



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Sperimentazione di un sistema di monitoraggio elettrico permanente per la valutazione della vulnerabilità dei rilevati arginali in terra



A cura di:  
**GRETA TRESOLDI**  
*greta.tresoldi@polimi.it*



**fondazione**  
**cariplo**



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA**



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI**  
DI MODENA E REGGIO EMILIA

20 giugno 2017  
Politecnico di Milano

# Il progetto PROACTIVE



- Nuova modalità di approccio alla sicurezza del territorio
- Coniugare le azioni della PA con nuove tecnologie di telecomunicazioni e con l'uso di reti sociali
- Sensoristica di nuova generazione e coinvolgimento dei cittadini

PeopleOnTheMove  
SnowWatch  
**LeakWatch**



- 1) Monitorare le perdite della rete idrica urbana con metodi acustici
- 2) **Monitorare la filtrazione concentrata attraverso gli argini in terra di canali irrigui**



**POLITECNICO**  
MILANO 1863



## 2. Gli obiettivi

- Prospezioni geoelettriche *time lapse* per il riconoscimento di filtrazione concentrata
- Progettazione di un sistema di monitoraggio geoelettrico permanente
- Implementazione e installazione del sistema di monitoraggio, test di confronto con uno strumento commerciale
- Analisi dei dati di monitoraggio
- Studio della dipendenza che intercorre tra resistività, temperatura e precipitazioni
- Calibrazione di una curva resistività/contenuto d'acqua
- Discussione dei vantaggi derivanti dall'utilizzo di dati provenienti dal monitoraggio per implementare analisi di filtrazione e stabilità

### 3. Il rischio idrogeologico connesso all'instabilità arginale

Rischio= f(Pericolosità, Esposizione, Vulnerabilità)

- Monitoraggio degli argini grazie a Vigilanza e Polizia Idraulica (R. D. 523/1904)
- Ricognizione grazie ai volontari della PC
- Manutenzione ordinaria ad opera dei Consorzi di Bonifica (L.R. 7/2003)
- Normative delle singole regioni

MONITORAGGIO PERIODICO E VISIVO AD OPERA DI PERSONALE TALVOLTA SENZA ADEGUATA PREPARAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA



*Rottura dell'argine del Secchia  
(Modena, gennaio 2014)*

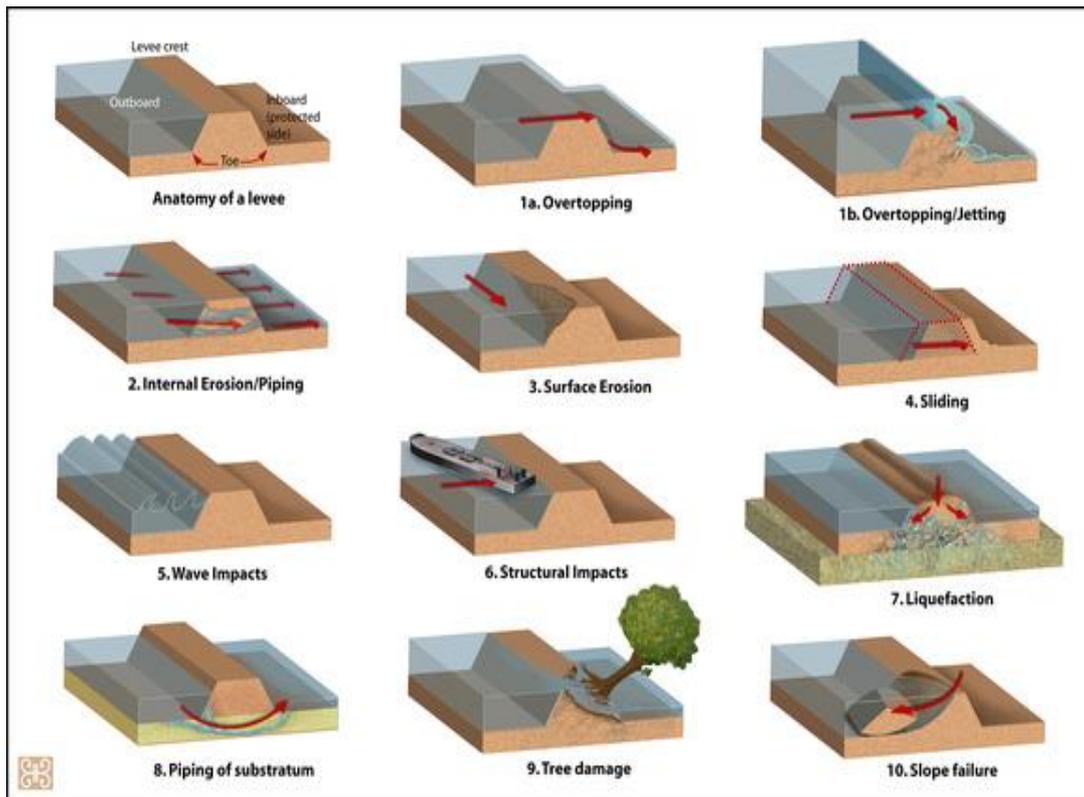


*Scavo di un argine causato da nutrie  
(Legnago, agosto 2015)*

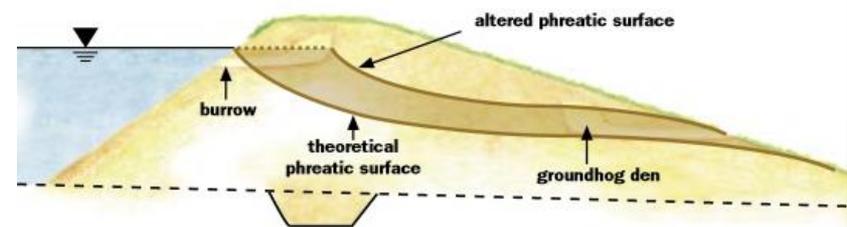
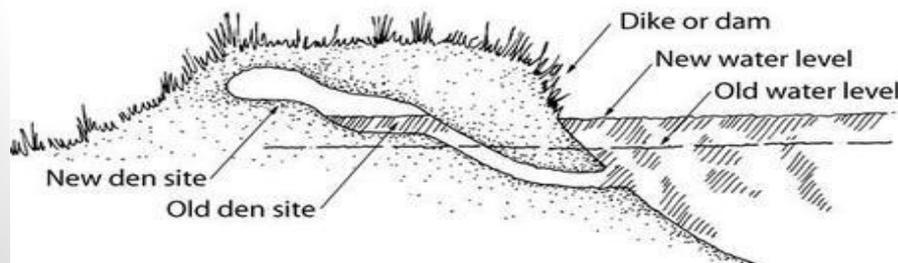
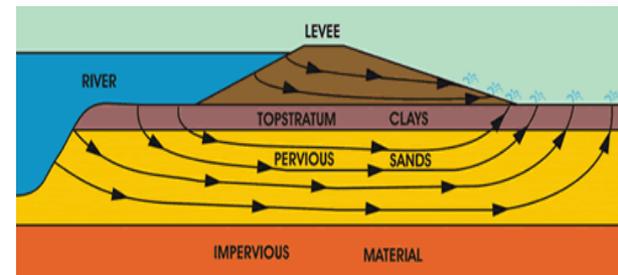


*Rottura dell'argine del Serchio  
(Nodica, dicembre 2009)*

# 3. Il rischio idrogeologico connesso all'instabilità arginale



- 1) UnderSeepage
- 2) Piping

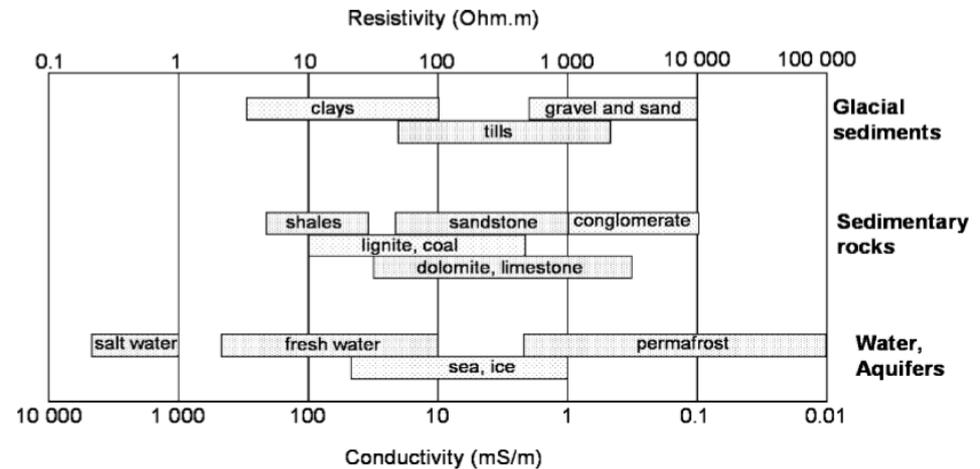


# 4. L'influenza di temperatura e precipitazioni sulla resistività

## La temperatura

Resistività funzione di:

- Natura dei componenti del suolo
- Caratteristiche spaziali dei vuoti
- Contenuto d'acqua
- Resistività dei fluidi circolanti
- **Temperatura**



(Samouelian, 2005)

- L'innalzamento della temperatura provoca una diminuzione di resistività
- Modelli che legano le due variabili: lineare (Hayashi, 2004; Corwin and Lesh, 2005), a potenza (Besson et al, 2008), esponenziale (Sheet and Hendrickx, 1995; Durlless, 1999; Luck et al., 2005), polinomiale (Rhoades et al., 1999)

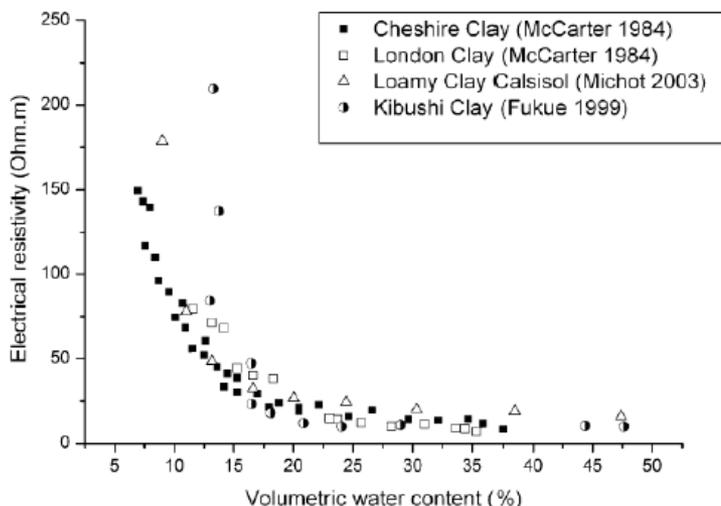
Secondo Ma et al. (2010):  
$$\rho_{25} = \rho_t [1 + \delta(T - 25)]$$

POCHI ESEMPI DI CORREZIONI DI MISURE IN CAMPO  
DIFFICILE APPLICAZIONE SU UN MONITORAGGIO DI  
LUNGO PERIODO

Dove  $\rho_{25}$ : resistività riportata a 25 °C;  $\rho_t$ : resistività alla temperatura dell'aria T (°C);  $\delta$ : fattore che indica la variazione di resistività legata alla variazione di 1 °C, variabile da 0.0191 °C<sup>-1</sup> (Hayashi, 2004) a 0.025 °C<sup>-1</sup> (Besson et al., 2008).

# 4. L'influenza di temperatura e precipitazioni sulla resistività

## Le precipitazioni



## Indagini *time lapse*:

- Possibilità di evitare le precipitazioni
- Studio del tempo da far trascorrere per ripetere la misura

Li L., Li H., Xiang B., et al. (2009)  
variabili considerate: durata precipitazione, quantità di pioggia

## Monitoraggio permanente:

- Importanza di registrare le precipitazioni
- Possibilità di valutare l'infiltrazione
- Influenza delle piogge su resistività e contenuto d'acqua

MANCANZA DI FORMULAZIONI TEORICHE CHE LEGHINO I PARAMETRI DELLE PRECIPITAZIONI ALLA VARIAZIONE DI RESISTIVITA'

ANALISI DEI DATI DI MONITORAGGIO PER VALUTARE QUALITATIVAMENTE LA RISPOSTA DEL TERRENO ALL'EVENTO PRECIPITATIVO

# 5. Inquadramento del sito d'indagine

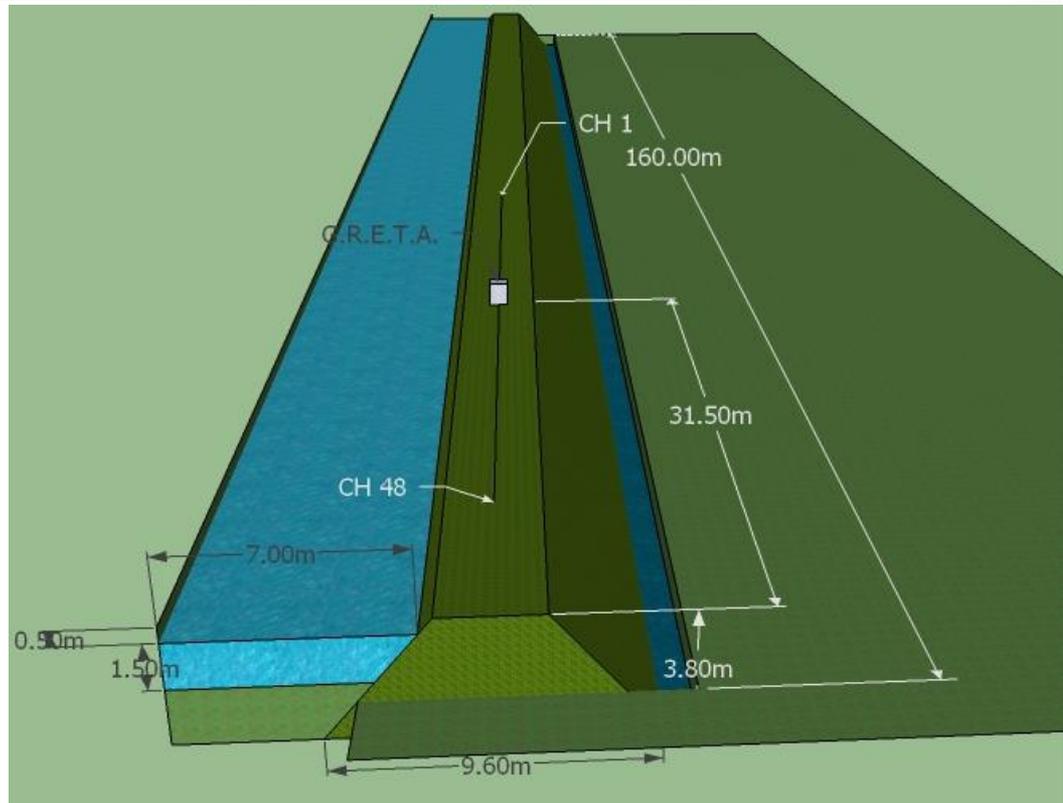
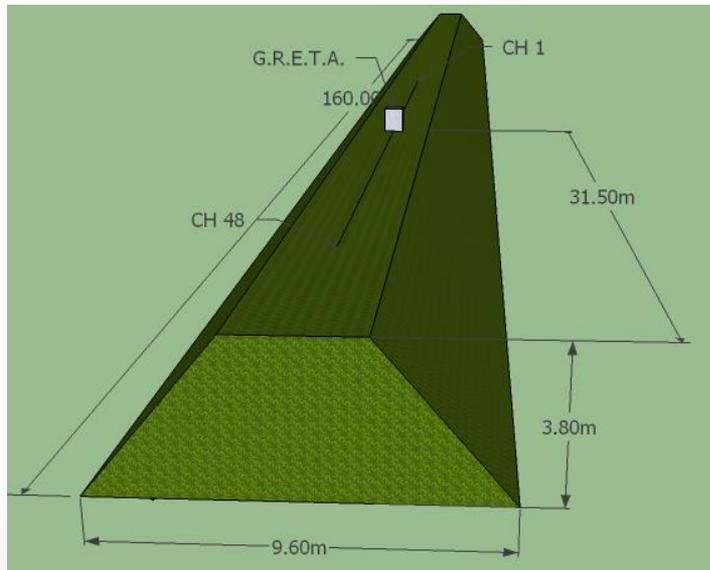


San Giacomo delle Segnate (MN)

- 1) Via Marconi
- 2) Via Dugale



# 5. Inquadramento del sito d'indagine



<b>Temperatura</b>	20 °C
<b>Conducibilità</b>	410 $\mu\text{S}/\text{cm}$
<b>Resistività</b>	24 $\Omega\cdot\text{m}$
<b>Concentrazione di sali</b>	200 mg/l

## 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro

### *Criteria di progettazione:*

- Installazione permanente
- Parti sepolte resistenti agli agenti esterni
- Misure e programmazione da remoto
- Invio dati a frequenza prefissata via internet
- Strumento non esigente energeticamente
- Profondità di indagine limitata
- Costo contenuto



## 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro

- 2 cavi con 48 elettrodi
- Massima corrente iniettabile 200 mA
- Sensibilità della tensione a 25  $\mu\text{V}$
- Profondità di indagine di circa 10 m
- Filtro notch a 50 Hz
- Registrazione dei parametri di misura: corrente iniettata, tensione misurata, deviazione standard
- Misura delle resistenze di contatto
- Modifica da remoto dei parametri e dell'intervallo di misura
- Modem per invio dei dati



## 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro



4 settembre 2015

## 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro

### Elettrodi a piastra:

- Spaziati 1 m
- Guaina anti-roditore
- Resina bicomponente



### Stazione meteo:

- Precipitazioni
- Temperatura aria
- Umidità aria
- Livello canale
- Sonda TDR

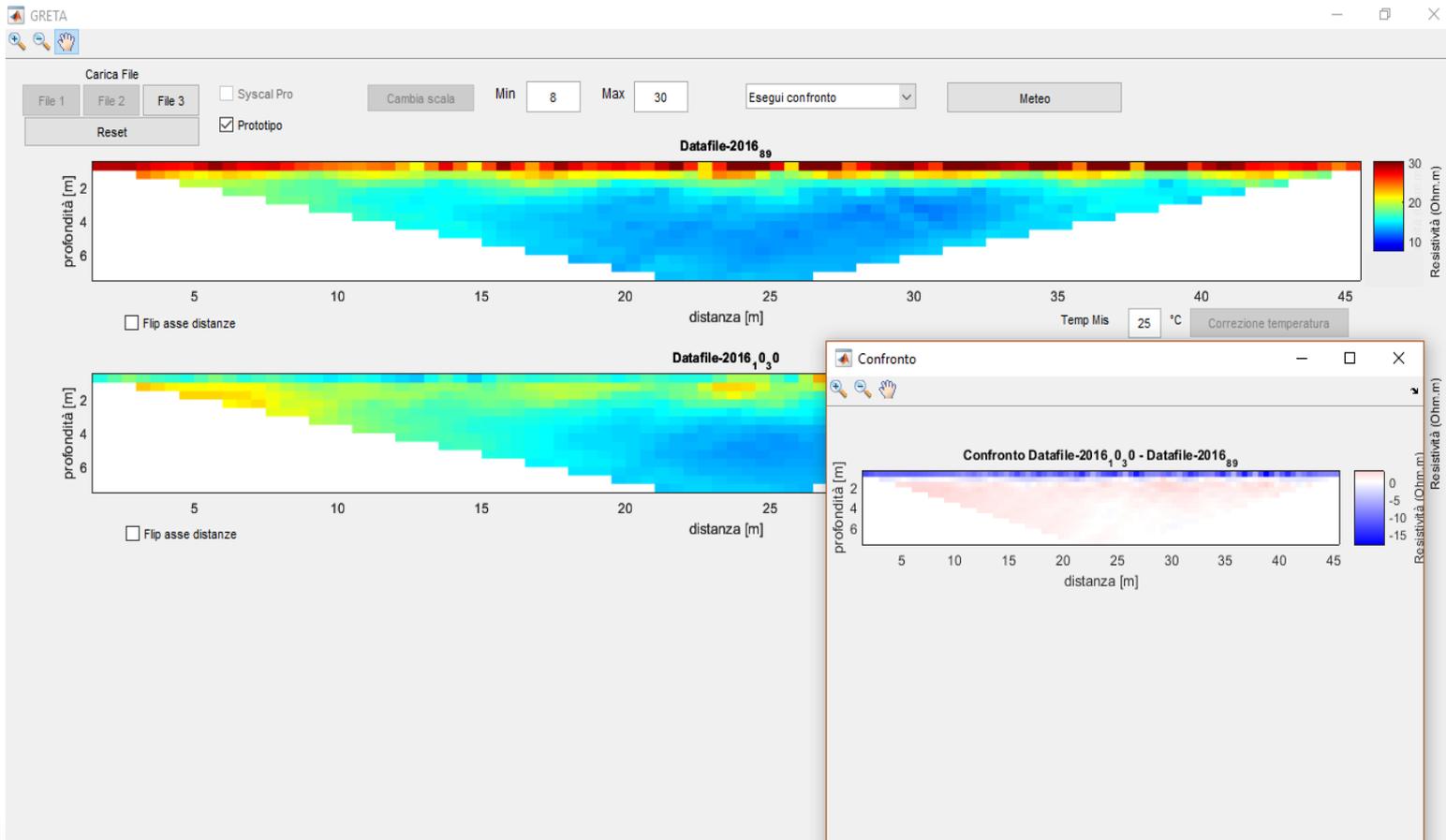


### Sonda TDR

- Temperatura suolo
- Costante dielettrica

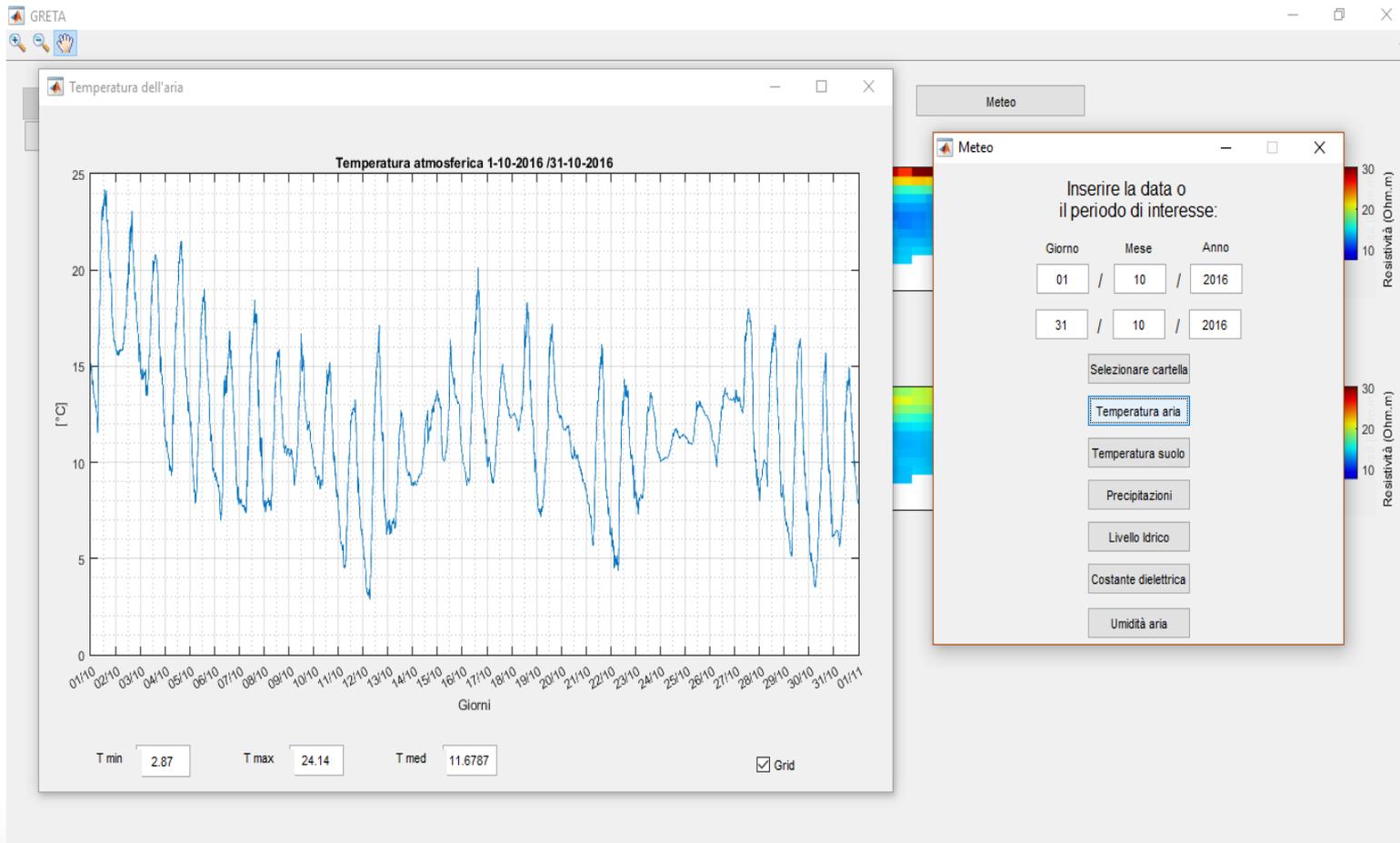
# 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro

*Il software: dati di resistività*



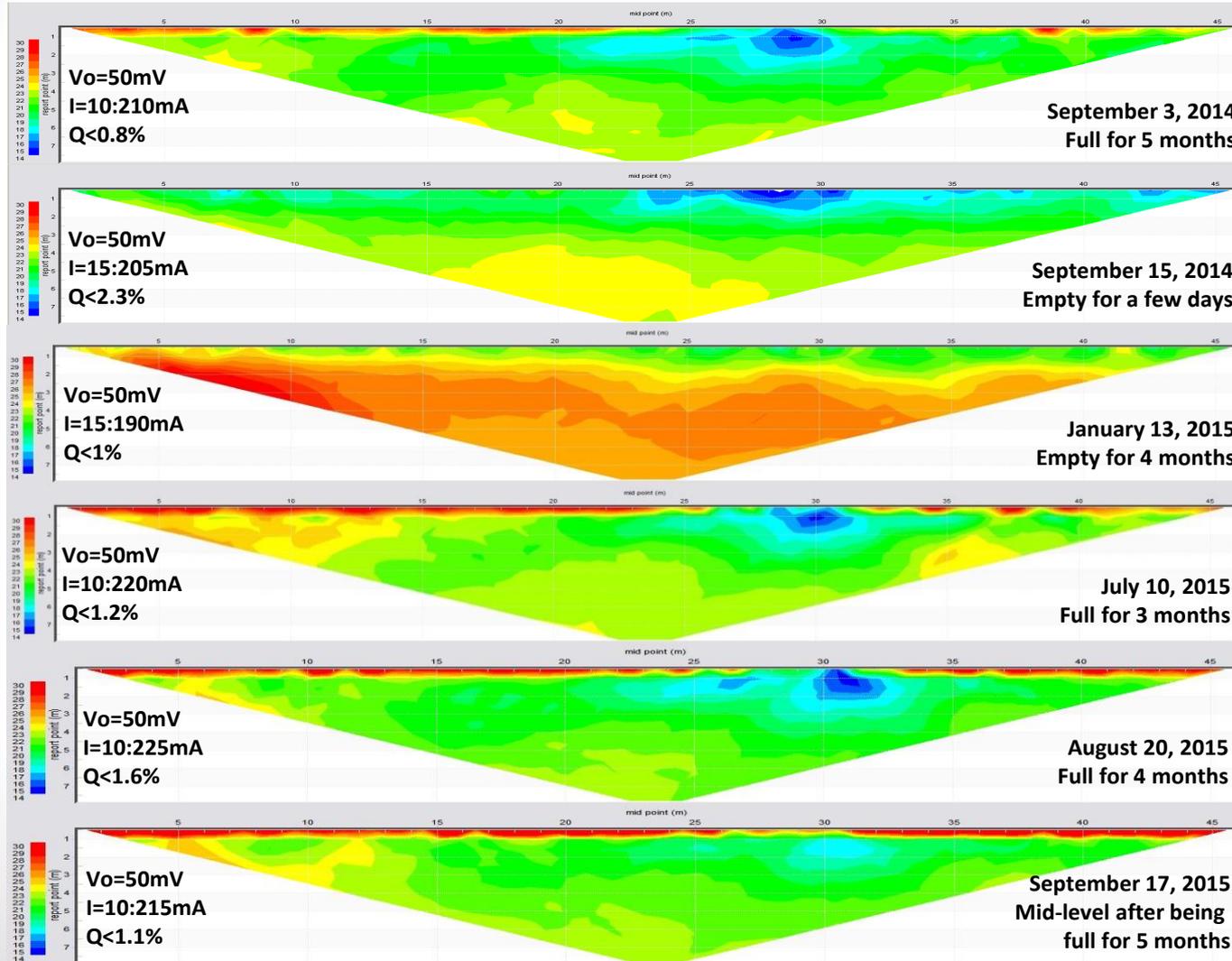
# 6. Progettazione ed installazione del geo-resistivimetro

*Il software: dati meteo*



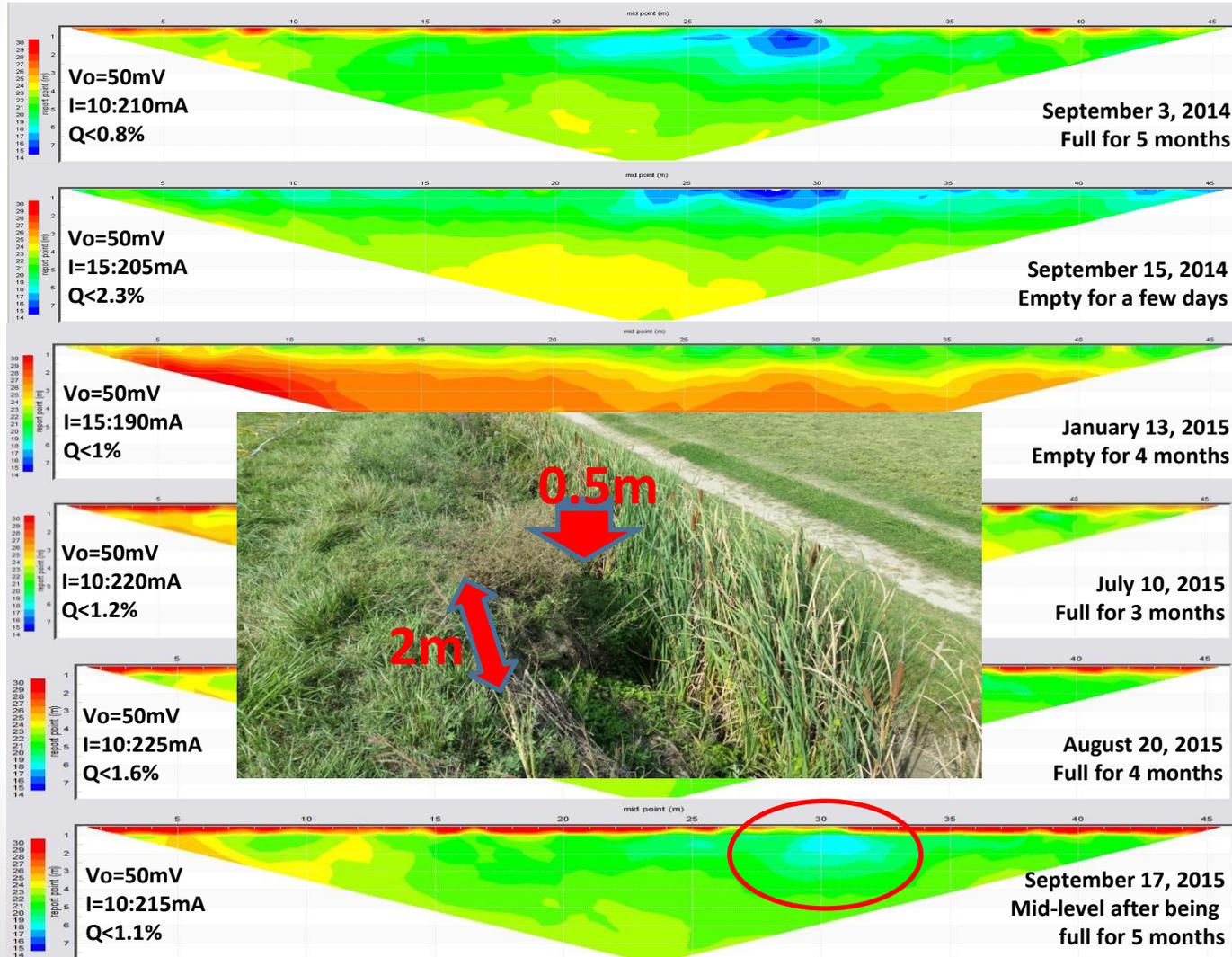
# 7.1 Misure preliminari

Via Dugale



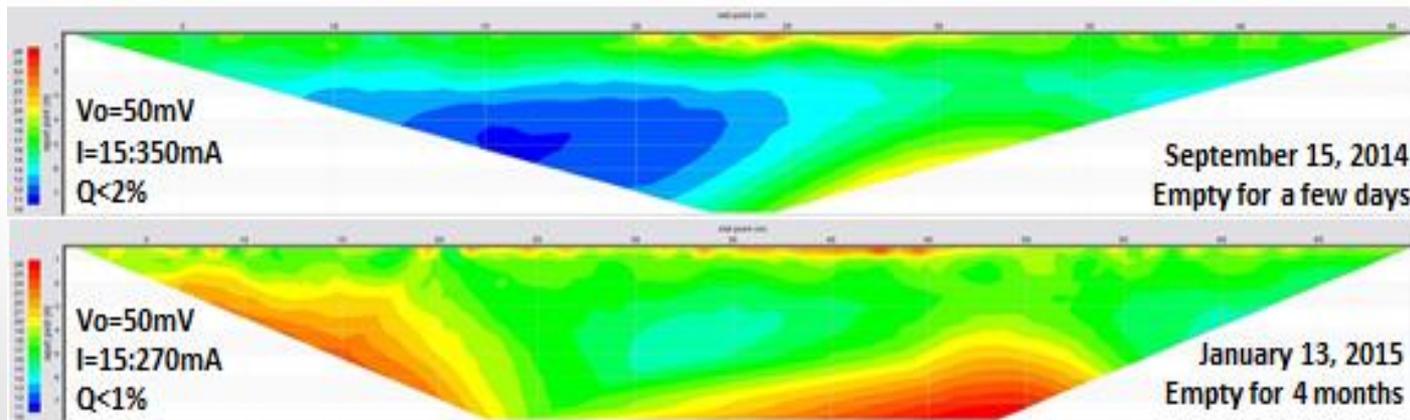
# 7.1 Misure preliminari

## Via Dugale



# 7.1 Misure preliminari

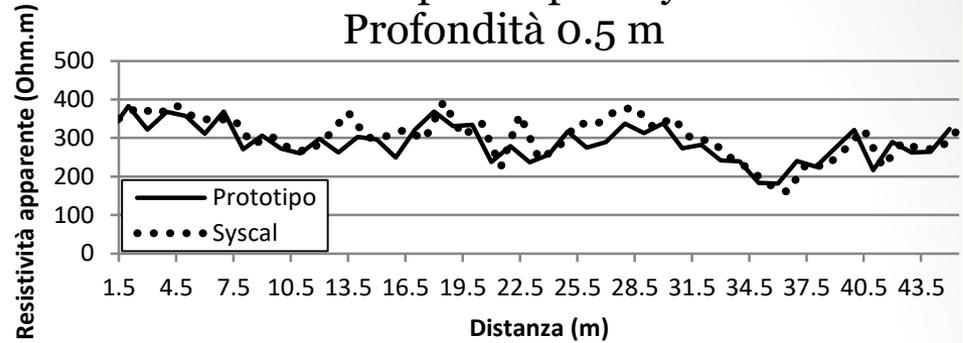
Via Marconi



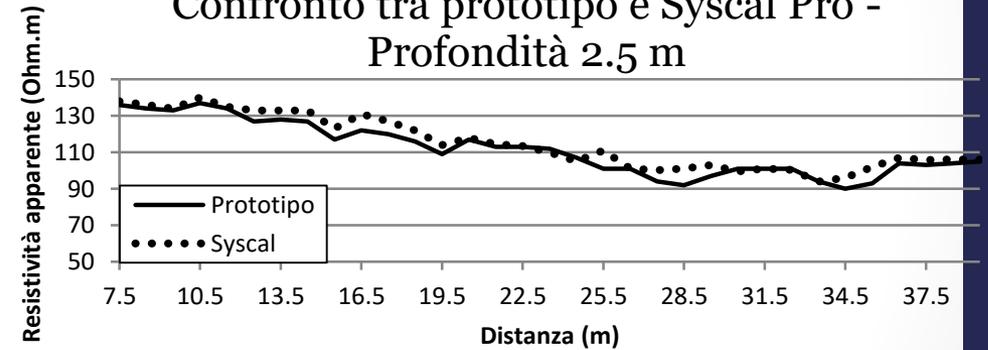
# 7.2 Misure di confronto



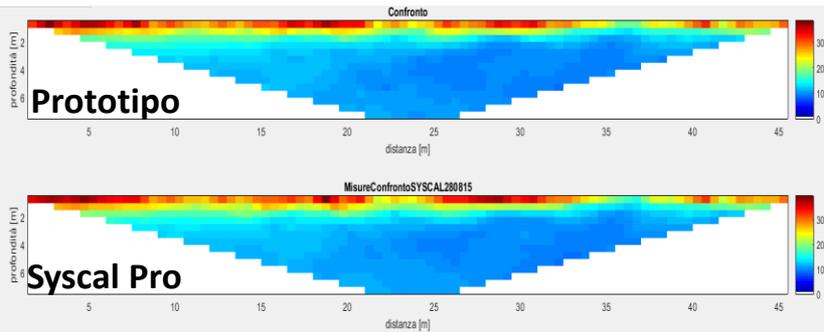
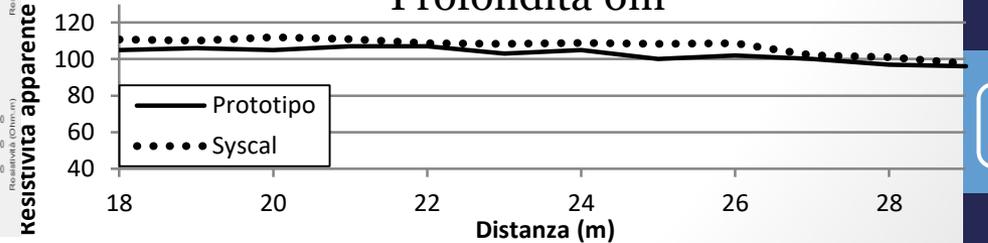
Confronto tra prototipo e Syscal Pro -  
Profondità 0.5 m



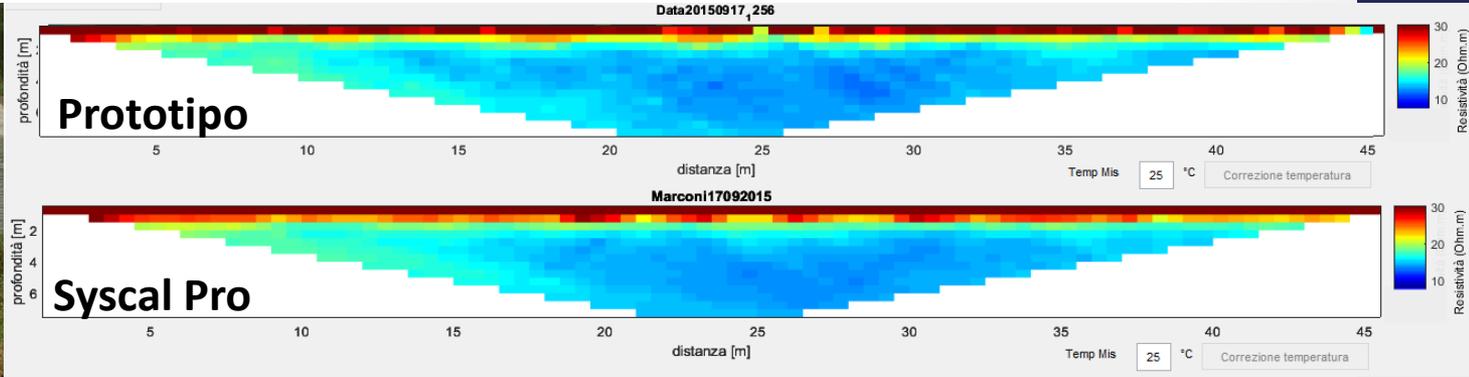
Confronto tra prototipo e Syscal Pro -  
Profondità 2.5 m



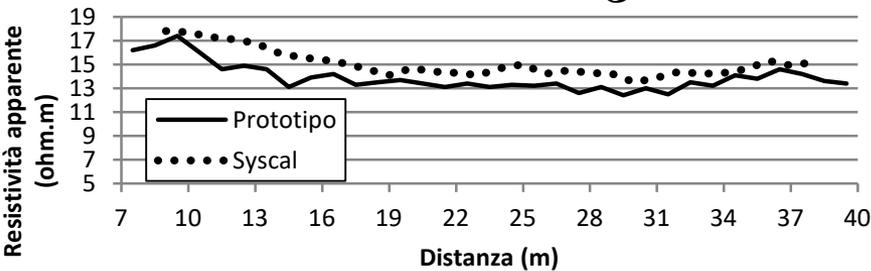
Confronto tra prototipo e Syscal Pro -  
Profondità 6m



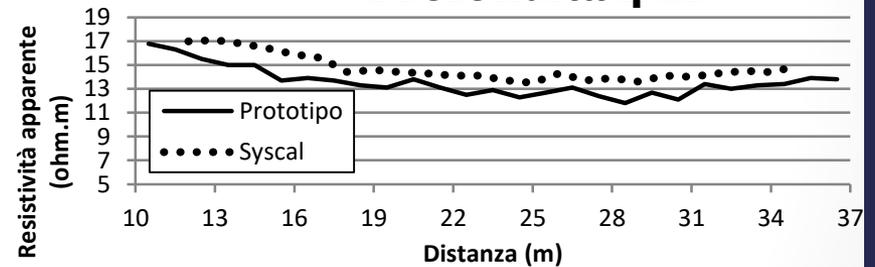
# 7.2 Misure di confronto



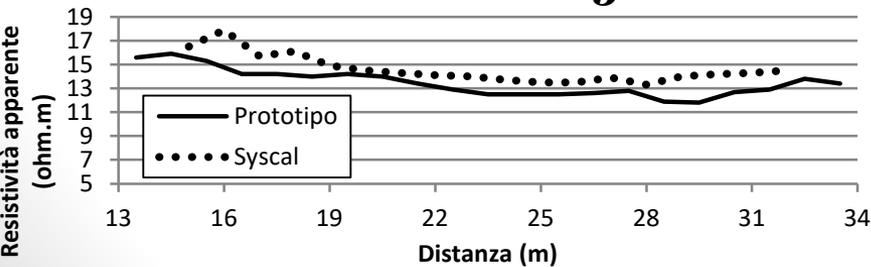
### Profondità 3 m



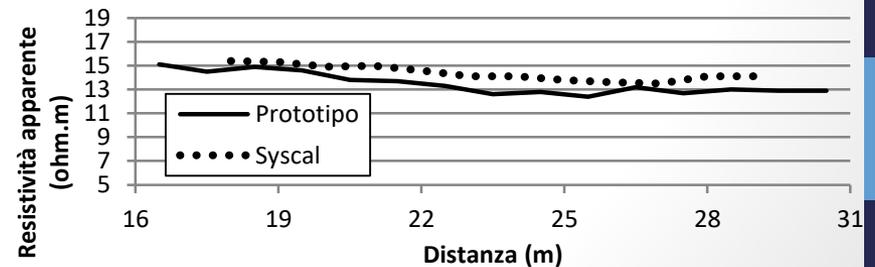
### Profondità 4 m



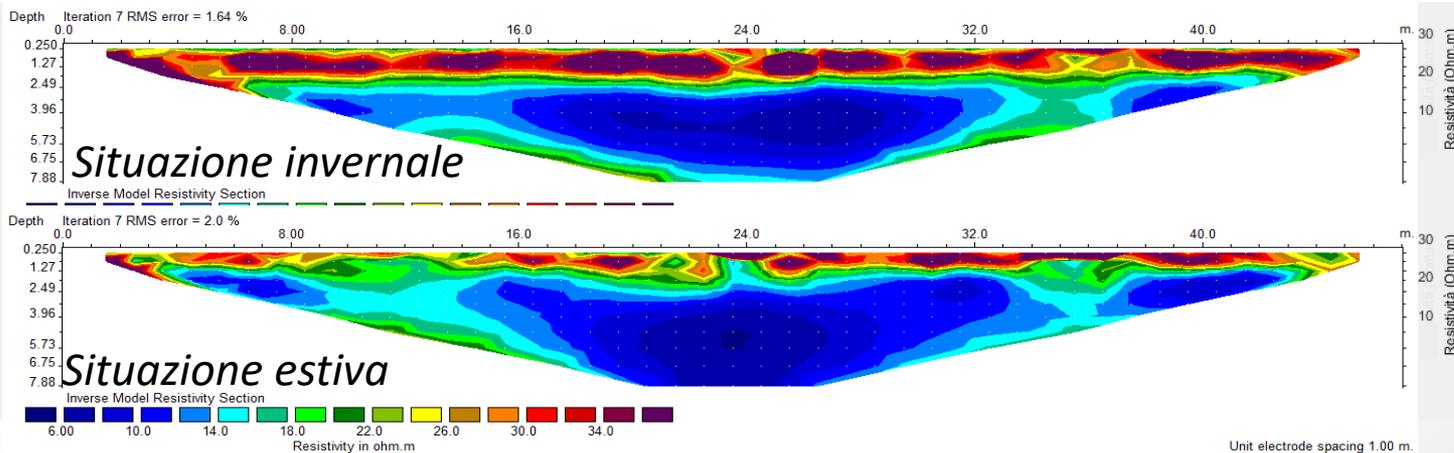
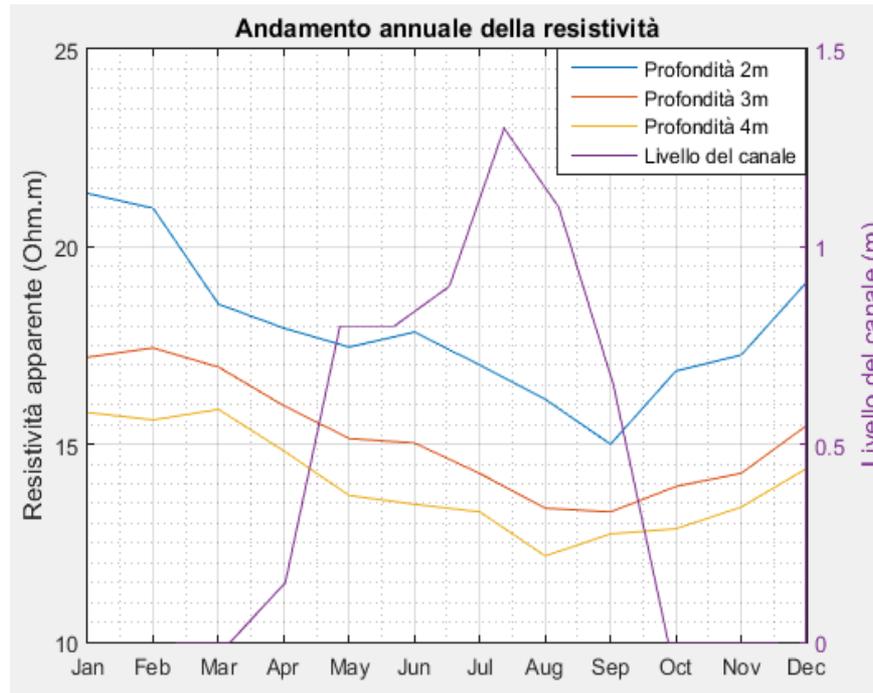
### Profondità 5 m



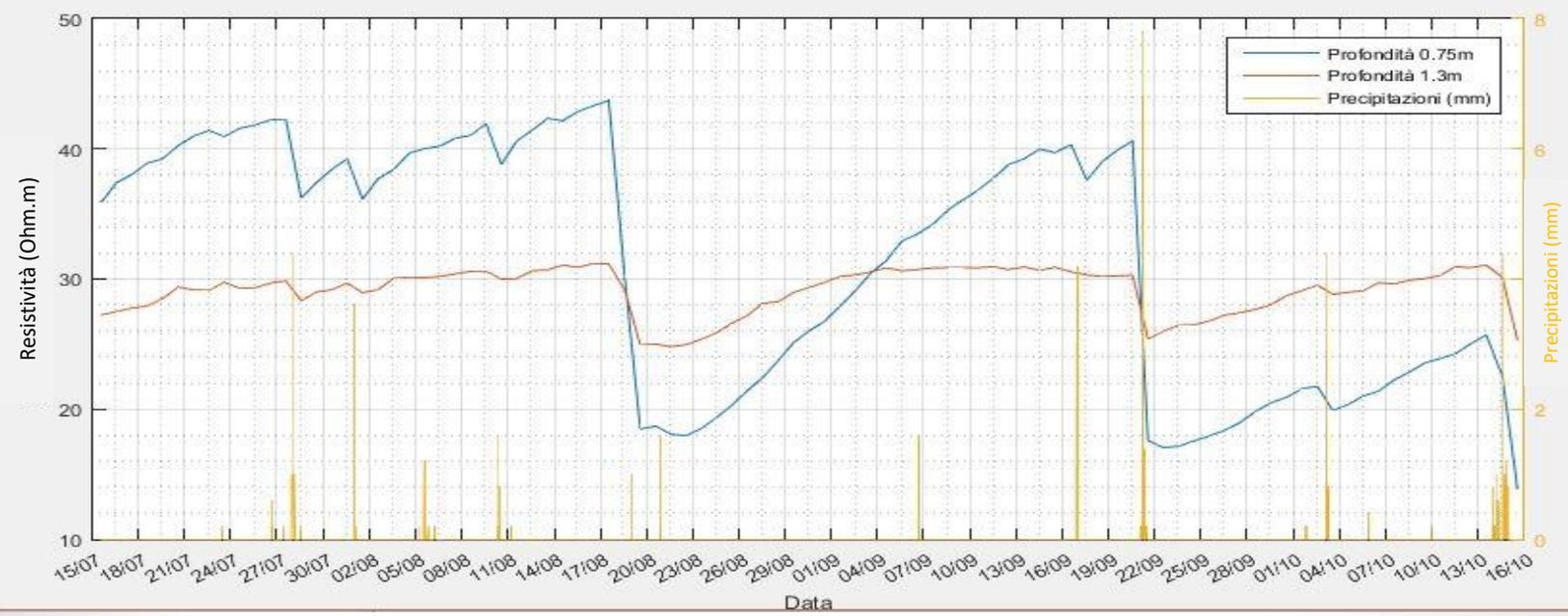
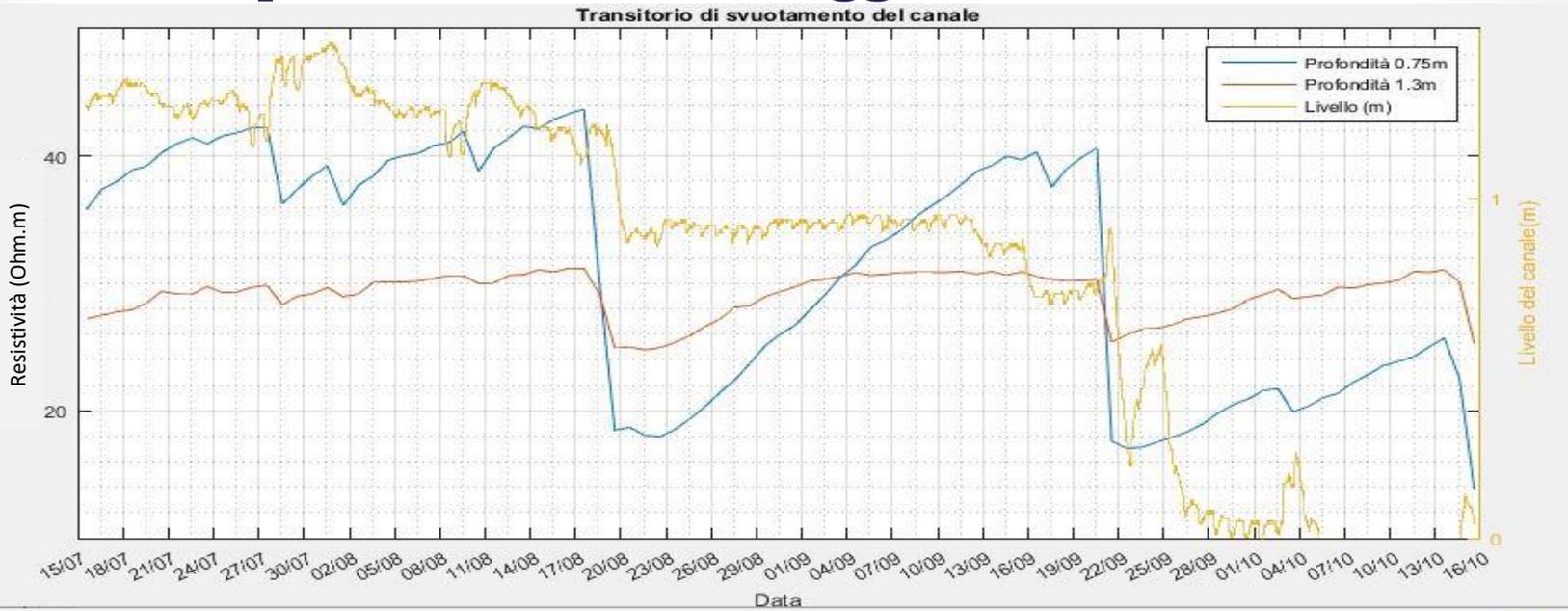
### Profondità 6 m



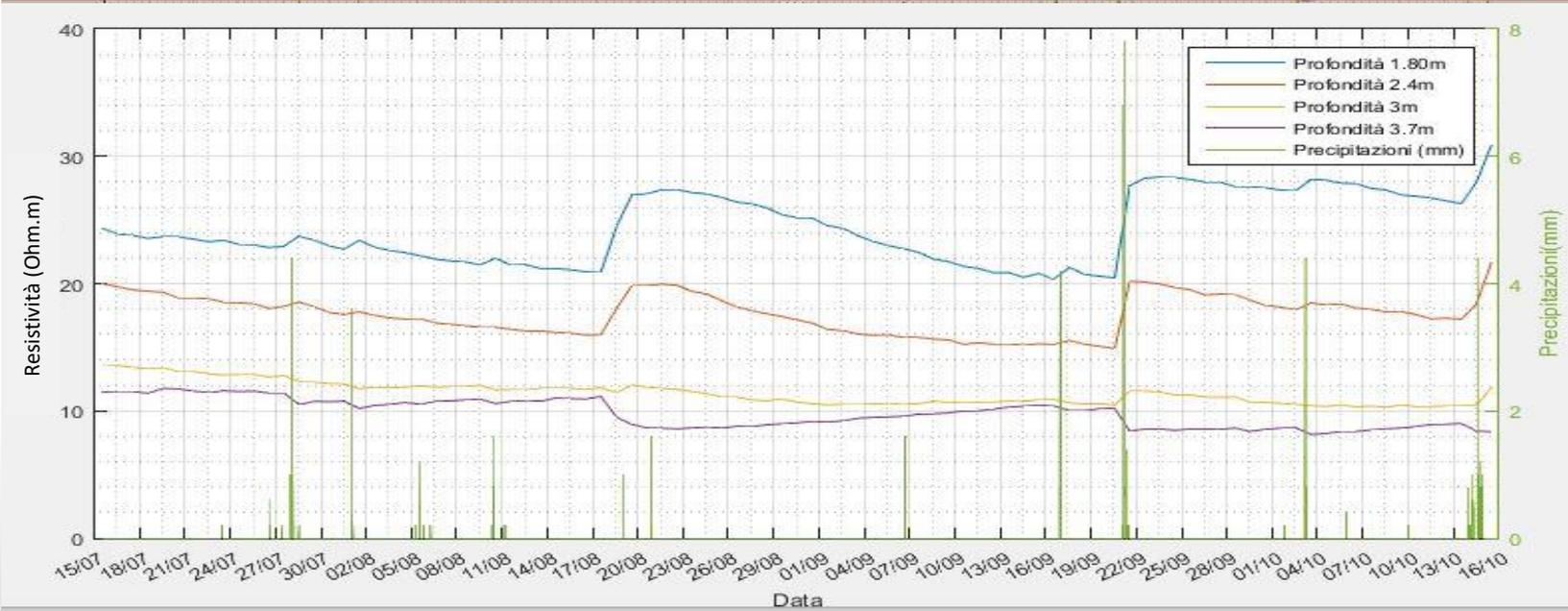
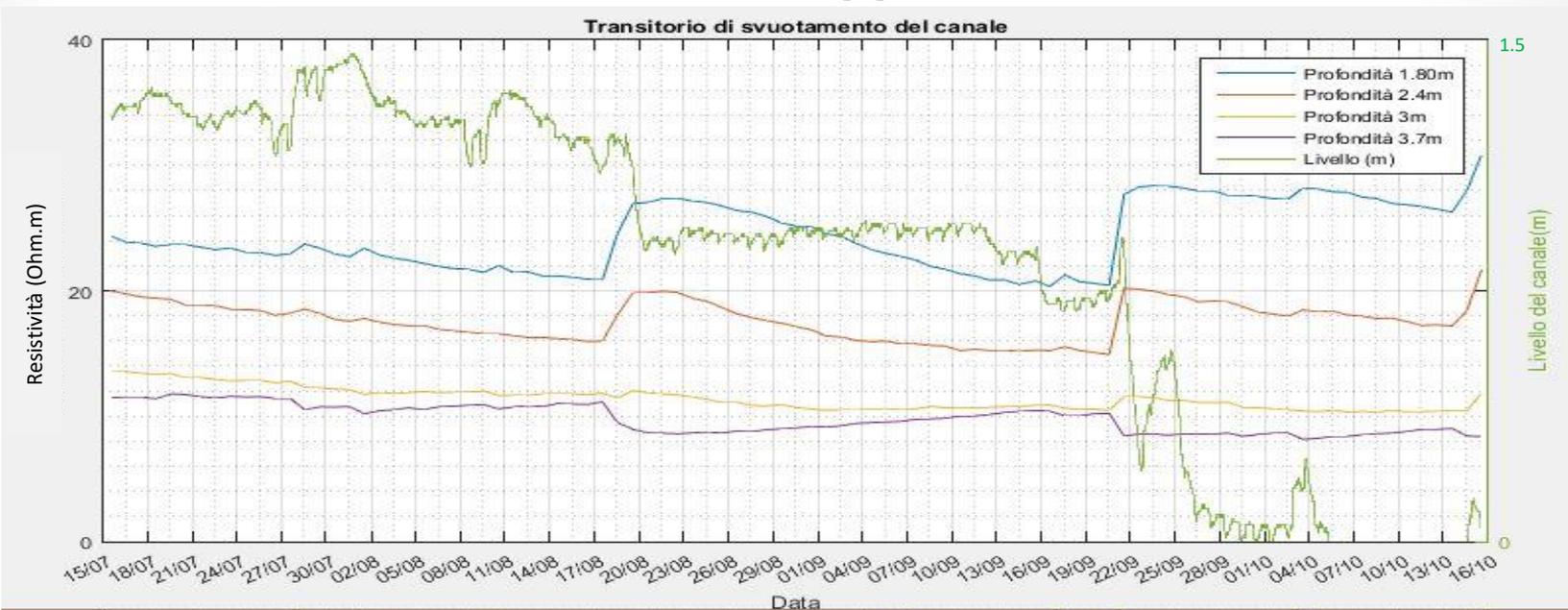
# 8. Il periodo di monitoraggio *Il livello del canale*



# 8. Il periodo di monitoraggio *Transitorio di svuotamento*

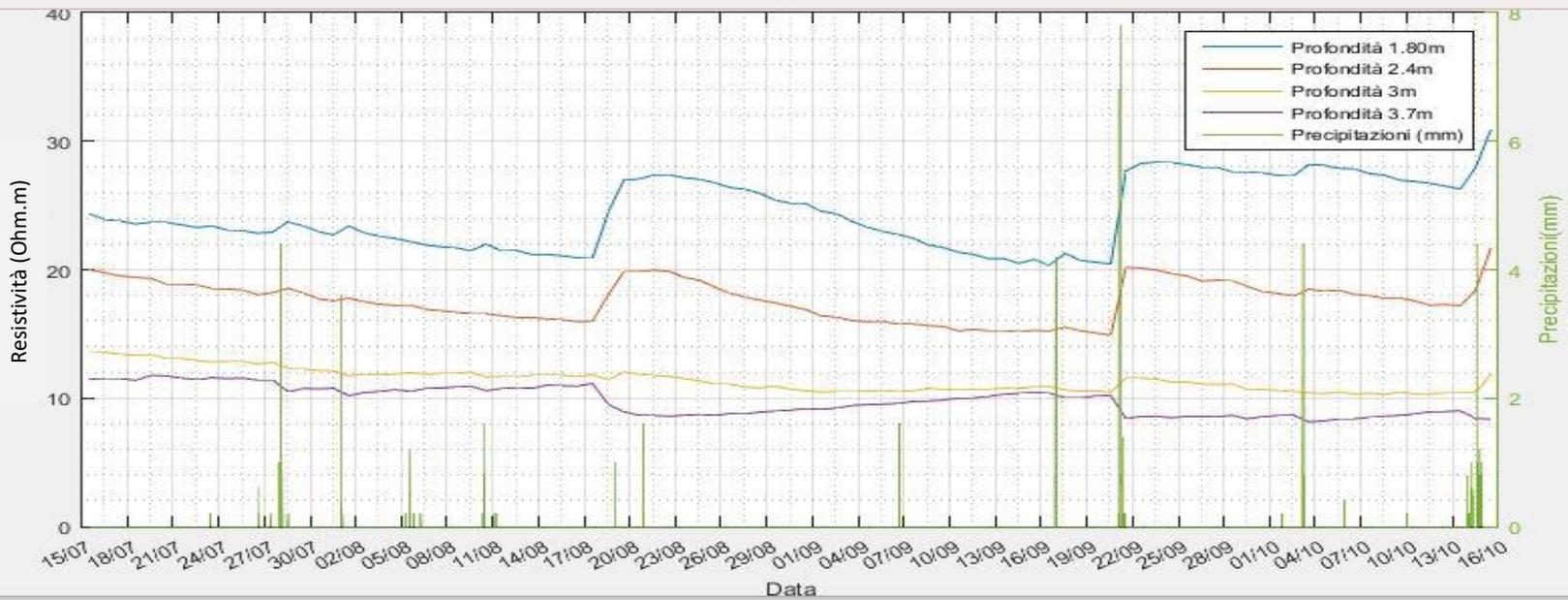
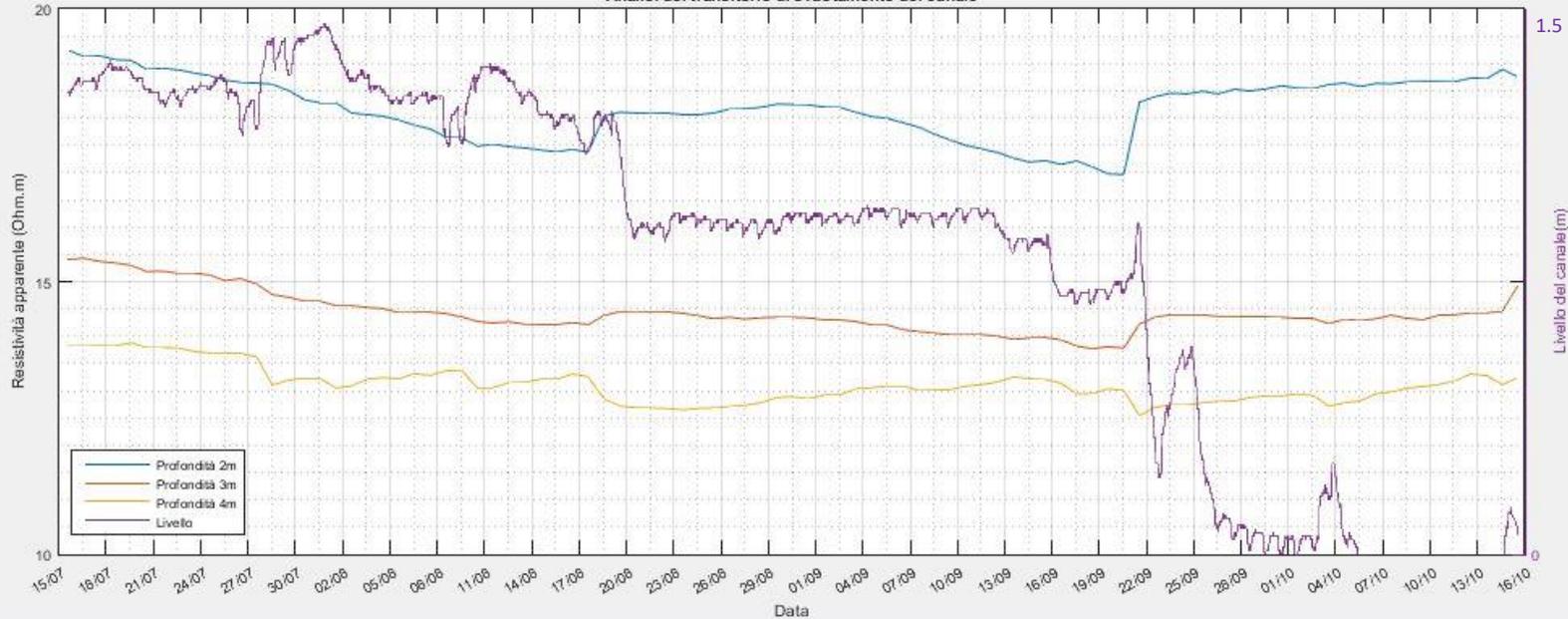


# 8. Il periodo di monitoraggio *Transitorio di svuotamento*



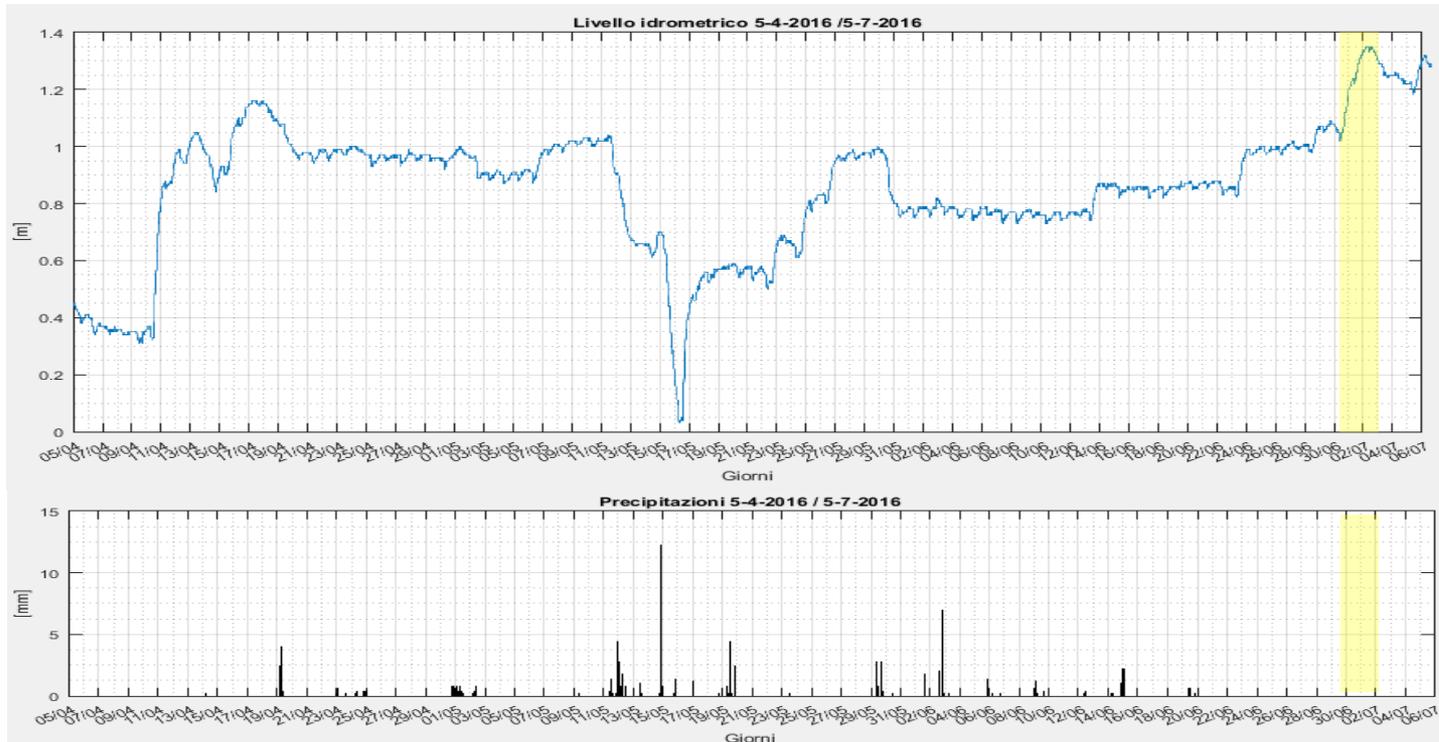
# 8. Il periodo di monitoraggio *Transitorio di svuotamento*

Analisi del transitorio di svuotamento del canale

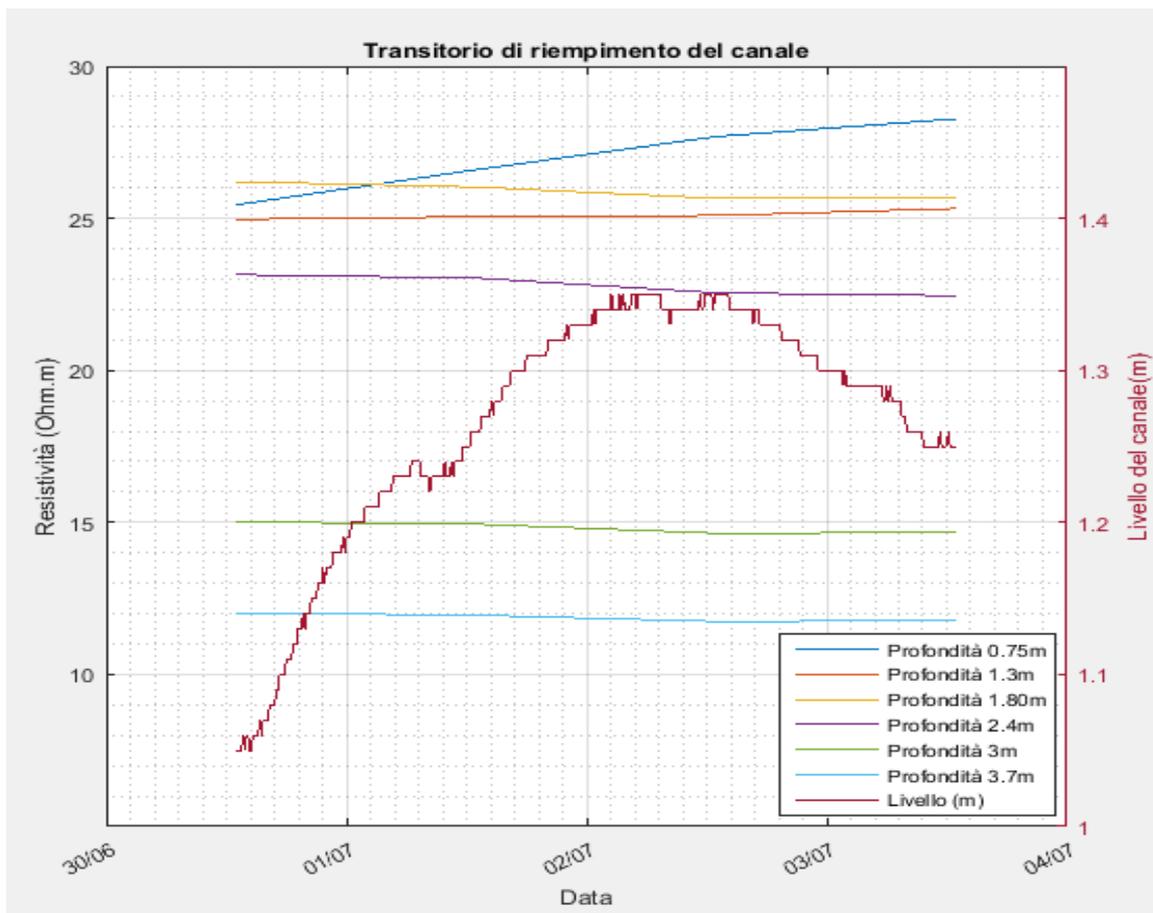




# 8. Il periodo di monitoraggio *Transitorio di riempimento*

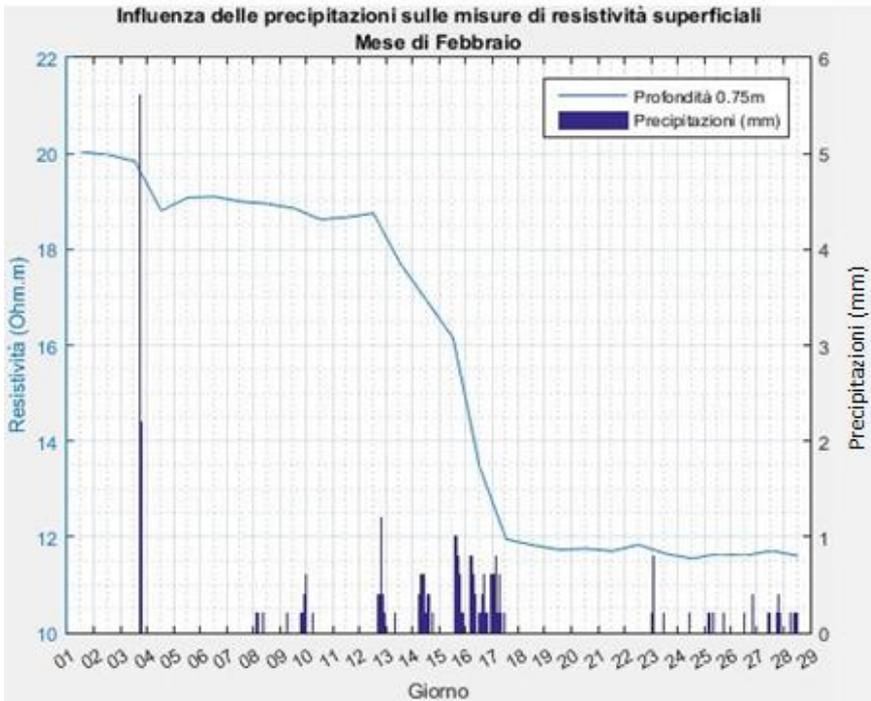


# 8. Il periodo di monitoraggio *Transitorio di riempimento*

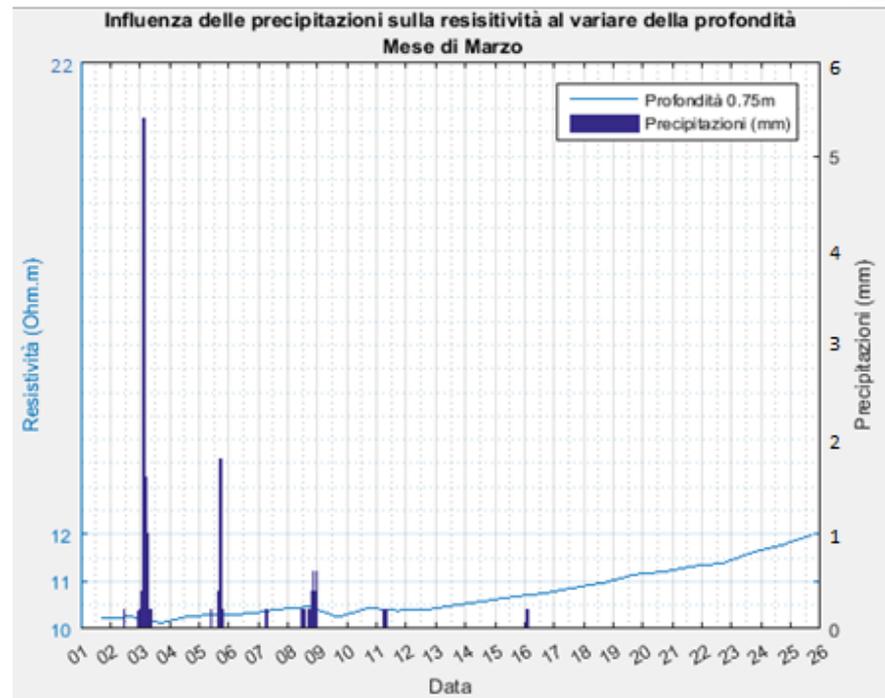


# 8. Il periodo di monitoraggio *Le precipitazioni*

*Mese di febbraio*

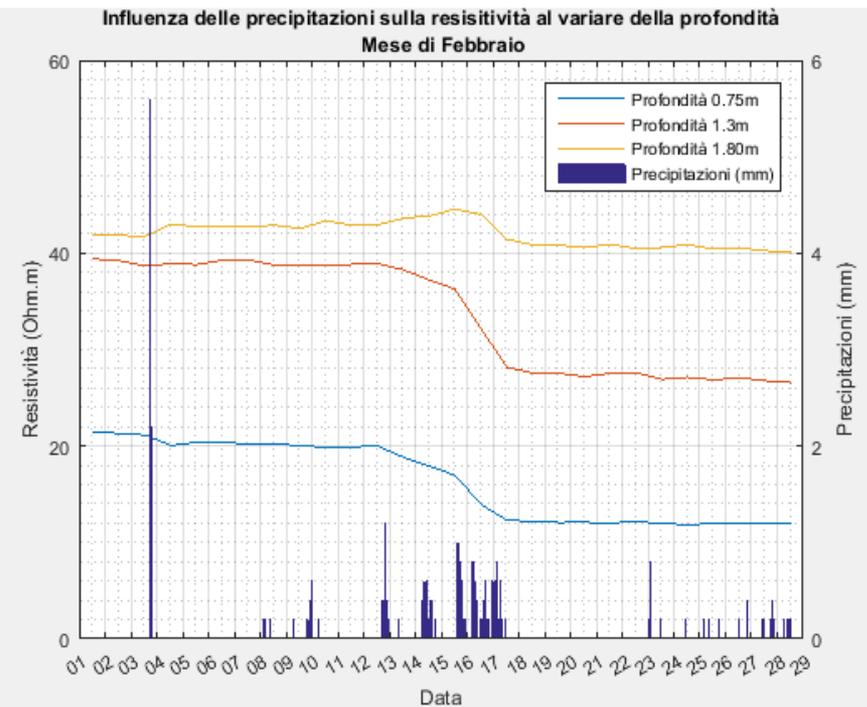


*Mese di marzo*

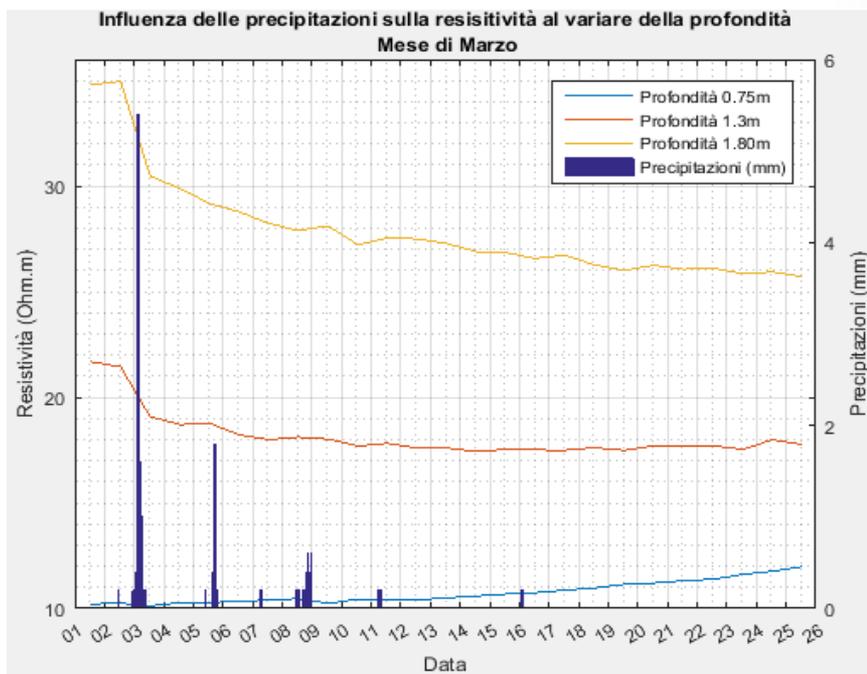


# 8. Il periodo di monitoraggio *Le precipitazioni*

## *Mese di febbraio*

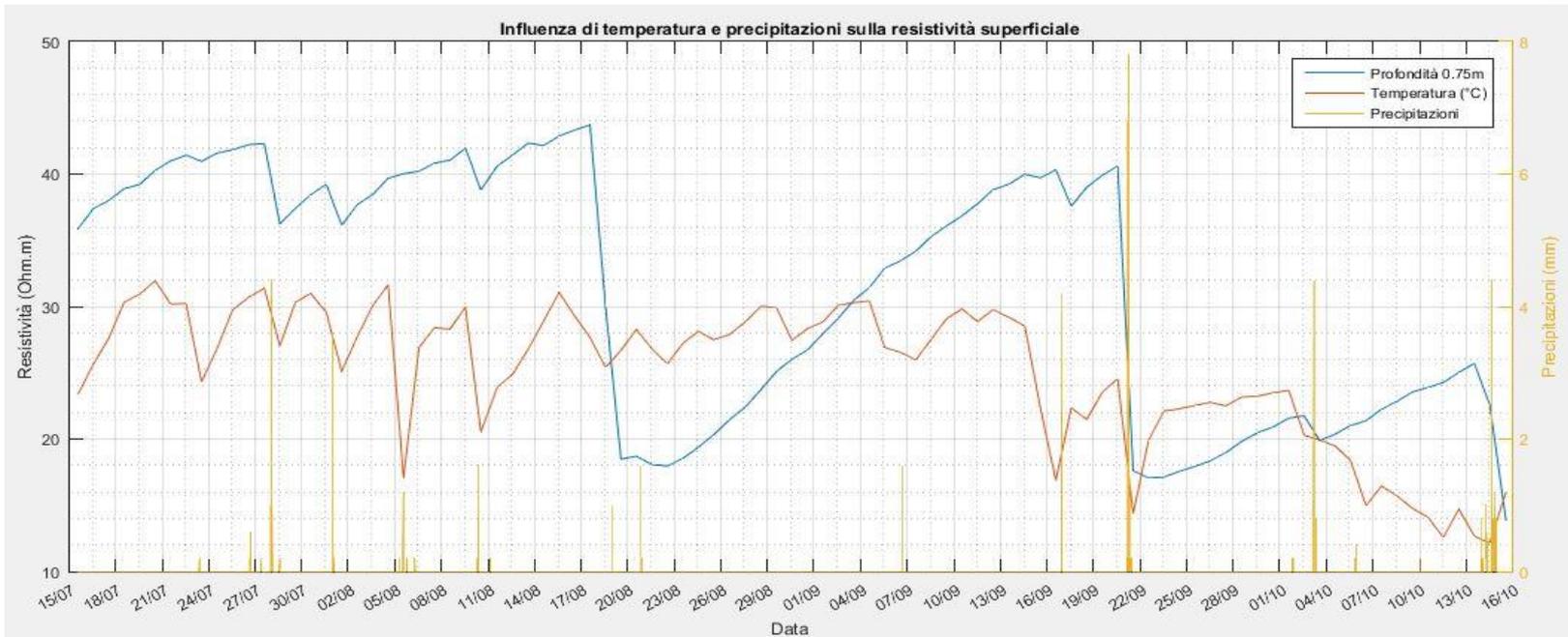


## *Mese di marzo*



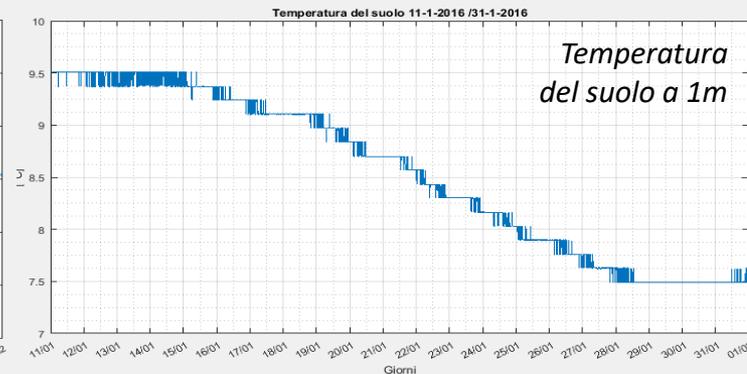
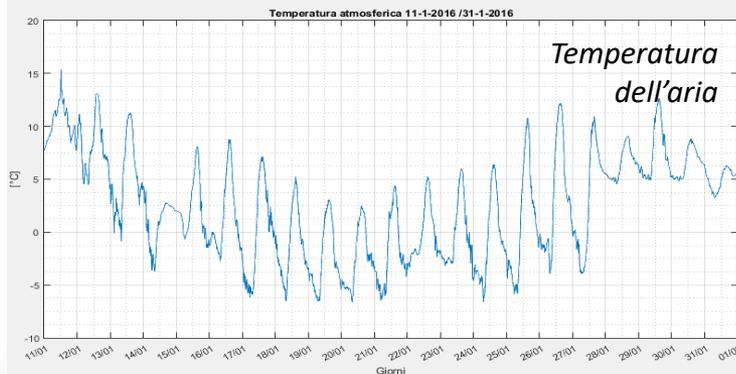
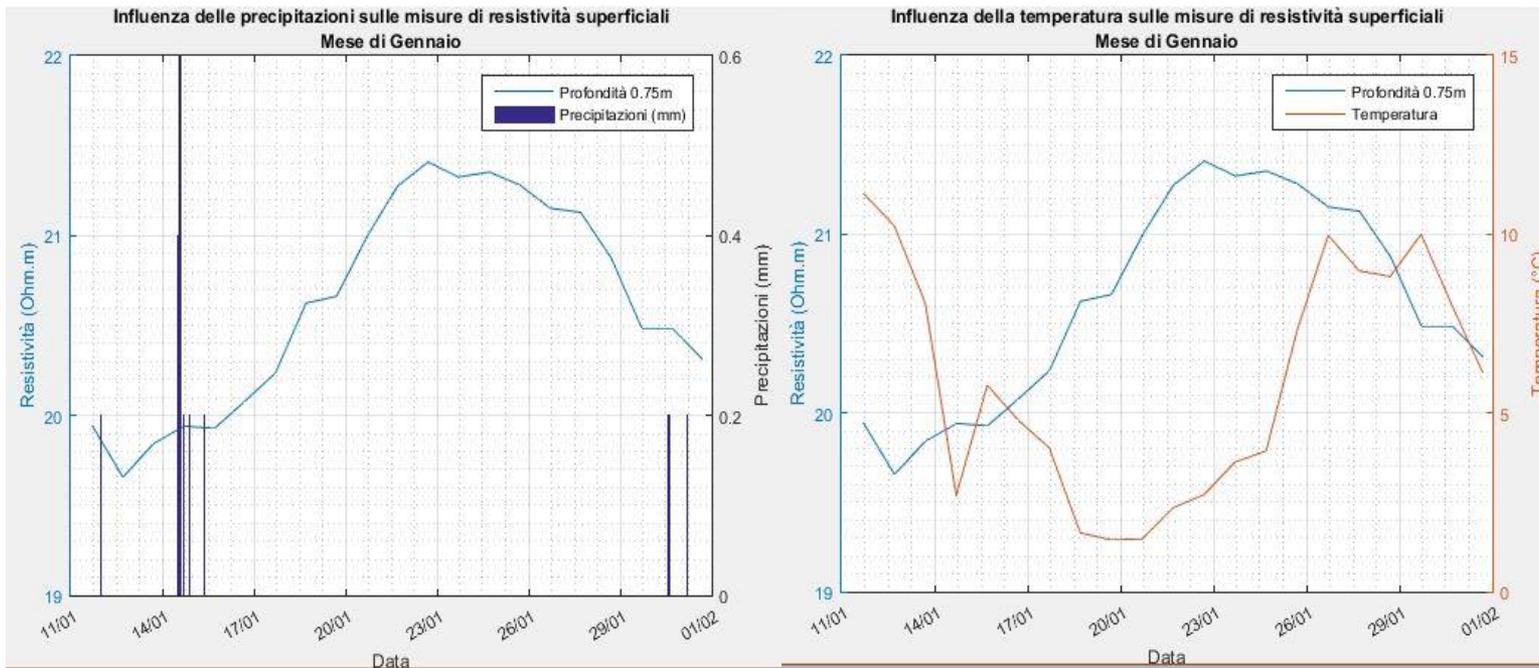
# 8. Il periodo di monitoraggio *La temperatura*

## *Transitorio di svuotamento*



# 8. Il periodo di monitoraggio *La temperatura*

## Mese di gennaio



# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua

Misure:

- Dirette
- Indirette



Metodologie utilizzate:

- Analisi di laboratorio
- Sonde a emissione di neutroni
- Sonde TDR
- Misure satellitari
- GPR

PROBLEMI LEGATI ALLA SCALA,  
ALLA RISOLUZIONE,  
ALL'APPLICABILITA'

UTILIZZO DEI DATI  
DI RESISTIVITA'



NON FACILE CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI  
MAL SI ADATTANO AL CASO STUDIO

CALIBRAZIONE DI UNA RELAZIONE  
RESISTIVITA'/CONTENUTO D'ACQUA

Relazione di Archie (1942): 
$$S = \left(\frac{R_o}{R}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{FRw}{R}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{\alpha\Phi^{-m}Rw}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$$

S: saturazione; R: resistività della roccia; Ro: resistività tot saturo in acqua; Rw: resistività del fluido;  
n, m: parametri funzione della saturazione e della cementazione; Φ: porosità

Relazione di Waxman e Smith (1967): 
$$Co = \frac{1}{F^*} (C_e + C_w) = \frac{1}{F^*} (BQ_v + C_w)$$

Co: conducibilità roccia; Ce: conducibilità da scambio cationico; Cw: conducibilità per circolazione di fluidi;  
F\*: fattore di formazione modificato per componente argillosa; B: conducibilità da radicali liberi in relazione a conducibilità del fluido; Qv: concentrazione dei cationi scambiati

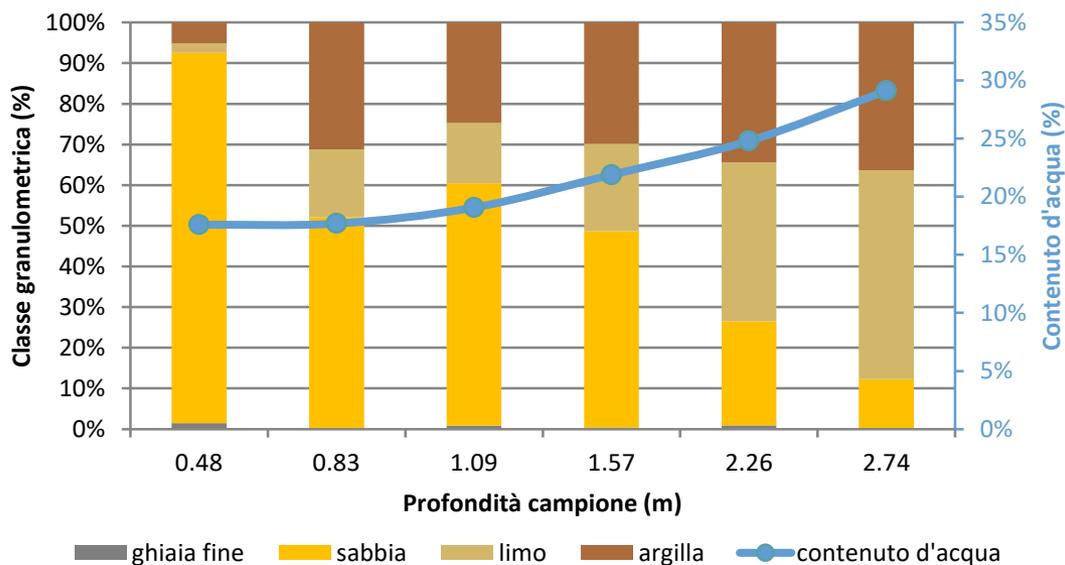
# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua

*Il carotaggio (08 agosto 2016) e le analisi di laboratorio*

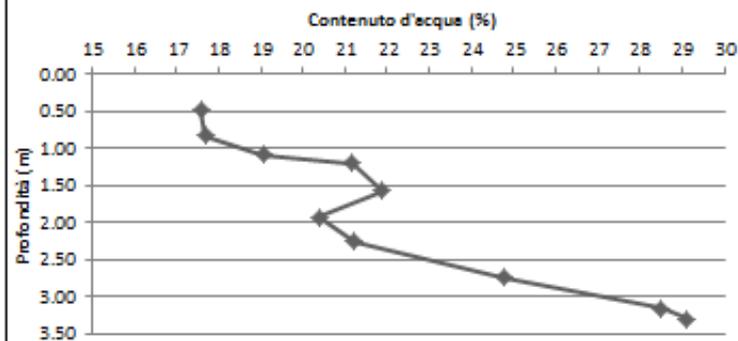


# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua

## Granulometria campioni a seguito di analisi di laboratorio e contenuto d'acqua

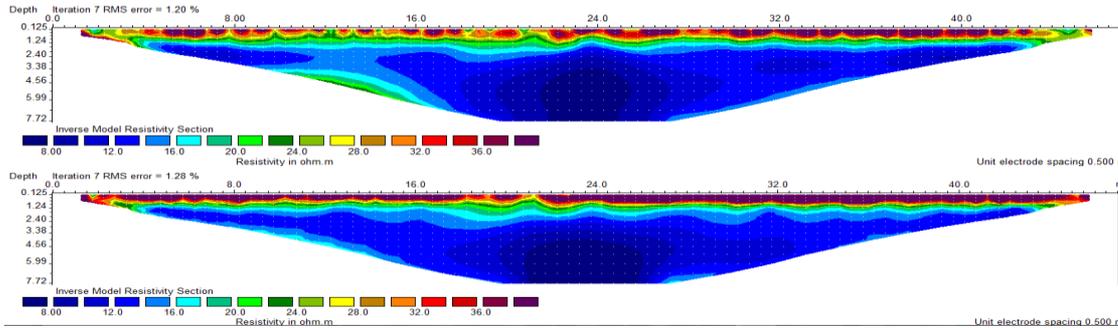


## Contenuto d'acqua dei campioni al variare della profondità



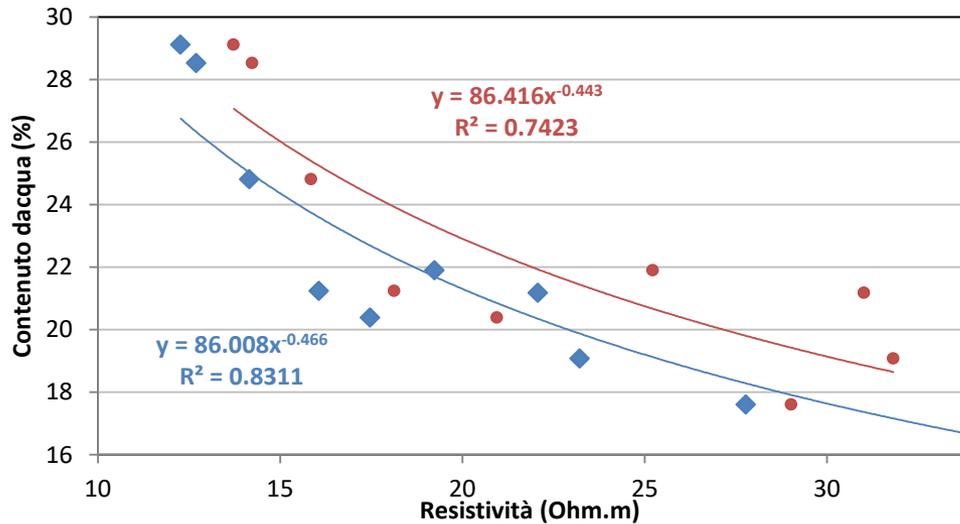
Profondità (m)	Contenuto d'acqua (%)
0.48	17.59
0.83	17.69
1.09	19.07
1.2	21.17
1.57	21.89
1.93	20.38
2.26	21.23
2.74	24.80
3.15	28.52
3.3	29.11

# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua



Profondità (m)	Contenuto d'acqua (%)
0.48	17.59
0.83	17.69
1.09	19.07
1.2	21.17
1.57	21.89
1.93	20.38
2.26	21.23
2.74	24.80
3.15	28.52
3.3	29.11

## Resistività vs Contenuto d'acqua

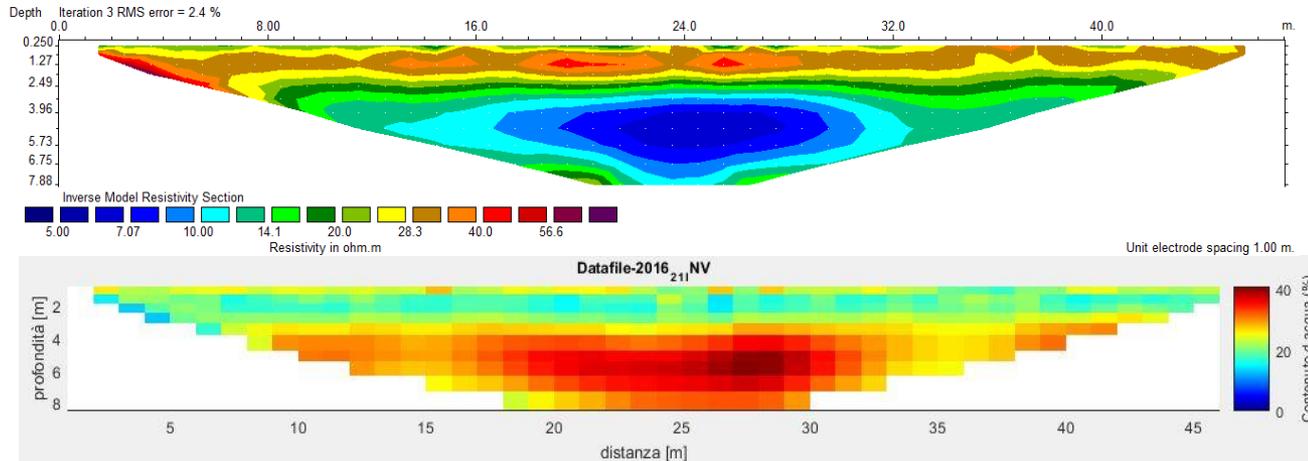


$$S = \alpha R^{-\beta}$$

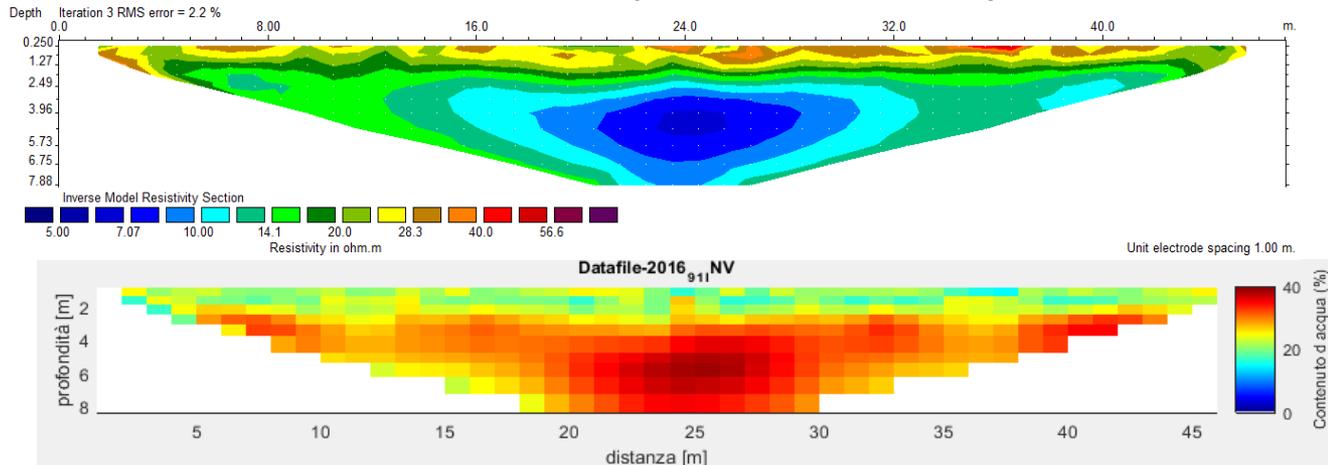
Serie di dati	$\alpha$	$\beta$
Syscal	86.006	0.466
G.R.E.T.A.	86.416	0.433

# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua

## Situazione invernale (1 febbraio 2016)

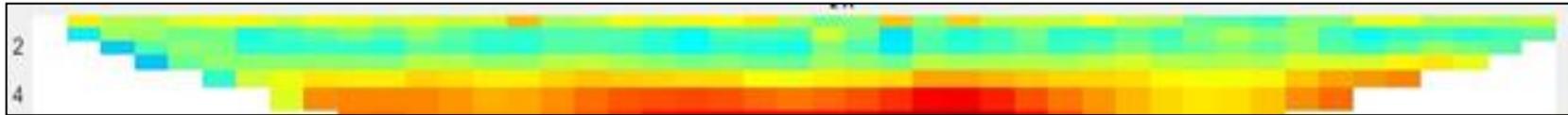


## Situazione estiva (1 settembre 2016)

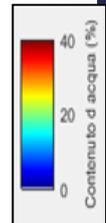
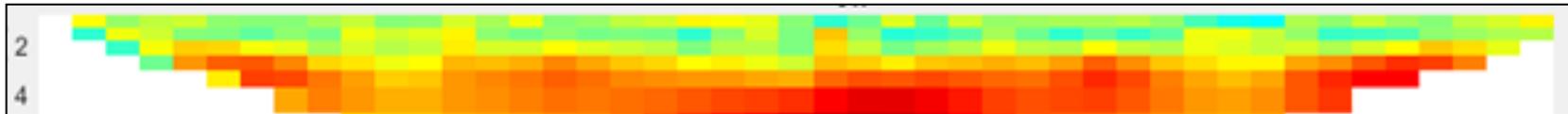


# 9. Ottenimento della relazione resistività/contenuto d'acqua

*Situazione invernale (1 febbraio 2016)*



*Situazione estiva (1 settembre 2016)*



# 10. Le potenzialità derivanti dall'utilizzo dei dati di monitoraggio per un'analisi di filtrazione e stabilità

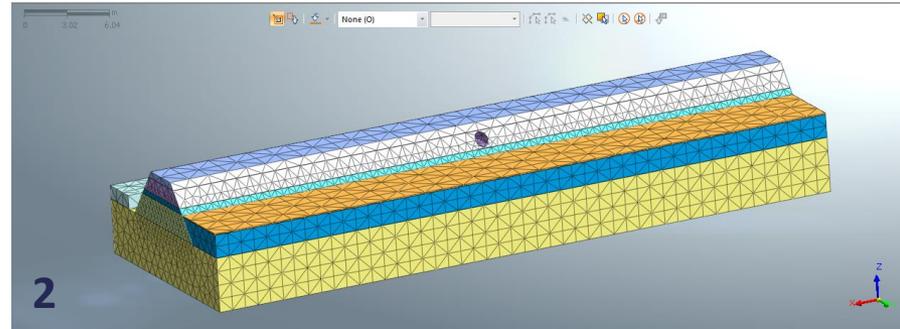
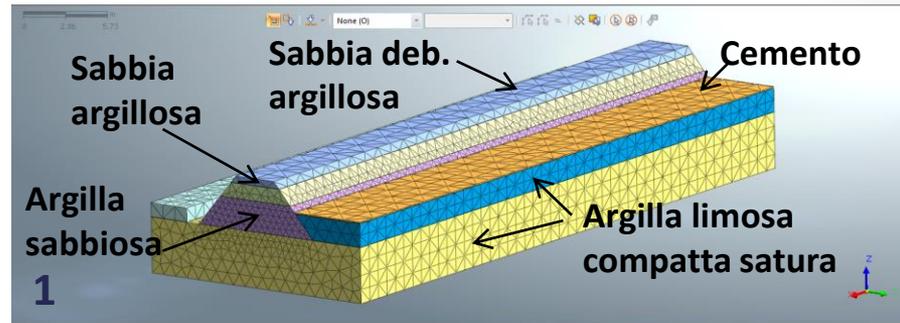
- **Caso 1:** Analisi di filtrazione senza la modellizzazione delle zona di *piping*
- **Caso 2:** Introduzione nella modellizzazione della zona di *piping*

## Parametri geometrici *piping*

Lunghezza	3 m
Diametro	1 m
Profondità del centro dalla cresta	1 m

## Stage analisi in transitorio

Incremento	Tempo (s)	Livello canale (m)
0	0	1.50
1	86400	1.20
2	172600	0.90
3	259200	0.60
4	345600	0.30
5	432000	0

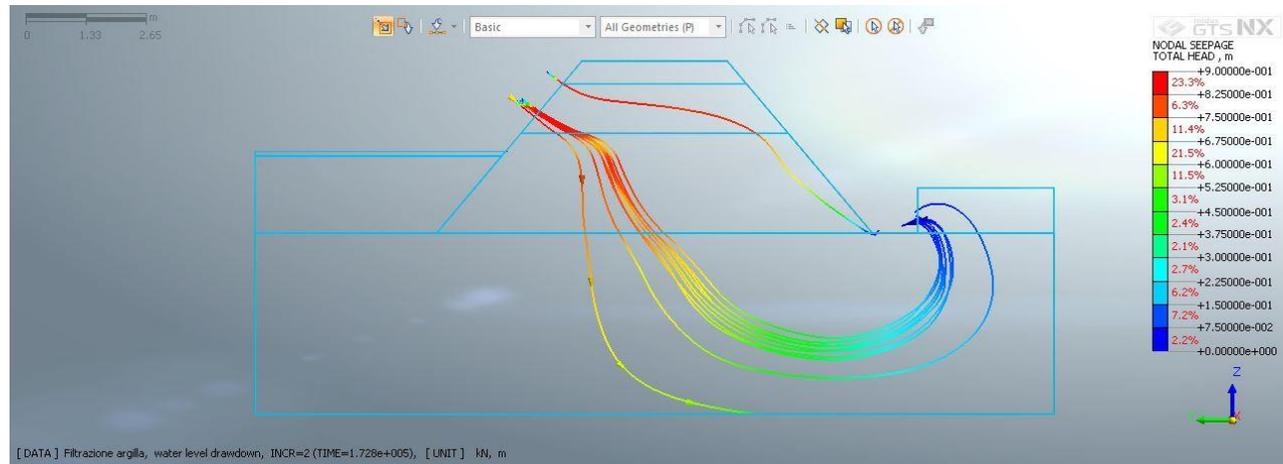
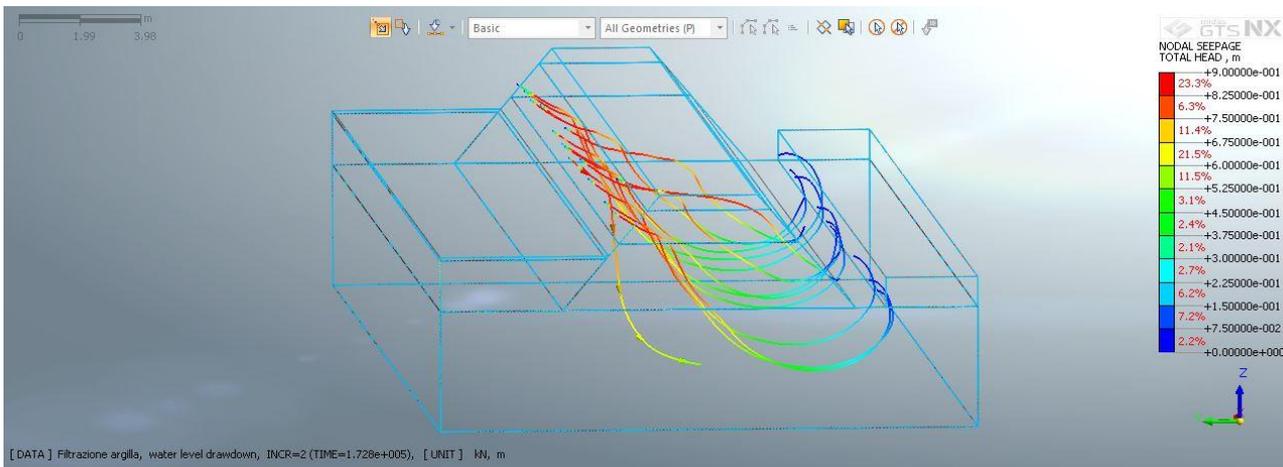


## Parametri materiali del modello

Terreno	Angolo d'attrito <sup>13</sup> (°)	Coesione <sup>13,14</sup> (kPa)	Peso specifico <sup>13</sup> secco (kN/m <sup>3</sup> )	Modulo di Young <sup>15</sup> (MPa)	Volume dei vuoti <sup>13</sup>	Permeabilità <sup>13</sup> (m/s)
Sabbia deb. argillosa	38	0	21	50	0.4	10 <sup>-6</sup>
Sabbia argillosa	35	10	19.5	20	0.3	10 <sup>-7</sup>
Argilla sabbiosa	30	13	18.5	5	0.25	5.10 <sup>-9</sup>
Argilla limosa compatta satura	32	13	20	20	0.5	10 <sup>-9</sup>

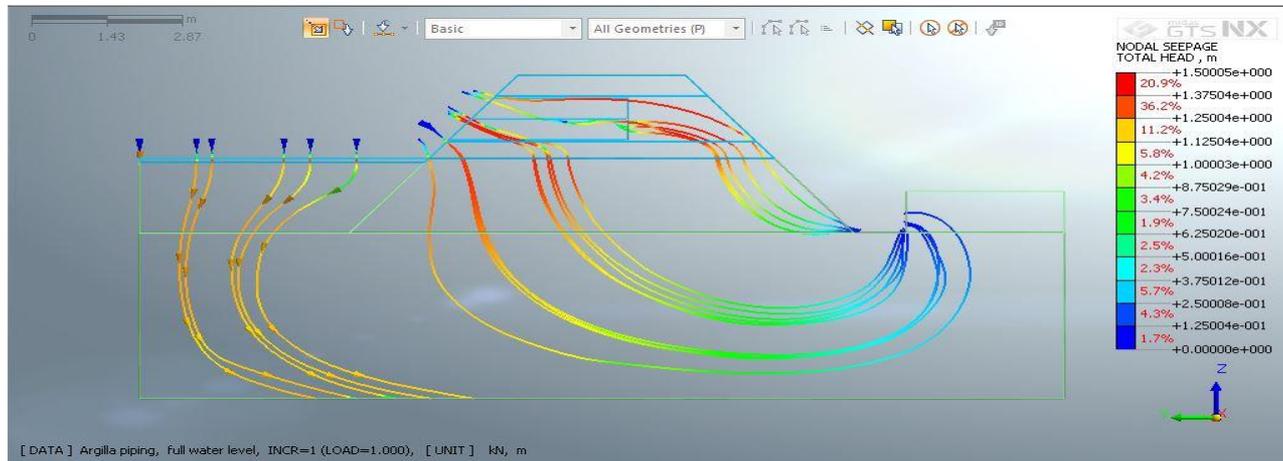
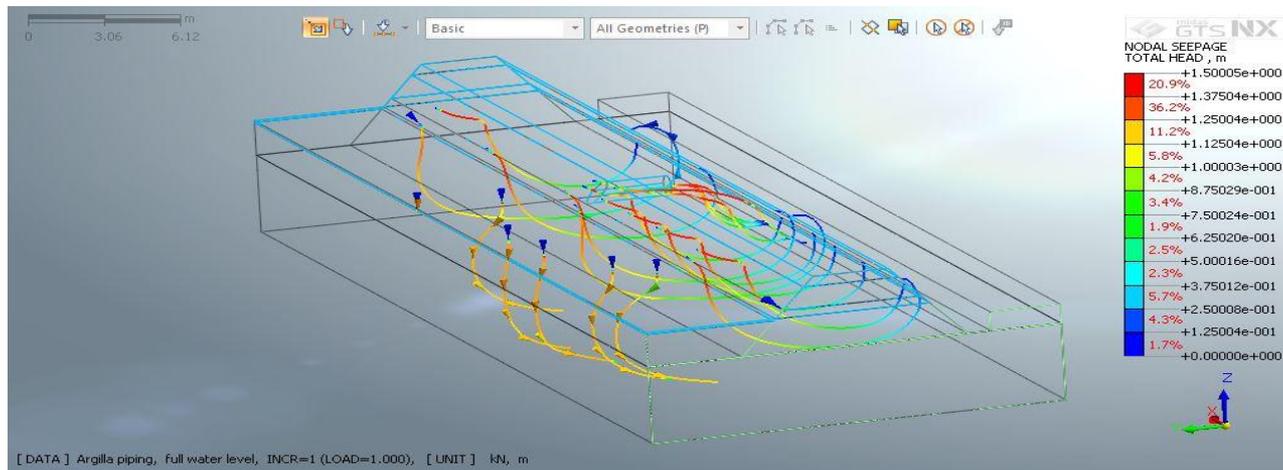
# 10. Le potenzialità derivanti dall'utilizzo dei dati di monitoraggio per un'analisi di filtrazione e stabilità

- *Caso 1*: Analisi di filtrazione senza la modellizzazione delle zona di *piping*



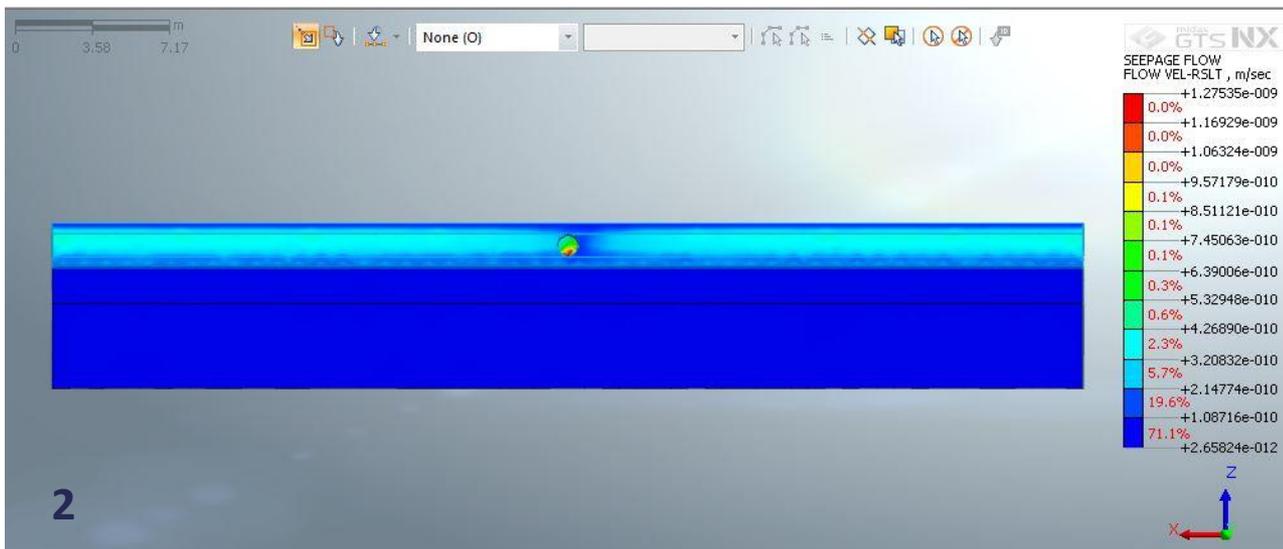
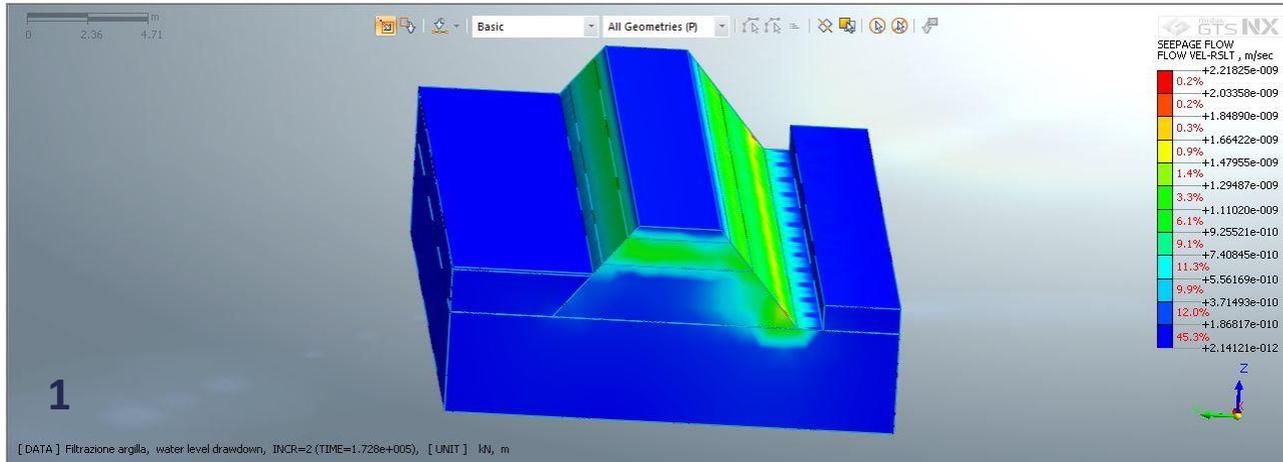
# 10. Le potenzialità derivanti dall'utilizzo dei dati di monitoraggio per un'analisi di filtrazione e stabilità

- *Caso 2*: Introduzione nella modellizzazione della zona di *piping*



# 10. Le potenzialità derivanti dall'utilizzo dei dati di monitoraggio per un'analisi di filtrazione e stabilità

## Velocità di filtrazione



# Conclusioni

- Adeguatezza della metodologia geoelettrica per lo scopo
- Efficienza energetica, costo contenuto e risultati affidabili del prototipo
- Possibilità di comprendere le dinamiche di filtrazione nel rilevato ma necessità di ulteriori dati
- Differente influenza delle precipitazioni con la profondità in funzione del livello del canale
- Influenza della temperatura trascurabile
- Ottenimento di una relazione per conversione resistività/contenuto d'acqua in maniera empirica grazie ai dati di un carotaggio
- Miglioramento della modellizzazione in analisi di filtrazione e stabilità e risultati più affidabili utilizzando i dati di monitoraggio

# Applicabilità

- Monitoraggio di zone ad alto rischio (pericolosità, esposizione, vulnerabilità)
- Implementazione di una rete di «punti a rischio»
- Monitoraggio da parte di PA e PC
- Determinazione delle priorità di intervento durante eventi straordinari o per la manutenzione

# Sviluppi futuri

- Analisi di filtrazione e stabilità con dati da analisi geotecniche del terreno in sito
- Confronto tra il contenuto d'acqua calcolato dai software di simulazione e ottenuto con la relazione empirica
- Esecuzione di prove di laboratorio di rottura arginale
- Definizione di soglie di stabilità connesse a situazioni di contenuto d'acqua



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Descrizione di Tech-Levee-Watch, progetto finanziato da Fondazione Cariplo



**fondazione**  
**cariplo**



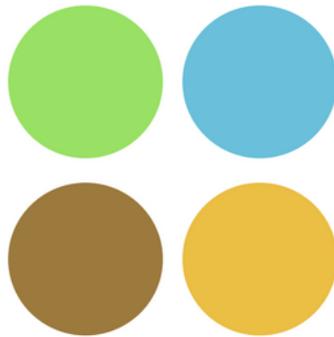
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI MODENA E REGGIO EMILIA

20 giugno 2017  
Politecnico di Milano

*Ricerca dedicata al dissesto idrogeologico: un contributo per la previsione, la prevenzione e la mitigazione del rischio*



*Tech Levee Watch  
Integrated technologies  
for diagnostic and  
monitoring of levees and  
flood prevention*

- Valutazione della vulnerabilità arginale
- Introduzione di una procedura oggettiva di controllo
- Utilizzo sinergico di nuove tecnologie geofisiche
- Generazione di allerte per la popolazione
- Previsione e prevenzione del rischio idrogeologico

# Tech Levee Watch

## 1. Fast Scanning

1.1 *Metodologia Radar e Elettromagnetica mobile*

1.2 *Ispezione su larga scala*

1.3 *Identificazione siti critici*

## 2. Monitoraggio Permanente

2.1 *Metodologia geoelettrica*

2.2 *Installazione nei siti critici*

2.3 *Controllo in tempo reale*

## 3. Scenari e Soglie

3.1 *Calibrazione curva resistività/contenuto d'acqua*

3.2 *Esperimenti di laboratorio*

3.3 *Definizione soglie di pericolosità*

## 4. Allarme

4.1 *Per autorità e popolazione*

4.2 *Priorità di intervento*

4.3 *Previsione e prevenzione del rischio idrogeologico*

# Ringraziamenti



**fondazione**  
**c a r i p l o**

