

Tecniche GIS per il calcolo del bilancio idrologico delle acque superficiali

Maria Teresa NOTO(*), Goffredo LA LOGGIA (**), Leonardo V. NOTO (**)

(*) Ufficio Idrografico Regionale, Via G. Bonsignore, 1, 90135 - Palermo, tel 091 7075983, e-mail mtnoto@uirsicilia.it.

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

Abstract

In questo lavoro è stato sviluppato un modello di bilancio idrologico delle acque superficiali finalizzato alla creazione di mappe spazialmente distribuite, relative al deflusso medio annuo ed all'evaporazione, tramite l'utilizzo di un DEM, di strati informativi relativi alla precipitazione meteorica mensile (proveniente dai dati di pioggia misurati dallo Ufficio Idrografico Regionale della Sicilia). Il modello sviluppato per tutto il territorio siciliano e qui applicato al bacino del fiume Platani, è stata sviluppato implementando una serie di algoritmi eseguiti con script *Avenue*, sfruttando al massimo le capacità del linguaggio di programmazione *object-oriented*. Per stimare il deflusso in siti non strumentati è stato messo a punto e tarato un modello (di tipo regressivo) di previsione a scala annua afflussi-deflussi; si è successivamente proceduto con la mappatura del deflusso reale, lavorando su strati informativi di tipo raster. A partire dallo strato informativo dell'afflusso totale annuo, applicando il modello afflussi-deflussi, si è ottenuto lo strato informativo del deflusso annuo atteso. Lo strato informativo del deflusso reale è stato ottenuto unendo le informazioni del deflusso netto osservato a scala di bacino con il deflusso atteso, elaborando preventivamente uno strato correttivo in cui il valore di ogni cella è pari alla differenza tra il deflusso "netto" osservato dalla stazione di misura e quello medio atteso a scala di bacino.

Abstract

In this study a precipitation grid, a digital elevation model (DEM), gaged streamflow data of Ufficio Idrografico Regionale of Sicily, and other data sets were used to generate spatially distributed maps of mean annual runoff and evaporation for the Platani basin in Sicily. In the process of creating these maps, some gaged watersheds were delineated and a set of hydrologic attributes was compiled for each watershed including net measured inflow and precipitation. To estimate the runoff in ungaged locations, a curve of "expected" annual runoff as a function of rainfall was developed.

An equation fitted to the expected rainfall-runoff curve was applied to each cell in the precipitation grid to generate an expected runoff grid. For gaged watersheds, the difference between the actual runoff per unit area and the expected runoff per unit area was computed, and these values were used to create an adjustment grid. Adding the adjustment grid to the expected runoff grid results in a grid of actual runoff. This method forces the sum of cells in the actual runoff grid within each watershed to equal the net measured inflow for that watershed. In ungaged areas, the actual runoff was assumed to be equal to the expected runoff. By applying a flow accumulation function to the runoff maps, the expected and actual flows were calculated at each 100 m DEM cell in Platani basin and flow map were created.

Introduzione

Le mappe riportanti le portate convogliate dai corsi d'acqua possono avere differenti usi (Arnell, 1995). Innanzitutto esse indicano la quantità di risorse idriche disponibili in una regione e costituiscono quindi importanti strumenti di pianificazione della risorsa idrica. Poi possono essere usate, in combinazione con mappe di precipitazione, per determinare i bilanci idrologici e idrici a scala regionale o continentale e quindi contribuire alla comprensione dei flussi idrici a scala globale. Infine forniscono dati per la validazione dei modelli di simulazione atmosferica e dei modelli idrologici a macro-scala.

In letteratura scientifica la maggior parte di tali mappe sono state prodotte a diverse scale (dalla scala di bacino a scala continentale) (Stancik et al., 1988; Baumgartner e Reichel, 1975, Bishop e Church, 1992, Church et al., 1995, Bishop et al., 1998); quasi tutte però presentano una rappresentazione a isolinee. Le mappe ad isolinee sono adatte per mostrare la variabilità spaziale di una grandezza continua nello spazio, come la precipitazione o la quota, mentre si rivelano meno adatte per descrivere il deflusso idrico che rappresenta la quantità d'acqua accumulata su di un'area. Per questo tipo di variabile le mappe coroplate e dunque i dati riportati su di una griglia regolare si mostrano più adatte, anche perché possono essere facilmente confrontate e utilizzate accanto ai moderni dataset climatici.

In questo lavoro, semplici modelli idrologici di tipo regressivo vengono utilizzati in sinergia con tecniche di analisi spaziale per creare mappe di tipo raster relative al deflusso medio. Tale metodologia è stata sviluppata per l'intera Sicilia e qui viene esposta un'applicazione al bacino idrografico del Platani.

Bilancio idrologico delle acque superficiali

Il bilancio idrologico delle acque superficiali è stato effettuato tramite l'implementazione di un modello finalizzato alla creazione di mappe spazialmente distribuite, relative al deflusso medio annuo. Per la realizzarlo, è stato necessario elaborare una grande quantità di dati, utilizzando il software ArcView GIS e i concetti di programmazione *object oriented* tramite Avenue. I passi più importanti dell'analisi sono stati:

1. reperimento dati e archiviazione in formato digitale all'interno di un SIT [cartografia a scala 1:50.000 dell'IGM, riportato nel sistema di riferimento UTM-ED50; DEM prodotto dall'Assessorato BB.CC.AA. della Regione Sicilia, avente una dimensione caratteristica originaria di 25 m e qui ricampionato su di una griglia con dimensione pari a 100 m; dati di altezza di afflusso e di deflusso annuo relativi ai bacini strumentati dall'Ufficio Idrografico Regionale (UIR) della Sicilia, utilizzando come fonte di dati gli Annali Idrologici dell'UIR];
2. individuazione dei bacini idrografici a partire dal DEM;
3. costruzione e taratura di un modello di previsione a scala annuale afflussi-deflussi;
4. creazione dei grid relativi al deflusso reale e previsto.

Individuazione dei bacini idrografici

Per l'individuazione dei bacini idrografici si è partiti proprio dall'informazione morfologica digitale contenuta nel DEM della regione Sicilia. Prima di procedere con l'individuazione dei bacini idrografici e del relativo reticolo, il DEM originario è stato corretto con 2 operazioni successive, la prima, detta *filling*, è servita al fine di rimuovere le depressioni; la seconda, *burning in the streams*, è servita al fine di ottenere il DEM idrologico, nel quale la rete di drenaggio risulta il più simile possibile alle *blue lines* presenti nella cartografia (in particolare, l'operazione di bruciatura viene effettuata con la preventiva individuazione delle *blue lines* su cartografia e successiva rasterizzazione su una griglia con la stessa risoluzione di quella del DEM e con un incremento della quota delle celle versante, rispetto a quella delle celle fiume). E' proprio sul DEM idrologico che viene applicato l'algoritmo *single-flow* (Jenson e Domingue, 1988) secondo il quale da ciascuna cella l'acqua può raggiungere, in funzione delle differenze di quota, solo una delle otto celle

limitrofe (quattro diagonali e quattro cardinali) ed in particolare quella con pendenza maggiore e che consente l'individuazione dei bacini idrografici, attraverso l'utilizzo di due funzioni:

1. *Flow Direction*, che consente di ottenere lo strato raster delle direzioni di flusso;
2. *Flow Accumulation*, che, applicato allo strato raster delle direzioni di flusso, consente di ottenere la rete di drenaggio.

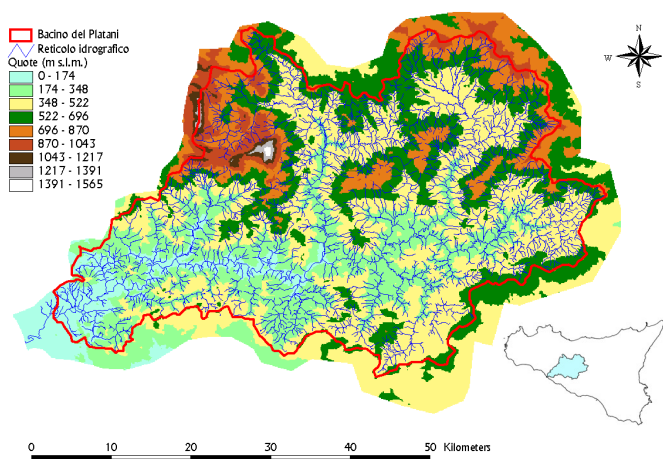


Figura 1 – DEM del bacino Platani e blue-lines da IGM 1:50.000

La metodologia descritta è stata applicata al bacino del fiume Platani (figura 1), identificando cinque sottobacini di cui tre, individuati da tre stazioni idrometriche che hanno funzionato per almeno dieci anni (Belici a Bruciato, Belici a Marianopoli Scalo e Platani a Passofonduto) sono serviti per tarare il modello e costruire le superfici di deflusso; gli altri due, Fanaco e Gallo d'Oro, sono stati scelti per fornire delle analisi comparative con quanto ottenuto con la metodologia tradizionale. Le principali caratteristiche di questi sottobacini (mostrati in figura 3) sono riportate nella tabella di figura 2, in cui è

anche riportata la superficie riportata sugli annali dell'Ufficio Idrografico Regionale (UIR) della Sicilia, insieme a quella ottenuta a partire da DEM con il metodo classico e con il metodo *burning in the streams* (DEM_B).

Figura 2 – Caratteristiche dei bacini esaminati

Bacino	Superficie [Km ²]			H _{min} [m s.l.m.]	H _{max} [m s.l.m.]	H _{med} [m s.l.m.]
	UIR	DEM_B	DEM			
Belici a Bruciato	131.0	131.7	133.8	375	1051.2	618.7
Belici a Marianopoli Scalo	226.0	226.2	227.2	350	105.2	602.2
Platani a Passofonduto	1237.0	1235.2	1223.2	158.4	1565.8	520.3
Fanaco	-	297.8		275	1665.8	641.2
Gallo d'Oro	-	112.8		234.1	699.4	418

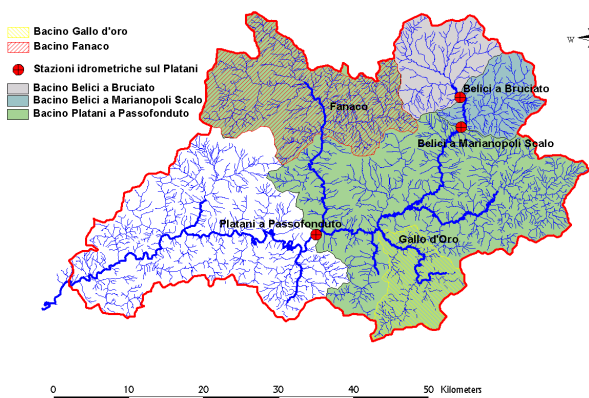


Figura 3 – Bacini esaminati

Dall'analisi della tabella si evince che l'utilizzo del metodo di delimitazione automatica del bacino idrografico *burning in the streams* migliora le prestazioni fornite dall'algoritmo tradizionale in termini di superficie totale. Infatti per tutti e tre i bacini individuati da stazioni dell'UIR la superficie del bacino imbrifero delimitata con la metodologia *burning in the streams* finisce quasi per coincidere con quella indicata dallo UIR negli annali idrologici. La metodologia *burning in the streams* quindi potrebbe migliorare notevolmente le prestazioni del metodo automatico di delimitazione del bacino

imbrifero a partire da DEM che già di per sé era abbastanza veloce e affidabile.

Messa a punto del modello afflussi deflussi a scala annua

Al fine di stimare il deflusso in bacini non strumentati, si è cercato di implementare un semplice modello afflussi-deflussi a scala annuale. Questo modello, basandosi sui dati annuali di afflusso e di deflusso, fornisce una curva di “*previsione*” del deflusso annuale, in funzione dell’afflusso stimato sullo stesso orizzonte temporale al fine di costruire delle mappe di deflusso atteso relative ai bacini in esame.

Tra tutti i bacini delimitati dalle stazioni idrometriche sono stati preliminarmente scartati i bacini relativi a stazioni che hanno funzionato per meno di dieci anni. In questo modo sono stati eliminati 41 bacini portando il totale di bacini utilizzati nella curva afflussi-deflussi a 79. Di questi bacini si è calcolata l’altezza media di afflusso e di deflusso.

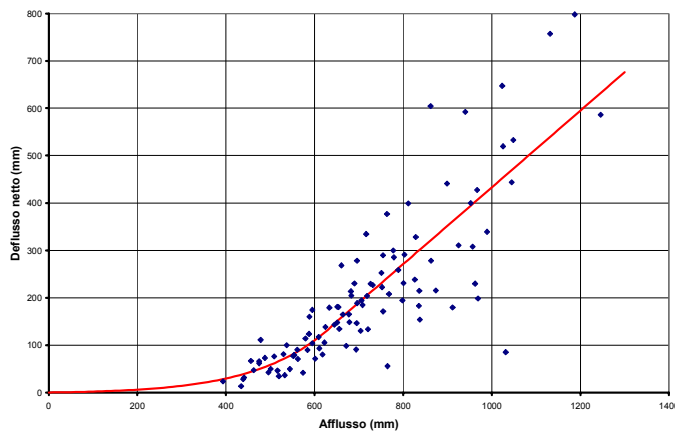


Figura 4 – Relazione afflussi-deflussi netti

I dati così elaborati sono stati disposti nel diagramma riportato in figura 4; analizzando la figura, che riporta il deflusso medio annuo netto in funzione dell’afflusso medio annuo, è evidente che il deflusso aumenta all’aumentare della pioggia; il trend crescente è abbastanza evidente, tuttavia sono presenti alcuni punti (*outliers*) che si discostano da tale trend: tali outliers sono stati scartati ai fini delle elaborazioni successive.

Al fine di ottenere una buona relazione tra Afflussi meteorici e Deflussi è stato utilizzato il modello Afflussi-Deflussi descritto dalle seguenti formule che

minimizzano la somma dei quadrati degli errori tra deflussi misurati e stimati:

$$Q = 0.012086 \cdot P \cdot \exp^{(0.004533 \cdot P)} \quad P < P_0 \quad [1]$$

$$Q = 0.8098 \cdot P - 376.92 \quad P \geq P_0 \quad [2]$$

in cui Q è il deflusso medio annuo [$mm \text{ anno}^{-1}$] e P è l’afflusso medio annuo [$mm \text{ anno}^{-1}$].

Per la mappatura del deflusso reale si è lavorato su strati informativi di tipo *raster* aventi dimensione di maglia uguale a quella del DEM della Regione Sicilia e cioè pari a 100 m. A partire dallo strato informativo contenente i valori delle altezze di afflusso totale annuo (figura 5) è stato creato, applicando il modello afflussi-deflussi descritto dalle [1] e [2], lo strato informativo del deflusso annuo *atteso* (figura 6).

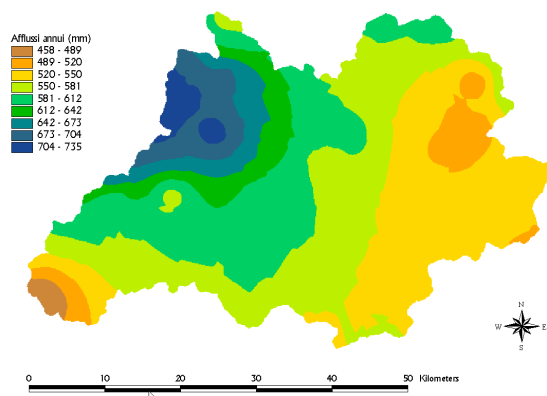


Figura 5 – Bacino del Platani: distribuzione spaziale dell’afflusso annuale

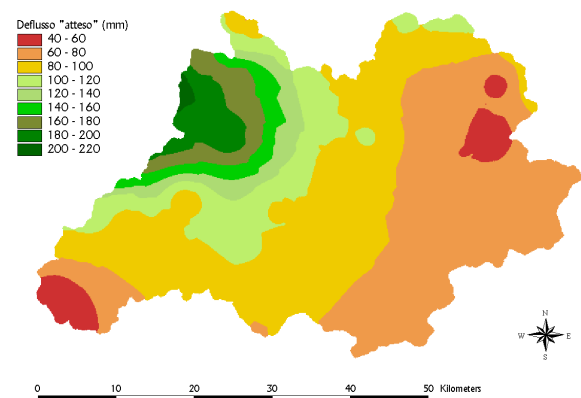


Figura 6 – Bacino del Platani: distribuzione spaziale del deflusso annuale “atteso”

Lo strato informativo del deflusso *reale* è stato ottenuto unendo le informazioni del deflusso netto osservato a scala di bacino con le informazioni del deflusso *atteso*. Per creare lo strato del deflusso *reale*, è stato elaborato uno strato *correttivo* in cui, ad ogni cella è stato assegnato un valore dato dalla differenza tra il deflusso “netto” osservato dalla stazione di misura e il deflusso medio atteso a scala di bacino.

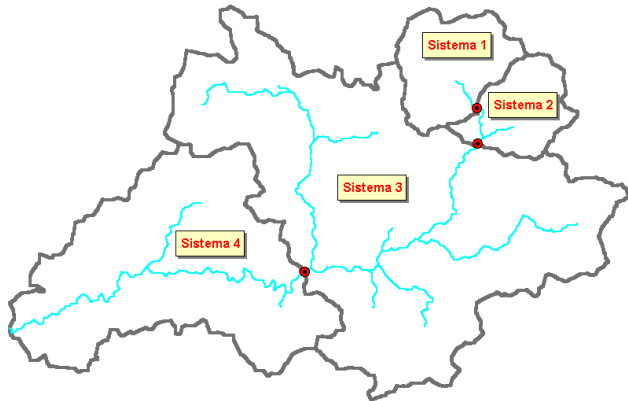


Figura 7 – Sottosistemi del bacino del Platani

Come si è già detto, nel caso del sistema del fiume Platani sono presenti quattro sottobacini di cui tre sottesi da stazioni idrometriche (figura 7). La figura riporta, per i sistemi in esame, il deflusso *netto* osservato e il deflusso medio atteso e la loro differenza che costituisce la base per lo strato *correttivo* (figure 8 e 9). A tale strato *correttivo* è stato quindi sommato lo strato informativo del deflusso *atteso* ottenendo così lo strato informativo del deflusso *reale* (figura 10).

Figura 8 – Valori del deflusso netto osservato, medio atteso e correttivi

ID Bacino	Deflusso osservato (mm)	Deflusso netto osservato (mm)	Deflusso medio atteso (mm)	Valore correttivo (mm)
1	103.9	103.9	90.4	13.5
2	65.8	13.2	70.2	-57.0
3	121.5	134.0	100.4	33.6
4	-	-	-	0.0

Lo strato informativo del deflusso medio annuo *reale* è stato anche rappresentato in termini di portate medie annue *reali*. Questo è stato fatto implementando un semplice algoritmo che esegue la funzione *Flow Accumulation* di ArcView, utilizzando, come *grid* di pesi, lo strato informativo del deflusso medio annuo *reale*. Viene creato così uno strato informativo che fornisce, per ogni cella del bacino in esame, le portate medie annue *reali* (figura 11).

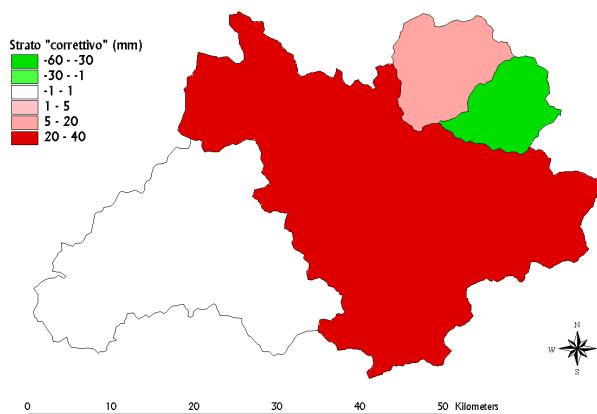


Figura 9– Strato “correttivo” del deflusso (osservato meno atteso a scala di bacino)

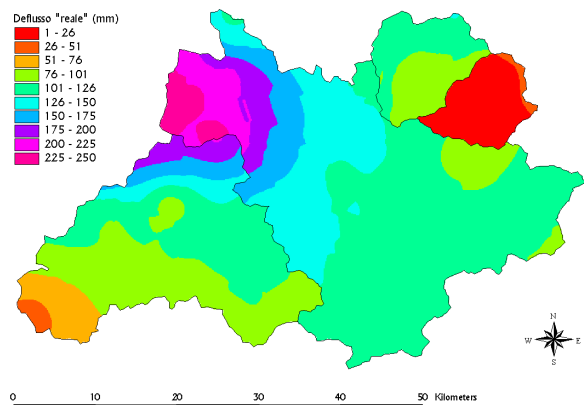


Figura 10 – Bacino del Platani: distribuzione spaziale del deflusso annuale “reale”

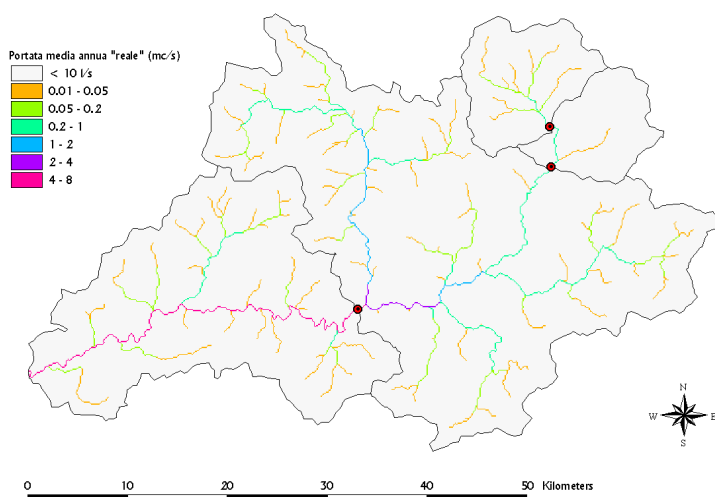


Figura 11 – Bacino del Platani: mappa delle portate medie annue “reali” in m^3/s

Dall’analisi dello strato informativo riportato in figura 9 si possono determinare le portate medie annuali reali in corrispondenza delle tre sezioni strumentate dallo STIR; per la stazione di Belici a Bruciato si ottiene una portata di $0.432 m^3/s$, per quella di Belici a Marianopoli Scalo $0.473 m^3/s$ mentre per l’ultima, quella di Platani a Passofonduto $4.711 m^3/s$. Questi valori di portata media annua moltiplicati per il numero di secondi presenti in un anno e divisi per la superficie sottesa da ciascuna stazione idrometrica forniscono rispettivamente i valori di $103.9 mm$, $65.8 mm$ e $121.5 mm$ che corrispondono ai valori medi annui ricavabili dagli Annali idrologici.

Conclusioni

In questo lavoro è stata sviluppata e applicata ad un bacino siciliano una tecnica per mappare il deflusso medio annuo. Tale metodologia implica un’estensiva raccolta dati e la gestione di dati geografici e idrologici. Questo tipo di mappatura può essere utilizzata oltre che nei problemi di stima della risorsa idrica anche laddove è necessario calcolare i carichi inquinanti diffusi a scala regionale e/o di bacino. Inoltre, dalla differenza tra gli strati informativi della precipitazione meteorica e del deflusso medio annuo reale, è possibile ottenere in maniera molto agevole uno strato informativo relativo alle perdite idrologiche. L’utilizzo di tale strato informativo insieme ad altri quali radiazione netta e temperatura, può fornire una stima del valore medio annuo del rapporto di Bowen che permetterebbe di individuare la presenza di zone a rischio di desertificazione.

Riferimenti bibliografici

- Arnell N.W., (1995). Grid mapping of river discharge, *Journal of Hydrology*, 167, 1, pp. 39-56(18).
- Baumgartner, A. and Reichel, E., (1975). World water balance: Mean annual global continental and maritime precipitation, evaporation and runoff, Amsterdam, Elsevier Scientific Publ. Co.179 pp.
- Bishop G.D., Church M.R., (1995). Mapping long-term regional runoff in the eastern United States using automated approaches, *Journal of Hydrology*, 169, 1, July, pp. 189-207(19)
- Bishop, G.D., Church, M.R., Aber, J.D., Neilson, R.P., Ollinger, S.V., Daly, C., (1998). A comparison of mapped estimates of long-term runoff in the northeast United States, *Journal of Hydrology*, 206, 3-4, pp. 176-190.
- Church M.R., Bishop G.D., Cassell D.L. (1995). Maps of regional evapotranspiration and runoff/precipitation ratios in the northeast United States, *Journal of Hydrology*, 168, 1, pp. 283-298(16)
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue, (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54, 1593–1600.
- Stancik, S., Jovanovic, (1988). Hydrology of the river Danube, Publishing House Priroda, Bratislava, Slovakia.