

# **Valutazione di Snow Water Equivalent (SWE) e simulazione di portate idriche con l'ausilio di immagini satellitari: caso di studio del bacino del fiume Mallerio**

Angelo COLOMBI (\*), Davide BAVERA (\*\*), Anna RAMPINI (\*), Carlo De Michele (\*\*)

(\*) IREA – CNR, Via Bassini 15, 20133 Milano, tel: 0223699299, email: colombi.angelo@libero.it

(\*\*) Politecnico di Milano, P.zza L. Da Vinci 32, 20133 Milano, tel 0223996235, e-mail: davide.bavera@polimi.it

## **Riassunto**

Obiettivi del presente lavoro sono la quantificazione della presenza di acqua sotto forma di neve disponibile all'inizio della stagione ablativa e la simulazione delle portate idriche giornaliere derivanti dalla fusione nivale. Il primo aspetto consente di effettuare una previsione a medio-lungo termine circa la quantità d'acqua disponibile durante l'intera stagione di ablazione; il secondo invece è una previsione a breve termine del deflusso idrico alla sezione di chiusura di un determinato bacino.

Per la valutazione di variabili e parametri necessari alla modellazione idrologica, si è fatto uso integrato di due differenti tipologie di dati: quelli provenienti da stazioni nivo-meteorologiche posizionate a terra e quelli derivati dai sensori satellitari.

## **Abstract**

This work is aimed at the evaluation of the water stored as snow during the whole accumulation season and at the simulation of the daily river discharge coming from the snowmelt. The first point allows a long-term forecast about the water available during the whole snowmelt season; while the second one is a short-term forecast of the discharge at the outlet of a certain watershed.

In order to evaluate hydrological parameters and variables we have used ground data measured at the weather stations and remote sensing information about the snow covered area.

## **Introduzione**

Il problema della gestione delle risorse idriche sta assumendo in questi ultimi anni proporzioni sempre maggiori. L'acqua disponibile, deve essere gestita in modo coerente per far fronte a tutte le diverse necessità, a partire dagli usi domestici ed industriali, fino alla politica di gestione dei serbatoi a scopo irriguo e soprattutto idroelettrico. In un contesto simile l'acqua accumulata sotto forma di neve nei bacini alpini rappresenta un'importante risorsa per il periodo primaverile ed estivo, ove si concentra la stagione di fusione nivale.

Il presente studio pertanto si propone di quantificare la risorsa idrica disponibile, con l'ausilio delle informazioni provenienti dal sensore satellitare MODIS e dalla rete di monitoraggio dell'ARPA Lombardia. L'utilizzo sinergico di queste due tipologie di dati hanno infatti permesso di modellare il processo di accumulo e fusione nivale all'interno del bacino del fiume Mallerio in Lombardia.

## **Area di studio**

L'area oggetto del presente studio è il bacino del fiume Mallerio (320 km<sup>2</sup> circa) situato nel nord della regione Lombardia al confine con la Svizzera, tipico bacino alpino in cui la componente derivante da fusione nivale ha una notevole importanza nel bilancio idrologico. Il bacino, caratterizzato da un range di quote molto ampio (250-4000 m) e da un'altitudine media di circa 2000 m s.m., risulta in larga parte coperto dal manto nevoso durante l'intera stagione invernale.

## Modellazione idrologica

Il primo approccio impiegato è finalizzato alla valutazione delle portate idriche medie giornaliere in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino del fiume Mallero (Sondrio, m 250 s.m.). A tal fine si è utilizzato lo Snowmelt Runoff Model (SRM, *Martinec et al 1994*), modello di tipo distribuito e concettuale. La valutazione dei deflussi idrici, effettuata per le stagioni 2002, 2003 e 2004 ha riguardato il solo periodo Aprile-Luglio, quando le portate dipendono sia dalle precipitazioni piovose, sia dalla fusione nivale. Suddiviso il bacino idrografico in quattro fasce di quota, all'interno di ciascuna di esse sono state valutate le variabili di input del modello: la temperatura dell'aria e la precipitazione medie giornaliere. Tali variabili sono state conseguite spazializzando i dati misurati dalle stazioni meteorologiche automatiche presenti all'interno del bacino (16 pluviometri e 12 termometri), utilizzando il metodo dei topoi per le precipitazioni ed il gradiente termico per le temperature. La copertura nivale, terza variabile del modello, è invece valutata, sempre per fascia di quota, con l'ausilio delle immagini satellitari del sensore MODIS. Da tali immagini è infatti possibile ottenere, mediante opportuna classificazione, l'estensione areale della neve durante i giorni privi di copertura nuvolosa. L'interpolazione temporale delle elaborazioni effettuate consente quindi l'ottenimento della variabile a cadenza giornaliera, come richiesto dal modello. Il fenomeno di fusione nivale è modellato con un approccio concettuale di tipo degree-day, in cui interviene il parametro degree-day factor (DDF) che viene valutato mediante calibrazione, e la temperatura dell'aria; mentre la copertura nivale serve per spazializzare l'informazione così ottenuta. Altri due parametri riguardanti le perdite per evaporazione, intercettazione ed evapotraspirazione, relative alla pioggia e alla fusione nivale ( $C_r$  e  $C_s$ ) sono valutati da calibrazione. Da ultimo il modello richiede in ingresso, per valutare la portata al giorno  $n$ , le portate (misurate o stimate) relative al giorno  $n-1$  ed il coefficiente di recessione ( $k$ ) del bacino, stimato invece da analisi storica delle portate.

Il secondo approccio è volto a ricavare una stima dello Snow Water Equivalent (SWE) accumulato al suolo al termine della stagione invernale, disponibile quindi come risorsa idrica durante la fase di ablazione, assumendo, in accordo con la letteratura scientifica, il primo di aprile come data di riferimento.

I dati necessari sono altezza ( $H_s$ ) e densità ( $\rho_s$ ) del manto nevoso, dai quali lo SWE è ricavato secondo la relazione  $SWE = \rho_s H_s / \rho_w$ . Nel caso in esame i valori di altezze di neve sono stati ottenuti da 11 stazioni di misura di proprietà di ARPA Lombardia e AINEVA con serie di dati giornalieri o sub giornalieri di lunghezza diversa, comunque compresi tra il 1985 ed il 2007.

Per quanto concerne i valori di densità invece sono stati utilizzati circa 200 rilievi sparsi realizzati da personale AINEVA, riportanti contestualmente tutte le informazioni relative al sito di misura. In questo modo è stato possibile stimare, tramite regressione lineare, i coefficienti della seguente equazione di stima dello SWE, funzione del numero di giorni passati dal 1 settembre ( $D$ ), dell'altitudine ( $A$ ) e della pendenza locale ( $I$ ):

$$\rho_s = 0.038 \cdot A + 0.649 \cdot D - 1.434 \cdot I + 145.030 \quad R^2 = 0.43 \quad [1]$$

È stato pertanto possibile calcolare in ogni stazione di misura il valore di SWE. Tuttavia tale valore puntuale non può essere rappresentativo di tutta l'area coperta di neve, a causa della rilevante variabilità dello SWE con l'altitudine, ragione per cui è stato necessario spazializzare il valore calcolato, in primo luogo passando ad un valore standardizzato ( $SWE^*$ ). Per fare questo si sono calcolati, in base ai dati di tutti gli anni disponibili, i valori di media e varianza di SWE e poi il valore standardizzato per ciascuna stazione e medio sul bacino secondo le formule (eq. 2)

$$SWE_1^* = \frac{SWE_1 - \mu_{SWE1}}{\sigma_{SWE1}} \quad \overline{SWE_1^*} = \frac{\sum_{i=1}^n SWE_1^*}{n} \quad [2]$$

Nei punti del bacino non strumentati è quindi possibile determinare il valore di media e varianza di SWE tramite una regressione lineare rispetto all'altitudine dei punti misurati stimata con il metodo Jackknife (eq. 3), utilizzando la sola altitudine come variabile in quanto risulta essere la grandezza più influente. Infine si determina la stima del valore di SWE in ogni punto del bacino (eq. 3):

$$\widehat{SWE}_1 = \hat{\mu}_{SWE_1} + \hat{\sigma}_{SWE_1} \cdot \overline{SWE_1^*} ; \hat{\mu}_{SWE_1} = 0.035 \cdot A - 47.447 ; \hat{\sigma}_{SWE_1} = 0.023 \cdot A - 28.869 \quad [3]$$

A questo punto il modello richiede di intersecare la mappa di SWE ottenuta con l'area effettivamente coperta da neve (in seguito Snow Covered Area – SCA).

### Valutazione della copertura nivale da immagini satellitari

Per la valutazione della copertura nivale sono state processate le immagini satellitari del sensore MODIS (MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dei satelliti polari Terra e Aqua della NASA. Tale sensore acquisisce informazione in 36 bande spettrali ad una risoluzione geometrica variabile tra 250 m ed 1 km.

Per l'applicazione del modello SRM, tra i prodotti NASA disponibili si è utilizzato il MOD10, che fornisce direttamente informazioni circa l'estensione areale della copertura nivale ad una risoluzione geometrica di 500 metri, ed il MOD09 che fornisce indicazioni circa la riflettanza superficiale, disponibile anche con risoluzione pari a 250 metri. Considerato il grado di dettaglio richiesto, si è deciso di mappare la copertura nivale alla massima risoluzione geometrica possibile e con una tecnica che permettesse di ottenere informazioni anche circa la copertura frazionaria del pixel. Quindi si è optato per la classificazione del prodotto MOD09 a 250 metri. Tale prodotto tuttavia presenta il limite di sole due bande spettrali disponibili, una nella regione del Visibile ed una nell'Infrarosso Vicino. La disponibilità di queste due bande spettrali è sufficiente per distinguere la neve da tutte le altre coperture del suolo, dal momento che in entrambe le bande la neve presenta una riflettanza molto maggiore. Tuttavia le nuvole, presentando un comportamento molto simile alla neve in queste due bande, disturbano una corretta classificazione comportando errori ed imprecisioni (Ranzi *et al.* 1999). Tale comportamento può essere invece differenziato analizzando la regione dell'Infrarosso medio, disponibile solo a 500 m di risoluzione. In tale contesto si è deciso perciò di utilizzare il MOD10 come strumento per la scelta delle immagini prive di nuvole, prodotto che permette di distinguere neve da nuvole, essendo creato utilizzando anche le bande dell'Infrarosso Medio. Le immagini selezionate sono poi state classificate da MOD09 a 250 metri. La classificazione delle immagini, vista l'esigenza di un grado di dettaglio elevato è avvenuta secondo la tecnica *soft* del fuzzy statistico, che consente di ottenere un'informazione circa la copertura frazionaria dei pixel dell'immagine, aumentando in modo notevole il grado di dettaglio rispetto alle classificazioni convenzionali. Con tale tecnica, infatti, ad ogni pixel non corrisponde un'unica classe di copertura del suolo, bensì più classi con probabilità variabile tra 0 ed 1 (Wang, 1990). Il maggior vantaggio ottenibile da una simile classificazione (figura 1) è la possibilità di poter trattare in modo più preciso tutti i pixel 'misti', non caratterizzati cioè da un'unica copertura di suolo e assai frequenti in corrispondenza della linea della neve. Stimate le coperture nivali del bacino in determinate date si è proceduto all'interpolazione mediante tracciamento delle curve di deplezione per ciascuna fascia di quota, ottenendo così la variabile richiesta dal modello.

Per il modello SWE, invece, essendo richiesta una sola immagine ad inizio stagione si è utilizzata una procedura di classificazione di tipo *hard* con una risoluzione geometrica di 500 metri (Rota Nodari & Sapio, 2007).

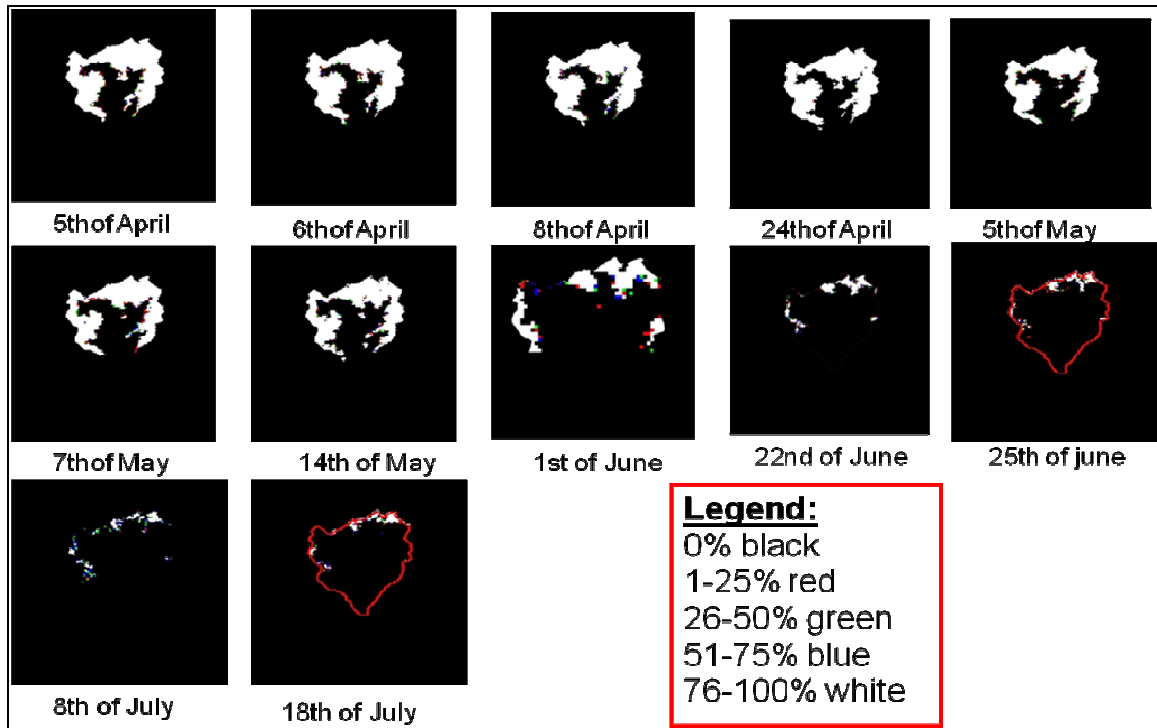


Figura 1 – Classificazione delle immagini satellitari relative alla stagione di fusione 2003.

## Risultati

La calibrazione del modello SRM per le stagioni 2002, 2003 e 2004 ha permesso di ottenere un valore univoco dei parametri per tutte le fasce di quota, indipendente dalla stagione e variabile ogni 15-giorni. L'accuratezza ottenuta inserendo tali parametri ha fornito valori di  $R^2$  (coefficiente di Nash-Sutcliffe) sempre maggiori di 0,9 e valori di deviazione di volume stagionale sempre inferiori al 10%. In figura 2 sono riportati gli idrogrammi simulati e misurati per la stagione 2003.

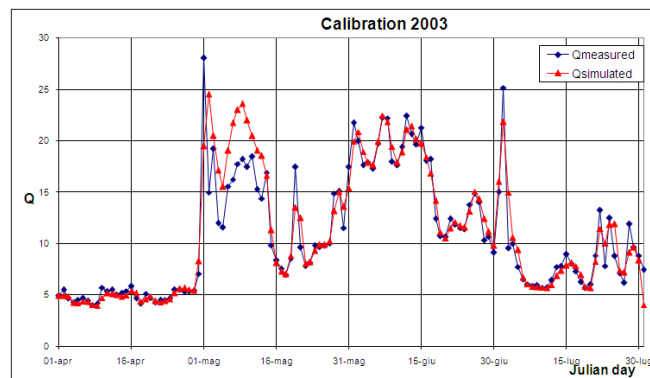


Figura 2 – Calibrazione del modello SRM per la stagione 2003

Quanto all'applicazione del modello SWE, di seguito sono descritti i risultati parziali e finali per l'anno 2003 mentre per gli altri anni, tra il 2001 e il 2007, si riportano solo i risultati finali, ottenuti in modo analogo.

Partendo dai dati puntuali misurati di altezza di neve al primo di aprile per gli anni disponibili e dalla eq. 1 relativa alle densità si è ricavato il valore puntuale di SWE e tramite le eq. 2 e 3 si è ricavata la formula di stima per la spazializzazione in funzione dell'altitudine ottenendo una mappa di SWE stimato sull'intero bacino (fig. 3 a)

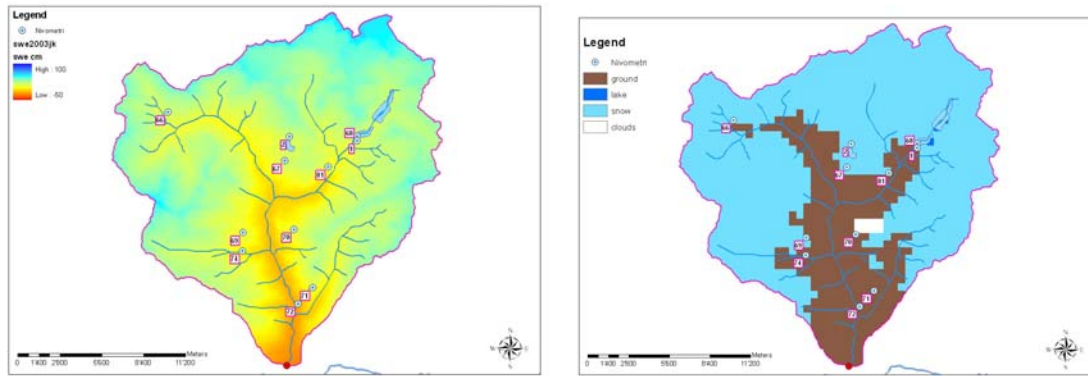


Figura 3 - Mappa di spazializzazione dello SWE (a) e classificazione dell'immagine MODIS per l'anno 2003 (b)

Quindi si è intersecata tale mappa con l'area effettivamente coperta di neve ottenuta in prossimità del 1 Aprile (fig 3 b), che è quindi stata utilizzata come maschera per ritagliare la mappa di SWE precedentemente ottenuta. (fig. 4 a)

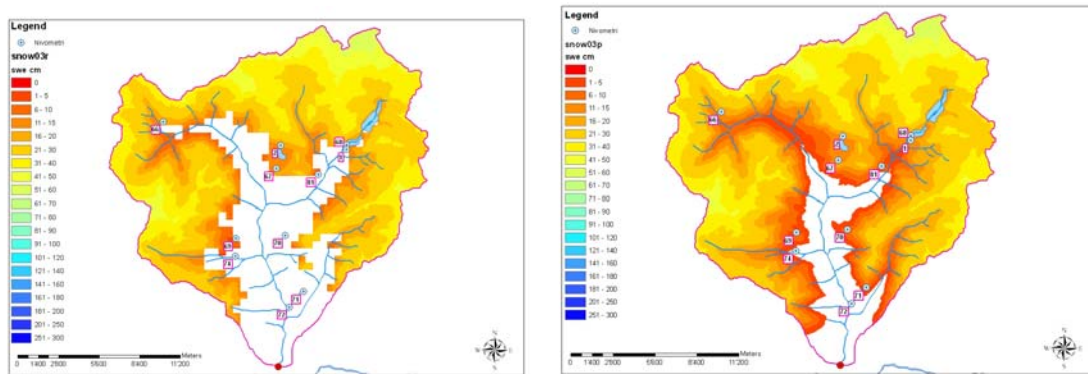


Figura 4 - Mappa finale di SWE con SCA ricavata da MODIS (a) e SCA ricavata tramite linea di neve funzione della quota (b)

Nel caso in cui i dati telerilevati non siano disponibili è possibile procedere ad una stima indiretta della SCA considerando come linea di neve la quota per cui si ricava zero come valore stimato di SWE dalla eq. 3. Per l'anno 2003 il risultato ottenuto secondo questa diversa tecnica è mostrato in figura 4 b.

Le due procedure portano a risultati simili nonostante le differenze in termini di SCA. Questo perché le differenze maggiori si hanno alla quote più basse della SCA, dove, in termini di volume di neve, si accumulano le minori percentuali che pertanto pesano poco sul valore totale.

Per gli altri anni di studio con le medesime procedure si sono ottenuti i seguenti risultati (fig 6).

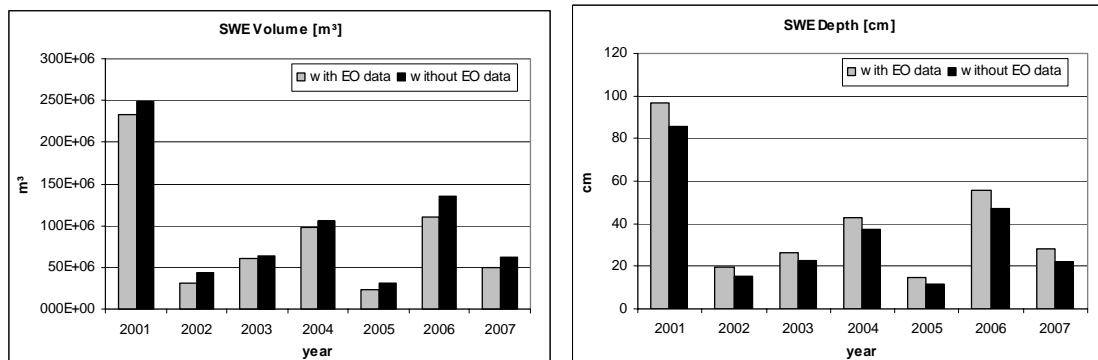


Figura 6 - Volumi totali di neve al suolo (a) e degli spessori medi di manto nevoso (b)

## Conclusioni

La calibrazione del modello SRM ha mostrato un'elevata accuratezza di risultati, che lo rende idoneo per la previsione delle portate idriche, sulla base delle previsioni di temperatura e precipitazione, disponibili in genere solo a breve termine.

Il metodo di stima di SWE si è mostrato in grado di fornire una rapida valutazione del volume di SWE accumulato su un bacino utilizzando dati a terra e telerilevati in genere facilmente reperibili e costituisce una prima approssimazione della disponibilità idrica all'inizio della stagione di fusione. Alcuni errori di classificazione sono stati messi in luce confrontando i risultati delle mappe di SWE con i dati a terra. Questi sono principalmente legati a disturbi derivanti da ombreggiature orografiche. Per migliorare la procedura di stima si stanno confrontando i risultati ottenuti con le misure ricavate da una campagna di rilievo in sito cercando di assimilare tali dati nella stima.

## Ringraziamenti

Questo studio è realizzato all'interno del progetto europeo del sesto programma quadro AWARE (A tool for monitoring and forecasting Available Water REsource in mountain environment).

Gli autori ringraziano ARPA Lombardia, Centro Monitoraggio Geologico (Sondrio) e AINEVA per aver reso disponibili i dati delle stazioni a terra.

## Bibliografia:

- Cunderlik J.M. (2003), *Hydrologic model selection for the CFCAS project: Assesment of water Resource Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions*. Project Report 1.
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. (1995), Development of Methods for Mapping Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data, *Remote Sensing of Environment*, 54:127-140.
- Martinec J., Rango A., Roberts R. (1994), The Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual (ed. By M.F. Baumgartner). *Geographica Bernensia*, P29, *Departments of Geography, Univ. of Berne*, Berne, Switzerland.
- Wang F. (1990), Fuzzy Supervised Classification of Remote Sensing Images. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 194-200.
- World Meteorological Organization (1986), Intercomparison of models of snowmelt runoff. *Operational Hydrology Report No.23*, WMO.
- Anderton, S.P., White, S.M. & Alvera, B. 2002. Micro-scale spatial variability and the timing of snow melt runoff in a high mountain catchment, *Journal of Hydrology*, 268, 158–176.
- Blöschl, G. 1999. Scaling issues in snow hydrology, *Hydrol.Process.*,13, 2149-2175.
- Bocchiola, D., Rosso, R., 2007. The distribution of daily Snow water Equivalent in the Central Italian Alps, *Advances in Water Resources*, 30, 135–147
- Bohr, G. S. & Aguado, E. 2001 Use of April 1<sup>st</sup> SWE measurements as estimates of peak seasonal snowpack and total cold-season precipitation. *Water Resour. Res.*, 37, 1, 51-60.
- Carrol, S. S. & Cressie, N. A. C. 1997. Spatial modeling of snow water equivalent using covariances estimated from spatial and geomorphic attributes, *J. of Hydrol.*, 190, 42-59.
- Elder, K, Dozier, J. & Michaelsen, J. 1991, Snow accumulation and distribution in an alpine watershed, *Water Resour. Res.*, 27(7), 1541-1552.
- Ranzi, R., Grossi, G. & Bacchi, B. (1999). Ten years of monitoring areal snow pack in the Southern Alps using NOAA-AVHRR imagery, ground measurements and hydrological data, *Hydrol.Process.*,13, 2079-2095.
- Rota Nodari, F. & Sapio, F. 2007. Snow Cover Area (SCA) estimation and analysis in the alpine range using moderate resolution satellites. *EARSel Proceedings*
- Swamy, A.N. & Brivio, P.A (1996). Hydrological modeling of snowmelt in the Italian Alps using visible and infrared remote sensing, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17. no. 16, pp. 3169-3188.