

La collana cui appartiene il presente testo riporta, in termini sintetici, risultanze emerse dal progetto GERIA (Gestione dei Rischi Ambientali – programma INTERREG II ) in merito ad uno dei vari aspetti in esso trattati.

Pare opportuna, a riguardo, una premessa di generale “inquadramento” di detto progetto, anche in relazione al più ampio quadro di iniziative che la Regione Liguria sta assumendo sul tema della difesa del suolo e della prevenzione e mitigazione dei rischi naturali. Iniziative volte a favorire i processi di integrazione delle capacità e potenzialità degli enti che operano nel territorio, alle diverse scale di competenza. E’ in tale ottica che si colloca l’esperienza “GERIA”, di cui una prima fondamentale caratterizzazione è stata proprio l’aver posto “allo stesso tavolo” i ruoli omologhi delle diverse amministrazioni, rendendole partecipi delle scelte e degli sviluppi delle diverse fasi di attività. Ciò in stretto contatto con le realtà locali dei territori esaminati. Detta compartecipazione ha riguardato sia la parte italiana che quella francese ed è stata impostata in modo organico, attraverso la preventiva istituzione di appositi comitati e gruppi di lavoro.

Del tutto originale è stato il tipo di approccio alle tematiche prese in esame. Esso infatti si è valso di competenze scientifiche altamente qualificate nei diversi settori di pertinenza, promovendone un’integrazione, proficua di risultanze innovative, anche sinergiche rispetto alle originali visioni settoriali.

Il progetto ha avviato un rinnovato e più organico rapporto tra Amministrazioni Pubbliche ed Università, attraverso una impostazione metodologica ed una prassi operativa che ha chiamato in causa entrambe le realtà per gli aspetti di più logica pertinenza e capacità. Ne sono derivate risultanze trasferibili nella prassi della gestione del territorio, sia direttamente che attraverso successivi approfondimenti e precisazioni.

Il tema dei rischi naturali costituisce in oggi uno dei principali “nodi problematici” che le pubbliche amministrazioni devono affrontare, con ripercussioni economiche spesso rilevanti ed incerte ed a fronte di uno “ stato della conoscenza” poco capace di risposte utilizzabili nei processi decisionali, che abbisognano di dati sintetici, comparabili anche sul piano sociale ed economico. Con la promozione del progetto GERIA la Regione Liguria arricchisce il processo avviato con le attività di pianificazione di bacino e di protezione civile per affrontare tali problemi, predisponendo le diverse strutture non solo a determinare ma anche a porre in pratica le soluzioni trovate. Ciò sia sul piano tecnico che su quello normativo e gestionale.

Il Direttore del Dipartimento  
Tutela dell’Ambiente ed Edilizia  
Ing. Mario Fracchia

## **IL PROGETTO**

Ha avuto ad oggetto il tema dei rischi naturali, considerati sia in relazione alle singole tipologie di possibili eventi (sismi, esondazioni, incendi, frane) che in termini di effetti integrati degli stessi.

Le attività hanno avuto come riferimento un ambito territoriale interfrontaliero, delimitato dall'area costiera tra Nizza e Imperia, che abbraccia l'entroterra per una fascia dell'ordine di 15 – 20 Km.

Sono stati realizzati approfonditi studi ed elaborazioni, che hanno preso in considerazione sia la "pericolosità", che la "vulnerabilità" e il "danno temuto" delle categorie di "esposto vulnerabile" di maggiore significatività alle diverse scale di riferimento. Questo per ogni tipologia di possibile evento calamitoso. Attraverso la determinazione e simulazione di appositi scenari è stato possibile produrre valutazioni sulla vulnerabilità non solo di tipo "fisico o strutturale" ma anche di tipo "sistemico", legata cioè all'incidenza sui più generali livelli di funzionalità dei tessuti urbani e dei sistemi territoriali. Sono state altresì affrontate problematiche di specifico interesse per le amministrazioni pubbliche, riferibili ad azioni volte alla prevenzione e/o mitigazione del rischio, che hanno tenuto conto delle differenti situazioni vigenti tra le due realtà nazionali, anche sul piano normativo e procedurale.

Sotto il profilo scientifico il progetto è risultato particolarmente innovativo, sia nei singoli campi disciplinari che per gli effetti sinergici che sono derivati dalla messa in comune delle competenze e capacità delle diverse equipe. A riguardo, per parte italiana, hanno operato, in modo organico e strettamente integrato, competenze di cinque diverse strutture dell'università di Genova, appartenenti a due diverse Facoltà. L'impostazione data al progetto e la conseguente costituzione di appositi comitati (vedi schemi successivi) ha consentito la fattiva partecipazione, ai diversi livelli di riferimento, di tutte le amministrazioni pubbliche interessate alle tematiche in esame. Attraverso l'attività di specifici "gruppi di lavoro" sono stati coinvolti anche altri organismi, sia pubblici che privati, che operano nel territorio considerato. Attraverso il collegamento tra competenze omologhe (liaison) sia italiane che francesi, è stato possibile favorire confronti ed interscambi diretti tra le diverse situazioni ed esperienze.

## **I DOSSIERS TEMATICI**

Sono stati realizzati al fine di consentire una maggiore divulgazione, sia pur sintetica, dell'attività e delle risultanze acquisite nel progetto, su aspetti di diffuso interesse. Le tematiche trattate sono state pertanto esposte cogliendone aspetti essenziali ed evitando, per quanto possibile, terminologie o precisazioni troppo settoriali. Obiettivo è stato l'inquadramento delle questioni trattate e non le specifiche tecniche delle risultanze conseguite. Queste ultime sono state indicate in termini generali citando, con apposite note, le fonti e/o modalità di possibile approfondimento

## **IL PRESENTE DOSSIER: "VULNERABILITÀ TERRITORIALE DA FRANE E CROLLI IN ROCCIA"**

Regione Liguria ha attivato il Progetto GE.RI.A., il cui nome è l'acronimo di GEstione di RISchi Ambientali, secondo il Programma d'Iniziativa Comunitaria InterReg-II in cooperazione transfrontaliera Italia-Francia (1994-1999). L'attività è stata quindi svolta in ambito territoriale transfrontaliero che, nel caso dell'estremo Ponente Ligure, corrisponde all'intera provincia d'Imperia. I rischi considerati nel Progetto GE.RI.A. sono quelli associati alla vulnerabilità fisica del territorio da Eventi Sismici, Inondazioni, Incendi Boschivi e Frane.

Tra le principali finalità del progetto vi era l'identificazione di tecniche e metodi di analisi da applicare affidabilmente su scala territoriale e, soprattutto, che queste fossero implementabili sui cosiddetti Sistemi Informativi Territoriali (GIS). In quanto segue si riassume, sinteticamente, il lavoro svolto in tale ambito presso il Dipartimento d'Ingegneria Strutturale e Geotecnica (DISEG) dell'Università di Genova, per quanto attiene alla vulnerabilità connessa alle frane in terreni sciolti ed ai crolli, per scorrimento, da fronti in ammassi rocciosi.

Nel presente Dossier verranno quindi esposti, seguendo uno schema opportuno, i modelli concettuali adottati per simulare la risposta meccanica di terreni e fronti in roccia alle sollecitazioni ambientali, al fine di identificare metodologie che si ritengono idonee a condurre analisi di stabilità.

Tali tecniche, pur semplificate, sono applicabili alla scala dell'intero versante, utilizzano informazioni riferite al tipo di suolo (sia in termini geotecnici che idrologici) ed alla sua destinazione d'uso, permettono di caratterizzare la vulnerabilità fisica locale (sulla scorta di scenari anche virtuali): attività basilare per le successive e conseguenti Valutazioni di Rischio.

**COMITATO DI GESTIONE (UNIVERSITÀ DI GENOVA)**  
**COORDINAMENTO SCIENTIFICO: PROF. PIETRO UGOLINI**

Giorgio Roth	CIMA	Rischio idrogeologico; ingegneria ecologica
Riccardo Minciardi	CIMA Modellistica	Modellistica matematica, strumenti informatici e tecniche decisionali; metodiche di mappatura dei rischi ambientali; determinazione di scenari di rischio
Pietro Ugolini .	CIMA/D.E.U.I.M	Aspetti pianificatori, gestionali e normativi a livello urbano e territoriale. Vulnerabilità sistemica.
Antonio Chirico	D.E.U.I.M	
Claudio Eva	DIP.TE.RIS	Valutazione della pericolosità sismica; analisi ai fini della determinazione di scenari di rischio; sperimentazione di tecniche speditive di microzonazione
Sergio Lagomarsino	D.I.S.E.G.	Vulnerabilità sismica degli insediamenti e delle infrastrutture, del costruito e del patrimonio storico e monumentale; vulnerabilità fisica
Roberto Passalacqua	D.I.S.E.G.	Aspetti di geotecnica, per la difesa del suolo

**COMITATO REFERENTE – REGIONE LIGURIA**

**RESPONSABILI: ING. MARIO FRACCHIA**

**ING. STEFANO MASSONE**

**REFERENTE REGIONALE: DOTT.SSA GIOVANNA GORZIGLIA**

Mario Fracchia	Assetto del Territorio e controllo tecnico
Stefano Massone	Assetto del Territorio e controllo tecnico
Giovanna Gorziglia	Assetto del Territorio e controllo tecnico
Daniela Minetti	Politiche e Programmi Ambientali
Sergio Torre Laura Levi	Edilizia Abitativa e Scolastica
Gianni Gaggero	Pianificazione Territoriale
Antonino Rossi	Urbanistica
Giuseppe Stoppelli	Ispettorato Funzioni Agricole
Anna Cerrato	Sistemi Informatici
Anna Doris Genesin	Protezione Civile
Gianfilippo Micillo	Corpo Forestale dello Stato Coord. Provinc. Imperia

**Comitati costituiti nell'ambito del Progetto GERIA**

<b>COMITATO DI PILOTAGGIO</b>	
Funzioni: Sede di promozione ed organico coinvolgimento della realtà locale. Ambito di competenza e riferimento di scelte pianificatorie e gestionali dei territori considerati	
<b>ITALIA</b>	<b>FRANCIA</b>
<b>COMPOSIZIONE</b>	<b>COMPOSIZIONE</b>
<i>Presidenza</i>	<b>Prefecture (Direction de la Protection Civile)</b>
<b>Provincia di Imperia</b>	<b>Conseil General des Alpes Maritimes</b>
<b>Componenti</b>	<b>Conseil Regional Provence Alpes Cote d'Azur</b>
<b>Regione Liguria</b>	<i>COMMUNES CONCERNEES PAR LE PROJET</i>
<b>Comune di Cervo</b>	<b>DATAR</b>
<b>Comune di Imperia</b>	<b>DIREN- Direction de l'Environnement</b>
<b>Comune di Sanremo</b>	<b>DRIRE - Direction Régionale Régionale de L'Industrie de la recherche et de l'Environnement</b>
<b>Comune di Taggia</b>	<b>DRAF - Direction Régionale de l'Agriculture et des Foretes</b>
<b>Comune di Ventimiglia</b>	<b>DDAF – Direction Departementale Régionale de l'Agriculture et des Foretes</b>
<i>Aderenti</i>	<b>DRE - - irection Régionale Régionale de l'Environnement</b>
Comunità Montane (n. 2) <input type="checkbox"/> C. M. Intemelia <input type="checkbox"/> C. M. Argentina-Armea	<b>DDE - Direction Départementale de l'Equipement</b>
<b>Comuni (n. 46)</b> Airole, Apricale, Badalucco, Baiardo, Bordighera, Borgomaro, Camproosso, Carpasio, Castellaro, Ceriana, Chiusanico, Chiusavecchia, Cipressa, Civezza, Costarainera, Diano Arentino, Diano Castello, Diano Marina, Diano San Pietro, Dolceacqua, Dolcedo, Isolabona, Lucinasco, Montaldo Ligure, Olivetta San Michele, Ospedaletti, Perinaldo, Pietrabruna, Pontedassio, Prela', Riva Ligure, Rocchetta Nervina, San Bartolomeo Al Mare, San Lorenzo Al Mare, Santo Stefano Al Mare, Seborga, Soldano, Terzorio, Vallebona, Vasia, Villa Faraldi.	<b>DDISIS – Direction Départementale des Services d'Incendies et de Secours</b>
	<b>DDASS – Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales</b>
	<b>CIRCOSC de Vallabre</b>
	<b>ONF – Office National des Forets</b>
	<b>METEO FRANCE</b>

**Comitati costituiti nell'ambito del Progetto GERIA**

## INDICE

1 MODELLO IDROLOGICO	2
1.1 IL METODO EMPIRICO proposto dal <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)	2
1.2 CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO CN	6
1.3 MODELLO IDROLOGICO DI VERSANTE – metodo <i>CN MODIFICATO</i>	9
1.3.1 Indicazioni per la valutazione del parametro $\lambda$	14
1.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO	17
2 MODELLI GEOTECNICI	20
2.1 VERSANTI TERRAZZATI	20
2.1.1 Analisi delle spinte agenti	21
2.1.2 Condizioni di danneggiamento delle opere di sostegno	22
2.2 VERSANTI NON TERRAZZATI	26
2.3 APPLICAZIONE SUI VERSANTI IN TERRENI SCIOLTI	27
2.4 FRONTI IN AMMASSI ROCCIOSI	29
2.4.1 Implementazione su GIS	31
2.5 APPLICAZIONE SU FRONTI IN ROCCIA	32
3 CONCLUSIONI	35
4 RINGRAZIAMENTI	36
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	36

## 1. MODELLO IDROLOGICO

Il processo di penetrazione dell'acqua meteorica dalla superficie verso gli strati di suolo sottostanti è definito di *infiltrazione* e si distingue dalla *filtrazione*, che rappresenta il moto della stessa nel terreno.

Molto spesso l'innescò delle frane è attribuibile alle elevate quantità d'acqua che, infiltrata rapidamente nello strato più superficiale del terreno, non viene altrettanto celermente smaltita dalle parti più profonde e meno permeabili, o attraverso il substrato roccioso. Ne discende pertanto un processo più o meno rapido di saturazione interessante la coltre detritica, funzione della diversa conduttività idraulica (K) dei vari orizzonti stratigrafici e della intensità di pioggia, responsabile della formazione di un livello di falda "sospeso", temporaneo, che può provocare la movimentazione della massa costituente il versante; a tale fenomeno è quasi sempre associata l'aggravante dovuta ad una inadeguata regimazione, sia delle acque superficiali che di quelle profonde.

Al fine di pervenire alla determinazione di una correlazione fra eventi meteorici e dissesti, è necessario definire un modello idrologico, la cui generazione ed utilizzazione è vincolata alla perimetrazione di un'area geografica, alla conoscenza dei locali eventi franosi passati ed al riconoscimento dei loro cinematismi di distacco. L'adozione di tale metodologia condurrà a risultati tanto più attendibili quanto più saranno diffusi i dati di precipitazione ("buona" copertura territoriale con stazioni pluviometriche) e, ovviamente, quanto più l'area indagata sarà omogenea sia dal punto di vista geomorfologico che in termini di uso del suolo. Un modello idrologico orientato alle presenti finalità deve quindi identificare i cosiddetti "valori di soglia", oltre i quali le intensità e frequenze di pioggia hanno prodotto, o produrranno, collassi gravitativi.

### **IL METODO EMPIRICO proposto dal *Soil Conservation Service* (SCS)**

È opportuno fornire una rapida ma esaustiva illustrazione del metodo SCS, poiché su questo è impostato il modello idrologico adottato.

La risposta di un suolo in termini di pioggia efficace può essere studiata tramite il metodo basato sul parametro empirico detto *Curve Number* (CN nel seguito), proposto dal Soil Conservation Service dello U.S. Dep.t of Agriculture (1972-1975): è di concezione Hortoniana e discende da osservazioni sperimentali, calibrate su oltre 4000 bacini agricoli aventi condizioni tipiche delle regioni del Nord America.

Rivisitati i parametri che lo caratterizzano, al fine di integrare al meglio la metodologia alle nostre longitudini, si osserva che tale procedura bene si rapporta quando si devono trattare informazioni distribuite sul territorio, poiché è in grado di riassumere nel parametro sintetico CN, rilevanti informazioni distribuite sul territorio, quali l'uso del suolo.

Permette quindi, di stimare l'altezza di deflusso superficiale  $R$  [mm], che genera ruscellamento, in funzione dell'altezza totale di precipitazione  $H$  [mm] dall'inizio dell'evento, arrivando alla determinazione di un parametro dimensionale  $S$  [mm], che rappresenta il massimo potenziale di assorbimento del terreno descrivendone tipo e stato in termini di copertura vegetale, sistemazione e condizioni antecedenti di bagnamento.

Quindi, durante un fenomeno di precipitazione meteorica, la quantità complessiva di pioggia caduta  $H$  [mm], si può considerare come la somma di tre componenti:

- $I_a$ , quantità di pioggia iniziale per cui non si verifica ruscellamento, o assorbimento iniziale;
- $F$ , quantità che si infila, proporzionale alla capacità di immagazzinamento massima potenziale del terreno  $S$ ;
- $R$ , pioggia efficace, o ruscellamento.

Le interrelazioni tra tali altezze sono viste graficamente nella figura seguente per definire, pur qualitativamente, il semplice bilancio idrologico introdotto dall'SCS.

**Figura 1. Bilancio idrologico della pioggia cumulata H secondo il modello SCS, in cui R: ruscellamento superficiale (*runoff*) – F: infiltrazione -  $I_a$ : assorbimento iniziale.**

L'ipotesi su cui si basa il metodo è che siano uguali i rapporti tra infiltrazione e capacità di immagazzinamento da un lato, pioggia efficace e potenziale di ruscellamento dall'altro:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

e che sia soddisfatto il bilancio di cui in figura 1:

$$H = R + I_a + F$$

Mettendo a sistema le due espressioni si ottiene, al generico tempo t:

$$R(t) = \frac{[H(t) - I_a]^2}{H(t) + S - I_a} \quad \text{per } H > I_a$$

Normalmente è ragionevole assumere  $I_a = 0.2S$  e quindi, sostituendo:

$$R(t) = \frac{[H(t) - 0.2S]^2}{H(t) + 0.8S}$$

Il parametro S è definito come:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

funzione di CN, parametro adimensionale con un campo di variabilità compreso tra i valori asintotici 0 (superficie permeabile) e 100 (superficie impermeabile); tabellato in relazione alle seguenti caratteristiche del terreno in posto:

- uso del suolo, copertura;
- trattamento, o pratica colturale;
- condizioni idrauliche, in relazione al drenaggio superficiale;
- condizioni idrologiche, a loro volta suddivise in:

tipo A:     potenziale di scorrimento superficiale molto basso; suoli con alta capacità d'infiltrazione, anche se completamente saturi e formati essenzialmente da sabbie e ghiaie, bene o eccessivamente drenati in profondità;



tipo B: potenziale di scorrimento superficiale basso; suoli che hanno moderata capacità d'infiltrazione, anche se completamente saturi, aventi tessitura fine o moderatamente grossolana, da moderatamente profondi a profondi, da moderatamente a ben drenati;

tipo C: a moderato potenziale di scorrimento superficiale; suoli che hanno bassa capacità d'infiltrazione quando sono saturi, costituiti principalmente da suoli aventi uno strato che impedisce il movimento verticale dell'acqua e aventi tessitura da moderatamente fine a fine;

tipo D: ad alto potenziale di scorrimento superficiale; suoli con bassissima capacità d'infiltrazione quando saturi, costituiti principalmente da argille; suoli con falda freatica permanente prossima alla superficie; coltri sottili su basamento impermeabile.

- stati di bagnamento precedenti, individuati dalle seguenti tre condizioni AMC (Antecedent Moisture Condition):

AMC I: minimo potenziale di ruscellamento; terreno secco, asciutto ma non ancora alle condizioni alle quali le piante appassiscono;

AMC II: condizione intermedia;

AMC III: massimo potenziale di ruscellamento; terreno completamente saturato dalle piogge precedenti.

Per passare dalla condizione di bagnamento AMC II alle altre, si utilizzano le seguenti relazioni:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}$$

Si osserva infine che il valore di  $I_a$ , altezza iniziale di assorbimento (*no runoff*), può essere empiricamente scelto in funzione delle classi di acclività del territorio, in base alle quali attribuire un valore compreso nel ristretto campo 0.15 (versanti acclivi) e 0.2 (zone a pendenze minori).

In tabella 1 alla pagina successiva, sono riportati i valori di CN, riferiti alle diverse condizioni idrauliche e idrologiche, ai tipi di uso del suolo e pratiche colturali.

Uso del suolo o copertura vegetale	Tipo di pratica colturale o trattamento	Cond. idrauliche	Cond. Idrologiche			
			A	B	C	D
Incolti	Frana-poggio		77	86	91	94
Filari	Frana-poggio	Scadenti	72	81	88	91
	Frana-poggio	Buone	67	78	85	89
	Gira-poggio	Scadenti	70	79	84	88
	Gira-poggio	Buone	65	75	82	86
	Terrazze	Scadenti	66	74	80	82
	Terrazze	Buone	62	71	78	81
Seminativi	Frana-poggio	Scadenti	65	76	84	88
	Frana-poggio	Buone	63	75	83	87
	Gira-poggio	Scadenti	63	75	83	87
	Gira-poggio	Buone	61	73	81	84
	Terrazze	Scadenti	61	72	79	82
	Terrazze	Buone	59	70	78	81
Seminativi fitti	Frana-poggio	Scadenti	66	77	85	89
Legumi o colture a rotazione	Frana-poggio	Buone	58	72	81	85
	Gira-poggio	Scadenti	64	75	83	85
	Gira-poggio	Buone	55	69	78	83
	Terrazze	Scadenti	63	73	80	83
	Terrazze	Buone	51	67	76	80
	Pascoli	Scadenti	68	79	86	89
		Accettabili	49	69	79	84
		Buone	39	61	74	80
	Gira-poggio	Scadenti	47	67	81	88
	Gira-poggio	Accettabili	25	59	75	83
	Gira-poggio	Buone	6	35	70	79
	Pascoli con erbe alte	Buone	30	58	71	78
Boschi		Scadenti	45	66	77	83
		Accettabili	36	60	73	79
		Buone	25	55	70	77
	Strade sterrate		72	82	87	89
Strade a superf. dura			74	84	90	92

**Tabella 1. Valori del parametro CN, in condizioni di bagnamento AMCII, al variare dell'uso suolo, tipo di pratica colturale, condizioni idrauliche e condizioni idrologiche.**

### CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO CN

Regione Liguria, negli anni '80, ha prodotto una serie di carte tematiche digitali, su maglia quadrata di lato 100 m, a partire da riprese aeree fotogrammetriche a colori in scala 1:15'000 effettuate negli anni 1973 e 1974.

Di particolare importanza in quest'ambito sono la carta tematica dell'Uso Suolo e quella della Litologia; partendo da queste, alcuni Autori (Mancini & Rosso, 1989 – Brath & al.,

1989), tramite una procedura automatica, hanno associato ad ogni cella del DEM (modello digitale del terreno, all'epoca su maglia di lato 225 m), il valore dell'indice CN: è quindi possibile definire la diffusione sull'intero territorio regionale di S, massima capacità di ritenzione potenziale del terreno.

**Figura 2. Carta Tematica Regionale con l'identificazione, in falsi colori, di 11 classi di Uso Suolo. Scala 1:25'000. (Fonte: riprese aeree fotogrammetriche a colori in scala 1:15'000 effettuate negli anni 1973-74).**

**Figura 3. Carta Tematica Regionale con l'identificazione, in falsi colori, di 10 classi di Litologia. Scala 1:25'000. (Fonte: riprese aeree fotogrammetriche a colori in scala 1:15'000 effettuate negli anni 1973-74).**

La procedura di stima e calibrazione del CN è sinteticamente descrivibile nelle seguenti tre fasi:

1. dapprima si è adottato un criterio associativo, basato sulla descrizione delle 11 classi dell'uso suolo e quelle corrispondenti ai valori di CN forniti dal SCS, così come descritti in tabella 1, per una tipologia di suolo mediamente permeabile;
2. usando le informazioni fornite dalla mappa tematica Litologica della Liguria si è modificato, per alcune classi di uso del suolo (Vegetazione Arborea, Arbustiva ed Erbacea, Prato e Pascolo ...), il CN in modo da tenere conto della maggiore o minore

permeabilità attesa per le coltri sovrastanti le differenti tipologie litologiche; si è così ricavata una mappa *raster* del CN in condizioni di bagnamento iniziali normali (AMC II);

3. si quindi è proceduto ad una “ri-rasterizzazione” (su maglia di 225 metri) delle due carte tematiche, in modo da renderle coerenti alla risoluzione ed alla proiezione cartografica del modello digitale morfologico allora disponibile.

I valori dell’indice CN, in condizioni AMCII e associati alle 11 classi di uso suolo, vengono riportati in tabella 2; inoltre, al variare delle 10 categorie litologiche, in tabella 3 sono riportati i valori incrementali o riduttivi da applicare al parametro CN, già ottenuto nella designazione in classi di uso suolo.

<b>CLASSI USO SUOLO</b>	<b>CN</b>
AREE PREVALENTEMENTE RESIDENZIALI	90
AREA INDUSTRIALE	90
GRANDI SERVIZI URBANI E DI USO TURISTICO	92
VEGETAZIONE ARBOREA	56
VEGETAZIONE ARBUSTIVA	60
VEGETAZIONE ERBACEA PRATO E PASCOLO	65
COLTURE SPECIALI	75
OLIVETO	65
VIGNETO	70
SEMINATIVO	60
ROCCIA AFFIORANTE E AREA NON VEGETATIVA	75

**Tabella 2. Valori del parametro CN, in condizioni di bagnamento AMC II, associati ad 11 classi di uso suolo.**

<b>CATEGORIE LITOLOGICHE</b>	<b>Variazione CN</b>
ROCCE ARGILLOSE	+0
ROCCE CALCAREE	+10
ROCCE ARENACEE	+10
ROCCE SILICEE	+5
ROCCE BRECCIOIDI	+10
ROCCE OFIOLITICHE	+10
ROCCE CRISTALLINE	+15
ROCCE METAMORFICHE	+15
COLTRI DETRITICHE	-5
SEDIMENTI	-5

**Tabella 3. Valori di variazione, secondo Categorie Litologiche, da applicare al parametro CN come ottenuto per le diverse classi di Uso Suolo.**

**Figura 4, Carta con l'identificazione, in falsi colori, di 8 classi di Curve Number in condizioni AMC II. Scala di restituzione 1:25'000. Fonte: utilizzo combinato della Carta Tematica Regionale Uso suolo e della Carta Tematica Regionale Litologica.**

#### **MODELLO IDROLOGICO DI VERSANTE – metodo *CN MODIFICATO***

Il modello descritto nel seguito, rispetto all'originario modello del Soil Conservation Service che tiene unicamente conto del ruscellamento superficiale, permette di considerare il volume idrico attualmente infiltrato prima di analizzare un successivo evento meteorico.

Il terreno è assimilato ad un serbatoio sotterraneo, con capacità massima di immagazzinamento pari ad  $S$ ; detta quantità, in accordo con il metodo dell'SCS, viene espressa in termini di altezza equivalente d'acqua essendo, dal punto di vista dimensionale, un'altezza per unità di superficie.

L'alimentazione al serbatoio è costituita unicamente dalle sollecitazioni meteoriche  $P$ , o meglio dalla quota parte di pioggia che si infiltra nel terreno, depurata dalla componente di ruscellamento superficiale  $P_e$ ; i contributi in uscita sono rappresentati dallo *scorrimento subsuperficiale* e dalla *evapotraspirazione*.

La condizione di serbatoio pieno indica un terreno completamente saturo e, a partire da questa situazione, il sistema non è più in grado di ricevere entrate: l'ulteriore pioggia incidente va in ruscellamento superficiale.

L'evapotraspirazione (EV) della copertura vegetale è fattore di difficile valutazione, che dovrebbe essere espresso in funzione di temperatura, esposizione cardinale e venti prevalenti. Per comodità e semplicità in questa applicazione è valutato un valore medio

giornaliero, trascurando il contributo di EV durante i periodi di pioggia. In ambiente semiarido, come quello ligure, si possono utilizzare i seguenti valori (indicativi):

$$EV = 10 \div 15 \text{ mm/giorno} \quad \text{in periodo estivo;}$$

$$EV = 1 \div 3 \text{ mm/giorno} \quad \text{per i mesi autunnali ed invernali.}$$

La componente in uscita dovuta al deflusso subsuperficiale, è invece individuata tramite la funzione di esaurimento di un serbatoio lineare:

$$V_{t+\Delta t} = V_t \cdot e^{-\lambda(\Delta t)} \quad (\bullet)$$

essendo  $\Delta t$  il tempo di svuotamento,  $V_t$  e  $V_{t+\Delta t}$  i volumi presenti nel serbatoio, rispettivamente agli istanti  $t$  e  $t+\Delta t$ . L'ipotesi di linearità è adottata in modo tale da rendere il tempo di dimezzamento indipendente dallo stato in cui si trova il serbatoio, considerandolo quindi come una caratteristica propria del sistema.

Il parametro  $\lambda$  è la cosiddetta *costante di svuotamento*, che si ottiene calcolando il tempo che il serbatoio lineare impiega a dimezzare il proprio volume in assenza di alimentazione; sostituendo  $V_{t+\Delta t} = \frac{V_t}{2}$  e  $\Delta t = t_{1/2}$  nella ( $\bullet$ ), si ha:

$$\frac{V_t}{2} = V_t \cdot e^{-\lambda(t_{1/2})}$$

da cui, per le proprietà dei logaritmi, si ricava

$$\lambda = -\frac{1}{t_{1/2}} \ln\left(\frac{1}{2}\right) \quad (\bullet\bullet)$$

Invece di considerare direttamente la grandezza  $\lambda$ , che non fornisce indicazioni immediate sulle condizioni del suolo, si preferisce individuare il tempo di dimezzamento, che si può ritenere variabile tra i 2 e 5 giorni a seconda del tipo di suolo considerato. Il valore di  $\lambda$ , che si ottiene inserendo il  $t_{1/2}$  scelto nella ( $\bullet\bullet$ ), è condizionato naturalmente dallo step temporale adottato nella simulazione: se l'analisi è svolta a livello orario si utilizzerà un  $\lambda$  decisamente inferiore rispetto ad una scala giornaliera, dovendo convertire i numeri di giorni scelti quale tempo di dimezzamento nell'equivalente numero di ore.

Il parametro  $\lambda$  contiene informazioni riguardanti la porosità, la pendenza locale del territorio, la fratturazione del substrato roccioso ed è indipendente dall'altezza d'acqua

contenuta nel serbatoio. La presenza del substrato roccioso di base, anche eventualmente fratturato, fa sì che il coefficiente di permeabilità in direzione orizzontale risulti maggiore rispetto a quello in verticale, conseguentemente il flusso in uscita dalla zona satura si può normalmente ritenere orientato secondo la direzione di massima pendenza del versante.

Per spiegare il comportamento del sistema si supponga di voler eseguire una simulazione a scala giornaliera, considerando due giorni consecutivi di pioggia.

Il volume che entra nel serbatoio durante la prima giornata è dato da:

$$V_{in(1)} = P_1 - \frac{(P_1 - cS)^2}{P_1 + (1 - c)S}$$

essendo  $P_1$  l'altezza giornaliera di pioggia, mentre la quantità:

$$\frac{(P_1 - cS)^2}{P_1 + (1 - c)S}$$

rappresenta la quota parte in ruscellamento superficiale, ovviamente da considerarsi solo se la pioggia cumulata  $P_1$  è maggiore di  $cS$ ; se quest'ultima condizione non risulta soddisfatta, l'intera quantità di pioggia  $P_1$  va ad aumentare il livello del serbatoio.

**Figura 5. Rappresentazione del comportamento del terreno, secondo il modello CN modificato.**

In figura 5 sono esposte le diverse quantità in entrata e uscita dal sistema: l'altezza  $S$ , oltre a rappresentare la capacità massima d'immagazzinamento del terreno, indica (a meno della porosità) lo spessore del substrato permeabile di suolo, sovrapposto al substrato roccioso;  $V$  è l'altezza della zona satura, cioè il livello d'acqua presente nel serbatoio, che defluisce sotto l'azione gravitativa in direzione della line di massima pendenza.

Trascurando l'evapotraspirazione, per conoscere il contenuto d'acqua del terreno al termine della giornata, occorre eliminare la porzione defluita subsuperficialmente.

Il principale problema per individuare tale componente sta nel fatto che occorre trasformare il processo fisico di scorrimento, che rappresenta lo scarico continuo del serbatoio, in una quantità concentrata, da sottrarre in un preciso momento scelto a priori nel modello di simulazione. Supponendo di eliminare questo contributo nell'istante tra la fine della giornata considerata e l'inizio del giorno successivo, il volume effettivamente entrato nel serbatoio durante il primo giorno è pari a:

$$V'_{\text{int}(1)} = V_{\text{int}(1)} - (\text{defl.sub.})$$

Se il volume d'acqua inizialmente contenuto nel terreno è rappresentato da  $V_0$ , la parte defluita dal serbatoio durante il giorno (assumendo quindi  $\Delta t=1$ ) è:

$$(\text{defl.sub.}) = V_0 - V_0 \cdot e^{-\lambda} = V_0 \cdot (1 - e^{-\lambda})$$

in quanto si assume che lo scorrimento subsuperficiale intervenuto nell'intervallo temporale unitario sia dovuto al volume già contenuto nel serbatoio all'inizio del giorno stesso.

Si supponga ora di introdurre una nuova grandezza, detta *pioggia fittizia*, definita come quella quantità  $P'_1$  che soddisfa la relazione:

$$V'_{\text{int}(1)} = P'_1 - \frac{(P'_1 - cS)^2}{P'_1 + (1 - c)S}$$

$P'_1$  rappresenta in tal modo la quota parte di precipitazione che sarebbe dovuta cadere, durante la giornata, per far entrare nel serbatoio un volume pari a  $V'_{\text{int}(1)}$ .



In altre parole, se si utilizza la *pioggia fittizia*  $P_1'$  in luogo di  $P_1$ , è come se si considerasse il contributo in uscita, dovuto allo scorrimento subsuperficiale, direttamente all'interno della stessa pioggia incidente, che quindi risulta minore dell'effettiva precipitazione che ha sollecitato il versante.

$P_1'$  tiene quindi memoria dello stato del terreno, una volta deciso l'istante in cui togliere la quota parte in deflusso subsuperficiale, permettendo di considerare tutto il volume entrato nel serbatoio unicamente in funzione della differenza tra pioggia e ruscellamento, che risultano in tal modo quantità fittizie.

Il volume presente nel serbatoio al termine della giornata è:

$$V_1 = V_0 + P_1 - \frac{(P_1 - cS)^2}{P_1 + (1 - c)S} - V_0(1 - e^{-\lambda})$$

Il secondo giorno si utilizza un valore di pioggia cumulata dato da:

$$P_{c2} = P_1' + P_2$$

essendo  $P_2$  l'altezza giornaliera di pioggia caduta effettivamente.

Rispetto al giorno precedente, per ottenere il ruscellamento superficiale è quindi necessario effettuare la differenza:

$$\frac{(P_{2c} - cS)^2}{P_{2c} + (1 - c)S} - \frac{(P_1' - cS)^2}{P_1' + (1 - c)S}$$

poiché nel metodo SCS è richiesto un valore di precipitazione cumulata; le restanti quantità si calcolano in modo analogo al primo giorno.

Si può così eseguire una procedura iterativa sul numero di giorni di pioggia da considerare valutando, per ogni intervallo temporale unitario, il contenuto d'acqua nel suolo, il ruscellamento superficiale ed il deflusso subsuperficiale.

Quale verifica della procedura, al termine di ogni giornata (o, più genericamente, dell'intervallo di tempo adottato) deve essere soddisfatta l'equazione di continuità che, secondo il modello definito, deve essere:

$$\Sigma(\text{Volumi Entrati}) + \Sigma(\text{Volumi Usciti}) = \text{Volume Presente}$$

Riassumendo, il metodo proposto necessita quindi di due parametri: il CN (Curve Number) e la costante di svuotamento  $\lambda$ , che implicitamente contengono informazioni

quali la porosità, l'uso del suolo, la pendenza locale, le condizioni idrologiche del versante, ecc.

Il CN è disponibile e si ricava, come già evidenziato, da cartografia digitale su maglia di lato 225 m, mentre il valore di  $\lambda$  dovrebbe essere ricavato da indagini diffuse sul terreno di sito, oppure è stimabile da osservazioni sul comportamento dei singoli bacini idrografici correlate con le storie di pioggia incidenti. In realtà la scelta di  $\lambda$  non influenza il risultato qualitativo dell'analisi, pertanto in questa sede si ritiene opportuno assegnargli un valore rappresentativo, senza incorrere nella necessità di particolari e specifiche indagini.

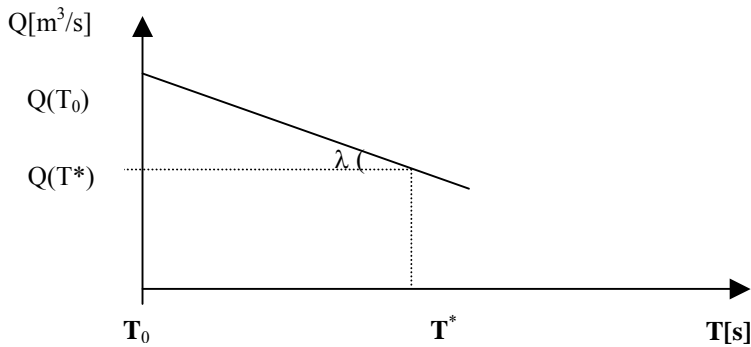
### **1.3.1 Indicazioni per la valutazione del parametro $\lambda$**

La corretta assegnazione del parametro  $\lambda$ , può essere perseguita mediante la conoscenza delle portate in alveo delle aste costituenti il reticolo idrografico complessivo del bacino in esame, al fine di caratterizzare il comportamento idrologico dei versanti incidenti sulle stesse. Tale operazione consente di fornire alla funzione di svuotamento del serbatoio lineare, una curvatura dipendente dalle complete caratteristiche fisiografiche del sito d'interesse.

Il modo più semplice di procedere, per sintetizzare il comportamento dei versanti in questi termini, è riferirsi ad una condizione media di bagnamento del suolo, in modo che la precipitazione determini un ruscellamento superficiale tale da alimentare, in funzione del tempo di risposta del pendio, la portata idrica dei rivi sottesi. Supponendo poi che non vi siano ulteriori eventi meteorici, è ragionevole assumere che la portata si esaurisca. In pratica il decremento avviene lentamente, a causa dell'apporto d'acqua dovuto al deflusso subsuperficiale dei versanti.

La valutazione della costante di svuotamento può essere quindi condotta utilizzando un misuratore di portata nel tratto terminale dei singoli rivi (immediatamente a monte delle confluenze con l'asta principale), che campioni ad intervalli temporali costanti, permettendo la costruzione di un diagramma da cui restituire il valore indicativo della curvatura della funzione di deflusso subsuperficiale.

In figura 6,  $Q(T_0)$  rappresenta la massima portata del rio, associata all'evento meteorico che l'ha generata, mentre  $Q(T^*)$  è il valore della portata in condizioni antecedenti alla precipitazione, depurata dal deflusso subsuperficiale.



**Figura 6. Variazione della portata di un rio nel tempo, in assenza di precipitazione meteorica.**

In pratica, un modo relativamente semplice per stimare l'ordine di grandezza di  $\lambda$ , è considerare che il logaritmo della curva di esaurimento sopra citata, nel tratto  $T^*-T_0$  segua una legge di decadimento lineare per cui, assegnati i valori di portata corrispondenti, si ottiene:

$$r = \frac{Q(T_0)}{Q(T^*)}$$

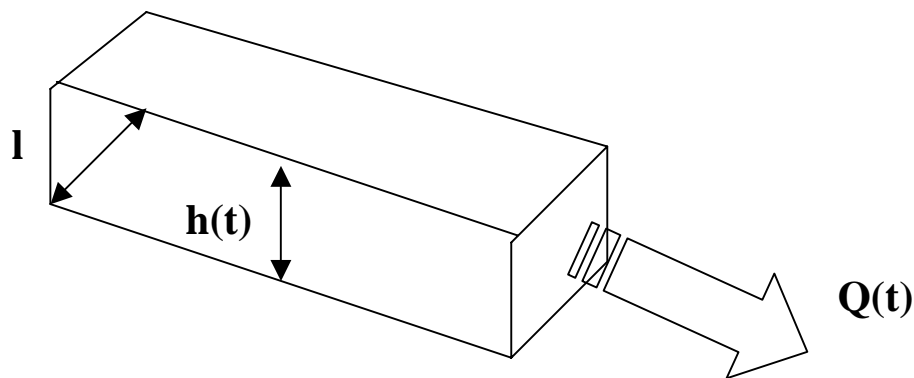
$$\ln(r) = \lambda \cdot (T^* - T_0)$$

$$\lambda = \frac{\ln(r)}{(T^* - T_0)} \left[ \frac{1}{T} \right]$$

Un secondo metodo di valutazione della costante di svuotamento di  $\lambda$  può essere individuato mediante la conducibilità idraulica satura  $K_s$ , caratteristica del terreno di sito, e dalla stima sulla densità di drenaggio  $L$ , quest'ultima variabile in un range pari a 50 ÷ 100 m nelle caso delle zone di interesse.

Si ricava quindi la portata d'acqua  $Q(t)$  che attraversa la sezione  $1 \cdot h(t)$  nel tempo  $t$ , utilizzando la velocità apparente definita dalla *legge di Darcy*  $v = K_s \cdot i$  (in cui  $i$  è la pendenza motrice, cioè l'acclività locale in esame), secondo la relazione:

$$Q(t) = 1 \cdot h(t) \cdot K_s \cdot i$$



**Figura 7. Portata d’acqua che attraversa, con velocità apparente  $v = K_s \cdot i$  (legge di Darcy), la sezione  $l \cdot h(t)$  nel tempo  $t$ ;  $i$  rappresenta la “pendenza motrice”.**

Ricordando inoltre che  $Q(t)$  rappresenta la variazione di volume del fluido nel tempo all’interno del volume di controllo considerato, si ottiene:

$$L \cdot \frac{d(h(T) \cdot l)}{dT} = h(T) \cdot l \cdot K_s \cdot i$$

integrando quindi l’espressione differenziale, con la condizione al contorno  $h(T_0 = 0) = h_0$ , si perviene alla stima del parametro  $\lambda$  definito come segue:

$$\lambda = \frac{K_s \cdot i}{L} \left[ \frac{1}{T} \right]$$

Si osserva che questo secondo modo di procedere pretende una conoscenza dettagliata del terreno, a causa della presenza di  $K_s$  di determinazione non immediata, se non a mezzo di prove di permeabilità eseguite in sito sia di tipo profondo (*Lefranc e/o Lugeon*) che superficiali con infiltrometri di superficie. Quindi, per soddisfare la necessità di eseguire analisi di stabilità su scala territoriale, quest’ultimo caso risulta meno idoneo rispetto al precedente, che se da un lato prevede accessi al sito per procedere a misure di portata, dall’altro tali indagini hanno modalità decisamente meno onerose, sia in termini economici sia in termini di tempo.

I valori della costante di svuotamento  $\lambda$ , comunque ottenuti, possono essere riorganizzati in una griglia sovrapponibile al reticolo idrografico del bacino di interesse, per poi estrapolare da questa una distribuzione di  $\lambda$  adatta alla scala di versante.

I valori di  $\lambda$  adottati per una applicazione del modello qui proposto (v. par. succ.) , sono stati stimati in un range tale che il tempo di dimezzamento è compreso tra i 3 ed i 5

giorni, valori accettabili per i pendii della Regione Liguria; in effetti, nel caso dei nostri bacini, il deflusso medio della risorsa idrica è circa il 60% dell'afflusso medio su scala temporale annuale, ovvero, la maggior parte delle precipitazioni defluisce velocemente alla chiusura (mare o torrente principale), caratterizzando il clima dell'intero territorio Regionale, come già detto, nel tipo *semiarido*.

### **APPLICAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO**

In forma sintetica ma rappresentativa, si riportano in figura 8 le evoluzioni delle quantità in *run-off*, *scorrimento subsuperficiale* e *contenuto d'acqua*, nel caso di un versante boscato (CN=60 - AMCII) ubicato nello squadro CTR n° 258070, prossimo al centro abitato di Badalucco, in provincia di Imperia.

La sollecitazione meteorica entrante, utilizzata in questa analisi, è stata fornita dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN), mediante la sequenza riepilogata in tabella 4, così come rilevato nel mese di Novembre 2000 dalla Stazione Pluviometrica di Imperia.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Imperia è la stazione più vicina al sito di interesse, che ha rilevato un valore di altezza di pioggia cumulata sulle 24 ore maggiore rispetto a quella di San Remo.

Novembre 2000	Altezza di pioggia [mm] (cumulata sulle 24 ore)
1	12,2
2	104,2
3	0
4	0
5	90
6	0
7	0,4
8	0,4
9	0
10	0
11	0
12	3
13	35,2
14	3,6
15	10
16	23,8
17	0
18	0
19	2,8
20	0,2
21	0
22	165,8
23	7,2
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0
Totale mensile [mm]	458,8

**Tabella 4. Dati pluviometrici del mese di novembre 2000: SIMN – stazione di Imperia.**

**A:**

**B:**

**Figura 8. Mese di novembre 2000. In A: precipitazione giornaliera (SIMN – Imperia), run-off e scorrimento subsuperficiale. In B: contenuto d’acqua nello strato subsuperficiale per la frana censita numero 1.**

Il modello idrologico appena descritto è di tipo lineare, distribuito e di carattere semi-empirico; per descrivere i fenomeni in gioco utilizzano relazioni fisiche connesse tra loro in modo decisamente semplice. L'approccio lineare è adottato in quanto, pur semplificando la modellazione, ben si presta a descrivere la realtà morfologica da analizzare; ha un carattere *distribuito* poiché ammette i dati in ingresso, relativamente alle precipitazioni agenti, e li tratta in una modalità spazialmente distribuita sul territorio da esaminare, fornendo risultati validi a livello locale estendibili ai singoli versanti analizzati.

Consente infine di effettuare simulazioni a scala di evento ed è versatile, poiché può essere adattato all'analisi di storie temporali diverse (da scala oraria a giornaliera o settimanale), a seconda delle frequenze pluviometriche disponibili.

## **2. MODELLI GEOTECNICI**

È anzitutto d'obbligo distinguere a priori le situazioni di versanti con coperture detritiche, cioè in materiali "sciolti", da quelle riguardanti i fronti esposti in formazioni rocciose (crolli): infatti, pur adottando in entrambi i casi il concetto generale dell'equilibrio limite, i relativi approcci metodologici sono sostanzialmente diversi.

Inoltre, nel caso delle coperture detritiche, vanno ancora distinte le situazioni nel cosiddetto "stato naturale" da quelle sistemate a "fasce terrazzate", cioè laddove è evidente l'influenza sulla stabilità globale delle opere di sostegno con cui i pendii sono stati da tempo antropizzati.

### **VERSANTI TERRAZZATI**

Lo studio della stabilità delle zone sistemate antropicamente è stato affrontato trattando i diffusi "muri a secco" quali opere di sostegno a comportamento rigido, su cui va a spingere un cuneo di terreno approssimabile, in sezione, ad un'area triangolare.

La loro reazione alla spinta è gravitativa, in quanto la stabilità della sistemazione "a fasce" è garantita dal peso proprio del muro stesso; la quantità e la distribuzione delle azioni che il terreno esercita sull'opera, sono legate all'entità ed al tipo di movimento che essa manifesta, pertanto la determinazione di tali azioni richiederebbe, a rigore, l'analisi dell'interazione terreno-struttura.



### 2.1.1 Analisi delle spinte agenti

La spinta totale che riceve l'elemento di sostegno è dovuta a diversi contributi quali:

- spinta del terreno ( $P_t$ );
- presenza di acqua a tergo ( $P_w$ );
- eventuale presenza di sovraccarichi a monte ( $q$ );
- eventuali azioni sismiche ( $P_{pga}$ ).

#### **Figura 9. Spinte sull'opera di sostegno.**

Nel caso in cui l'angolo d'inclinazione del pendio (considerando l'andamento del substrato in posto correlato alla generale acclività di versante) risulti minore dell'angolo di attrito interno del terreno, non è più possibile applicare questo metodo; risulta necessario introdurre l'analisi all'equilibrio limite, ipotizzando una superficie di rottura avente un certo angolo di inclinazione. In tal caso la spinta del terreno sul muro ed il sovraccarico sono dati in funzione del coefficiente di spinta attiva ( $K_a$ ), valutato secondo Rankine.

L'analisi di resistenza del muro è eseguita in tre distinte sezioni: alla base del muro, ad un terzo e a due terzi della sua altezza. Le sezioni sono sollecitate dal momento flettente dovuto alle spinte e dalla forza normale, questa dovuta al peso proprio dell'opera di sostegno: la risultante di tali azioni è eccentrica rispetto al baricentro della sezione presa in esame.

### **Figura 10. Geometria dell'opera di sostegno.**

Il calcolo è svolto applicando la sovrapposizione degli effetti; in particolare si determina l'eccentricità della risultante delle azioni verticali, per verificare se la stessa ricade o meno all'interno del *nocciolo centrale d'inerzia*.

La presenza d'acqua nel terreno aumenta il momento ribaltante, con variazioni legate alla profondità di infiltrazione. Anche in questo caso è necessario distinguere la sezione soggetta a verifica, poiché anche il braccio della spinta idraulica può variare.

#### **2.1.2 Condizioni di danneggiamento delle opere di sostegno**

Si possono considerare i seguenti effetti di degrado e/o danneggiamento:

- a.** muro scalzato in sommità;
- b.** muro fuori assetto;
- c.** mancanza di elementi lapidei dal paramento;
- d.** sovraccarico a monte;
- e.** sovrapposizione di diversi casi.

Nel caso **a**, la mancanza di alcuni elementi lapidei nella parte sommitale crea una riduzione del peso proprio, che provoca un minor effetto stabilizzante nei confronti della fascia che il muretto deve sostenere; il valore del peso di elementi murari scalzati in sommità, è approssimato considerando la semplice geometria dovuta ad una mancanza di forma triangolare, vista in prospetto, come emerge dalle osservazioni in sito, di cui la figura 11 è un classico esempio.

### Figura 11. Muro scalzato in sommità.

Il peso proprio del muro “ridotto” vale quindi:

$$W_{foro} = \frac{1}{2} \cdot S_2 \cdot l_f \cdot h_f \cdot \gamma_m \cdot c$$

con una eccentricità della risultante delle azioni pari a:

$$e_{foro} = \frac{M_{P_{tot}} - \bar{M} + M_W}{W_{tot} - W_{foro}}$$

ove  $l_f$  rappresenta la larghezza in sommità della zona scalzata ed  $h_f$  la sua altezza totale;  $c$  è invece un fattore per poter tenere in considerazione il fatto che non tutti gli elementi lapidei costituenti un singolo strato possano essere scalzati, supponendo in tal caso che una parte rimanga “inglobata” nel terreno retrostante.

Nel caso **b** si considera di studiare la resistenza del muro a secco soggetto ad un danneggiamento da deformazione, volgarmente detto “spanciamento”, fenomeno relativamente diffuso.

L’analisi di resistenza in tal caso viene fatta approssimando la deformata con due linee rette, che si intersecano ad un terzo dell’altezza dell’opera secondo lo schema di figura 10; il valore della deformata in quel punto rappresenta lo scostamento del paramento dalla sua posizione originaria, e viene detta *eccentricità di fuori assetto* o *braccio dello spanciamento*.

**Figura 12. Schema di muro fuori assetto.**

Il peso proprio degli elementi murari spostati vale:

$$W_{spanciamento} = \frac{1}{2} \cdot l_m \cdot b_{spanciamento} \cdot \gamma_m$$

mentre il momento dovuto a tale spostamento è:

$$M_{spanciamento} = W_{spanciamento} \cdot d$$

Il valore dell'eccentricità della risultante delle azioni è:

$$e_{spanciamento} = \frac{M_{spanciamento} - \bar{M}_\gamma + M_{P_{tot}}}{W_{tot}}$$

che, in presenza di acqua, va invece valutata secondo la relazione:

$$e_{spanciamento} = \frac{M_{spanciamento} - \bar{M}_\gamma + M_{P_{tot}} + M_{W\gamma}}{W_{tot}}$$

Nel caso c si intende invece schematizzare la frequente situazione in cui vi sono opere che presentano la mancanza di alcuni elementi lapidei, a diverse altezze; la riduzione in peso del muro viene calcolata, per semplificare la valutazione delle pietre mancanti, assumendo a titolo di riferimento una porzione di prospetto unitaria e costituita da un certo numero di “celle”, all'interno delle quali possono ricadere uno o più di elementi lapidei. Il peso degli elementi mancanti vale:

$$W_{ridotto} = 0.8 \cdot \gamma_m \cdot h_c \cdot l_c \cdot (n_\alpha \cdot c_\alpha \cdot S_\alpha + n_\beta \cdot c_\beta \cdot S_\beta + n_\gamma \cdot c_\gamma \cdot S_\gamma)$$

ed il valore dell'eccentricità della risultante delle azioni è:

$$e_{\gamma} = \frac{M_{P_{tot}} - \bar{M}}{W_{tot} - W_{ridotto}}$$

**Figura 13. Mancanza di elementi lapidei dal paramento murario.**

ove:  $n_{\alpha}$  -  $n_{\beta}$  -  $n_{\gamma}$  sono il numero delle “celle” mancanti nei rispettivi strati,  $c_{\alpha}$  -  $c_{\beta}$  -  $c_{\gamma}$  coefficienti moltiplicativi dei diversi strati che valgono, rispettivamente, 1 - 1.1 - 1.2 considerando una riduzione all'80% per ogni strato poiché, come precedentemente detto, una porzione di elementi lapidei quasi sempre rimane “intestata” nel riempimento a tergo.

La presenza di un sovraccarico verticale, agente sul piano di fascia a monte, provoca un incremento di forza spingente che deve essere sopportato dall'opera di sostegno. Molto spesso il crollo di una singola porzione di fascia produce un fenomeno di collasso progressivo, coinvolgendo la sistemazione sottostante, anche se in buone condizioni.

Per analizzare il comportamento del muro a secco soggetto ad un sovraccarico, nel caso **d** si considera di aggiungere, alle azioni che esso deve normalmente sostenere, una porzione dell'opera di sostegno soprastante assieme ad una parte del terreno costituente la fascia superiore (entrambe in termini di peso); in tal caso è opportuno assegnare in termini percentuali la distinzione tra i due diversi pesi, che vanno distribuiti sul piano di fascia spingente. L'entità di tale sovraccarico viene quindi valutata pari a:

$$q = (W_T \cdot A) + (W_{tot} \cdot B)$$

la cui spinta vale:

$$P_q = (W_T + q) \cdot tg(\theta - \phi)$$

con eccentricità definita da:

$$e_{\gamma} = \frac{M_q - \bar{M} + M_w}{W_{tot}}$$

Nel caso e si considera infine che possano sussistere, ad esempio, la mancanza di elementi lapidei ed il paramento fuori assetto. Lo spunto, per l'introduzione della combinazione di danneggiamenti, deriva sempre da evidenze di sito e dal fatto che la presenza di un corpo murario molto danneggiato estende le sue problematiche anche a zone limitrofe.

In tali condizioni la verifica di resistenza è svolta considerando la sovrapposizione dei singoli effetti.

## 2.2 VERSANTI NON TERRAZZATI

Sebbene esistano metodi molto più accurati si è ritenuto, data la natura del presente studio orientato alla grande scala, fosse soddisfacente il metodo proposto da Skempton & De Lory (1957), che prevede l'analisi delle condizioni di equilibrio di un pendio indefinitamente esteso, inclinato di un angolo  $q$  rispetto all'orizzontale, avente potenziale piano di scivolamento parallelo all'assetto morfologico in superficie del pendio stesso; si suppone inoltre che il pendio sia interessato da un moto di filtrazione parallelo alla linea di massima pendenza.

L'adozione di questo metodo d'analisi nello studio dei fenomeni traslazionali superficiali, peraltro tipico nella letteratura dedicata a questo argomento, appare giustificata dalla natura delle tipologie di dissesto riscontrate in sito.

La superficie di rottura, che spesso è identificata da una zona di discontinuità, è ipotizzata piana, posta ad una certa profondità dal piano di campagna e con andamento parallelo al pendio.

Nell'ipotesi di moto di filtrazione parallelo al pendio e nel caso in cui la falda sia ad un'altezza  $mz$  al di sopra dell'ipotetico piano di scorrimento, in presenza di terreno coesivo con resistenza al taglio definita in termini efficaci a mezzo di  $c'$  e  $\varphi'$ , il coefficiente di sicurezza è fornito dalla relazione:

$$F = \frac{c' + z \cdot \cos^2 \theta (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \operatorname{sen} \theta}$$

**Figura 14. Schema di pendio non terrazzato (indefinito)**

### 2.3 APPLICAZIONE SUI VERSANTI IN TERRENI SCIOLTI

Il metodo combinato idrologico-geotecnico sopra descritto, è stato applicato allo studio della franosità nel territorio della Provincia di Imperia, più in particolare nella porzione N-W dello squadro Taggia; si è potuta inoltre cogliere l'opportunità di procedere ad analisi in retrospettiva (*back-analyses*), in base alle informazioni raccolte sul gran numero di eventi franosi occorsi nel mese di novembre 2000.

Diversi sopralluoghi, svolti in tempi successivi, hanno consentito l'acquisizione di dati inerenti la geometria e i danneggiamenti ascrivibili alle zone terrazzate, all'uso del suolo, alla presenza di singolarità territoriali ed antropiche, che hanno permesso di spiegare e di migliorare il modello ancora in fase di studio.

Si è eseguito il riconoscimento delle potenze di coltre per fotointerpretazione dell'area in esame, integrando tale attività con puntuali riscontri in sito; riguardo alla caratterizzazione fisico-meccanica, si sono utilizzate indicazioni di letteratura (Gray, 1978 - Carter & Bentley, 1991), correlazioni empiriche basate sulle distribuzioni granulometriche (Koerner, 1970 - Bolton, 1986) e, ove possibile, i risultati di prove di taglio diretto eseguite su campioni ricostituiti (Turner, 1996).

L'analisi effettuata ha evidenziato la necessità di ipotizzare due differenti tipologie di pericolosità: di base e previsionale. La prima definisce la suscettività intrinseca del territorio al dissesto, funzione delle caratteristiche in esso presenti quali: paleofrane, nicchie di distacco e zone a ruscellamento marcato, ricavabili dall'osservazione di carte

geomorfologiche e dall'interpretazione di foto aeree: il risultato ottenuto e esposto in figura 15.

**Figura 15. Pericolosità di base dei versanti, nella porzione di territorio analizzata.**

La pericolosità previsionale stima invece la tendenza al dissesto di versante in relazione alle condizioni d'uso (zona terrazzata e non), di degrado e di bagnamento del suolo, tale valutazione è quindi strettamente correlata alla previsione di precipitazione meteorica nella finestra temporale scelta.

L'implementazione del modello su G.I.S., ha consentito di simulare, a mezzo dei relativi codici di calcolo, uno scenario di pericolosità *virtualmente* previsionale legato alle evoluzioni delle precipitazioni meteoriche (tra cui l'evento del 23 novembre 2000) già viste in tabella 4. Il risultato è sinteticamente esposto nella successiva figura 16.

Da riscontri sulla franosità reale emerge che la capacità previsionale ha una rispondenza al 70%, mentre la restante quota del 30% è conservativa (cioè in sovrastima).

Si evidenzia il fatto che se, a valle di un'analisi di scenario, un versante o un fronte manifesta condizioni di instabilità, ciò non implica una modifica della sua pericolosità di base, ma indica l'innescò di un probabile cinematismo a causa delle evoluzioni ambientali ipotizzate.



**Figura 16. Pericolosità previsionale sull'area esaminata, per effetto della storia pluviometrica descritta in tabella 4: in verde le zone a pericolosità bassa o nulla, in giallo quelle in condizione intermedia ed in rosa elevate.**

#### **2.4 FRONTI IN AMMASSI ROCCIOSI**

Lo studio dei versanti in roccia è usualmente condotto utilizzando il metodo all'equilibrio limite, più in particolare si procede all'analisi di stabilità su singoli blocchi lapidei. Per ogni blocco di roccia prospiciente il fronte si valuta il possibile cinematismo di scorrimento, l'analisi qui proposta è quindi relativa unicamente ai moti di traslazione. Forma, geometria e dimensioni dei blocchi sono ricavate dallo sviluppo di un procedimento che combina i piani di discontinuità con il fronte del pendio e con una eventuale superficie a monte della cresta (Hoek & Bray, 1981). Viene verificato il possibile innesco di cinematismo, senza analizzare moto e traiettoria successivi. Le principali ipotesi del metodo dell'equilibrio limite sono le seguenti:

- la rottura avviene per scivolamento su una superficie semplice, o composta, nota;
- la massa scivolante è costituita da uno o più blocchi, assunti rigidi, che possono spostarsi senza deformarsi e subire rotture interne.

Facendo riferimento alla figura 17, si considera il blocco soggetto alle seguenti azioni:

- peso proprio  $W$ , la cui componente  $W \cdot \sin\alpha$  tende a innescare lo scorrimento, mentre quella normale alla superficie di contatto va essere considerata in termini di sforzi efficaci:  $\sigma' = (W \cdot \cos\alpha - U) / A$

- eventuale presenza delle spinte idrauliche:  $V$  a monte del blocco ed  $U$  lungo la superficie di scorrimento (sottospinta).

Anche la forza  $V$  viene scomposta nelle direzioni parallela e normale alla superficie di scivolamento ottenendo, rispettivamente, le azioni  $T_p$  e  $T_N$ .

Si osserva che nel caso semplice, ma a tal riguardo particolare, di figura 17 si ha  $T_p = V$  e  $T_N = 0$ .

### **Figura 17. Sistema di forze in gioco nell'equilibrio di un generico blocco**

Se si esprime la resistenza al taglio lungo la superficie di contatto mediante il criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan \varphi$$

nel caso del blocco assume la forma:

$$\tau = c + W \cdot \cos \alpha / A \cdot \tan \varphi$$

da cui, in termini efficaci, il vettore risultante è infine:

$$R = cA + (W \cos \alpha - U) \tan \varphi$$

Il fattore di sicurezza alla condizione di equilibrio limite è, come d'uso, definito dal rapporto tra la resistenza a taglio massima mobilitabile e quella effettivamente spingente, che tende ad indurre lo scorrimento. Con riferimento a quanto sopra detto, il fattore di sicurezza  $F$  è quindi pari a:

$$F = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \alpha - U) \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \alpha + V}$$

e viene assunto costante lungo tutta la potenziale superficie di scorrimento in esame.

### 2.4.1 Implementazione su GIS

L'analisi è orientata alla verifica di stabilità, a scorrimento, sui diedri in roccia (*wedge analysis*) che si possono presentare nell'ammasso roccioso in esame; è stata implementata in un GIS (MapInfo<sup>®</sup>) sviluppando un'opportuna procedura di calcolo nello specifico linguaggio di programmazione (MapBasic<sup>®</sup>).

I blocchi, in base al numero di piani da cui risultano formati, possono essere tetraedri (4 piani) oppure pentaedri (5 piani) irregolari; vengono individuati fissando dapprima giacitura ed orientamento sia del fronte che dell'eventuale superficie a monte della cresta, poi combinando spazialmente i piani di discontinuità (sedimentazione, giaciture, contatti, fratture): tali dati debbono provenire da rilievi morfologici e geostrutturali operati in sito e, opportunamente *georeferenziati* nel database del GIS, permettono di procedere all'analisi. In figura 18 è rappresentata, a titolo d'esempio, una delle 24 tipologie possibili.

Le geometrie di blocchi indagate, sono quelle che prevedono uno o due piani lungo i quali può avvenire scorrimento verso l'esterno del fronte; è inoltre rilevante il caso della presenza di un eventuale terzo piano, ove si possa innescare rottura per pura trazione (*tension crack*).

**Figura 18. Tipologia di cuneo n° 3: in rosso il fronte del versante, in viola la superficie di monte, in verde i piani di scorrimento; il tratteggio indica la traccia del *Tension Crack***

Per l'utilizzo della procedura di calcolo occorre disporre della cartografia relativa all'area da analizzare in forma digitale (*raster*), dei dati relativi alle caratteristiche geotecniche degli ammassi rocciosi e degli eventuali materiali di riempimento dei giunti, del rilievo geostrutturale dei sistemi di discontinuità (angoli e direzioni di immersione) e dell'assetto morfologico dei fronti in esame.

Il rilievo in sito deve procedere per *punti-stazione*; ognuno di essi diviene rappresentativo per un certo areale, se questo è giudicato sufficientemente uniforme rispetto a tre aspetti fondamentali: giacitura e orientamento del fronte, stratigrafia ed assetto strutturale della formazione rocciosa e, naturalmente, del litotipo. Inoltre per l'areale relativo ad un certo punto-stazione l'altezza in cresta, da rilevare puntualmente (ad esempio con *distanziometri laser* a riflessione diretta), deve essere approssimativamente costante. Il rilievo secondo punti-stazione è indispensabile per procedere ad analisi i cui risultati abbiano una discreta affidabilità. Il livello di definizione necessario e praticamente attuabile in sede di rilevamento, permette di condurre analisi ad estensione *microterritoriale*.

Se in elaborazione risulta che uno dei blocchi appartenenti ad un dato punto-stazione ha coefficiente di sicurezza minore del minimo imposto, al simbolo che individua il punto stazione georeferenziato (▼) viene assegnato il colore rosso; in caso contrario, il blocco è stabile ed al simbolo viene assegnato il verde.

## **2.5 APPLICAZIONE SU FRONTI IN ROCCIA**

I fronti in roccia, esaminati per verificare la rispondenza del modello sopra descritto, sono quelli di Val Roia fronteggianti lo sviluppo della Strada Statale n° 20 “*Colle di Tenda*”, a partire dal km. 133.8 (Confine di Stato), fino al km 148.0 (località Roverino). L'analisi è stata eseguita, a scala microterritoriale, sul rischio da crolli in sede stradale e condotta secondo 20 diversi *scenari*; distintamente, in ciascuno di questi si è ipotizzata una crescita del carico piezometrico presente nei sistemi di discontinuità, passando dallo stato secco (0%) a quello saturo (100%) a intervalli costanti (5%), per simulare azioni meteoriche sempre più gravose.

Sono stati rilevati 43 punti-stazione, come visibile in figura 19.

**Figura 19. Posizione dei 43 punti-stazione, esaminati lungo la SS20 del Col di Tenda**

I risultati ottenuti sono riportati nella sintesi di figura 20, in forma di un'istogramma che mostra la progressiva chilometrica dei punti-stazione con la percentuale di carico idraulico che eventualmente ha innescato, secondo il modello di elaborazione proposto, fenomeni di crollo.

Dal grafico emerge che, nello stato secco, tutte le posizioni risultano stabili mentre, per un carico idraulico del 50% si hanno 9 punti-stazione instabili che, in condizioni di saturazione completa, salgono a 23.

**Figura 20. Riepilogo dell'analisi di scenario, dal punto di vista del carico idraulico presente nei giunti, sui 43 punti-stazione disposti lungo la SS20 del *Col di Tenda*.**

In figura 21 è riportato, emblematicamente, a sinistra il risultato in uscita dalla elaborazione in ambiente GIS sul tratto più a Nord della SS20, indicante fenomeni di crollo in prossimità al bivio per Olivetta San Michele: l'effettiva realtà del rischio è stata poi riscontrata in sito, come visibile nella fotografia a destra.

**Figura 21. Il rischio da crollo di blocchi lapidei in corrispondenza del bivio per Olivetta San Michele: in A come previsto dal metodo di analisi, in B la realtà di sito.**

Concludendo, anche nel caso della metodologia adottata per i crolli da fronti in roccia si può riferire in merito ad una significativa rispondenza delle analisi condotte rispetto alla realtà di sito, come riscontrato dalle evidenze sopra citate e dai “dati storici” a mani del Sovrintendente di Zona dell'ANAS.

### **3. CONCLUSIONI**

Le metodologie implementate, per affrontare la valutazione della vulnerabilità fisica da frane e da crolli per scivolamento in ammassi rocciosi, sono conformi alla disposizione legislativa 267/1998 (ex D.L. 180); le tecniche descritte promuovono una fase conoscitiva del territorio d'interesse, adottando parametri in grado di riassumere informazioni distribuite sul territorio, di determinazione non onerosa sia in termini economici sia tecnico–scientifici, significative alla scala dei fenomeni da cogliere; i metodi inoltre si raccordano al meglio con i contenuti della Legge 183/1989 sulla difesa del suolo, poiché sviluppatati sovrapponendo tematismi conformi alle Raccomandazioni Regionali (n° 4/1996 - Modulo C: “*problematiche e criticità di bacino nella valutazione della pericolosità*”), quali:

- acclività;
- litologia;
- geomorfologia;
- idrogeologia;
- uso del suolo.

L'utilizzo del G.I.S., oltre alle sue ben note caratteristiche associate alla georeferenziazione di dati distribuiti sul territorio, consente di simulare scenari a mezzo di opportuni motori di calcolo, ciascuno relativo a diversa causa di innesco della franosità (d'interesse in ambito del *Progetto GE.RI.A.* sono risultate le azioni sismiche e quelle idro-meteoriche).

Ciò implica la diversificazione dei necessari dati in ingresso in:

- **dati di base:** acclività locale e CN (in forma digitale, organizzati secondo una griglia con maglia idonea a condurre analisi di stabilità sulla scala di versante), evapotraspirazione e  $\lambda$  (costante di svuotamento) ed altri parametri per caratterizzare stato e uso del suolo; rilievi e identificazioni di parametri geomeccanici e geostrutturali, con riferimento ai fronti in ammassi rocciosi;
- **dati di scenario:** PGA (Peak Ground Acceleration - accelerazione attesa al suolo da eventi sismici) e rilievo sistematico, diffuso sul territorio, di dati pluviometrici.

Ulteriori vantaggi, connessi all'implementazione in un G.I.S. di modellazioni del tipo di quelle descritte nel presente *Dossier*, si possono anche riconoscere nella gestione delle risorse in ambito di Protezione Civile, grazie alla capacità di individuare i siti potenzialmente a rischio nelle aree esaminate, con una conseguente ottimizzazione nella programmazione degli interventi, ovviamente orientati alla salvaguardia di vite umane e delle attività economiche dislocate sul territorio.

Oltre le motivazioni appena esposte, è infine di rilevante importanza identificare i potenziali agenti di dissesto, per iscrivere le zone a rischio d'instabilità a livelli di pericolosità distinti e selettivi: un'area ricadente in classe P1 per effetto di scuotimento sismico potrebbe, ad esempio, ottenere una designazione in P4, nel caso di particolari eventi meteorici.

#### 4. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano anzitutto i Colleghi Paolo La Barbera e Paolo Bartolini del Dipartimento di Ingegneria Ambientale (DIAM) dell'Università di Genova, per il loro validissimo e fondamentale contributo nel campo della modellazione idraulico-idrologica.

Un ringraziamento va anche agli (allora) Allievi Ingegneri: Emanuele Alberoni, Monica Peirano, Roberto Pisano, Andrea Serpetti e Salvatore Varano, poiché hanno tutti dedicato notevole dedizione e sincero interesse ai vari argomenti esposti in sintesi dal sottoscritto nel presente *Dossier Tematico*, spingendo l'impegno ben oltre i limiti normalmente richiesti allo sviluppo delle loro singole Tesi di Laurea.

#### 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Skempton, A.W. e F.A. De Lory (1957), "Stability of natural slopes in London Clay", in: *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.*, vol. 2, pp. 378-381
- Soil Conservation Service (1972), "Hydrology", in: *National Engineering Handbook* - section 4, U.S. Dept. Of Agriculture, available from U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Soil Conservation Service (1975), "Urban hydrology for small watersheds", Tech. Rel. No. 55, U.S. Dept. Of Agriculture, Washington, D.C.
- Mancini, R. e R. Rosso (1989), "Using GIS to assess spatial variability of SCS Curve Number at the basin scale", in: *New Directions for Surface Water Modelling*, ed. by M.L. Kavvas, IAHS Publ. No. 181, pp. 435-444
- Brath, A., P. La Barbera, M. Mancini e R. Rosso (1989), "Analysis of scale effects in distributed rainfall-runoff modelling", in: *Modelling and Simulation*, ed. by W.G. Vogt & M.H. Mickle, Vol. 20 - part 4, pp. 1521-1526
- Hoek, E. e J. Bray, (1981), "Rock Slope Engineering", *The Institution of Mining and Metallurgy*, London
- Gray, D.H. (1978), "Role of woody vegetation in reinforcing soil and stabilizing slopes", in: *Proc. Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques*, Sydney, pp. 253-306
- Turner, A.K. (1996), "Colluvium and talus", in: *Landslides investigation and mitigation*, ed. by A.K. Turner & R.L. Schuster, Nat. Academy Press, Washington, D.C., pp. 525-554
- Carter, M. e S.P. Bentley (1991), "Correlation of soil properties", *PenTech Press Ltd.*, Londra
- Bolton, M.D. (1986), "The strength and dilatancy of sands", *Géotechnique*, Vol. 36 – No. 1, pp. 65-78
- Koerner, R.M. (1970), "Effect of particle characteristics on soil strength", *Journ. of the Soil Mech. & Foundation Div.*, ASCE, Vol. 96 – no: SM4, July, pp. 1221-1234