

MONITORAGGIO DEL CONTENUTO D'ACQUA E VALUTAZIONE AUTOMATICA IN GIS DELLA RESISTENZA DEL SUOLO IN CONDIZIONI DI PARZIALE SATURAZIONE PER L'ANALISI DI STABILITÀ DEI VERSANTI.

S. Viaggio¹*, A. Iacopino¹, B. Federici¹, R. Bovolenta¹

¹ Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering (DICCA), University of Genoa,
via Montallegro 1, 16145 Genoa, Italy – stefania.viaggio@edu.unige.it,
(alessandro.iacopino, rossella.bovolenta, bianca.federici)@unige.it

Sommario

La stabilità dei pendii è fortemente influenzata dalle condizioni idrauliche del suolo. Considerando le frane superficiali, la stabilità può essere notevolmente alterata dalla propagazione del fronte di saturazione all'interno della zona insatura a seguito delle precipitazioni. La resistenza al taglio del suolo nella zona insatura varia sensibilmente con le variazioni di umidità. Il monitoraggio della zona insatura può essere effettuato mediante la misurazione del contenuto volumetrico d'acqua, utilizzando sensori capacitivi di costo moderato, facili da gestire e che forniscono dati in tempo quasi-reale. Per essi è raccomandabile una calibrazione di laboratorio suolo-specifica. Conoscendo il contenuto d'acqua del suolo, è possibile stimare il parametro di suzione mediante una Curva di Ritenzione Idrica (Water Retention Curve - WRC) e, di conseguenza, la resistenza al taglio del terreno in condizioni insature. Nella presente nota viene illustrata una procedura, sviluppata in ambiente GIS, per la stima della resistenza del terreno insaturo a partire da dati di monitoraggio dell'umidità del suolo. Inoltre, si mostrano risultati preliminari relativi a un caso di studio: la frana di Ceriana-Mainardo (IM, Italia). La procedura proposta può essere integrata in modelli per la valutazione della suscettibilità al dissesto franoso (e.g. LAMP - LAndslide Monitoring and Predicting).

1. Introduzione

La stabilità dei pendii è fortemente influenzata dalle condizioni idrauliche del suolo, alterate dagli eventi meteorici a cui il sito è soggetto. Con particolare riferimento alle frane superficiali innescate da piogge, la propagazione del fronte di saturazione risulta determinante, in quanto causa una variazione della resistenza al taglio del terreno. Il monitoraggio della zona insatura può essere effettuato misurando la suzione e/o il contenuto volumetrico d'acqua nel suolo. Quest'ultimo può essere osservato attraverso l'utilizzo di sensori capacitivi a basso costo distribuiti sull'area di studio. Tali sensori forniscono dati in tempo quasi-reale e sono relativamente facili da installare e sostituire. Dal momento che le leggi di calibrazione fornite dai produttori potrebbero non descrivere in modo efficace i dati misurati nel suolo del sito in studio, è consigliabile intraprendere un'opportuna attività sperimentale in laboratorio per la ricerca di equazioni di calibrazione specifiche del suolo nei siti investigati (Campora et al., 2020; Bovolenta et al., 2020).

La conoscenza del contenuto d'acqua del suolo consente la stima del parametro di suzione, grazie alla Curva di Ritenzione Idrica (Water Retention Curve - WRC), e di conseguenza la definizione della resistenza al taglio del suolo in condizioni di parziale saturazione, necessaria per la valutazione delle

condizioni di stabilità di un pendio.

In letteratura (Escobar-Wolf et al., 2021; Moresi et al., 2020) e in alcuni software GIS (Geographic Information System) sono stati proposti modelli per la valutazione della suscettibilità al dissesto franoso superficiale basati principalmente su LEM (Limit Equilibrium Method) (es. r.shalstab in GRASS GIS). Tuttavia, questi modelli di solito non considerano il comportamento del suolo insaturo, ma al massimo tengono conto del contributo di resistenza fornito dall'apparato radicale della vegetazione.

Questa nota presenta una procedura, sviluppata mediante script Python in QGIS, che, partendo dai dati di monitoraggio dell'umidità del suolo, permette una stima, spazialmente distribuita, della coesione apparente del terreno nella zona insatura, essenziale per la valutazione della suscettibilità al dissesto franoso superficiale (Viaggio et al., 2022). Questa procedura può essere direttamente integrata nella modellazione e analisi di stabilità di pendii in GIS, oppure i suoi risultati possono essere adottati in analisi numeriche o all'equilibrio limite globale. Vengono qui presentati alcuni risultati ottenuti dall'analisi del caso studio della frana di Ceriana-Mainardo (IM, Italia).

2. La procedura automatica

La procedura proposta consente di valutare come varia la resistenza al taglio nel terreno in seguito a variazioni del contenuto d'acqua del suolo. Di seguito vengono illustrati i dati di monitoraggio dell'umidità del suolo, la metodologia seguita e il flusso di lavoro della procedura implementata in GIS.

2.1 Dati di monitoraggio dell'umidità del suolo

I sensori capacitivi WaterScout SM100 (Spectrum Tec.) sono stati scelti per monitorare l'umidità del suolo e le sue variazioni indotte dalle precipitazioni: sono relativamente poco costosi, facili da installare e da sostituire, e forniscono una risposta quasi immediata alle variazioni di umidità.

Essi possono essere installati a diverse profondità del terreno, fornendo informazioni sul contenuto d'acqua lungo un allineamento verticale. Inoltre, l'installazione di una rete di sensori, in diversi punti dell'area analizzata, permette di ricostruire la distribuzione spaziale di tale parametro. L'installazione richiede alcune precauzioni operative per garantire la comunicazione tra i dispositivi della rete, la loro integrità nel tempo e l'affidabilità delle misure ottenute, evitando che si creino percorsi preferenziali di infiltrazione dell'acqua a seguito dell'installazione (Iacopino et al., 2021). I dati di monitoraggio possono essere registrati a intervalli di tempo da 5 a 60 minuti e trasmessi tramite Modem. Possono essere impiegati pannelli solari per l'alimentazione. È raccomandato il prelievo di campioni di terreno in corrispondenza dei punti di installazione dei sensori, per l'esecuzione di una calibrazione suolo-specifica in laboratorio, al fine di definire la correlazione tra il dato grezzo e l'effettivo contenuto volumetrico d'acqua (Bovolenta et al., 2020).

2.2 La resistenza al taglio del terreno

Nella zona insatura, la resistenza al taglio del terreno è fortemente correlata alle caratteristiche del suolo e alle variazioni di umidità alle quali è soggetto in termini di suzione. Per questo motivo, è stata individuata l'esistenza di una relazione tra la resistenza al taglio del suolo insaturo e la curva di ritenzione idrica (WRC) suolo-specifica (Vanapalli et al., 1996). L'uso delle WRC è probabilmente il metodo più utilizzato per definire le caratteristiche idrauliche di mezzi porosi insaturi, come il terreno. Infatti, la curva caratteristica suolo-acqua fornisce uno strumento concettuale e interpretativo attraverso il quale comprendere il comportamento dei terreni insaturi (Vanapalli e Fredlund, 2000). Tuttavia, poiché la definizione di una WRC specifica per il sito non è semplice, a causa della necessità di una strumentazione di laboratorio specifica e costosa, sono stati proposti in letteratura modelli di ritenzione idrica del suolo. In questo lavoro, la procedura descritta per la definizione della WRC si basa sul metodo proposto da Balzano et al. (2021), che impiega la consolidata funzione di pedotrasferimento di Vereecken et al. (1989), costruita su una funzione di tipo Van Genuchten (1980). Quest'ultima si basa su una relazione che lega direttamente il contenuto volumetrico d'acqua e la suzione. Vale la pena sottolineare che l'uso di una funzione di pedotrasferimento permette di usare correlazioni empiriche tra il modello di ritenzione idrica e proprietà fisiche del suolo facilmente misurabili. In particolare, nel

metodo qui descritto, l'equazione di Van Genuchten è correlata a proprietà intrinseche del suolo (distribuzione granulometrica, densità secca e contenuto di carbonio organico). Secondo l'equazione di Van Genuchten, la curva di ritenzione idrica del suolo di riferimento può essere scritta come segue:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \left(\alpha \frac{s}{\gamma_w} \right)^n} \quad (1)$$

dove:

θ = contenuto volumetrico d'acqua [–]

s = suzione [kPa]

θ_s = contenuto volumetrico d'acqua a saturazione [–]

θ_r = contenuto volumetrico d'acqua residuo [–]

γ_w = peso specifico dell'acqua = 10 kN/m³

α = parametro di equazione [1/cm]

n = parametro di equazione [–]

I parametri introdotti sono legati alle proprietà intrinseche del suolo, distribuzione granulometrica, densità secca e contenuto di carbonio organico attraverso le seguenti relazioni:

$$\theta_r = 0.015 + 0.005\%Clay + 0.14\%C \quad (2)$$

$$\theta_s = 0.81 - 0.283\rho_d + 0.001\%Clay \quad (3)$$

$$\alpha = \exp(-2.486 + 0.025\%Sand - 0.351\%C - 2.617\rho_d - 0.023\%Clay) \quad (4)$$

$$n = \exp(0.053 + 0.009\%Sand - 0.013\%Clay - 0.00015\%Sand^2) \quad (5)$$

dove:

%Clay = frazione argillosa

%Sand = frazione sabbiosa

%C = contenuto di carbonio

ρ_d = densità secca del terreno [g/cm³]

La stima del parametro di densità secca si basa sull'ipotesi che il contenuto volumetrico d'acqua più elevato, θ_{max} , registrato in campo in occasione di piogge significative, corrisponda allo stato di completa saturazione del suolo, coincidente quindi con la porosità del suolo. Questa ipotesi è espressa in termini di contenuto gravimetrico d'acqua, w_{max} :

$$\rho_d = \frac{\rho_w G_s}{1 + w_{max} G_s} \quad (6)$$

dove:

G_s = densità particellare [–]

ρ_w = densità dell'acqua = 1000 kg/m³

L'applicazione di questo modello, attraverso la stima dei parametri coinvolti, consente di definire la WRC suolo-specifica. Di conseguenza, in ogni verticale della rete di monitoraggio, per ogni profondità di installazione, conoscendo i valori del contenuto volumetrico d'acqua registrati dai sensori capacitivi, il relativo valore di suzione è stimato come segue:

$$s = \frac{\gamma_w}{\alpha} \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r} \right)^{1/n} \quad (7)$$

dove il significato dei diversi parametri è specificato sopra. Secondo l'Eq. 8 proposta da Fredlund et al. (1978), modificata da Vanapalli et al. (1996), è possibile stimare il valore della resistenza al taglio del suolo insaturo:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{S - S_r}{S_{max} - S_r} \right) \tan \phi' \quad (8)$$

dove:

τ_f = resistenza a taglio del terreno insaturo [kPa]

c' = coesione efficace [kPa]

ϕ' = angolo di resistenza al taglio efficace [°]

$(\sigma - u_a)$ = tensione netta normale al piano di scorrimento a collasso [kPa]

$(u_a - u_w)$ = matrice di suzione, corrispondente al parametro s nella procedura sopra descritta [kPa]

$\left(\frac{S - S_r}{S_{max} - S_r} \right)$ = grado di saturazione effettivo [–]

La procedura descritta di seguito è dedicata al calcolo del terzo addendo dell'Eq. 8, che è strettamente correlato alle condizioni di parziale saturazione.

2.3 Procedura GIS

Poiché la procedura di definizione della WRC suolo-specifica adotta il metodo proposto da Balzano et al. (2021), sopra dettagliato, la procedura richiede come dati di input le proprietà intrinseche del suolo e il valore massimo del contenuto volumetrico d'acqua. L'utente deve quindi fornire le percentuali di sabbia, argilla, contenuto di carbonio organico e θ_{\max} . L'implementazione delle formule permette di stimare i parametri coinvolti (α , n , θ_s , θ_r , w_{\max} e ρ_d) e di conseguenza la definizione della Soil-WRC specifica del sito.

I dati di contenuto volumetrico d'acqua possono essere forniti in input sia come dati puntuali, in formato CSV (Comma Separated Values) o vettoriale, oppure distribuiti sull'area in studio in formato raster. L'utente può scegliere il periodo temporale con cui lavorare, una volta identificato l'evento di pioggia da analizzare. Se sono forniti in input dati grezzi derivanti dai sensori capacitivi, essi possono essere calibrati, qualora l'utente inserisca i parametri di calibrazione secondo una relazione lineare. Inserendo i valori di contenuto volumetrico d'acqua del suolo nella Soil-WRC, la procedura automatica esegue il calcolo della suzione in ogni nodo, applicando l'Eq. 7, per ogni profondità di misura. L'utilizzo di un algoritmo di interpolazione TIN (Triangulated Irregular Network) fra i nodi di misurazione consente la spazializzazione dei risultati. La procedura in output fornisce le superfici di coesione apparente alle diverse profondità indagate, oltre al dato puntuale di suzione in formato CSV o vettoriale.

3. L'applicazione al caso studio di Ceriana

Si riportano brevemente alcuni risultati ottenuti con riferimento al sito ligure di Ceriana-Mainardo (IM) (Fig. 2). Questo sito è stato scelto per la sua nota suscettibilità alle frane innescate dalle precipitazioni. La rete di monitoraggio, attualmente operativa, è costituita da cinque nodi di misurazione (denominati C1, C2, C3, C4 e C5) distribuiti nell'area di studio, ciascuno dei quali è dotato di quattro sensori di umidità del suolo, posizionati a diverse profondità (-10, -35, -55 e -85 cm) lungo una verticale. L'evento meteorologico analizzato nella presente nota interessa il periodo compreso tra l'01/06/2020 e il 16/06/2020, nel quale sono state registrate cumulate di circa 70 mm. Una precedente analisi è stata effettuata in corrispondenza dell'evento di pioggia, noto come Tempesta Alex, che ha colpito il sito di Ceriana-Mainardo il 01/10/2020 e 02/10/2020 (Viaggio et al., 2022).

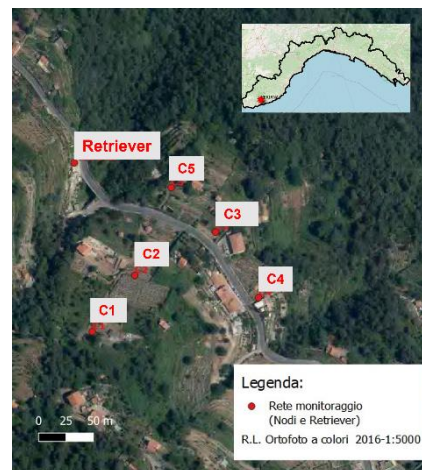


Fig 2. Rete di monitoraggio di Ceriana-Mainardo (IM).

3.1 Dati in input

Con riferimento a Ceriana-Mainardo, è stata effettuata una caratterizzazione geotecnica e una calibrazione suolo-specifica dei sensori di umidità del suolo. La distribuzione granulometrica, mediante setacciatura e sedimentazione di un campione di terreno del nodo C5, è stata ottenuta secondo le linee guida proposte dalla BS EN ISO 17892-4:2016. Inoltre, con riferimento a un campione di suolo del nodo C3, il contenuto di carbonio organico è stato calcolato come il 58% della sostanza organica del suolo (Pribyl, 2010), determinato in conformità alla norma ASTM D2974-20 (2020). I valori adottati come input nella procedura automatica sono riportati nella Tab. 1.

%Sand [%]	%Clay [%]	%C [%]
47.9	29.0	1.304

Tab 1. Percentuale di sabbia, argilla e carbonio organico.

Per il caso studio, G_s è pari a 2.6 ed è stato determinato secondo la norma BS EN ISO 17892-3:2015. Per quanto riguarda il valore di contenuto volumetrico d'acqua (θ_v), è stata eseguita una calibrazione suolo-specifica su un campione di terreno riferito al nodo C5, prossimo al nodo C3, ottenendo l'Eq. 9, mediante una regressione lineare dei dati di laboratorio (Bovolenta et al., 2020):

$$\theta_v = 276.5 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right) - 87.5 \quad (9)$$

dove V_{out}/V_{in} è il rapporto di normalizzazione fra il dato grezzo (V_{out}), misurato dai sensori in campo, e il voltaggio di alimentazione del Sensor Pup (V_{in}). L'applicazione dell'Eq. 9 ai dati di monitoraggio, registrati nel periodo maggio 2020-marzo 2022, ha fornito un valore di θ_{max} calibrato pari a 0.478. L'applicazione dell'Eq. 6 ha poi permesso di stimare il valore del contenuto d'acqua gravimetrico e della densità secca, pari a 0.352 e 1.357 g/cm³ rispettivamente. Il passo successivo è consistito nella definizione della Soil-WRC e nella conseguente stima della suzione (Eq. 7) per ogni θ_v su scala giornaliera.

3.2 Risultati

Una volta inseriti tutti i dati in input, la procedura implementata esegue il calcolo del Soil-WRC ottenuto per il sito di Ceriana-Mainardo. Con riferimento a ciascuna profondità di misurazione, il valore di suzione è stato calcolato applicando l'Eq. 7 ai dati pertinenti il periodo di pioggia esaminato. Infine, anche il contributo di resistenza al taglio in condizioni di parziale saturazione è stata valutato calcolando il terzo addendo dell'Eq. 8. L'ultimo passaggio eseguito dalla procedura consiste nella spazializzazione dei dati sull'area di interesse. Gli output della procedura automatica sono le superfici di coesione apparente alle quattro profondità di misura, relative a ciascun giorno del periodo analizzato. La Fig.3a mostra la variazione di coesione apparente con riferimento a ciascun giorno del periodo analizzato, dove per una migliore rappresentazione, i valori sono stati moltiplicati per 10; le precipitazioni sono rappresentate dall'istogramma blu, mentre in arancione i valori θ_v monitorati. In Fig.3b e c, due mappe, relative alla profondità pari a -35 cm, mostrano la variazione di coesione apparente a inizio e fine evento.

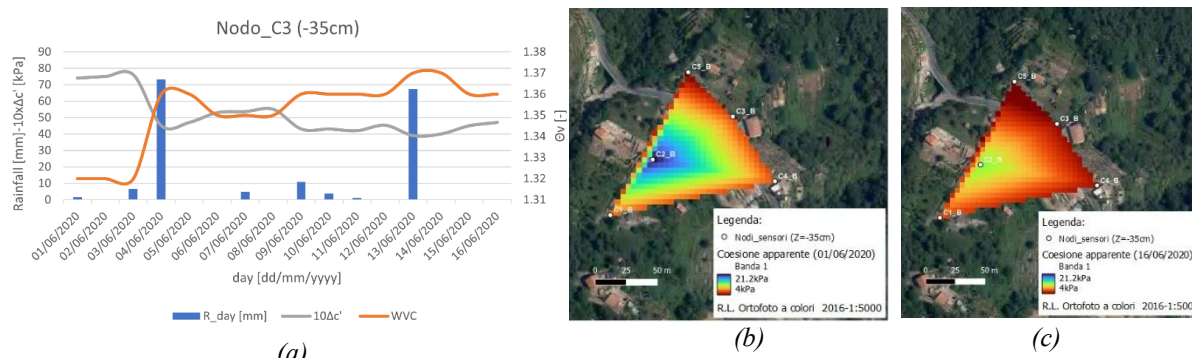


Fig 3. (a) Resistenza al taglio indotta dalla parziale saturazione (linea grigia) e contenuto volumetrico d'acqua (linea arancione) nei giorni del periodo analizzato (01-16/06/2020). I valori di resistenza al taglio sono moltiplicati per 10.
(b-c) Superfici di coesione apparente riferite al 01/06/2020 (b), e al 16/06/2020 (c).

4. Conclusioni

Nel presente lavoro è stata descritta una procedura automatica per la valutazione della resistenza al taglio del terreno nella zona insatura. A titolo d'esempio, è stata presentata l'applicazione della procedura al sito di Ceriana-Mainardo, con riferimento ad un evento di pioggia significativo. I risultati ottenuti appaiono coerenti con le precipitazioni occorse e con i valori di umidità nel suolo registrati dalla rete di monitoraggio ivi installata. La procedura può essere utilmente impiegata per la valutazione della stabilità nel tempo, in funzione delle condizioni meteorologiche. Gli autori integreranno la procedura nel sistema chiamato LAMP (LAndslide Monitoring and Predicting) (Bovolenta et al., 2016), basato sull'implementazione in GRASS GIS di un modello 3D integrato idrologico-geotecnico (IHG Model-Integrated Hydrological Geotechnical Model) (Passalacqua et al., 2012; Bovolenta et al., 2017) per la valutazione della suscettibilità al dissesto franoso. Inoltre, per consentire alla comunità scientifica di valutare l'utilità della metodologia proposta, la procedura implementata sarà quanto prima condivisa (<https://github.com/LabGeomatca/Unsaturated-soil-shear-strenght.git>), una volta completata la fase di test.

Bibliografia

- Balzano, B., Bruno, A. W., Denzer, H., Molan, D., Tarantino, A., Gallipoli, D., 2021. REAL-TIME quality check of measurements of soil water status in the vadose zone. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 121, 102918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102918>.
- Bovolenta, R., Federici, B., Berardi, R., Passalacqua, R., Marzocchi, R., Sguerso, D., 2017. Geomatics in support of geotechnics in landslide forecasting, analysis and slope stabilization. In *GEAM, Geingegneria Ambientale e Mineraria* - ISSN: 1121-9041, 151(2), 57-62.
- Bovolenta, R., Iacopino, A., Passalacqua, R., Federici, B., 2020. Field measurements of soil water content at shallow depths for landslide monitoring. In *Geosciences (Switzerland)* - ISSN: 2076-3263, 10(10), 409. DOI: 10.3390/geosciences10100409.
- Bovolenta, R., Passalacqua, R., Federici, B., Sguerso, D., 2016. LAMP-LAndslide Monitoring and Predicting for the analysis of landslide susceptibility triggered by rainfall events. 2, 517- 522. DOI: 10.1201/9781315375007-45.
- Campora, M., Palla, A., Gnecco, I., Bovolenta, R., Passalacqua, R., 2020. The laboratory calibration of a soil moisture capacitance probe in sandy soils. *Soil and Water Research* - ISSN: 1801-5395, 15(2), 75-84. DOI: 10.17221/227/2018-SWR.
- Escobar-Wolf, R., Sanders, J., Vishnu, C., Oommen, T., Sajinkumar, K., 2021. A GIS tool for infinite slope stability analysis (GIS-TISSA). *Geoscience Frontiers*, 12(2), 756-768.
- Fredlund, D., Morgenstern, N. R., Widger, R., 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), 313-321. DOI: <https://doi.org/10.1139/t78-029>.
- GRASS Development Team, 2022. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>, last accessed on 08 June 2022.
- Iacopino, A., Viaggio, S., Bovolenta, R. (2021): Monitoraggio delle frane mediante una rete di sensori: la misura del contenuto d'acqua nel terreno Atti del XXVII Convegno Nazionale Geotecnica, Vol. 2, 807-814.
- Moresi, F., Maesano, M., Collalti, A., Sidle, R., Matteucci, G., Scarascia Mugnozza, G., 2020. Mapping landslide prediction through a GIS-based model: A case study in a catchment in southern Italy. *Geosciences*, 10(8), 309.
- Passalacqua, R., Bovolenta, R., Spallarossa, D., De Ferrari, R., 2012. Geophysical site characterization for a large landslide 3-D modeling. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization ISC' 4* - ISBN:9780415621366. 2, 1765-1771.
- Pribyl, D. W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3-4), 75-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>.
- QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System. <https://www.qgis.org>, last accessed on 08 June 2022.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- Vanapalli, S., Fredlund, D., 2000. Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. 195-209. DOI:[https://doi.org/10.1061/40510\(287\)13](https://doi.org/10.1061/40510(287)13).
- Vanapalli, S., Fredlund, D., Pufahl, D., Clifton, A., 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 379-392. DOI:<https://doi.org/10.1139/t96-060>.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil science*, 148(6), 389-403. DOI:10.1097/00010694-198912000-00001.
- Viaggio, S., Iacopino, A., Bovolenta, R., Federici, B., 2022. Landslide Susceptibility assessment: soil moisture monitoring data processed by an automatic procedure in GIS for 3D description of the soil shear strength. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1-7, in print.