

# Integrazione di tecniche GIS e dati telerilevati per il bilancio idrologico del suolo

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

(\*) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, viale delle Scienze, 90100 Palermo, tel 091 6657726, fax 091 6657749, e-mail [glal@idra.unipa.it](mailto:glal@idra.unipa.it), [valerio@idra.unipa.it](mailto:valerio@idra.unipa.it)

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

## Abstract

In Sicilia la disponibilità idrica rappresenta uno dei più grossi problemi per lo sviluppo socio-economico della regione. Nonostante la realizzazione di numerose infrastrutture (serbatoi, acquedotti), avvenuta nei decenni passati, si registra un'inefficienza del sistema di gestione relativo all'approvvigionamento idrico. Obiettivo del presente lavoro è mettere a punto dei modelli di simulazione idrologica tramite programmazione *object-oriented* (implementati totalmente in ambiente GIS), verificando al contempo l'utilizzabilità dei dati ricercati e ottenuti da archivi remoti (prevalentemente dalla NASA), cercando di realizzare uno strumento utile anche per una corretta gestione della risorsa idrica. A tale scopo è stato implementato un modello di simulazione di bilancio idrologico, utilizzabile sia a scala regionale che a scala di bacino, sfruttando l'ambiente GIS di ArcView 3.2. Sono stati implementati due differenti algoritmi che forniscono la stima dell'evapotraspirazione potenziale e il bilancio idrologico del suolo a partire dai valori medi mensili di precipitazione e dall'evaporazione potenziale (output del primo algoritmo). Il modello messo a punto è stato applicato al bacino del fiume Platani. I risultati possono essere rappresentati sia sotto forma di mappe tematiche che descrivono mensilmente la distribuzione spaziale delle grandezze nel bacino, che di grafici sinottici per ognuna delle celle. Confrontando i risultati ottenuti con i dati di studi precedenti, ricavati con metodi tradizionali, si è osservato l'ottimo comportamento del modello, considerando che non è stata condotta alcuna opera di calibrazione; l'assenza di calibrazione ha fatto sì che i valori relativi al surplus e all'umidità del suolo sono stati interpretati meglio come indici dell'umidità relativa, piuttosto che come stime assolute.

## Abstract

In Sicily the water availability is one of the greatest limiting problem for the social and economic development of the island despite the realization of many water supply infrastructures. Aim of this paper is the development of hydrological simulation models using object-oriented languages in a GIS environment and hydrological data from remote archives (mainly from NASA). Monthly soil water surplus is here calculated, at regional and basin scale, using the Thornthwaite soil water balance model in which the evaporation computation has been modified to include a spatial database of net radiation obtained from the Earth Radiation Budget Experiment of NASA. Some Avenue scripts are used to calculate the soil water budget. The product of a soil water balance is a time history on a monthly basis of soil moisture content, evaporation and "water surplus" which is the water flowing from the soil to form surface runoff and groundwater recharge. This model has been applied to a Sicilian watershed with an area of about 1800 km<sup>2</sup> and compared with the results of previous studies.

## Introduzione

In caso di dati non disponibili relativamente al suolo, alla profondità degli acquiferi e alla vegetazione, gli idrologi hanno spesso usato modelli e schemi di bilancio alquanto semplici per modellare i processi idrologici nello strato superficiale del suolo. Nonostante numerose incertezze associate all'utilizzo di un siffatto tipo di semplici modelli, molti ricercatori li hanno applicato a problemi caratterizzati da una scala che andava da quella relativa al bacino fino a quella globale, indirizzata a verificare scenari di cambiamenti climatici. (Thornthwaite, 1948; Mather, 1978; Willmott et al., 1985; Mintz e Serafini, 1992). Questa tipologia di approccio è molto usata a causa della sua semplicità; infatti tali modelli richiedono pochissimi dati di input: precipitazione, evapotraspirazione potenziale, e capacità di ritenzione idrica nel suolo. Gli studi di Willmott et al. (1985) e Mintz e Serafini (1992), sono studi climatologici che presentano la stima della distribuzione globale della precipitazione, dell'evapotraspirazione e dell'umidità del suolo. Mintz e Serafini paragonano le loro stime di evapotraspirazione per i maggiori sedici bacini del mondo con quelle derivate dall'analisi del deflusso fatta da Baumgartner e Reichel (1975) trovando dei valori abbastanza simili a quelli forniti da questi ultimi. Ad una scala più piccola, Mather (1978) ha descritto l'applicazione di un modello budget idrico del suolo a molti bacini negli stati del Delaware, Maryland e Virginia. Il confronto tra i valori di deflusso misurati e stimati fornisce risultati piuttosto scarsi per quanto riguarda la scala mensile ma notevolmente migliori per la scala annuale, sebbene l'autore ha suggerito ulteriori miglioramenti del metodo per valori annuali.

Nel presente lavoro è stato implementato un modello di simulazione di bilancio idrologico, utilizzabile sia a scala regionale che a scala di bacino, sfruttando l'ambiente GIS di ArcView 3.2, e utilizzando dati ottenuti da archivi remoti (prevalentemente dalla NASA).

## Il modello di bilancio idrologico del suolo

L'analisi del bilancio idrologico a scala regionale è stata realizzata in forma distribuita su un grigliato regolare di 2 Km di lato. Il modello adottato è una variazione in forma distribuita di quello proposto da Thornthwaite (1948) e da Willmott et al. (1985), secondo cui, per ognuna delle aree elementari in cui è suddiviso il territorio, è soddisfatta la legge di conservazione della massa, esprimibile per volumi idrici con la seguente formula:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = P - E - S \quad [1]$$

in cui  $S$  è l'eccedenza (o surplus),  $P$  è la precipitazione,  $E$  è l'evaporazione,  $w$  è l'umidità del terreno e  $t$  il tempo. La maggiore difficoltà nella soluzione della [1] consiste nella stima dell'evaporazione, strettamente legata alla stima dell'evapotraspirazione potenziale, alla capacità di ritenzione idrica dei suoli e ad una funzione di estrazione dell'umidità. Per quanto riguarda la stima dell'evapotraspirazione potenziale, questa è stata realizzata adottando il metodo proposto da Priestley-Taylor (1972)

$$PE = \left[ \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \right] \alpha' \quad [2]$$

in cui  $R_n$  è la radiazione netta [ $MJ m^{-2} giorno^{-1}$ ],  $G$  è il flusso di calore immagazzinato e rilasciato dal terreno [ $MJ m^{-2} giorno^{-1}$ ],  $\lambda$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua [ $MJ Kg^{-1}$ ],  $\Delta$  è la derivata rispetto alla temperatura  $T$  della pressione parziale di vapore saturo [ $KPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ],  $\gamma$  è la costante psicrometrica e  $\alpha'$  è il coefficiente stimato da Priestley e Taylor [1,26 – 1,28].

## Implementazione del modello di bilancio idrologico

Il modello di simulazione di bilancio idrologico è stato implementato utilizzando l'ambiente GIS di ArcView 3.2, selezionato perché fornisce sia capacità di gestione per il database spaziale sia capacità di programmazione *object-oriented* tramite il linguaggio *Avenue*. Il modello di bilancio idrologico a scala mensile è stato predisposto in maniera da poter essere utilizzato sia a scala regionale che a scala di bacino.

Preliminarmente allo sviluppo dei codici di calcolo si è provveduto alla preparazione dei dati input che riguardano temperatura, precipitazione, radiazione netta e capacità di campo.

I dati mensili di temperatura relativi alla regione Sicilia sono stati ottenuti dal *Center for Climatic Research Department of Geography University of Delaware* (<ftp://climate.geog.udel.edu>). Questi dati, interpolati su di una griglia di 0.5° provengono dall'archivio "*Global Air Temperature and Precipitation Data Archive*" compilato da Legates and Willmott (1990). Per quanto riguarda la precipitazione l'archivio degli stessi autori era in grado di fornire i dati mensili su una griglia avente la stessa risoluzione di quella relativa alle temperature. Si è invece preferito utilizzare i dati provenienti dall'Ufficio Idrografico Regionale (UIR) a risoluzione 100 m. I dati di radiazione netta sono stati ottenuti, nell'ambito del progetto *Surface Radiation Budget (SRB)* tramite il sito del DAAC (*Distributed Active Archive Center*) di Langley (<http://eosweb.larc.nasa.gov>). Tali dati includono le stime del flusso di radiazione *longwave* e *shortwave* per un periodo di 8 anni che va dal 1983 a 1991. I dati relativi al suolo sono stati forniti dall'*Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL-DAAC)* (<http://www.daac.ornl.gov>) che contiene i dati mondiali relativi alle proprietà dei suoli, mappe della distribuzione globale dei suoli ed il *SoilData System*, sviluppato da *International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information System (IGBP-DIS)*.

	<b>Strato informativo</b>	<b>Provenienza dati</b>	<b>Risoluzione</b>
1	Temperatura	Dati Legates and Willmott	0.5°
2	Precipitazione	Dati UIR	100 m
3	Radiazione netta	Dati SRB	2.5°
4	Capacità di campo	Dati ORNL DAAC	5'

Figura 1 Tipologia di dati utilizzati

Come si vede dalla tabella, riportata in figura 1, i dati di partenza hanno una risoluzione spaziale gli uni diversa dagli altri. Si è allora provveduto a riportare ad una stessa risoluzione i dati provenienti da diverse piattaforme con la sola esclusione del dato di radiazione netta.

A tale scopo, utilizzando il sistema di riferimento UTM-ED50, è stata costruita una griglia computazionale costituita da 97 righe per 145 colonne (per un totale di 14.065 elementi) i cui elementi sono quadrati della dimensione caratteristica di 2000 m. Questa griglia si estende da 270.000 Ovest a 560.000 Est e da 4.051.000 Sud a 4.245.000 Nord. Sulla base di questa griglia computazionale è stata costruita una copertura di nodi computazionali posizionando un nodo al centro di ogni quadrato; molti di questi elementi (sia quadrati che nodi), ricadendo in mare, non sono utili ai fini della determinazione delle grandezze coinvolte nel bilancio idrologico del suolo. E' stato allora creato un altro file contenente le aree e i nodi che ricadono soltanto sulla terraferma riducendo così di più della metà gli elementi computazionali (si arriva così a 6.679 elementi

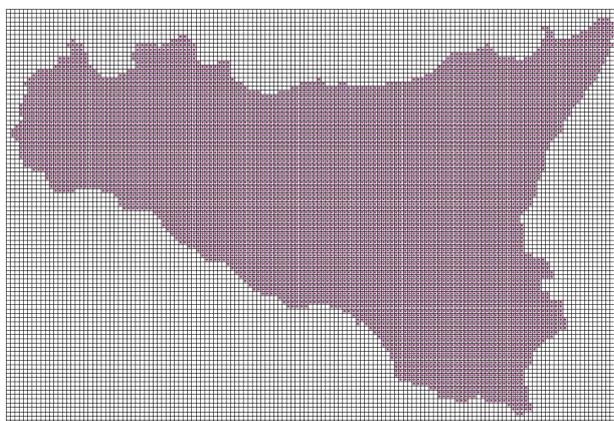


Figura 2 – Griglia computazionale con nodi di calcolo

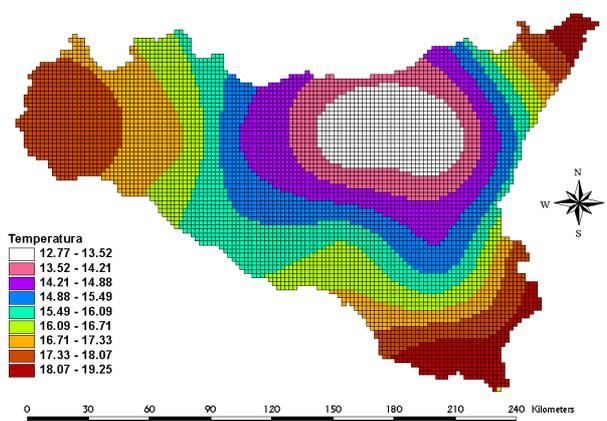


Figura 3 – Distribuzione spaziale temperature medie annue

computazionali, figura 2), ottenendo una griglia modificata che costituisce la base di rappresentazione dei dati medi mensili di temperatura (figura 3) e di precipitazione (figura 4) oltre che della capacità di ritenzione idrica del suolo (figura 5).

Il programma è stato sviluppato tramite implementazione di due algoritmi separati che possono essere avviati a partire da un apposito menu che è stato inserito nella barra dei menu di ArcView 3.2. Il primo programma, chiamato *EvapotraspirazionePT*, fornisce la stima dell'evapotraspirazione potenziale tramite il metodo di Priestley-Taylor. L'algoritmo richiede per il suo funzionamento due coperture vettoriali relative alla temperatura e alla radiazione netta, oltre che una copertura vettoriale contenente i nodi computazionali. Il codice necessita per il suo funzionamento dei dati di temperatura media mensile e dei dati di radiazione netta in (*shapefile*). L'utente è invitato, da un'apposita maschera di input a fornire i nomi di questi due temi vettoriali.

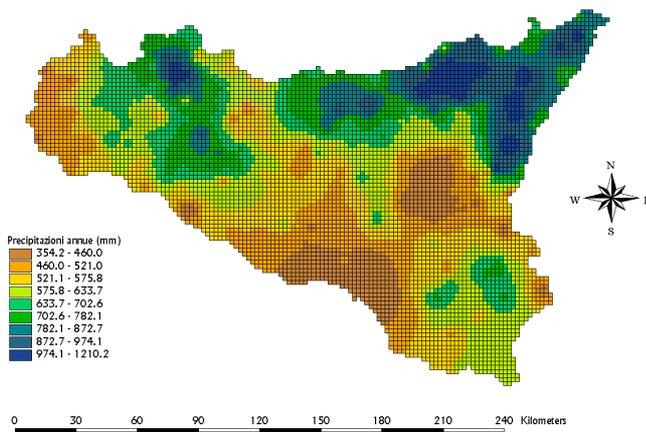


Figura 4 - Distribuzione media annua regionale delle precipitazioni

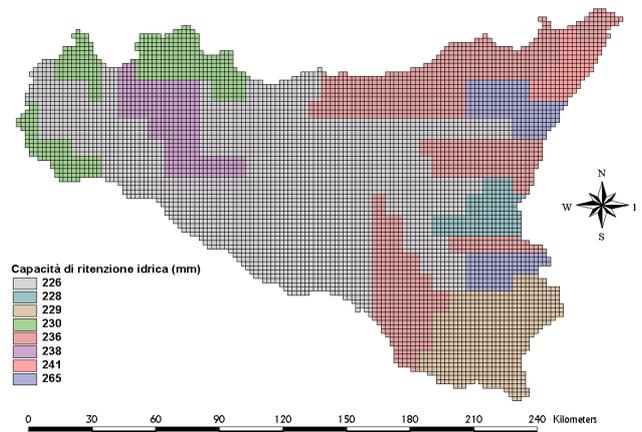


Figura 5 – Distribuzione spaziale della capacità di ritenzione idrica del terreno

Il file di output è un file in cui i record sono costituiti dai mesi ed esistono tanti campi (*field*) quante sono le celle selezionate.

Il secondo programma, chiamato *Bilancio*, calcola il bilancio idrologico del suolo a partire dai valori medi mensili di precipitazione e l'evapotraspirazione potenziale (entrambi in mm/mese) contenuti in due tabelle che vengono fornite in output dal programma *EvapotraspirazionePT*. E' necessario anche un file vettoriale di punti o poligoni che corrisponde agli elementi riportati nei due file. I file di output sono costituiti da tabelle che riportano il surplus idrico (*S*), il contenuto d'acqua nel suolo (*ST*) e l'incremento di umidità del suolo da un mese a quello successivo (*DST*) e l'evapotraspirazione reale (*E*). In ciascuno di questi file i record sono costituiti dai mesi e esistono tanti campi (*field*) quante sono le celle selezionate.

Anche in questo caso esiste una maschera di input che richiede i nomi dei file coinvolti nel bilancio idrologico insieme ad un certo numero di informazioni riguardanti il periodo in cui effettuare il bilancio.

Tutti i file che vengono indicati nella maschera di input devono essere già stati precedentemente aggiunti al progetto. Inoltre bisogna specificare il tema vettoriale (areale o puntuale) che costituisce la base per il bilancio idrologico indicando il campo che contiene la chiave identificativa (ID) necessaria a collegare i dati contenuti nelle tabelle relative alla precipitazione e all'evaporazione potenziale con quelli contenuti nel tema vettoriale relativo alla capacità di ritenzione

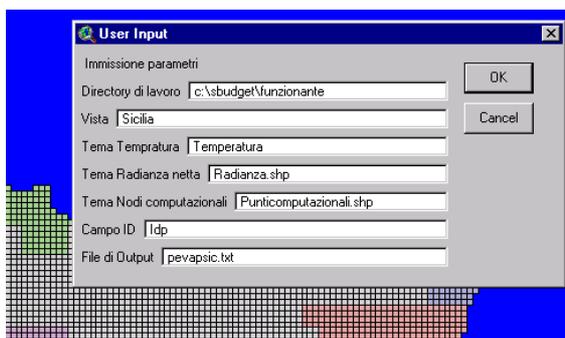


Figura 6 – Maschera di input dati per il programma Calcola EP

idrica o capacità massima (*water holding capacity*). Il programma assume infine che il bilancio cominci e finisca il primo giorno del mese.

Una volta selezionata una o più aree elementari sul grigliato di riferimento che suddivide l'intero territorio regionale, si sceglie di avviare attraverso il menu EvBil (figura 6) i due programmi *Calcola EP* (per avviare *EvapotraspirazionePT*) e *Bilancio idrico del suolo* (per avviare *Bilancio*). Questi programmi come detto, per ciascuna delle celle selezionate, restituiscono il valore medio mensile dell'evapotraspirazione reale, del surplus idrico, del contenuto d'acqua nel suolo e dell'incremento di umidità del suolo da un mese a quello successivo.

### Applicazione al bacino del fiume Platani

Il modello messo a punto è stato applicato a 518 celle della griglia di calcolo che comprendono il bacino del fiume Platani, la cui estensione è pari a circa 1767 km<sup>2</sup> (figura 7).

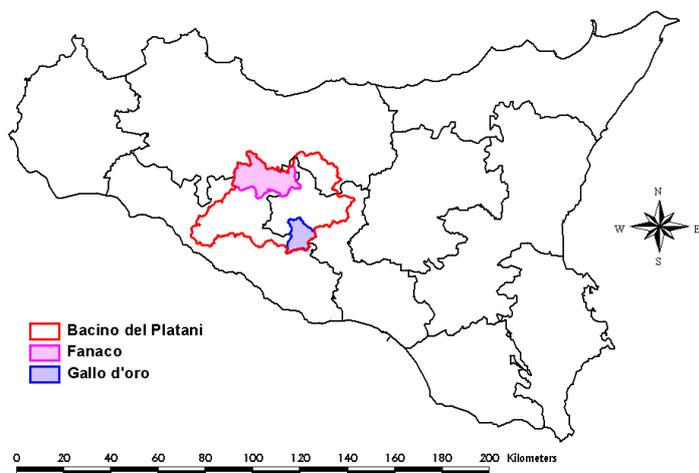


Figura 7 – Bacino del fiume Platani.

I risultati del bilancio idrologico del suolo sono stime mensili dell'evapotraspirazione, dell'eccedenza e dell'umidità del suolo, in ogni cella di lato 2000 m dello strato *raster* di copertura della Sicilia. Utilizzando il metodo dell'evapotraspirazione potenziale di Priestley-Taylor, si ottiene una media di 195.4 mm/anno di surplus sul bacino del Platani.

I risultati ottenuti dalle simulazioni mensili possono essere rappresentati sia attraverso mappe tematiche che descrivono mensilmente la distribuzione spaziale delle grandezze sull'intero bacino (figure 8 e 9), sia sotto forma di grafici sinottici per ciascuna delle celle selezionate (figura 10).

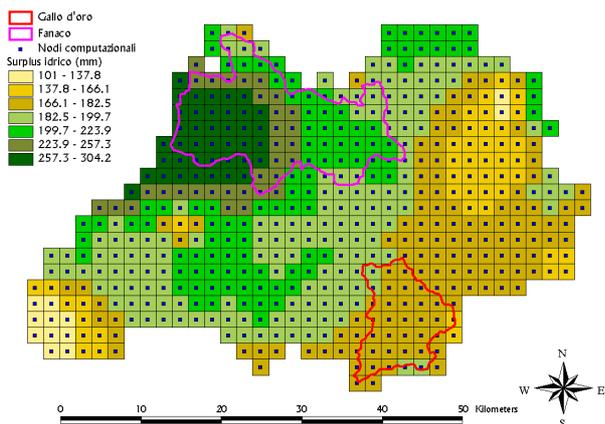


Figura 8 – Surplus annuo ottenuto dal bilancio idrico del suolo.

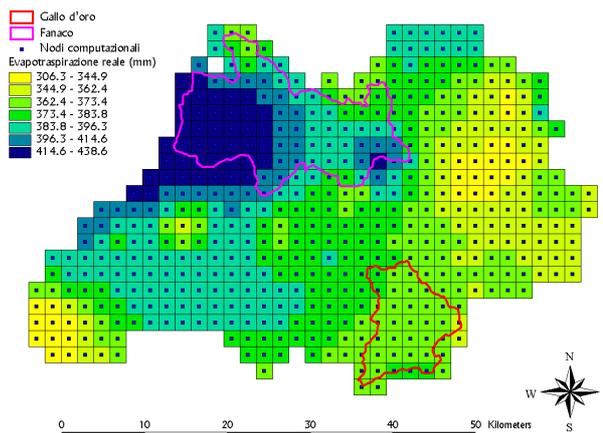


Figura 9 – Evapotraspirazione reale ottenuta dal bilancio idrico del suolo.

I valori di Precipitazione annuale *P*, eccedenza idrica (*Surplus*) *S*, Deficit idrico *D*, Evapotraspirazione reale *E* e potenziale *PE* stimati col presente modello di bilancio idrologico del suolo, per due sottobacini del Platani (il Fanaco e il Gallo d'Oro) sono stati confrontati con quelli riportati nell'Atlante di Idrologia Agraria per la Sicilia realizzato dall'Istituto di Idraulica e di Idraulica Agraria della Facoltà di Ingegneria di Palermo (Università di Palermo, 1971).

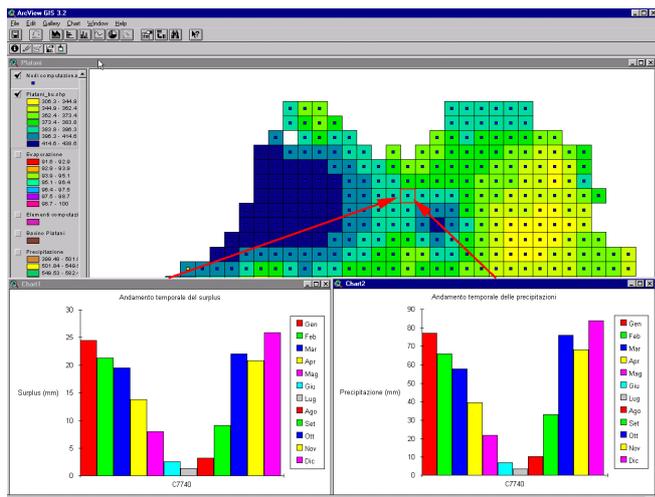


Figura 10 – Andamento temporale delle precipitazioni e del surplus per un elemento computazionale selezionato.

modello devono essere pertanto intesi come indici di questo perché non è stata effettuata nessuna calibrazione utilizzando grandezze misurate. Le maggiori limitazioni di questo tipo di modello sono l'utilizzo di una scala mensile, la rappresentazione estremamente semplificata dell'idrologia del suolo e della vegetazione, l'ambiguità che nasce dall'applicazione del concetto di evapotraspirazione potenziale nelle zone aride e semiaride e gli errori che si presentano nella stima dell'evapotraspirazione potenziale stessa. La risoluzione temporale utilizzata infatti non consente di tener conto dei deflussi di piena che costituiscono un importante contributo al deflusso totale. L'unico modo per ottenere accurate stime del deflusso è utilizzare il modello del bilancio idrologico del suolo insieme alle informazioni relative al deflusso misurato. Un approccio più dettagliato potrebbe essere realizzato tramite l'utilizzo di un modello continuo con passo temporale almeno giornaliero.

### Riferimenti bibliografici

Atlante di Idrologia Agraria per la Sicilia, (1971). Università degli Studi di Palermo – Istituto di Idraulica – Istituto di Idraulica Agraria.

Baumgartner, A., Reichel, E., (1975). The World Water Balance, Elsevier, Amsterdam - New York.

Mather, J.R., (1978), The Climatic Water Budget in Environmental Analysis. Lexington Book.

Mintz, Y., Serafini, Y.V., (1992), A Global Monthly Climatology of Soil Moisture and Water Balance, *Climate Dynamics*, 8, 13-27.

Legates, D.R., Willmott, C.J., (1990), Mean Seasonal and Spatial Variability Global Surface Air Temperature, *Theoretical and Applied Climatology*, 41, 11-21.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., (1972), On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters, *Monthly Weather Review*, 100, No. 2, 81-92, February.

Thornthwaite, C.W., (1948), An Approach Toward a Rational Classification of Climate, *Geographical Review*, 38, 55-94.

Willmott, C.J., Rowe, C.M., Mintz, Y., (1985), Climatology of the Terrestrial Seasonal Water Cycle, *Journal of Climatology*, 5, 589-606.

L'esame della tabella, riportata in figura 11, mostra che i valori ottenuti con il modello proposto non si discostano sensibilmente dai valori ricavati nell'ambito dello studio precedente, nonostante il modello utilizzato sia più semplice e non sia stata condotta nessuna opera di calibrazione.

### Conclusioni

Il bilancio idrologico messo a punto in questo studio è in grado di fornire una stima qualitativa di come la precipitazione viene ripartita tra deflusso superficiale, evapotraspirazione e immagazzinamento, sotto forma di umidità, negli strati superficiali del suolo. Il surplus e i valori dell'umidità del suolo stimati con tale

		Fanaco	Gallo D'Oro
Precipitazione [mm]	Modello	636.4	548.0
	Atlante	774.0	671.7
PE [mm]	Modello	931.5	964.2
	Atlante	845.0	872.2
E [mm]	Modello	400.0	370.3
	Atlante	451.8	472.0
Deficit [mm]	Modello	391.5	422.4
	Atlante	374.0	407.8
Surplus [mm]	Modello	231.6	175.8
	Atlante	284.0	176.7

Figura 11 - Confronto tra i valori ottenuti da tre diversi metodi di bilancio