

ANALISI COMPARATIVA DI STABILIZZAZIONE DI PENDII CON SOLUZIONI CONVENZIONALI, NATURALI E COMBinate MEDIANTE MODELLAZIONE ALL'EQUILIBRIO LIMITE

Marco Uzielli

Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze

marco.uzielli@unifi.it

Daniela Boni

ex Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze

daniela.boni@stud.unifi.it

Lorenzo Borselli

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)

lorenzo.borselli@uaslp.mx

Federico Preti

Dip. di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali, Univ. degli Studi di Firenze

federico.preti@unifi.it

Sommario

Il presente contributo illustra sinteticamente l'approccio concettuale e operativo, nonché alcuni tra i risultati principali, di un'analisi quantitativa comparativa di stabilizzazione geotecnica di un pendio naturale mediante soluzioni convenzionali, naturali e combinate, ovverosia basate sul connubio tecnico sinergico tra le precedenti categorie. L'analisi verte sull'applicazione di metodi di stabilità all'equilibrio limite a un ampio numero di scenari di modellazione, definiti dalle soluzioni tecnologiche adottate, dall'istante temporale di analisi e del livello di cautelatività dei valori dei parametri geotecnici utilizzati. Data l'unicità dei sistemi naturali che limita la generalità dei risultati quantitativi ottenuti, si pone particolare attenzione alle tendenze evidenziate nella variazione dei fattori di sicurezza calcolati.

1. Introduzione

La mitigazione sostenibile della pericolosità idrogeologica mediante stabilizzazione geotecnica di pendii naturali e artificiali costituisce un obiettivo etico e tecnico di crescente rilevanza a livello globale, anche in conseguenza del crescente impatto dei cambiamenti climatici e della sempre più pronunciata tendenza alla preservazione e alla rigenerazione ambientale. In tale contesto, le soluzioni geotecniche "convenzionali" di stabilizzazione, che prevedono l'utilizzo di materiali inerti, iniezioni di miscele cementizie ed elementi d'acciaio possono ottemperare al criterio di prestazionalità, ma non a quello di sostenibilità. Negli ultimi anni, l'impiego di soluzioni di Ingegneria Naturalistica (IN), ha nuovamente assunto una notevole importanza. L'IN utilizza piante vive autoctone, da sole o in abbinamento con materiali reperibili in loco (legno, terra, pietrame, geotessili, reti in acciaio zincato, ecc.) per incrementare la prestazionalità ingegneristica degli ecosistemi favorendo contestualmente l'aumento della loro biodiversità. Nel contesto della stabilizzazione dei pendii, gli interventi IN risultano essere efficaci nel caso di fenomeni di dissesto prevalentemente superficiali o poco profondi, dal momento che le forze destabilizzanti devono essere equilibrate ed assorbite dalla resistenza degli apparati radicali delle specie vegetali utilizzate, che permangono negli strati superficiali di terreno (Preti & Giadrossich

2009, 2010; Preti 2013; Cornelini et al. 2015). La diffusione di soluzioni di IN può essere agevolata dalla disponibilità di casistiche circa l'analisi di prestazionalità e di capacità stabilizzante, comprendenti le soluzioni tecnologiche e gli approcci progettuali adottati. Nel contesto delle soluzioni di IN è necessario tenere conto esplicitamente dei processi fisici che determinano la variazione temporale della prestazionalità dei sistemi. Inoltre, in considerazione delle notevoli incertezze epistemiche presenti nei sistemi medesimi, e per conformità con l'approccio progettuale semiprobabilistico definito dalla Normativa italiana, è opportuno valutare la sensitività del fattore di sicurezza rispetto alla variazione dei valori progettuali dei parametri geotecnici di resistenza al taglio forniti in ingresso alle analisi di stabilità. Scopo del presente contributo è la presentazione sintetica dell'approccio concettuale e operativo, nonché dei principali risultati di un'analisi comparativa di stabilità geotecnica (eseguita mediante metodi all'equilibrio limite – nel seguito LEM – “limit equilibrium method”) svolta da Boni (2022) su un pendio naturale stabilizzato secondo scenari di modellazione definiti da: (a) soluzione tecnologica di stabilizzazione; (b) istante temporale di analisi; e (c) livello di cautelatività dei parametri geotecnici di progetto.

2. Presentazione del caso di studio

L'unicità dei sistemi naturali e la sito-specificità dei loro attributi geometrici e geotecnici non consente la conduzione di analisi di validità generale. Il presente contributo si riferisce a un caso di studio costituito da un fenomeno franoso, classificabile come fenomeno composto e interessante una viabilità storica a tutt'oggi carrabile, avvenuto nell'anno 2020 in un sito posto in via di Montisoni, in zona collinare nei dintorni di Firenze, a seguito di precipitazioni intense. La stabilizzazione del pendio ha previsto la progettazione (da parte della Società Georisk Engineering S.r.l. in collaborazione con il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università degli Studi di Firenze) e la realizzazione sequenziale (da parte della Cooperativa AgriAmbiente Mugello) dei seguenti interventi tecnici: (1) ripristino del rilevato stradale al fine di realizzare un piano di lavoro sicuro per la posa dei micropali; (2) realizzazione a tergo del corpo stradale di una trincea drenante e un tubo microfessurato con funzione di drenaggio delle acque (recapito di queste alla base della scarpata); (3) realizzazione di una berlinese di N° 11 micropali in acciaio sul lato di valle della strada; (4) riprofilatura del pendio mediante due ordini di palificate doppie e grate vive di legno, riempite con terra di scavo e materiale drenante al fine di abbassare la quota piezometrica; (5) rinverdimento del pendio mediante semina di un miscuglio di graminacee e leguminose; (6) posizionamento di talee e di specie radicate autoctone delle specie *Prunus*, *Digitaria sanguinalis*, *Spartium junceum*, *Laurus nobilis*, *Fraxinus ornus*, *Carpinus betulus*; (7) realizzazione di muretto di contenimento sul bordo di valle della strada; (8) realizzazione di strada bianca e di canalette di drenaggio trasversali e longitudinali. Lo stato ante-operam e quello post-operam sono riportati in Fig. 1a e Fig. 1b rispettivamente. Dettagli circa l'inquadramento del sito e lo stato realizzato sono disponibili in Boni (2022).

3. Analisi geotecnica di stabilità

L'analisi geotecnica di stabilità è stata svolta secondo l'approccio LEM per tutti gli scenari mediante il software SSAP (Borselli 2022), scaricabile gratuitamente dal sito <https://www.ssap.eu>. Tra i metodi LEM disponibili nel software, si è implementato il metodo di Morgenstern & Price, ricercando le potenziali superfici critiche mediante la tecnica di generazione casuale “Random Search”, che genera campioni di (nello studio in oggetto, 10,000) superfici composite, localmente anche concave-convesse, approssimate da segmenti di lunghezza media predefinita (in questo caso 1.00 m). Per ciascuno degli scenari si è registrato il valore minimo del fattore di sicurezza FS , corrispondente alla superficie di scivolamento più critica.

Per l'assegnazione dei parametri di resistenza al taglio in ingresso alle analisi della stabilità LEM dei pendii vegetati, si è impiegata una versione semplificata del “Fiber (Root) Bundle Model” dal momento

che presenta un numero limitato di parametri (Schwarz et al., 2010a, 2010b) e che la formulazione è riconducibile al criterio a rottura di Mohr-Coulomb, largamente utilizzato in ambito geotecnico e, in particolare, negli approcci LEM. L'applicazione di tale metodo prevede la modellazione delle caratteristiche meccaniche dei pendii vegetati mediante una coesione addizionale, dovuta al radicamento e decrescente esponenzialmente con la profondità dal piano di campagna. Il processo di modellazione è descritto in dettaglio in Boni (2022).

4. Definizione degli scenari di modellazione

Come premesso, l'analisi comparativa della prestazionalità del pendio è stata impostata per scenari di modellazione LEM definiti dalle soluzioni tecnologiche di stabilizzazione, dall'istante temporale di analisi e dal livello di cautelatività progettuale. Di seguito si fornisce una sintesi del processo di modellazione.

Fattori tecnologici

Lo Scenario A corrisponde allo stato ante-operam, con pendio a frana avvenuta. Lo Scenario B corrisponde alla stabilizzazione con soluzione convenzionale costituita da una berlinese di micropali in acciaio, messi in opera con interasse s variabile. Lo Scenario C1 prevede la stabilizzazione esclusivamente con soluzioni di IN, costituite da palificate vive, poste al piede del pendio, e grate vive, poste nella parte sommitale. Lo scenario C2 corrisponde allo stato realizzato, ovvero sia con la soluzione combinata comprendente micropali e soluzioni di IN. Lo scenario D1 costituisce l'evoluzione dello scenario C1, con l'aggiunta di una berlinese di fittoni in legno (castagno), posta a metà della grata viva a valle della sede stradale. Lo scenario D2 prevede l'utilizzo, in aggiunta allo scenario C2, della medesima berlinese di fittoni in legno.

Il software SSAP consente la definizione di "lenti-strato" con proprie caratteristiche geomeccaniche. Tale opzione è stata utilizzata in sede di modellazione dei micropali convenzionali, della palificata/grata viva e della berlinese di fittoni in legno. I dettagli del processo di modellazione, non riportati per limitazioni di spazio e comprendenti le modalità di assegnazione dei parametri geotecnici equivalenti per le opere convenzionali e di IN necessari per l'implementazione dei metodi LEM (peso di volume, angolo di resistenza al taglio, coesione efficace, coesione non drenata), sono disponibili in Boni (2022).

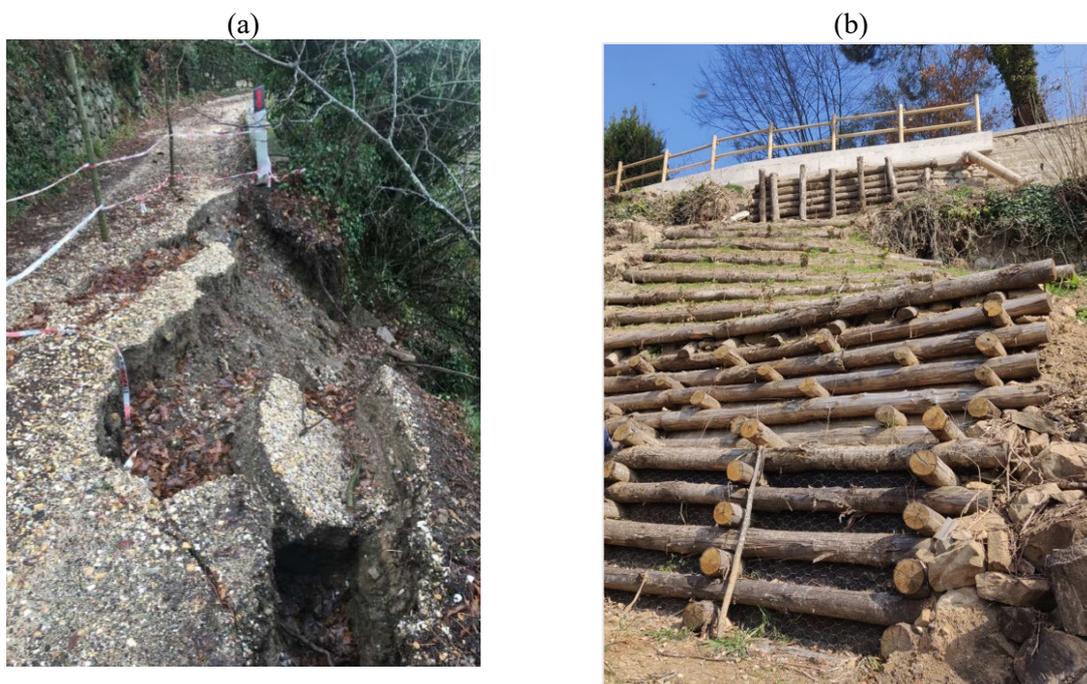


Fig. 1. Frana di Montisoni: (a) stato ante-operam; (b) stato post-operam

Fattori temporali

Nella modellazione di opere di sostegno, le NTC18 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” (D.M. 17 gennaio 2018) impone la verifica geotecnica di stabilità in condizioni statiche all’atto di fine costruzione dell’opera. L’evoluzione temporale delle opere geotecniche viene quindi trascurato. Tuttavia, in presenza di soluzioni di IN, l’evoluzione delle caratteristiche meccaniche del sistema geotecnico riveste una rilevanza fondamentale, in quanto si osservano tipicamente: (a) un incremento di coesione radicale che riduce la spinta del terreno a tergo dell’opera; (b) un aumento di biomassa (ipogea ed epigea); e (c) la degradazione delle parti morte (Sauli et al., 2005; Preti et al., 2011). Tali fenomeni provocano variazioni contrastanti in termini di stabilità complessiva del sistema geotecnico, per cui non è generalmente possibile definire a priori lo scenario temporale più gravoso. Si sono quindi individuati tre istanti temporali nei quali valutare la stabilità del pendio sulla base di quanto suggerito da Bischetti et al. (2021): (1) t_0 : tempo di fine costruzione; t_1 : 10 anni da fine costruzione, ovverosia prima che le piante abbiano radici propagate; t_2 : 25 anni da fine costruzione, ovverosia dopo il completamento della propagazione delle nuove radici, il raddoppio della coesione equivalente del terreno radicato rispetto all’istante t_1 e in condizioni di dimezzamento della coesione equivalente (per decomposizione) degli elementi in legno. L’istante t_0 è stato considerato solamente per gli scenari A e B, mentre t_1 e t_2 sono stati considerati anche per gli scenari C e D. La variazione temporale dei valori mediani ipotizzati per la coesione efficace del legno, del terreno radicato (valore medio sulla profondità di 1.00 m) ed “equivalente” è illustrata in Fig. 2. I dettagli del processo di modellazione della variazione temporale delle proprietà geotecniche per i materiali naturali ai fini dell’analisi di stabilità LEM sono disponibili in Boni (2022).

Fattori di cautela di progettualità

L’evoluzione delle normative progettuali geotecniche, che riconoscono la presenza e la rilevanza delle incertezze nei parametri di ingresso alle analisi di stabilità e ne richiedono esplicitamente la valutazione in sede di assegnazione dei valori caratteristici, ha suggerito lo svolgimento di un’analisi parametrica di sensitività rispetto ai valori progettuali dei parametri di resistenza al taglio. Il campo di variazione di tali valori è stato definito sulla base di una modellazione semplificata delle incertezze epistemiche, consistenti in: (a) incertezze di misura e nella definizione del valore rappresentativo in un intervallo di profondità per la coesione efficace e l’angolo di attrito del terreno radicato; (b) incertezze di misura e di selezione del valore rappresentativo della coesione e dell’angolo di attrito del legno; e (c) incertezza di trasformazione derivante dalla natura puramente teorica del modello di calcolo della coesione equivalente. Ipotizzando una distribuzione normale per l’angolo di attrito e una distribuzione lognormale per la coesione, e quantificando i coefficienti di variazione dei medesimi parametri su base empirica e mediante assegnazione soggettiva, si sono ricavati valori progettuali corrispondenti a probabilità di

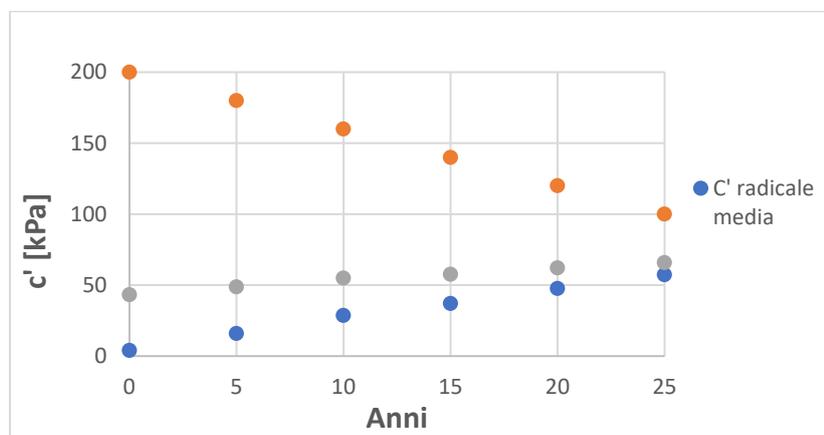


Fig. 2. Variazione temporale dei valori mediani ipotizzati per la coesione efficace del legno, del terreno radicato ed “equivalente” (Boni 2022)

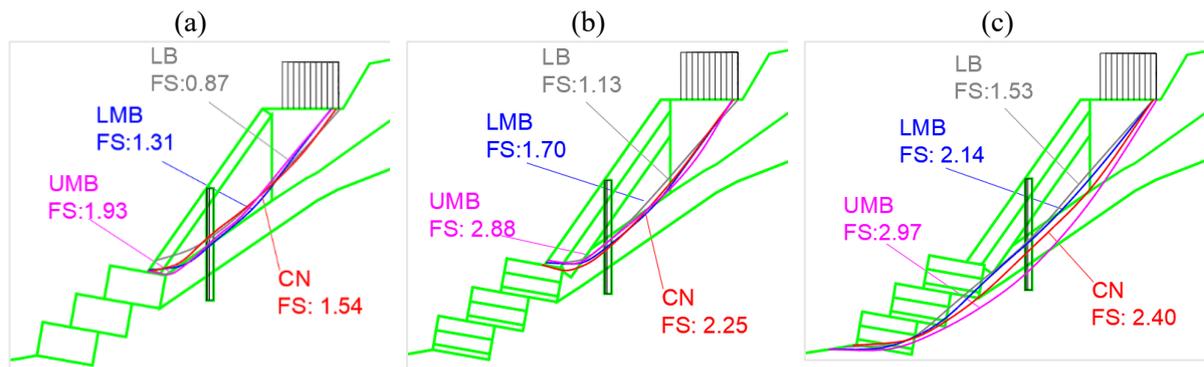


Fig. 3. Superfici di scorrimento critiche e relativi valori di FS per gli scenari: (a) D1.0, (b) D1.1, (c) D1.2, per gli scenari di cautelatività LB, LMB, CN e UMB.

superamento del 95% (LB: lower bound), 75% (LMB: lower-medium bound), 50% (CN: central value) e 25% (UMB: upper-medium bound). Tali probabilità corrispondono a livelli di cautelatività sequenzialmente decrescenti. I dettagli dell'assegnazione statistico-probabilistica dei valori progettuali per i diversi livelli di cautelatività sono disponibili in Boni (2022).

5. Risultati esemplificativi

A valle della modellazione sopra descritta, si sono ricavati 112 scenari di modellazione. A titolo di esempio dei numerosi risultati ottenuti a seguito dell'applicazione del metodo di Morgenstern & Price e riportati da Boni (2022), in Fig. 3 si mostrano le superfici di scorrimento per gli scenari di modellazione D1.0 (Fig. 3a), D1.1 (Fig. 3b) e D1.2 (Fig. 3c), corrispondenti allo scenario D1 negli istanti temporali t_0 , t_1 e t_2 rispettivamente. Si osserva, tra lo scenario D1.0 e gli scenari D1.1 e D1.2, la presenza di strati aggiuntivi nei volumi di terreno interessati dalle soluzioni di IN. Tali strati consentono la modellazione a maggiore risoluzione della variabilità spaziale della coesione equivalente per effetto della progressiva rarefazione dell'apparato radicale con la profondità. Nella transizione tra gli scenari D1.1 e D1.2, le superfici critiche si estendono, raggiungendo il piede del pendio e tagliando l'ultimo ordine di palificata, a causa dell'incremento di resistenza fornito dall'apparato radicale in crescita negli strati superficiali. In Fig. 4 si riporta l'andamento temporale comparativo di FS per gli scenari D1 e D2, per i livelli di cautelatività progettuale LB, LMB, CN e UMB. Il grafico evidenzia le tendenze all'aumento di FS associate sia all'aumento della cautelatività progettuale (da LB and UMB) e del tempo dalla costruzione.

6. Analisi riassuntiva e conclusioni

L'applicazione dell'analisi parametrica al caso di studio ha evidenziato numerosi aspetti di notevole interesse geotecnico, sia dal punto di vista tecnologico sia da quello di approccio progettuale. La definizione di un ampio numero di scenari ha consentito la disamina qualitativa e quantitativa degli effetti: (1) della soluzione tecnologica di stabilizzazione geotecnica adottata (convenzionale/IN/combinata); (2) della variazione temporale delle proprietà geotecniche del sistema conseguente all'utilizzo di soluzioni di IN; e (3) della selezione di valori progettuali corrispondenti a diversi livelli di cautelatività.

Dal punto di vista tecnologico, l'analisi comparativa di stabilità conferma che gli interventi di IN rappresentano un valido ausilio per la stabilizzazione geotecnica dei pendii. Tuttavia, i volumi di terreno interessati dalla radicazione sono limitati agli strati superficiali. Inoltre, negli scenari corrispondenti al tempo della costruzione, gli scenari corrispondenti all'utilizzo di soluzioni IN non assicurano valori di FS sufficientemente elevati.

La soluzione combinata, effettivamente realizzata nel caso di studio, rappresenta quindi una sintesi ottimizzante dal punto di vista della prestazionalità sostenibile. La riprofilatura delle zone intermedie e di valle del pendio mediante soluzioni di IN garantisce l'incremento della resistenza meccanica nel

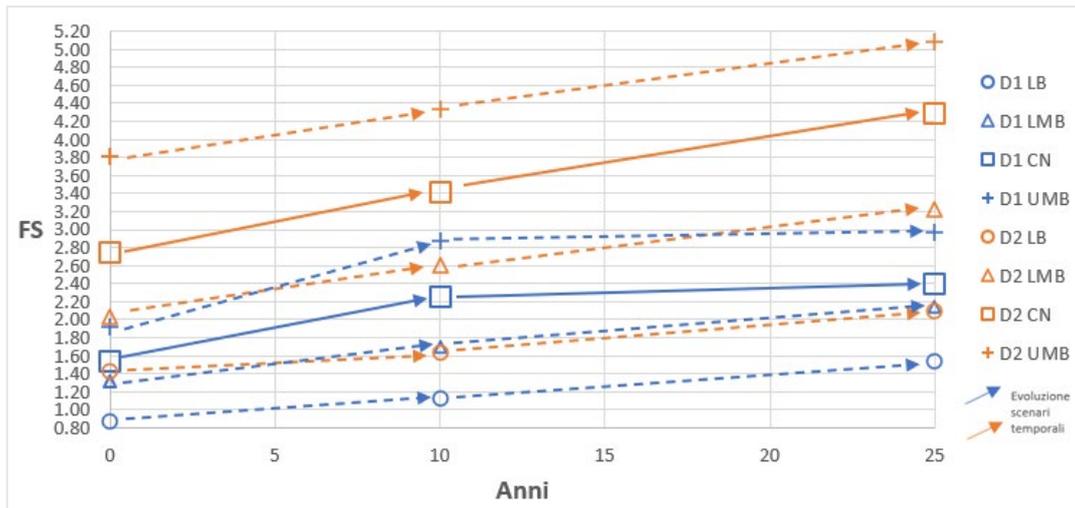


Fig. 4. Variazione temporale comparativa del fattore di sicurezza per gli scenari D1 e D2, per i livelli di cautela progettuale LB, LMB, CN e UMB (Boni 2022)

tempo, consentendo di ridurre il numero di micropali convenzionali e quindi il costo dell'intervento complessivo. Tale risultato è in linea con studi di letteratura (Preti, 2013, Preti et al., 2022).

Dal punto di vista dell'approccio progettuale, l'analisi di sensitività rispetto al livello di cautela ha confermato l'importanza di riconoscere la presenza di rilevanti incertezze epistemiche nei valori dei parametri geotecnici utilizzati in sede di modellazione di stabilità, e di definire consapevolmente tali valori su base soggettiva o a seguito di prescrizioni normative. Mentre la sito-specificità dei risultati quantitativi non consente l'esportabilità delle osservazioni ad altri casi, le tendenze osservate in termini di effetti della variabilità temporale e del livello di cautela progettuale sono coerenti con la teoria e l'esperienza geotecnica.

Bibliografia

- Bischetti, G. B., De Cesare, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Schwarz, M., Stangl, R. (2021). Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. *Ecological Engineering*, 169, 106309.
- Boni D. (2022). Tesi di Laurea Magistrale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze.
- Borselli L. (2022). SSAP 5.1 - SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM". Manuale di riferimento. del codice SSAP Versione 5.1. Researchgate. DOI: <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31522.91841>
- Cornelini, P., Sauli, G. (2015). Compendio di ingegneria naturalistica per docenti e professionisti; analisi, casistica, ed elementi di progettazione.
- Preti, F., Giadrossich, F. (2009). Root reinforcement and bioengineering stabilisation by Spanish broom. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 1713–1726. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1713-2009>.
- Preti, F., Dani, A., Laio, F. (2010). Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecological Engineering*, 36(3), 305-316.
- Preti, F., Togni, M., Dani, A., Perugini, F. (2011). Il potere del tempo - La durabilità degli elementi lignei delle palificate, *ACER*, ISSN1828-4434, 6/2010, pp. 33-37
- Preti, F., Togni, M., Dani, A., Perugini, F. (2011). Il potere del tempo - La durabilità degli elementi lignei delle palificate, *ACER*, ISSN1828-4434, 6/2010, pp. 33-37
- Preti, F. (2013). Forest protection and protection forest: Tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering. *Ecological Engineering*, 61, 633-645.
- Preti, F., Capobianco, V., Sangalli, P. (2022). Soil and water bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*, 181, 106687.
- Sauli, G., Cornelini, P., Preti, F. (2005) *Manuale di Ingegneria Naturalistica*, Vol. 3, Sistemazione dei versanti. Roma.