

## **Esempi di modelli per l'analisi delle frane innescate da pioggia.**

### **INTRODUZIONE**

In letteratura tecnica sono presenti diversi approcci che forniscono relazioni fra precipitazioni e movimenti franosi indotti.

La differenza fra i vari modelli è dovuta a molteplici aspetti:

- la diversità dei contesti geologici di riferimento e i meccanismi secondo i quali le piogge influenzano la stabilità dei versanti;
- il dettaglio adottato per descrivere i processi idrologici e le proprietà geotecniche dei versanti;
- la scala spaziale di indagine, che varia da aree vaste fino a decine di migliaia di chilometri quadri ad aree limitate che possono ridursi anche ad un singolo corpo di frana;
- qualità, quantità dei dati idrologici, idraulici e geotecnici necessari a garantire l'accuratezza del modello.

La prima distinzione riguarda i modelli che analizzano il singolo fenomeno (modelli puntuali) e quelli che riguardano più fenomeni relativi ad un singolo versante o più in generale ad un comprensorio più ampio (modelli areali).

Una seconda classificazione riguarda in dettaglio adottato per descrivere i meccanismi idrologici e geotecnici. In particolare si possono distinguere modelli idrologici (o empirici) e modelli completi.

I modelli idrologici sono basati solo sull'analisi di dati storici riguardanti eventi franosi e delle piogge antecedenti e non richiedono installazioni di campagna (Campbell, 1975; Caine, 1980; Sirangelo & Versace, 1992).

Questi approcci differiscono tra loro in funzione della scala temporale e spaziale di interesse. Le piogge precedenti prese in considerazione si estendono per un periodo che dipende dalla dimensione della frana. In frane superficiali, come soil slips e debris flows, è sufficiente considerare, nella gran parte dei casi, le piogge cadute nelle ultime 24-48 ore. Al contrario, per le frane di maggiore dimensione l'orizzonte temporale si può estendere fino ad alcuni mesi.

L'area di interesse può variare dalla scala locale che analizza il singolo versante o addirittura il singolo fenomeno, alla scala regionale che può estendersi fino a decine di migliaia di Km<sup>2</sup>.

L'estensione dell'area investigata è condizionata ovviamente dalla necessità che si abbia una adeguata omogeneità nelle condizioni geologiche, geomorfologiche e di uso del suolo.

I modelli completi si propongono, invece, di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono alla scala di versante e utilizzano una dettagliata informazione idrologica, idraulica e geotecnica (Iverson, 2000). Sono molto legati al contesto geologico e al meccanismo con il quale la pioggia influenza la stabilità del pendio.

In generale sono composti da due moduli: uno idrologico che, in base alle forzanti pluviometriche, descrive l'andamento delle pressioni neutre nell'acquifero, l'altro geotecnico che serve a valutare la stabilità del pendio.

### **I MODELLI IDROLOGICI**

I modelli idrologici (o empirici) identificano le relazioni frana-precipitazione sulla base di eventi franosi osservati e delle piogge antecedenti. I criteri di classificazione proposti in letteratura possono essere molteplici.

Un primo criterio è basato sullo spessore del corpo di frana. All'aumentare della profondità del suolo interessato dal movimento, infatti, vengono prese in considerazione, per le precipitazioni antecedenti, durate maggiori.

Nel caso di frane superficiali, come scivolamenti e colate di fango, è sufficiente considerare le precipitazioni verificatesi in poche ore. Per frane di dimensione maggiore, invece, possono essere assunti orizzonti temporali fino alla scala mensile.

Un altro importante criterio di classificazione è l'estensione dell'area interessata dal fenomeno che può variare dalla scala locale, con l'analisi di singoli versanti, fino alla scala regionale che considera aree più estese fino a varie decine di migliaia di Km<sup>2</sup>.

L'estensione dell'area indagata è ovviamente condizionata dalla necessità di una sufficiente omogeneità per quanto riguarda la geologia, la geomorfologia e le condizioni di uso del suolo.

L'omogeneità costituisce un requisito particolarmente importante quando si opera a scala di versante.

Inoltre, l'analisi di singoli fenomeni è vincolata all'esistenza di condizioni stazionarie per il sistema investigato.

Le frane superficiali a scala regionale sono i fenomeni maggiormente studiati. In molti casi i modelli identificano un valore soglia  $Y_{cr}$  di una funzione di mobilitazione  $Y(t)$  che separa le condizioni "mobilitazione impossibile" e "mobilitazione certa". Lo schema soglia è naturalmente un caso semplificato di uno schema più generale che fornisce:

$$P[E_t] = \begin{cases} 0 & \text{if } Y(t) < Y_1 \\ g[Y(t)] & \text{if } Y_1 \leq Y(t) \leq Y_2 \\ 1 & \text{if } Y(t) > Y_2 \end{cases} \quad (1)$$

dove  $P[E_t]$  è la probabilità che al tempo  $t$  si possa verificare una mobilitazione,  $g(\cdot)$  è una generica funzione non decrescente che può assumere i valori  $[0;1]$  nell'intervallo  $[Y_1; Y_2]$ .

Assumendo  $Y_1=Y_2=Y_{cr}$ , lo schema a soglia diventa:

$$\begin{cases} P[E_t] = 0 & \text{if } Y(t) < Y_{cr} \\ P[E_t] = 1 & \text{if } Y(t) \geq Y_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

L'uso di una funzione soglia introduce un'approssimazione eccessiva e può risultare ambigua dal momento che i diversi autori danno interpretazioni diverse: "abundant landslides" (Cannon & Ellen 1985) oppure "one or more than one landslides" (Wieczoreck 1987). Lo schema a soglia, in ogni caso, è quello più largamente usato nelle pratiche applicazioni (Guzzetti, 2008).

In molti casi,  $Y(t)$  coincide con l'intensità media di precipitazione  $I(t)$  o con la pioggia cumulata, riferita all'intervallo di tempo  $D$ , che varia da 1 a 24-48 ore, mentre il valore critico  $I_{cr} = Y_{cr}$  varia con la durata della pioggia; di conseguenza la soglia è rappresentata da una curva nello spazio  $I - D$  (intensità-durata di precipitazione). Spesso si considera, per la relazione fra  $I_{cr}$  e  $D$ , una funzione di potenza (Caine 1980, Cannon & Ellen 1985):

$$Y_{cr} = I_{cr} = aD^{-b} \quad (3)$$

In alcuni casi, quando si confrontano fenomeni caratterizzati da differenti condizioni climatiche, il valore di  $I(t)$  viene normalizzato rispetto al valore medio della pioggia annua.

Altri autori considerano come funzione di mobilitazione  $Y(t)$  una pioggia cumulata in un definito intervallo temporale, per esempio 1 ora o 1 giorno, ed esprimono il valore critico come funzione della pioggia cumulata durante un lungo periodo di tempo, fissato a priori, che parte dall'inizio dell'evento di pioggia o dall'inizio della stagione umida.

d'Orsi et al. (1997), per esempio, assumono la pioggia dell'ultima ora come  $Y(t)$  e considerano  $Y_{cr}$  dipendente dalla precipitazione osservata nelle precedenti 96 ore.

In letteratura sono reperibili modelli più complessi, ma la struttura teorica generale è essenzialmente la stessa.

Naturalmente, i limiti di questo genere di modelli sono quelli tipici di tutti i modelli empirici, in quanto legati a grossolane semplificazioni del fenomeno reale complesso ed alla

combinazione di informazione su fenomeni che possono essere estremamente differenti. Inoltre ci sono altre limitazioni significative in relazione all'uso non adeguato dell'informazione idrologica disponibile.

L'uso di una funzione soglia, infatti, introduce una approssimazione eccessiva. L'impiego della pioggia cumulata o dell'intensità media come funzione di mobilitazione, non consente di distinguere eventi piovosi che si sviluppano con andamenti diversi. L'adozione di una relazione unica non permette di differenziare tra fenomeni con caratteristiche differenti.

Infine, quando le informazioni disponibili riguardo le frane verificatesi in passato sono scarse, vengono applicate soglie euristiche predefinite, assumendo, per esempio, come soglia critica una precipitazione caratterizzata da un fissato periodo di ritorno.

Nonostante queste limitazioni, comunque, i modelli empirici raggiungono una affidabilità crescente allorquando aumenta la disponibilità di informazione circa le frane osservate e gli eventi di pioggia relativi che le hanno innescate.

### **I MODELLI COMPLETI**

I modelli completi sono molto diversi tra loro. In particolare le differenze più rilevanti riguardano: la capacità di riprodurre la topografia del piano campagna, le modalità con le quali simulano il fenomeno d'infiltrazione, le metodologie adottate per simulare il flusso sotterraneo, le tecniche per la stima della stabilità dei versanti.

Questi modelli combinano gli aspetti idrologici (intensità di pioggia e modellazione del deflusso superficiale e sub-superficiale), geomorfologici e geotecnici con differenti livelli di complessità.

Anche se nella stabilità dei pendii una analisi tridimensionale può diventare importante, per esempio nei casi in cui la geometria del pendio varia in maniera significativa in direzione laterale o quando le proprietà dei materiali sono fortemente anisotrope, è molto comune l'uso di metodi semplificati per descrivere l'infiltrazione e la circolazione dell'acqua nel sottosuolo, molte volte adattati dal caso monodimensionale (Green & Ampt 1911).

Anche l'analisi della stabilità del pendio è generalmente sviluppata in modo semplificato, utilizzando il ben noto modello di pendio indefinito.

I modelli completi possono essere anche suddivisi in regionali e locali.

I primi usualmente producono una mappa di suscettibilità che caratterizza le aree soggette a movimenti franosi con un indice di stabilità.

I modelli locali sono di solito molto più accurati poiché analizzano la stabilità di un singolo pendio utilizzando informazioni idrologiche, idrauliche e geotecniche dettagliate.

Tra i modelli regionali più diffusi si ricordano:

- SHALSTAB (Montgomery & Dietrich 1994), in cui si utilizza il modello del pendio indefinito e una descrizione stazionaria dei flussi idrologici.
- dSLAM (distributed Shallow Landslide Analysis Model) proposto da Wu & Sidle (1995), basato sul pendio indefinito per la stabilità e sull'onda cinematica per il moto nell'acquifero, è adatto per aree forestate e tiene conto dell'effetto delle radici, ma trascura il non saturo.
- SINMAP (Stability INDEX MAPping, Pack et al. 1998), che utilizza come modulo idrologico il TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979), ed ipotizza che la falda sia parallela alla superficie topografica e che spessore e conduttività idraulica siano uniformi. La variabilità spaziale dei parametri geotecnici è descritta in termini probabilistici. Il modello è adatto solo a frane superficiali traslazionali.
- TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Slope-stability, Baum et al. 2002), che supera i limiti di molti modelli regionali, ovvero l'ipotesi di condizioni di moto stazionarie e falda parallela al piano di campagna. Utilizza l'equazione di Richards per calcolare i carichi idraulici, e l'equazione del pendio indefinito per la valutazione della stabilità. Si avvale della formulazione di Iverson (2000), e ricostruisce l'andamento nel tempo alle diverse quote del fattore di sicurezza. Per la sua semplicità è stato usato anche per esaminare la relazione tra le caratteristiche pluviometriche e la suscettività a franare (D'Odorico et al. 2005).
- GEOTop-FS (Simoni et al. 2007), che combina un modello idrologico distribuito, GEOTop (Bertoldi et al. 2006), ed un modello geotecnico con il pendio indefinito. GEOTop modella il contenuto idrico dei terreni in 3D risolvendo numericamente l'equazione di Richards. Il fattore di sicurezza è stimato con un approccio probabilistico, assegnando una distribuzione di probabilità ai parametri che descrivono le caratteristiche del suolo.

Tra i modelli completi di tipo puntuale vanno ricordati quelli proposti da Qui et al. (2007), Tsai et al. (2008), ed il modello SUSHI (Saturated Unsaturated Simulation for Hillslope Instability, Capparelli, 2006), realizzato presso il Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria.

## BIBLIOGRAFIA:

- 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. US Geological Survey Open-File Report, 02-0424.
- Bertoldi, G., Rigon R. & Over TM. 2006. Impact of watershed geomorphic characteristics on the energy and water budgets. *Journal of Hydrometeorology* 7(3):389-403
- Beven, K.F. & Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin* 24: 43-69.
- Caine, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler* 62 A (1-2): 23 -27.
- Campbell, R.K. 1975. *Soil Slips, Debris Flows and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California*. U.S. Geol. Surv., Professional Paper, 851.
- Cannon, S.H. & Ellen, S.D., 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *Geology* 38 (12): 267– 272.
- Capparelli, G. 2006. *Il ruolo della circolazione idrica sotterranea nei pendii soggetti a fenomeni di instabilizzazione*. PhD Thesis, University of Calabria.
- D'Odorico, P., Fagherazzi, S. & Rigon, R. 2005. Potential for landsliding: Dependence on hyetograph characteristics *J. Geophys. Res.* 110
- d'Orsi, R.N., D'Avila, C., Ortigao, J.A.R., Moraes, L. & Santos, M.D. 1997. Rio-The Rio de Janeiro landslide watch *Proc. of 2nd PSL Pan-Am Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Vol 1,:* 21-30.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4: 1-24.
- Guzzetti, F. 2008. Book Review of “Measuring Vulnerability to Natural Hazards”. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8, 521.
- Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36: 1897-1910.
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. 1994. A physically based model topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30: 1153-1171.
- Pack R.T., Tarboton D.G. & Goodwin C.N. 1998. SINMAP, a stability index approach to terrain stability hazard mapping. *SINMAP user's manual*, 68, Terratech Consulting Ltd.
- Qui, C., Esaki, T., Xie, M., Mitani, Y. & Wang C. 2007. Spatio temporal estimation of shallow landslides hazard triggered by rainfall using a three-dimensional model. *Environmental Geology* 52:1569-1579.
- Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G. & Rigon R. 2007. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flow using GEOTOP\_FS. *Hydrological Processes*. Wiley InterScience.
- Tsai, T. L, Chen, H.E. & Yang, J.C. 2008. Numerical modeling of rainstorm induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology* 55:1269-1277.
- Wieczorek, G.F. 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology* 7: 93-104.

Wu, W. & Sidle, R.C. 1995. A distributed slope stability model for steep forested basin. *Water Resources Researches* 31: 2097-2110.

Sirangelo, B. & Versace, P. 1992. Modelli stocastici di precipitazione e soglie pluviometriche di innesco dei movimenti franosi. *Proc. of XXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Florence (Italy), Vol. D: 361-373.*