

# Integrazione di dati idrologici satellitari a modelli di previsione di frane superficiali

Massimiliano Bordoni<sup>1</sup>, Valerio Vivaldi<sup>1</sup>, Luca Brocca<sup>2</sup>, Luca Ciabatta<sup>2</sup>, Claudia Meisina<sup>1</sup>

1



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

2



# 1. IL PROBLEMA



- **Frane superficiali indotte da piogge:** innescate da eventi di pioggia intensi e spesso concentrati
- Innesco legato alle caratteristiche idrologiche e geologico-geomorfologiche del sito
- **Danni significativi a strade, infrastrutture, coltivazioni, spesso perdita di vite umane**
- Alta densità di fenomeni in aree di piccole dimensioni (> 10 frane per km<sup>2</sup>)
- **Aumento della loro probabilità di accadimento a causa del cambiamento climatico (Gariano and Guzzetti, 2016; Ciabatta et al., 2017; Haque et al., 2019)**



Evento del 27-28 April 2009 in Oltrepò Pavese: 1639 frane superficiali in 250 km<sup>2</sup>

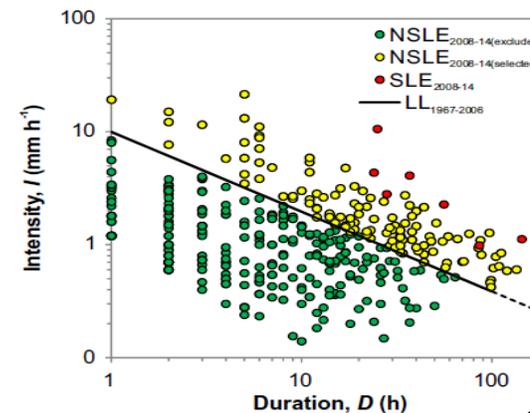
## Metodi di valutazione della probabilità di accadimento spaziale e temporale di frane superficiali

### Soglie pluviometriche

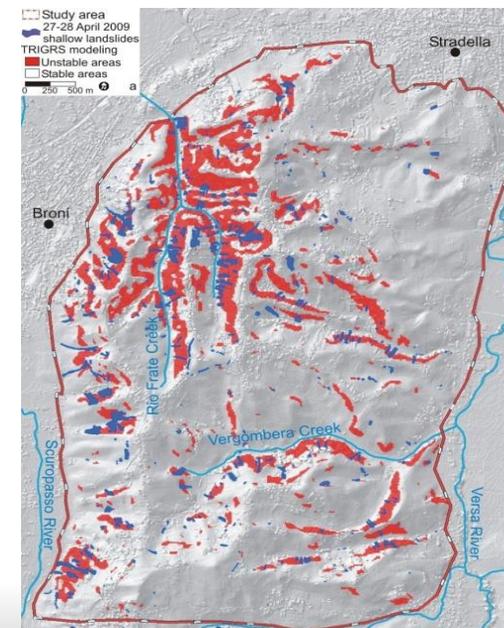
- + Condizioni di pioggia di innesco
- + Facili da ricostruire a scala regionale
- Non si considerano dati geologici e geomorfologici, piogge antecedenti
- Incertezze sulla qualità e sulla quantità dei dati di pioggia

### Modelli fisicamente basati

- + Analisi quantitativa della condizioni che portano all'innesco
- + Tengono conto delle proprietà geologiche e idrologiche dei terreni, nonché della morfologia dei versanti
- + Analisi di come cambia nel tempo la percentuale di aree stabili e instabili
- Elevato numero di dati, limitati a piccoli bacini
- Incertezze sulle condizioni al contorno dei modelli



Galanti et al., 2018



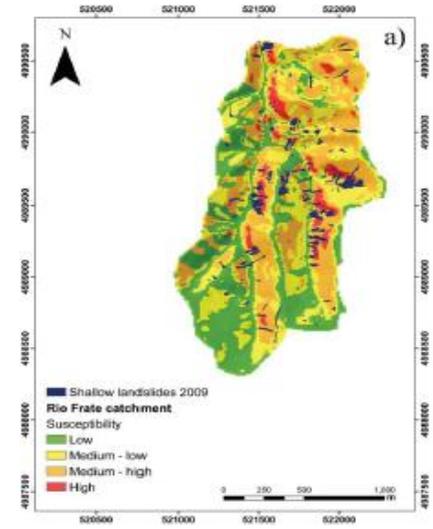
Bordoni et al., 2015

## 2. STATO DELL'ARTE

### Metodi di valutazione della probabilità di accadimento spaziale e temporale di frane superficiali

#### Metodi data-driven

- + **Tengono conto delle proprietà geologiche e idrologiche dei terreni, nonché della morfologia dei versanti**
- + **Facili da ricostruire a scala regionale**
- + **Modellazione di diversi eventi, a partire da diversi inventari**
- **Variabili dinamiche per la stima dell'innescò (pioggia, proprietà idrologiche del suolo) non sono in genere considerati)**



Persichillo et al., 2017

Sviluppare una metodologia innovativa che tenga conto dei vantaggi di questi modelli e consenta di superare i loro svantaggi:

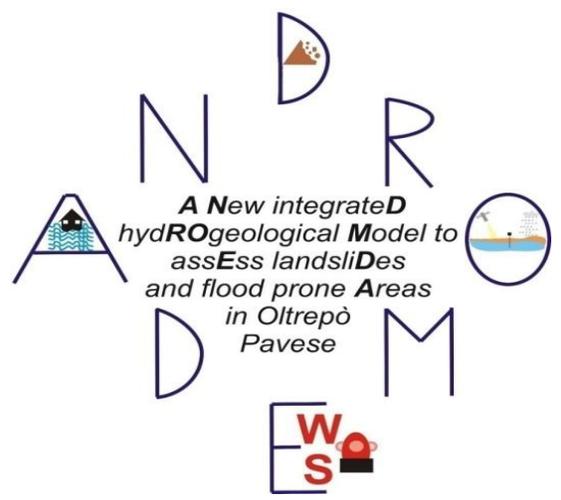
- **Considerare fattori predisponenti “statici” e innescanti “dinamici (pioggia, proprietà idrologiche del suolo)**
- **Analisi dinamica nel tempo per individuare come cambiano le aree stabili e instabili**
- **Facili da ricostruire a scala regionale e in grado di modellare diversi eventi**



# 3. OBIETTIVI



**Sviluppo e validazione di un metodo data-driven per la stima della probabilità spazio-temporale di innesco di frane superficiali indotte di piogge a larga scala, che integri dati idrologici raccolti tramite satellite**



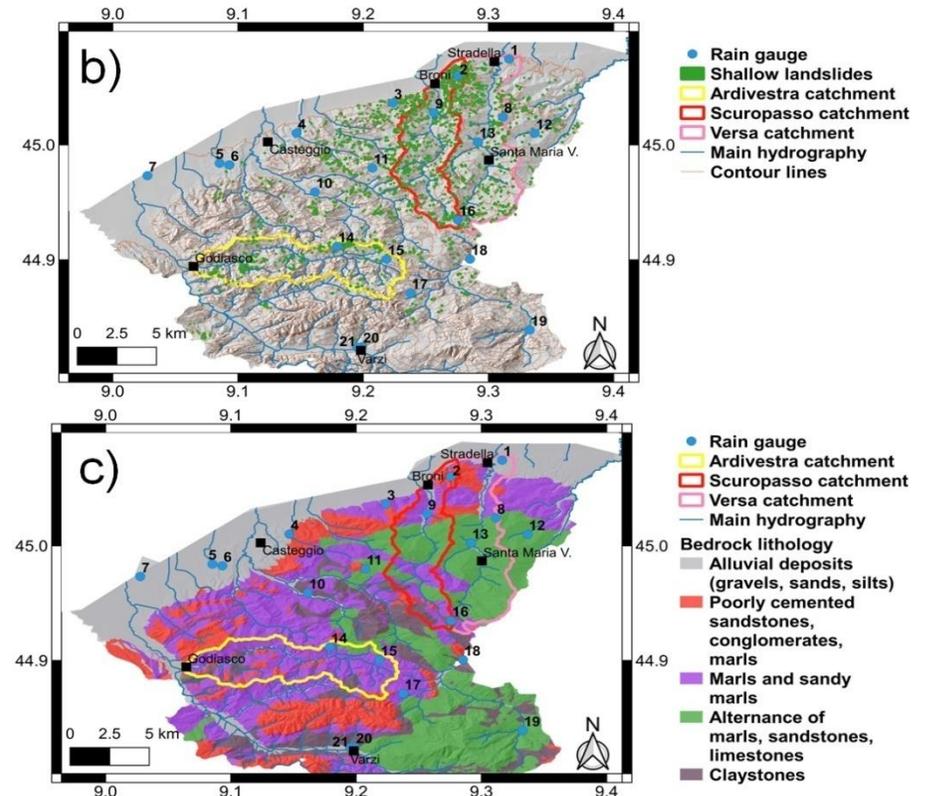
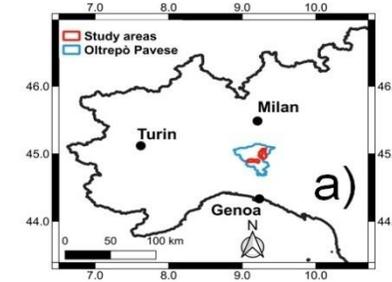
# 4. AREE DI STUDIO

## Oltrepò Pavese area (720 km<sup>2</sup>): rappresentativo delle condizioni geologico-geomorfologiche dell'Appennino Settentrionale

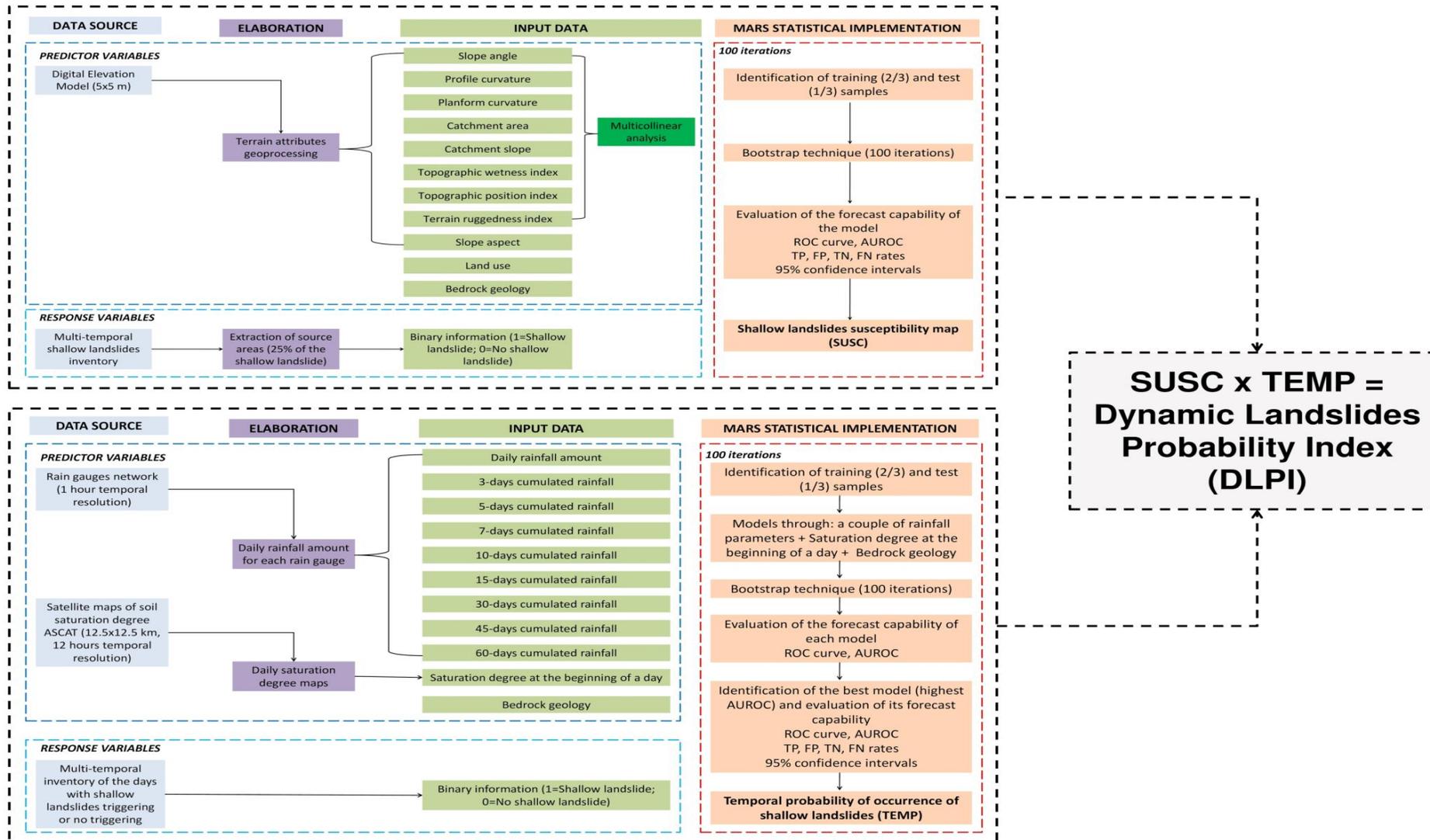
Bacino dell'Ardivestra: versanti medio-bassa pendenza (8-15°), suoli argillosi spessi (>2 m) derivanti da substrati argillosi e a matrice caotica

Bacini di Scuropasso e Versa: versanti molto pendenti (>15°), suoli limoso poco spessi (1-1.5 m) derivanti da substrati marnosi e arenaceo-conglomeratici

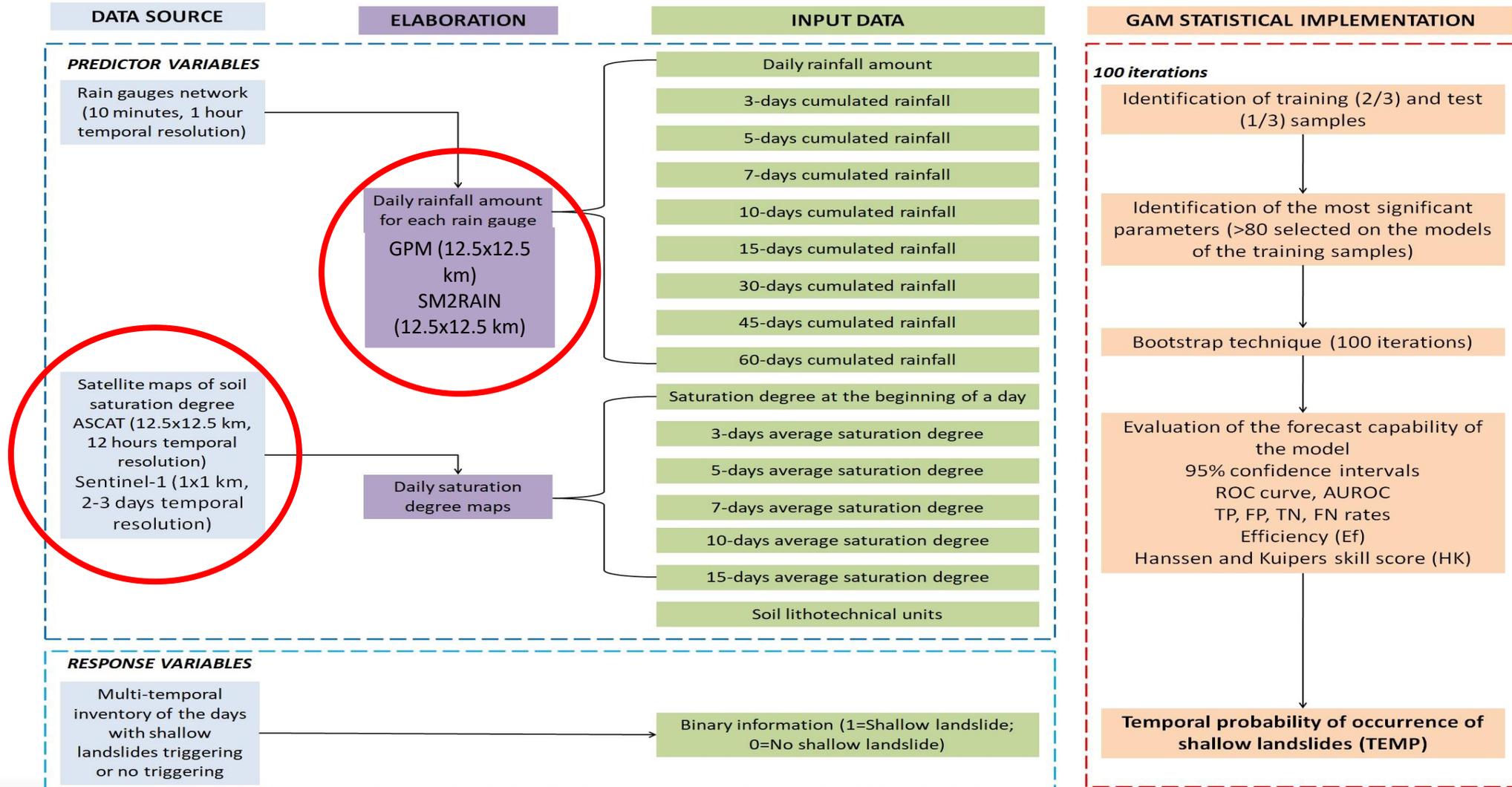
Elevata suscettibilità a frane superficiali: fino a 51 frane per km<sup>2</sup>



# 5. METODI



## Modello di probabilità di accadimento temporale (TEMP): integrazione di dati idrologici satellitari



### Dati disponibili

#### Per la suscettibilità (previsione spaziale):

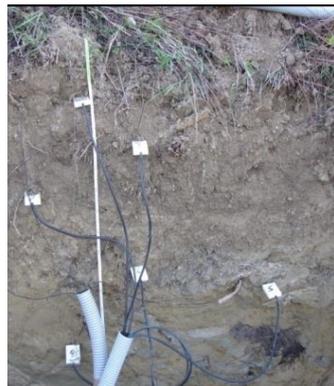
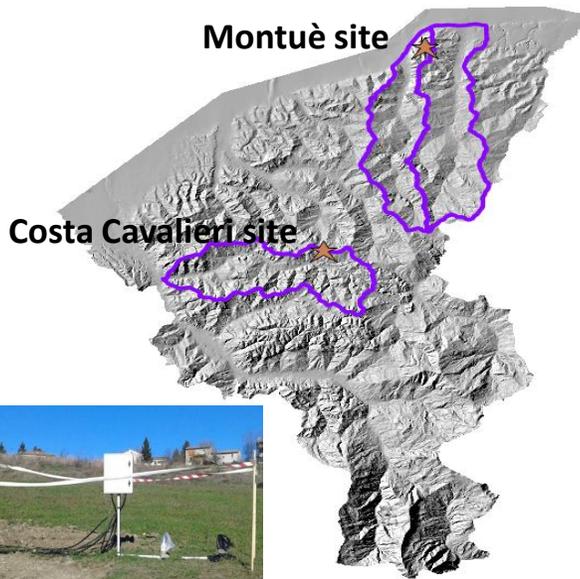
- Modello digitale DEM 5x5 m, uso del suolo, litologia del substrato,
- Inventario multi-temporale delle frane superficiali avvenute dal 2008

#### Per la previsione temporale:

- Dati di pioggia delle stazioni meteo a terra dal 2008
- Mappe di umidità del suolo acquisite da satellite tramite ASCAT (dal 2008) e Sentinel-1 (dal 2015)
- Mappe di pioggia acquisite da satellite tramite GPM (dal 2014)
- Mappe di pioggia derivate da mappe di umidità del suolo acquisite da satellite (SM2RAIN; Brocca et al., 2014) (dal 2008)

## Misure in campo di pioggia

- Pluviometri (risoluzione 0.1 mm)

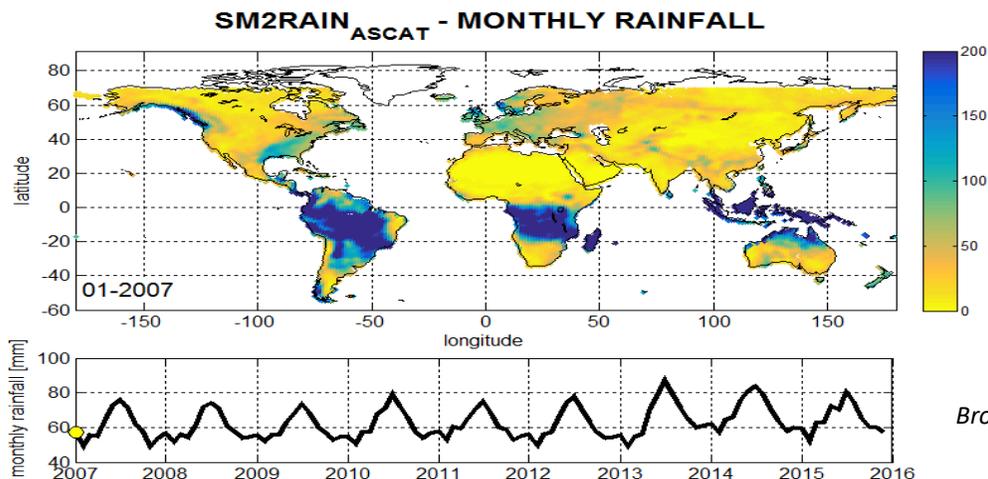
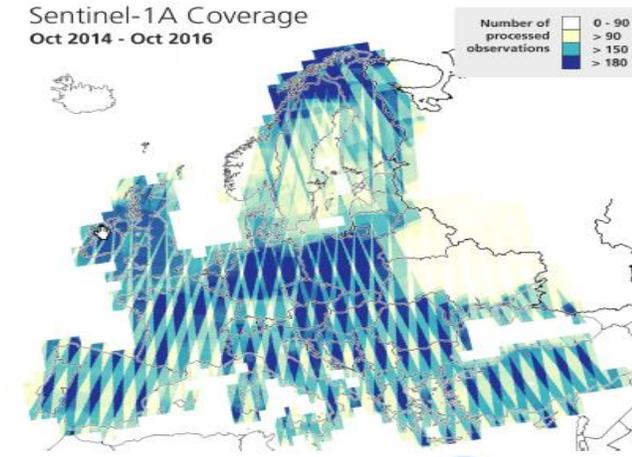
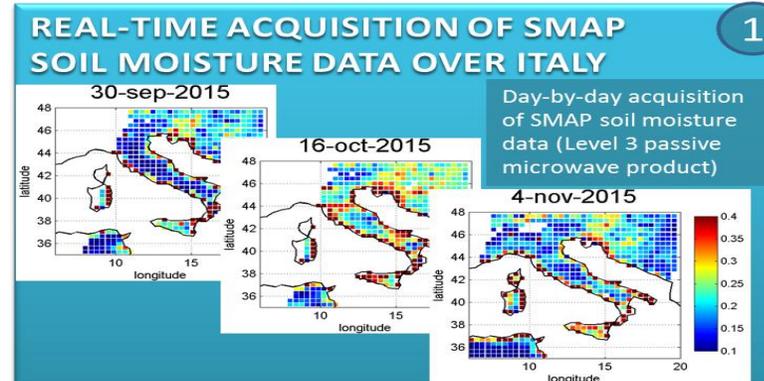


## Misure in campo di umidità del suolo

- Stazioni di monitoraggio idrologico: sensori di misura del contenuto in acqua a diverse profondità (TDR, sonde dielettriche)

## Mappe di umidità del suolo da satellite

- ASCAT (12.5 km, 12 h)
- Sentinel-1 (1 km, 2-3 d)

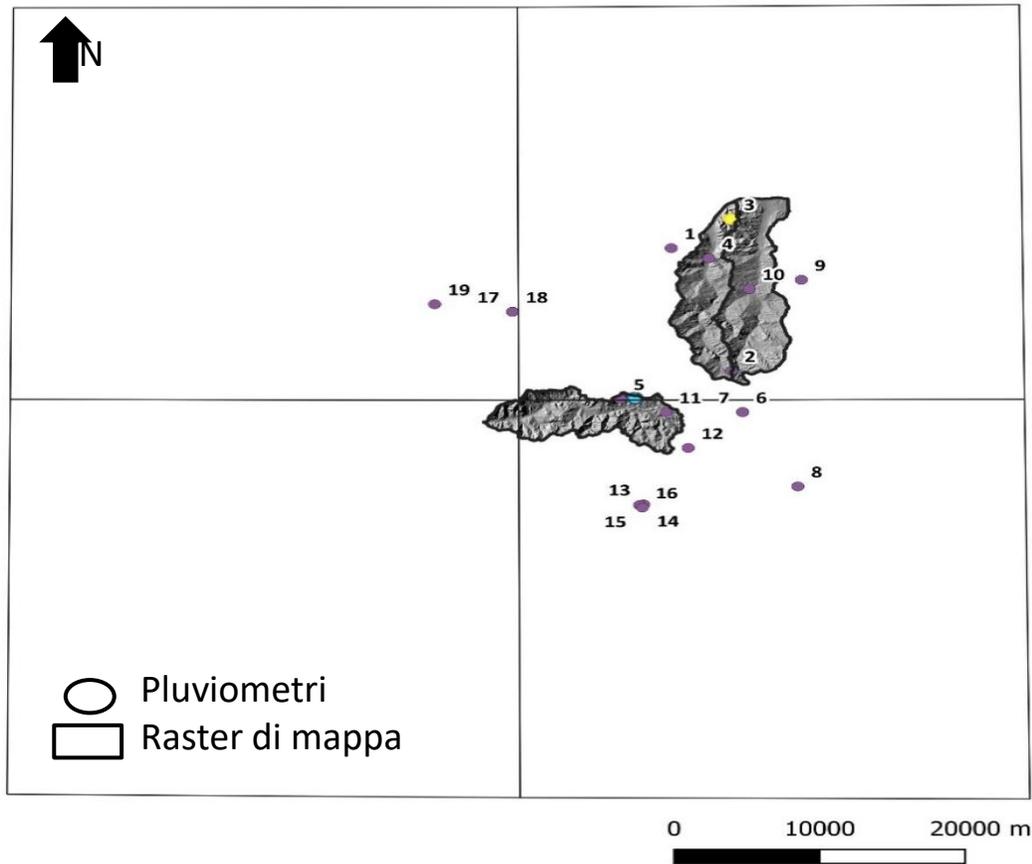


Brocca et al., 2014

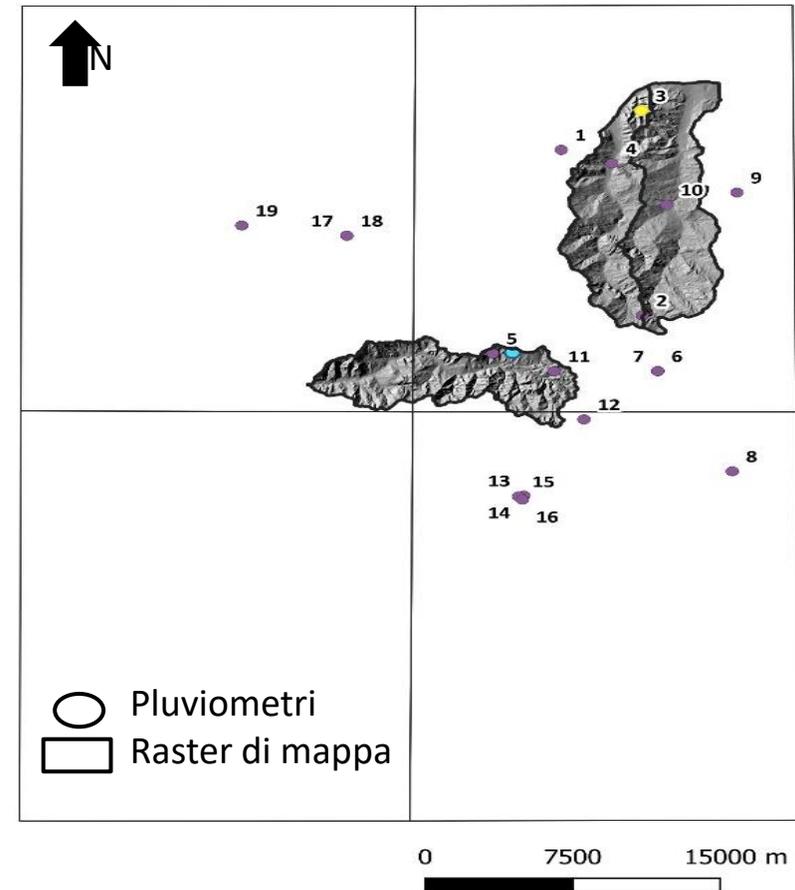
## Mappe di pioggia da satellite

- GPM-IMERG (10 km, 30 min)
- SM2RAIN-derived:
  - ASCAT (12.5 km, 1d)
  - SCATSAR (1 km, giornaliero)
- Integrated (GPM+SM2RAIN)

Mappe di umidità del suolo ASCAT  
Mappe di pioggia SM2RAIN



Mappe di pioggia GPM

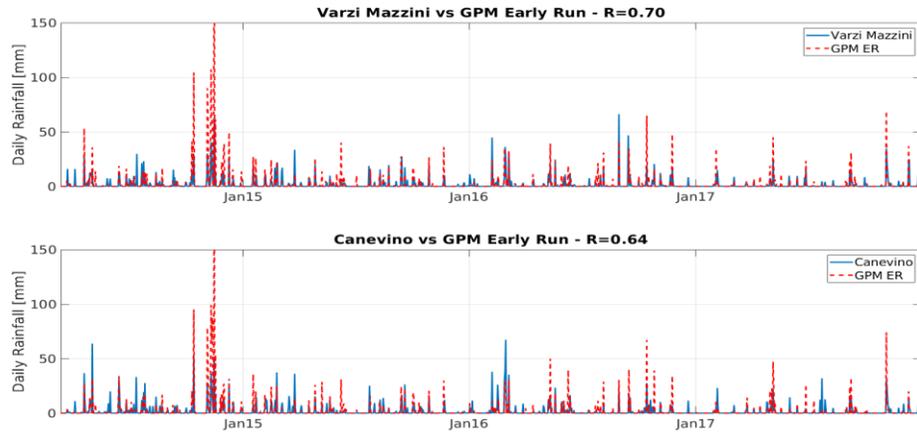


# 6. RISULTATI

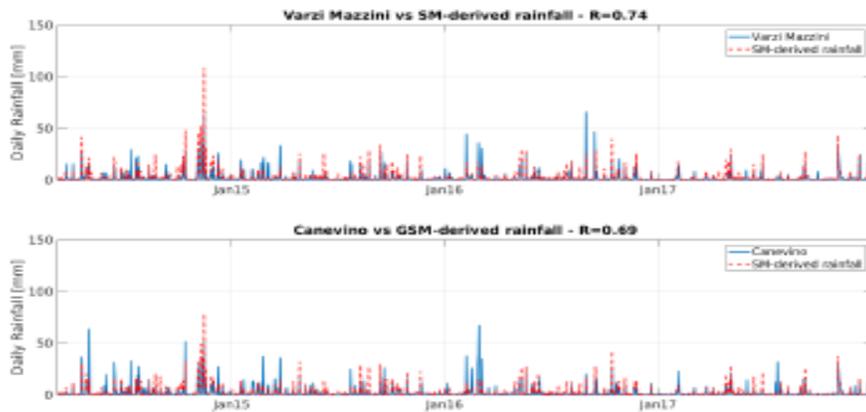
## Confronto tra misure di campo e satellitari di pioggia e umidità del suolo

### Pioggia

Pluviometri vs GPM: R=0.64-0.70

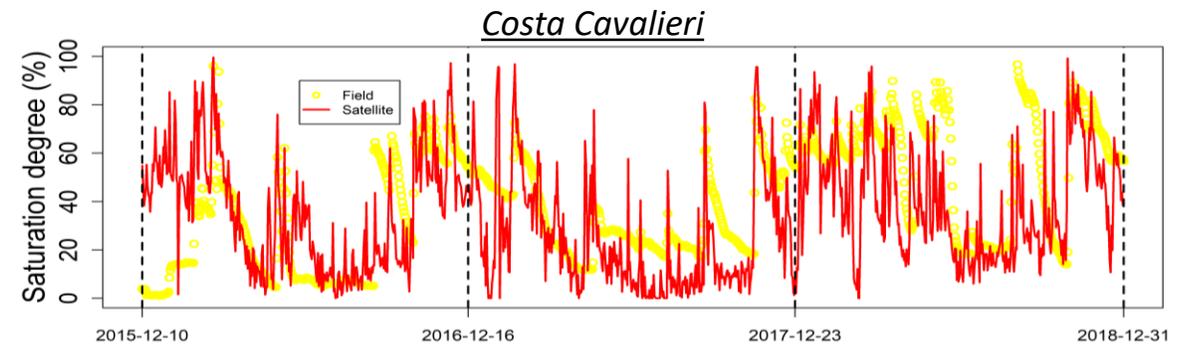
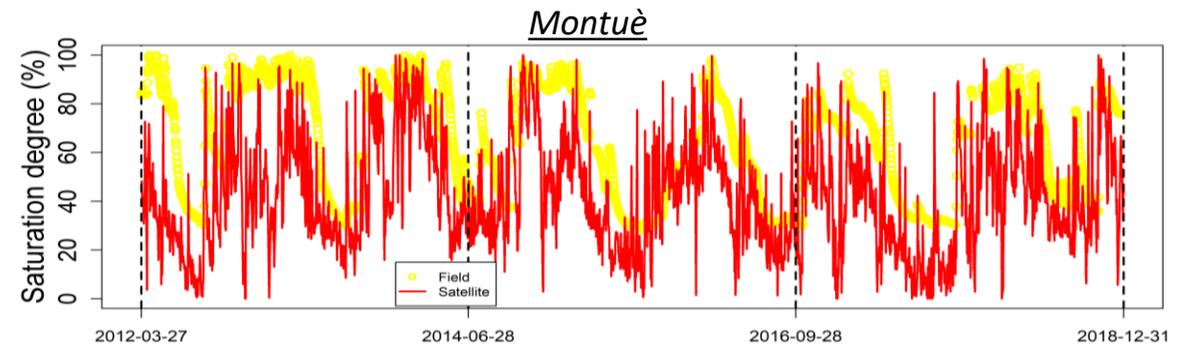


Pluviometri vs SM2RAIN: R=0.69-0.74

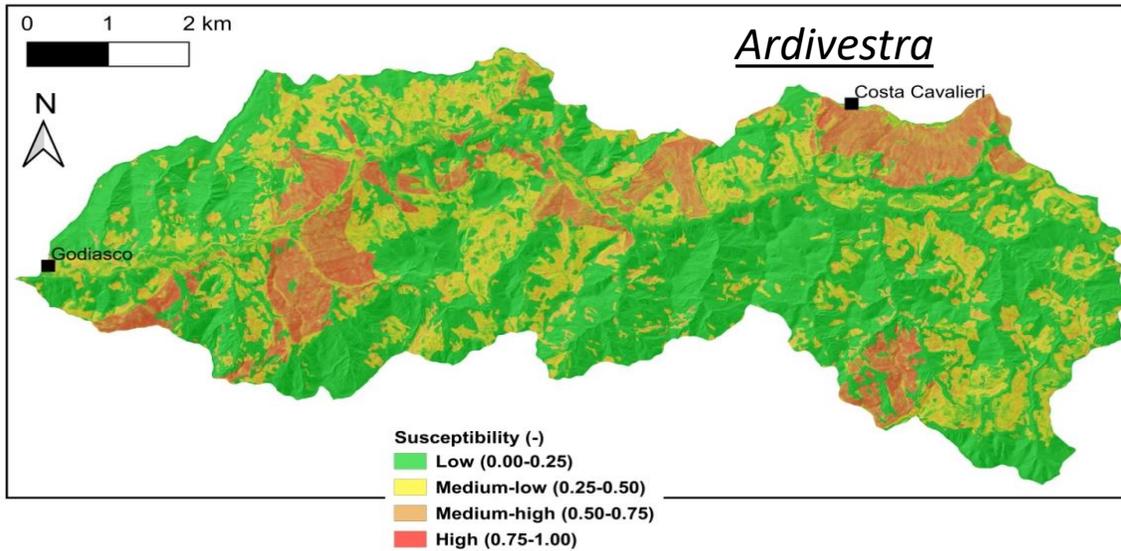


### Umidità del suolo

Campo vs ASCAT: R=0.64-0.71

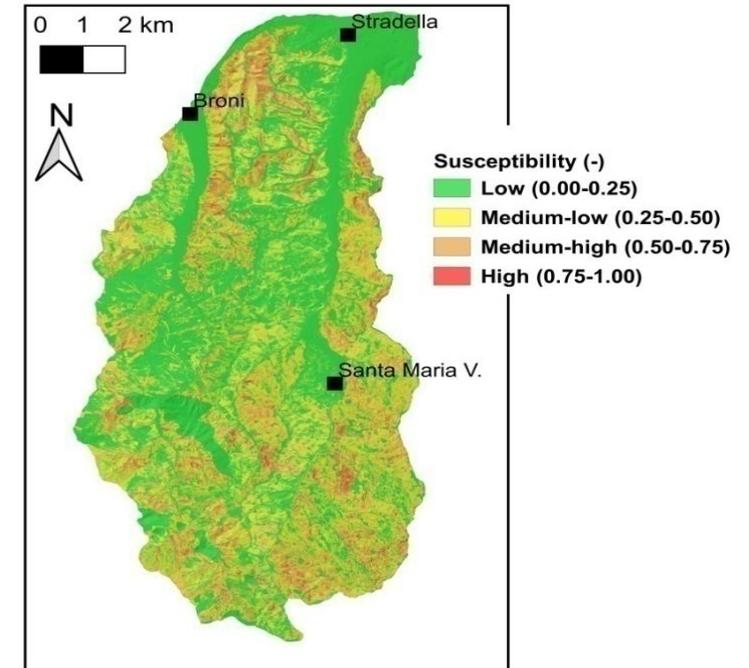


## Mappe di suscettibilità a scala di bacino



Parametri significativi: slope angle (non-linear), tpi (non-linear), catchment area, land use, lithotechnical units  
 AUROC=0.90  
 TP=85%, TN=75%, FP=25%, FN=15%  
 Ef=86%, HK=70%

## Scuropasso-Versa



Parametri significativi: slope angle (non-linear), tpi (non-linear), twi (non-linear), planform curvature (non-linear), catchment slope (non-linear), slope aspect, land use, lithotechnical units  
 AUROC=0.89  
 TP=88%, TN=76%, FP=24%, FN=12%  
 Ef=82%, HK=76%

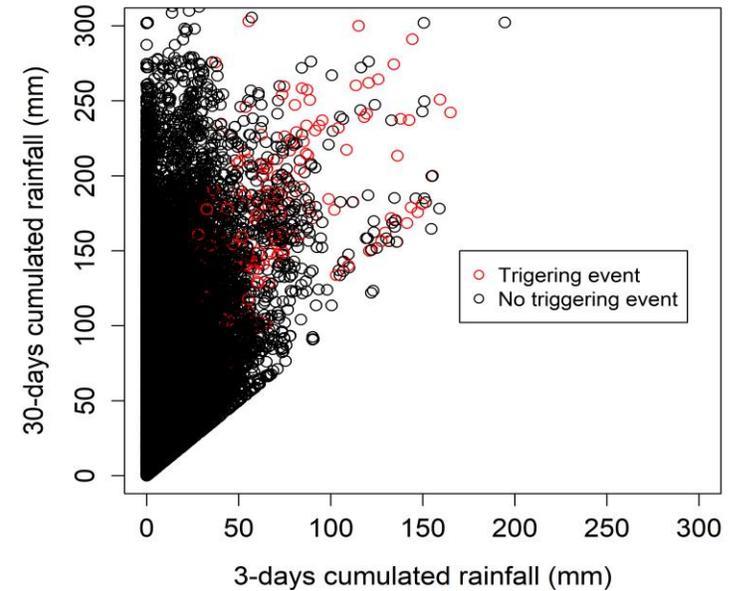
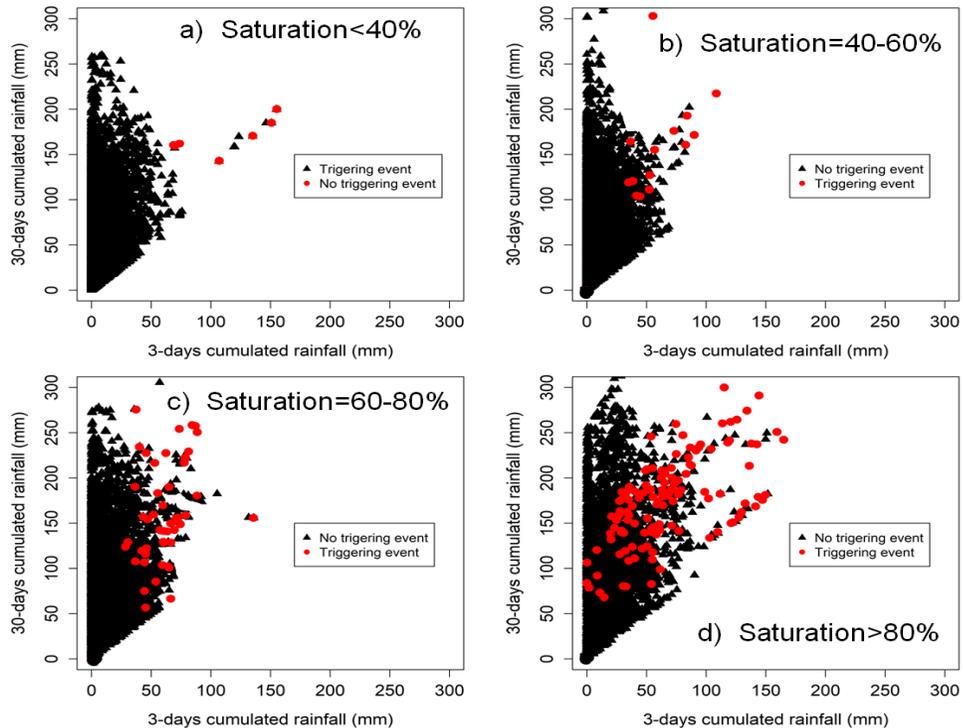
## Probabilità di accadimento temporale a scala giornaliera

Parametri significativi: pioggia cumulata di 3 giorni, pioggia cumulata di 30 giorni, grado di saturazione all'inizio del giorno

AUROC=0.98

TP=98%, TN=98%, FP=2%, FN=2%

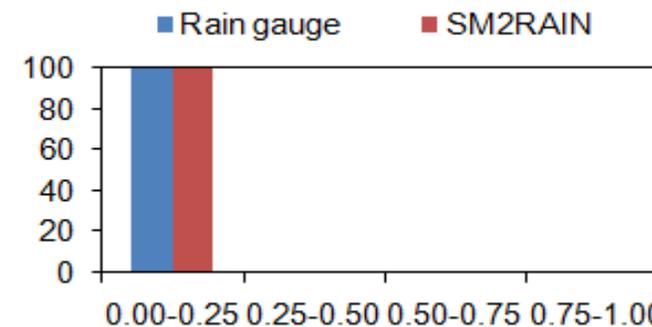
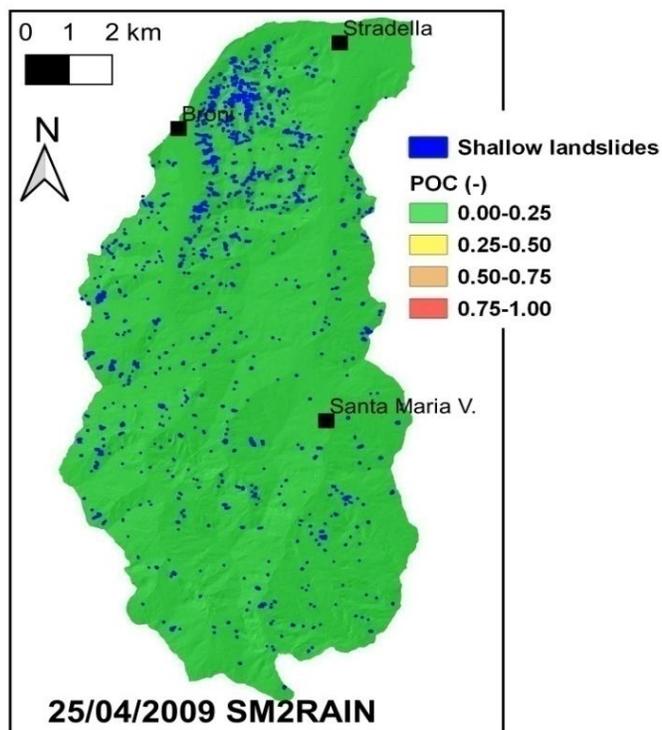
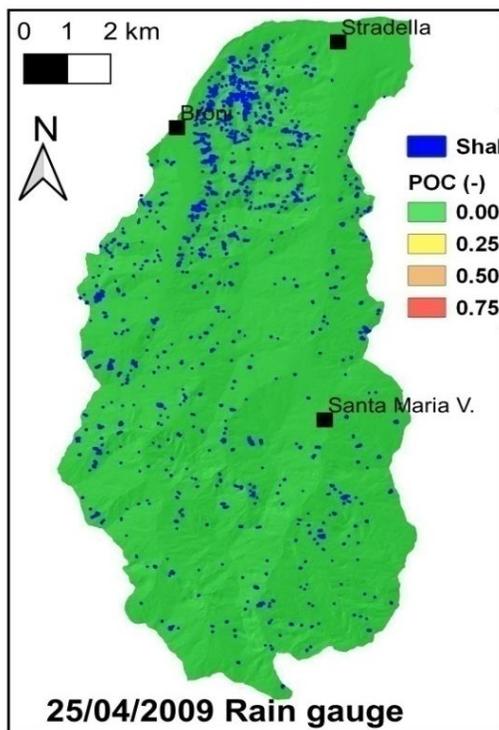
Ef=98%, HK=96%



# 6. RISULTATI



## Scuropasso e Versa - 25/04/2009



3d-rain=0.4-0.6 mm  
 30d-rain=141.6-149.8 mm  
 Sat.=56%

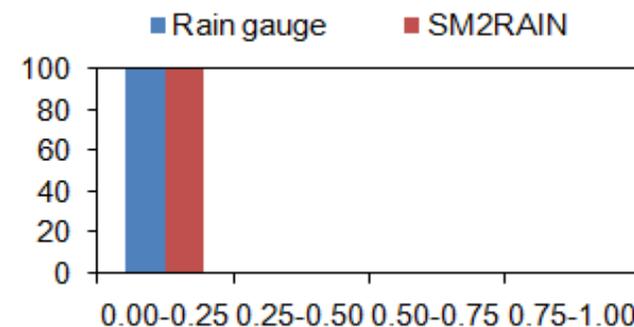
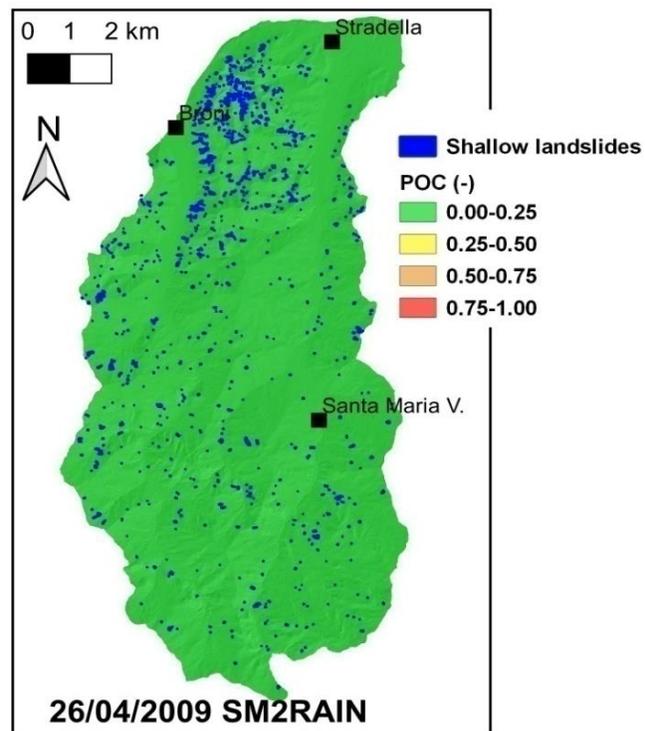
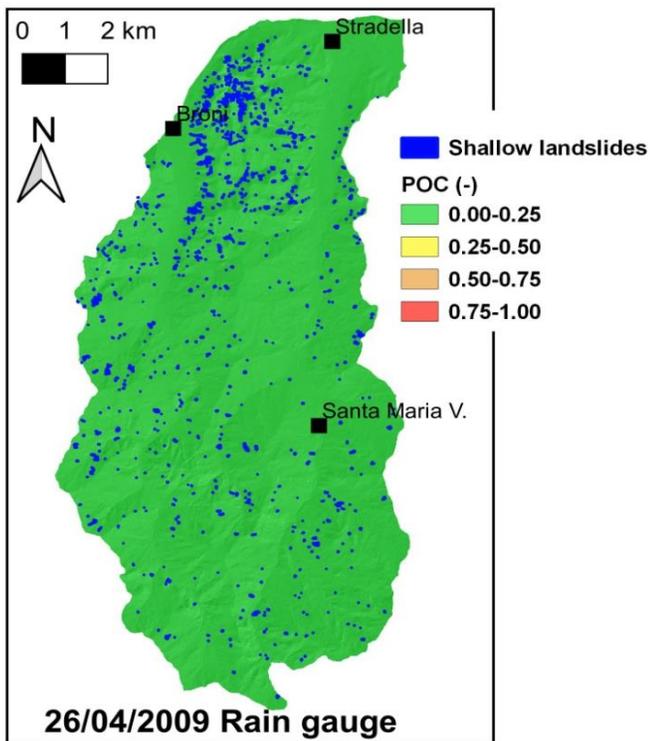
3d-rain=0.0-5.0 mm  
 30d-rain=141.0-193.0 mm  
 Sat.=56%

Kappa index=1.00

# 6. RISULTATI



## Scuropasso e Versa - 26/04/2009

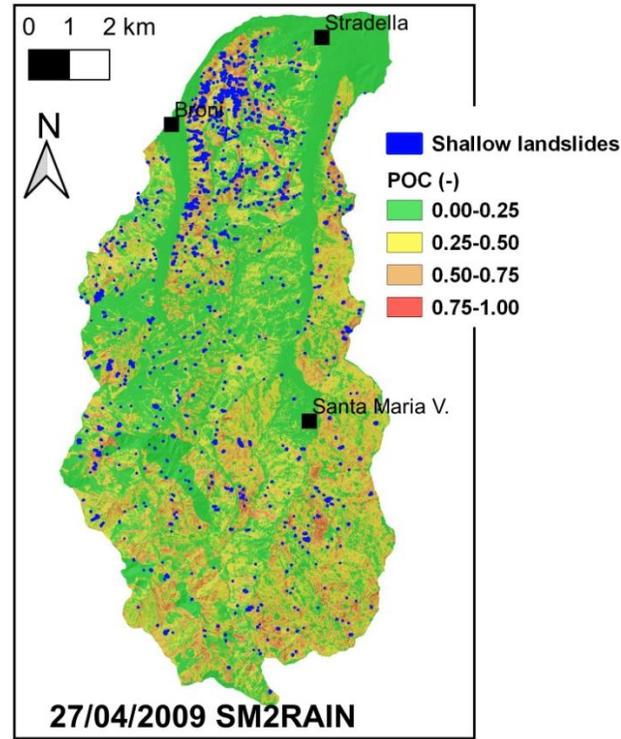
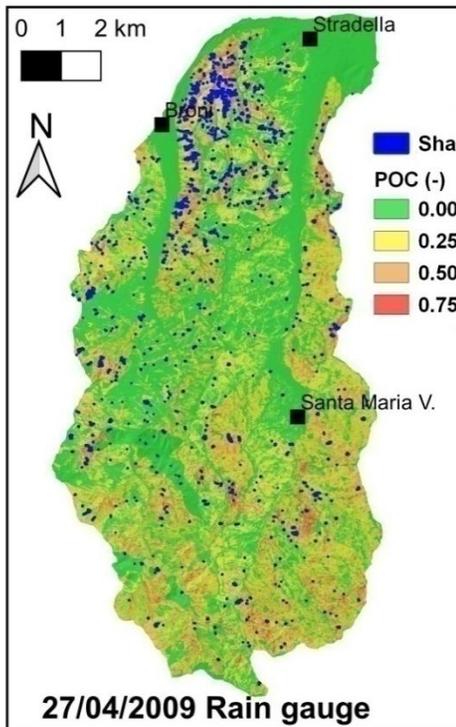


3d-rain=10.8-11.4 mm  
 30d-rain=152.0-161.2 mm  
 Sat.=53-54%

3d-rain=15.0-17.5 mm  
 30d-rain=158.5-203.0 mm  
 Sat.=53-54%

Kappa index=1.00

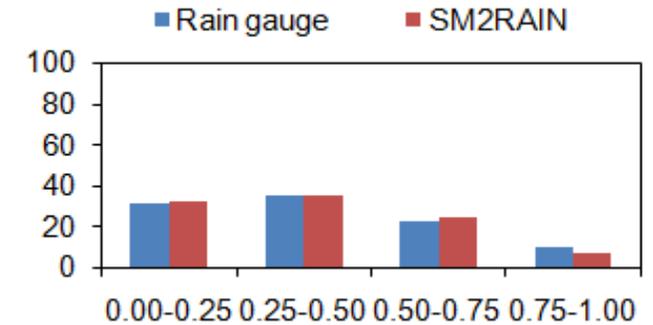
## Scuropasso e Versa - 27/04/2009 → Momento di innesco



3d-rain=113.6-125.8 mm  
 30d-rain=260.2-264.4 mm  
 Sat.=80%

3d-rain=63.0-75.0 mm  
 30d-rain=176.5-211.0 mm  
 Sat.=80%

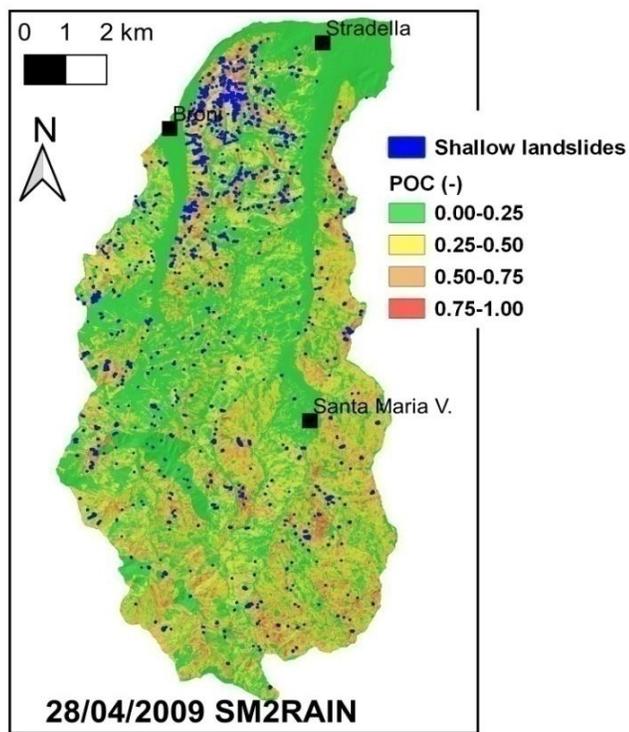
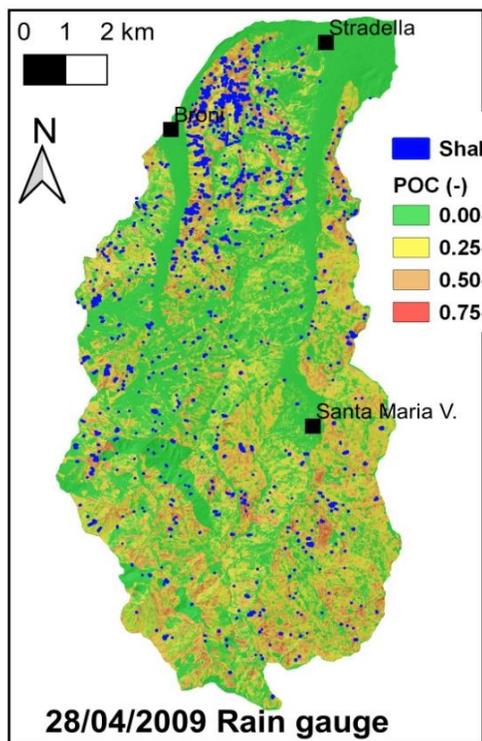
Kappa index=0.97-0.99



# 6. RISULTATI



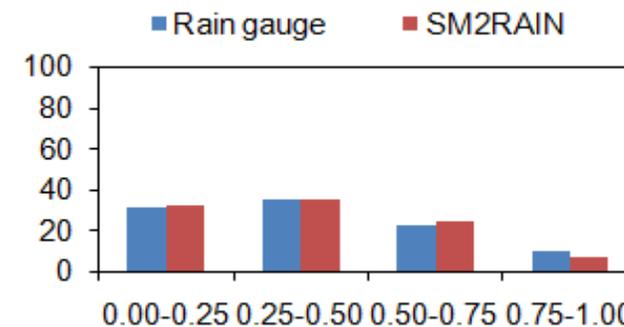
## Scuropasso e Versa - 28/04/2009 → Momento di innesco



3d-rain=113.6-125.8 mm  
 30d-rain=260.2-264.4 mm  
 Sat.=80%

3d-rain=63.0-75.0 mm  
 30d-rain=176.5-211.0 mm  
 Sat.=80%

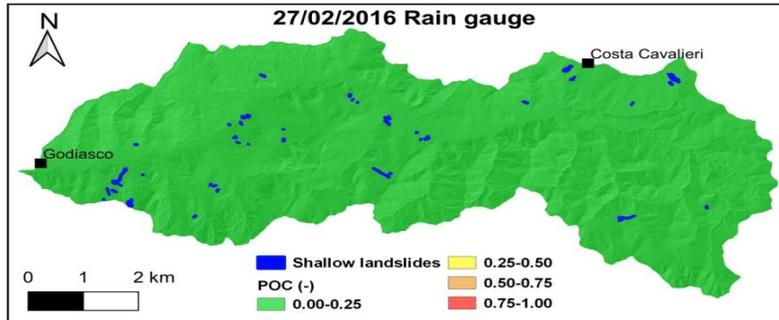
Kappa index=1.00



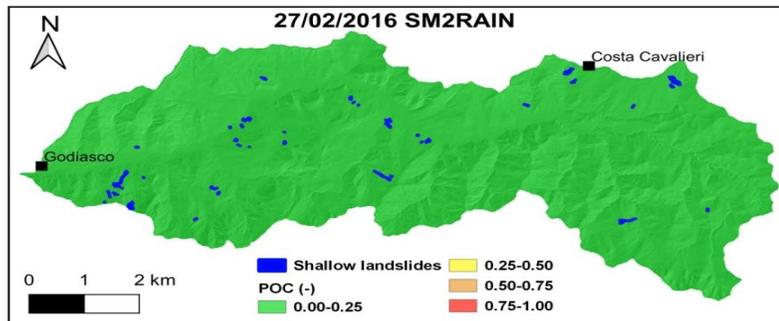
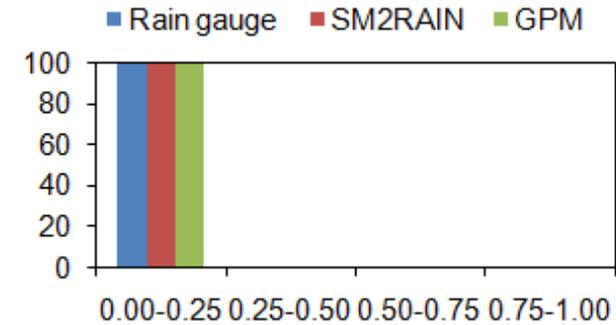
	Rain gauge	SM2RAIN
<b>AUROC</b>	0.88	0.88
<b>TP</b>	91.8	91.8
<b>TN</b>	84.1	84.1
<b>FP</b>	15.9	15.9
<b>FN</b>	8.2	8.2
<b>Ef</b>	85.3	85.3
<b>Hk</b>	75.9	75.9

# 6. RISULTATI

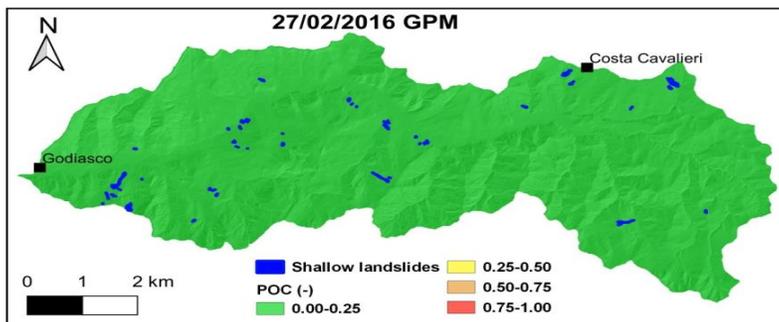
Ardivestra - 27/02/2016



3d-rain=23.2 mm  
30d-rain=93.4 mm  
Sat.=77%



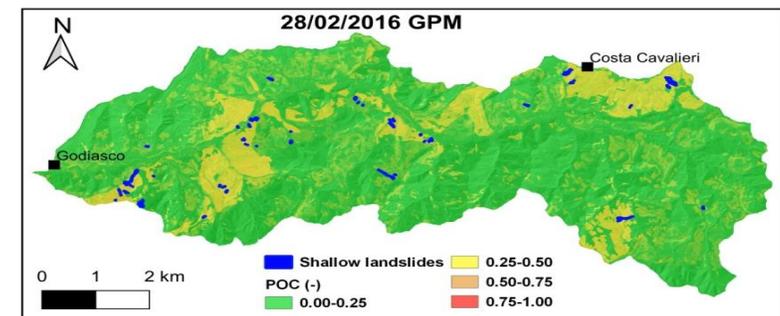
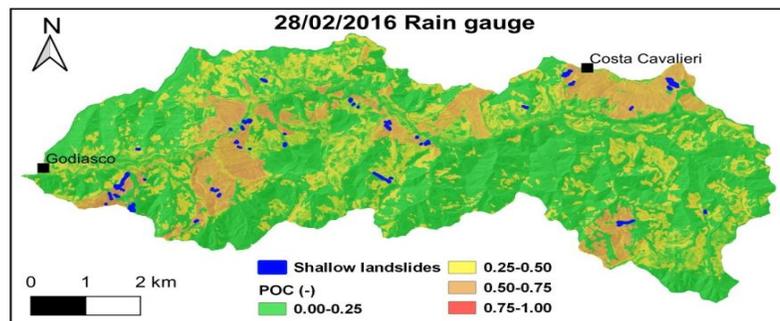
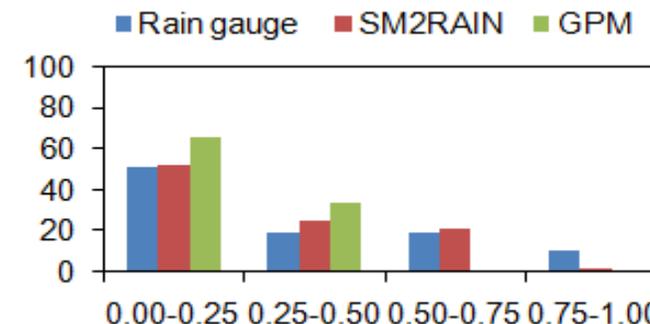
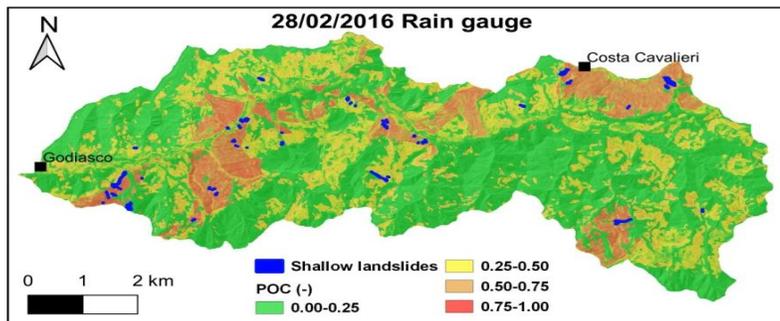
3d-rain=0.0 mm  
30d-rain=42.1 mm  
Sat.=77%



3d-rain=1.1 mm  
30d-rain=3.5 mm  
Sat.=77%

Kappa index=1.00

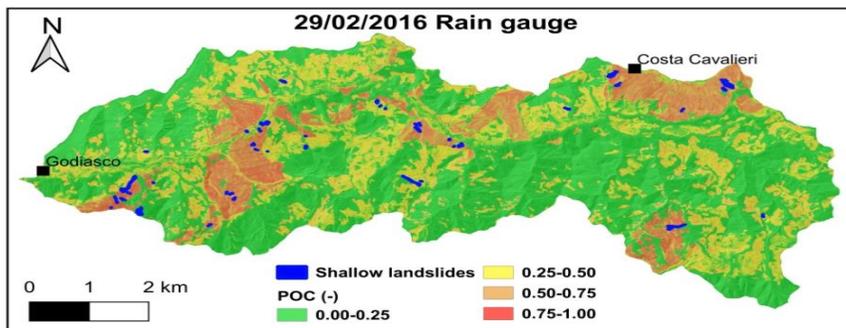
## Ardivestra - 28/02/2016 → Momento di innesco



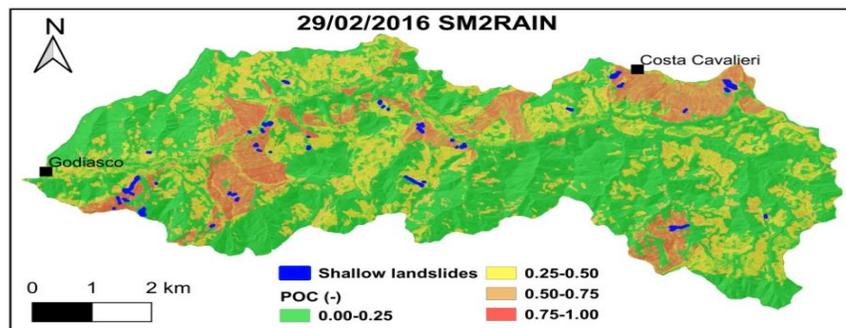
Kappa index=0.43-0.97

# 6. RISULTATI

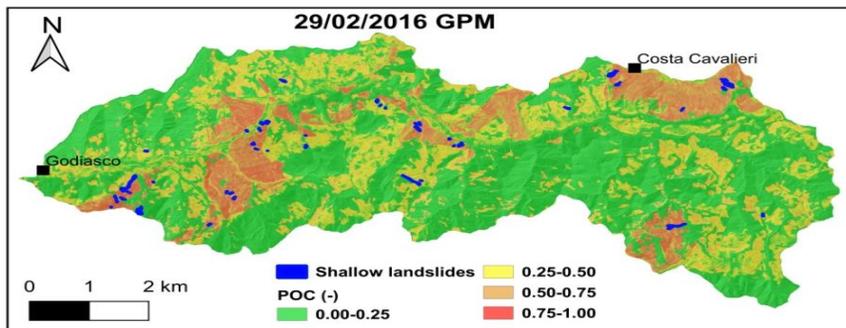
## Ardivestra - 29/02/2016 → Momento di innesco



3d-rain=102.0 mm  
30d-rain=177.0 mm  
Sat.=99%

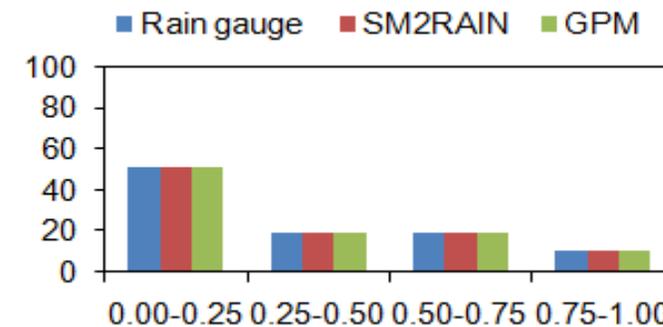


3d-rain=78.2 mm  
30d-rain=135.3 mm  
Sat.=99%



3d-rain=152.1 mm  
30d-rain=158.3 mm  
Sat.=99%

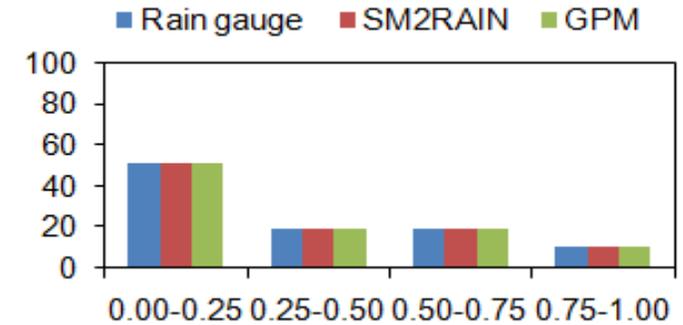
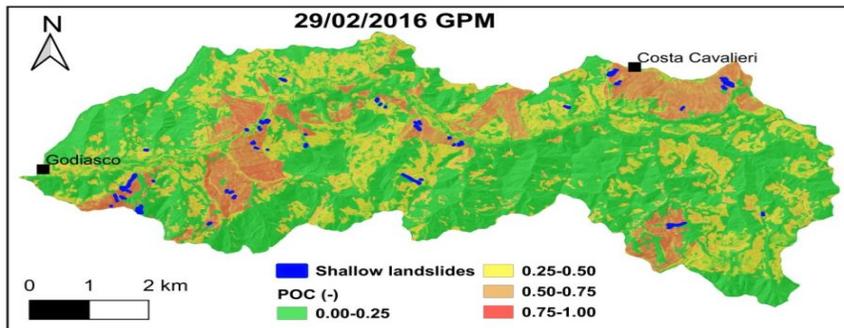
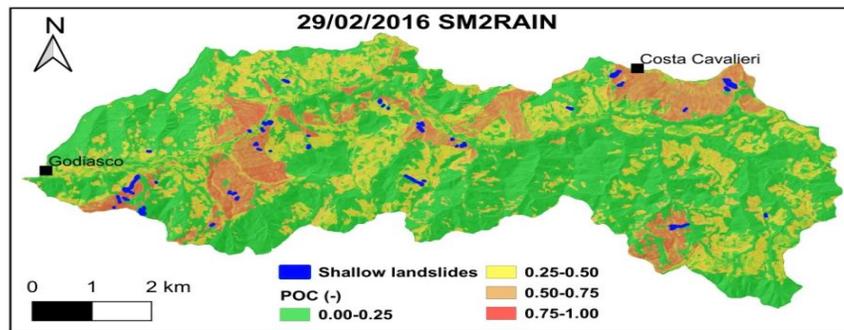
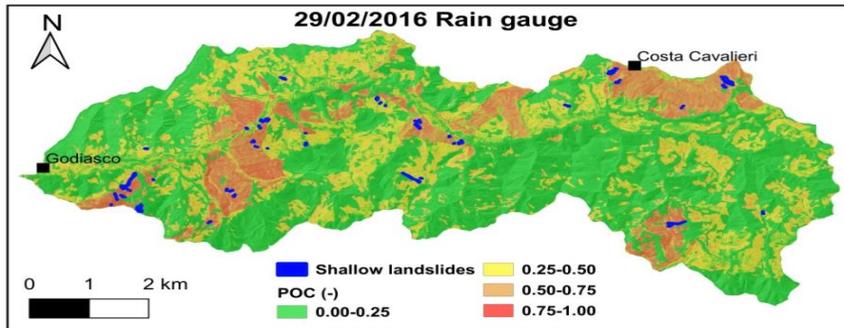
Kappa index=1.00



	Rain gauge	SM2RAIN	GPM
<b>AUROC</b>	0.89	0.89	0.89
<b>TP</b>	94.5	94.5	94.5
<b>TN</b>	83.6	83.6	83.6
<b>FP</b>	16.4	16.4	16.4
<b>FN</b>	5.5	5.5	5.5
<b>Ef</b>	88.6	88.6	88.6
<b>Hk</b>	78.1	78.1	78.1

# 6. RISULTATI

Ardivestra - 01/03/2016



Kappa index=1.00

Bordoni M., Vivaldi V., Lucchelli L., Ciabatta L., Brocca L., Galve J.P., Meisina C. (2021). Development of a data-driven model for spatial and temporal shallow landslide probability of occurrence at catchment scale. *Landslides* 18, 1209-1229. doi:10.1007/s10346-020-01592-3.

---

### Original paper

---

Landslides (2021) 18:1209–1229  
DOI 10.1007/s10346-020-01592-3  
Received: 29 May 2020  
Accepted: 20 November 2020  
Published online: 3 December 2020  
© The Author(s) 2020

**M. Bordoni · V. Vivaldi · L. Lucchelli · L. Ciabatta · L. Brocca · J. P. Galve · C. Meisina**

### **Development of a data-driven model for spatial and temporal shallow landslide probability of occurrence at catchment scale**

### Vantaggi e limiti della metodologia proposta

- + Fattori predisponenti “statici” più importanti integrati a fattori idrologici “dinamici”
  - + Valutazione dinamica delle aree stabili e instabili e della loro variazione nel tempo, a scala giornaliera e su area vasta, considerando come varia la distribuzione di piogge e umidità
  - + Modellazione corretta delle aree di innesco e dei giorni in cui queste frane si possono formare
  - + Integrazione con mappe di pioggia e umidità da satellite
- 
- Numero ancora elevato di falsi positivi (sovrastima del modello)
  - Spesso modellizzate condizioni instabili anche per 1-2 giorni dopo la fine di un evento

### Vantaggi e limiti della metodologia proposta

- + Fattori predisponenti “statici” più importanti integrati a fattori idrologici “dinamici”
  - + Valutazione dinamica delle aree stabili e instabili e della loro variazione nel tempo, a scala giornaliera e su area vasta, considerando come varia la distribuzione di piogge e umidità
  - + Modellazione corretta delle aree di innesco e dei giorni in cui queste frane si possono formare
  - + Integrazione con mappe di pioggia e umidità da satellite
- 
- Numero ancora elevato di falsi positivi (sovrastima del modello)
  - Spesso modellizzate condizioni instabili anche per 1-2 giorni dopo la fine di un evento

### Possibili utilizzi

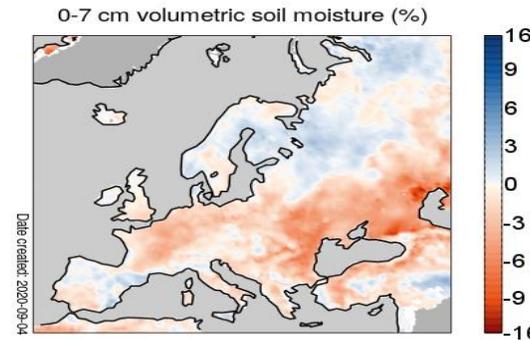
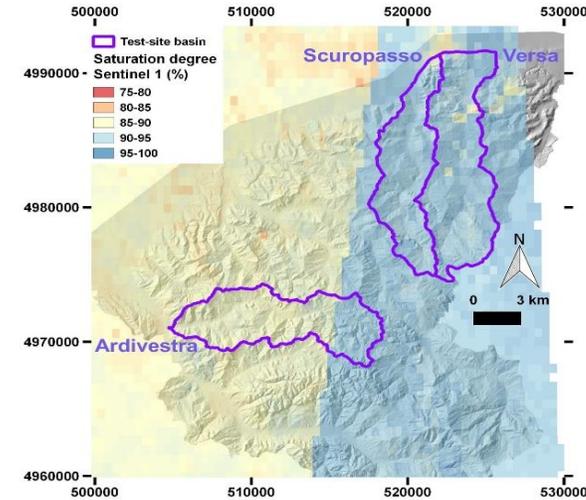
- Carte di suscettibilità da frana superficiale, mappe semaforiche di probabilità di accadimento spazio-temporale per eventi con diversi tempi di ritorno → Pianificazione territoriale
- Mappe semaforiche di probabilità di accadimento spazio-temporale in funzione delle piogge previste → Protezione civile

## Sviluppi futuri

➤ Integrazione di dati satellitari a maggiore risoluzione (es. Sentinel-1, 1x1 km)

➤ Considerare mappe di umidità del suolo modellate a maggiore profondità (es. 1 m dal piano campagna, tipica profondità della superficie di scivolamento)

➤ Scenari di pericolosità per diversi tempi di ritorno



ERA5 dataset

Modelli di previsione del contenuto in acqua in profondità da dati satellitari superficiali **(in fase di validazione)**

## 8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bogaard T, Greco R (2018) Invited perspectives: hydrological perspectives on precipitation intensity-duration thresholds for landslide initiation: Proposing hydrometeorological thresholds. Nat Hazards Earth Syst Sci 18:31–39. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-31-2018>

Bordoni M, Meisina C, Valentino R, Lu N, Bittelli M, Chersich S (2015) Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: from the field monitoring to a simplified slope stability analysis. Eng Geol 193:19–37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.006>

Bordoni M, Corradini B, Lucchelli L, Valentino R, Bittelli M, Vivaldi V, Meisina C (2019) Empirical and physically based thresholds for the occurrence of shallow landslides in a prone area of northern Italian Apennines. Water 11:2653.  
<https://doi.org/10.3390/w11122653>

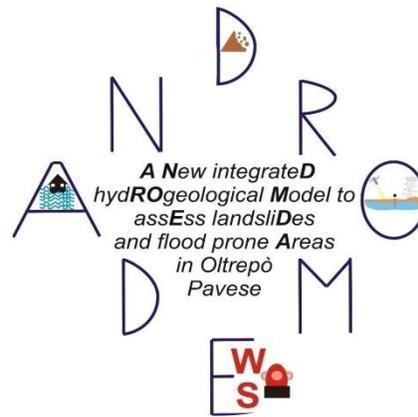
Brocca L, Ciabatta L, Massari C, Moramarco T, Hahn S, Hasenauer S, Kidd R, Dorigo W, Wagner W, Levizzani V (2014) Soil as a natural rain gauge: estimating global rainfall from satellite soil moisture data. J Geophys Res Atmos 119:5128–5141. <https://doi.org/10.1002/2014JD021489>

Brunetti MT, Melillo M, Peruccacci S, Ciabatta L, Brocca L (2018) How far are we from the use of satellite rainfall products in landslide forecasting? Remote Sens Environ 210:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.016>

Galanti Y, Barsanti M, Cevasco A, D'Amato Avanzi G, Giannecchini R (2018) Comparison of statistical methods and multi-time validation for the determination of the shallow landslide rainfall thresholds. Landslides 15:937–952. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0919-3>

Piciullo L, Tiranti D, Pecoraro G, Cepeda JM, Calvello M (2020) Standards for the performance assessment of territorial landslide early warning systems. Landslides. 17:2533–2546. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01486-4>

Fondazione  
**CARIPLO**



# GRAZIE PER L'ATTENZIONE



ProgAndromeda ([https://www.facebook.com/ProgAndromeda-1922388478072055/?modal=admin\\_todo\\_tour](https://www.facebook.com/ProgAndromeda-1922388478072055/?modal=admin_todo_tour))

**Website:** <https://progettoandromeda.unipv.it/>

**E-Mail:** [andromeda@unipv.it](mailto:andromeda@unipv.it)



@ProgAndromeda



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

