INFLUENZA DELL'ACCURATEZZA DEL DTM IN MODELLAZIONI GIS DI CARATTERE GEOTECNICO

Antonio CONDORELLI, Giuseppe MUSSUMECI

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, V.le A.Doria 6, 95125 Catania, fax 095/7382247
e-mail: acondor@dica.unict.it; gmussume@dica.unict.it - Settore Geomatica, tel. 095/7382212 095/7382225

Sommario
Da diversi anni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania si è sviluppato un proficuo filone di ricerca che ha dato luogo ad una estesa produzione scientifica con riferimento particolare a modellazioni GIS specializzate su fenomeni ambientali.
Nel presente lavoro si affronta, per la prima volta sperimentalmente, il delicato argomento dei requisiti qualitativi richiesti ai dati geografici (modelli digitali del terreno) che entrano in gioco nelle modellazioni al fine di garantire alle stesse un adeguato livello di affidabilità.

Abstract
During the last years a research field about specialized GIS modelling of environmental phenomenon has been developed in the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Catania. In this work the focus is about the quality requirements of geographic data (digital terrain model) used in the modelling application in order to guarantee a good level of reliability.

1. Introduzione

Le moderne tecnologie GIS, come è ben noto, consentono numerose e differenziate tipologie di applicazioni, che variano da complessi sistemi di gestione e aggiornamento di informazioni a riferimento spaziale a veri e propri ambienti di modellazione, che consentono di elaborare e successivamente analizzare simulazioni realistiche di fenomeni ambientali.
Relativamente a quest'ultimo aspetto è stato avviato già da diversi anni presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania (settore geomatica) un proficuo filone di ricerca, spesso alimentato anche da collaborazioni con altri raggruppamenti disciplinari, che ha dato luogo ad una estesa produzione scientifica, con riferimento particolare a modellazioni di fenomeni ambientali connessi a problematiche di Protezione Civile.
Appare tuttavia evidente che l'affidabilità dei risultati che è possibile ottenere con questa tipologia di approccio scientifico è direttamente correlata da una parte alle inevitabili approssimazioni proprie dei modelli utilizzati, dall'altra alla qualità dei dati di input, spesso difficili da reperire, specialmente con il livello di accuratezza richiesto.
Valutare a priori il livello di affidabilità che è possibile ottenere dall'applicazione di un modello è certamente un problema molto complesso e che non può essere esaustivamente affrontato in questa sede. Per una analisi completa bisognerebbe, infatti, entrare nel merito delle procedure operative che hanno condotto alla formulazione di ogni singolo modello utilizzato, oltre che prendere in considerazione l'accuratezza di ogni singolo parametro che entra in gioco.
Per quanto esposto, si ritiene dunque di poter concentrare la propria attenzione esclusivamente sui dati di input che sono di competenza delle discipline topo-cartografiche o, per utilizzare un termine più moderno e dall'accezione più ampia, della geomatica. In particolare, sulla base delle esperienze

sinora maturate, si ritiene di poter affermare che molti dei parametri utilizzati nei modelli di simulazione siano direttamente o indirettamente connessi alla morfologia plano-altimetrica dell'area di studio. Ci si propone dunque di valutare il grado di influenza che può avere una differente tipologia di modello digitale del terreno (DTM) sui risultati che scaturiscono dall'applicazione di un modello di simulazione di un fenomeno ambientale.
In dettaglio, il lavoro si sviluppa mediante l'applicazione di un modello di simulazione della stabilità dei pendii in condizioni statiche o sismiche sfruttando, a parità di altre condizioni, DTM di scala differente, in termini di risoluzione geometrica del pixel di riferimento e di accuratezza nella determinazione della quota. Dal confronto dei risultati ottenuti, scaturiscono ulteriori considerazioni di natura tecnico-economica, orientate alla definizione della scelta del DTM ottimale, correttamente bilanciato tra un livello soddisfacente di affidabilità del risultato ed un ragionevole investimento per l'acquisizione.

2. La modellazione utilizzata

La modellazione utilizzata nel presente lavoro, già stata testata e documentata in precedenti memorie, rappresenta uno strumento finalizzato alla valutazione degli effetti del moto sismico sulle condizioni di stabilità delle aree in pendio. Considerata la complessità di questo problema di dinamica dei terreni, sono stati proposti numerosi approcci differenti; tuttavia in letteratura si riscontra un sostanziale accordo nel riconoscere il metodo degli spostamenti proposto da Newmark per i pendii naturali come il miglior compromesso tra l'accuratezza del risultato ottenuto, il livello di caratterizzazione geotecnica richiesto dall'analisi e la definizione di un affidabile input sismico.
L'approccio di Newmark, in sostanza, consiste in un problema di equilibrio limite, in cui la massa di terreno potenzialmente in frana viene assimilata ad un corpo rigido sottoposto ad azioni destabilizzanti, (peso del terreno, eventuali sovraccarichi agenti sul pendio, azioni inerziali di natura sismica) e ad azioni stabilizzanti (resistenza a taglio disponibile lungo una data superficie di potenziale scorrimento).
La massa di terreno, secondo tale approccio, permane in equilibrio fin tanto che le azioni stabilizzanti risultino superiori a quelle destabilizzanti, ovvero fino a quando il valore del fattore di sicurezza sismico (F_s) del pendio rimane superiore all'unità. La massa di terreno subisce invece spostamenti permanenti quando, per effetto delle azioni sismiche o per la riduzione della resistenza a taglio, il fattore di sicurezza scende sotto l'unità e, dunque, il sistema delle forze cui la massa stessa è sottoposta non risulta più equilibrata dando luogo ad accelerazioni.
Nell'ambito della metodologia descritta assume particolare importanza il valore dell'accelerazione sismica per cui il pendio è in condizione di equilibrio limite, che viene definito *accelerazione critica* (k_c), e che dipende dal meccanismo di collasso assunto e dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del terreno. Il moto relativo della massa di terreno instabile rispetto alla sottostante formazione stabile ha inizio proprio quando l'accelerazione sismica supera, per la prima volta, il valore critico. Da tale istante il pendio inizierà ad accumulare spostamenti permanenti fin tanto che l'accelerazione sismica, invertendosi di segno, annullerà la velocità relativa della massa in frana. Il moto del terreno riprenderà nuovamente con le stesse modalità quando l'accelerazione sismica cui la massa è sottoposta supererà nuovamente il valore critico. Al termine dell'agitazione sismica, la sommatoria di tutti i suddetti spostamenti rappresenta lo spostamento permanente cumulato dal pendio per effetto dell'evento sismico preso in esame.
Con riferimento al meccanismo di pendio indefinito (schema geometrico di riferimento in figura 1) ed indicando con c', ϕ' e γ rispettivamente la coesione efficace, l'angolo di resistenza al taglio e il peso dell'unità di volume del terreno e con ω l'inclinazione dell'azione sismica rispetto all'orizzontale, le espressioni del fattore di sicurezza statico F_s e dell'accelerazione critica k_c del pendio (espressa come frazione dell'accelerazione di gravità) sono le seguenti:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma \cdot H \cdot \cos\beta \cdot \mathrm{sen}\beta} + \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \cdot (1 - r_u)$$

$$k_c = \frac{c'/(\gamma \cdot H \cdot \cos\beta \cdot \mathrm{sen}\beta) + \cos\beta \cdot \tan\phi' \cdot (1 - r_u) - \mathrm{sen}\beta}{\cos(\beta + \omega) + \tan\phi' \cdot \mathrm{sen}(\beta + \omega)}$$

con $r_u = \frac{\gamma_w \cdot H_w}{\gamma \cdot H}$

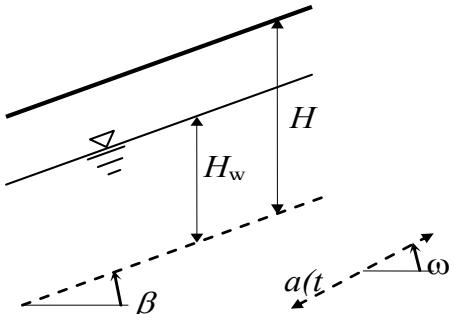

Figura 1 – Schema di pendio indefinito

Il termine β rappresenta l'angolo di pendio, mentre r_u rappresenta il coefficiente di pressione interstiziale e descrive le condizioni idrauliche del pendio; il coefficiente può assumere valori compresi tra r_u=0 e r_u=0,5 corrispondenti, rispettivamente, ad una superficie piezometrica posta al di sotto della superficie di scorrimento o alla quota del piano campagna. Relativamente all'angolo ω, sarà assunto il valore critico $\omega_{cr}=\phi'-\beta$ per il quale è facile dimostrare che il valore dell'accelerazione critica risulta minimo, consentendo, quindi, una stima cautelativa degli spostamenti permanenti indotti.
Volendo testare il comportamento della modellazione geotecnica con riferimento esclusivo ai differenti parametri geometrici derivati dai DTM (Digital Terrain Model) disponibili, le altre variabili in gioco sono state considerate costanti, e precisamente pari a: r_u=0, c'=0 kN/mq, ϕ'=30° e γ=19 kN/mc, parametri corrispondenti ad un terreno sabbioso (e dunque privo di coesione) di caratteristiche medie.

3. Le basi altimetriche di riferimento

Le applicazioni presentate nell'ambito del presente lavoro sono state sviluppate su un'area campione di 1km x 1km, per la quale sono disponibili[1] un modello digitale del terreno ad alta risoluzione (1m) derivato da rilevamenti laserscan e un modello più tradizionale con risoluzione geometrica pari a 25m. Le precisioni dichiarate sono pari a ±0.5m (σ) per il modello ad alta risoluzione (indicato nel seguito con Dtm1m) e ±1-2m per l'altro (indicato con Dtm25m).
Al fine di testare la procedura con riferimento ad un maggior numero di risoluzioni geometriche, il modello ad alta risoluzione è stato ripetutamente ricampionato, mediante algoritmo d'interpolazione bilineare, fino ai valori di 2m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 40m per pixel. Tali ulteriori modelli (interpolati) vengono indicati nel seguito con le sigle: Int2m, Int5m, Int10m, Int15m, Int20m, Int25m, Int30m, Int40m.
Nella tabella 1 vengono sintetizzate le principali caratteristiche dei DTM utilizzati nel seguito. Si osservi che, a fronte di un valore medio delle quote e di una deviazione standard piuttosto "stabili", al crescere della

Modello		**Quote [m]**			
Nome	N° celle	Min	Med	Max	DevStd
Dtm1m	1002001	647,616	726,289	828,677	37,006
Int2m	251001	647,616	726,265	828,601	37,002
Int5m	40000	647,998	726,315	828,357	36,957
Int10m	10000	648,499	726,380	827,901	36,948
Int15m	4489	648,061	726,187	827,215	37,201
Int20m	2500	649,744	726,39	828,278	36,921
Int25m	1600	651,045	726,323	826,281	36,951
Dtm25m	1600	654,797	726,216	827,799	36,585
Int30m	1089	654,496	726,609	825,112	36,4549
Int40m	625	654,238	726,379	825,964	36,931

Tabella 1 – Caratteristiche dei DTM utilizzati

[1] I modelli, prodotti da SwissTopo (Ufficio Federale di Topografia) e relativi ad una piccola porzione del territorio svizzero utilizzata come area test, sono stati gentilmente concessi in uso per finalità scientifiche nel corso di uno stage dal prof. A.Carosio, direttore dell'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria del Politecnico Federale di Zurigo (ETH) al quale vanno i ringraziamenti degli autori.

dimensione del pixel si delinea una certa convergenza dei valori di estremità (il minimo ed il massimo) verso la media. Tale fenomeno è una inevitabile conseguenza della
maggiore dimensione del pixel che, dovendo essere rappresentativo della media delle quote della superficie occupata, provoca un "appiattimento" dei valori isolati, siano essi picchi di massimo o di minimo. Si nota inoltre un certo scarto tra i valori caratteristici del modello a 25m (Dtm25m) e quelli del modello interpolato di pari risoluzione (Int25m), il che solleva qualche perplessità sulla reale efficienza degli algoritmi di interpolazione normalmente utilizzati in termini di affidabilità del risultato. Nella fattispecie, le interpolazioni sono state effettuate sul Dtm1m con il modello bilineare, ma si è avuto modo di verificare che, anche adottando altri algoritmi disponibili (cubico e di prossimità), si ottengono risultati molto simili tra loro.

4. Le elaborazioni effettuate

Una delle operazioni preliminari che è stata effettuata su tutti i modelli disponibili è stato il calcolo del grid delle pendenze, mediante l'algoritmo *derive slope* dello *Spatial Analyst* di *ArcGIS*. Poiché il grid delle pendenze β risulta uno dei parametri di input (di natura esclusivamente geometrica) più importanti nella modellazione adottata, è sembrato opportuno effettuare una prima analisi dei dati disponibili, al fine di comprenderne meglio le logiche di variazione. I risultati di queste analisi sono sintetizzati nella tabella 2 e nella figura 2, dalle quali si possono dedurre le seguenti osservazioni:

- al crescere della dimensione del pixel, come era logico attendersi, le classi presenti con minore frequenza nel campione disponibile (0°-4° e da 25°-30° in su) hanno la netta tendenza a decrescere in termini di superficie percentuale occupata, fino addirittura a scomparire nei casi più estremi;
- al crescere della dimensione del pixel, le classi maggiormente rappresentate nel campione disponibile (da 4°-8° a 12°-16°) hanno la tendenza prima a crescere fino ad un picco che solitamente viene raggiunto in corrispondenza dei modelli con pixel di 20-25m, per poi mantenersi sostanzialmente stabili o con una leggera flessione.

In altre parole, avviene una sorta di "schiacciamento" del diagramma di distribuzione statistica del dato verso il valore medio, il che comporta, inevitabilmente, la perdita dei valori estremi. Si osservi inoltre una differenza non trascurabile tra i grid delle pendenze derivati dal modello a 25m (Dtm25m) e quello interpolato di pari risoluzione (Int25m), fatto che conferma quanto già osservato nel paragrafo 2, ma con una evidenza ancora maggiore.

Modello	**Classi di pendenza [°]**											
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	>50
Dtm1m	18,19	25,97	18,47	11,20	7,83	6,30	3,92	2,76	2,06	1,45	0,93	0,92
Int2m	16,53	26,06	19,05	12,08	8,67	6,65	3,79	2,56	1,87	1,35	0,74	0,44
Int5m	13,10	27,12	21,12	14,60	9,63	6,46	2,75	1,91	1,57	1,22	0,47	0,05
Int10m	10,98	29,03	23,77	14,57	8,86	5,95	2,52	1,76	1,42	1,04	0,10	0,00
Int15m	10,02	29,74	24,46	14,81	8,42	5,79	2,70	1,51	1,38	0,69	0,02	0,00
Int20m	9,76	31,28	24,68	14,60	8,20	5,92	2,60	1,44	1,08	0,44	0,00	0,00
Dtm25m	6,75	36,63	26,19	12,50	8,94	4,63	2,38	1,06	0,63	0,31	0,00	0,00
Int25m	9,31	32,31	24,00	15,63	8,56	5,00	2,56	1,31	1,00	0,31	0,00	0,00
Int30m	9,64	33,43	23,60	15,70	8,45	4,78	2,48	1,10	0,73	0,09	0,00	0,00
Int40m	9,76	32,32	25,92	15,84	7,20	5,44	2,24	0,96	0,32	0,00	0,00	0,00

Tabella 2 -Variazioni delle classi di pendenza [°] del terreno: % di superficie occupata per modello

Successivamente, sulla base dei grid delle pendenze precedentemente elaborati e dei parametri caratteristici del terreno assunti a riferimento (cfr. par.2), è stato effettuato il calcolo del fattore di sicurezza F_s su tutta l'area disponibile. Si osservi che i risultati delle elaborazioni effettuate hanno evidentemente una valenza teorica, strettamente connessa alle ipotesi fatte per caratterizzare i terreni. In altri termini, l'individuazione di aree in cui il fattore di sicurezza F_s risulti minore di 1 non comporta nella realtà l'esistenza di un fenomeno franoso in atto, ma è imputabile ad un contributo

della coesione qui non preso in considerazione o ad una sotto-stima dell'angolo di resistenza a taglio. Fatte queste premesse, è evidente che i risultati presentati di seguito non rappresentano la realtà, ma la rappresenterebbero qualora il contesto geotecnico-geologico ipotizzato fosse reale.

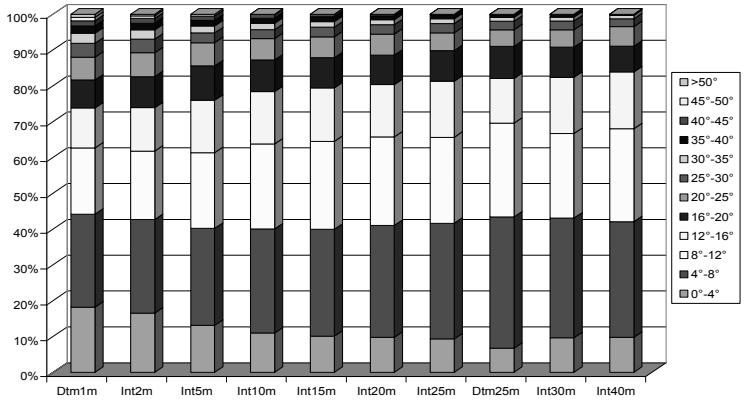

Figura 2 - Istogrammi delle classi di pendenza [°] del terreno: % di superficie occupata per modello

Come si può osservare dalla tabella 3 e dalla figura 3, appare abbastanza evidente una diminuzione percentuale delle aree con coefficiente di sicurezza F_s<1 al crescere della dimensione del pixel di riferimento. Il fenomeno, che assume un andamento di tipo pseudo-esponenziale, deve essere certamente considerato rilevante, viste le variazioni comprese tra 8,12% e 1,28%. In altri termini, *effettuare valutazioni utilizzando un modello digitale del terreno non adeguato* può condurre a risultati non solo poco attendibili ma, per di più, *a tutto svantaggio della sicurezza*, visto che ampie aree identificate come instabili nei DTM a più alta risoluzione risultano invece perfettamente stabili in base a quelli a bassa risoluzione.

A maggior riscontro di quanto sopra si osservi anche la serie di carte tematiche riportate in figura 4, nelle quali vengono evidenziate in nero le aree dove F_s<1 ed in grigio quelle con F_s>1. Al di là della progressiva (procedendo dall'alto a sinistra verso destra in basso) riduzione delle aree potenzialmente instabili già evidenziata dal grafico di figura 3, si osservi anche come, al ridursi della risoluzione, vada via via radicalmente modificandosi la forma della zona d'interesse. Effettuando una analisi basata esclusivamente su modelli a bassa risoluzione (da 20-25m in su) si rischia dunque di trascurare importanti porzioni di territorio che potrebbero essere verosimilmente interessate da fenomeni d'instabilità. Utilizzando invece solo modelli ad altissima risoluzione (1-2m) si tende (ma a vantaggio della sicurezza) ad un eccesso di classificazione con F_s <1, in quanto possono essere classificate con F_s <1 anche celle totalmente isolate. Nella realtà, tuttavia, è ragionevole ritenere che, viste le piccole dimensioni del pixel e, conseguentemente, le ridotte masse di terreno in gioco, tali celle isolate con F_s <1 potrebbero anche rimanere stabili o, comunque, dar luogo a fenomeni non preoccupanti. Potrebbe essere utile in tal senso, nell'ottica di considerare veramente instabili solo porzioni di terreno costituite da un numero minimo di celle contigue, effettuare una analisi di prossimità al contorno.

Procedure simili (qui omesse) sono state effettuate per la valutazione dell'accelerazione critica k_c.

Modello	**Numero di celle**			**Superficie %**	
	Totale	Fs <1	Fs >1	Fs <1	Fs >1
Dtm1m	1002001	81317	920684	8,12%	91,88%
Int2m	251001	17485	233015	6,97%	92,83%
Int5m	40000	2086	37914	5,22%	94,79%
Int10m	10000	432	9568	4,32%	95,68%
Int15m	4489	162	4327	3,61%	96,39%
Int20m	2500	74	2426	2,96%	97,04%
Int25m	1600	42	1558	2,63%	97,38%
Dtm25m	1600	32	1568	2,00%	98,00%
Int30m	1089	21	1068	1,93%	98,07%
Int40m	625	8	617	1,28%	98,72%

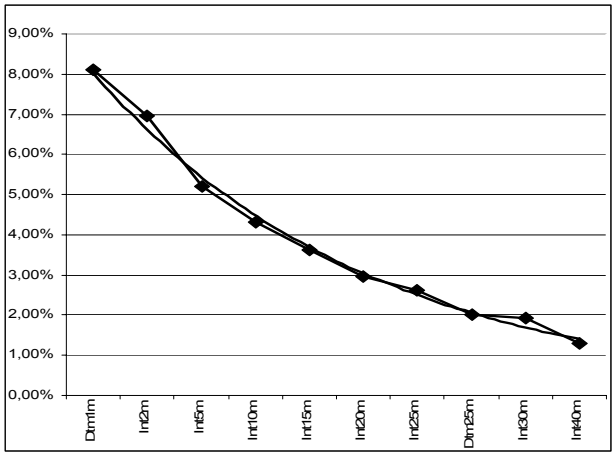

Figure 3 – Tabella e grafico delle variazioni delle aree in cui il coefficiente di sicurezza Fs risulta minore di uno in funzione della risoluzione del DTM

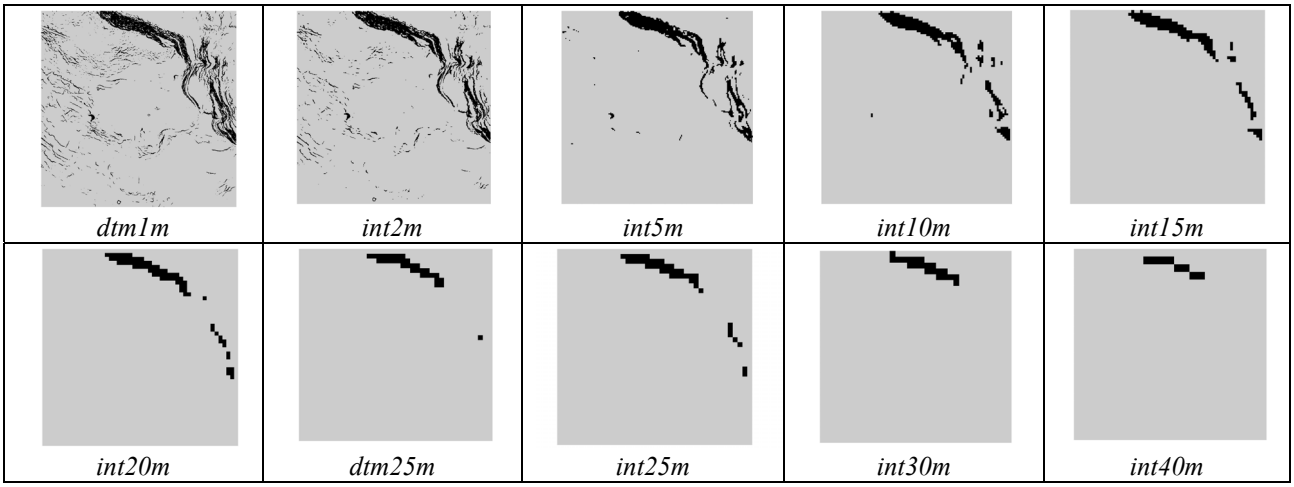

Figure 4 – Variazioni del coefficiente di sicurezza Fs in funzione della risoluzione del DTM: ogni mappa ha dimensione 1km x 1km e le aree potenzialmente instabili sono evidenziate in nero(Fs<1)

5. Conclusioni

Nel presente lavoro, sulla base di alcune esperienze condotte in passato relativamente alla messa a punto di una procedura GIS di valutazione della stabilità dei versanti, si è iniziato a esplorare il delicato argomento dei requisiti qualitativi richiesti ai dati geografici al fine di garantire alle modellazioni un adeguato livello di affidabilità dei risultati. In particolare sono stati esaminati differenti modelli digitali del terreno (DTM) di una stessa area campione con risoluzioni comprese tra 1m e 40m e, in base a questi modelli, è stata calcolata la distribuzione al suolo del fattore di sicurezza F_s dei versanti. Dall'analisi dei risultati sono emerse significative differenze imputabili esclusivamente al diverso DTM utilizzato, per cui diventa fondamentale definire la risoluzione ottimale, intesa come miglior compromesso tra i costi di realizzazione del DTM stesso ed un livello soddisfacente di affidabilità dei risultati. Considerato che i costi di realizzazione per passare da una risoluzione di 25m ad una di 1-2m possono essere anche cento volte superiori, si ritiene, sulla base delle analisi effettuate, che il miglior compromesso sia un modello di risoluzione pari a 5-10m.

Bibliografia

Carosio A., Condorelli A., Mussumeci G. (2006) "*IMPIEGO DI DEM AD ALTA RISOLUZIONE NELL'AMBITO DI SIT "SPECIALIZZATI"*" - Convegno Nazionale SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D" – Castellaneta Marina (Taranto), 13-25 Giugno 2006

Biondi G., Condorelli A., Maugeri M., Mussumeci G. (2005) "*STRUMENTI DI ANALISI E METOLOGIE DI RAPPRESENTAZIONE IN UN SIT "SPECIALIZZATO" SUL RISCHIO SISMICO DI FRANA*" – Bollettino SIFET n°1/2005, pp.53-70

Biondi G., Condorelli A., Maugeri M., Mussumeci G. (2004) "*EARTHQUAKE-TRIGGERED LANDSLIDE HAZARD IN THE CATANIA AREA*" - 4th International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation RISK ANALYSIS 2004 (Wessex Institute of Technology) - 27 – 29 Settembre 2004, Rhodes (Greece)

Biondi G., Condorelli A., Maugeri M., Mussumeci G. (2003) "*MODELLAZIONE GIS PER IL MONITORAGGIO SU VASTA SCALA DELLA STABILITÀ DEI PENDII E DEGLI SPOSTAMENTI PERMANENTI DI ORIGINE SISMICA*" - 7a Conferenza Nazionale ASITA, Vol. II, pp. 1445 -1450 – Verona 28-31 ottobre 2003

Newmark N.M.. (1965) "*EFFECT OF EARTHQUAKES ON DAM AND EMBANKMENT*", The Rankine lecture, Geotèchnique, Vol.15, No.2, 1965