Technical Reports

CENTRO EURO-MEDITERRANEO
PER I CAMBIAMENTI CLIMATICI

**ISC - Divisione Impatti sul Suolo e sulle Coste**

# AMRA - CODICI DI CALCOLO PER LA MODELLAZIONE DEI PROCESSI DI INFILTRAZIONE NEL SOTTOSUOLO E L'ANALISI DEGLI EFFETTI AL SUOLO

**Luciano Picarelli**
*Seconda Università di Napoli - Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Ingegneria Civile*

**Filippo Vinale**
*Università di Napoli Federico II - Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Ingegneria Geotecnica*

**Centro Euro-Mediterraneo**
**per i Cambiamenti Climatici**
**www.cmcc.it**

**Luglio 2007 ■ TR9**

# CODICI DI CALCOLO PER LA MODELLAZIONE DEI PROCESSI DI INFILTRAZIONE NEL SOTTOSUOLO E L'ANALISI DEGLI EFFETTI AL SUOLO

**Sommario**
L'attività in oggetto è stata incentrata sullo studio degli strumenti teorici idonei per la previsione degli effetti al suolo associabili alle condizioni meteorologiche. Attraverso i codici di calcolo studiati e messi a punto è possibile affrontare una vastissima gamma di problemi di stabilità dei pendii riconducibili alle condizioni meteorologiche. I tre codici studiati (ABAQUS, VADOSE e TRIGRS), opportunamente utilizzati anche attraverso delle routine di calcolo sviluppate nell'ambito del progetto, consentono di assumere l'evoluzione delle condizioni meteorologiche come evoluzione di condizioni al contorno di un problema idraulico, e di determinare grandezze fisiche significative per la valutazione degli effetti al suolo.
Tali effetti possono essere studiati in sequenza, dapprima con VADOSE, per ottenere una risposta in termini di flusso evapotraspirativo, e, di seguito, con ABAQUS, introducendo tale flusso come condizione al contorno
ABAQUS e VADOSE permettono una valutazione, ad una scala dettagliata, degli effetti connessi ai fenomeni meteorologici. Per poter individuare all'interno di un territorio di grande estensione i versanti critici su cui eseguire tali analisi di tipo puntuale, si ritiene necessario l'impiego integrato di codici, come TRIGRS, che eseguano analisi di tipo areale.
Nel rapporto si illustrano i principali risultati dell'attività finora svolta, sulla base della quale vengono fornite idonee indicazioni per il proseguo della ricerca.

**Keywords:** analisi effetti al suolo, infiltrazione, modellazione sottosuolo.

*Address for correspondence*:
Luciano Picarelli
Seconda Università di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Civile
via Roma, 29
81031 Aversa (CE), Italy.
E-mail: picarell@unina.it

Filippo Vinale
Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Geotecnica
Via Claudio, 21
80125 Napoli, Italy.
E-mail: vinale@unina.it

## INDICE

**1 Introduzione ..... 2**

**2 Il codice ABAQUS ..... 2**

Aspetti generali del codice e teoria implementata ..... 2

Esempi applicativi ..... 12

*2.2.1 Pendio in presenza di lama d'acqua superficiale* ..... 12

*2.2.2 Pendio in presenza di lama d'acqua superficiale* ..... 17

**3 Il codice VADOSE ..... 22**

Aspetti generali del codice e teoria implementata ..... 22

Un esempio applicativo ..... 28

**4 Il codice TRIGRS ..... 36**

Aspetti teorici ..... 37

4*.1.1 Infiltrazione* ..... 37

*4.1.2 Runoff* ..... 47

*4.1.3 Analisi di stabilità* ..... 48

Aspetti operativi ..... 49

Esempio applicativo ..... 52

*4.3.1 Stesura del file topoindex.ini* ..... 52

*4.3.2 Stesura del file trigrs.ini* ..... 59

*4.3.3 Risultati* ..... 65

Limiti ..... 66

**5 Conclusioni ..... 67**

**6 Riferimenti bibliografici ..... 69**

# 1 Introduzione

L'attività in oggetto è stata incentrata sullo studio degli strumenti teorici idonei per la previsione degli effetti al suolo associabili alle condizioni meteorologiche. I codici studiati, opportunamente utilizzati anche attraverso delle routine di calcolo sviluppate nell'ambito del progetto, consentono di assumere l'evoluzione delle condizioni meteorologiche come evoluzione di condizioni al contorno di un problema idraulico o accoppiato, e di determinare grandezze fisiche significative per la valutazione degli effetti al suolo. La ricerca è stata incentrata su approcci di tipo deterministico: in relazione ad essi sono stati studiati i modelli più significativi e utili per le finalità del progetto. Lo studio ha preliminarmente considerato i più noti codici di calcolo commerciali sviluppati nell'ambito del settore geotecnico. Tra essi tre in particolare sono apparsi dotati delle caratteristiche congruenti con gli scopi della ricerca.

Nel seguito, per ciascuno dei tre codici, verranno illustrati nell'ordine: la teoria implementata (equazioni reggenti), le caratteristiche essenziali del codice, uno o più esempi applicativi, presentando alcune previsioni dimostrative esplicative delle sue potenzialità. Nelle conclusioni verrà infine indicato in che misura ciascuno degli strumenti descritti si prevede venga impiegato nello sviluppo futuro del progetto.

# 2 Il codice ABAQUS

Aspetti generali del codice e teoria implementata

ABAQUS è un codice commerciale *general purpose* che implementa diverse modellazioni fisico-matematiche. In relazione agli scopi della ricerca esso possiede due caratteristiche essenziali:

a) consente di risolvere sia un problema di filtrazione di un fluido nello scheletro solido, sia un problema di deformazioni dello scheletro solido; consente altresì di "accoppiare" i due aspetti teorici consentendo di modellare problemi nei quali ciascuno di essi influenza l'altro

b) rispetto alla modellazione del problema della filtrazione presenta significativi elementi di flessibilità in quanto attraverso di esso è possibile definire condizioni al contorno di tipo idraulico del tutto generali, diverse da quelle tradizionali (flusso

imposto, pressione interstiziale imposta) scrivendo una subroutine che viene compilata insieme al resto del programma

Per ciò che concerne l'aspetto a) si ricorda come il carattere transitorio di un flusso all'interno del mezzo poroso terreno può dipendere sia da variazioni della porosità (fenomeno di consolidazione), sia da variazioni del grado di saturazione (processo di saturazione-desaturazione). Meno frequenti sono i casi in cui la transitorietà è associabile a variazioni di densità del fluido. Il flusso e le variazione temporali di porosità, grado di saturazione, densità devono avvenire, punto per punto, nel rispetto della legge di conservazione della massa. In ABAQUS tale legge è implementata nella forma abbastanza generale che modella ciascuno dei tre fattori:

$$-\rho_w \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial(\rho_w S_r n)}{\partial t} \qquad (2.1a)$$

$S_r$ = *grado di saturazione*

$v_i$ = *vettore delle velocità della fase liquida*

$n$ = *porosità*

$\rho_w$ = *densità della fase liquida*

Per la quasi totalità dei terreni è possibile assumere che il moto dell'acqua sia di tipo laminare e che quindi tra la velocità di flusso e il gradiente idraulico sia possibile assumere il legame lineare postulato da Darcy. In ABAQUS tale legame assume la forma generale:

$$v_i = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \qquad (2.1b)$$

$k_{ij}$ = *matrice di permeabilità*

$h = z + \frac{u_w}{\gamma_w}$ = *quota piezometrica*

$u_w$ = *pressione della fase liquida*

$z$ = *quota geometrica*

attraverso la quale è possibile modellare processi di filtrazione in mezzi anisotropi sotto il profilo della permeabilità.

La (1a) e la (1b) sono insufficienti a rendere il problema determinato.

La possibilità che siano contemplate variazioni del grado di saturazione $\frac{\partial(S_r)}{\partial t}$ richiede l'aggiunta di un legame funzionale fra grado di saturazione stesso e la pressione della fase liquida, del tipo:

$$S_r = f(u_w) \qquad (2.1c)$$

La (1c) è nota in letteratura come equazione della curva caratteristica o della curva di ritenzione. In ABAQUS tale relazione può essere definita per punti. E' possibile modellare anche l'isteresi idraulica, ovvero considerare la (1c) in un processo di saturazione diversa da quella in un processo di desaturazione, congruentemente con quanto si osserva nella realtà. E' possibile anche definire il criterio di passaggio dalla legge che regola il processo di saturazione alla legge che regola il processo di desaturazione.

Un flusso transitorio è associato a variazioni di pressione della fase liquida che, tipicamente, determinano variazioni di stato tensionale efficace. Le variazioni di porosità che si hanno in conseguenza del principio di tensioni efficaci e della deformabilità dello scheletro solido possono generare variazioni nella distribuzione dello stato tensionale totale nel corso del processo di filtrazione. I processi deformativi che si sviluppano devono ovviamente svilupparsi nel rispetto della congruenza:

$$d\varepsilon_{ij} = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (2.2a)$$

$u_i$ = *componenti di spostamento*

$\varepsilon_{ij}$ = *tensore delle deformazioni*

mentre le variazioni degli stati tensionali totali devono avvenire nel rispetto dell'equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_w}{\partial x_i} = X_i \qquad (2.2b)$$

$u_w$ = *pressione della fase liquida*

$\boldsymbol{\sigma}'_{ij}$ = *tensore delle tensioni efficaci*

$X_i$ = *vettore delle forze di massa*

Se si sceglie di seguire un approccio di tipo monotensoriale la definizione di tensore delle tensioni efficaci in regime di parziale saturazione è:

$$\boldsymbol{\sigma}'_{ij} = \boldsymbol{\sigma}'_{ij} - S_r u_w \boldsymbol{\delta}_{ij} \qquad (2.2c)$$

Le variazioni di tensioni e deformazioni devono infine essere rispettose della legge costitutiva del mezzo:

$$d\boldsymbol{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl} d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} \qquad (2.2d)$$

$\sigma'_{ij}$ = *tensore delle tensioni efficaci*

$\varepsilon_{ij}$ = *tensore delle deformazioni*

$C_{ijkl}$ = *matrice di rigidezza dello scheletro solido*

In ABAQUS viene è implementata la teoria che contempla la possibilità che durante il processo di filtrazione il volume possa variare $\left(\frac{\partial(n)}{\partial t} \neq 0\right)$ e possano determinarsi, più in generale, processi deformativi dello scheletro solido, con conseguenti redistribuzioni degli stati tensionali. Tale aspetto, noto come accoppiamento fra problema idraulico e

problema statico, è descritto matematicamente dall'insieme delle equazioni (1), che descrivono la parte idraulica e delle equazioni (2), che descrivono la parte statica.
Ovviamente è possibile, come caso particolare, schematizzare un problema a scheletro solido rigido imponendo rigidezze tali da forzare l'assenza di deformazioni.
Nel codice sono implementati numerosi legami costitutivi appartenenti alle diverse categorie tradizionalmente distinte dalla letteratura (ipoelastici, iperelastici, elastoplastici ad incrudimento isotropo, elastoplastici ad incrudimento combinato). Il codice consente altresì di implementare la legge costitutiva del mezzo in una subroutine scritta in FORTRAN (la umat.f) attraverso la quale l'utente deve aggiornare lo stato tensionale efficace a partire dagli incrementi di deformazione, note le così dette "variabili di stato", in modo tale che siano passate nella subroutine stessa.
In approcci di tipo trifase un ruolo importantissimo riveste la metodologia con cui si assegnano le condizioni al contorno relative ai fluidi presenti all'interno dei pori del terreno. Nell'approccio semplificato seguito da ABAQUS, nel quale la pressione della fase gassosa è considerata invariabilmente nulla e nel quale pertanto viene eliminata l'equazione di continuità della fase gassosa, le condizioni al contorno relative ai fluidi riguardano la sola fase liquida e devono essere definite o in relazione o alla sua velocità di flusso normale al contorno o in relazione al suo valore di pressione.
Sul contorno ove sono noti i valori di pressione della fase liquida occorre banalmente assegnare tali valori. Sulla porzione di contorno a contatto con una formazione impermeabile occorre assegnare una condizione di velocità della fase liquida normale al contorno pari a zero.
In un pendio possono poi essere presenti porzioni del contorno idraulico ove non sono note a priori le condizioni da imporre (fig. 2.1) in quanto queste sono diverse a seconda se il mezzo sul contorno è saturo o meno (superfici filtranti o di filtrazione). Sulla parte satura del contorno sarebbe necessario imporre la condizione di pressione nulla della fase liquida, mentre sulla parte non satura del contorno sarebbe necessario imporre la condizione di contorno impermeabile.

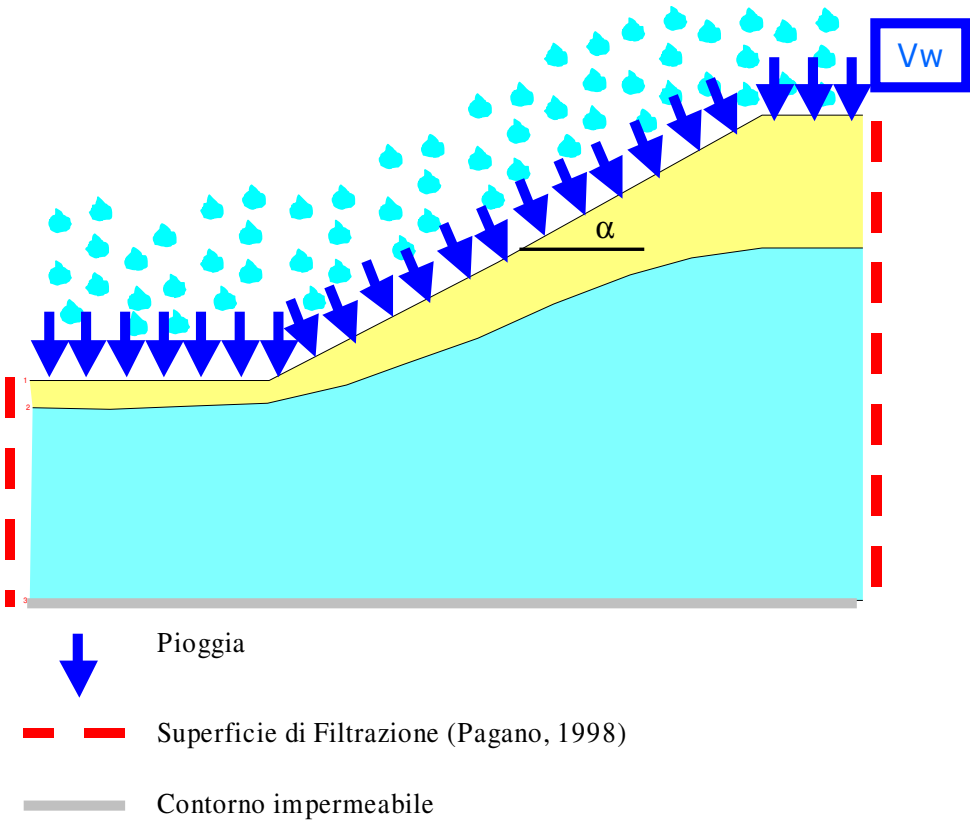


Figura 2.1: Condizioni al contorno di tipo idraulico

Trattandosi di un problema di flusso non confinato, la regione di completa saturazione non è nota a priori. Anche la porzione del contorno satura di conseguenza non è nota a priori ma deve essere individuata attraverso l'algoritmo di soluzione del problema. Ciò si può conseguire definendo al contorno una condizione di tipo "non uniforme", variabile in relazione ai valori che assume il grado di saturazione (o, equivalentemente, la pressione della fase liquida) nel corso del processo iterativo utilizzato per conseguire la soluzione del problema per via numerica. Se all'ultima iterazione nel punto di contorno considerato si è verificata la saturazione, la pressione della fase liquida deve essere posta pari al valore nullo; se invece nel punto le condizioni sono di saturazione parziale deve essere imposta la condizione di flusso nullo. Tale tipo di condizione al contorno è nota in letteratura come "superficie di filtrazione". Essa può essere approssimata (fig. 2.2) definendo una funzione che lega la velocità di flusso al valore della pressione della fase liquida nella quale, per $u_w < 0$ si assume $v_n = 0$ mentre per $u_w > 0$ si pone $v_n = k * u_w$. Tale ultima posizione assicura che al contorno la pressione

neutra non ecceda mai il valore nullo (Pagano, 1998). In ABAQUS è possibile definire tale relazione attraverso una subroutine in FORTRAN (flow.f) che, riferita a ciascun punto di Gauss del contorno stesso, richiede l'aggiornamento del valore della velocità di flusso normale. A tale routine viene passato il valore di pressione della fase liquida all'incremento precedente.

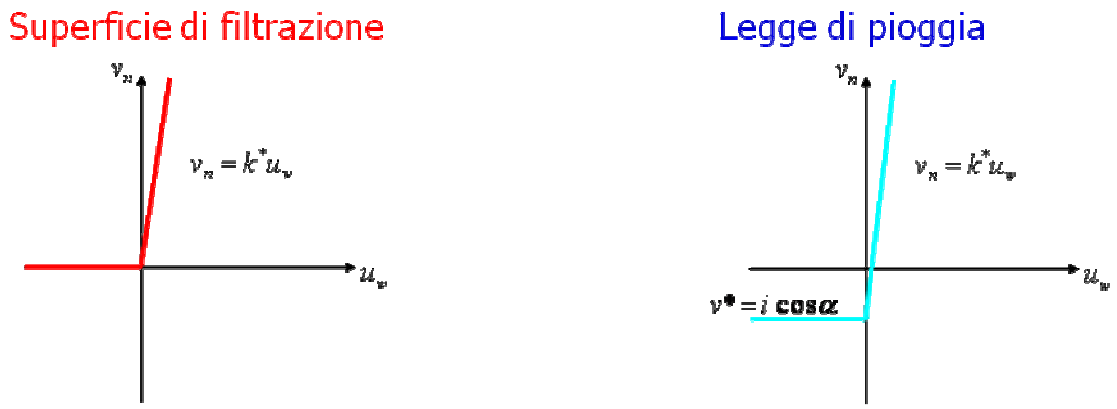


Figura 2.2: Condizioni al contorno di tipo idraulico associabili alla pioggia

In maniera simile viene simulata una generica legge di pioggia con intensità pari a i. Sul contorno esposto a pioggia, infatti, l'acqua può ruscellare o infiltrarsi: la goccia di acqua che cade sulla superficie superiore del pendio è a pressione atmosferica e tende ad infiltrarsi all'interno dei pori del terreno se il carico idraulico richiesto per il processo stesso è disponibile. In caso contrario la goccia d'acqua ruscella. Per la continuità della fase liquida a cavallo della superficie esterna il processo di filtrazione attraverso la superficie è pari all'intensità di pioggia "i" proiettata lungo la normale alla superficie esterna ($v^* = i\cos\alpha$ con $\alpha$ = angolo di inclinazione del pendio rispetto all'orizzontale). Come ipotesi di tentativo si può assumere che la pioggia costituisca una condizione idraulica al contorno tipo velocità di flusso $v^*$. Se però l'imposizione di $v^*$ comporta una pressione sul contorno maggiore della pressione atmosferica (valore massimo disponibile associato alla goccia d'acqua) ciò significa che il gradiente idraulico disponibile non è sufficiente all'infiltrazione dell'intera aliquota $v^*$. Anche in tal caso, la condizione al contorno all'iterazione successiva deve essere definita in termini di valore imposto della pressione della fase liquida.

Un altro aspetto importante attiene alla definizione delle condizioni iniziali che, nel problema più generale descritto dalle (1) e dalle (2) riguardano la quantificazione all'inizio dell'analisi della distribuzione degli stati tensionali efficaci ($\sigma'_{ij(0)}$), delle pressioni interstiziali ($u_{w(0)}$) e del grado di saturazione. In ABAQUS la condizione iniziale di equilibrio punto per punto si definisce imponendo che gli stati iniziali:

$$\sigma_{ij(0)} = \sigma'_{ij(0)} + \delta_{ij} S_{r(0)} u_{w(0)} \qquad (2.3)$$

diano luogo a una distribuzione di forze interne equilibrata dalle distribuzione di forze esterne applicate, delle forze di massa (ad esempio il peso proprio) e delle forze di superficie (ad esempio carichi applicati a piano campagna). Nel codice la verifica della corretta definizione di uno stato tensionale totale di equilibrio consiste nel constatare che alla prima iterazione l'analisi fornisca spostamenti pressoché nulli. Il grado di saturazione iniziale e la pressione interstiziale iniziale devono inoltre essere congruenti con la curva caratteristica assunta, nel senso che il punto rappresentativo dello stato iniziale deve ricadere sulla curva stessa.

Il codice ABAQUS, in quanto solutore anche del problema statico, può essere impiegato efficacemente per risolvere problemi di stabilità dei versanti di tipo tradizionale (determinazione del coefficiente di sicurezza di un pendio) o problemi più avanzati, nei quali si analizzano anche i processi deformativi, nella loro distribuzione spaziale e/o nella loro evoluzione temporale. A tal fine è bene evidenziare come con il codice ABAQUS è possibile seguire strade più avanzate per la valutazione delle condizioni di stabilità di un pendio. A differenza degli approcci tradizionali, in sostanza tutti basati su uno stesso modello (comportamento rigido-plastico, criterio di rottura di Mohr-Coulomb) e distinti sul metodo solutivo di un problema staticamente indeterminato, la soluzione delle (1) e (2) consente di seguire una strada nella quale è univocamente determinato il problema della quantificazione dello stato tensionale corrente, indispensabile per ricavare il coefficiente di sicurezza lungo una superficie potenziale di scorrimento. La soluzione delle (1) e (2), qualora preveda l'impiego di modelli elastoplastici che implementano un criterio di rottura, consente di seguire una

strada alternativa, realizzando un certo numero di analisi nelle quali parametri di resistenza a rottura del terreno vengono progressivamente ridotti (Figura 2.3). Si procede fino ad individuare il fattore riduttivo della resistenza per il quale gli spostamenti in punti prefissati del dominio superano un valore di soglia. Il fattore riduttivo della resistenza rappresenta il coefficiente di sicurezza del pendio. L'approccio non richiede l'assunzione aprioristica della superficie di rottura che anzi, in linea di principio, viene ricavata dalla soluzione del problema come inviluppo dei punti dove tendono a concentrarsi le deformazioni distorsionali plastiche oppure come inviluppo dei punti nei quali il coefficiente di sicurezza (puntuale) risulta minimo. Tuttavia è bene ricordare come un'analisi numerica agli elementi finiti o alle differenze finite, in condizioni di incipiente rottura, possa generare soluzioni che sono fortemente influenzate dalla mesh utilizzata. Questo non è ovviamente un problema specifico del codice ABAQUS ma di tutti i codici di calcolo che implementano approcci nei quali il comportamento del mezzo viene schematizzato come elastoplastico. Quando si segue la strategia di ridurre progressivamente i parametri di resistenza del mezzo fino ad indurre il collasso dello schema è bene allora confrontare la risposta meccanica (caratterizzandola, ad esempio, attraverso gli spostamenti della sommità del pendio) derivante da almeno due discretizzazioni spaziali completamente diverse ed arrestare il processo di riduzione dei parametri laddove si osservi una biforcazione della soluzione. In genere la biforcazione si verifica per valori degli spostamenti in sommità significativi (10% dell'altezza) e associabili, da un punto di vista ingegneristico, a uno stato limite ultimo del pendio. Tale tecnica può essere pertanto utilizzata nella maggior parte dei casi sia per derivare il coefficiente di sicurezza globale (rapporto tra parametri di resistenza del mezzo e parametri di resistenza necessari) sia per derivare la geometria della superficie di scorrimento (luogo dei punti dove tendono a localizzarsi le deformazioni distorsionali plastiche).

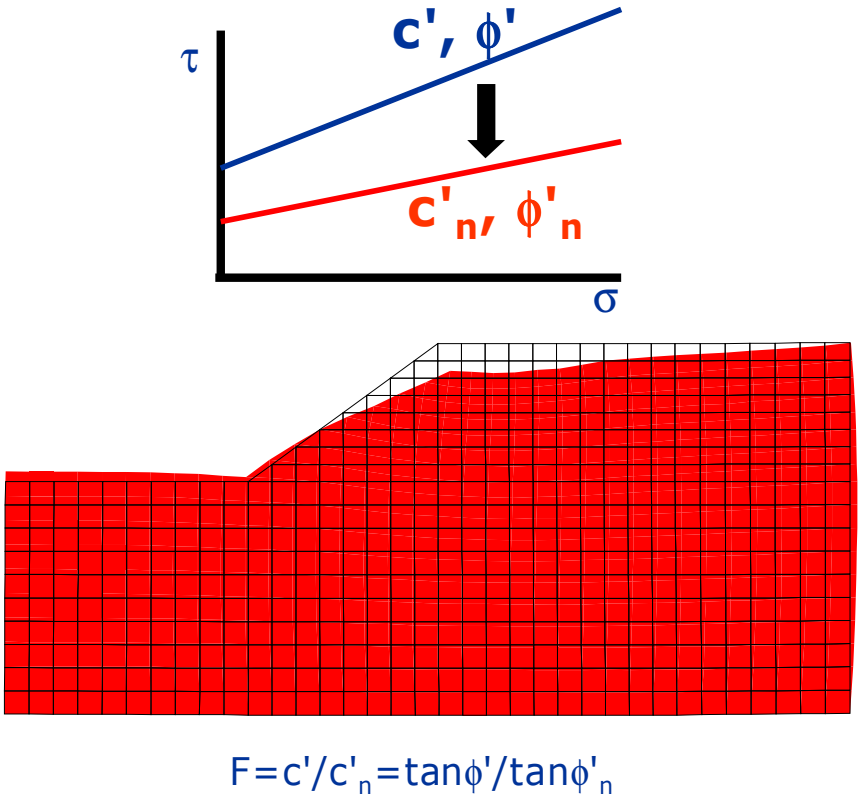


Figura 2.3: Valutazione delle condizioni di sicurezza di un pendio attraverso la riduzione progressiva dei parametri di resistenza a rottura

Gli eventi franosi classificati come fenomeni da colata rapida sono associati ad incrementi del contenuto d'acqua del terreno. Tipicamente ciò a viene a seguito di eventi piovosi e a processi d'infiltrazione dell'acqua piovana attraverso la superficie del piano campagna. Si tratta di processi di filtrazione dall'alto verso il basso regolati dalla durata e intensità dell'evento, dalla geometria del sistema pendio, dalle proprietà idrauliche del terreno e della superficie (permeabilità, proprietà di ritenzione). Tali processi sono sempre a carattere transitorio ed è significativo analizzare quali sono gli approcci di letteratura che ne consentono una corretta modellazione.

Attraverso il codice ABAQUS è possibile schematizzare gli aspetti geometrici in problemi piani o tridimensionali (la morfologia esterna del pendio, le stratificazioni presenti nel sottosuolo, la morfologia del substrato infinitamente rigido e resistente), le proprietà meccaniche e idrauliche delle diverse stratificazioni, le condizioni al contorno e le condizioni iniziali.

Nel seguito si mostreranno alcuni esempi di previsioni ottenute attraverso il codice, risolvendo un problema a "scheletro solido rigido", nell'ottica soprattutto di un impiego del codice per l'interpretazione di grandezze fisiche di tipo idraulico in pendii costituiti da piroclastiti (altezze di pioggia, suzione, contenuto d'acqua) che, se correttamente comprese possono supportare la previsione di fenomeni di colata rapida.

Esempi applicativi

*2.2.1 Pendio in presenza di lama d'acqua superficiale*

Il primo esempio applicativo si riferisce alla modellazione di un prototipo di pendio realizzato per lo studio di fenomeni di colata rapida (Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli Federico II).
Il reticolo ad elementi finiti è un rettangolo lungo 3 m e alto 0.4 m, inclinato di 34° sull'orizzontale.

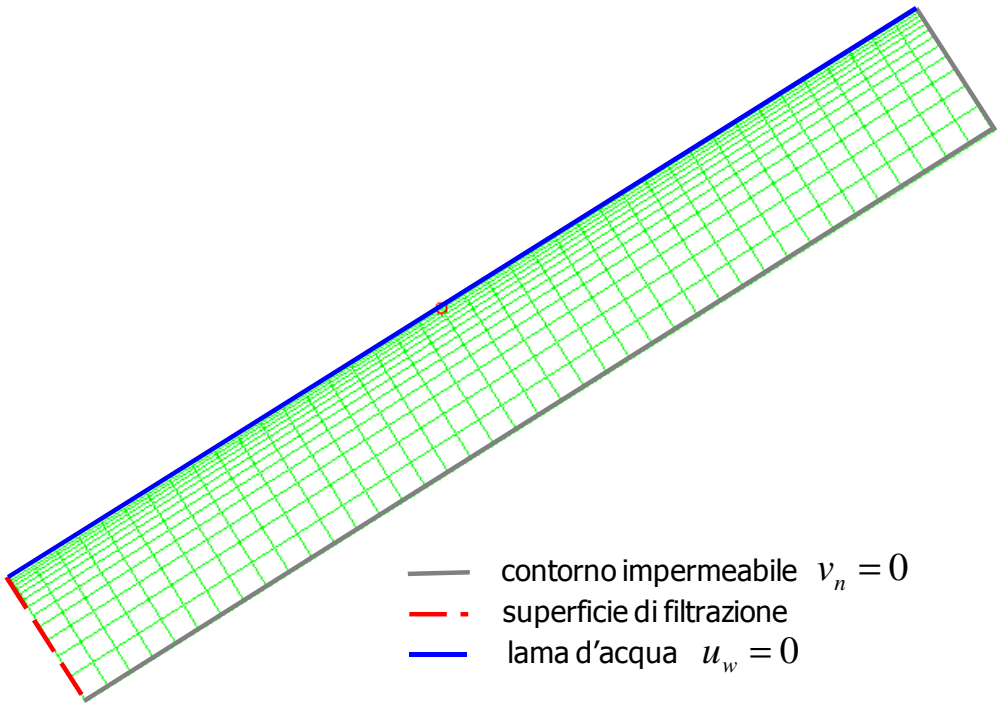


Figura 2.4: Reticolo a elementi finiti e condizioni al contorno del caso 1.

Si è modellata l'infiltrazione di acqua nel pendio a seguito di un evento di pioggia che garantisca una lama d'acqua a pressione atmosferica su tutta la superficie.

Conformemente alle caratteristiche del prototipo sono state considerate impermeabili le superfici inferiore e laterale destra mentre la superficie laterale sinistra è stata modellata come superficie di filtrazione, così come descritto al paragrafo 2.1.

Il dominio di calcolo è inizialmente non saturo e sottoposto a un valore di pressione neutra inferiore a quella atmosferica, cioè in suzione. L'analisi sperimentale del comportamento di terreni non saturi ha messo in luce l'esistenza di una relazione tra il grado di saturazione di un terreno e il valore della suzione a cui è sottoposto, detta curva caratteristica o di saturazione. Il codice ABAQUS consente di specificare tale relazione in maniera tabulare. Pertanto sono state adoperate le tre diverse curve di saturazione mostrate in fig. 2.5.

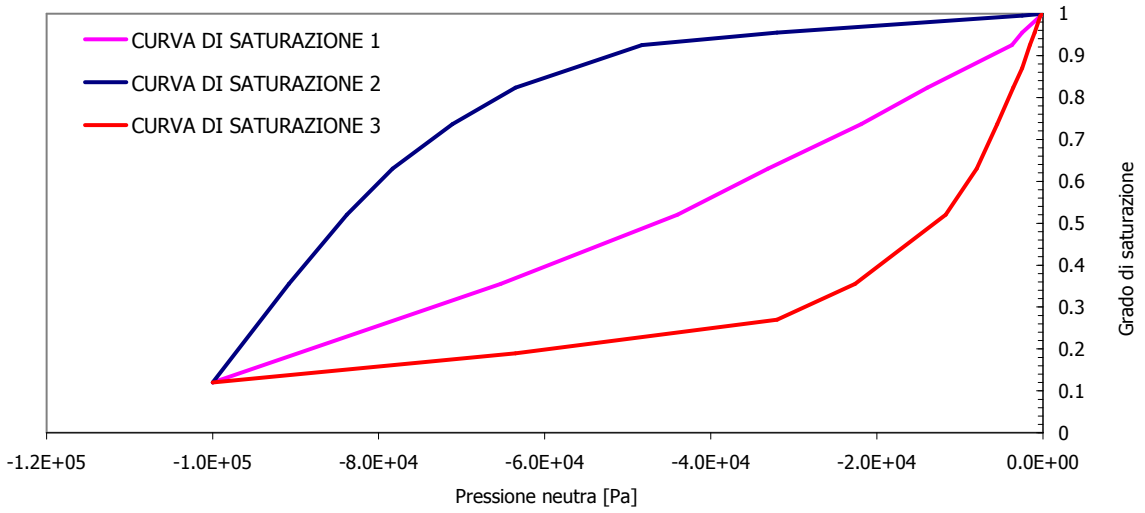


Figura 2.5: Curve di saturazione adoperate.

La permeabilità del mezzo, invece, è stata mantenuta costante e pari a una valore di $10^{-7}$ m/s.

In fig. 2.6 sono mostrati gli andamenti della velocità del flusso entrante in un nodo del contorno superiore del reticolo in funzione del tempo. Il moto di filtrazione ha ovviamente natura transitoria tendendo verso una condizione stazionaria a regime. In tale fase il valore del grado di saturazione nel dominio cambia e conseguentemente il valore della suzione, in accordo con ciascuna curva di saturazione specificata (nel caso specifico la curva 2 di fig. 2.5).

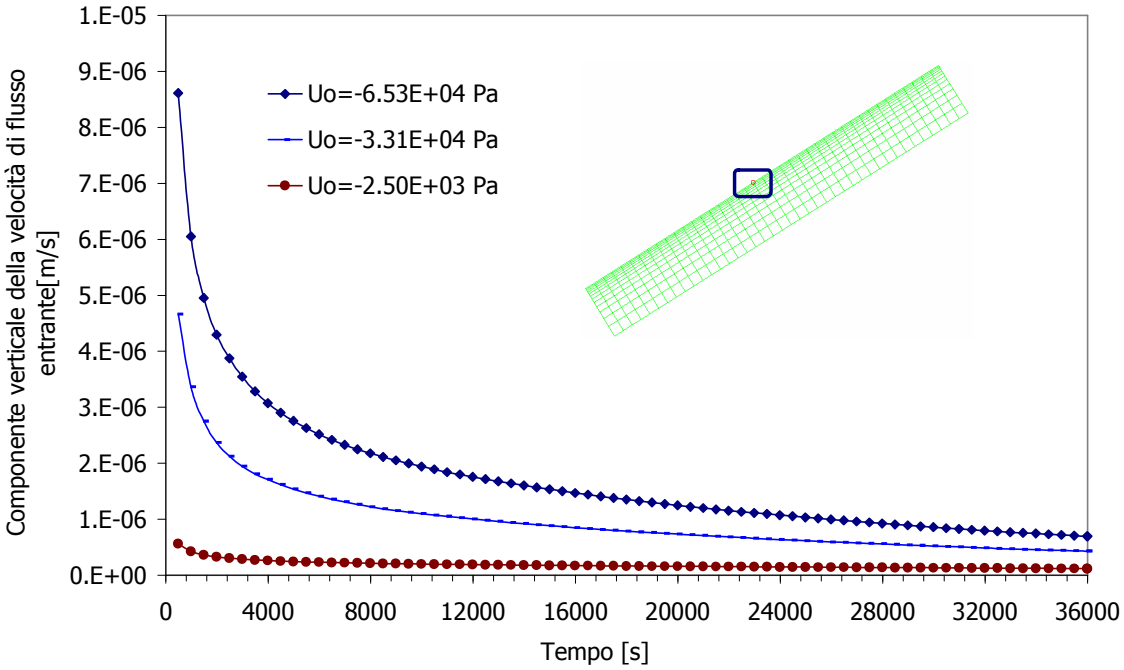


Figura 2.6: Componente verticale della velocità del flusso nel nodo 286 per diversi valori della suzione iniziale

Si osserva che maggiore è il valore della suzione iniziale (in valore assoluto) maggiore è la velocità di infiltrazione e il tempo necessario al raggiungimento di una condizione stazionaria. La curva corrispondente al valore $u_o$=-2.5 kPa, cioè alla suzione iniziale più bassa, mostra una componente verticale di velocità di filtrazione all'incirca un ordine di grandezza inferiore a quella relativa al valore di suzione iniziale più elevato $u_o$=-65.3 kPa. Inoltre nel primo caso ($u_o$=-2.5 kPa) già dopo circa un'ora il moto è prossimo alla condizione stazionaria, mentre nel secondo ($u_o$=-65.3 kPa) tale condizione si osserva non prima di 10 ore.

La portata d'acqua entrante nel dominio durante la fase transitoria del moto è mostrata in fig. 2.7 per $u_o$=-65.3 kPa. In tal caso essa raggiunge il valore di circa 5 litri per metro attorno alle 10 ore dall'inizio del processo e mostra ancora una tendenza positiva.

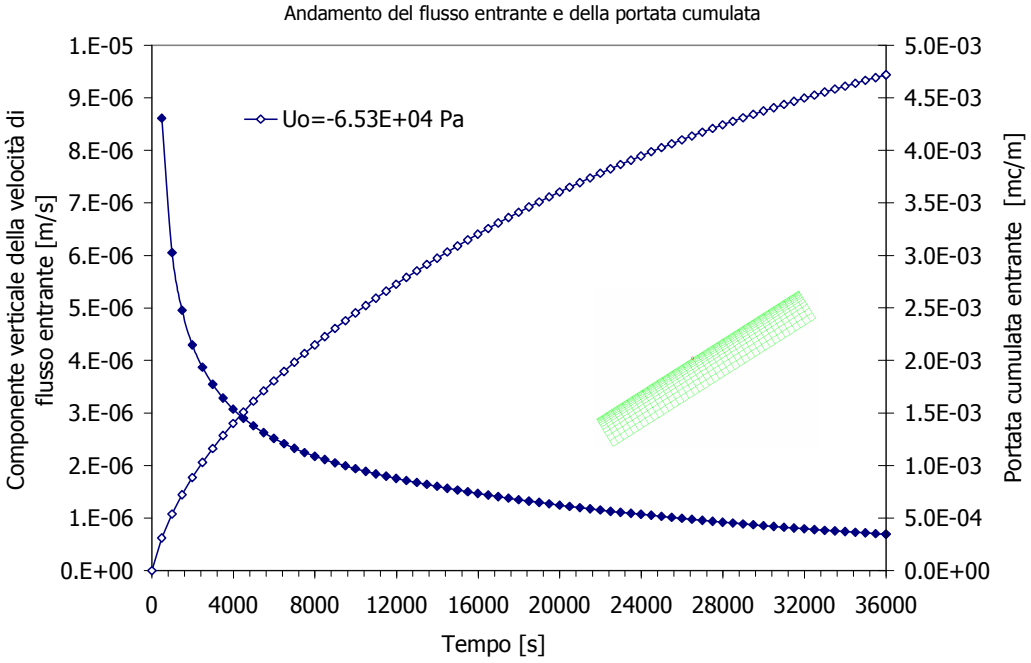


Figura 2.7: Componente verticale della velocità del flusso e portata cumulata entrante nel dominio

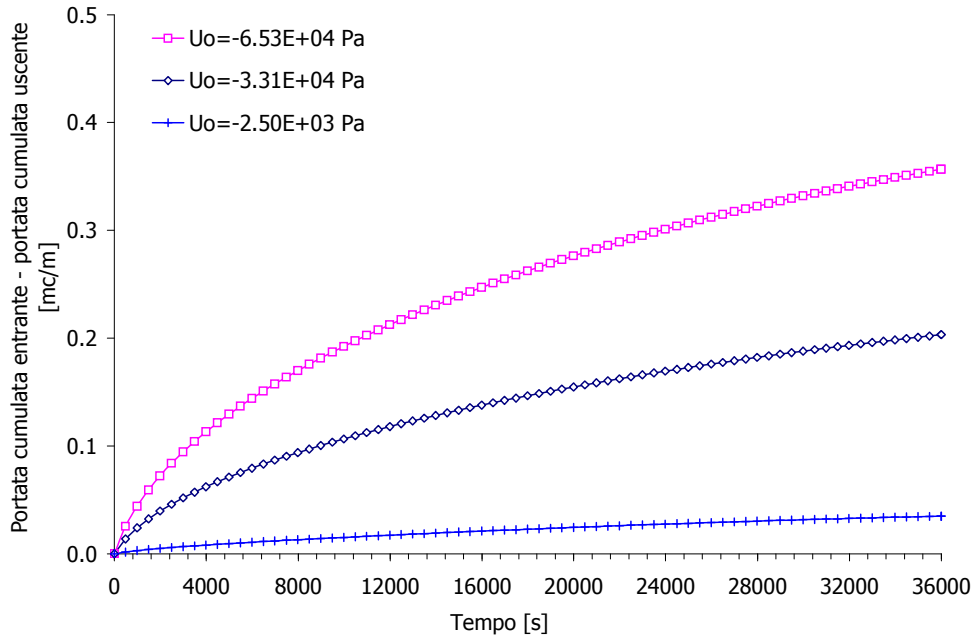


Figura 2.8: Componente verticale della velocità del flusso e portata cumulata entrante nel dominio

L'accumulo d'acqua nel dominio durante la fase transitoria del moto è mostrato in fig. 2.8. In essa viene diagrammata in funzione del tempo la differenza tra la portata cumulata entrante e uscente dal dominio. Questa rappresenta il volume d'acqua che si accumula nel pendio determinandone la progressiva saturazione, secondo la legge che è stata specificata per quel terreno (curva 2 di fig. 2.5)

Un confronto tra pendii caratterizzati da diverse curve di saturazione e diversi valori della suzione iniziale in termini di componente verticale della velocità entrante è riportato in fig. 2.9.

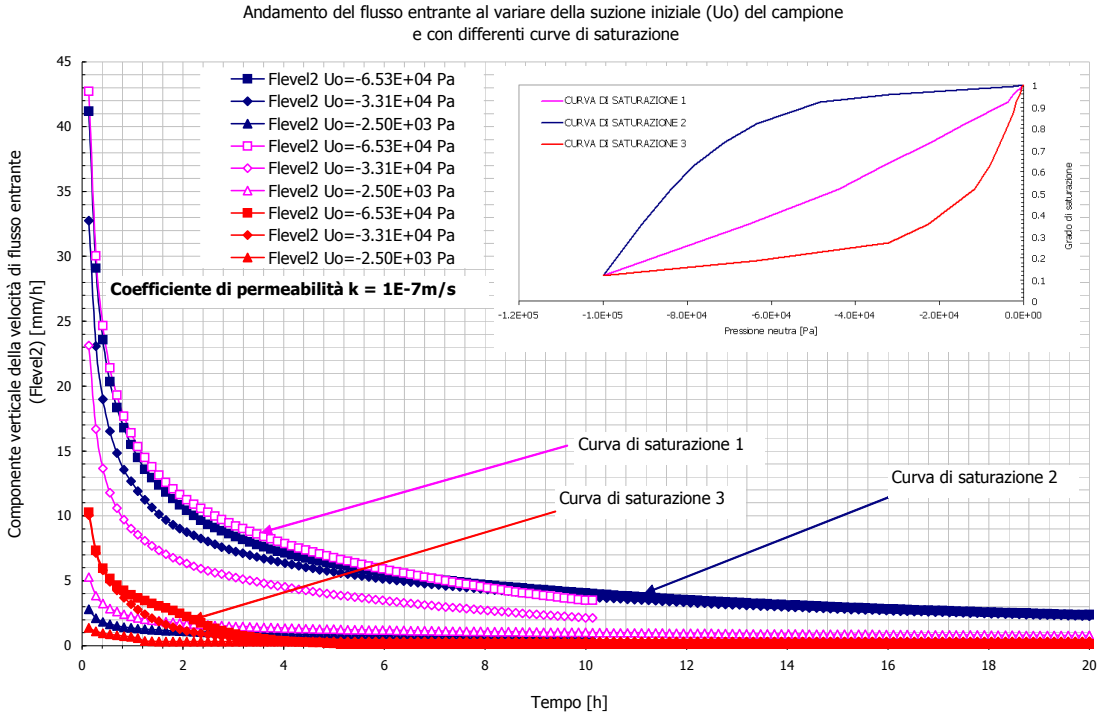


Figura 2.9: Confronto tra analisi relative a diverse curve di saturazione e diversi valori di suzione iniziale.

Dalla figura appare evidente la necessità, anche in presenza di un evento meteorico estremamente semplificato (condizione di lama d'acqua in superficie), di caratterizzare opportunamente il pendio in termini di curva di saturazione e valore di suzione iniziale al fine di determinare i caratteri del moto di filtrazione nel tempo e, conseguentemente, le variazioni di stato tensionale e delle condizioni di stabilità.

*2.2.2 Pendio in presenza di lama d'acqua superficiale*

Il secondo esempio applicativo si riferisce allo stesso prototipo di pendio, questa volta sottoposto a una pioggia di intensità costante e pari a 30 mm/h. La condizione al contorno superiore è stata quindi assunta in conformità con quanto illustrato al paragrafo 2.1

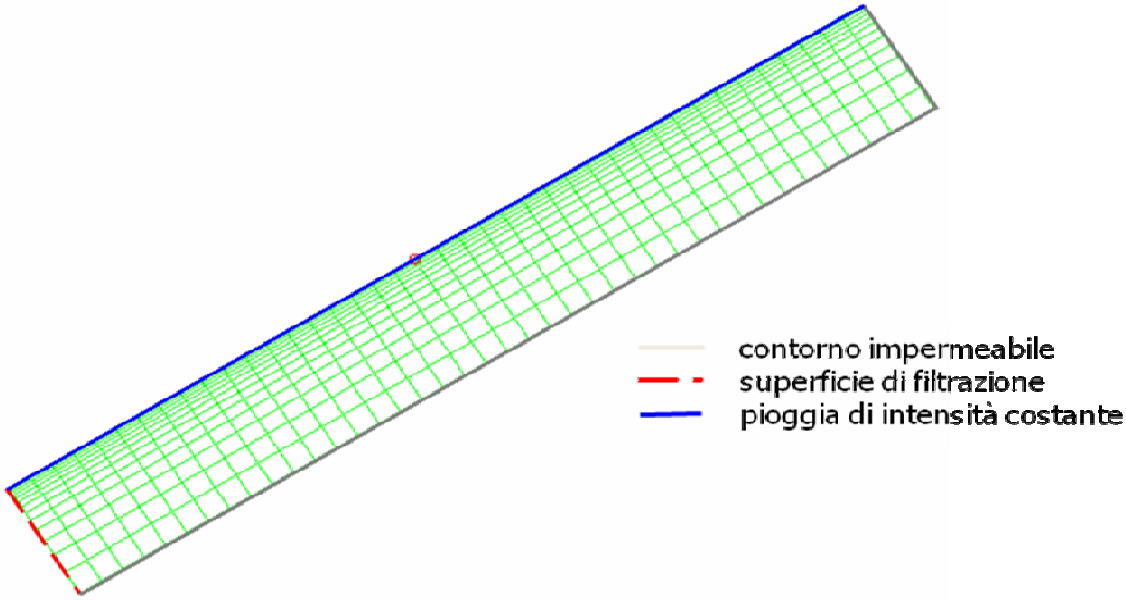


Figura 2.10: Reticolo a elementi finiti e condizioni al contorno del caso 2.

I risultati delle analisi relative alla curva di saturazione 1 di fig. 2.5 e a una suzione iniziale $u_0$=-3.31 kPa sono riportati in termini di isocontorni del grado di saturazione nelle figg. 2.11-2.13 dopo 2, 5 e 10 ore di pioggia di intensità costante.
Le figure mostrano il procedere del fronte saturo in direzione sub-perpendicolare al pendio, con una tendenza prevalente alla saturazione della zona di valle dopo 10 ore di pioggia. Le successive figg. 2.14-2.16 mostrano la corrispondente evoluzione della pressione neutra nel pendio.

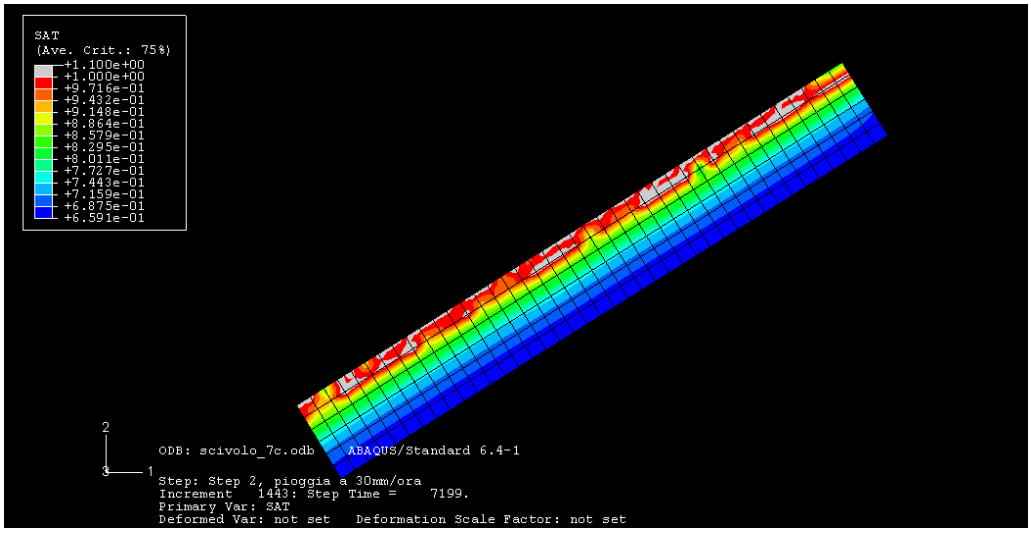


Figura 2.11: Isocontorni del grado di saturazione dopo 2 ore di flusso.

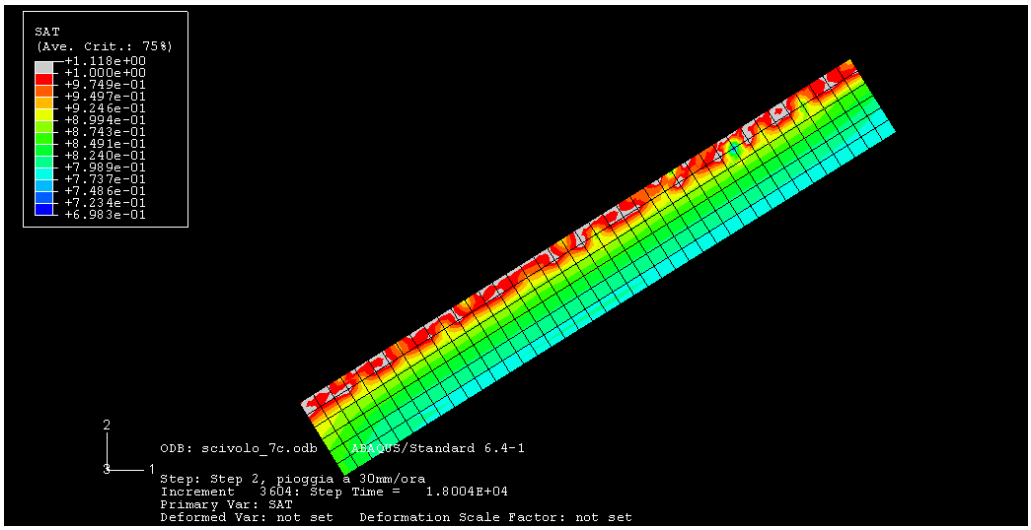


Figura 2.12: Isocontorni del grado di saturazione dopo 5 ore di flusso.

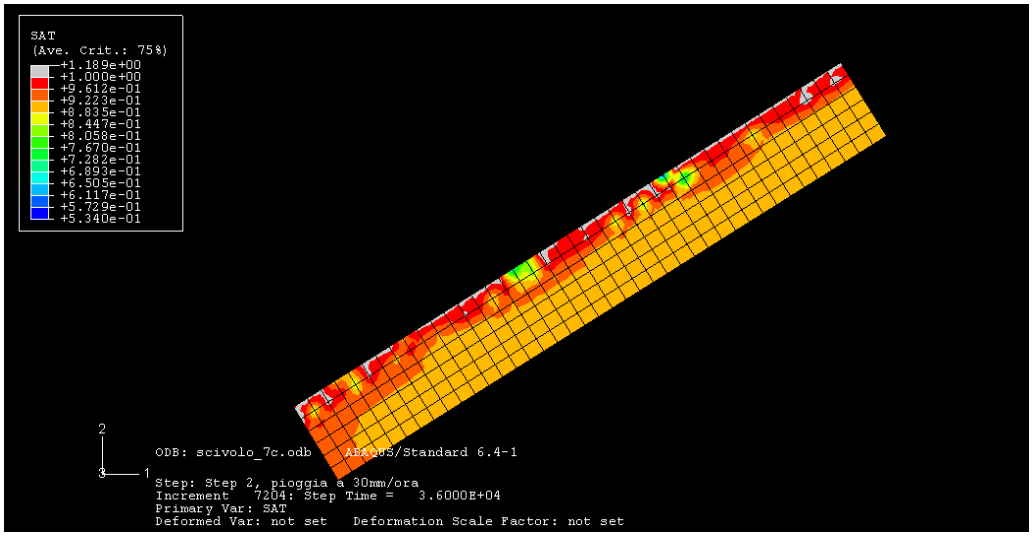


Figura 2.13: Isocontorni del grado di saturazione dopo 10 ore di flusso.

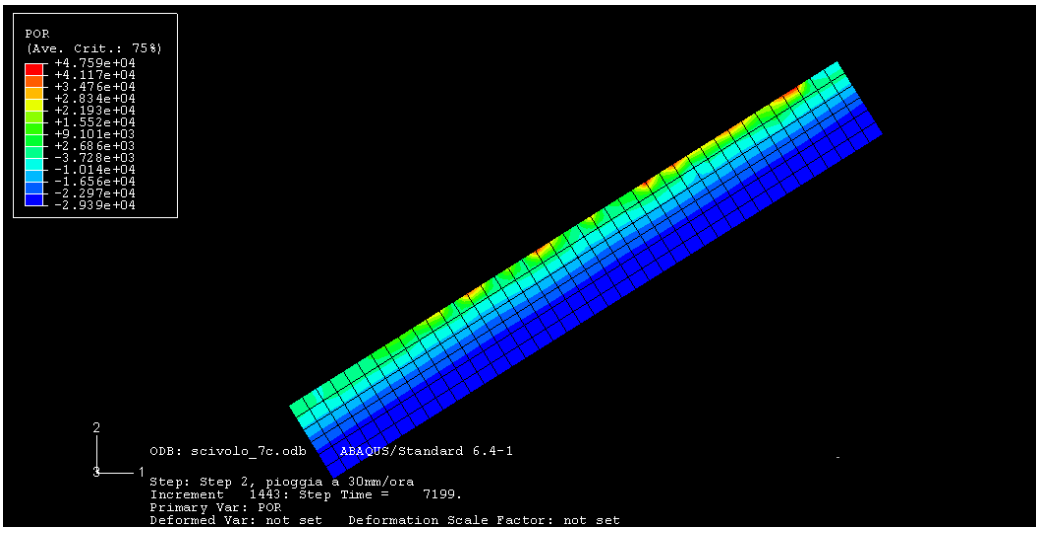


Figura 2.14: Isocontorni di pressione neutra dopo 2 ore di flusso.

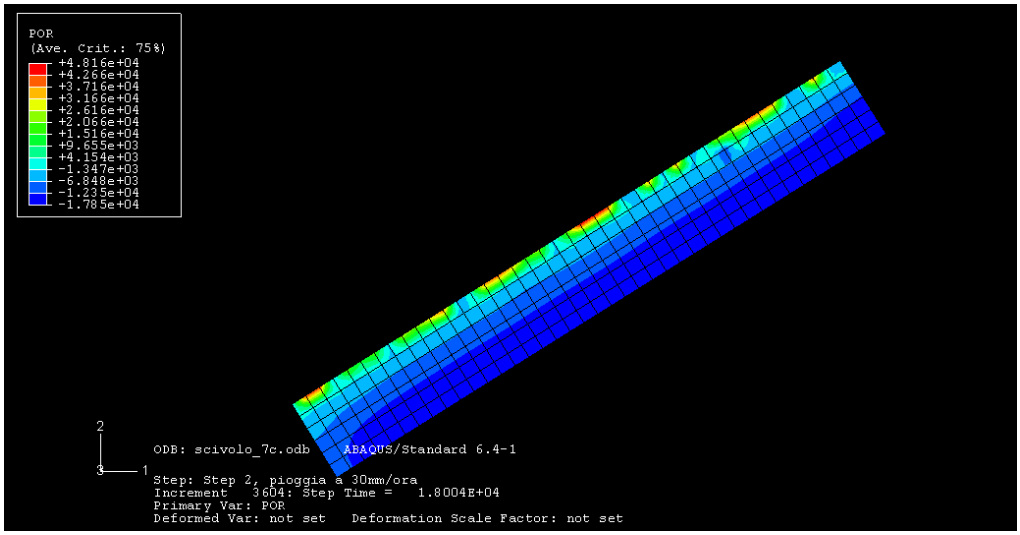


Figura 2.15: Isocontorni di pressione neutra dopo 5 ore di flusso.

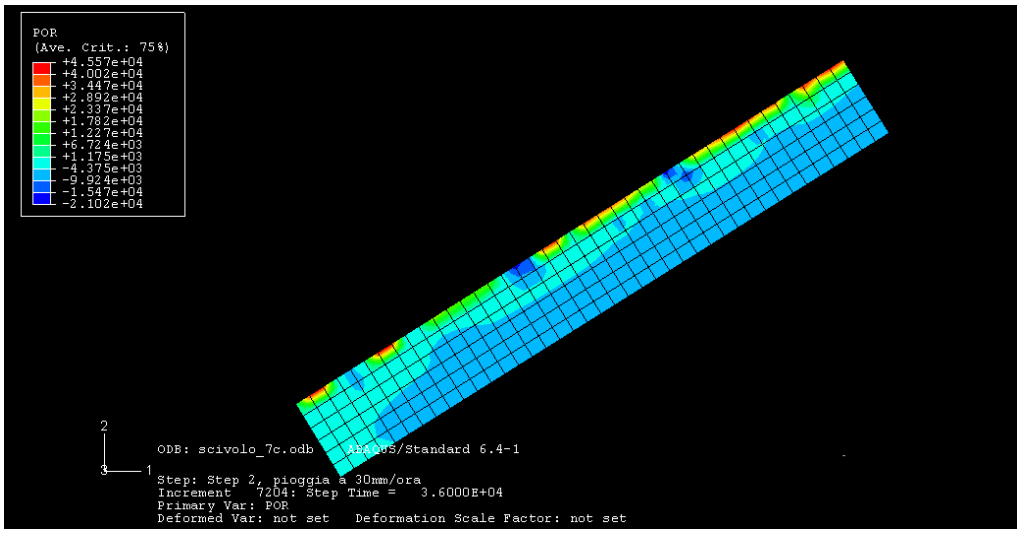


Figura 2.16: Isocontorni di pressione neutra dopo 10 ore di flusso.

In fig. 2.17 viene diagrammato l'andamento del grado di saturazione nel tempo in alcuni nodi allineati in direzione ortogonale al pendio. Si nota come tutte le curve partano dallo stesso valore iniziale di circa 0.6 ed evolvono verso la saturazione ($S_r$=1) in tempi differenti, mostrando evidenza dell'avanzamento del fronte saturo dall'alto verso il basso. L'irregolarità delle curve relative ai nodi più superficiali è dovuta ai forti gradienti di pressione in quelle zone e la soluzione può essere resa regolare infittendo il reticolo, seppure scontando un maggiore onere computazionale.

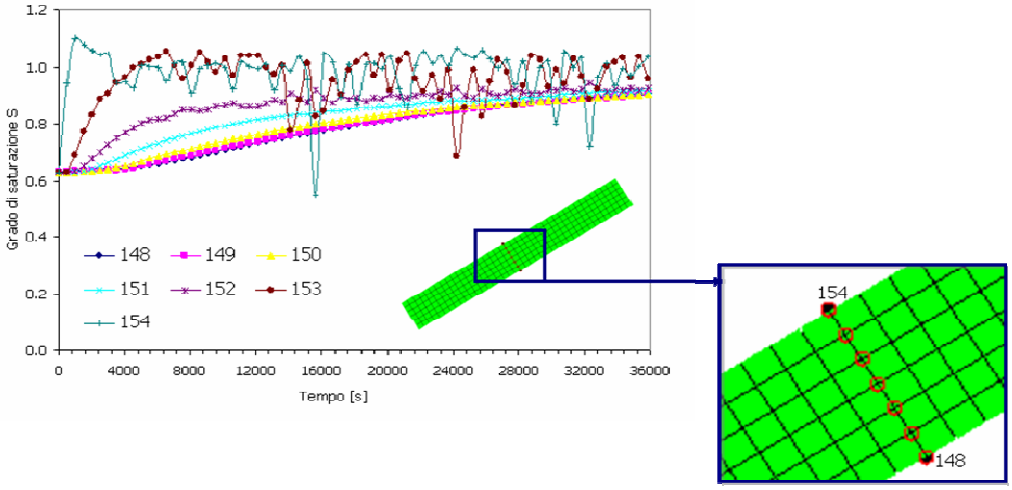


Figura 2.17: Andamento del grado di saturazione S nel tempo in corrispondenza dell'allineamento A

Nella fig. 2.18 si osservano le curve relative all'andamento della pressione neutra negli stessi nodi. Conformemente alla suzione iniziale imposta, le curve partono tutte da un valore di -3.3 kPa a t=0 ed evolvono verso la condizione stazionaria che in superficie corrisponde, seppure con le irregolarità di cui si è discusso sopra, al valore nullo (pressione atmosferica).

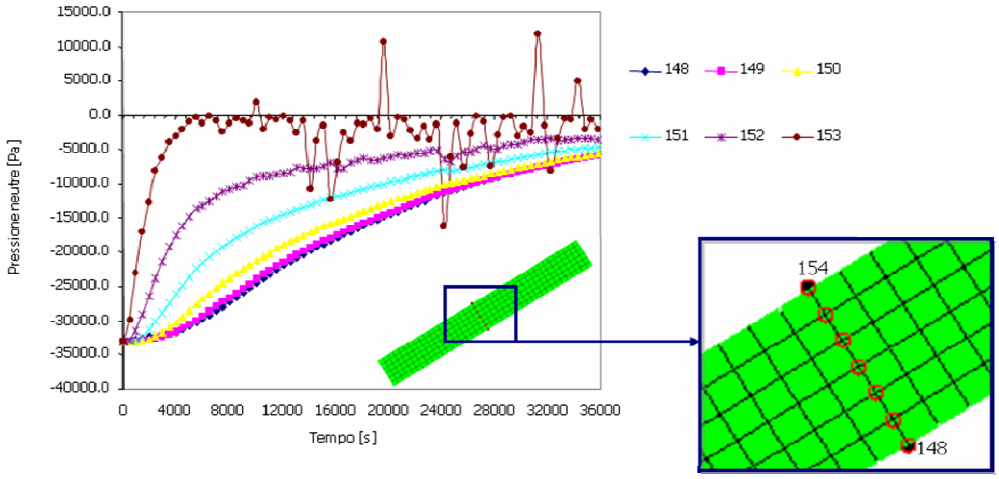


Figura 2.18: Andamento della pressione neutra nel tempo in corrispondenza dell'allineamento A

# 3 Il codice VADOSE

Aspetti generali del codice e teoria implementata

Il codice VADOSE risolve, con la tecnica degli elementi finiti (discretizzazione spaziale) e delle differenze finite (discretizzazione temporale) un problema di filtrazione tridimensionale, ipotizzando lo scheletro solido rigido. A differenza del codice ABAQUS trascura l'aspetto statico del problema e non consente pertanto previsioni di tensioni e deformazioni nel sottosuolo. D'altro canto il fenomeno della filtrazione è, rispetto ad ABAQUS, implementato in una forma molto più generale, che considera anche il flusso regolato dai gradienti di temperatura. Ciò consente di stimare alcune variabili fisiche nel terreno, come la temperatura e la pressione di vapore, che influenzano in misura significativa quei processi di evaporazione e traspirazione tanto importanti nella valutazione degli effetti al suolo delle condizioni climatiche.

In particolare, VADOSE consente la modellazione dei processi di evaporazione attraverso la superficie del suolo.
Nel seguito il modello matematico implementato è descritto in condizioni di flusso monodimensionale, ovvero nelle stesse condizioni per le quali si ipotizza l'impiego del codice nell'ambito del progetto.
Partendo dalle equazioni (1) reggenti il problema idraulico in ABAQUS:

$$-\rho_w \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial(\rho_w S_r n)}{\partial t} \qquad (3.1a)$$

$$v_i = -k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \qquad (3.1b)$$

$$S_r = f(u_w) \qquad (3.1c)$$

$S_r$ = *grado di saturazione*

$v_i$ = *vettore delle velocità della fase liquida*

$n$ = *porosità*

$\rho_w$ = *densità della fase liquida*

$k_{ij}$ = *matrice di permeabilità*

$h = z + \frac{u_w}{\gamma_w}$ = *quota piezometrica*

$u_w$ = *pressione della fase liquida*

$z =$ *quota geometrica*

la densità $\rho_w$ è considerata costante; in tali ipotesi e in condizioni monodimensionali (z direzione del flusso) la (1a) si particolarizza nell'equazione:

$$-\frac{\partial v_{wz}}{\partial z} = \frac{\partial (S_r n)}{\partial t} \qquad (3.4a)$$

$$v_{wz} = -k_{wz}\frac{\partial h}{\partial z} = k_{wz}\frac{\partial\left(z + \frac{u_w}{\rho_w g}\right)}{\partial z} \qquad (3.4b)$$

In tali relazioni è stato aggiunto il pedice "w" alle variabili di campo e alle proprietà relative alla fase liquida.
In VADOSE il bilancio di massa dell'acqua è implementato nella forma più generale che considera, accanto al flusso $v_w$ della sostanza allo stato liquido, anche il flusso della sostanza allo stato di vapore $v_v$. La 4a si trasforma allora nell'equazione:

$$-\frac{\partial v_{wz}}{\partial z} - \frac{\partial v_{vz}}{\partial z} = \frac{\partial (S_r n)}{\partial t} \qquad (3.4c)$$

nella quale il flusso della fase liquida $v_{wz}$ può essere esplicitato attraverso la legge di Darcy (4b) e il flusso di vapore $v_{vz}$ da una relazione analoga nella quale esso è associato alla pressione di vapore $u_v$ e alla permeabilità $k_{vz}$ del terreno al vapore

$$v_{vz} = -\frac{1}{\rho_w} k_{vz}\frac{\partial u_v}{\partial z} \qquad (3.4d)$$

Nella (4c) l'espressione del flusso di vapore è corretta per portare in conto gli spostamenti orizzontali della massa di vapore legati alla trasmissione di calore per avvezione:

$$-\frac{\partial v_{wz}}{\partial z}-\frac{u_a+u_w}{u_a}\frac{\partial v_{vz}}{\partial z}=\frac{\partial(S_r n)}{\partial t} \qquad (3.4e)$$

$u_a$ = pressione assoluta dell'aria

Introducendo la (4b) e la (4d) nella (4e) si ottiene:

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left[k_{wz}\frac{\partial}{\partial z}\left(z+\frac{u_w}{\rho_w g}\right)\right]-\frac{u_a+u_w}{u_a}\frac{\partial}{\partial z}\left[k_{vz}\frac{\partial}{\partial z}u_v\right]=\frac{\partial(S_r n)}{\partial t} \qquad (3.4e)$$

VADOSE al bilancio di massa dell'acqua (4e) (la variazione di massa d'acqua all'interno di un generico volume di controllo deve corrispondere alla massa che transita attraverso le superfici del volume stesso) associa il bilancio termodinamico. Questo impone che la variazione di energia termica d$Q$ all'interno del volume di controllo $V$ corrisponda al flusso di calore $\frac{\partial\phi}{\partial z}$ che transita attraverso le superfici del volume stesso:

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{Q}{V}\right]=\frac{\partial\phi}{\partial z} \qquad (3.5a)$$

Il flusso di calore è somma di due aliquote: l'una $\frac{\partial\phi_c}{\partial z}$, di conduzione, è legata un'aliquota al gradiente di temperatura T. L'altra $\frac{\partial\phi_d}{\partial z}$, di diffusione, è invece legata al cambio di stato per vaporizzazione:

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{Q}{V}\right]=\frac{\partial \phi_c}{\partial z}+\frac{\partial \phi_d}{\partial z} \qquad (3.5b)$$

Il bilancio termodinamico (5b) trascura l'aliquota di flusso che avviene per convezione.

Esplicitando i tre termini della (5b) si ha:

$$\lambda_t \frac{\partial T}{\partial t}=\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right)-\frac{u_a+u_v}{u_a} L_v \frac{\partial}{\partial z}\left[k_{vz} \frac{\partial u_v}{\partial z}\right] \qquad (3.5c)$$

$T$ = temperatura assoluta dell'aria

$\lambda_t$ = calore volumetrico specifico del terreno

$\lambda$ = conduttività termica del terreno

$L_v$ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua

La pressione di vapore dell'acqua $u_v$ è inoltre esprimibile in funzione della pressione dell'acqua allo stato liquido $u_w$ noti che siano il contenuto d'acqua e la temperatura del terreno:

$$u_a-u_w=\frac{\rho_w RT}{w_w}\ln\left(\frac{u_v}{u_{vs}}\right) \qquad (3.5d)$$

Attraverso tale approccio è possibile stimare nel terreno alcune variabili fisiche (temperatura, pressione di vapore, contenuto d'acqua) che controllano; insieme alle variabili climatiche (temperatura, irraggiamento, umidità relativa, velocità del vento), i processi di evaporazione e traspirazione. E' possibile in tal modo definire correttamente le condizioni al contorno che regolano l'interazione con l'atmosfera.

In un terreno parzialmente saturo i processi di evapotraspirazione dipendono dal contenuto d'acqua e quindi dalla suzione, grandezza fisica ad esso correlato, oltre che, come appena detto, dalle condizioni climatiche. Tali processi infatti sono regolati dal

gradiente di pressione che si instaura nel vapor acqueo presente a cavallo della superficie del suolo, ovvero dalle differenze tra la pressione $u_v^s$ del vapore presente nei pori del terreno in prossimità della superficie e la pressione $u_v^a$ del vapore negli strati dell'atmosfera a contatto con la superficie. In un mezzo saturo la pressione di vapore nei pori $u_v^s$ assume il massimo valore possibile $u_{vsat}^s$. A parità di altre condizioni si genera pertanto la massima evaporazione possibile, che, proprio in quanto tale, è detta evaporazione potenziale $E_{pot}$. Essa può esprimersi attraverso la relazione (*Gray*,1970):

$$E_{pot} = f(U)\left(u_{vsat}^s - u_v^a\right) \qquad (3.5d)$$

dove $f(U)$ rappresenta un parametro che dipende dal vento e dalle caratteristiche aerodinamiche della superficie.

In un mezzo parzialmente saturo l'espressione dell'evaporazione E assume una forma analoga alla (5d):

$$E = f(U)\left(u_v^s - u_v^a\right) \qquad (3.5e)$$

nella quale è presente il valore della pressione di vapore $u_v^s$ agente nel mezzo parzialmente saturo al posto del valore associato al mezzo saturo.

All'interno dell'applicativo VADOSE si utilizza la relazione di Penman per la determinazione di f(U), con le modifiche apportate da Wilson per tener conto della parziale saturazione:

$$E = \frac{\Gamma R_n + \gamma E_a}{\Gamma + \gamma A} \qquad (3.5f)$$

$\Gamma$ = pendenza della curva di pressione di vapore saturo-temperatura

$R_n = G + H + L_e$ = quantità netta di energia ricevuta dalla superficie, disponibile per tutti i processi fisici e biologici: $G = k_{soil}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{soil}$ =calore trasmesso attraverso il suolo; $H = k_{air}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{air}$ [1] = calore trasmesso attraverso l'atmosfera; $L_e$ = calore scambiato nei processi di evaporazione o condensazione al suolo

$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon\lambda} = 0{,}665 * 10^{-3} p_A$ costante psicrometrica: $c_p$ calore specifico a pressione costante $(= 1.013 * 10^{-3} J/kgK)$; $P$ = pressione atmosferica; ε =rapporto tra peso molecolare di aria e vapore $(= 0.622)$; $L_v$ = calore latente di vaporizzazione $\left(= 2418000 \frac{J}{kg}\right)$; $\gamma = 0.066 kPa$ per $p_A = 1 atm$; $E_a = f_v P_v^a (B - A) = 0.135(1 + 0.146U) P_v^a (B - A)$; con $B$ e $A$ reciproci dell'umidità relativa rispettivamente dell'aria e della superficie.

Le relazioni sopra esposte valgono solo in assenza di vegetazione; in presenza di vegetazione il flusso associato all'evaporazione è ovviamente inferiore in quanto parte dell'energia radiante è assorbita dalle piante. All'interno di VADOSE tale riduzione è portata in conto attraverso la relazione (*Tratch*, 1996):

$$E_v = E^{-0.4\,LAI} \qquad (3.5g)$$

LAI =(superficie fogliaria proiettata al suolo)/(superficie suolo)

La presenza della vegetazione comporta però un incremento traspirativo, valutato dal codice attraverso le relazioni sperimentali di *Tratch* (1996):

$$T_r = \frac{2E_{pot}(-0.21 + 0.7\,LAI)}{z_{root}}\left(1 - \frac{z}{z_{root}}\right) A_n * F_l \qquad (3.6)$$

[1] $k_{soil}$ e $k_{air} = 0.025 W/mK$ sono i coefficienti di conduttività termica nel suolo e in atmosfera

$A_n$ =indice rappresentativo della forma e della distribuzione degli apparati radicali nel terreno; $T_s$ =temperatura sulla superficie del terreno (imposto dal programma come condizione al contorno superiore e valutato secondo la relazione di *Wilson*,1990): $T_s = T_a + \frac{1}{\gamma f(U)}(R_n - T_r - E_v)$.

Un esempio applicativo

Attraverso VADOSE sono state condotte analisi monodimensionali su un elemento di volume di terreno per mostrare l'effetto della temperatura sulla risposta idraulica dello schema. Il dominio di calcolo è riportato in fig. 3.1

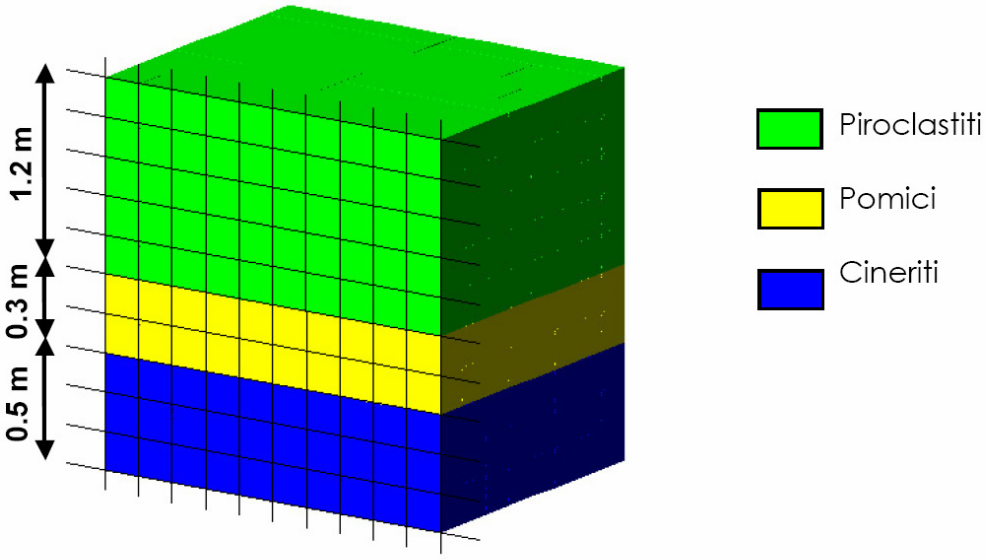


Figura 3.1: Schema di calcolo adottato, costituito da tre strati con proprietà idrauliche differenti

Il dominio di calcolo è costituito da uno strato iniziale di piroclastiti di spessore pari ad 1.2 m, da uno strato di pomici di spessore 0.3 m e da uno strato inferiore di 0.5 m di cineriti poggianti sui calcari. Le proprietà idrauliche in termini di curva caratteristica e funzione di permeabilità sono state assunte sulla base delle conoscenze di letteratura disponibili per tali materiali.

Oltre alle caratteristiche propriamente geotecniche è stato necessario introdurre le leggi associate alla capacità dei diversi strati nel trasmettere il calore. In particolare è stato necessario definire a tal fine due funzioni: la conduttività termica, ovvero la quantità di energia termica che attraversa uno strato di spessore unitario nell'unità di tempo e sotto un gradiente unitario di temperatura; il calore volumetrico specifico, ovvero la quantità di calore necessaria ad incrementare di 1°C la temperatura del terreno. Entrambe le grandezze crescono al crescere del contenuto d'acqua e sono state stimate con metodi empirici e semiempirici.

Il modello ovviamente richiede la definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno. Sulla base inferiore è stato imposta, come condizione al contorno, una pressione della fase liquida nulla, ipotizzando che i calcari fossero fratturati e fosse presente un contatto con acqua. Al piano campagna le condizioni al contorno sono state variate sulla base delle variazioni delle condizioni climatiche e hanno riguardato la temperatura, l'umidità relativa dell'aria, la velocità del vento ed l'altezza di pioggia. Le condizioni iniziali in termini di suzione sono state assunte coincidenti con quelle stazionarie di equilibrio idraulico (distribuzione idrostatica della pressione interstiziale al di sopra del substrato). Le condizioni iniziali in termini di temperatura sono state assegnate ipotizzando una distribuzione costante e pari alla temperatura media dell'aria all'inizio della simulazione.

I valori base che sono stati presi in considerazione per effettuare le simulazioni sono elencati in tabella 3.1.

| Temperatura | Umidità relativa | Velocità del vento | Vegetazione |
|---|---|---|---|
| 5° C | 50% | 0 m/s | LAI=0 |

Tabella 3.1 – Valori di riferimento utilizzati per definire le condizioni al contorno

Il pluviogramma di riferimento (fig.3.2) è rappresentato da un evento caratterizzato da due giorni di pioggia seguiti da giorni in cui l'altezza di pioggia è nulla (l'evento di pioggia iniziale ricalca il pluviogramma critico registrato nei giorni del 4 e 5 maggio del 1998 a Sarno, ai piedi del rilievo di Pizzo D'Alvano).

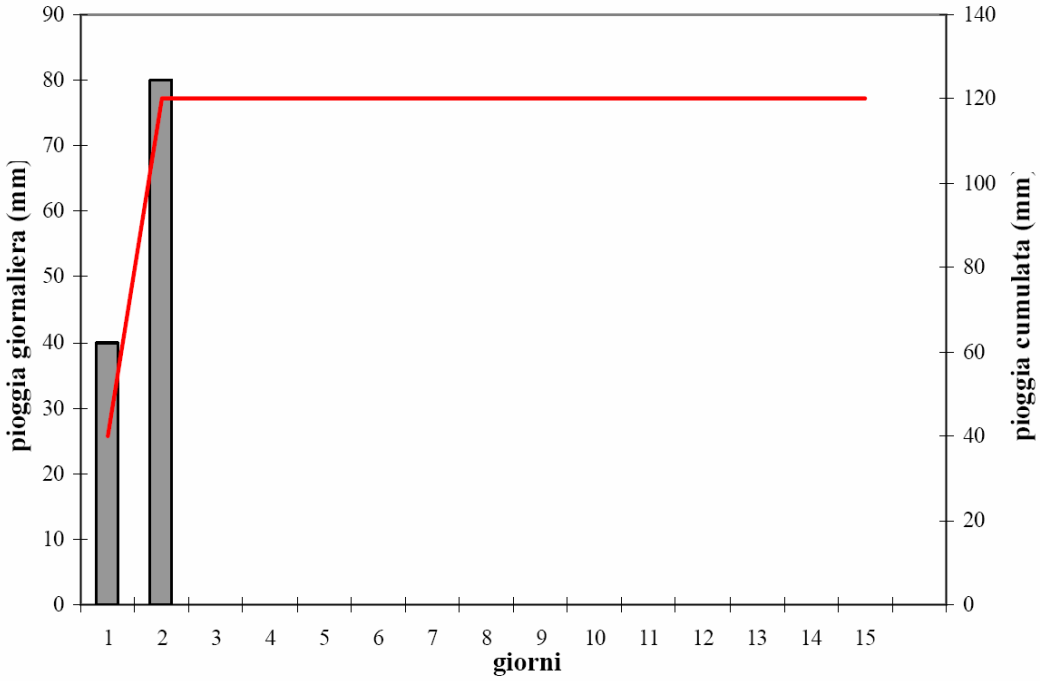


Figura 3.2 – Pluviogramma di riferimento utilizzato per l'analisi.

Per valutare la risposta dell'elemento di volume alle variazioni di temperatura sono state svolte tre simulazioni utilizzando tre diversi valori di temperatura (5°C, 15°C, 25°C), lasciando inalterati i valori degli altri parametri in ingresso (si veda tabella 2).
La prima considerazione è riferita all'andamento nel tempo della suzione a diverse profondità dal piano campagna. L'aliquota di acqua che si infiltra nel sottosuolo in seguito all'evento di pioggia, genera decrementi di suzione che, come ovvio, sono sempre meno significativi man mano che ci si approfondisce (figure da 3.3 a 3.6).

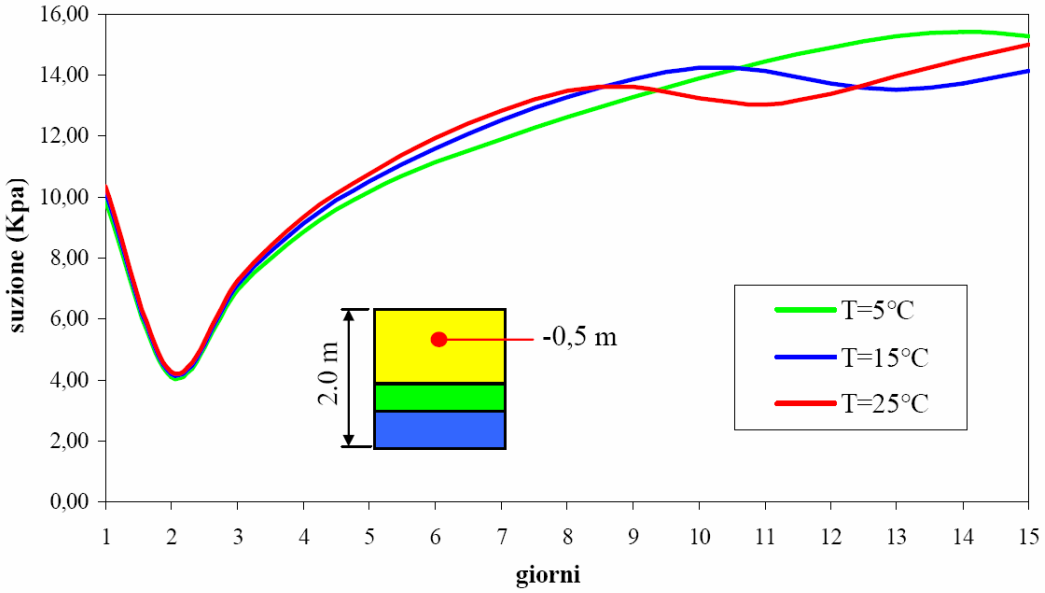


Figura 3.3 – Evoluzioni temporali di suzione  a 0.5 m dal p.c.

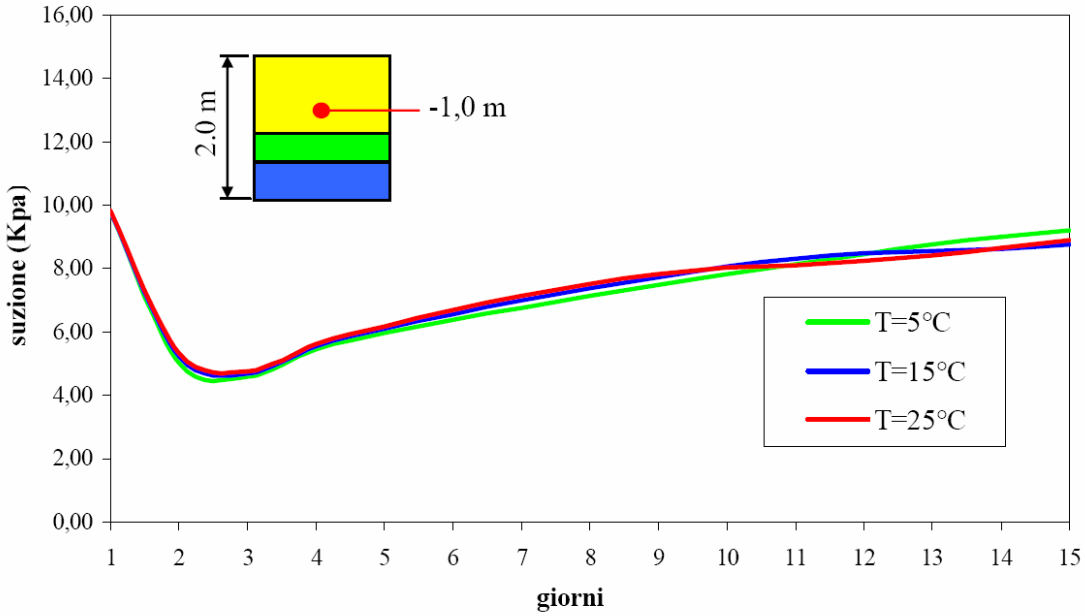


Figura 3.4 – Evoluzioni temporali di suzione  a 1 m dal p.c.

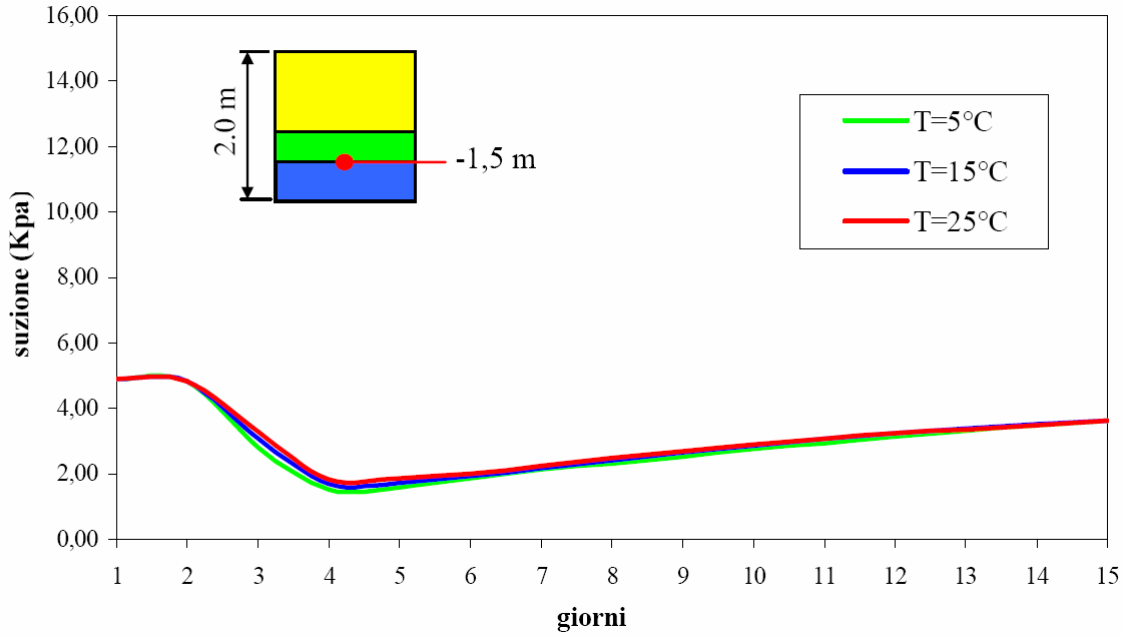


Figura 3.5 – Evoluzioni temporali di suzione  a 1.5 m dal p.c.

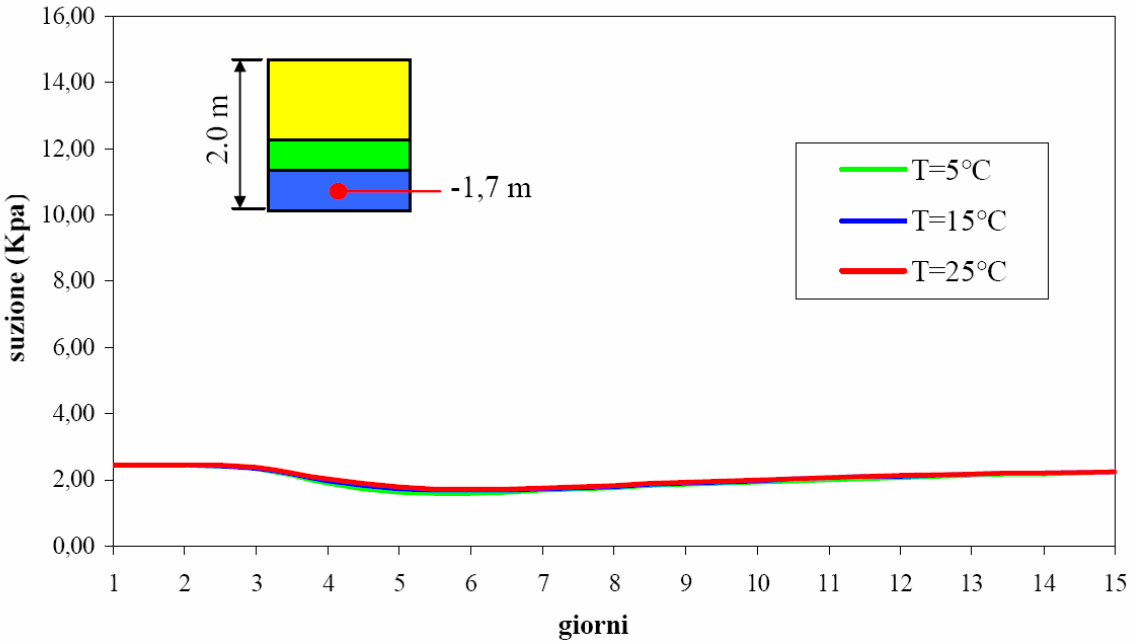


Figura 3.6 – Evoluzioni temporali di suzione  a 1.7 m dal p.c.

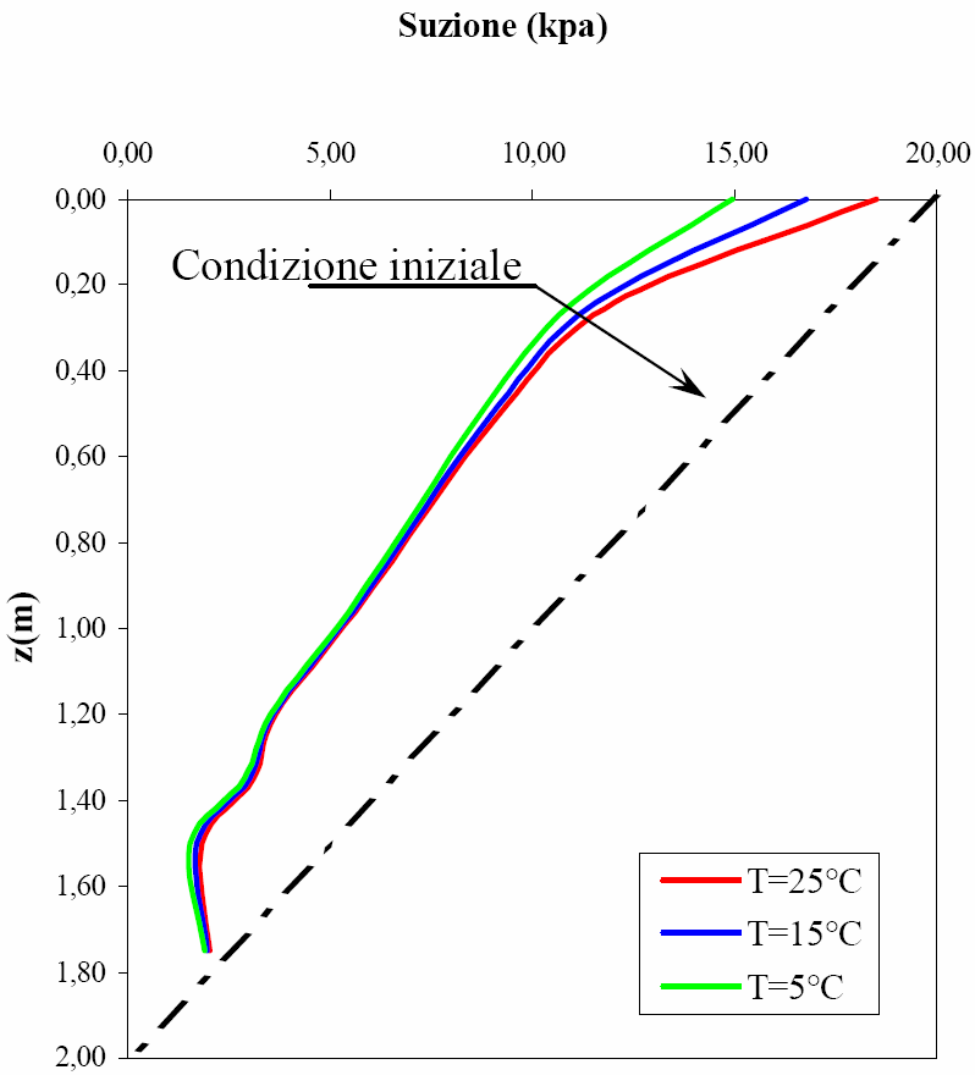


Figura 3.7 - Distribuzione della suzione lungo la verticale a 4 giorni dall'evento.

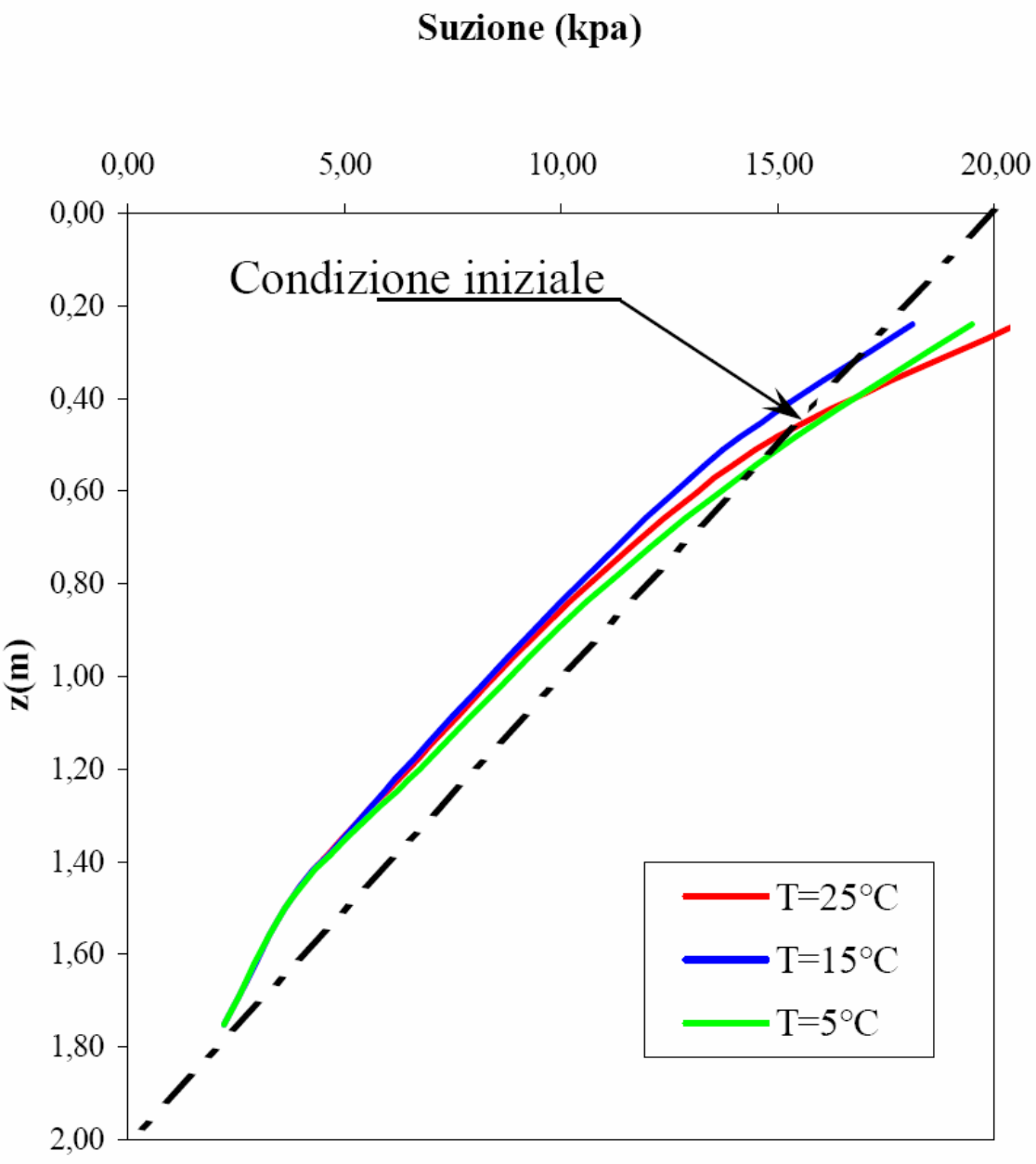


Figura 3.8 - Distribuzione della suzione lungo la verticale a 15 giorni dall'evento.

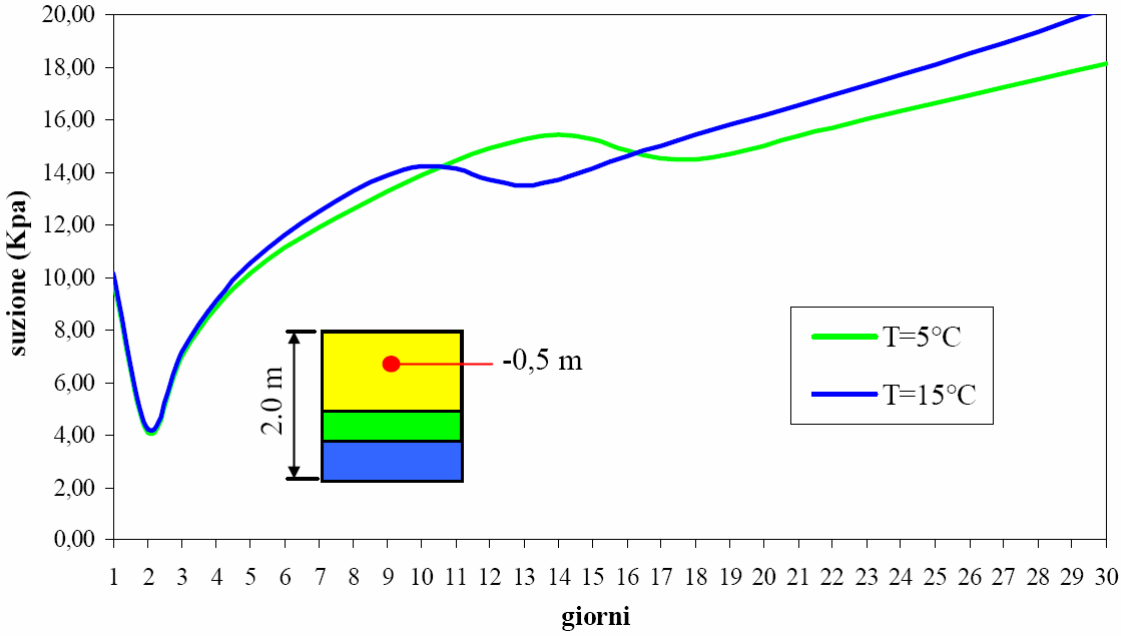


Figura 3.9 – Evoluzioni temporali di suzione  a 0.5 m dal p.c.

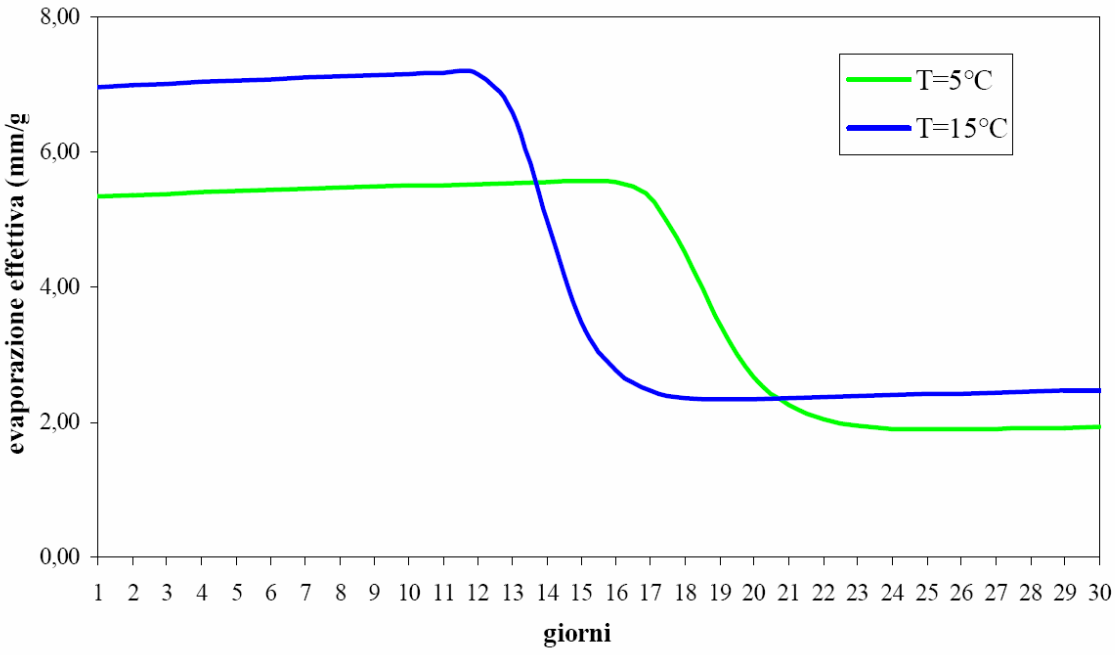


Figura 3.10 – Evoluzioni temporale dell'evaporazione

In particolare, si può constatare che a 1.7 metri di profondità dal p.c. le variazioni della suzione sono impercettibili ed indipendenti dalla temperatura (fig. 3.6).
Inoltre (Figure 3.3-3.6), nell'immediato post evento si riscontra un andamento della suzione praticamente indipendente dalla temperatura, mentre al passare del tempo si assiste ad una progressiva crescita della suzione che è più significativa per valori maggiori di temperatura (figg 3.3-3.6). Considerazioni analoghe possono essere svolte commentando i diagrammi di suzione al variare della profondità per prefissati istanti (figg. 3.7-3.8). E' interessante osservare come l'andamento della suzione non risulti essere invariabilmente crescente nel tempo ma presenti un'inversione nei primi 50-70 cm di profondità (fig. 3.9). Tale inversione è anticipata per temperature maggiori. Essa avviene proprio perché l'evaporazione (fig. 3.10) produce nelle zone superiori una riduzione energetica nella fase liquida in concomitanza con gli incrementi di energia prodotti, a profondità significative, dal fronte umido. Si genera pertanto un'inversione del moto che riduce la suzione.

## 4 Il codice TRIGRS

L'individuazione all'interno di un territorio di notevole estensione (es. provinciale o regionale) delle aree potenzialmente instabili per effetto di precipitazioni di intensità e durata variabile richiede l'impiego di appositi strumenti di calcolo che eseguano le cosiddette "analisi di stabilità a livello areale". I programmi in questione schematizzano l'area in esame tramite una griglia di celle tridimensionali, ognuna delle quali rappresenta la superficie esterna di una colonna di terreno rispettosa della stratigrafia del suolo, ed assegnano le condizioni al contorno relative all'interfaccia suolo-atmosfera sulla base di dati meteorologici.
Tra i codici di calcolo utili allo scopo, uno dei più diffusi è indubbiamente il TRIGRS (**T**ransient **R**ainfall **I**nfiltration and **G**rid-based **R**egional slope **S**tability), compilato da Baum et al. (2002) ed attualmente impiegato dallo United States Geological Survey (USGS) di Denver (Colorado, USA). Il TRIGRS è un codice scritto in linguaggio Fortran che, essendo in grado di analizzare le variazioni cicliche delle pressioni neutre (all'interno di un mezzo omogeneo, isotropo, saturo o parzialmente saturo) connesse a

piogge di intensità e durata variabili, fornisce un coefficiente di sicurezza che risulta variabile nel tempo e nello spazio.

Nei paragrafi seguenti verranno illustrate le principali caratteristiche di tale codice. In particolare, verranno richiamati alcuni aspetti teorici dei modelli adottati, ci si soffermerà sugli aspetti operativi e sarà illustrato un esempio applicativo.

Aspetti teorici

Lo studio degli effetti generati dalle precipitazioni sulla stabilità dei versanti viene affrontato da TRIGRS attraverso l'impiego di semplici modelli di infiltrazione e runoff combinati ad analisi di stabilità di tipo globale. Di tali modelli verrà nel seguito fornita una descrizione che riprenderà ed approfondirà alcuni degli aspetti presentati nel Rapporto "*Analisi della bibliografia* ".

*4.1.1 Infiltrazione*

Il modello di infiltrazione implementato in TRIGRS è basato sulla soluzione proposta da Iverson (2000) dell'equazione di Richards riguardante il moto di filtrazione in ipotesi unidirezionali. Per un pendio inclinato di $\theta$ rispetto all'orizzontale, l'equazione di Richards può essere scritta:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t}\frac{d\Theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K_L(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - sen\,\theta\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_L(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_Z(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos\theta\right)\right] \quad [4.1]$$

in cui $\Psi$ è l'altezza piezometrica, $\Theta$ è il contenuto volumetrico d'acqua, $\theta$ è l'inclinazione del pendio, $K_L$ e $K_Z$ sono le permeabilità in direzione rispettivamente parallela e normale al pendio riferite ad un sistema di riferimento locale di coordinate *x,y,z* riportato in fig. 4.1 (*x* tangente all'inclinazione del pendio, *y* tangente alla curva topografica, *z* normale al piano *xy*).

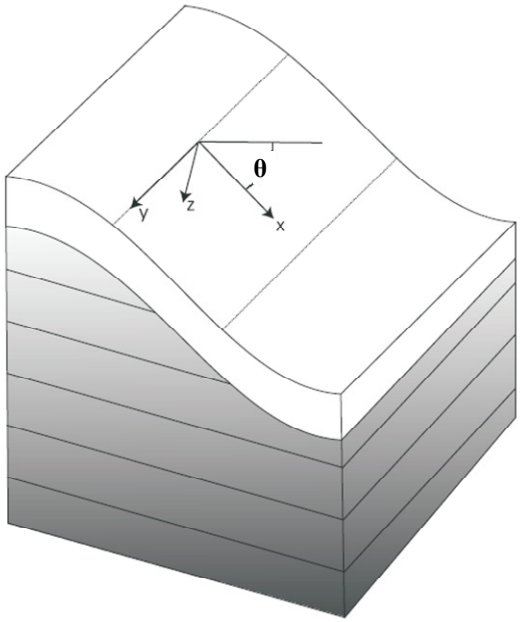


Figura 4.1. Codice TRIGRS: sistema di riferimento locale

Essendo sia il contenuto volumetrico d'acqua $\Theta$, che le permeabilità $K_L$ e $K_Z$ funzioni dell'altezza piezometrica $\Psi$, l'equazione [4.1] è non lineare. Le soluzioni si particolarizzano a seconda che venga fatta l'ipotesi di mezzo saturo o parzialmente saturo.

L'ipotesi di **mezzo saturo** semplifica il problema, perché consente di linearizzare l'equazione di Richards, ma risulta applicabile esclusivamente ai pendii con falda a piano campagna o caratterizzati da una frangia capillare che si estende fino a piano campagna (fig. 4.2). Con riferimento all'equazione [4.1], in un mezzo saturo è possibile assumere:

- $\frac{d\Theta}{d\Psi} = C_0$ costante;
- $K_L = K_Z = K_{sat}$.

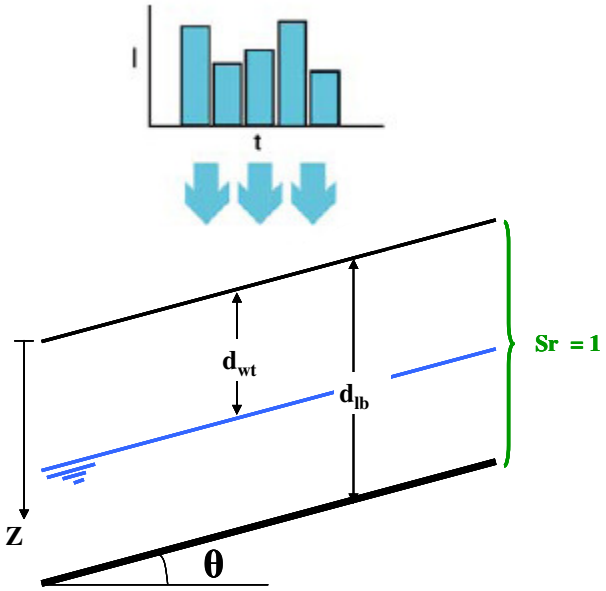


Figura 4.2. Schema di pendio a cui è applicabile il modello saturo: $d_{wt}$ è lo spessore della frangia capillare

L'equazione [4.1] diventa:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] \qquad [4.2]$$

detta equazione di diffusione lineare, in cui $D_0 = \frac{K_{sat}}{C_0}$ rappresenta la diffusività idraulica.

Per infiltrazione verticale, la [4.2] diventa:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \qquad [4.3]$$

dove $D_1 = D_0 \cos^2 \theta$ $Z = \frac{z}{\cos \theta}$ (*Z* è considerata lungo la verticale; *z* lungo la normale al p.c., come evidenziato in fig. 4.3).

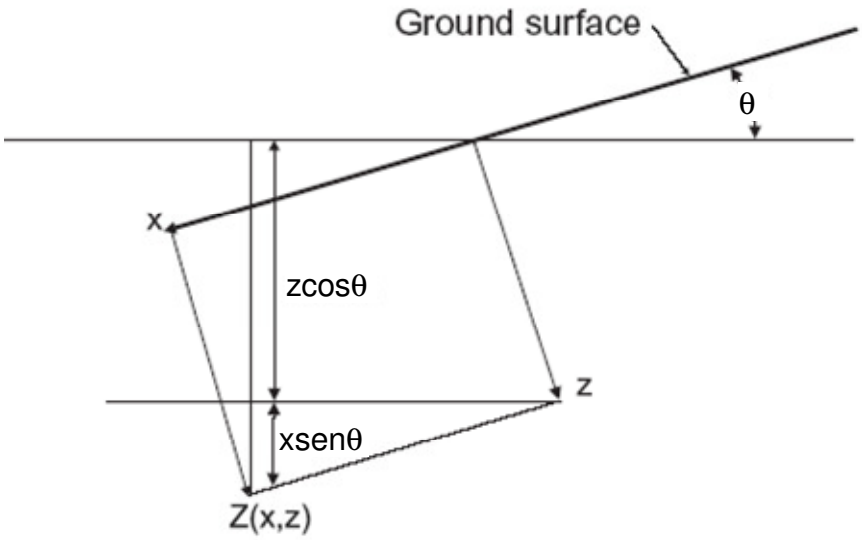


Figura 4.3. Sistema di coordinate utilizzate in TRIGRS (Baum et al., 2002)

La soluzione della [4.3] è evidentemente funzione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno imposte.

Date le condizioni al contorno di flusso variabile nel tempo a piano campagna e di contorno inferiore impermeabile posto a distanza infinita rispetto al piano campagna, la soluzione della [4.3] implementata in TRIGRS è :

$$\Psi(Z,t) = [Z-d]\beta + \\ +2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}\left[H(t-t_n)\left[D_1(t-t_n)^{\frac{1}{2}}\right]ierfc\left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}}\right]\right]- \\ -2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}\left[H(t-t_{n+1})\left[D_1(t-t_{n+1})^{\frac{1}{2}}\right]ierfc\left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}}\right]\right] \qquad [4.4]$$

in cui:

$\Psi$ è l'altezza piezometrica;

$Z = \frac{z}{\cos\theta}$ è la coordinata in direzione verticale;

z è la coordinata in direzione normale al piano campagna;

*d* è la profondità in condizioni stazionarie del pelo libero della falda dal piano campagna misurata lungo Z; $\beta = \lambda \cos\theta$

. $\lambda = \cos\theta - \left[\frac{I_Z}{K_Z}\right]_{LT}$ ;

$I_Z$ è il flusso verticale in superficie stazionario iniziale;

$K_Z$ è la permeabilità satura;

$I_{nZ}$ è il flusso in superficie in corrispondenza del $n^{mo}$ intervallo di tempo;

*N* è il numero totale degli intervalli di tempo;

$H(t - t_n)$ è una funzione pari a 0 per $t \leq t_n$ e pari a 1 per $t > t_n$.;

$ierfc(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp\left(-\eta^2\right) - \eta erfc(\eta)$, ossia *ierfc* rappresenta il primo integrale della funzione di errore complementare (Carslaw e Jaeger, 1959).

Tale soluzione presenta una componente stazionaria ed una transitoria. La componente stazionaria, fornita dal termine $[Z - d]\beta$ ,è funzione delle condizioni iniziali (posizione del pelo libero della falda, flusso di partenza) e dell'inclinazione del pendio; la componente transitoria è determinata dalla intensità e dalla durata dei flussi verticali. In particolare la fig. 4.4 illustra un esempio di serie di precipitazioni che l'equazione [4.1] è in grado di modellare.

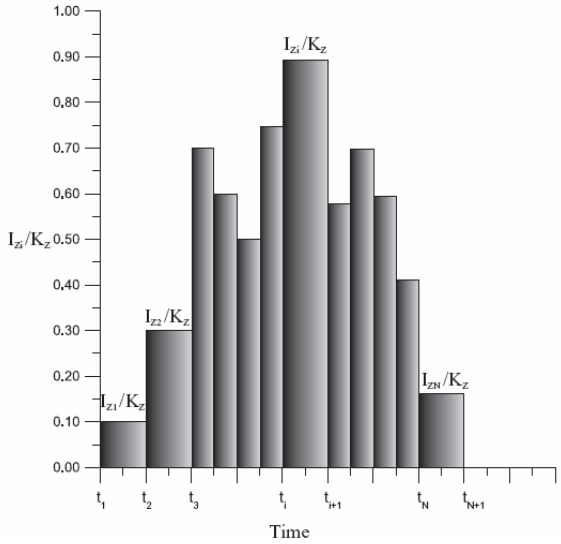


Figura 4.4. Ipotesi di intervalli pluviometrici diversi per intensità e durata inseribili come dati di input in TRIGRS (Baum et al., 2002)

Se, invece, il contorno inferiore impermeabile è ipotizzato ad una distanza finita rispetto al piano campagna, la soluzione della [4.3] diventa:

$$\Psi(Z,t) = [Z-d]\beta +$$
$$+2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}H(t-t_n)\left[D_1(t-t_n)^{\frac{1}{2}}\right]\sum_{m=1}^{\infty}\left\{ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}}\right]+ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}}\right]\right\}-$$
$$-2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_Z}H(t-t_{n+1})\left[D_1(t-t_{n+1})^{\frac{1}{2}}\right]\sum_{m=1}^{\infty}\left\{ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}}\right]+ierfc\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}}\right]\right\}$$
[4.5]

in cui $d_{LZ}$ rappresenta la profondità del contorno impermeabile rispetto al piano campagna misurata lungo Z, mentre le altre notazioni coincidono con quelle riportate nella [4.4]

Le equazioni [4.4] e [4.5] rappresentano, pertanto, le soluzioni relative a due differenti condizioni di sottosuolo. La [4.4], relativa al semispazio indefinito, è applicabile nei casi in cui le proprietà idrauliche del terreno si mantengono sostanzialmente uniformi con la profondità (fig. 4.5a). Al contrario, la soluzione proposta dalla [4.5] è utilizzabile quando da una certa profondità in poi è riscontrabile una netta riduzione di permeabilità (fig. 4.5b).

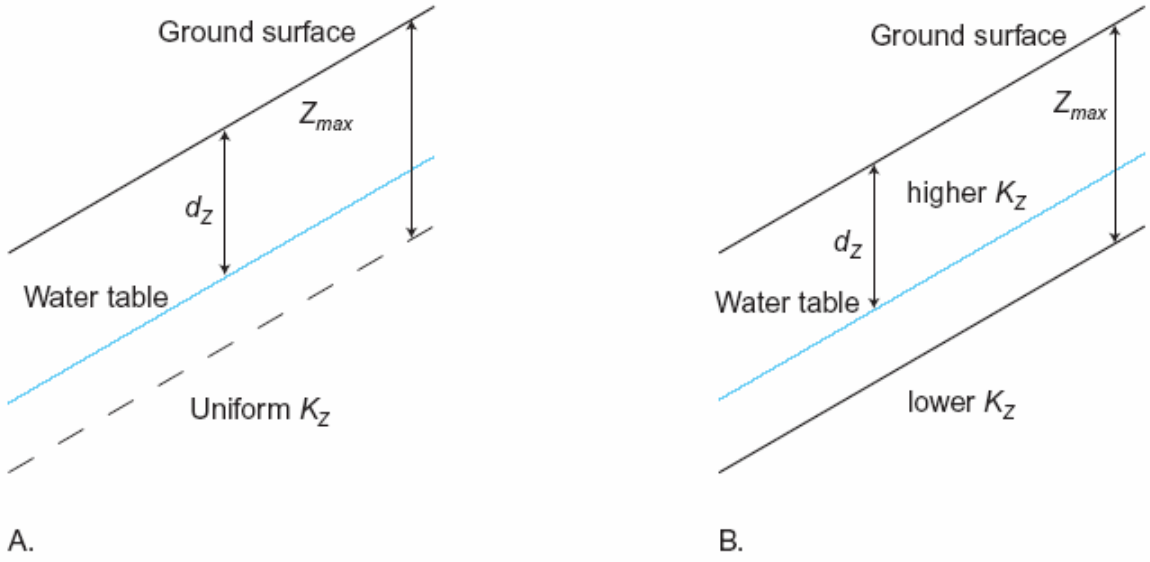


Figura 4.5. Differenti condizioni al contorno ipotizzabili: contorno inferiore posto a distanza infinita dal piano campagna (A); contorno inferiore posto a distanza finita dal piano campagna (B) (Baum et al., 2002)

Durante ogni fase di calcolo, TRIGRS controlla il rispetto del limite fisico

$$\Psi(Z, t) \leq Z\,\beta \qquad [4.6]$$

che, in corrispondenza di ogni $Z$ ed in ogni istante $t$, impedisce all'altezza piezometrica, calcolata con la [4.4] o la [4.5], di superare quella che si avrebbe ipotizzando condizioni di flusso stazionario con pelo libero della falda a piano campagna ed infiltrazione verticale in superficie determinata da $\left[\frac{I_Z}{K_Z}\right]_{LT}$. Se dovesse rilevare tale anomalia, TRIGRS riduce automaticamente la $\Psi(Z, t)$ al valore $Z\,\beta$.

L'assunzione di mezzo saturo ha il limite evidente di essere valida esclusivamente all'interno della frangia capillare ed al di sotto del pelo libero della falda, ma non al di sopra della frangia capillare ($Z < d_{uz}$ di fig. 4.6), in cui il terreno è parzialmente saturo.

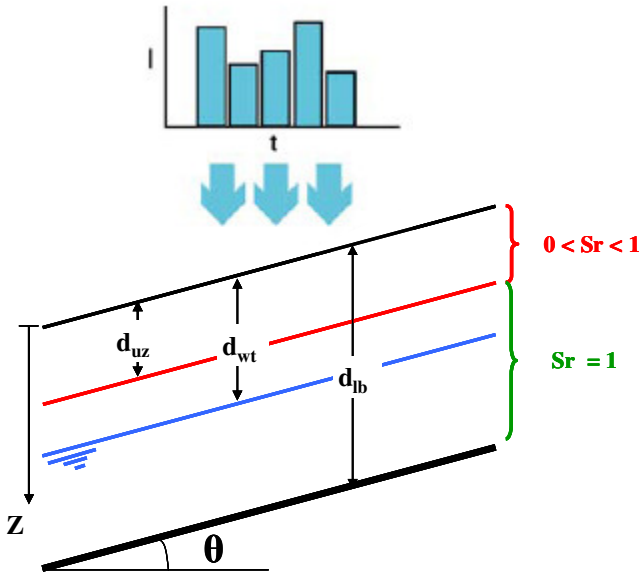


Figura 4.6. Schema di pendio a cui è applicabile il modello accoppiato non saturo/saturo: lo spessore della frangia capillare è dato da $d_{wt} - d_{uz}$ ; il terreno è saturo per $Z \geq d_{uz}$

Per un **terreno parzialmente saturo**, l'equazione [4.1] diventa:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\partial}{\partial Z}\left[ K(\Psi) \cdot \left( \frac{\partial \Psi}{\partial Z} - 1 \right) \right] \qquad [4.7]$$

Gardner (1958) propone per la permeabilità K ed il contenuto volumetrico d'acqua Θ le espressioni

$$K(\Psi) = K_{sat}\, e^{\alpha \Psi^*} \quad [4.8]$$

$$\Theta(\Psi) = \Theta_r + (\Theta_{sat} - \Theta_r)\, e^{\alpha \Psi^*} \quad [4.9]$$

in cui

$K_{sat}$ è la permeabilità satura del terreno;

$\Theta_r$ è il contenuto volumetrico d'acqua residuo;

$\Theta_{sat}$ è il contenuto volumetrico d'acqua saturo;

$\Psi^* = \Psi - \Psi_0$ ($\Psi_0$ costante);

$\alpha$ è ricavabile sperimentalmente dalle curve caratteristiche del terreno come riportato in fig. 1.7 ($\frac{1}{\alpha}$ rappresenta, in particolare, l'altezza della frangia capillare).

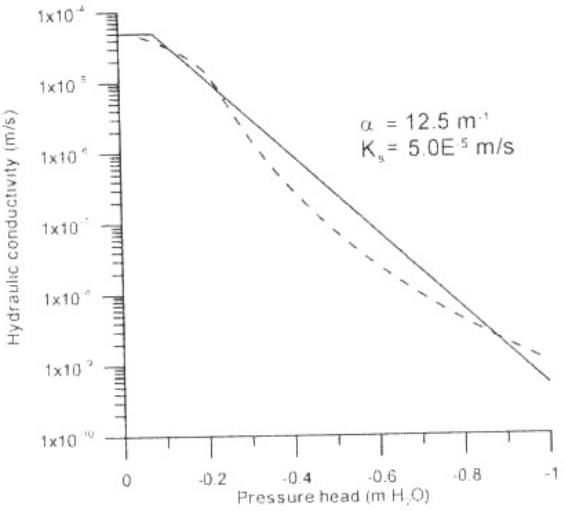


Figura 4.7. Permeabilità di un mezzo parzialmente saturo in funzione dell'altezza piezometrica: estrapolazione del parametro □ da inserire nelle equazioni [1.8] e [1.9] (Savage et al., 2004)

Sostituendo le [4.8] e [4.9] nella [4.7] si ottiene:

$$\frac{\partial^2 K}{\partial Z^2} + \alpha \frac{\partial K}{\partial Z} = \frac{\alpha(\Theta_{sat} - \Theta_r)}{K_{sat}} \frac{\partial K}{\partial t} \quad [4.10]$$

Per la risoluzione della [4.10], le condizioni al contorno dello strato parzialmente saturo sono:

- per Z=0: $\frac{1}{\alpha}\frac{\partial K}{\partial Z} + K = I_{nZ}$ ($I_{nZ}$ rappresenta il flusso di superficie di assegnata intensità in corrispondenza dell'intervallo di tempo $n^{mo}$);

- per Z= $d_{uz}$ : $K = K_{sat}$;

In particolare, la condizione al contorno per Z = 0 si ottiene sostituendo nella legge di Darcy

$$q = K(Z,t)\left[\frac{\partial \psi}{\partial Z} + 1\right] \qquad [4.11]$$

l'equazione [4.8] ottenendosi

$$q = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial K}{\partial Z} + K \quad [4.12]$$

Le condizioni iniziali per la risoluzione della [4.10] sono:

- per $Z = d_{uz}$ (sommità della frangia capillare): altezza piezometrica $\Psi_0 = -\frac{1}{\alpha}$;

- per $0 \leq Z < d_{uz}$ (strato parzialmente saturo): $K(Z,0) = I_{ZLT} - (I_{ZLT} - K_{sat})e^{-\alpha(Z-d_{uz})}$ ($I_{ZLT}$ è il flusso di superficie stazionario iniziale).

La soluzione dell'equazione [4.10] che si ricava è data da:

$$K(Z,t) = \sum_{n=1}^{N} H(t-t_n)\left[\begin{array}{l} I_{nZ} - (I_{nZ} - K_{sat})e^{-\alpha Z} - 4(I_{nZ} - I_{ZLT})\exp\left[-\frac{\alpha K_{sat} t}{4(\Theta_{sat} - \Theta_r)}\right]\cdot \\ \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{sen\alpha\lambda_n(d_{uZ} - Z)sen(\alpha\lambda_n d_{uZ})}{1 + \frac{d_{uZ}}{2} + 2\lambda_n^2 d_{uZ}} \exp\left[-\frac{\alpha\lambda_n^2 K_{sat}(t-t_n)}{(\Theta_{sat} - \Theta_r)}\right] \end{array}\right] -$$

$$- \sum_{n=1}^{N} H(t-t_{n+1})\left[\begin{array}{l} I_{nZ} - (I_{nZ} - K_{sat})e^{-\alpha Z} - 4(I_{nZ} - I_{ZLT})\exp\left[-\frac{\alpha K_{sat} t}{4(\Theta_{sat} - \Theta_r)}\right]\cdot \\ \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{sen\alpha\lambda_n(d_{uZ} - Z)sen(\alpha\lambda_n d_{uZ})}{1 + \frac{d_{uZ}}{2} + 2\lambda_n^2 d_{uZ}} \exp\left[-\frac{\alpha\lambda_n^2 K_{sat}(t-t_{n+1})}{(\Theta_{sat} - \Theta_r)}\right] \end{array}\right] \qquad [4.13]$$

Dalle eq. [4.8] e [4.13] si ottiene l'andamento delle altezze piezometriche nel tempo lungo Z

$$\Psi(Z,t) = \frac{1}{\alpha}\left[\ln\left(\frac{K(Z,t)}{K_{sat}}\right) - 1\right] \qquad [4.14]$$

che, a sua volta, tramite l'eq. [4.9] consente di ricavare l'andamento del contenuto volumetrico d'acqua $\Theta(Z,t)$.

Per studiare il problema in maniera completa e cioè calcolare la variazione delle $\Psi$ in tutto lo strato di terreno, si deve accoppiare tale "modello non saturo" (valido per $0 \leq Z < d_{uz}$) al "modello saturo" descritto precedentemente (valido per $d_{uz} \leq Z \leq d_{lb}$). A tal proposito, per calcolare la variazione dell'altezza piezometrica $\Psi$ interna al mezzo saturo, si dovrà entrare nell'eq. [4.4] (o [4.5]) inserendo come condizione al contorno alla sommità della frangia capillare ($Z = d_{uz}$) il flusso $q(d_{uz}, t)$ ricavabile sostituendo la [4.14] nella [4.12].

*4.1.2 Runoff*

Come è noto, se l'intensità di pioggia eccede l'infiltrabilità del suolo, ossia la sua capacità di assorbimento, una parte di essa non è in grado di infiltrarsi e, di conseguenza, ruscella superficialmente lungo il pendio (fenomeno di runoff). La questione può avere un peso non indifferente se l'area oggetto di studio contempla zone urbanizzate che presentano un'infiltrabilità spesso ridottissima, essendo caratterizzate da numerose superfici pavimentate. Pertanto, in fase di analisi risulta necessario operare una ridistribuzione delle portate idriche non infiltratesi in determinate celle della griglia a celle adiacenti. Il modello di runoff adottato da TRIGRS è piuttosto semplice. In corrispondenza di ogni cella, l'infiltrazione $I$ è data dalla somma della precipitazione P, che si abbatte direttamente sulla cella, e del runoff $R_u$ proveniente dalle celle di monte come ruscellamento superficiale:

$$I = P + R_u \qquad [4.15]$$

Se la somma $P + R_u$ supera l'infiltrabilità del suolo $I_{max}$ (coincidente con la permeabilità satura nel mezzo saturo), la porzione eccedente diventa runoff $R_d$ :

$$R_d = P + R_u - I_{max} \qquad [4.16]$$

Tale quantità $R_d$ viene automaticamente ed istantaneamente distribuita da TRIGRS alle celle adiacenti poste a valle, salvaguardando il bilancio di massa ad ogni step di calcolo.

*4.1.3 Analisi di stabilità*

La stabilità del versante viene analizzata da TRIGRS attraverso l'impiego del modello concettuale di "pendio indefinito". Ogni cella si ritrova, pertanto, caratterizzata da un'inclinazione costante e da pelo libero della falda parallelo al piano campagna, presentando, quindi, condizioni di sollecitazione che si ripetono identicamente lungo ogni verticale.

La stabilità viene verificata attraverso l'introduzione di un coefficiente di sicurezza *FS*, che è dato ad ogni profondità Z dal rapporto tra la resistenza tangenziale del mezzo $\tau_{lim}$ e la tensione di taglio agente $\tau$:

$$FS = \frac{\tau_{\lim}}{\tau} \quad [4.17]$$

che, in ipotesi di pendio indefinito, vale:

$$FS(Z;t) = \frac{\tan\varphi'}{\tan\theta} + \frac{c - \psi(Z;t)\cdot\gamma_w\cdot\tan\varphi'}{\gamma\cdot Z\cdot sen\theta\cdot\cos\theta} \qquad [4.18]$$

in cui

- $c$ è la coesione del terreno;
- $\varphi$' è l'angolo d'attrito del terreno;
- $\theta$ è l'inclinazione del pendio;
- $\gamma$ è il peso dell'unità di volume del terreno;
- $\gamma_w$ è il peso specifico dell'acqua;

- $\Psi(Z;t)=\frac{u_w(Z;t)}{\gamma_w}$ è l'altezza piezometrica

Pertanto, poiché l'applicazione del modello di infiltrazione rende nota la $\Psi(Z;t)$, tramite la [4.18] è possibile conoscere ad ogni istante e per ogni profondità Z il coefficiente di sicurezza FS in corrispondenza di qualsiasi cella della griglia.

Aspetti operativi

Per poter avviare **TRIGRS**, è necessaria da parte dell'utente la stesura di un apposito file di inizializzazione (da salvare come *trigrs.ini*) che riporta i nomi ed i percorsi dei file di input contenenti i parametri necessari per le analisi di ogni cella della griglia.

Il ***trigrs.ini*** è un file di testo che controlla i file di input (opportunamente redatti in precedenza), i file di output, nonché alcune costanti necessarie per le analisi. È composto da righe di comando, ognuna delle quali è preceduta da una riga di commento.

La prime sei righe di comando riportano il nome del progetto ed alcuni dati numerici riguardanti il numero di celle, la storia pluviometrica che si vuole assegnare, le condizioni iniziali e le proprietà del terreno. Se i valori numerici sono positivi, tali dati sono costanti per tutte le celle; al contrario, la lettura di valori negativi obbliga il programma a leggere un apposito file di griglia, il cui percorso deve essere specificato nelle righe successive. Le proprietà richieste per il terreno saturo sono: coesione, angolo d'attrito, peso dell'unità di volume, diffusività idraulica e permeabilità satura. Per il terreno parzialmente saturo, alle precedenti sono da aggiungere: contenuto volumetrico d'acqua saturo, contenuto volumetrico d'acqua residuo, parametro □ (vedi eq. [4.9] ).

Tra i dati numerici deve essere anche precisato l'istante di tempo *t* a cui faranno riferimento esclusivo i risultati delle analisi. Per tale motivo, per conoscere l'evoluzione nel tempo del coefficiente di sicurezza *FS*(*Z*;t) è necessario far girare il programma per differenti valori di tempo *t*.

Le righe di comando poste immediatamente al di sotto richiamano i file di input da cui TRIGRS ricava le informazioni variabili da cella a cella. Alcuni di questi file di input risultano necessari per risolvere le problematiche connesse al calcolo del runoff.
Le righe seguenti i file di input riportano i file di output, che vengono generati su richiesta dell'utente e riguardano informazioni relative a: coefficiente di sicurezza, pressioni neutre, runoff.
Una volta terminata la stesura del file di inizializzazione, può essere lanciato il TRIGRS. Quest'ultimo apre il *trigrs.ini*, legge i file di input, esegue i calcoli e salva i risultati su altri file di output. Tanto i file di input quanto quelli di output sono sotto forma di file di testo e di file di griglia (ASCII *grid files*). Questi ultimi, in particolare, sono inseribili in un sistema informativo geografico (GIS), che ne consente la visualizzazione grafica.

Per calcolare il runoff, il codice TRIGRS è affiancato dall'apposito *utility software* **TopoIndex** (Topographic Index), che ha lo scopo di:

- classificare le celle in ordine decrescente di quota assoluta;
- attribuire ad ogni cella l'elenco delle celle adiacenti che si presentano maggiormente inclinate verso valle.

TopoIndex, pertanto, legge la geometria al fine di fornire informazioni utili per la ripartizione del runoff di ogni cella, che verrà calcolato da TRIGRS.
Come TRIGRS, anche TopoIndex necessita del proprio file di inizializzazione (da salvare come *topoindex.ini*), la cui struttura è molto simile a quella del TRIGRS.
Le prime tre righe di comando del ***topoindex.ini*** riportano il nome del progetto ed istruzioni esecutive riguardanti la dimensione della griglia, il numero massimo di iterazioni delle analisi e le percentuali di ripartizione del runoff tra le celle adiacenti. L'utente ha la possibilità di decidere tali percentuali secondo gli schemi riportati in fig. 4.8: ad esempio, può decidere che il runoff venga trasferito solo alla cella maggiormente inclinata verso valle, oppure che venga ripartito in proporzione all'inclinazione delle celle adiacenti ecc.
Nel seguito del *topoindex.ini* sono riportati i nomi ed i percorsi da cui prelevare due specifici file di griglia. Il primo richiama il DEM (Digital Elevation Model) dell'area e, quindi, deve assegnare ad ogni cella la corrispondente quota assoluta. Il secondo deve

assegnare ad ogni cella un particolare numero di identificazione che permette di individuare univocamente quale cella confinante è la più inclinata tra quelle poste a quota inferiore.

Una volta redatto il *topoindex.ini*, è possibile far girare TopoIndex. I risultati vengono riportati in una serie di file di output, che riclassificano le celle in ordine decrescente di quota assoluta ed assegnano ad ogni cella l'elenco delle celle adiacenti che si presentano maggiormente inclinate verso valle (con annessi coefficienti di ripartizione del runoff): tali file di output vengono richiamati da TRIGRS per la distribuzione delle portate di ruscellamento (TopoIndex va, pertanto, fatto girare prima di TRIGRS).

| Exponent | Weighting factor | Distribution pattern |
|---|---|---|
| $\omega < 0$ | $w_{ij1} = \left(\frac{\pi}{4} - \delta\right) \Big/ \left(\frac{\pi}{4}\right)$<br>$w_{ij2} = \delta \Big/ \left(\frac{\pi}{4}\right)$; if two cells<br>$w_{ij} = 1$; if only one cell | Narrow, flow is diverted only to the one or two neighboring downslope cells, $j$ and $k$, that straddle the steepest downslope path. If the steepest downslope path is aligned with a grid direction or diagonal, then flow is diverted only to the neighboring cell in that direction. The weighting factors depend on the angle $\delta$ between the D8 flow direction and the steepest slope. Here the exponent, $\omega$, serves only as a flag. |
| $\omega = 0$ | $w_{ij} = \frac{1}{n}$ | Fan-shaped, uniform distribution among adjacent downslope cells regardless of slope |
| $0 < \omega \leq 20$ | $w_{ij} = s_{ij}^{\omega} \Big/ \sum_{j=1}^{j=n} s_{ij}^{\omega}$ | Fan-shaped, the positive value of $\omega$ results in weighting factors that favor steeper flow paths. The pattern becomes more strongly skewed toward the steepest downslope path as $\alpha$ increases. |
| $\omega > 20$ | $w_{ij} = 1$; cell on steepest path<br>$w_{ij} = 0$; other downslope cells | Narrow, flow is diverted only to the neighboring cell that is on the steepest downslope path (D8 method, O'Callaghan and Mark, 1984) |

Figura 4.8. Fattori di peso utilizzati da TRIGRS per la distribuzione del runoff (Baum et al., 2002)

Nel paragrafo successivo verrà presentato un semplice esempio applicativo che darà la possibilità di entrare nel dettaglio dei file di inizializzazione di TRIGRS e TopoIndex.

Esempio applicativo

In tale paragrafo verrà riportato un semplice tutorial applicativo presente nel manuale di TRIGRS (Baum et al., 2002), che ha lo scopo di illustrare all'utente le istruzioni necessarie per l'impiego del codice.

L'applicazione riguarda l'analisi di stabilità di una regione avente una superficie di 10000 $m^2$ (schematizzata attraverso una griglia formata da 100 celle, ognuna delle quali ha un'area di 100 $m^2$) e caratterizzata da geometria e proprietà fisiche variabili nello spazio. Sul contorno di tale area vengono applicati due eventi piovosi: il primo ha un'intensità di $3 \cdot 10^{-7}$ m/s ed una durata di 48 ore, il secondo presenta un'intensità di $9 \cdot 10^{-5}$ m/s ed una durata di 12 ore.

### *4.3.1 Stesura del file topoindex.ini*

La prima operazione che l'utente deve compiere è la stesura del file di inizializzazione di TopoIndex, che dovrà chiamarsi *topoindex.ini*. Esso è un file di testo caratterizzato da righe di commento (evidenziate in grassetto in fig. 4.9) che precedono sempre le corrispondenti righe di comando; i numeri contenuti nelle righe di comando devono essere separati da una virgola e da almeno uno spazio. Nel seguito verranno analizzati nel dettaglio i contenuti delle differenti righe.

```
Name of project (up to 255 characters)
Tutorial example data for TopoIndex analysis
Rows, Columns, flow-direction numbering scheme (ESRI=1, TopoIndex=2)
10,     10,     2
Exponent, Number of iterations
-1,        10
Name of elevation grid file
data\tutorial\dem.asc
Name of direction grid
data\tutorial\directions.asc
Save listing of D8 downslope receptor cells?  Enter T (.true.) or F (.false.)
F
Save grid of D8 downslope receptor cells? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save cell index number grid ? Enter T (.true.) or F (.false.)
F
Save list of cell number and corresponding index number?  Enter T (.true.) or F
(.false.)
T
Save flow-direction grid remapped from ESRI to TopoIndex? Enter T (.true.) or F
(.false.)
F
Name of folder to store output?
data\tutorial\
ID code for output files? (8 characters or less)
tutorial
```

Figura 4.9. Il file di inizializzazione *topoindex.ini* (Baum et al., 2002)

La riga di comando 1 contiene il nome del progetto, che può avere un massimo di 255 caratteri: nell'esempio proposto si chiama "*Tutorial data for Topoindex analysis*".

La riga di comando 2, oltre a contenere il numero delle righe (10) e delle colonne (10) della griglia, riporta il numero identificativo dello schema usato nel file griglia *directions.asc* (richiamato nella riga 5), esplicativo delle direzioni di flusso della griglia: il numero 1 è rappresentativo della convenzione utilizzata da ESRI (la ESRI è l'azienda che distribuisce il software ArcGis, con cui può interfacciarsi TRIGRS), mentre il numero 2 identifica la convenzione adottata da TopoIndex (quest'ultima è stata adottata nell'applicazione in esame).

Nella riga di comando 3 è riportato un esponente rappresentativo del criterio di distribuzione scelto per la ripartizione del runoff alle celle adiacenti, che verrà operata da TRIGRS. Ad esempio, una volta classificate le celle in funzione della maggiore

inclinazione offerta verso valle rispetto alla cella in esame, scegliendo l'esponente "-1" verrà fatta arrivare la portata di ruscellamento alle due celle confinanti maggiormente inclinate verso valle in proporzione alle corrispondenti pendenze (fig. 4.10).

La riga di comando 3 contiene, inoltre, il numero massimo di iterazioni che TopoIndex dovrà eseguire. Tale numero è strettamente connesso alle dimensioni della griglia ed il manuale consiglia di porlo almeno pari a $1+\frac{n°righe+n°colonne}{20}$. Nell'applicazione in esame è stato deciso un numero massimo di iterazioni pari a 10.

Nella riga di comando 4 l'utente deve riportare la posizione del file di griglia *dem.asc* (già precedentemente realizzato), contenente le quote assolute in superficie di ciascuna cella della griglia (fig. 4.11). In particolare, il file *dem.asc* contiene la dimensione geometrica di ogni cella e le coordinate del punto della griglia posto inferiormente e a sinistra (*xllcorner*, *yllcorner*); le celle alle quali non si volesse assegnare alcuna quota, devono presentare il valore convenzionale -9999 (quest'ultima convenzione varrà anche per gli altri file di griglia).

Nella riga di comando 5 è, invece, richiamato il percorso del file *directions.asc*, che permette di individuare univocamente, in corrispondenza di ogni cella, quale tra quelle confinanti poste a quota inferiore risulta la più inclinata (fig. 4.12). Sulla base di quanto scelto nella riga 2, i valori assegnati ad ogni cella devono rispettare la convenzione TopoIndex (anziché quella ESRI), ossia i numeri devono essere compresi tra 1 e 9. Come riportato in fig. 4.13, se, ad esempio, la cella maggiormente inclinata verso valle è posta alla sinistra della cella esaminata, a quest'ultima deve essere assegnato il numero 4.

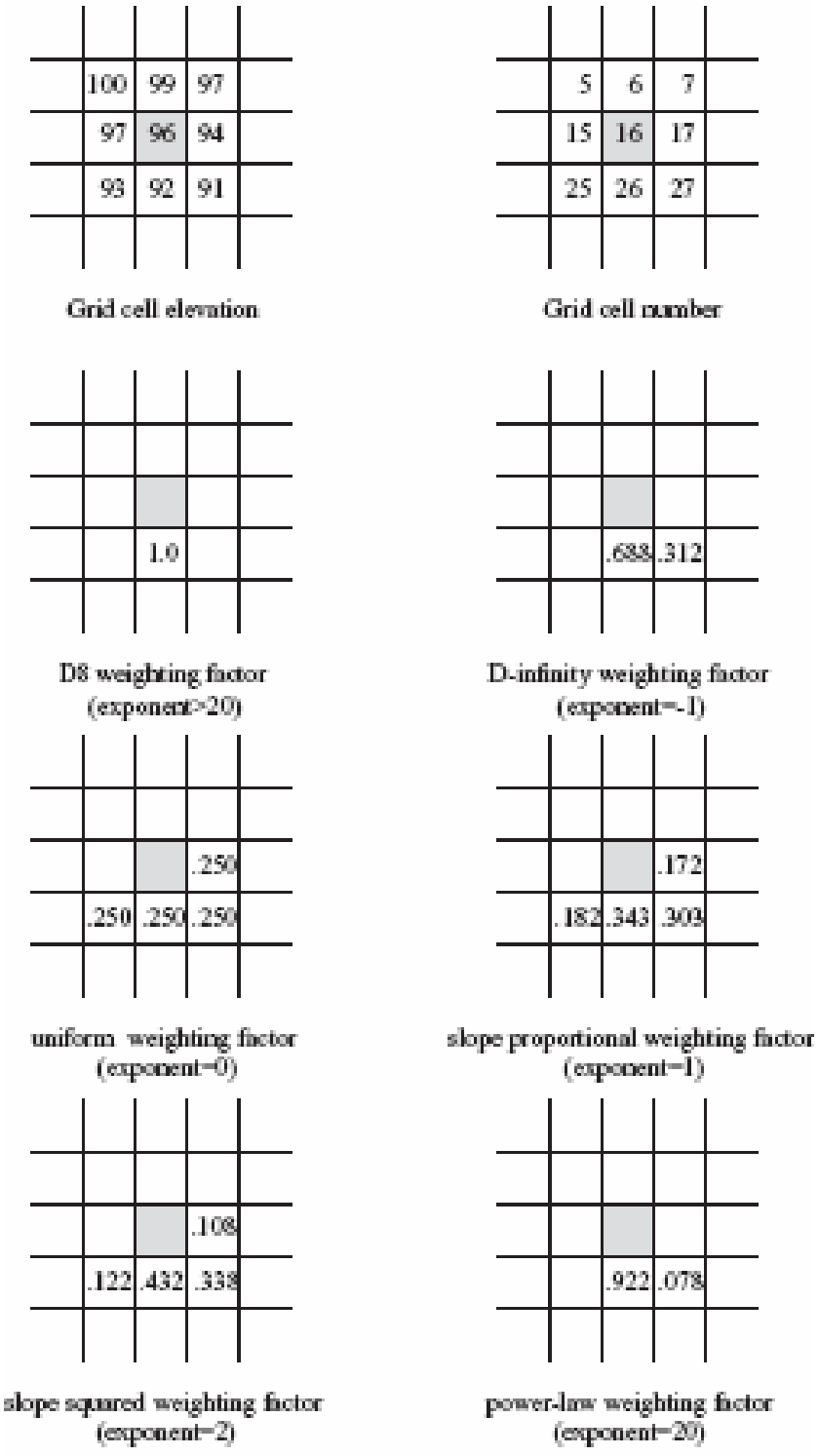


Figura 4.10. Criteri adottati da TRIGRS per la distribuzione del runoff dalla cella n.16 posta a quota 96 (Baum et al., 2002)

```
ncols         10
nrows         10
xllcorner     563435
yllcorner     5258305
cellsize      10
NODATA_value  -9999
103 102 102 101 100 99 97 95 94 92
100 100 100 99 97 96 94 92 90 88
97 97 96 95 93 92 91 88 85 82
94 93 92 90 89 87 84 82 79 76
90 89 87 86 84 81 78 75 74 72
86 84 83 80 77 75 72 70 69 69
81 79 76 74 72 69 68 67 68 71
76 73 71 69 68 66 67 68 71 73
71 69 68 66 65 66 68 71 74 76
68 66 65 65 66 68 71 74 77 81
```

Figura 4.11. File *dem.*asc (Baum et al., 2002)

```
ncols         10
nrows         10
xllcorner     563435
yllcorner     5258305
cellsize      10
NODATA_value  -9999
8 8 9 9 8 9 9 9 9 8
8 8 8 9 8 8 9 9 9 8
8 8 9 8 9 9 8 9 9 8
8 9 8 9 9 9 9 8 8 8
9 8 9 9 8 9 8 8 8 8
8 9 8 8 9 8 8 8 7 7
9 8 8 8 9 8 7 7 4 4
8 8 9 8 8 7 4 4 4 1
9 8 8 8 7 4 4 4 1 1
6 6 5 5 4 1 1 1 1 2
```

Figura 4.12. File *directions.asc* (Baum et al., 2002)

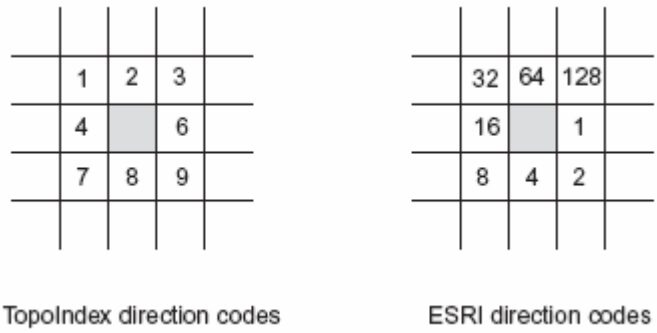


Figura 4.13. File *directions.asc*: convenzioni adottate da TopoIndex e da ESRI nell'assegnazione dei codici (Baum et al., 2002)

Dalla riga di comando 6 alla riga 10 vengono fatte apposite richieste riguardanti il salvataggio (facoltativo) di cinque appositi file di output di TopoIndex, che presenteranno tutti lo stesso prefisso ("TI" di default) e lo stesso suffisso scelto dall'utente all'interno della riga 12 (nel caso in esame è "tutorial"). I cinque file in questione sono:

- *TIdsneiList_tutorial.txt* – è un file di testo che contiene, per ogni cella esaminata, la lista delle celle confinanti poste a quota inferiore;
- *TIdscelGrid_tutorial.asc* – è un file griglia che associa ad ogni cella quella confinante maggiormente inclinata verso valle;
- *TIcelindxGrid_tutorial.asc* - è un file griglia che associa ad ogni cella un indice rappresentativo della posizione occupata nella graduatoria che classifica le celle in ordine decrescente di quota assoluta;
- *TIcelindxList_tutorial.txt* – è un file di testo che classifica tutte le celle in ordine decrescente di quota assoluta;
- *TIflodirGrid_tutorial.asc* - è un file griglia che, qualora si fosse scelta la convenzione ESRI, riscrive il file *directions.asc* secondo la convenzione di TopoIndex.

La numerazione adottata nei file di testo per identificare le celle assegna il n° 1 alla cella posta in alto a sinistra della griglia, prosegue verso destra in ordine crescente per tutta la riga, per poi riprendere dalla prima cella della riga successiva e così via.

Una volta scritto il *topoindex.ini*, viene fatto girare TopoIndex. Ai precedenti file, facoltativamente scelti dall'utente, il codice genera automaticamente ulteriori file di output:

- *TIdscelList_tutorial.txt* - è un file di testo che riporta, per ogni cella, la lista delle celle potenzialmente ricettrici del runoff;
- *TIwfactorList_tutorial.txt* – è un file di testo che riporta, per ogni cella, i coefficienti di ripartizione del runoff;
- *TopoIndexLog.txt* - attraverso questo file di testo, che riporta un breve riepilogo delle operazioni svolte (es. orario di inizio e di fine analisi, errori riscontrati ecc.), l'utente ha la possibilità di verificare che tutte le operazioni siano state svolte correttamente. Il *TopoIndexLog.txt* riepiloga, inoltre, il numero totale di celle della griglia che presentano valori (indicato in fig. 4.14 con *Data cells*), ed il numero di celle da computare per il runoff (indicato in fig. 4.14 con *Downslope cells*).

```
Starting TopoIndex
 Date: 10/30/2007
 Time: 11:13:43

 -- LISTING OF INITIALIZATION DATA --
 Name of project (up to 255 characters)
 Tutorial example data for TopoIndex analysis
 Rows, Columns, flow-direction numbering scheme (ESRI=1, TopoIndex=2)
   10  10  2
 Exponent, Number of iterations
  -1.00000  10
 Name of elevation grid file
 data\tutorial\dem.asc
 Name of direction grid
 data\tutorial\directions.asc
 Save listing of D8 downslope receptor cells?  Enter T (.true.) or F (.false.)
  F
 Save grid of D8 downslope receptor cells? Enter T (.true.) or F (.false.)
  T
 Save cell index number grid ? Enter T (.true.) or F (.false.)
  F
 Save list of cell number and corresponding index number?  Enter T (.true.) or F
(.false.)
  T
 Save flow-direction grid remapped from ESRI to TopoIndex? Enter T (.true.) or F
(.false.)
  F
 Name of folder to store output?
 data\tutorial\
 ID code for output files? (8 characters or less)
 tutorial
 -- END OF INITIALIZATION DATA --

 Tutorial example data for TopoIndex analysis

 Reading flow-direction data
 □
          Listing of grid mismatches
 Mismatch counter, Row, Column, Direction code
   0 ,  --,   --,  --
 No grid mismatch found!
 Subroutine nxtcel2 completed normally
 iteration   1  corrections   1
 iteration   2  corrections   0
 Parameters for file--> data\tutorial\dem.asc
 Exponent  -1.00000
 Data cells, Rows, Columns, Downslope cells
   100  10  10  154

 TopoIndex finished normally
 Date: 10/30/2007
 Time: 11:13:43
```

Figura 4.14. Il file di output *TopoIndexLog.txt* (Baum et al., 2002)

*4.3.2 Stesura del file trigrs.ini*

Una volta scritto il *topoindex.ini*, per far girare TRIGRS è necessaria la stesura del corrispondente file di inizializzazione, il *trigrs.ini*. Come evidenziato in fig. 4.15, esso presenta una struttura del tutto simile al *topoindex.ini*, ossia caratterizzata da un'alternanza di righe di commento e righe di comando.

Nella riga di comando 1 va assegnato il titolo al progetto: nell'esempio proposto si chiama "*Tutorial data for TRIGRS analysis*".

Nella riga di comando 2 devono essere riportati alcuni dati relativi alla griglia: n° di celle che presentano valori (*imax*), n° totale di righe (*row*), n° totale di colonne (*col*), n° di celle da computare per il runoff (*nwf*). I valori numerici di questa riga devono coincidere con quelli contenuti nell'ultima riga del file di output *TopoIndexLog.txt*, in cui vengono riportati nella stessa sequenza rispettivamente come *Data cells*, *Rows*, *Columns*, *Downslope cells* (fig. 4.14).

La riga di comando 3 deve contenere: il n° di "strati" lungo la verticale (*nzs*) alla base dei quali TRIGRS dovrà calcolare, per ciascuna cella, il coefficiente di sicurezza e le pressioni neutre (fig. 4.16); il n° di elementi (*mmax*), posti sotto il simbolo di sommatoria $\sum_{m=1}^{\infty}\{..\}$ dell'equazione [4.5], che si vuole portare in conto nella soluzione (tipicamente questo numero dovrebbe essere compreso tra 10 e 25, mentre impostare un valore *mmax*<1 equivale a scegliere la soluzione di Iverson, riportata nell'equazione [4.4], valida per il semispazio indefinito); il numero degli eventi di pioggia ad intensità costante che si applicheranno sul contorno dell'area (*nper*); la profondità minima (*zmin*) in corrispondenza della quale dovranno essere calcolati coefficiente di sicurezza e pressioni neutre; il peso specifico dell'acqua (*uww*); l'istante di tempo (*t*) a cui dovranno riferirsi i risultati delle analisi. È importante sottolineare che le unità di misura di tutte le grandezze dipendono dalla scelta dell'unità di misura del peso specifico dell'acqua.

Nella riga di comando 4 devono essere riportate informazioni riguardanti sia le proprietà del terreno, che le condizioni al contorno ed iniziali del problema: coesione ($c_c$); angolo d'attrito ($c_{phi}$); profondità del bedrock (*czmax*); peso dell'unità di volume (*cuws*); intensità iniziale di infiltrazione verticale stazionaria (*crizero*); posizione iniziale del pelo libero della falda (*cdep*); diffusività idraulica (*cdif*); permeabilità satura (*cks*). Se si avesse a che fare con un terreno parzialmente saturo, bisognerebbe aggiungere

le proprietà ricavabili dalla corrispondente curva caratteristica (contenuto volumetrico d'acqua saturo $\Theta_{sat}$, contenuto volumetrico d'acqua residuo $\Theta_r$ e reciproco dell'altezza di risalita capillare $\alpha$). Se alle proprietà viene assegnato un valore numerico positivo, questo verrà considerato dal codice costante per tutte le celle della griglia; al contrario, se viene assegnato un valore negativo, il codice andrà a leggere i corrispondenti file di griglia, che verranno richiamati nelle righe successive.

```
Name of project (up to 255 characters)
Tutorial data for TRIGRS analysis
imax, row, col, nwf
100,  10,  10,  154
nzs, mmax, nper,  zmin,  uww,     t
5,    20,   2,   0.001,  9.8e3,  0.01
cc,     cphi,  czmax,  cuws,  crizero, cdep,   cdif,      cks
-4.5e3, -32., -3.001, 2.2e4, -1.0e-9,  -2.4,  5.0e-04, -1.e-05
cri(1), cri(2), ..., cri(nper)
3.e-7,  9.e-5
capt(1), capt(2), ..., capt(n), capt(n+1)
0,       172800, 216000
File name of slope angle grid (slofil)
data\tutorial\slope.asc
File name of cohesion grid (cfil)
data\tutorial\cohes.asc
File name of Phi-angle grid (phifil)
data\tutorial\phi.asc
File name of depth grid (zfil)
data\tutorial\zmax.asc
File name of total unit weight of soil grid (uwsfil)
data\tutorial\gammat.asc
File name of initial depth of water table grid   (depfil)
data\tutorial\depthwt.asc
File name of diffusivity grid  (diffil)
data\tutorial\diffus.asc
File name of saturated hydraulic conductivity grid   (ksfil)
data\tutorial\ks.asc
File name of initial infiltration rate grid   (rizerofil)
data\tutorial\rizero.asc
File name of grid of D8 runoff receptor cell numbers (nxtfil)
data\tutorial\TIdscelGrid_tutorial.asc
File name of list of defining runoff computation order (ndxfil)
data\tutorial\TIcelindxList_tutorial.txt
File name of list of all runoff receptor cells  (dscfil)
data\tutorial\TIdscelList_tutorial.txt
File name of list of runoff weighting factors  (wffil)
data\tutorial\TIwfactorList_tutorial.txt
List of file name(s) of rainfall intensity for each period, (rifil())
data\tutorial\ri1.asc
data\tutorial\ri2.asc
Folder where output grid files will be stored  (folder)
data\tutorial\
Identification code to be added to names of output files (suffix)
t=0.01
Save grid files of runoff? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of factor of safety at maximum depth, zmax? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of pore pressure at maximum depth, zmax? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of depth of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save grid of pore pressure at depth of minimum factor of safety? Enter Enter T (.true.)
or F (.false.)
T
Save grid files of actual infiltration rate? Enter T (.true.) or F (.false.)
T
Save listing of pressure head and factor of safety ("flag")? (Enter -2 detailed, -1
normal, 0 none)
-2
```

Figura 4.15. Il file di inizializzazione *trigrs.ini* (Baum et al., 2002)

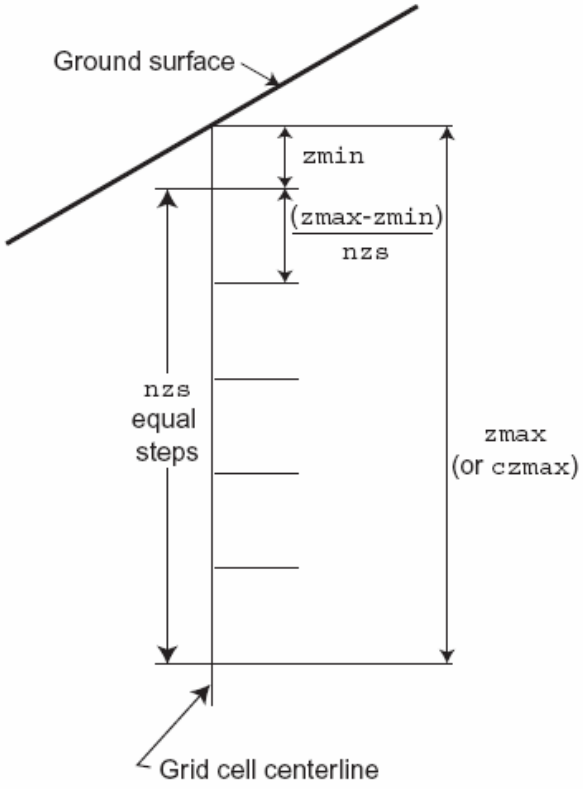


Figura 4.16. Spaziatura verticale adottata da TRIGRS: il coefficiente di sicurezza e le pressioni neutre verranno calcolate, a partire dalla quota *zmin*, alla base di ciascuno "strato" (Baum et al., 2002)

Mentre la riga di comando 5 contiene le intensità di pioggia (*cri*) corrispondenti al numero di intervalli (*nper*) indicati nella riga 3, nella riga di comando 6 sono riportate le durate cumulative (*capt*) di ciascuna precipitazione. Ad esempio, nel caso in esame il primo scroscio (di intensità pari a $3 \cdot 10^{-7}$ m/s) dura 172800 secondi, mentre il secondo, (di intensità pari a $9 \cdot 10^{-5}$ m/s) ha una durata di 43200 s (dato dalla differenza tra 216000 e 172800 s) ed inizierà immediatamente dopo il primo.
Come detto in precedenza, TRIGRS consente di far variare nello spazio proprietà sia geometriche che materiali. A tal proposito, dalla riga di comando 7 alla riga di comando 15 vengono richiamati vari file griglia (alcuni dei quali sono rappresentati graficamente in fig. 4.17), che consentono di avere informazioni diverse da cella a cella, quali:

- inclinazione (*slope.asc*);
- coesione (*cohes.asc*);

- angolo d'attrito (*phi.asc*);
- profondità del bedrock (*zmax.asc*);
- peso dell'unità di volume (*gammat.asc*);
- posizione iniziale del pelo libero della falda (*depthwt.asc*);
- diffusività idraulica (*diffus.asc*);
- permeabilità (*ks.asc*);
- infiltrazione iniziale stazionaria (*rizero.asc*);

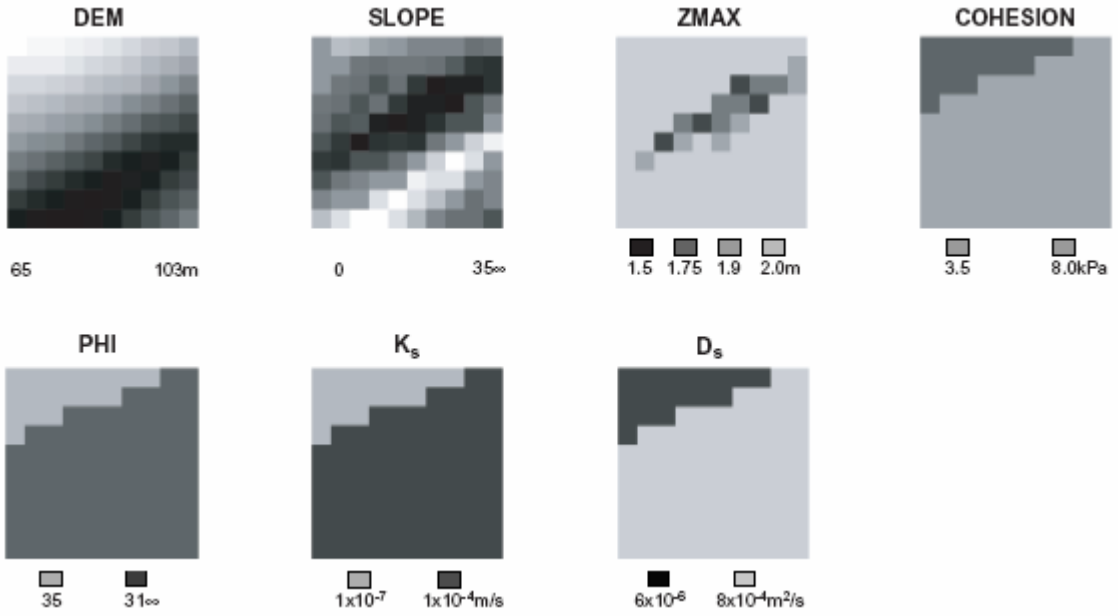


Figura 4.17. Dati di input di TRIGRS (Baum et al., 2002)

Dalla riga di comando 16 alla riga di comando 20 vengono, invece, richiamati alcuni dei file di output di TopoIndex necessari per lo studio del runoff (*TIdscelGrid_tutorial.asc; TIcelindxList_tutorial.txt; TIdscelList_tutorial.txt TIwfactorList_tutorial.txt*) e file griglia rappresentativi di intensità di pioggia variabili da cella a cella (*ri1.asc* e *ri2..asc*). Anche se riportati, nel tutorial questi ultimi due file non saranno, ovviamente, richiamati da TRIGRS, in quanto sono stati assegnati nella riga 5 valori positivi e, quindi, costanti in tutta l'area.

Nelle righe 21 e 22 è necessario precisare, rispettivamente, la directory in cui verranno salvati i file di output ed il suffisso con i quali si intende identificare gli stessi (nell'esempio è *t=0.01*).

Nelle righe successive è richiesto all'utente se ha intenzione o meno di salvare i diversi file di output di TRIGRS, che presenteranno tutti lo stesso prefisso ("TR" di default) e lo stesso suffisso scelto nella riga 22. Andando secondo l'ordine di fig. 4.15, i file in questione sono:

- *TRrunoffPer1t=0.01.asc* –file di griglia contenente, per ogni cella, il runoff calcolato per effetto del primo intervallo di pioggia *Per1* dopo 0.01 secondi (se il tempo *t* fosse maggiore di 172800 secondi, il codice genererebbe anche un file relativo agli effetti connessi al secondo intervallo di pioggia);
- *TRfs_at_zmax_t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, il coefficiente di sicurezza calcolato in corrispondenza di *zmax* dopo 0.01 secondi;
- *TRp_at_zmax_t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, l'altezza piezometrica calcolata in corrispondenza di *zmax* dopo 0.01 secondi;
- *TRfs_min_ t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, il coefficiente di sicurezza minimo calcolato dopo 0.01 secondi;
- *TRz_at_fs_min_t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, la profondità dal piano campagna in corrispondenza della quale si attinge il minimo coefficiente di sicurezza calcolato dopo 0.01 secondi;
- *TRp_at_fs_min_t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, l'altezza piezometrica corrispondente al minimo coefficiente di sicurezza calcolato dopo 0.01 secondi;
- *TRinfilratPer1t=0.01.asc* – file di griglia contenente, per ogni cella, l'intensità di pioggia che si infiltra calcolata per effetto del primo intervallo di pioggia *Per1* dopo 0.01 secondi (se il tempo *t* fosse maggiore di 172800 secondi, il codice genererebbe anche un file relativo agli effetti connessi al secondo intervallo di pioggia *Per2*);
- *TRlist_z_p_fs_t=0.01.txt* – file di testo contenente, per ogni cella, un elenco che riporta in corrispondenza di ogni step di profondità (scelto attraverso il coefficiente *nzs* di riga 3) l'altezza piezometrica ed il coefficiente di sicurezza calcolati dopo 0.01 secondi

In aggiunta a questi file, c'è da aggiungere il file di output *TrigrsLog.txt*, che viene creato automaticamente e che consente una verifica della correttezza delle operazioni svolte.

*4.3.3 Risultati*

Facendo variare il tempo *t* della riga di comando 3, è possibile, evidentemente, ottenere i risultati al termine di differenti istanti di tempo e, quindi, di seguire l'evoluzione cronologica del coefficiente di sicurezza, delle pressioni neutre e del runoff. Tale aspetto è evidenziato in fig. 4.18 in cui sono riportati graficamente i risultati al termine dei due intervalli di pioggia impostati (rispettivamente $t_1$= 172800 s, $t_2$ = 216000 s) ed in corrispondenza di periodi intermedi. Come si può notare, all'aumentare del tempo ovviamente aumentano le entità del runoff, dell'infiltrazione e delle altezze piezometriche, mentre si riduce il coefficiente di sicurezza. Quest'ultimo presenta in corrispondenza di alcune celle valori minori dell'unità già dopo 100800 secondi, ossia prima che venga applicato il secondo evento piovoso più intenso.

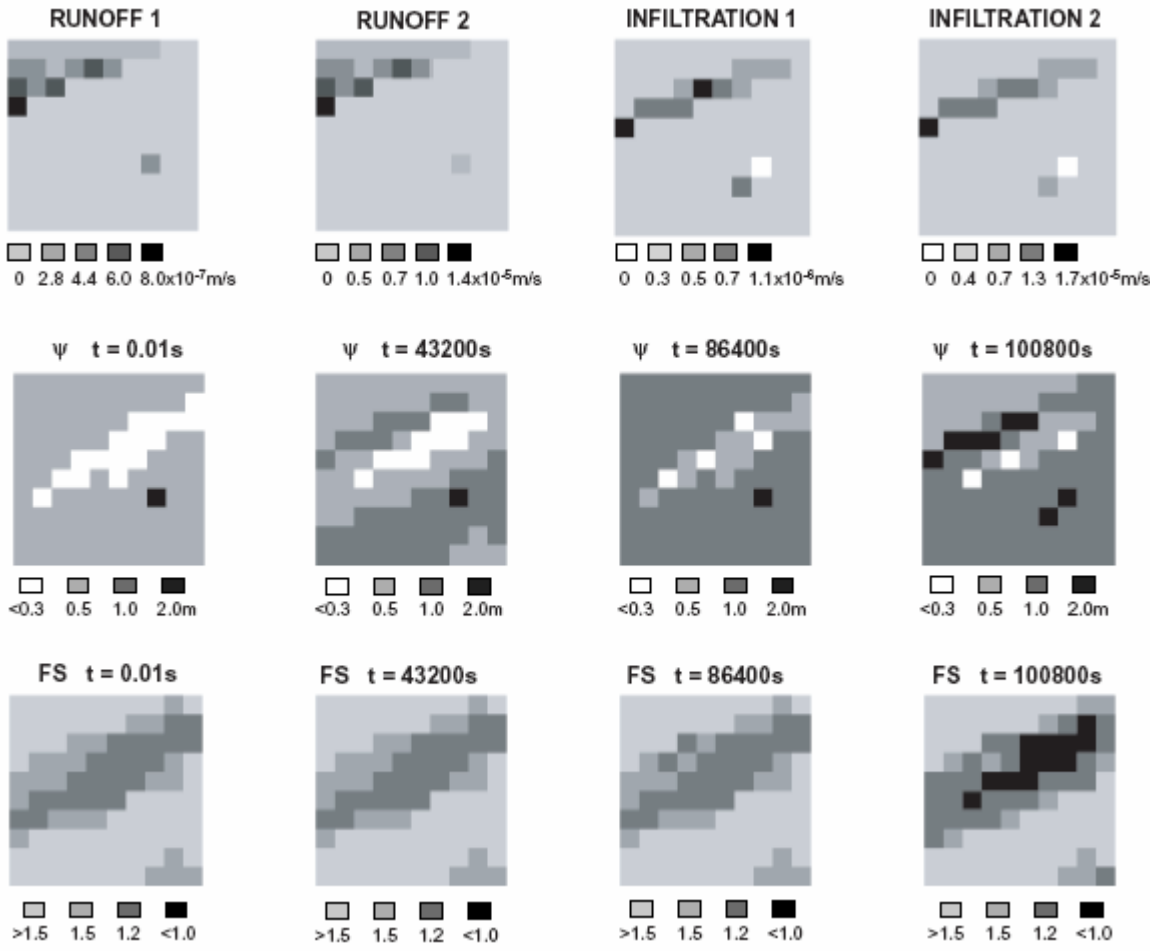


Figura 4.18. Dati di output di TRIGRS: ruscellamenti superficiali calcolati al termine del primo e del secondo intervallo di pioggia assegnati nel tutorial (Runoff 1 e Runoff 2);

intensità di infiltrazione al termine del primo e del secondo intervallo di pioggia assegnati nel tutorial (Infiltration 1 e Infiltration 2); altezze piezometriche $\psi$ calcolate in corrispondenza del bedrock a differenti istanti di tempo t; coefficienti di sicurezza FS calcolati in corrispondenza del bedrock a differenti istanti di tempo t (Baum et al., 2002)

Limiti

I limiti di TRIGRS sono comuni ai codici che eseguono analisi di stabilità a livello areale.

- Il codice non consente di far variare con la profondità le proprietà del terreno, che si presenta come un mezzo omogeneo ed isotropo.
- I risultati sono particolarmente sensibili alle condizioni iniziali assegnate. L'utente dovrebbe, pertanto, avere a disposizione il maggior numero possibile di informazioni riguardanti, ad esempio, la posizione iniziale del pelo libero della falda (qualora esistesse), l'entità dei flussi superficiali in ingresso (precipitazioni) o in uscita (evaporazioni).
- Il modello di runoff adottato da TRIGRS a seguito degli apporti pluviometrici non porta in conto eventuali fenomeni di evapotraspirazione in corso, che, pertanto, vengono ipotizzati trascurabili durante le precipitazioni. Inoltre, la ridistribuzione idrica da cella a cella avviene istantaneamente, di conseguenza l'intervallo di tempo *t* a cui vengono attribuiti i risultati delle analisi deve essere considerato dall'utente sufficiente per il completamento del ruscellamento superficiale di tutta l'area.
- TRIGRS non dispone di un preprocessore per la realizzazione del DEM. Tali procedure sono, comunque, incluse in un qualunque software GIS.
- L'analisi di stabilità di ogni cella viene eseguita nelle ipotesi di "pendio indefinito" e, pertanto, restringe il reale campo di applicabilità alle sole frane superficiali, le cui caratteristiche (spessori di terreno coinvolti modesti, superficie di scivolamento quasi planare, pelo libero della falda quasi parallela alla superficie di scorrimento) sono spesso compatibili con le assunzioni poste dal modello in questione.
- TRIGRS consente una previsione relativa alla distribuzione temporale e spaziale delle frane che potrebbero fare seguito ad un evento pluviometrico, ma non permette previsioni riguardanti la fase post-rottura.

# 5 Conclusioni

Attraverso i tre codici di calcolo studiati e messi a punto è possibile affrontare una vastissima gamma di problemi di stabilità dei pendii riconducibili alle condizioni meteorologiche. Con il codice ABAQUS è possibile affrontare problemi nei quali la geometria del sistema pendio è complessa al punto da richiedere una valutazione degli stati tensionali efficaci. Oppure problemi nei quali la valutazione degli effetti al suolo è legata allo sviluppo di processi di consolidazione nel terreno e richiede quindi l'utilizzo di approcci di tipo accoppiato. O, ancora, problemi nei quali la valutazione degli effetti al suolo è impostata sulle prestazioni del sistema e quindi sulla valutazione, in condizioni accoppiate o non, dei processi deformativi.

Il codice VADOSE trascura la previsione delle grandezze fisiche di natura statica (tensioni e deformazioni) ma scende con maggiore dettaglio rispetto ad ABAQUS nella modellazione e nella soluzione del problema idraulico, con la previsione di grandezze fisiche nel terreno indispensabili per una corretta valutazione, insieme alle variabili meteorologiche, dei processi di evaporazione e traspirazione. E' bene evidenziare come gli effetti di tali processi possano essere studiati in sequenza, dapprima con VADOSE, per ottenere una risposta in termini di flusso evapotraspirativo, e, di seguito, con ABAQUS, introducendo tale flusso come condizione al contorno. I due codici possono in sostanza essere posti in sinergia nello studio di problemi complessi nei quali si desidera prevedere, ad esempio, variazioni tensionali e deformative portando in conto anche processi di evapotraspirazione.

ABAQUS e VADOSE permettono una valutazione, ad una scala dettagliata, degli effetti connessi ai fenomeni meteorologici. Per poter individuare all'interno di un territorio di grande estensione i versanti critici su cui eseguire tali analisi di tipo puntuale, si ritiene necessario l'impiego integrato di codici, come TRIGRS, che eseguano analisi di tipo areale.

TRIGRS consente una previsione relativa alla distribuzione temporale e spaziale delle frane che potrebbero fare seguito ad eventi pluviometrici di intensità e durata variabili su superfici di notevole estensione. Essendo in grado di analizzare le variazioni cicliche delle pressioni neutre connesse alle piogge, il programma fornisce valori del coefficiente di sicurezza che risultano variabili nel tempo e nello spazio. Una volta individuata l'area

di studio (schematizzata attraverso una griglia di celle tridimensionali), per l'utilizzo del programma è sufficiente disporre di un modello digitale di terreno, di una carta delle coperture e di informazioni relative alle proprietà dei terreni. Tanto i file di input quanto quelli di output sono sotto forma di file di testo e di file di griglia. Questi ultimi risultano importabili (esportabili) da (su) un qualsiasi sistema informativo geografico, consentendo all'utente la visualizzazione grafica dei risultati e, quindi, ad esempio, l'individuazione delle aree maggiormente suscettibili a franare. I dati di input riguardanti la geometria, le condizioni al contorno (es. intensità di pioggia), le condizioni iniziali (es. posizione del pelo libero della falda) e le proprietà del terreno possono variare da cella a cella: è, pertanto, possibile analizzare gli effetti connessi a qualsiasi precipitazione su territori di caratteristiche anche complesse dal punto di vista geomorfologico. TRIGRS dispone, inoltre, di un semplice modello di runoff per portare in conto gli effetti connessi al ruscellamento superficiale delle portate idriche non infiltratesi. Essendo eseguita l'analisi di stabilità di ogni cella nelle ipotesi di "pendio indefinito", il reale campo di applicabilità è ristretto alle sole frane superficiali.

I codici Abaqus e Vadose verranno impiegati nel prosieguo del progetto per interpretare la frana verificatasi in località Nocera Inferiore nel marzo 2005. In una prima fase verranno analizzate con il codice ABAQUS schematizzazioni bidimensionali del pendio, analoghe a quelle illustrate in precedenza negli esempi relativi a tale codice. Con tali schematizzazioni si analizzeranno gli effetti prodotti dalla sola storia di pioggia che ha preceduto l'istante della frana. La storia di pioggia sarà considerata a partire dalla stagione secca (agosto 2004) anteriore all'evento stesso. La risposta del sistema sarà caratterizzata in termini di evoluzione delle pressioni interstiziali, degli stati tensionali, del coefficiente di sicurezza del pendio. Il coefficiente di sicurezza verrà computato sia come media dei coefficienti di sicurezza puntuali sia come rapporto tra parametri di resistenza reali e parametri di resistenza strettamente necessari alla stabilità del pendio. I parametri di resistenza necessari saranno stimati attraverso la strategia di ridurre progressivamente i parametri di resistenza, così come descritto in precedenza. In una seconda fase verranno caratterizzati, in condizioni monodimensionali, i fenomeni di evapotraspirazione che hanno interessato il pendio nel corso del periodo di riferimento. La previsione verrà realizzata attraverso il codice Vadose, interpretando le

evoluzioni di temperatura e umidità relativa misurate nella zona di Nocera Inferiore e ricavando i flussi della fase liquida attraverso la superficie del pendio. Tali analisi saranno condotte seguendo procedure del tutto analoghe a quelle descritte negli esempi relativi al codice VADOSE. Tali flussi saranno successivamente applicati come condizioni idrauliche in nuove analisi condotte con ABAQUS al fine di considerare la risposta del pendio associata, oltre che alla pioggia, anche alla temperatura e all'umidità relativa, e al fine di comprendere il ruolo giocato dalle storie di temperatura e umidità relativa nell'evento franoso verificatosi.
Il codice Vadose verrà impiegato in previsioni bidimensionali per analizzare una case-history di frana verificatasi nella zona dei Camaldoli. Anche in questo caso l'evoluzione delle variabili meteo verrà utilizzata come evoluzione di condizioni al contorno per determinare evoluzioni di pressioni interstiziali e del coefficiente di sicurezza. Il codice TRIGRS verrà utilizzato per realizzare previsioni riferite sempre alla collina dei Camaldoli, ma questa volta con riferimento ad un'area più vasta rispetto rispetto a quella associata alla case-history.

## 6 Riferimenti bibliografici

Baum R.L., Savage W.Z., Godt J.W. (2002). TRIGRS—A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424

Gardner W.R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, 85, pp. 228-232

Iverson R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. Water Resour Res, 36, pp. 1897–1910

Savage W.Z., Godt J.W., Baum R.L. (2004). Modeling time-dependent slope stability. Proc. IX Int. Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, pp 23–38