

## SOMMARIO

I fenomeni erosivi sul territorio italiano sono molto diffusi. Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche di protezione del suolo e di rinaturalizzazione. Fra queste emerge un'innovativa tecnologia naturale che impiega esclusivamente piante erbacee perenni a radicazione profonda e consente di operare anche in aree in cui le condizioni pedoclimatiche erano fino a pochi anni fa ritenute proibitive per lo sviluppo della vegetazione. Tale tecnologia appare promettente anche nei riguardi dei fenomeni di instabilità superficiale dei versanti: l'inerbimento con radici profonde può indurre effetti meccanici ed idraulici sulle condizioni di equilibrio del versante tali da incrementare tipicamente la resistenza a taglio del terreno. Gli effetti meccanici dell'impianto di radici sono attribuibili ai processi di interazione radice/terreno; gli effetti di natura idraulica derivano dal meccanismo secondo cui l'inerbimento può ridurre significativamente il contenuto d'acqua ed il grado di saturazione del terreno. La ricerca si pone come obiettivo finale la valutazione quantitativa di tali effetti, mediante la loro modellazione ed implementazione in un algoritmo di calcolo.

Parole chiave: fenomeni erosivi, impianto di radici, effetti meccanici ed idraulici, protezione superficiale di versanti

## 1 I FENOMENI EROSIVI

La dinamica dei fenomeni erosivi deriva da diverse concause. Sul territorio italiano, principalmente in ragione del clima che caratterizza le nostre latitudini, il principale agente erosivo è rappresentato dalle precipitazioni meteoriche che erodono il terreno con azioni diverse (erosione idrica) quali:

- energia cinetica delle gocce (*drop erosion*);
- trasporto superficiale di particelle del terreno (*interill erosion*);
- formazione di rivoli (*rill erosion*);
- formazione di solchi e fossi profondi (*gully erosion*).

L'intensità dell'azione erosiva dipende poi da vari fattori, quali:

- intensità e durata delle precipitazioni;
- lunghezza e inclinazione del pendio;
- permeabilità del terreno e grado di saturazione;
- vegetazione;
- erodibilità intrinseca del terreno, prevalentemente correlata alle caratteristiche granulometriche del terreno stesso.

Il ruolo della vegetazione nella protezione dei pendii dall'erosione è stato a lungo studiato ed è documentato da ricerche sperimentali. La protezione dall'erosione dipende

dal tipo di vegetazione, arborea e/o erbacea, e in generale consiste nel:

- assorbimento di una parte dell'energia cinetica delle gocce di acqua;
- rallentamento dei fenomeni di ruscellamento;
- ritardo nel raggiungimento delle condizioni di completa saturazione del terreno;
- rinforzo del terreno con apparato radicale;
- contenimento, filtro e contrasto dei fenomeni di trascinarsi dei granuli.

Esistono vari approcci per la stima quantitativa dell'erosione (perdita di suolo), quali quelli basati su modelli teorici, modelli fisici in scala ridotta e modelli empirici. Tra questi ultimi si evidenzia l'Equazione Universale per il calcolo della Perdita di Suolo - USLE - *Universal Soil Loss Equation* (Wishmeier e Smith, 1965; 1978), equazione empirica adottata per la stima dell'erosione idrica da *United States Department of Agriculture*. Tale equazione è generalmente diffusa nella seguente forma:

$$A = R \times K \times LS \times P \times C \quad (1)$$

ove:

- A: perdita specifica di suolo [t/ha anno], associata a fenomeni di *rill* e *interill erosion*;
- R: *Rainfall-Runoff Erosivity Factor*: fattore climatico, relativo all'intensità e alla durata delle precipitazioni [MJ mm/ha h anno];
- K: *Soil Erodibility Factor*: fattore pedologico che esprime l'erodibilità del suolo [t h/MJ mm];
- LS: fattore geometrico funzione della pendenza ed estensione del versante;
- P: *Support Practices Factor*: fattore riduttivo dipendente da eventuali interventi di protezione, controllo e conservazione;
- C: *Cover-Management Factor*: fattore riduttivo funzione della vegetazione.

Tra gli interventi finalizzati a ridurre gli effetti prodotti dall'erosione, rivestono particolare interesse quelli che agiscono direttamente sulla vegetazione, mediante impianto di radici profonde, contribuendo in tal modo a ridurre i fattori P e C che compaiono nell'equazione USLE (eq.ne 1). Le tecniche anti-erosive attualmente più diffuse praticabili risalgono agli anni 1950-60. Tutte prevedono l'impiego di manufatti sintetici quali ad esempio geocelle, geostuoie, georeti, oppure biostuoie, fascinate, viminate, etc. che, però, in condizioni pedoclimatiche difficili, possono non risolvere completamente il problema dell'erosione. Inoltre, alberi, arbusti e prati tradizionali sono stati da sempre impiegati per tentare di ostacolare fenomeni di erosione ed eventualmente piccoli smottamenti di terreno. Studi più recenti, eseguiti anche avvalendosi delle competenze di botanici, agronomi, naturalisti, geologi, hanno evidenziato la capacità di alcune specie erbacee a radicazione profonda di ostacolare molto efficacemente i fenomeni erosivi, anche in presenza di terreni aridi e sterili nei quali le specie vegetali usualmente impiegate non riescono a vegetare. Inoltre, la realizzazione di un impianto anti-erosivo costituito da sole essenze vegetali, mediante semina di piante erbacee perenni a radicazione profonda direttamente sul terreno tal quale, può essere di semplice e rapida realizzazione e non richiede alcuna manutenzione.

Il campo di applicazione di queste tecnologie, quale quella sviluppata in Italia da Prati Armati srl, è piuttosto vasto: rilevati e scarpate stradali e ferroviarie, arginature, cave, miniere, discariche, aree a mare, protezione spondale di fiumi, torrenti, canali artificiali.

Nei confronti dei fenomeni di erosione idrica su elencati, l'impianto di piante erbacee a radicazione profonda appare promettente per i seguenti motivi:

- la vegetazione dissipa gran parte dell'energia cinetica delle gocce di pioggia, così attenuando l'azione erosiva;
- in caso di precipitazioni intense, una frazione rilevante di acqua meteorica ruscella al di sopra della porzione epigea delle piante, anche quando la vegetazione è disseccata;
- la vegetazione riduce la velocità di ruscellamento dell'acqua sul terreno.

## 2 EFFETTI DELL'IMPIANTO DI RADICI NEL TERRENO

Come noto nella letteratura specialistica (Gray e Sotir, 1996), l'impianto di radici nel terreno favorisce generalmente un incremento della resistenza a taglio entro lo spessore radicato; in realtà, il fenomeno dipende da due processi distinti: in primo luogo, il rinforzo meccanico offerto dalle radici; in secondo luogo, la capacità dell'intero impianto erbaceo di influire, anche significativamente, sul bilancio idrologico dell'area di interesse, per la capacità dell'apparato epigeo di intercettare parte della precipitazione e dell'intera pianta di assorbire acqua dal suolo trasferendola all'atmosfera per traspirazione.

Il problema dell'interazione - di natura meccanica e idraulica - tra la radice ed il terreno diventa fondamentale allorché l'impianto con apparato radicale profondo abbia il duplice scopo di assolvere alla primaria funzione di protezione dall'erosione e, secondariamente, di contenere eventuali fenomeni superficiali - spessori delle coltri in movimento non superiori a  $1 \div 1.5$  m - di instabilità dei versanti. Il problema, oltre che rilevante, è evidentemente complesso, dal momento che i fenomeni in gioco sono molteplici ed il loro studio richiede competenze specifiche in diversi settori, dall'agronomia, alla fisica dei terreni, all'idraulica. Da un punto di vista analitico-numerico, è fondamentale rispettare l'equazione di bilancio delle masse, tenendo conto dei fenomeni di evaporazione del suolo, traspirazione delle piante, infiltrazione di acqua nel terreno, ruscellamento lungo il pendio.

Vale qui la pena richiamare solo alcuni concetti di base nello studio dei meccanismi di interazione radice/terreno: le radici delle piante da un lato incrementano direttamente la resistenza a taglio dei terreni per interazione meccanica, agendo come dei sottilissimi ancoraggi - di resistenza a trazione elevata - che si sviluppano nel terreno (Waldron, 1977); dall'altro lato garantiscono, indirettamente, un significativo contributo alla resistenza associabile a fenomeni di natura idro-meccanica.

### 2.1 Effetti meccanici dell'impianto di radici

Dal punto di vista prettamente meccanico, l'incremento diretto di resistenza a taglio offerto dalle radici può essere interpretato secondo l'approccio di Waldron (1977), proposto sulla scorta di numerosi risultati sperimentali di prove di taglio diretto su campioni di terreno radicati. Secondo tale approccio, il contributo di "rinforzo" offerto dalle radici può essere in prima approssimazione interpretato come una "pseudo-coesione" aggiuntiva che va a incrementare la resistenza a taglio del terreno.

Negli anni '70, Wu (1976) e Waldron (1977) proposero un semplice modello teorico di riferimento nell'ipotesi di considerare il terreno radicato come un materiale composito nel quale fibre lineari (radici) di elevata resistenza a trazione siano presenti in un mezzo multifase caratterizzato da resistenza a trazione minore. Lo schema meccanico di riferimento per la singola radice è rappresentato in Figura 1 nel caso di radice orientata in direzione ortogonale ad un piano di taglio, in condizioni iniziali indeformate. La singola radice, a seguito dello

scorrimento lungo una potenziale superficie di rottura che delimita un'eventuale porzione di terreno instabile, subisce una deformazione elastica nel tratto di spessore  $z$ . La configurazione deformata della fibra è descritta in funzione della distorsione angolare  $\theta$  e dello spostamento traslazionale nella direzione del piano di taglio. Ipotizzando per la radice una profondità d'infissione tale da impedire lo sfilamento dal terreno stabile, lo stato di deformazione indotto sulla fibra genera l'accumulo di sforzi di trazione (compatibilmente con la massima resistenza della radice) distribuiti non uniformemente nelle sezioni interne della radice, lungo una porzione che si estende ben oltre la zona di taglio di spessore  $z$ . Nel terreno, in prossimità della radice, si assiste ad un incremento della resistenza al taglio,  $\Delta\tau_{rad}$ . Tale incremento è direttamente proporzionale al valore medio della resistenza a trazione delle radici  $T_R$ , al rapporto di radicazione, oltre che all'angolo di attrito del terreno,  $\phi'$ .

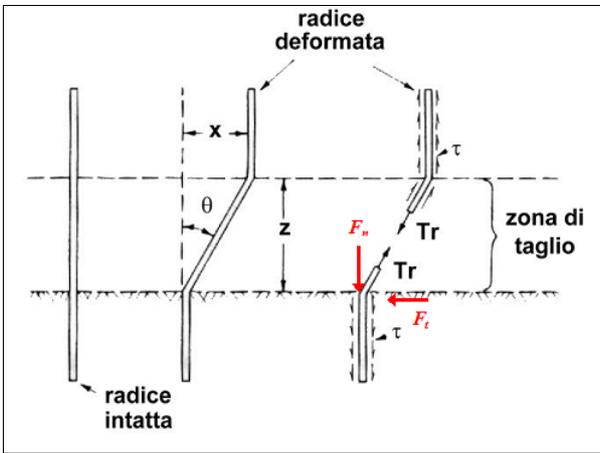


Figura 1. Modello semplificato di rinforzo del terreno per la singola radice presente in direzione perpendicolare al piano di taglio (adattato da Gray & Leiser 1989)

Nel caso del modello semplificato rappresentato in Figura 1 imponendo le condizioni di equilibrio in termini globali in corrispondenza della superficie di scorrimento si perviene all'espressione dell'incremento di resistenza a taglio offerto dalle radici:

$$\Delta\tau_{rad} = \frac{A_R}{A} T_R (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi')$$

ove  $T_R$  è la resistenza a trazione della singola radice, mentre il termine  $A_R/A$  esprime il rapporto di radicazione tra l'area complessiva occupata dalle radici,  $A_R$ , e l'area della sezione di terreno di riferimento ( $A$ ). Il rapporto di radicazione è funzione della specie vegetale adottata, e tipicamente diminuisce con la profondità. L'estensione del modello proposto per la singola radice all'intero apparato di radicazione ha indotto diversi Autori a proporre equazioni risolventi per la valutazione dell'incremento di resistenza al taglio  $\Delta\tau_{rad}$  offerto dall'intero impianto. In particolare, sulla scorta di risultati di prove sperimentali, sono state proposte diverse formule semi-empiriche, tra le

quali occorre citare l'equazione di Waldron (1977) derivante dai risultati di studi sperimentali condotti negli anni '70:

$$\Delta\tau_{rad} = 1.15 \cdot T_R \frac{A_R}{A} \quad (2)$$

e l'equazione di Bonfanti e Bischetti (2001):

$$\Delta\tau_{rad} = 1.15 \frac{A_R}{A} \cdot \left\{ \int_{D_{min}}^{D_{max}} T_R(D) \cdot F_d(D) dD \right\} \quad (3)$$

ove  $D_{max}$  e  $D_{min}$  rappresentano rispettivamente il diametro massimo ed il diametro minimo delle radici di una data specie, e la funzione di distribuzione dei diametri delle radici  $F_d(D)$  può essere definita dalle note funzioni di densità di probabilità disponibili in letteratura (per esempio, normale, triangolare o lognormale).

È stata condotta un'estesa indagine sperimentale presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano (Bischetti *et al.*, 2009), finalizzata alla determinazione della resistenza a trazione delle radici di 30 specie erbacee perenni attualmente impiegate da Prati Armati srl, principalmente appartenenti alle famiglie botaniche delle Graminacee e delle Leguminose. A titolo di esempio, l'andamento della resistenza a trazione  $T_R(D)$  in funzione del diametro delle radici è rappresentato nella Figura 2. Le curve sperimentali sono ben descritte da funzioni potenza, i cui parametri dipendono dalla specie erbacea.

Una volta determinato l'incremento di resistenza al taglio indotto dall'apparato radicale,  $\Delta\tau_{rad}$ , e, con riferimento allo schema di pendio indefinito, è possibile risolvere l'equazione che esprime il coefficiente di sicurezza ( $FS$ ) e quantificare il contributo stabilizzante offerto dalle radici per gli strati più superficiali di terreno, vale a dire:

$$FS = \frac{\tau_f(z) + \Delta\tau_{rad}(z)}{\gamma \cdot z \cos\alpha \sin\alpha} = \frac{c' + \left( \gamma - \frac{D_w}{z} \gamma_w \right) z \cos^2\alpha \tan\phi' + \Delta\tau_{rad}(z)}{\gamma z \cos\alpha \sin\alpha} \quad (4)$$

essendo:

- $c'$  e  $\phi'$ : i parametri di resistenza del terreno;
- $\gamma$  e  $\gamma_w$ : rispettivamente il peso dell'unità di volume del terreno e il peso dell'unità di volume dell'acqua;
- $\alpha$ : l'angolo di inclinazione del pendio;
- $z$ : la profondità della potenziale superficie di scorrimento dal piano campagna;
- $\tau_f(z)$ : la resistenza a taglio del terreno lungo la potenziale superficie di scivolamento;
- $D_w$ : la profondità della superficie di scorrimento rispetto alla superficie libera della falda.

Occorre infine notare che, indipendentemente dalla scelta di impiego di una delle due equazioni (eq.ni 2 e 3) finalizzate al calcolo dell'incremento di resistenza a taglio,  $\Delta\tau_{rad}$ , lo stato ultimo più cautelativo da prendere in considerazione non è necessariamente lo stato limite ultimo per superamento della resistenza a trazione della

singola radice, bensì potrebbe essere lo stato limite ultimo per sfilamento della radice stessa. Dal confronto dei due stati limite così considerati, è possibile individuare quello più cautelativo da prendere in esame nella soluzione dell'eq.ne (4) per il calcolo del coefficiente di sicurezza del pendio radicato.

Si vuole ora, a titolo di esempio, evidenziare l'entità dell'incremento della resistenza a taglio del terreno dovuto all'effetto meccanico dell'impianto di radici, per un caso

studio di riferimento. Avvalendosi di un algoritmo di calcolo sviluppato in VISUAL BASIC – EXCEL (Rettori et al., 2010), è stata condotta una semplice analisi di stabilità per lo schema di pendio indefinito. Si è in particolare considerato un pendio di inclinazione media pari a 25°, che delimita un deposito di sabbie addensate debolmente cementate ( $\phi' = 32^\circ$ ,  $c' = 4$  kPa).

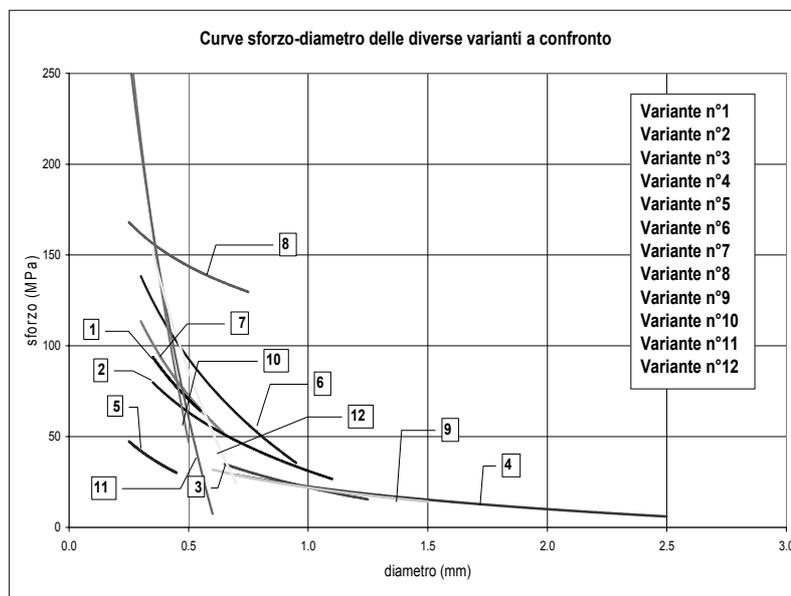


Figura 2. Risultati sperimentali di prove di trazione su alcune specie erbacee (Dipartimento di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano, 2009)

La superficie di falda è localizzata alla profondità di 1 m dal piano campagna. Nell'ipotesi che l'apparato radicale sia costituito da una miscela di piante erbacee a radicazione profonda con diametro medio della singola radice pari a 0.8 mm, e tali da raggiungere una profondità di radicazione pari a 3m, l'incremento di resistenza a taglio,  $\Delta\tau_{rad}$ , è stato valutato con l'equazione (3).

La Figura 3 mostra l'andamento di tale incremento  $\Delta\tau_{rad}$  (Fig. 3a) e dei coefficienti di sicurezza valutati con l'eq.ne (4) per terreno radicato e non, in funzione della profondità  $z$  dal piano campagna (Fig. 3b). Si osservi che l'incremento di resistenza a taglio  $\Delta\tau_{rad}$  diminuisce con la profondità, così come, evidentemente, il coefficiente di sicurezza per il terreno radicato. Il coefficiente di sicurezza nello spessore superficiale di terreno radicato, per l'effetto meccanico delle radici, può aumentare anche del triplo rispetto a quello calcolato in assenza di radici.

## 2.2 Effetti idraulici dell'impianto di radici

Oltre all'effetto meccanico descritto nel precedente paragrafo, l'impianto di radici contribuisce indirettamente a incrementare la resistenza a taglio del terreno poiché, come già accennato, può indurre una riduzione significativa del contenuto d'acqua nel terreno per effetto dell'assorbimento da parte delle radici stesse.

Per comprendere, anche dal solo punto di vista fenomenologico, i meccanismi d'interazione meccanica ed idraulica tra le radici ed il terreno, occorre analizzare l'equazione di bilancio delle masse, ove si tiene conto dei fenomeni di evapotraspirazione delle piante, infiltrazione di acqua nel terreno, ruscellamento lungo il versante. Una rappresentazione semplificata dei fenomeni è riportata nella Figura 4.

Il bilancio idrico può essere descritto dalla seguente espressione :

$$\sum_{\Delta t} (P - P_I) = \sum_{\Delta t} E + \sum_{\Delta t} T + \sum_{\Delta t} I + \sum_{\Delta t} R \quad (5)$$

ove:

$\Delta t$ : periodo temporale di riferimento;

$P$ : precipitazione totale, rappresentata da una variabile stocastica e rilevata in sito da stazioni meteorologiche;

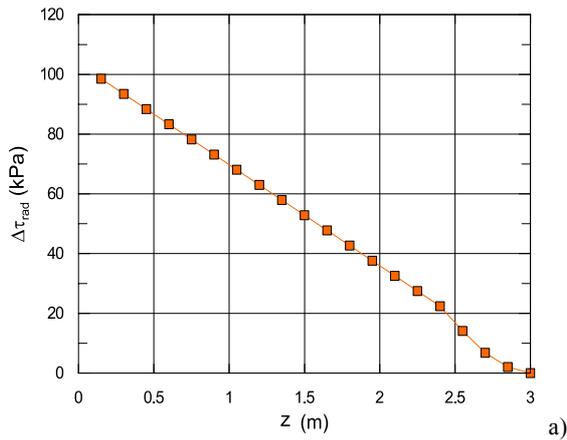
$P_I$ : pioggia intercettata dalla porzione epigea della vegetazione;

$E$ : evaporazione dallo strato superficiale di terreno;

$T$ : traspirazione;

$I$ : infiltrazione di acqua nello strato più superficiale di terreno;

$R$ : quantità di acqua interessata da fenomeni di ruscellamento (*run-off*) lungo il pendio.



$$P_l = a \cdot LAI \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{b \cdot P}{a \cdot LAI}} \right)$$

con:

$LAI$ : indice di area fogliare (*Leaf Area Index*);

$a$ : coefficiente empirico, funzione del tipo di coltura;

$b$ : frazione di terreno ricoperta dalla vegetazione, funzione anch'essa dell'indice  $LAI$  e del coefficiente di estinzione della luce solare  $k_{gr}$ .

Per una valutazione quantitativa delle grandezze  $E$ ,  $T$ , si può ricorrere al metodo della *crop evapotranspiration* (Feddes, 1987; Allen *et al.*, 1998):

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_0$$

in cui i coefficienti  $K$  quantificano la capacità di traspirazione della specie in esame in relazione al periodo di crescita, nonché la capacità evaporativa della superficie del suolo in funzione dell'ultimo evento di pioggia e della copertura fogliare. Il termine  $ET_0$  rappresenta l'evapotraspirazione di riferimento media giornaliera (Hargreaves & Samani, 1985).

Nell'obiettivo di valutare quantitativamente gli effetti dell'impianto di radici - tenendo conto di tutti i fenomeni appena citati - e di pervenire alla valutazione della stabilità superficiale di un pendio inerbito, occorre valutare la distribuzione del contenuto d'acqua e del grado di saturazione con la profondità, e pertanto simulare realisticamente il fenomeno dell'infiltrazione ( $I$ ). A tal fine, nell'ipotesi che il terreno radicato si trovi in condizione di parziale saturazione, può essere efficacemente adottata la ben nota equazione di Richards (1931):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (6)$$

ove  $\theta$  è il contenuto d'acqua volumetrico del terreno,  $K(\theta)$  la sua conducibilità idraulica, e il coefficiente di diffusività  $D(\theta)$  è definito da:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta}$$

con  $h$  = carico idraulico.

La soluzione numerica dell'equazione di Richards, nel rispetto dell'equazione di bilancio idrico, consente di calcolare l'andamento del contenuto d'acqua del terreno  $\theta(z, t)$  lungo tutto il profilo radicato, al variare del tempo. Noto  $\theta(z, t)$ , è possibile ricavare il profilo di suzione  $s(z)$  avvalendosi delle curve di ritenzione idrica ( $SWCC$ ) disponibili nella letteratura specializzata (es: Fredlund & Xing, 1994; Van Genuchten, 1980).

Infine dal profilo di suzione, adottando un criterio di rottura che tenga conto della parziale saturazione (es.: Fredlund *et al.*, 1996; Rassam e Cook, 2002; Vanapalli *et al.*, 1996), è possibile valutare la resistenza a taglio del terreno e le condizioni di equilibrio del pendio sinteticamente espresse dal fattore di sicurezza  $FS$ .

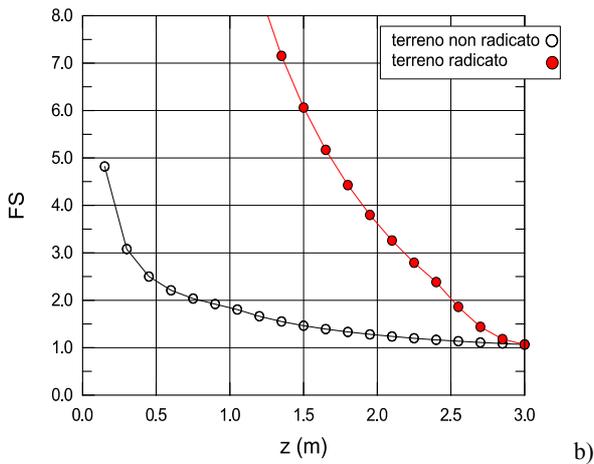


Figura 3. a) Incremento di resistenza a taglio offerto dalle radici,  $\Delta T_{rad}$  in funzione della profondità; b) coefficiente di sicurezza: confronto tra terreno non radicato e radicato (simboli pieni)

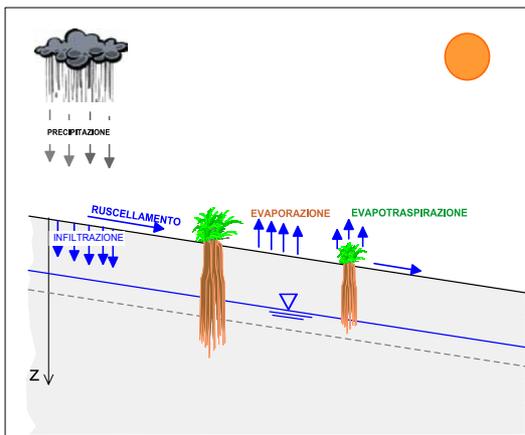


Figura 4. Rappresentazione schematica dei principali contributi che concorrono al bilancio idrico

Per quanto riguarda  $P_l$ , una delle più note espressioni reperibili nella letteratura (Von Hoyningen-Hune, 1983; Braden, 1985) per vegetazione di tipo agricolo è nella forma:

Ad esempio, assumendo come criterio di rottura per un terreno non saturo l'equazione proposta da Vanapalli *et al.*, (1996), la resistenza a taglio risulta direttamente influenzata da  $\theta$  e da  $s$  tramite la:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + s \cdot \left[ \tan \phi' \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \quad (7)$$

ove  $(\sigma_n - u_a)$  è la tensione normale netta e  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  rappresentano rispettivamente il contenuto d'acqua a saturazione e quello residuo.

Con riferimento allo schema di pendio indefinito, il coefficiente di sicurezza può essere ancora calcolato con l'eq.ne 4, nella quale la resistenza del terreno  $\tau_f$  è valutata mediante l'equazione (7).

### 3 UN ESEMPIO DI INTERVENTO MEDIANTE IMPIANTO DI RADICI

Un tipico esempio di impianto di specie erbacee a radicazione profonda, finalizzato alla prevenzione dell'erosione e alla stabilizzazione superficiale di pendii, è fornito dall'intervento eseguito in una località dell'Italia Centrale e rappresentato nelle Figure 5 e 6. In particolare nel dicembre 2004, in corrispondenza di una scarpata di notevole altezza e forte pendenza (70 – 80 gradi) costituita da piroclastiti e affioramenti basaltici fortemente alterati, si è verificato un movimento superficiale che ha ostruito la sottostante SP111 della Badia (v. Fig.5a). A distanza di pochi mesi dall'intervento, le specie erbacee impiantate hanno completamente ri-naturalizzato il versante nonostante le condizioni litologiche e morfologiche sfavorevoli all'attecchimento. L'impianto radicale profondo ha inoltre stabilizzato definitivamente la porzione superficiale del versante, bloccandone simultaneamente l'erosione (v. Fig.5b). Quest'ultima affermazione risulta particolarmente evidente dalla Figura 6, che mostra le canalette poste al piede del pendio prima e dopo l'intervento, ed evidenzia l'efficacia della tecnologia nel minimizzare le attività di manutenzione delle opere di regimazione idraulica.

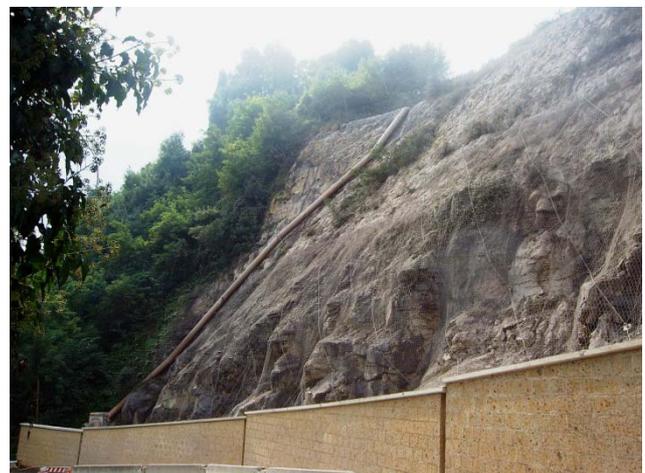
### 4 CONCLUSIONI

Fenomeni di erosione e fenomeni superficiali d'instabilità dei versanti possono essere efficacemente contenuti mediante l'impianto di coltri vegetali con apparato radicale relativamente profondo. Tale tecnologia, consistente nella semplice realizzazione - mediante semina - di impianti costituiti da piante erbacee perenni, appare di efficace e rapida realizzazione e non richiede alcuna manutenzione.

Si riconosce che l'impianto di radici profonde può indurre effetti sulle condizioni idrauliche e meccaniche dei terreni inerbiti, che a loro volta si riflettono sulle condizioni di equilibrio di potenziali porzioni superficiali di terreno in movimento. Nell'esempio riportato nella nota si mostra che i prati armati non solo costituiscono una tecnica di protezione dall'erosione, ma possono costituire

un efficace metodo per la stabilizzazione di movimenti superficiali di scarpate naturali e artificiali, ove, tenendo conto della profondità massima delle radici, per movimenti superficiali si intendono quelli che non si estendono oltre 1 ÷ 1.5 m di profondità. L'effetto dell'impianto di radici è in primo luogo attribuibile al rinforzo meccanico offerto dalle radici stesse; secondariamente, l'impianto di radicazione influisce, anche significativamente, sul bilancio idrologico dell'area di interesse, per la capacità dell'apparato epigeo sia di intercettare parte della precipitazione meteorica sia di assorbire acqua dal suolo trasferendola all'atmosfera per traspirazione.

Da parte degli Autori è stato recentemente avviato uno studio mirato alla modellazione numerica dei meccanismi di interazione meccanica/idraulica tra le radici ed il terreno. I risultati dello studio, in via di approfondimento, consentono la stima quantitativa dell'incremento di resistenza a taglio del terreno offerto dall'impianto, e la valutazione delle condizioni di equilibrio e sicurezza limitatamente a fenomeni di instabilità superficiale.



a)



b)

Figura 5. Orvieto (Terni) - SP111 della Badia: a) situazione del versante nel dicembre 2004, prima dell'intervento; b) dopo l'intervento di rinaturalizzazione (maggio 2006)



Figura 6. Orvieto (Terni) - SP111 della Badia: a) canaletta intasata (foto settembre 2005); b) canaletta pulita (foto maggio 2006)

## 5 BIBLIOGRAFIA

- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300 p.
- Bischetti G.B., Bonfanti F., Greppi M., 2001. *Misura della resistenza a trazione delle radici: apparato sperimentale e metodologia d'analisi*. Quaderni di Idronomia Montana, 21/1, 349-360.
- Bischetti G.B., Chiaradia E. A., Epis T., 2009. *Prove di trazione su radici di esemplari di piante PRATI ARMATI®. Rapporto conclusivo*. Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano.
- Bonfanti F., Bischetti G., 2001. *Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno – radici*. Istituto di Idraulica Agraria, Milano – Rapporto interno.
- Braden, H., 1985. *Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete*. Mittlungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 42, 294-299.
- Feddes, R.A., 1987. *Crop factors in relation to making reference crop evapotranspiration*. In 'Evaporation and weather', TNO Committee on Hydrological Research, 39, p. 33-46.
- Fredlund, D. G., and Xing A., 1994. *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., and Barbour, S.L. 1996. *The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 33: 440-448.
- Gray D. H., Ohashi H. (1983). *Mechanics of fiber reinforcement of sand*. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE.
- Gray D. H., Leiser A. T., 1989. *Biotechnical slope protection and erosion control*. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.
- Gray D. H., Sotir R. B., 1996. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley and Sons.
- Hargreaves, G.L., and Z.A. Samani, 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Applied Engineer. In Agric., 1, 2, 96-99.
- Rassam D.W., Cook F., 2002. *Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils*. Geotechnical Testing Journal, Technical Note, 25: 215-220.
- Rettori A., Cecconi M., Pane V., Zarotti C. 2010. *Stabilizzazione superficiale di versanti con la tecnologia Prati Armati®: implementazione di un modello di calcolo per la valutazione del coefficiente di sicurezza*. Accademia Nazionale dei Lincei – X Giornata Mondiale dell'Acqua, Convegno: Frane e Dissesto Idrogeologico, marzo 2010.
- Richards, L.A., 1931. *Capillary conduction of liquids through porous medium*. Physics, Vol. 1.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton, A.W., 1996. *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*. Canadian Geotechnical Journal, 33: 379-392.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk and C.A. van Diepen, 1997. *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*. Wageningen University and Alterra. Technical Document 45.
- Van Genuchten, M. Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Von Hoyningen-Hüne, J., 1983. *Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen*. Schriftenreihe des DVWK 57, 1-53.
- Waldron L.J., 1977. *The shear stress resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*. Soil Science Society of America Proceedings, 41:843-849.
- Wu T.H., 1976. *Investigation on landslides on Prince of Wales Island, Alaska*. Geotech. Rpt. No 5 (1976). Dpt. Of Civil Eng., Ohio State Univ., Columbus OH, 94 pp.
- W.H. Wishmeier, D.D. Smith, 1965. *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain*. Agr. Handbook, n. 282, U.S. Dept. of Agr.
- W.H. Wishmeier, D.D. Smith, 1978. *Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning*, Agr. Handbook, n. 537, USDA, Washington, USA.

### Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare il Prof. Giovanni Calabresi per i preziosi consigli e gli importanti suggerimenti.

### ABSTRACT

### BIOTECHNICAL SLOPE PROTECTION AND EROSION CONTROL

Keywords: soil erosion, mechanics of root reinforcement, role of vegetation on slope stability.

Erosion phenomena are broadly diffused in Italy. Different techniques of erosion control and soil protection have been developed in recent years. Among them, an innovative and natural technology is noted. This employs only perennial, deep rooting grassy plants. The biotechnology allows operating even in areas with prohibitive climatic conditions for the development of vegetation. Moreover, the technology sounds rather promising in the protection and superficial stability of slopes.

The role of vegetation can be investigated in terms of mechanical and hydraulic effects. The mechanical effects of the plant roots, which are already widely acknowledged in the specific literature, are due to the root/soil interaction processes; on the other hand, the hydraulic effects of roots can be ascribed to the significant reduction of water content and degree of saturation which, in turn, increase the soil shear strength, thus improving the slope equilibrium conditions.

Starting from the understanding of such mechanical/hydraulic interaction mechanisms between the planted roots and the soil, the research sets as a final goal the quantitative assessment of such effects and their modeling and implementation in a computing algorithm.