

## Valutazione del bilancio idrologico a scala sub-regionale mediante metodologie GIS

Marco Nicolosi <sup>(a)</sup>, Santino Pellerito <sup>(a)</sup>, Rocco Favara <sup>(a)</sup>, Antonino Granata <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa 153, Palermo, Italia

<sup>(b)</sup> Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia, Via Generale Magliocco n. 46, Palermo, Italia

### Introduzione

La risoluzione delle problematiche inerenti la desertificazione e la gestione delle risorse idriche è, da diversi anni, un argomento chiave dei programmi di azione internazionale [Direttiva CE 2000/60, Convenzione delle Nazioni Unite sulla Lotta alla desertificazione (UNCCD), Agenda 21 (Summit di Rio e Johannesburg)], ed è diventata un comune obiettivo, di importanza primaria, tra comunità scientifica e pubbliche amministrazioni, col fine di garantire sia la salvaguardia ambientale sia lo sviluppo socio-economico dei territori.

Nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e il Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti della Regione Sicilia (DRAR), che ha come obiettivo la definizione dei modelli concettuali dei corpi idrici sotterranei (CIS) ai sensi della Direttiva 2000/60, è stata sviluppata una procedura di stima delle componenti del bilancio idrologico su scala sub-regionale in ambiente GIS open source (QGIS 2.18 e 3.6) al fine di valutare gli apporti potenziali diretti ed indiretti nei corpi idrici sotterranei dei settori della Sicilia nord-orientale (Monti Peloritani e Nebrodi) e sud-orientale (Altopiano Ibleo Ragusano e Piana di Vittoria). Questa procedura consente la stima delle infiltrazioni efficaci dirette sui CIS e dei ruscellamenti a scala di bacino idrografico, che in quanto apporti potenziali rappresentano il punto di partenza per la gestione delle risorse idriche sotterranee.

In letteratura sono presenti alcune procedure simili a quella qui proposta (Civita, 2005; Braca & Ducci, 2018), ma la procedura messa a punto ha curato con particolare attenzione le interpolazioni dei dati pluviometrici col metodo della regressione lineare multipla e la delicata assegnazione dei coefficienti d'infiltrazione potenziale ai litotipi affioranti; i risultati mostrano valori che si allineano perfettamente con quelli ottenuti con l'applicazione di metodi tradizionali di stima del bilancio idrologico.

### Materiali e metodi

In assenza di pressioni antropiche, il bilancio idrologico è espressione dei volumi entranti, uscenti ed invasati in un determinato bacino, in un periodo di tempo assegnato, in condizioni di deflusso naturale:

$$P = ETR + R + I_{eff} \quad [1]$$

$P$  = precipitazione

$ETR$  = evapotraspirazione reale

$R$  = ruscellamento superficiale

$I_{eff}$  = infiltrazione efficace (pari alla ricarica diretta degli acquiferi).

Il volume netto di acqua in entrata nel bacino idrologico è rappresentato dalla precipitazione efficace ( $P_{eff} = P - ETR$ ), il volume in uscita è rappresentato dall'eccedenza idrica, anche detto deflusso idrico globale, ( $W = R + I_{eff}$ ).

La procedura presentata conduce alla stima degli apporti idrici diretti ( $I_{eff}$ ) sui CIS, inoltre per i CIS recettori di fiume viene valutato l'apporto indiretto derivante dai deflussi superficiali ( $R$ ) dell'intero bacino idrografico.

L'analisi spaziale e la stima dei singoli termini del bilancio è eseguita in ambiente GIS mediante strumenti di geoprocessing e di map-algebra.

A seguire si illustra la procedura adottata per l'analisi di ogni singolo termine del bilancio, con alcuni dettagli applicativi nei complessi montuosi dei Nebrodi e dei Peloritani (Sicilia).

### Precipitazioni

Per raggiungere la migliore copertura spaziale e temporale i dati di precipitazione sono stati omogeneizzati e integrati utilizzando due differenti reti [Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS) e Autorità di Bacino (ex Osservatorio delle Acque); figura 1].

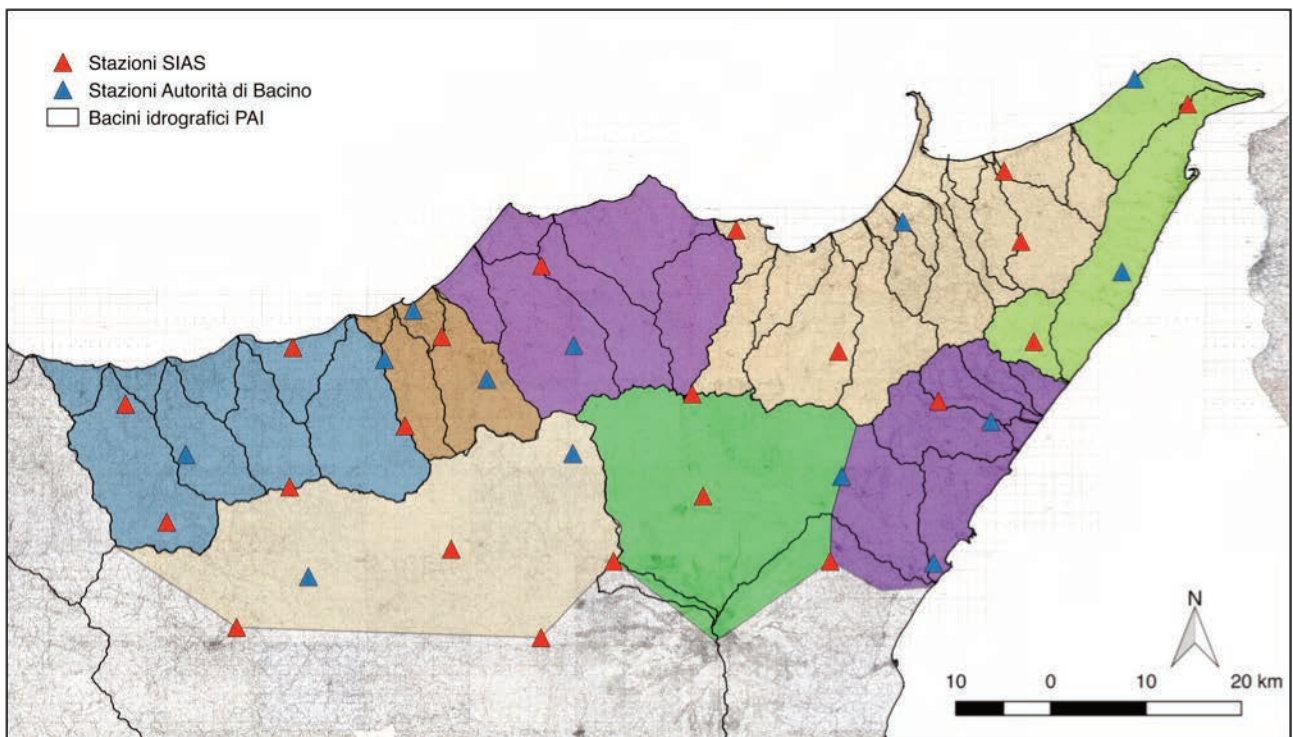


Figura 1. Rete termo-pluviometrica (SIAS e Autorità di Bacino) e suddivisione dei versanti con diverse caratteristiche meteo-climatiche, ognuno con una propria legge di distribuzione delle precipitazioni del tipo MLR.

In base ai dati a disposizione, l'anno idrologico medio individuato rappresenta gli anni 2002-2018. Per questo intervallo di tempo, a partire dai dati

giornalieri, sono stati calcolati i valori di precipitazione media mensile e media annuale.

Tenuto conto della disposizione spaziale delle stazioni pluviometriche, della morfologia dei luoghi e dell'esposizione dei versanti, ai fini di una dettagliata spazializzazione dei dati pluviometrici, alla scala dei CIS, si è deciso di adottare il metodo della regressione lineare multipla (MLR), che mette in relazione la precipitazioni con le variabili indipendenti quota, latitudine e longitudine. Questo approccio, sempre più utilizzato in letteratura (Naoum & Tsanis, 2004a e 2004b; Bostan et al. 2012), rispetto al metodo più classico che mette in relazione la piovosità con la sola quota, consente di tenere conto dei differenti apporti meteorici influenzati da condizioni atmosferiche locali che possono variare linearmente nello spazio (e.g. direzione e velocità del vento, irraggiamento solare, umidità dell'aria).

Sono state eseguite per tentativi successivi diverse MLR (attraverso tool on-line e foglio Excel) raggruppando i pluviometri adiacenti in base all'esposizioni dei versanti e alla morfologia del territorio (figura 1); sulla base dei coefficienti di determinazione ( $r^2$ ) sono state scelte le migliori MLR. Per esempio, nell'areale di Nebrodi e Peloritani si è arrivati alla suddivisione del territorio in 8 versanti e sono state definite 104 equazioni MLR [8 versanti x (12 medie mensili + 1 media annua)].

Per la spazializzazione del dato pluviometrico si è quindi passati, in ambiente GIS, alla suddivisione del territorio in celle 1Km x 1Km (in formato shapefile; figura 2) e alla creazione di centroidi (in formato shapefile) contenenti la quota media della cella (ricavata dal DTM 5m x 5m) e la coordinata (latitudine e longitudine); applicando le diverse equazioni delle MLR nei rispettivi versanti (tramite il calcolatore di campi), è stato possibile ricostruire i valori di precipitazione per gli areali di studio.

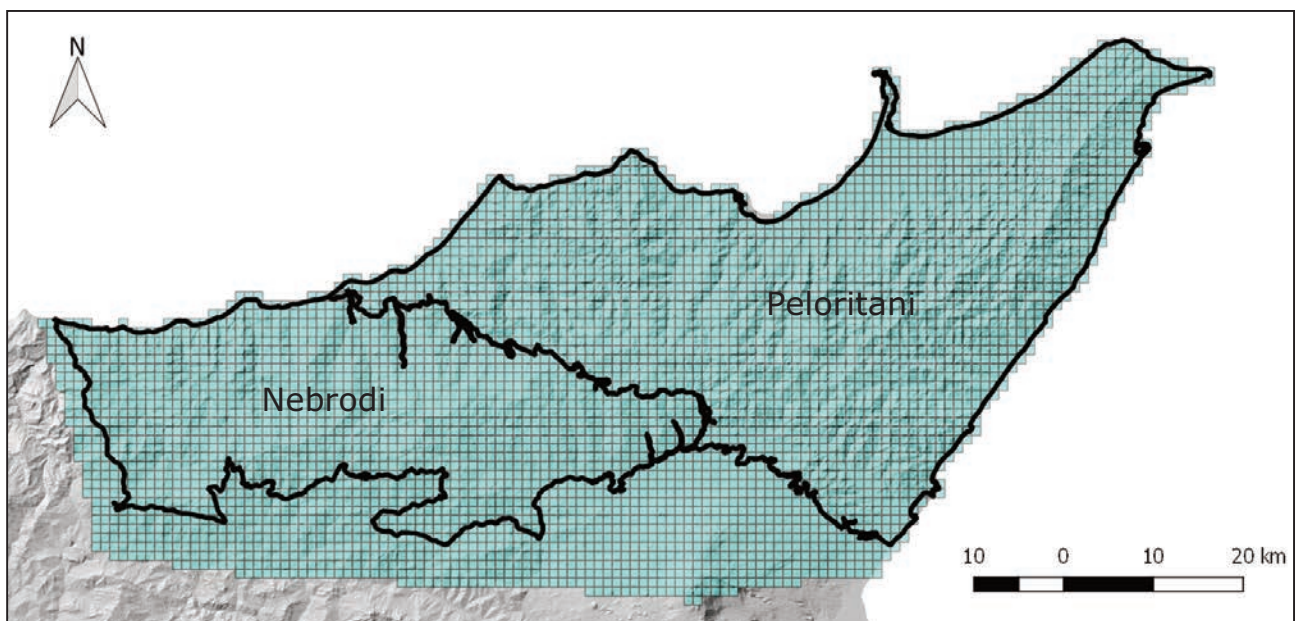


Figura 2. Esempio di grigliato con maglia 1Km x 1Km contenente tutti gli elementi del bilancio idrologico; ogni cella contiene i valori medi mensili ed annuali spazialmente mediati relativi all'anno idrologico 2002-1018.

## Temperature

Per il calcolo della *ETR*, un altro dato di base da conoscere, oltre alle precipitazioni, è quello di temperatura. I dati termometrici provengono dalle stesse stazioni della rete pluviometrica (fig. 1). Per l'anno idrologico medio (2002 – 2018) sono stati calcolati i valori di temperatura media mensile e media annuale.

Per la spazializzazione del dato termometrico è stata utilizzata la regressione lineare multipla (MLR) con le variabili indipendenti: quota, latitudine e longitudine, come fatto per i dati di precipitazione. Per la solidità di questa correlazione, non è stato necessario suddividere il territorio in differenti versanti; per Nebrodi e Peloritani sono state definite 13 equazioni MLR. Ancora una volta, con l'utilizzo delle equazioni MLR nel calcolatore di campi, sono stati popolati gli shapefile "Grigliato 1Km x 1Km" e "Centroidi" coi valori di temperatura media mensile e media annuale.

## Evapotraspirazione reale

La *ETR* è stata ricavata indirettamente attraverso la stima dell'evapotraspirazione potenziale (*ETP*), mediante il bilancio di Thornthwaite & Mather (1957) secondo l'impostazione di Celico (1988), e applicando le formulazioni che seguono negli shapefile "Grigliato 1Km x 1Km" e "Centroidi" (attraverso il calcolatore di campi):

$$ETP_i = K_i \cdot 16 \frac{10T_i^a}{I} \quad [2]$$

$ETP_i$  = evapotraspirazione potenziale media del mese i-mo (mm)

$K_i$  = coefficiente di latitudine del mese i-mo, (valore tabellato, adimensionale)

$T_i$  = temperatura media dell'aria riferita al mese i-mo (°C)

$I$  = indice annuo di calore, pari alla sommatoria degli indici di calore mensili ( $i$ ) (adimensionale)

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad [3]$$

$$i = \frac{T_i^{1,514}}{5} \quad [4]$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} I + 0,49239 \quad [5]$$

Per ottenere il valore di  $ETR_i$  (riferiti al mese i-mo), il metodo adottato prevede un bilancio idrico che tiene conto della funzione serbatoio del suolo attraverso la riserva utile massima ( $RU_{max}$ , detta anche capacità idrica di campo). Pertanto, a partire dai dati di spessore e tessitura dei suoli, attraverso apposita matrice di conversione (Ciavatta, Vianello, 1989), in ambiente GIS è stata ricavata la carte di  $RU_{max}$ , che è servita per popolare gli shapefile "Grigliato 1Km x 1Km" e "Centroidi".

Facendo riferimento ad un bilancio mensile, finché nel terreno è presente la riserva utile massima ( $RU_{max}$ ) e la precipitazione supera l'evapotraspirazione potenziale (mesi umidi) allora  $ETR_i = ETP_i$ ; se invece le piogge ( $P_i$ ) non compensano la  $ETP$  (mesi secchi),  $ETR$  sarà pari alla precipitazione meno la variazione, tra mese precedente e mese considerato, della riserva utile ( $RU$ , cioè il quantitativo di acqua realmente presente nel suolo).

A titolo di esempio, in figura 3 si mostra l'applicazione del metodo Thornthwaite & Mather (1957) alla stazione termo-pluviometrica "Patti".

### Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace, è stata stimata a partire dalla precipitazione efficace, che rappresenta l'eccedenza idrica, applicando il metodo dei coefficienti di infiltrazione potenziale ( $cip$  o  $c$ , Celico, 1988; Civita, 2005):

$$P_{eff} = I_{eff} \quad [6]$$

Il  $cip$  è un valore compreso tra 0 e 1 che varia in base alla permeabilità della roccia o del suolo. I valori presenti in letteratura più aggiornati (Civita, 2005) derivano da un'analisi statistica su oltre 100 bilanci idrogeologici completi e su ricerche ed indagini specifiche.

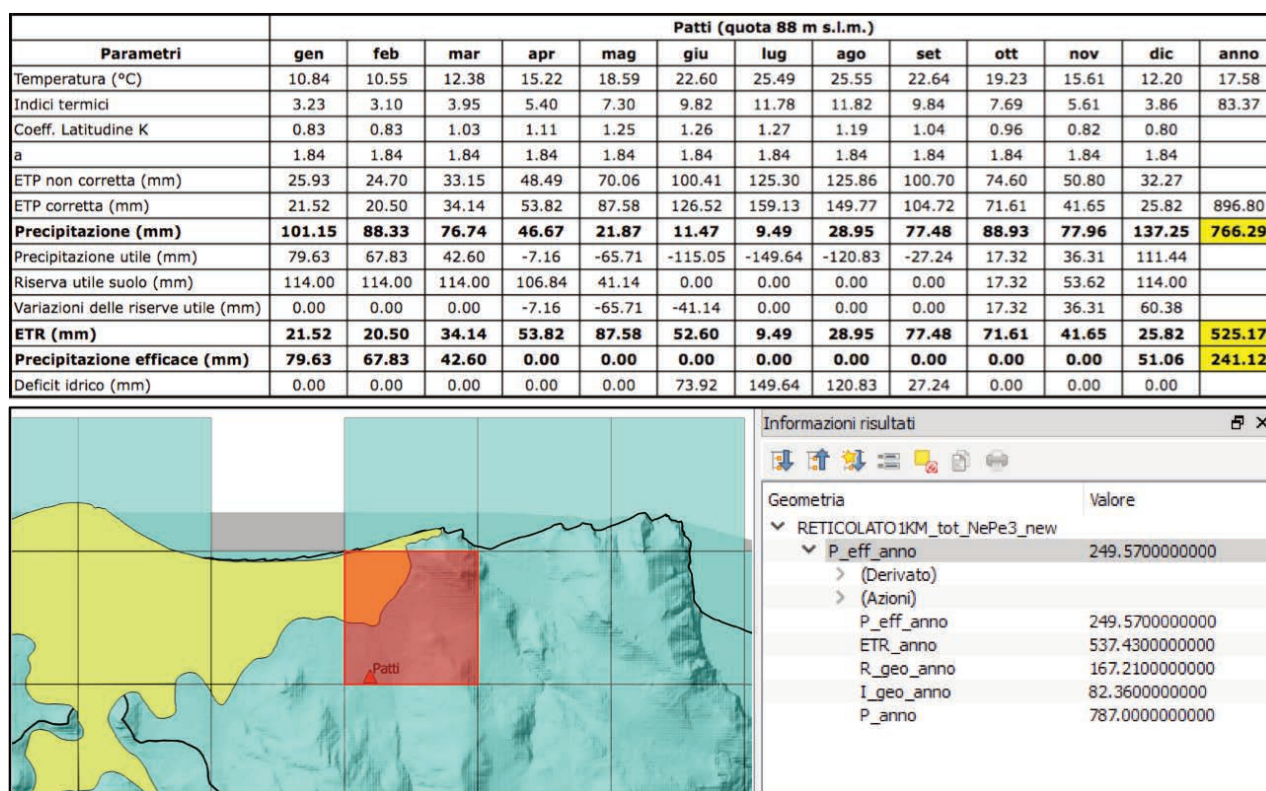


Figura 3. Valori del bilancio della stazione pluvio-termometrica "Patti", a monte del CIS Timeto. La parte grafica mostra in evidenza la cella del grigliato chilometrico entro la quale ricade la stazione di Patti (triangolo rosso), con accanto gli attributi relativi al bilancio.

L'adattamento dei valori di letteratura di  $cip$  alle aree di studio ha richiesto una dettagliata analisi delle formazioni litostratigrafiche e delle formazioni idrogeologiche, supportata da osservazioni di campo; per alcuni litotipi è stata necessaria una nuova attribuzione di  $cip$ . La base di lavoro è stata la

cartografia geologica a scala 1:50000 derivata da rilievi geologici a scala 1:10000 e 1:25000.

Una volta caricato il valore del *cip* su ogni cella del grigliato (a partire dalla carta geologica rasterizzata e poi processata col tool di statistiche zonali) è stato quindi possibile valutare, applicando la formula [6], con il calcolatore di campi, sia le infiltrazioni efficaci ( $I_{eff}$ ) che i ruscellamenti superficiali ( $R$ ) su tutte le celle del grigliato 1Km x 1Km (figura 2).

Per ottenere i valori relativi ai CIS ed ai bacini sottesi dei CIS, è bastato ritagliare il grigliato con la geometria del CIS o del bacino d'interesse per ottenere grigliati relativi alle sole geometrie d'interesse, quindi esportare su foglio di calcolo le relative tabelle attributi contenenti tutti i dati di bilancio, che sommati hanno permesso di ottenere i parametri fondamentali del bilancio (figura 4).

### Risultati

La validazione della procedura è avvenuta attraverso il confronto fra il bilancio stimato sulle stazioni termo-pluviometriche della rete fisica (dati reali elaborati su foglio di calcolo) e il bilancio stimato in ambiente GIS con la procedura esposta (dati derivati ed elaborati col calcolatore di campi nella tabella attributi).

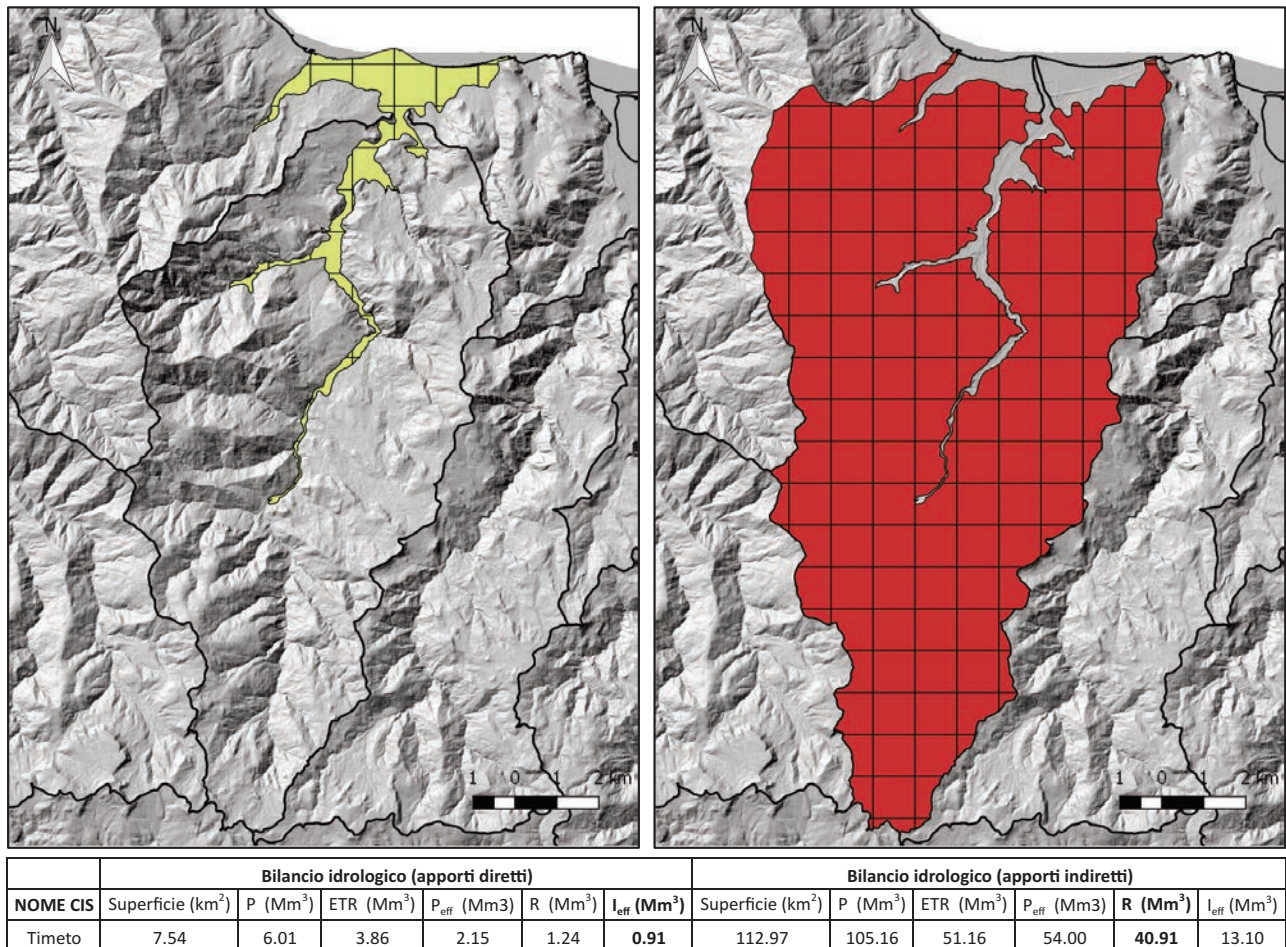


Figura 4. Rappresentazioni GIS del grigliato chilometrico ritagliato con le geometrie del CIS Timeto e del bacino sotteso dallo stesso corpo idrico. L'ammontare totale dei rispettivi bilanci è riportato in tabella.

A titolo di esempio si riportano i dati stimati per la stazione termopluviometrica denominata "Patti" (rete SIAS) messi a confronto con gli attributi che popolano la cella sulla quale ricade la stessa stazione (figura 3). Appare evidente che la procedura permette di ottenere valori di bilancio (precipitazione, evapotraspirazione e precipitazione efficace) piuttosto vicini a quelli misurati o stimati con tecniche classiche, con uno scarto sempre inferiore al 3,5%.

Nella figura 4 viene riportato, a titolo di esempio, la stima degli apporti idrici potenziali sulla piana costiera del CIS Timeto. I dati mostrano come gli apporti diretti sul CIS siano di scarso rilievo rispetto agli apporti indiretti da monte, che verosimilmente sono quelli che alimentano in maniera consistente il CIS Timeto.

## Conclusioni

La procedura esposta ha permesso di applicare una metodologia classica abbastanza robusta per la stima degli elementi del bilancio idrologico (Thornthwaite & Mather) abbinata sia all'elaborazione dei dati pluviometrici con il metodo della regressione lineare multipla (MLR) che ai potenti mezzi del GIS per la spazializzazione dei dati.

In presenza di un modello idrogeologico semplice, nel quale gli interscambi con i CIS adiacenti sono trascurabili, i risultati ottenuti ( $I_{eff}$  e  $R$ ) permettono un'immediata analisi semiquantitativa delle risorse idriche sotterranee; inoltre  $I_{eff}$  e  $R$  contribuiscono a definire le condizioni a contorno per l'implementazione del modello numerico idrogeologico che permette di affinare la stima delle risorse e delle riserve idrogeologiche.

Questa procedura rappresenta uno strumento relativamente rapido e versatile per stime di bilancio a qualsiasi scala spaziale e temporale di dettaglio, facile da aggiornare con dati di nuova acquisizione, applicabile anche con altri metodi di calcolo dei parametri del bilancio e con un controllo assoluto dei risultati. Inoltre le potenzialità di questa procedura si possono migliorare integrandola con un software database.

## Riferimenti bibliografici

Bostan P. A., Heuvelink G. B. M., Akyurek S. Z. (2012), "Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey", *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 19: 115-126

Braca G., Ducci D. (2018), "Development of a GIS Based Procedure (BIGBANG 1.0) for Evaluating Groundwater Balances at National Scale and Comparison with Groundwater Resources Evaluation at Local Scale", In Calvache M.L., Duque C., Pulido-Velazquez D. (a cura di), *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*, Edizioni Springer, January 2018

Celico P. (1988), "Prospezioni idrogeologiche" Vol.1 e Vol. 2, Edizioni Liguori

Ciavatta C., Vianello G. (1989), "Bilancio idrico dei suoli: applicazioni tassonomiche, climatiche e cartografiche", Edizioni CLUEB Bologna

Civita M. (2005), "Idrogeologia applicata e ambientale", Edizioni CEA

Naoum S., Tsanis I. K. (2004a), "Orographic Precipitation Modeling with Multiple Linear Regression", *J. Hydrol. Eng.*, 9:79-102

Naoum S., Tsanis I. K. (2004b), "A multiple linear regression GIS module using spatial variables to model orographic rainfall", *Journal of Hydroinformatics*, 6 (1): 39-56

Thornthwaite C.W., Mather, J.R. (1957), "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance". *Publications in Climatology*, 10(3)