

ANALISI DELL'INFLUENZA DELLA RISOLUZIONE SPAZIALE DI UN TIN SULLA RISPOSTA IDROLOGICA A SCALA DI BACINO

Elisa ARNONE (*), Leonardo V. NOTO (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, viale delle Scienze, 90128 Palermo, tel 091 6657726, fax 091 6657749, eliarn@libero.it, valerio@idra.unipa.it.

Riassunto

Negli ultimi anni sono state intraprese numerose ricerche sul fronte della modellistica idrologica *a base fisica e a parametri distribuiti* per consentire lo sviluppo di modelli in grado di tenere conto delle dinamiche dei processi idrologici spaziali e temporali interne al bacino, dell'eterogeneità spaziale delle caratteristiche topografiche e pedologiche del territorio nonché delle non-linearità dei suddetti processi. La maggiore difficoltà connessa allo sviluppo di tali modelli è legata all'eccessivo onere computazionale e quindi ai proibitivi tempi di esecuzione che una rappresentazione della superficie topografica con DEM a maglie quadre (*DEMgrid*) potrebbe comportare.

In questo lavoro è stato utilizzato un modello idrologico a base fisica e a parametri distribuiti che utilizza, per la rappresentazione della superficie, modelli a risoluzione multipla, ovvero i *TIN* (*Triangular Irregular Network*), permettendo una forte riduzione degli elementi computazionali rispetto ad una geometria a maglie quadre regolari, senza un'eccessiva perdita di dettaglio nelle informazioni. I *TIN* sono stati derivati, utilizzando un apposito software, a partire dal *DEMgrid* sulla base dei concetti di similarità idrologica e fissando il valore della percentuale dei punti che si vogliono mantenere passando dal *DEMgrid* al *TIN*.

Scopo dello studio è allora quello di valutare l'effetto della risoluzione del *TIN* sulla descrizione delle caratteristiche topografiche e sulla risposta idrologica del bacino valutata attraverso la descrizione di opportune variabili spazio-temporali. In particolare, il lavoro si sviluppa in due fasi: nella prima l'obiettivo sarà quello di verificare, passando dal *DEMgrid* ai *TIN* a diversa risoluzione, il mantenimento, in senso statistico, delle caratteristiche morfologiche del bacino di interesse; nella seconda fase, l'obiettivo sarà di verificare la risposta dei diversi *TIN* durante la simulazione dei processi idrologici attraverso l'uso del su detto modello idrologico. Il bacino di applicazione è il bacino idrografico del torrente Maganoce, ubicato nella parte nord-occidentale della Sicilia.

Abstract

The last researches in hydrological model development led to new *physically-based and spatially distributed* model based on digital data able to take into account the spatial and temporal dynamics within the basin, the topographic and pedological characteristics spatially distributed and also the non-linear behavior of these processes. Nevertheless, similar models require a detailed representation of spatial variables usually provided using a grid data based on a single resolution (*DEMgrid*) with a significant number of elements. Therefore, this approach leads to serious computational difficulty with very large and unacceptable execution times. Instead, the model used in this study is a fully-distributed, physically-based hydrological model using a multiple resolution approach in representing the spatial heterogeneity of topography, offering a reduction of the computational elements without any loss of information. The first part of the study deals with the assessment of the influence of *TIN* resolution on the morphologic characteristics by means the analysis of specific parameters; afterwards, the effect on the hydrologic processes is evaluated by using the above mentioned model. The application is carried out on the Maganoce basin.

1 Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito ad una sempre maggiore evoluzione nel campo della modellistica idrologica a parametri distribuiti raggiunta soprattutto grazie alla crescente disponibilità di potenti mezzi di calcolo e all'avvento dei nuovi supporti digitali per l'informazione territoriale, ovvero dei *Modelli Digitali dell'Elevazione (DEM)*.

L'eterogeneità spaziale della topografia, dell'uso-copertura del suolo, della vegetazione e le dinamiche spazio-temporali delle precipitazioni e della distribuzione dell'umidità nel suolo rappresentano i fattori chiave che influiscono in maniera determinante sulla esatta stima dei deflussi. I modelli idrologici a parametri distribuiti si caratterizzano proprio per l'esplicita rappresentazione di tali fattori. In particolare, l'accurata rappresentazione delle caratteristiche morfologiche e topografiche del terreno è di fondamentale importanza ai fini di un efficiente comportamento del modello, dal momento che la risposta idrologica agli eventi meteorici dipende strettamente dalle proprietà della superficie (pendenza, curvatura, esposizione, etc.).

Le due tipologie di DEM utilizzabili per la rappresentazione della morfologia sono il DEM a maglie quadre regolari (*DEMgrid*) e il *TIN*, *Triangular Irregular Network*, a maglie triangolari con risoluzione multipla. Benché i primi siano di più comune utilizzo per la semplice e più affidabile struttura, essi presentano difetti legati alla risoluzione della maglia: una bassa risoluzione determinerebbe un'inevitabile perdita di accuratezza, mentre un'elevata risoluzione comporterebbe una grande quantità di elementi di calcolo. Nel modello *TIN*, invece, la densità dei punti distribuiti nel territorio può essere fortemente disomogenea in modo da selezionare un maggior numero di punti nelle zone in cui la superficie è molto variabile e un minor numero di punti laddove la superficie è molto regolare. Così facendo si riesce a rappresentare la superficie con una notevole accuratezza senza richiedere un'eccessiva quantità di punti campione riducendo, così, il numero di elementi computazionali e quindi i tempi di esecuzione del modello.

In letteratura sono diversi i metodi presenti per la costruzione dei *TIN*, distinguendosi tra metodi tradizionali e quelli più avanzati. Tra i primi vi sono il metodo *VIP* (*Very Important Point*) e il *Latticetin*, implementati nel programma ARC/INFO GIS e che rappresentano due diverse tecniche di selezione dei punti; i secondi si basano sui concetti di similarità idrologica, oltre che sui metodi tradizionali stessi. L'algoritmo *VIP* presuppone la scelta della percentuale di punti v che si vogliono mantenere passando dal grid al *TIN*. Al crescere di tale parametro, aumenta il dettaglio ma anche il numero di nodi computazionali.

Per la creazione dei *TIN*, in questo lavoro è stato applicato un software creato presso il Parsons Laboratory del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) denominato *TIAP* (*TINindex Analysis Package*), (Vivoni et al., 2003a). In esso è implementato l'*Hydrographic TIN*, ovvero un metodo avanzato di generazione di *TIN* a partire dal *DEMgrid* che combina la tecnica del metodo *VIP* con la rappresentazione delle principali caratteristiche idrografiche della superficie, ossia reticoli, limiti di bacino e delle *floodplain* (aree soggette ad inondazione). Il *DEMgrid* di input viene utilizzato per estrarre i limiti del bacino, la rete idrografica e i limiti delle *floodplain* che, assieme ai punti campionati provenienti dal DEM, costituiscono la base per la costruzione di un *hydrographic TIN*. Le *floodplains* vengono delimitate attraverso l'uso di un algoritmo (Williams et al., 2000) che sceglie i punti rientranti entro uno specifico valore di soglia rappresentante la differenza di quota con il fondo del corso d'acqua. All'interno di queste aree vengono quindi selezionati diversi punti che vengono connessi a formare una 'fascia' di triangoli.

La percentuale di punti del DEM di partenza da mantenere nel *TIN*, è regolata dal parametro v del metodo *VIP*. I punti vengono connessi secondo la triangolazione *Delaunay* (Vivoni et al., 2003a). L'*Hydrographic TIN*, infine, si basa sul criterio della *slope-preserving* il cui scopo è quello di mantenere, nel passaggio dal DEM al *TIN*, la distribuzione spaziale della pendenza.

Gli obiettivi di questo lavoro sono di valutare l'effetto della risoluzione del *TIN*, fissata attraverso il parametro v , in prima analisi sulla distribuzione statistica delle caratteristiche morfologiche del

bacino sperimentale preso in esame, rappresentate attraverso specifici parametri, e poi sulla risposta idrologica del bacino attraverso l'applicazione di un modello idrologico distribuito e a base fisica.

2 Effetto della risoluzione sulle caratteristiche morfologiche del bacino Maganoce

Il bacino di applicazione per l'analisi appena descritta è il bacino idrografico del torrente Maganoce, tributario del lago di Piana degli Albanesi sul fiume Belice Destro, ubicato nella parte nord-occidentale della Sicilia ed esteso per circa 3 km². Del bacino si dispone di un *DEMgrid* a 4m e della carta uso/ copertura del suolo.

Applicando il metodo *Hydrographic TIN* del *TIAP* al *DEMgrid* sono stati ricavati otto *TIN* corrispondenti ai otto diversi valori di v riportati in tabella 1, relativi a situazioni di bassa, media e alta risoluzione. Sia per il *DEMgrid* che per i *TIN* sono stati determinati alcuni parametri topografici e statistici e le loro distribuzioni grazie alle quali è possibile effettuare il confronto ed evidenziare le differenze, in termini di accuratezza, tra le diverse configurazioni. In figura 2 vengono riportate le mappe a bassa, media e alta risoluzione, ovvero T5, T20 e T70. Da un'analisi semplicemente visiva, si nota come al crescere della percentuale i triangoli della rete diventano sempre più fitti e la rappresentazione della superficie è sempre più vicina a quella del *DEMgrid*.

ID	TIN	v%
1	T ₅	5
2	T ₈	8
3	T ₁₀	10
4	T ₁₅	15
5	T ₂₀	20
6	T ₃₀	30
7	T ₅₀	50
8	T ₇₀	70

Tabella 1 -
Valori di v .

Per disporre di una valutazione quantitativa dei risultati, è possibile analizzare l'andamento che assumono determinati parametri evidenziati come descrittori delle caratteristiche topografiche.

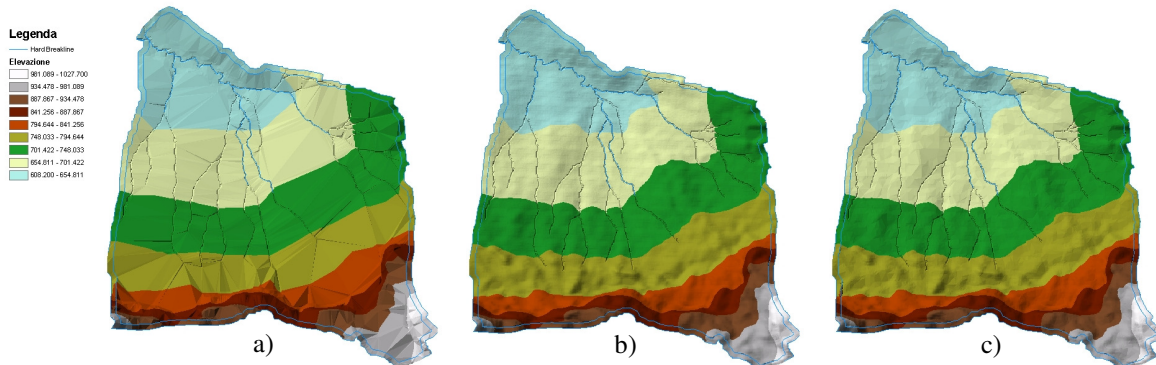


Figura 2 – Mappe dei TIN T5 (a), T20 (b) e T70 (c).

Tale valutazione è stata effettuata costruendo e confrontando le funzioni di densità di probabilità (*pdf*) relative ai diversi parametri esaminati. I parametri scelti sono: l'elevazione, la pendenza, la curvatura e l'indice topografico λ (figura 3). Quest'ultimo è un parametro sintetico che esprime l'attitudine di una porzione di terreno a produrre deflusso sottosuperficiale. È stato definito da Beven e Kirkby (1979) e poi da O'Loughlin (1986) come $\lambda = \ln(a / \tan \beta)$, essendo a l'area contribuyente per unità di larghezza associata ad ogni pixel, mentre $\tan \beta$ è la pendenza della superficie in corrispondenza del pixel.

La *pdf* dell'elevazione (figura 3a) fornisce, di fatto, un unico trend per $v > 5\%$, appoggiandosi perfettamente a quella del DEM. Anche nel caso della pendenza (figura 3b) gli andamenti sono molto prossimi tra loro. Come già precisato, del resto, il metodo usato si basa sul criterio della *slope preserving*, tendendo a preservare la distribuzione spaziale della pendenza. Tuttavia, i *TIN* T5, T8 e T10 in corrispondenza del picco hanno probabilità un po' più alte rispetto ai *TIN* T20, T30, T50, T70 e al DEM. Il T15 presenta un comportamento intermedio. La curvatura (figura 3c) è l'unico parametro che richiede un'elevata risoluzione, pari al 70%, perché non ci siano notevoli scostamenti tra la curvatura descritta dal *TIN* e quella fornita dal DEM. L'indice topografico (figura 3d) è invece rappresentativo di quello che potrebbe essere il giusto compromesso tra onere computazionale e

dettaglio informativo. In prossimità del picco, infatti, solo per $v > 20\%$ le *pdf* si sovrappongono a quella del DEM. All'aumentare dell'indice, e quindi dell'area contribuente, invece, tutti gli andamenti sono pressoché gli stessi. Questo accade in virtù della risoluzione multipla del modello *TIN*, per cui è possibile infittire la densità dei punti proprio in corrispondenza del reticolo e quindi delle zone ad alto valore di area contribuente, determinando, per quelle zone un comportamento simile a quello del DEM.

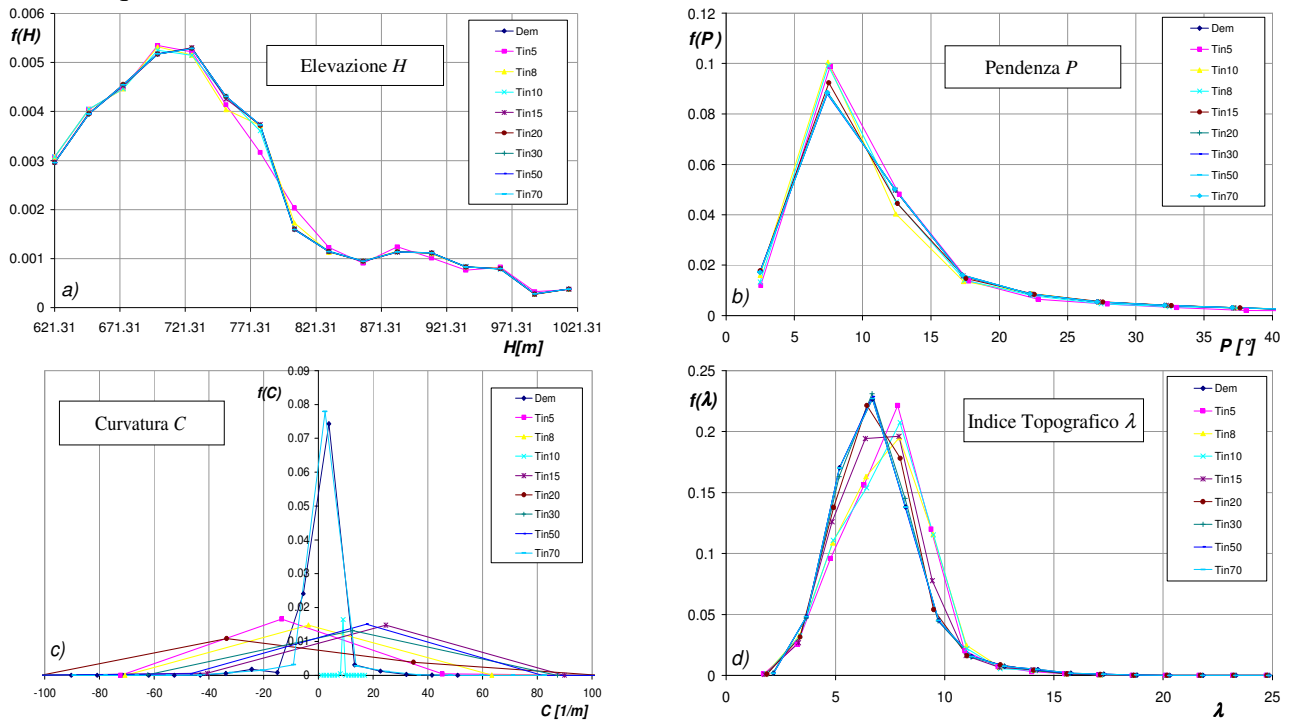


Figura 3 – Confronto TIN-DEM: pdf di elevazione (a), pendenza (b), curvatura (c) e indice topografico (d).

3 Effetto della risoluzione sulla risposta idrologica del bacino Maganoce

L'applicazione di un modello idrologico al bacino Maganoce ha permesso di valutare l'effetto della risoluzione del *TIN* sulla simulazione dei diversi processi idrologici. Il modello utilizzato è un modello a parametri distribuiti e fisicamente basato che utilizza come rappresentazione della morfologia del territorio la struttura *TIN*. Si tratta di un modello abbastanza complesso che richiede un'accurata descrizione delle caratteristiche del terreno utilizzando informazioni spazialmente distribuite quali pedologia, uso/soilo, le *floodplains* e forzanti climatiche. Rispetto ad una rappresentazione di tipo raster del territorio, l'uso di tale modello permette una drastica riduzione del numero dei nodi di calcolo, permettendo così una notevole efficienza computazionale senza consistenti perdite per quanto riguarda il dettaglio dell'informazione idrologica (Vivoni et al., 2003b) né eccessivi tempi di esecuzione del modello.

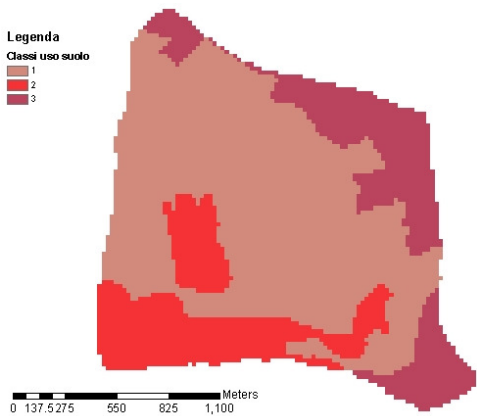
Il modello cerca di tenere conto di tutti i fenomeni che entrano in gioco nella trasformazione idrologica, quindi dei processi di deflusso profondo e ipodermico, dei processi di intercettazione, di infiltrazione, di evapotraspirazione, delle dinamiche dell'acquifero e redistribuzione laterale dell'umidità. Gli algoritmi implementati nel modello tentano allora di valutare tutte le interdipendenze tra questi fenomeni e le interazioni dei flussi idrici per riprodurre al meglio i meccanismi fisici che controllano la risposta idrologica. Un'altra importante peculiarità del modello consiste nella capacità di tenere conto anche delle caratteristiche di eterogeneità e di anisotropia del suolo, inserendo tra i dati di input anche le carte di uso/copertura del suolo e di copertura vegetale. Le variabili dinamiche vengono stimate usando l'approccio alle differenze finite su di un volume di controllo rappresentato dai *poligoni di Voronoi*.

In questo lavoro non è stato eseguito alcun processo di calibrazione e validazione del modello, per cui non è previsto nessun confronto con la reale risposta idrologica osservata.

Per valutare l'influenza della risoluzione del *TIN* sulla risposta idrologica simulata, sono state effettuate sei simulazioni a partire da sei diverse configurazioni *TIN*, a parità di ogni altra condizione, per i valori del parametro v del metodo VIP riportati in tabella 4.

ID	TIN	v%
1	T1	5
2	T2	10
3	T3	15
4	T4	20
5	T5	30
6	T6	50

Tabella 4 - Valori di v per il modello idrologico.



Classe	Categoria uso suolo	Caratteristiche pedologiche (permeabilità)
1	S. coltivato	Bassa
2	S. non coltivato	Media
3	S. vegetato	Alta

Figura 5 – Carta uso/copertura del suolo e le relative classi.

La carta di uso/copertura del suolo utilizzata (figura 5) contiene una classificazione in tre categorie. Alle tre classi corrispondono le categorie di uso del suolo riportate. Le forzanti climatiche sono una serie storica di precipitazione ed un ciclo sintetico dell'evaporazione con un valore complessivo di 6 mm/gg distribuito nell'arco delle 24h. Per poter effettuare un confronto tra le simulazioni relative alle sei configurazioni è stato opportuno riprodurre le stesse condizioni iniziali sia in termini di profondità della falda idrica che di umidità del suolo. L'effetto della risoluzione può essere valutato analizzando l'andamento nel tempo delle variabili concentrate (*lumped*), come la

portata nella sezione di chiusura, e la distribuzione spaziale delle variabili distribuite.

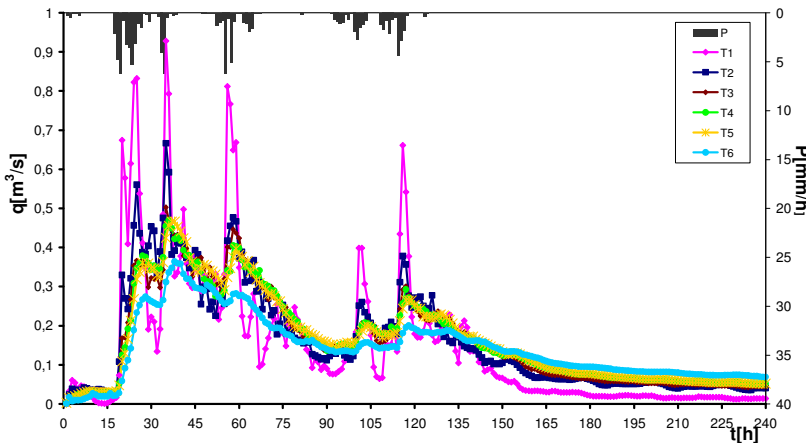


Figura 7 – Portata nella sezione di chiusura per i diversi TIN.

La figura 7 mostra per i diversi *TIN*, l'andamento temporale della portata nella sezione di chiusura. Quello del *TIN* meno dettagliato (T1) mostra un comportamento molto irregolare nella prima fase del diagramma, in corrispondenza del periodo di precipitazione. La curva, infatti, segue in maniera estrema l'andamento delle precipitazioni presentando picchi esagerati per le intensità di pioggia massime e valori molto bassi nei periodi di pioggia con intensità quasi nulla.

Al termine delle precipitazioni la curva assume un andamento più regolare, anche se, rispetto agli altri *TIN*, descrive una fase di esaurimento più ripida subito dopo la fine della pioggia, per stabilizzarsi quasi immediatamente al valore della portata di base del bacino. All'aumentare della precisione del *TIN* le curve tendono ad assumere via via un comportamento più regolare con picchi meno accentuati ed una fase di esaurimento più lenta. Il T2 ($v=10\%$) descrive un comportamento perfettamente intermedio tra il T1 e i *TIN* più dettagliati. Un maggior livello di dettaglio nella rappresentazione della superficie, quindi, porta a dei risultati più regolari che risentono in maniera meno accentuata della dinamica meteorica. Stesse considerazioni possono essere fatte per le altre variabili *lumped* simulate, ma qui non riportate (profondità media dell'acquifero, umidità del suolo nella *root zone*, etc).

In figura 8 è mostrata la distribuzione spaziale della umidità in 1 m di colonna di suolo (*root zone*) per i *TIN* T1, T4 e T6. I valori più alti di umidità, come atteso, si osservano in corrispondenza del reticolo e quindi delle zone in cui converge e si accumula l'acqua. La distribuzione è inoltre fortemente influenzata anche dalle proprietà idrauliche del suolo determinando bassi valori di

contenuto idrico la dove è maggiore la capacità di infiltrazione (ovvero la conducibilità idraulica) e quindi, è più profondo il livello della falda. All'aumentare della risoluzione si osserva come la distribuzione rifletta in maniera quasi perfetta lo strato informativo dell'uso/copertura del suolo da cui dipendono i parametri governanti i processi idraulici simulati.

Anche in questo caso il *TIN* al 20% mostra un comportamento abbastanza accettabile, mediato tra la scarsa e l'alta risoluzione. Tale comportamento è stato anche riscontrato per le altre variabili distribuite qui non mostrate. Dalle valutazioni effettuate si può concludere che i processi idrologici iniziano a risentire della scarsa accuratezza nella rappresentazione topografica per valori di $v < 10\%$.

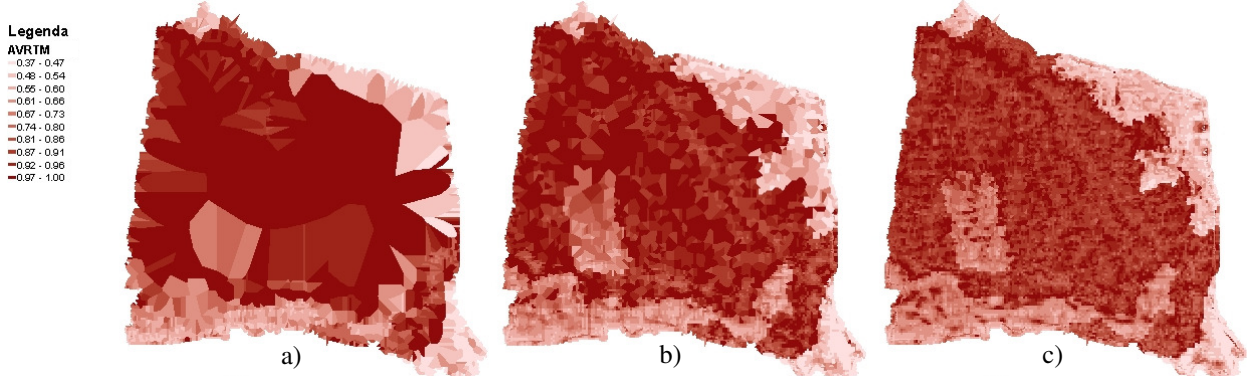


Figura 8 – Umidità del suolo nella root zone a fine simulazione per i TIN T1 (a), T4 (b) e T6 (c).

4 Conclusioni

L'entità della riduzione dell'onere computazionale rispetto ad un *DEMgrid* dipende dal valore del parametro v che si fissa in fase di costruzione del *TIN* con l'utilizzo delle tecniche implementate nel *TIAP*. Dall'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione del *TIAP* al DEM del Bacino Maganoce, si è potuto constatare che la scelta di valori troppo bassi di v ($< 10\% \div 15\%$) potrebbe determinare una scarsa accuratezza nella descrizione di alcune caratteristiche topografiche e idrografiche del bacino, con particolare riferimento alla curvatura e all'indice topografico. Un valore compreso tra il 15% e il 30% rappresenta, invece, un buon compromesso tra onere computazionale e accuratezza nella rappresentazione. Stesse considerazioni possono essere fatte sulla valutazione dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello idrologico. Per i *TIN* con risoluzione 20 volte e 10 volte più bassa di quella del DEM originario ($v = 5 \div 10\%$), infatti, si è riscontrata un'evoluzione dei processi idrologici abbastanza irregolare. Gli andamenti cominciano a descrivere un comportamento più regolare a partire da valori di v del $15\% \div 20\%$.

Si può concludere, quindi, che i risultati ottenuti dalla studio appaiono abbastanza promettenti e che non si commettono gravi mancanze nell'utilizzo di *TIN* a bassa risoluzione. Questo permette di usufruire in maniera completa dei vantaggi offerti dalla struttura a risoluzione multipla riducendo notevolmente i costi e i tempi di elaborazione.

Riferimenti bibliografici

- Beven K.J., Kirkby M.J. (1979), "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Sciences Bulletin*, 24: 43-69
- O'Loughlin E.M. (1986), "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis", *Water Resources Research*, 22 (5): 794-804
- Vivoni et al. (2003,a), " Generation of triangulated irregular networks based on hydrological similarity", *Journal of Hydrologic Engineering*. 9(4): 288-302.
- Vivoni et al. (2003,b), " On the effect of triangulated terrain resolution on distributed hydrologic model response ", *Hydrological Processes*. 19(11): 2101-2122.
- Williams et al. (2000), " An automated technique for delineating and characterizing valley-bottoms settings ", *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 105-114