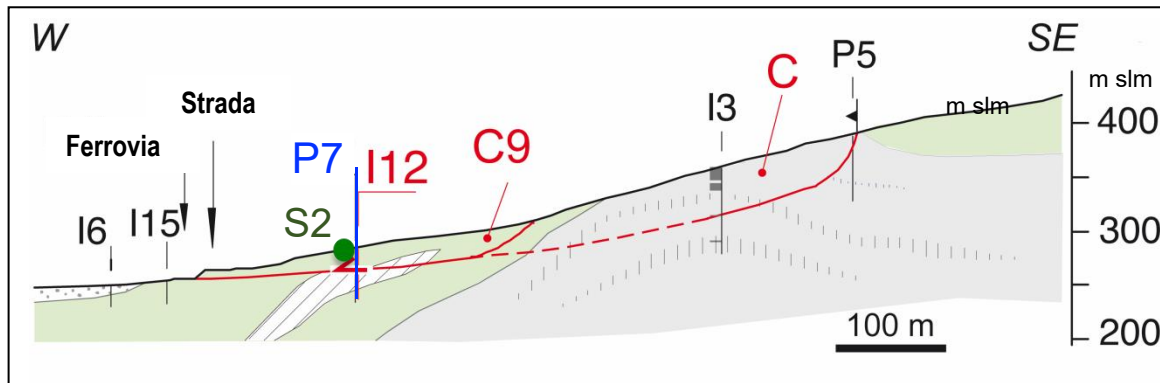
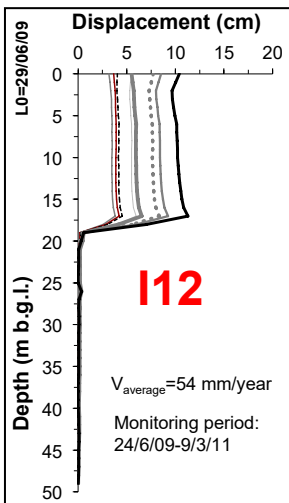
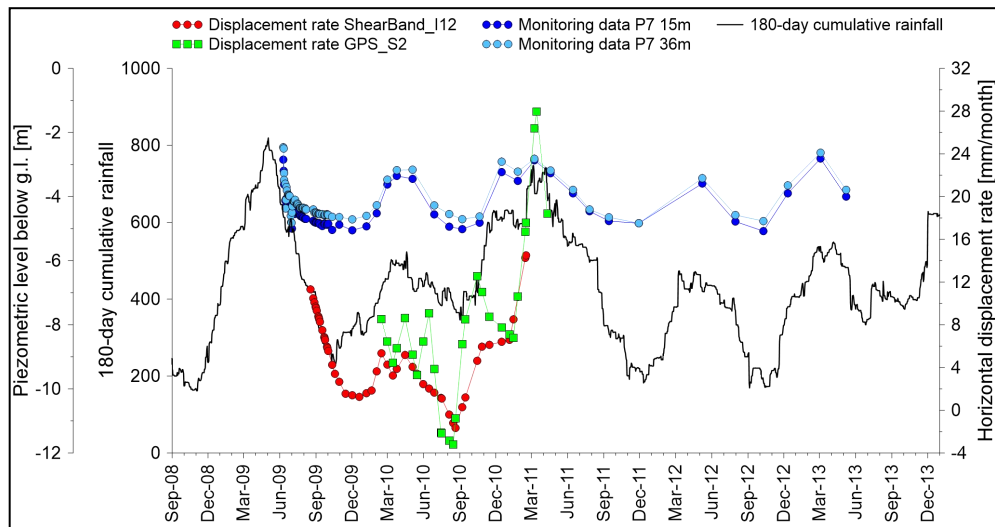
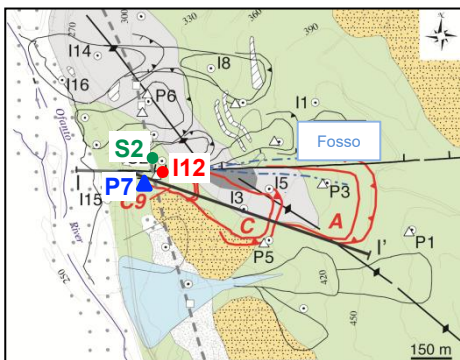










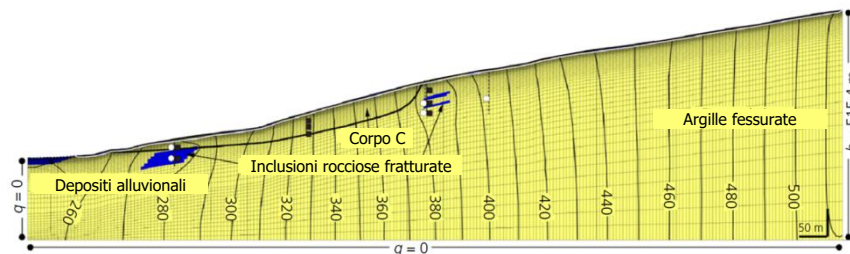
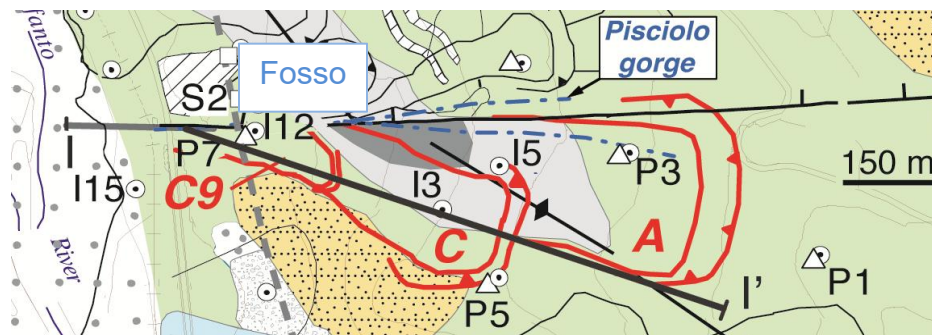


## Analisi dell'equilibrio del pendio

### Equazione di Richard's (1931)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(u_w) \left( \frac{\partial u_w}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \vartheta_w(u_w)}{\partial t}$$

- $\vartheta_w(u_w) = nS_r$   
Curva di ritenzione
- $k(u_w)$   
Funzione di conducibilità idraulica



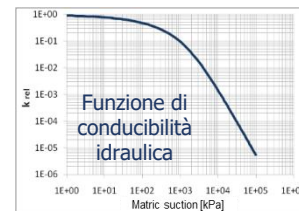
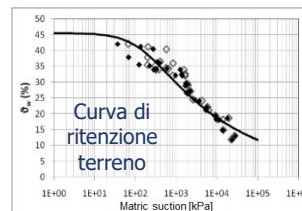
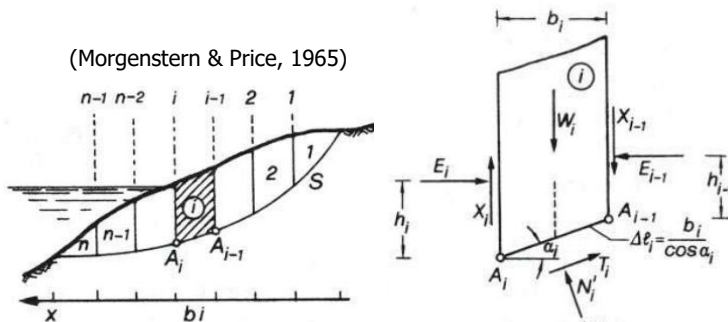
## Analisi dell'equilibrio del pendio

### Equazione di Richard's (1931)

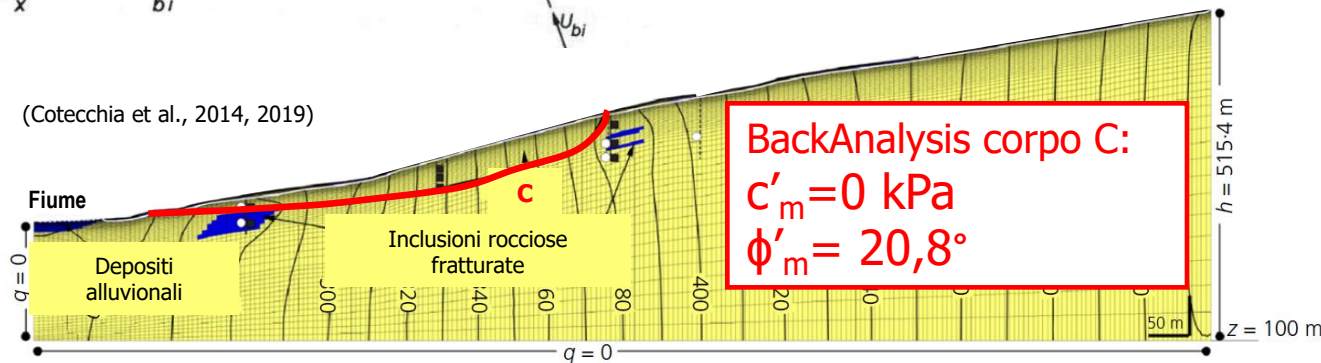
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(u_w) \frac{\partial u_w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(u_w) \left( \frac{\partial u_w}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \vartheta_w(u_w)}{\partial t}$$

$\vartheta_w(u_w) = nS_r$   
 Curva di ritenzione  
 $k(u_w)$   
 Funzione di  
 conducibilità idraulica

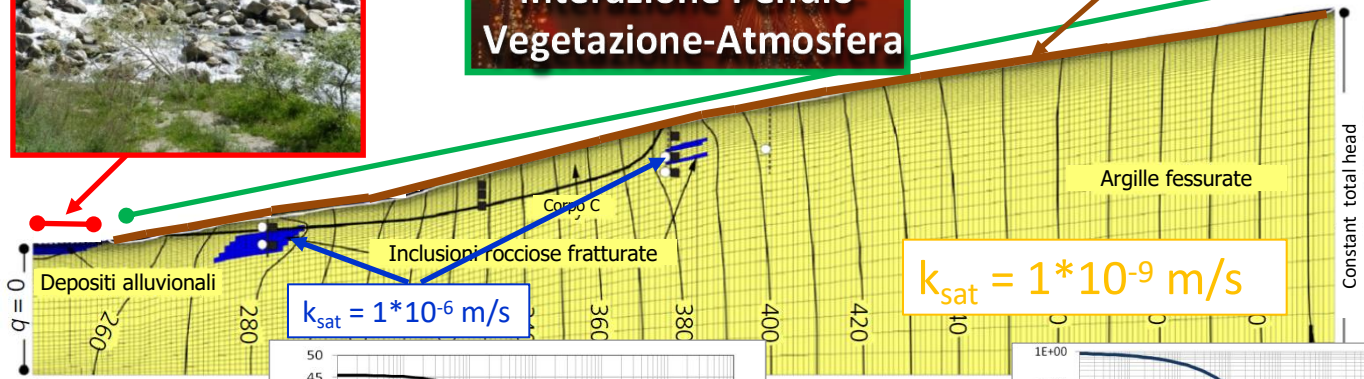
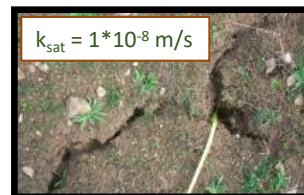
(Morgenstern & Price, 1965)



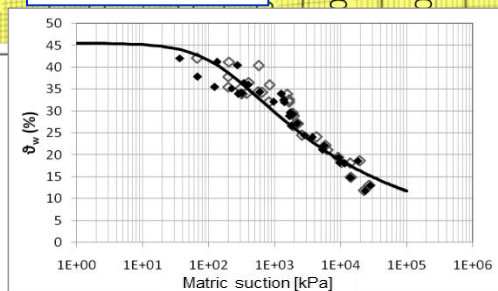
(Cotecchia et al., 2014, 2019)



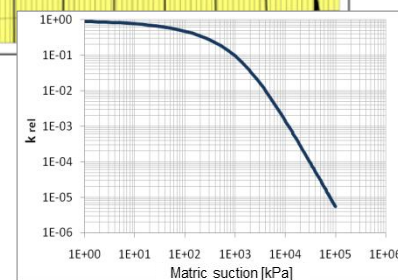
**BackAnalysis corpo C:**  
 $c'_m = 0 \text{ kPa}$   
 $\phi'_m = 20,8^\circ$



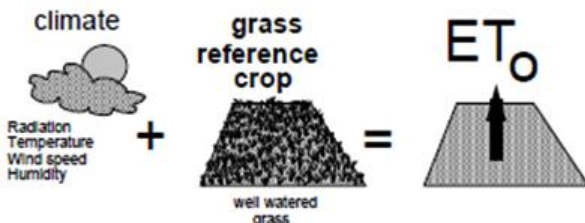
**Curva di ritenzione**



**Funzione di conducibilità idraulica**

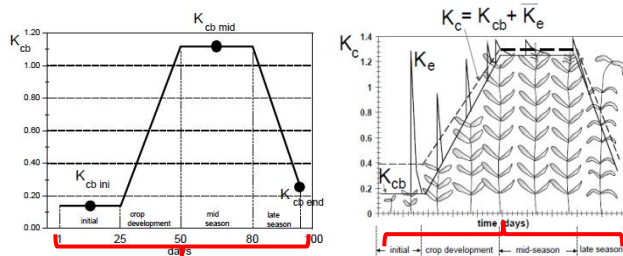


## Calcolo dell'evapotraspirazione ET: FAO PENMAN-MONTEITH (approccio a doppio coefficiente colturale)

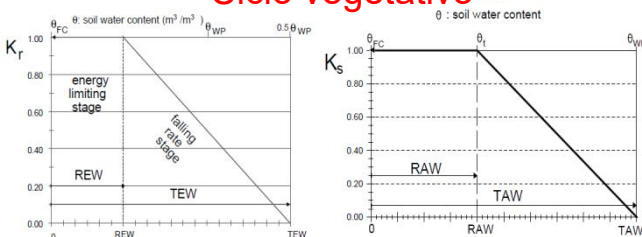


"A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of  $70 \text{ s m}^{-1}$  and an albedo of 0.23."

$ET_0$   
(ET di riferimento)



Ciclo vegetativo



In condizioni standard  
(potenziale)

$$E_P = K_E \times ET_0$$

$$T_P = K_{CB} \times ET_0$$



In condizioni non standard  
(reale)

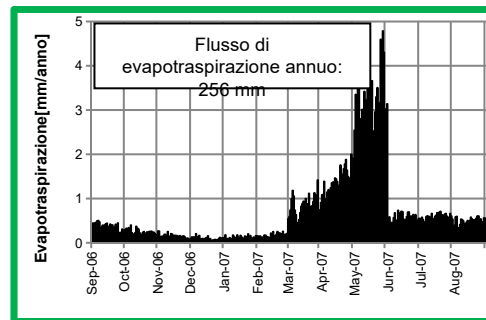
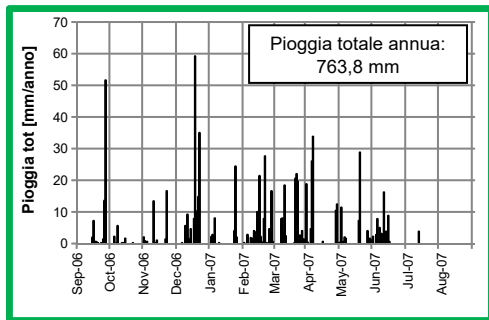
$$E_R = K_R \times E_P$$

$$T_R = K_S \times T_P$$

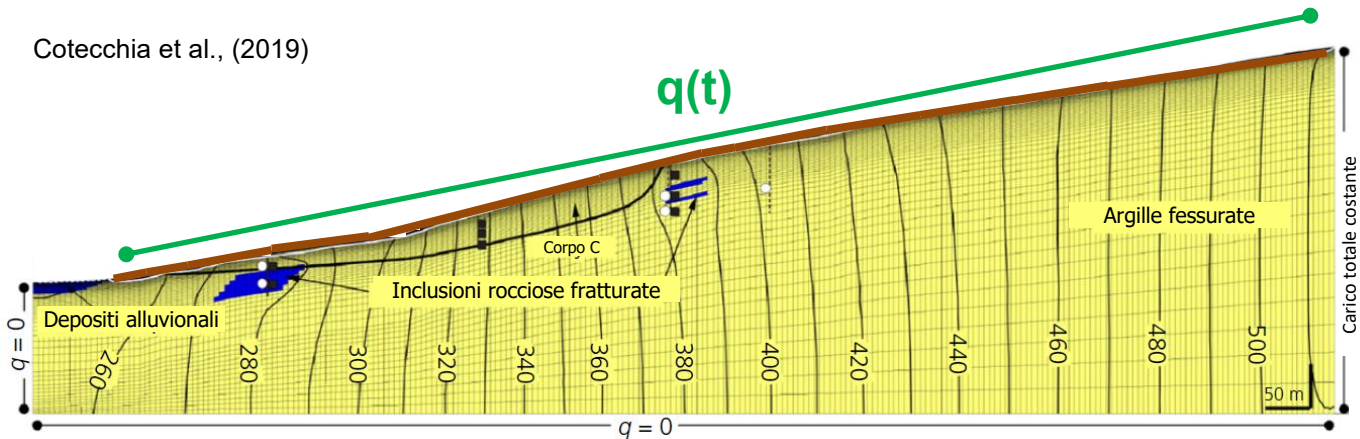


## Simulazione dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera con condizioni al contorno transitorie

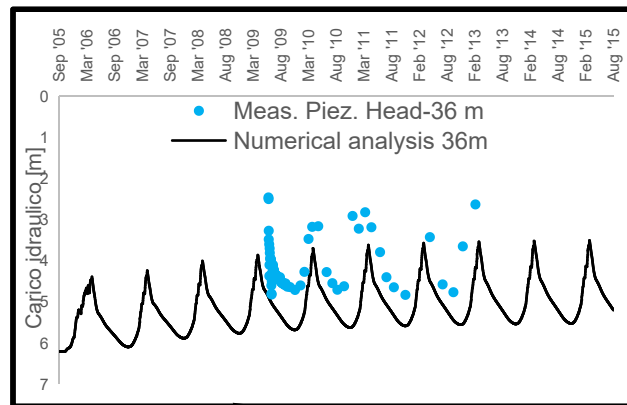
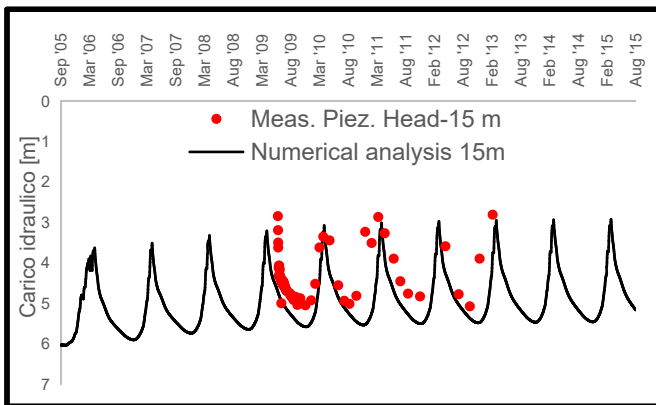
$q(t)$   
 Pioggia netta+ Runoff =



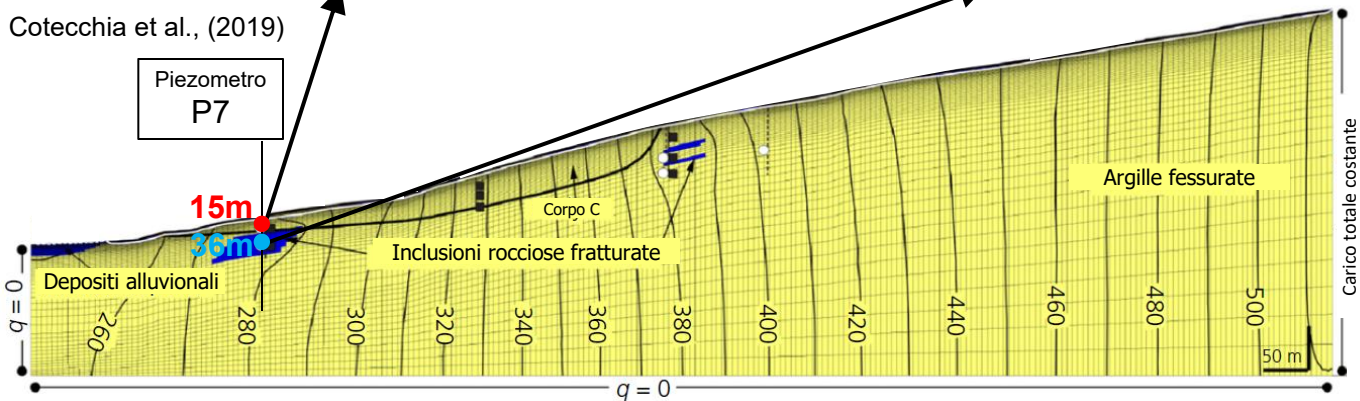
Cotecchia et al., (2019)



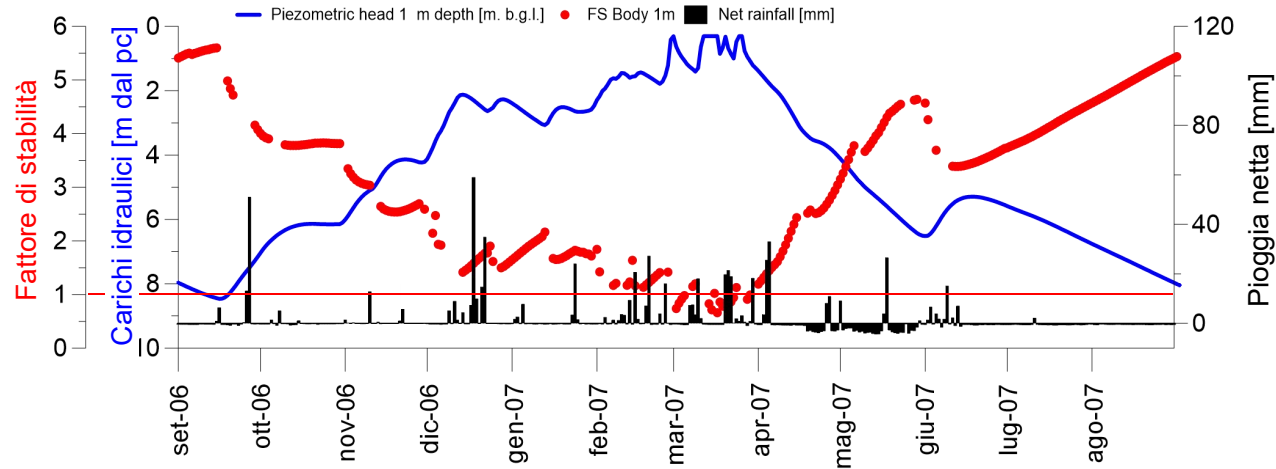




Cotecchia et al., (2019)

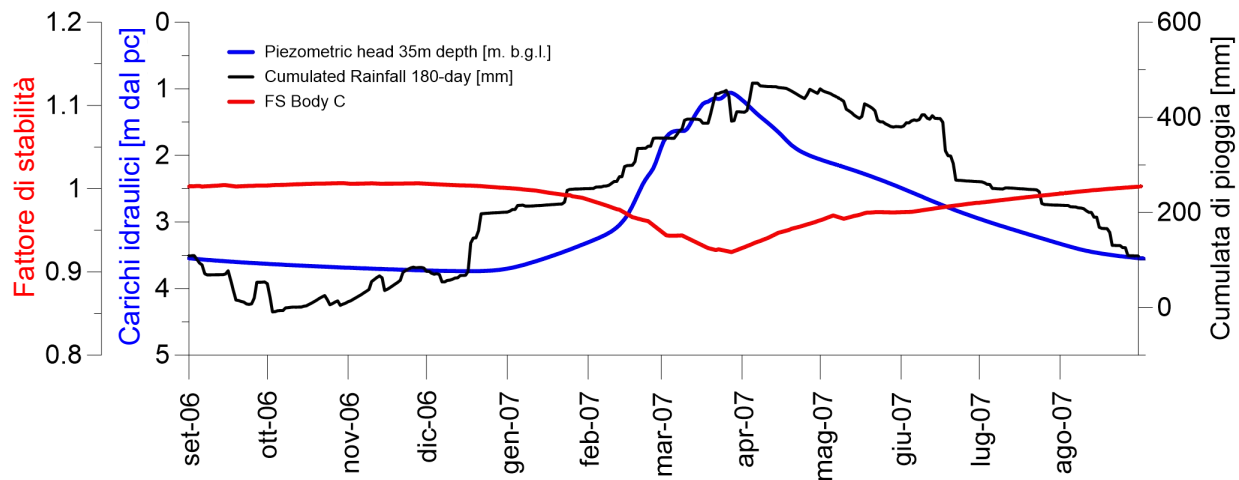


## Corpo di frana 1m



Cotecchia et al., (2019)  
 Tagarelli & Cotecchia, (2019)

## Corpo di frana C

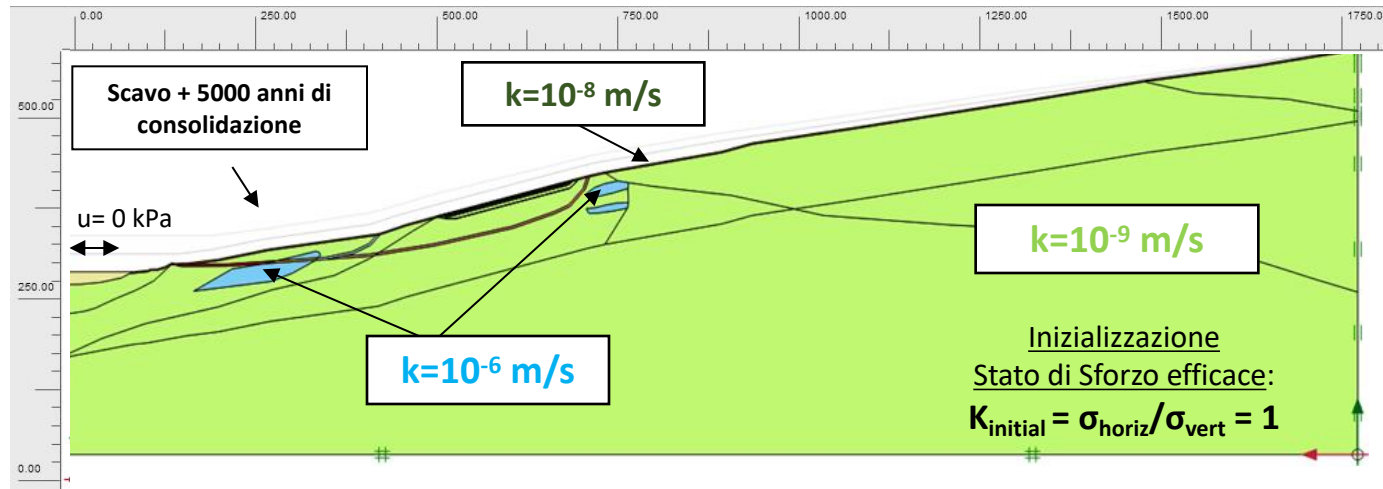


Cotecchia et al., (2019)

Tagarelli & Cotecchia, (2019)

## Modello Idro-Meccanico Accoppiato Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello geotecnico e inizializzazione dello stato di sforzo efficace

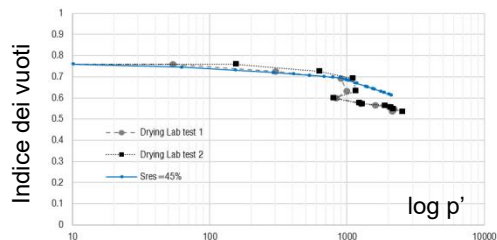
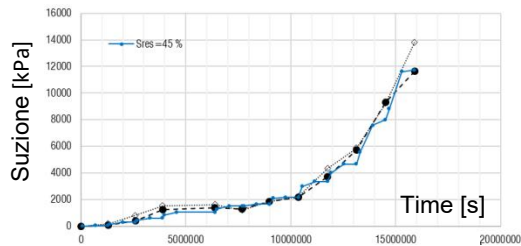


Tagarelli, (2019)

## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

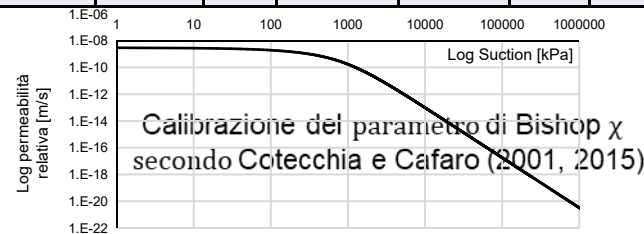
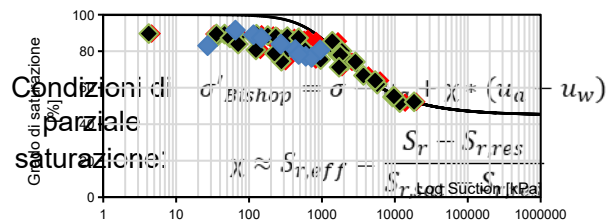
### Implementazione delle proprietà idro-meccaniche del materiale di pendio

Pedone, (2014)  
Tagarelli & Cotecchia, (2020)



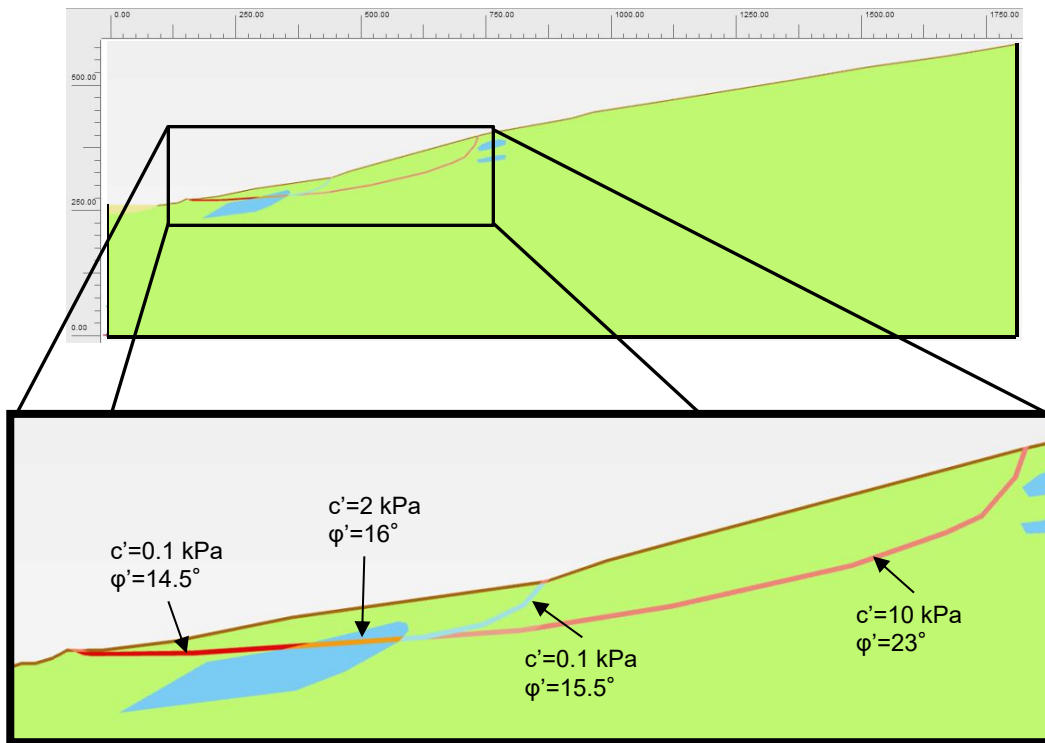
Argilla di Pisciole  
Cotecchia et al., (2014, 2019)

Peso dell'unità di volume terreno		Parametri meccanici (Mohr-Coulomb)					Proprietà idrauliche
$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu'$	$E'$ [kPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$\psi$ [°]	$k_{sat}$ [m/s]
<b>21</b>	<b>19</b>	<b>0,3</b>	<b>15000</b>	<b>15</b>	<b>23</b>	<b>0</b>	<b>3*10<sup>-9</sup></b>



## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

### Implementazione di bande di taglio pregresse



Proprietà  
meccaniche della  
preesistente  
banda di taglio

## Modellazione per l'analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Condizioni al contorno transitorie

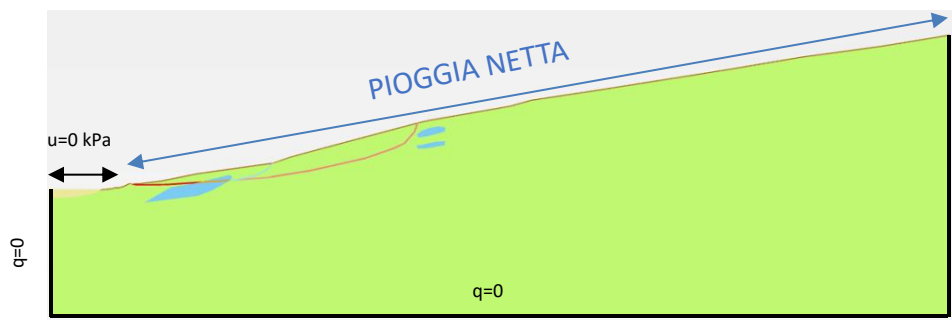
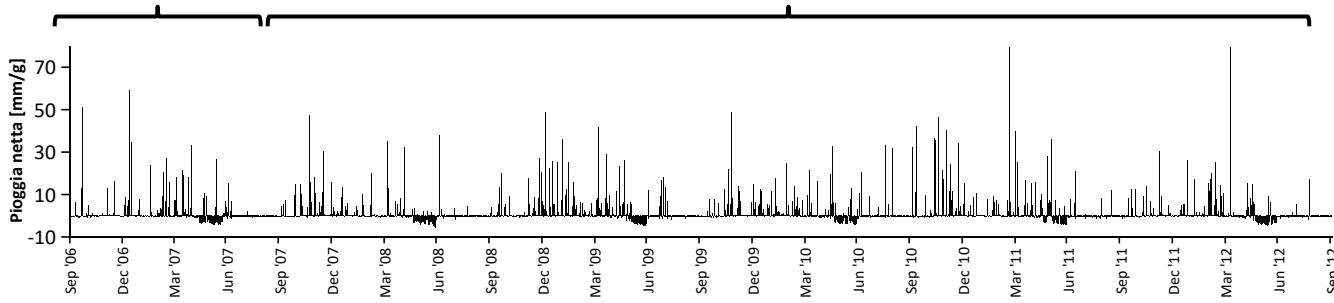
$$\text{PIGGIA NETTA} = \text{PIOGGIA TOTALE} - \text{EVAPOTRASPIRACIONE}$$

Dati rilevati in stazione pluviometrica

Metodo FAO Penman-Monteith

10 anni di PIOGGIA NETTA 2006-2007

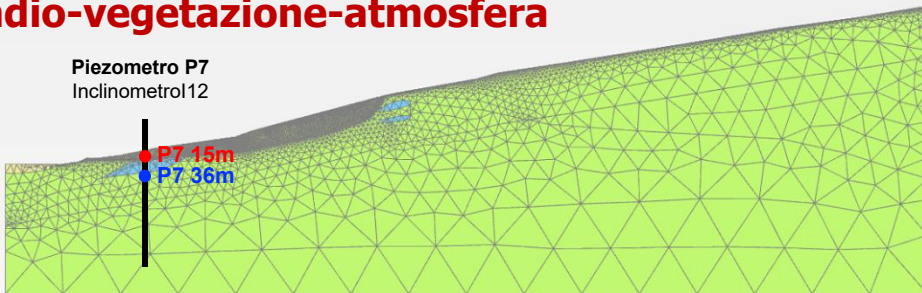
PIOGGIA NETTA 2007-2012



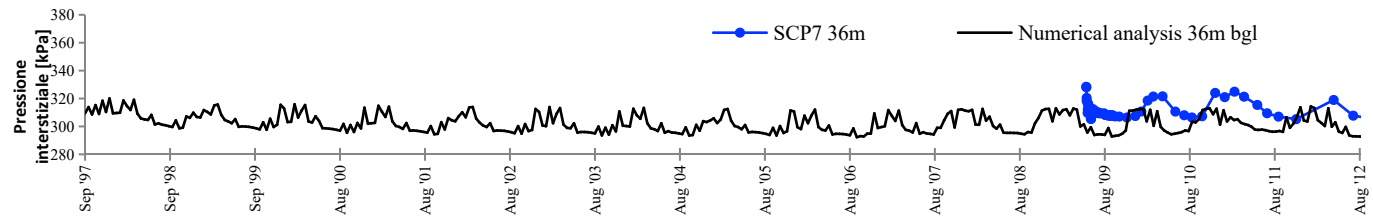
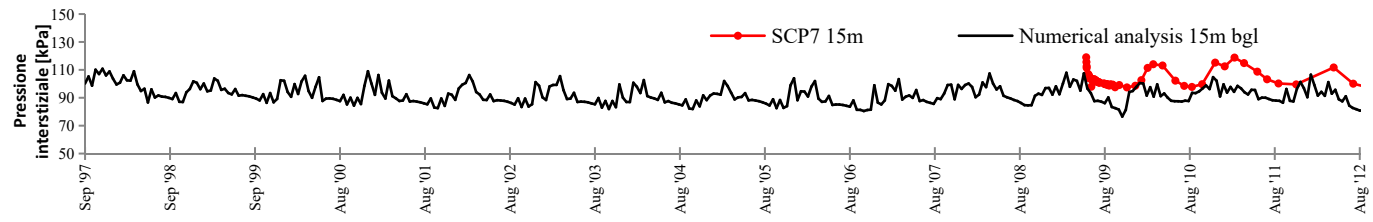
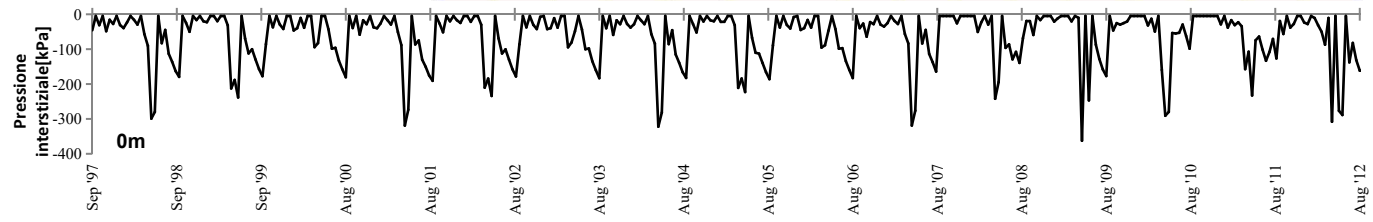
Tagarelli, (2019)

## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:  
pressioni interstiziali



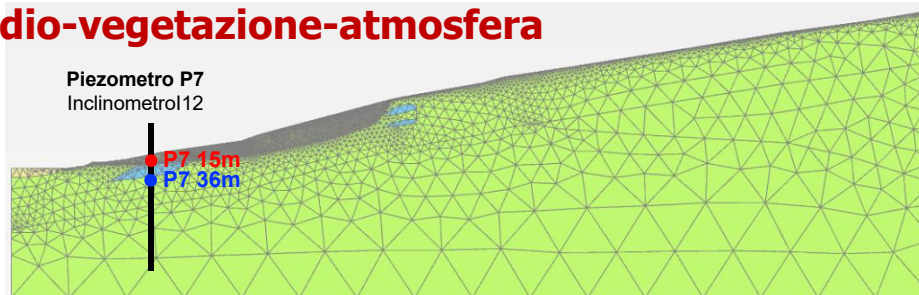
Tagarelli, (2019)



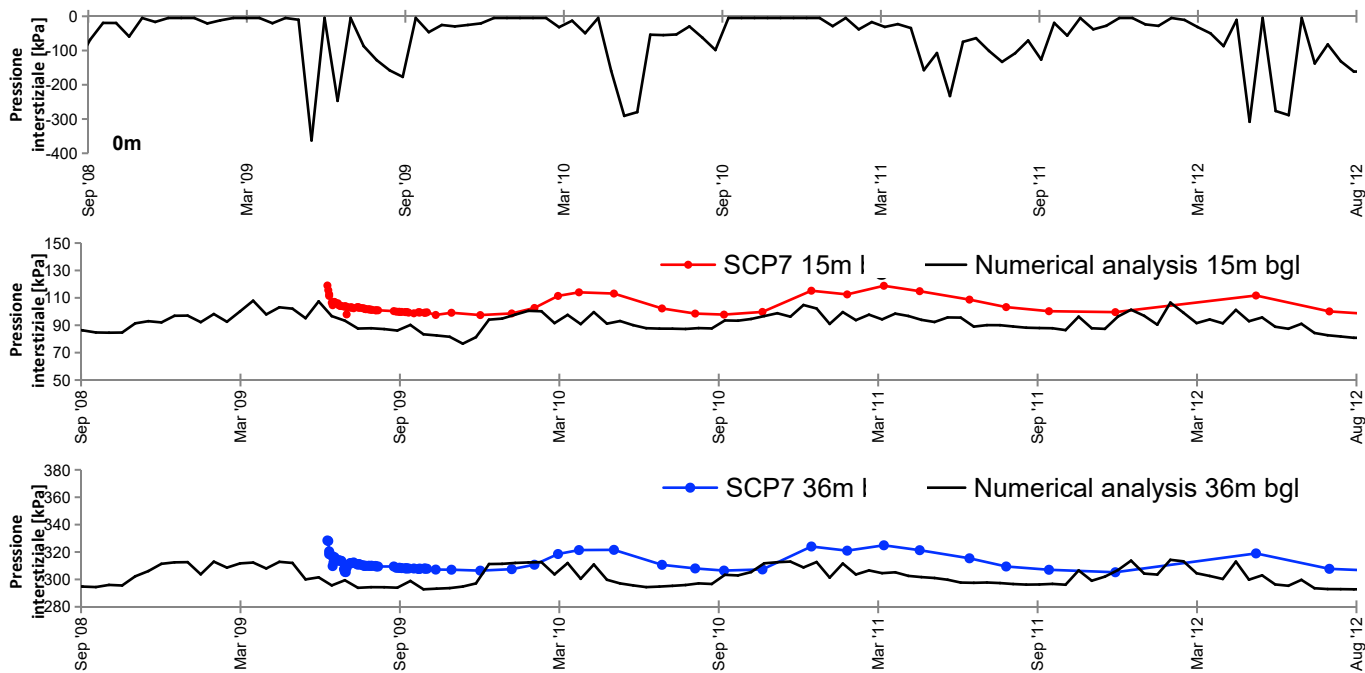


## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:  
pressioni interstiziali

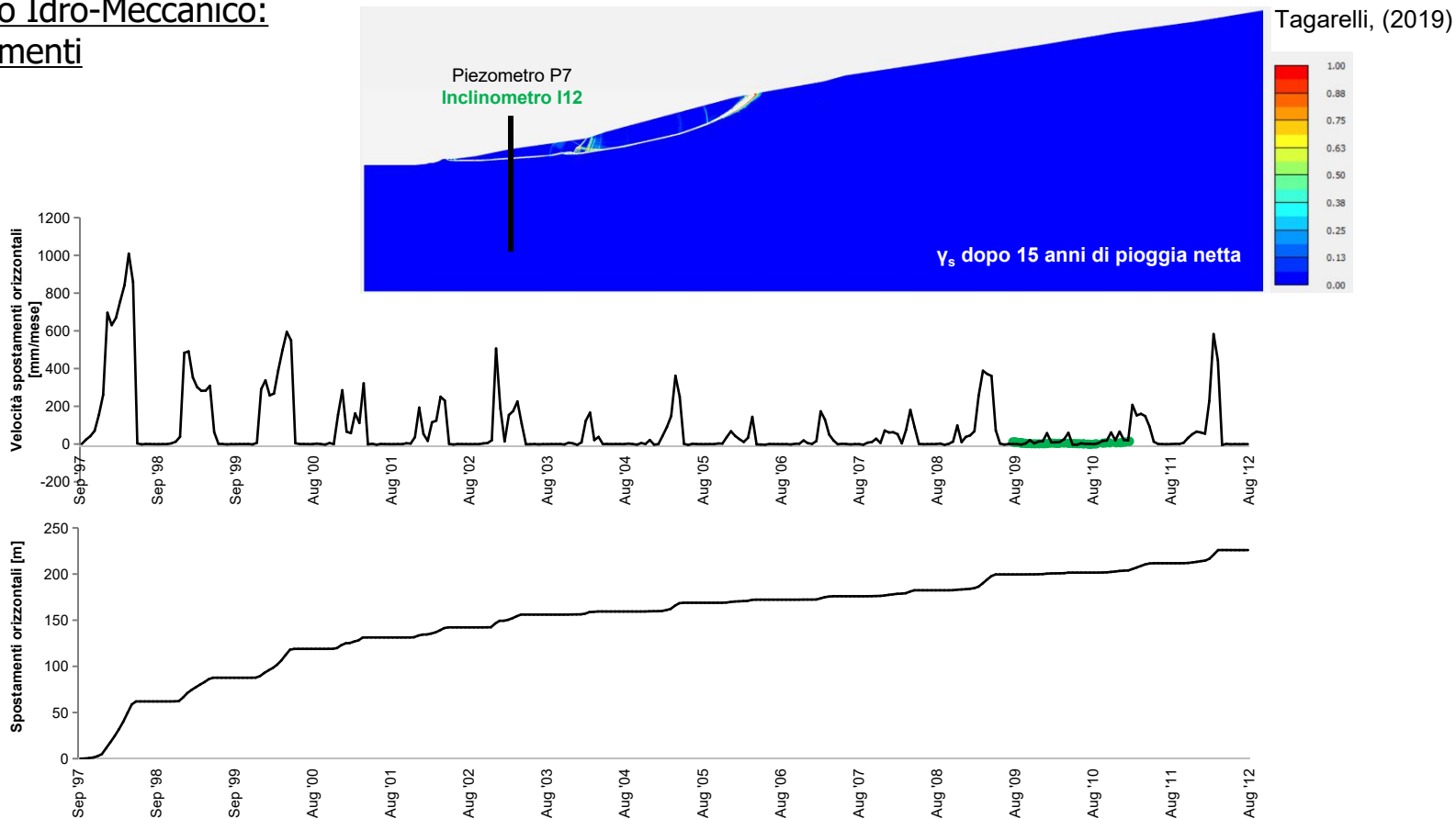


Tagarelli, (2019)



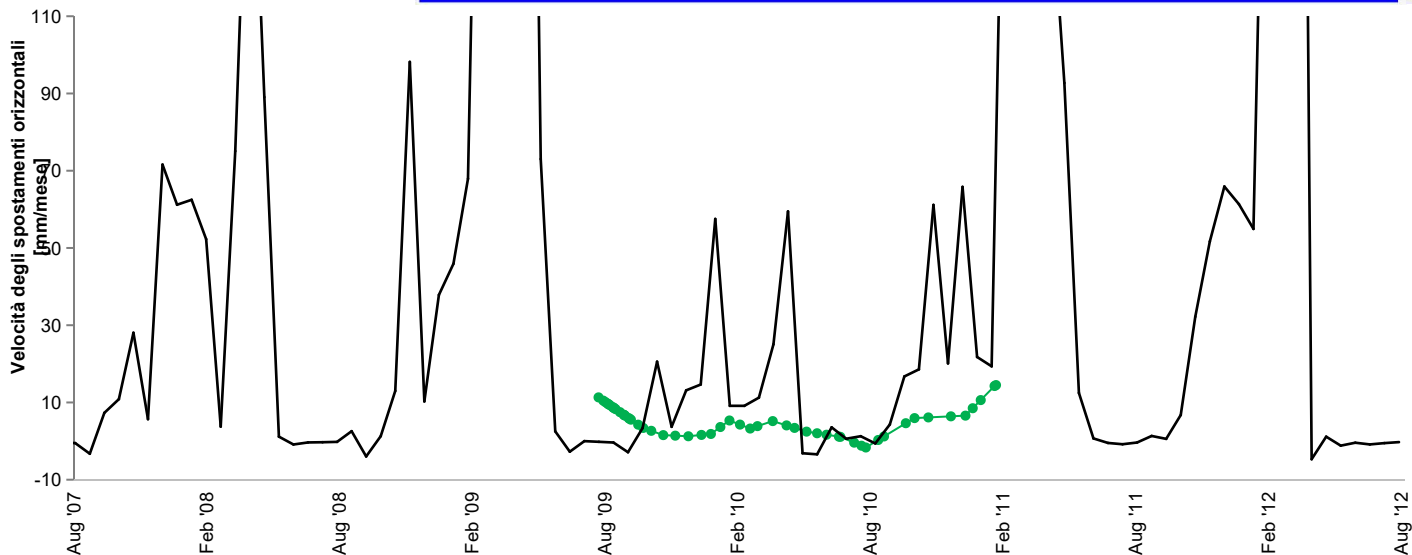
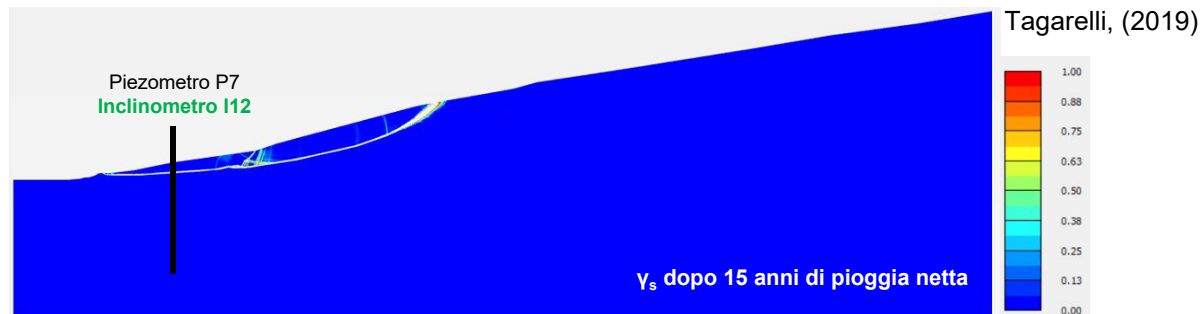
## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:  
spostamenti

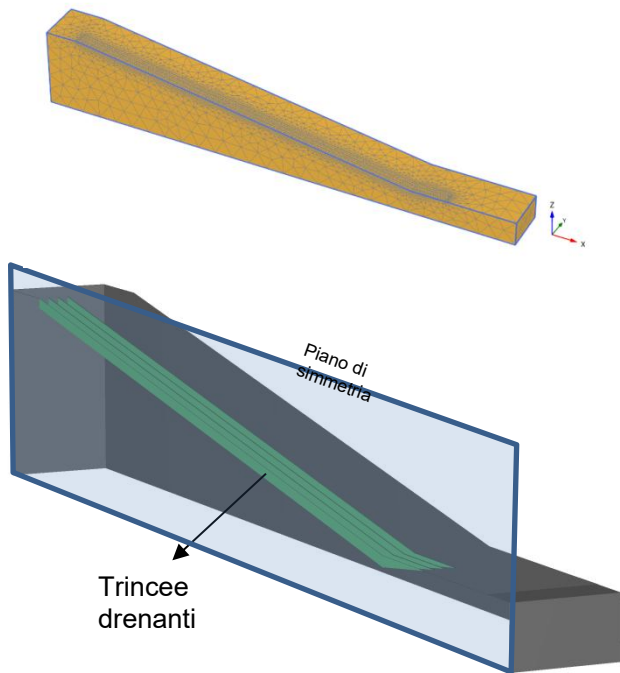


## Analisi dell'interazione pendio-vegetazione-atmosfera

Modello Idro-Meccanico:  
spostamenti

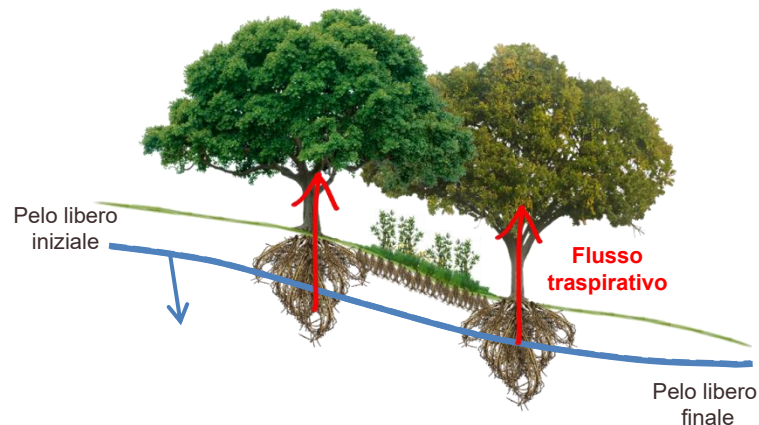


## TRINCEE DRENANTI PROFONDE

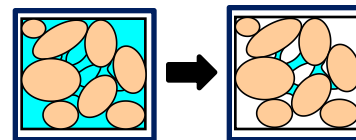


MODELLAZIONE 3D AVANZATA  
DELL'INTERAZIONE  
PENDIO-VEGETAZIONE-ATMOSFERA  
CON L'AZIONE DI UN SISTEMA DI TRINCEE  
DRENANTI PROFONDE

## USO DI VEGETAZIONE SELEZIONATA



ABBASSAMENTO del PELO LIBERO



$$u_{\text{iniziale}} > 0$$

$$u_{\text{finale}} \leq u_{\text{iniziale}}$$

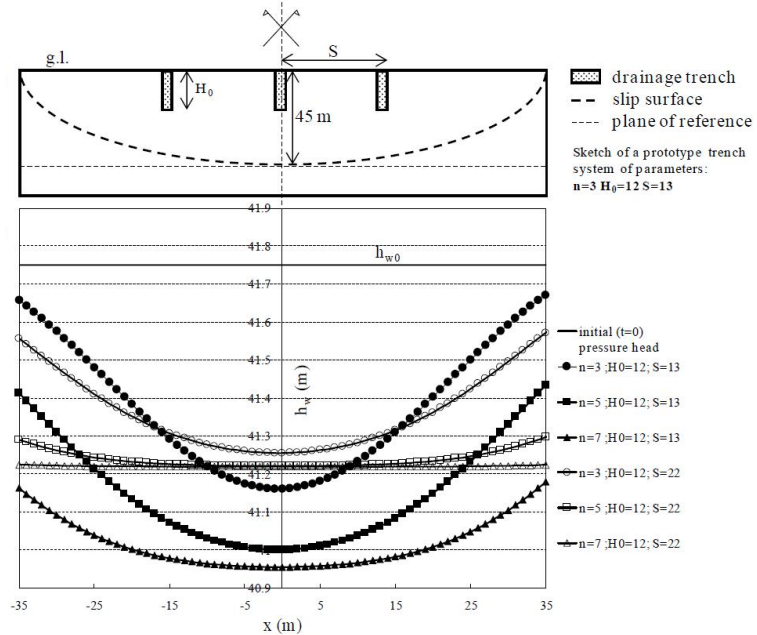
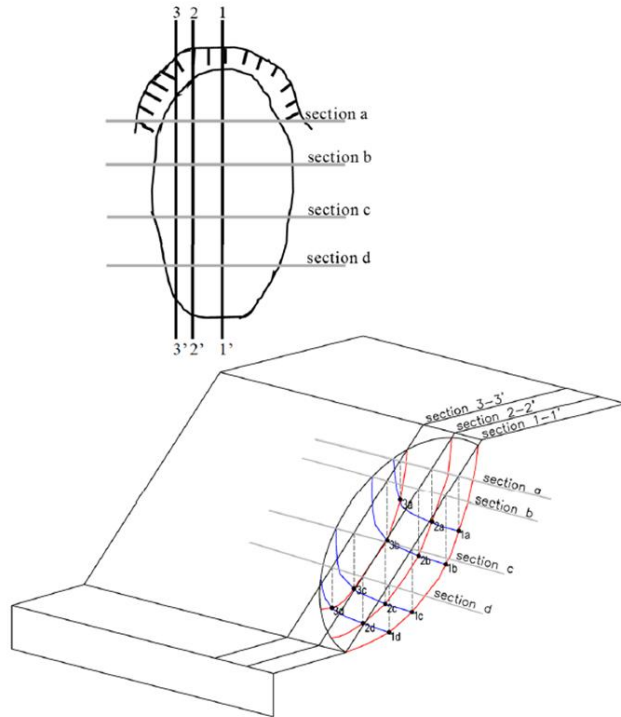
$$u_{\text{finale}} \leq 0 \quad (Sr \leq 100\%)$$

**Criterio di rottura:**  
Mohr-Coulomb-Terzaghi

$$\tau_f = c' + (\sigma - u)tg\phi'$$

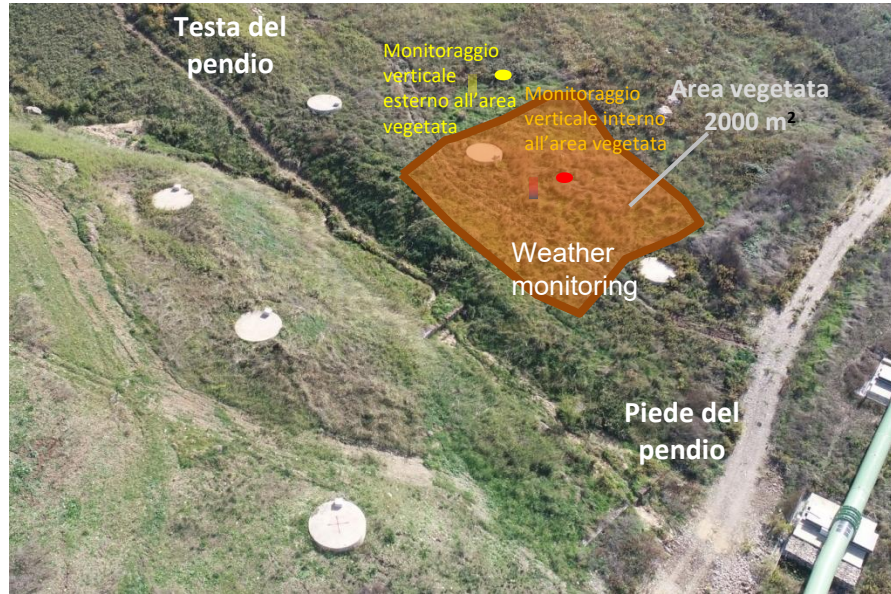
INCREMENTO DELLA  
RESISTENZA AL TAGLIO  
DEL SISTEMA  
TERRENO-RADICE

## Modellazione numerica 2D di trincee drenanti



Cotecchia et al., (2016)  
 Tagarelli & Cotecchia (2022)

## Crop-Test in situ sul versante di Pisciole



### All'interno dell'area vegetata

- Temperatura terreno: 1 e 2,5m
- Suzione: 1 and 2,5m
- Contenuto d'acqua: 0-1,6m
- Pressione interstiziale: 7m

### All'esterno dell'area vegetata

- Temperatura terreno: 1 and 2,5m
- Suzione: 1 and 2,5m
- Contenuto d'acqua: 0-1,6m
- Pressione interstiziale: 7m

Tagarelli & Cotecchia, (2022)