

PREVISIONE IDROLOGICA PER LA GESTIONE DEGLI IMPIANTI IDROELETTRICI

S. Manfreda¹, L. Funicelli¹, & L. Mancusi²

- (1) Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata,
e-mail: salvatore.manfreda@unibas.it
(2) Dipartimento Ambiente e Sviluppo Sostenibile, Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A.,
e-mail: leonardo.mancusi@rse-web.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro è descritto un modello idrologico a parametri concentrati ideato per migliorare i sistemi di previsione per la produzione idroelettrica. Particolare enfasi è data alla struttura del modello e alla metodologia di calibrazione adottata. In particolare, viene presentato un approccio mirato a scomporre le fasi di calibrazione in funzione dei processi da simulare. Tale approccio ha consentito di definire una struttura di modello robusta in grado di fornire buone stime del deflusso in alveo a supporto del collocamento nella borsa elettrica dell'energia prodotta. Il modello è stato utilizzato sul bacino del Fiume Aniene per generare previsioni di tipo deterministico. Queste analisi sono servite per valutare l'attendibilità delle previsioni con tempi di preavviso di 1, 2 e 3 giorni. I risultati mostrano un buon livello di affidabilità delle previsioni con un giorno di anticipo, mentre gli errori delle previsioni a 2 e 3 aumentano in modo più marcato.

1 INTRODUZIONE

L'energia idroelettrica rappresenta circa il 18% della produzione nazionale di energia elettrica (statistiche TERNA 2010) ed è una fonte strategica per soddisfare i picchi di richiesta. In un sistema di libero mercato dell'energia è di fondamentale importanza prevedere la produzione elettrica con qualche giorno di anticipo in modo da collocare al meglio la propria offerta presso la borsa elettrica. Le società produttrici hanno l'esigenza di previsioni idrologiche a breve e medio termine per ottimizzare la gestione degli impianti idroelettrici ad invaso e ad acqua fluente. Nei sistemi ad acqua fluente, l'esigenza di conoscere gli afflussi in alveo è ancor più stringente, considerata l'impossibilità di modulare le portate mediante un sistema di accumulo. La previsione è fondamentale ai fini della continuità del servizio elettrico poiché l'energia elettrica, che transita nella rete, non è immagazzinabile e inoltre nella rete elettrica deve essere mantenuto in ogni istante l'equilibrio tra immissioni e prelievi. Tale equilibrio richiede l'utilizzo di apposite risorse (di "riserva" e di "bilanciamento") ed è voce di costo della tariffa elettrica.

L'utilizzo di modelli idrologici in cascata a modelli meteorologici ad area limitata è una delle strade più promettenti per la previsione idrologica. I modelli meteorologici di nuova generazione sono capaci di prevedere i campi delle variabili meteorologiche con

risoluzione spaziale e temporale prossime a quelle necessarie per la simulazione idrologica. Nel presente lavoro viene utilizzato un modello di previsione meteorologica ad area limitata accoppiato ad un modello idrologico a parametri concentrati (AD2 - *Manfreda e Fiorentino*, 2004) al fine di fornire previsioni delle portate ordinarie e di piena da utilizzare come strumento di supporto per la previsione della produzione a 24-48-72ore. Nel presente caso sono state utilizzate le previsioni meteorologiche del modello COSMO-LAMI (gestito dall'Arpa Piemonte e Arpa Emilia Romagna congiuntamente al CNMCA dell'Aeronautica Militare nell'ambito del progetto di collaborazione internazionale COSMO).

2 IL CASO STUDIO

L'approccio modellistico è stato applicato al bacino idrografico del Fiume Aniene (uno degli affluenti principali del Tevere) a monte della diga di San Giovanni (Tivoli). Le caratteristiche principali di questa parte di bacino sono: superficie di 690 km², range di altitudine da 213 a 2156 m s.l.m. (altitudine media di 800 m s.l.m.) e portata media di 13 m³/s. A partire dal 1884, questo corso d'acqua è stato utilizzato per la produzione di energia elettrica. Gli impianti idroelettrici realizzati lungo il corso fluviale sono caratterizzati da una modesta capacità d'invaso (con volume di accumulo compreso tra 0.03 Mm³ e 0.19 Mm³) e una regolazione giornaliera. All'interno del bacino sono presenti 10 stazioni di monitoraggio del Servizio Idrografico di Roma: 7 per registrazioni pluviometriche e di temperatura, 2 per misure pluviometriche e idrometriche, ed infine una stazione idrometrica è posta a valle della diga di San Giovanni. I dati di pioggia utilizzati si riferiscono al periodo compreso tra 1/01/2006 e 31/12/2010. La stima delle temperature è ottenuta mediante i valori rilevati alla stazione di Subiaco-Scolastica (534 m s.l.m.).

3 APPROCCIO METODOLOGICO

Il modello idrologico AD2 (*Fiorentino & Manfreda*, 2004; *Rosano et al.*, 2008) è di tipo concettuale a parametri concentrati fisicamente basati. Il bacino idrografico è schematizzato come un bucket rappresentativo del suolo idrologicamente attivo. Le componenti del bilancio idrologico simulate sono costituite da: infiltrazione, deflusso superficiale, ruscellamento subsuperficiale, scioglimento nivale, percolazione profonda, evapotraspirazione. L'AD2 è stato rielaborato con l'obiettivo di giungere ad una versione di modello in grado di fornire una previsione delle disponibilità idriche in tutte le fasi idrologiche, incluse le magre. Per le finalità del presente lavoro particolare enfasi è stata posta alla descrizione delle portate di base e della componente legata allo scioglimento nivale.

Le portate superficiali e ipodermiche vengono simulate per mezzo di uno schema di invaso lineare, mentre il deflusso di base viene calcolato direttamente dalla serie dei dati di portata registrata mediante un filtro appositamente sviluppato. Questo assunto è necessario a causa delle incongruenze esistenti nel bilancio idrologico a scala di bacino dovute ai numerosi prelievi idrici per scopi civili ed industriali non monitorati. Infine, è stato sviluppato un modulo neve per un modello concettuale che potesse esser testato con misure di copertura nivale effettuate da satellite.

Un aspetto innovativo del presente lavoro riguarda la calibrazione del modulo nivale

che si è svolta in modo indipendente dalla calibrazione del modello stesso evitando così di arrivare ad una stima dei parametri performanti, ma non per il giusto motivo. Infatti, in molti casi la calibrazione dei modelli avviene modificando indistintamente i parametri con l'obiettivo di riprodurre le portate registrate in alveo. Questo inevitabilmente porta ad avere un set di parametri che riproduce correttamente il segnale integrato del bacino, ma non è detto che lo faccia riproducendo correttamente i fenomeni (Kirchner, 2006). Pertanto, in questi casi è probabile che le performance dei modelli non siano altrettanto soddisfacenti in periodi diversi da quelli di calibrazione. Coerentemente a quanto appena detto, i parametri responsabili della generazione del deflusso del modello AD2 sono stati calibrati utilizzando la serie dei deflussi superficiali ottenuta depurando la serie delle portate registrate dai deflussi di base stimati.

3.1 Lo scioglimento nivale

Il modulo per lo scioglimento nivale schematizza il manto nevoso attraverso l'equivalente in acqua (SWE) calcolato su tre porzioni del bacino idrografico: porzione coperta da neve a temperature inferiori al punto di scioglimento, porzione coperta da neve in fase di scioglimento e porzione priva di copertura nevosa (figura 1). Queste porzioni del bacino hanno dimensioni variabili nel tempo in relazione alla distribuzione spaziale delle temperature dedotta mediante la curva ipsografica del bacino.

A tale scopo si adotta l'approssimazione matematica della curva ipsometrica proposta da Strahler (1952):

$$\frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} = \frac{f_c(t)}{1 + l(1 - f_c(t))} \quad (1)$$

con z , f_c , $z_{\min}$, e $z_{\max}$ che rappresentano rispettivamente la generica quota all'interno del bacino, la porzione di bacino al di sotto di z , la quota minima e la massima del bacino, mentre l indica il parametro caratteristico della funzione. Questa equazione consente di sviluppare un modello a parametri concentrati in grado di descrivere l'eterogeneità spaziale presente in un bacino idrografico. La calibrazione del parametro l è stata effettuata attraverso il DEM del bacino studiato ottenendo $l=2.6$.

Assumendo una dipendenza lineare tra temperature e quota è possibile stimare la distribuzione delle temperature del bacino nota la temperatura in un generico punto ad una quota Z_s (quota della stazione di monitoraggio). In tal modo è possibile identificare la quota di riferimento (z_0) corrispondente ad una temperatura T_b che segna la transizione tra la zona di accumulo neve e la zona in cui la neve è soggetta a scioglimento. Utilizzando un gradiente termico $lr = -6.5$ °C/km, a partire dalla quota della stazione di rilevamento delle temperature è possibile stimare

$$z_0 = z_s + (T_s - T_b)/lr \quad (2)$$

dove T_s è la temperatura rilevata (°C) in corrispondenza della stazione di misura.

Mediante l'eq. 1 è possibile, nota z_0 , definire l'area del bacino che si trova al di sotto di essa (f_0) e la restante frazione (a_0) dove le temperature sono minori di T_b . La temperatura T_b viene utilizzata come livello di transizione tra pioggia liquida e nevosa, come soglia inferiore per lo scioglimento e superiore per il ricongelamento, per cui la curva di livello z_0 diviene il confine tra due regioni: una in cui si realizza l'accumulo e/o il ricongelamento nivale (zona fredda dove $T < T_b$) e l'altra in cui si realizza lo

scioglimento nivale (dove le temperature sono maggiori di T_b). Il contenuto equivalente d'acqua al di sopra di z_0 viene denominata SWE_0 , la componente al di sotto di z_0 è invece indicata con SWE_{sm} . La porzione del manto nevoso a temperature superiori a T_b ha dimensioni che dipendono dall'evoluzione delle temperature e tende a contrarsi con l'aumento delle stesse. Questo meccanismo è garantito dal fatto che nel modello l'eventuale scioglimento riduce l'estensione dell'area coperta da neve e non l'altezza di neve accumulata.

Questo approccio consente di simulare l'evoluzione del manto nevoso nel tempo con un modello versatile ed allo stesso tempo in grado di descrivere le dinamiche alla scala di bacino. Inoltre, il modello riesce a descrivere le dinamiche spaziali della neve che possono essere eventualmente confrontate con misure di copertura nevosa facilmente reperibili mediante sensori satellitari.

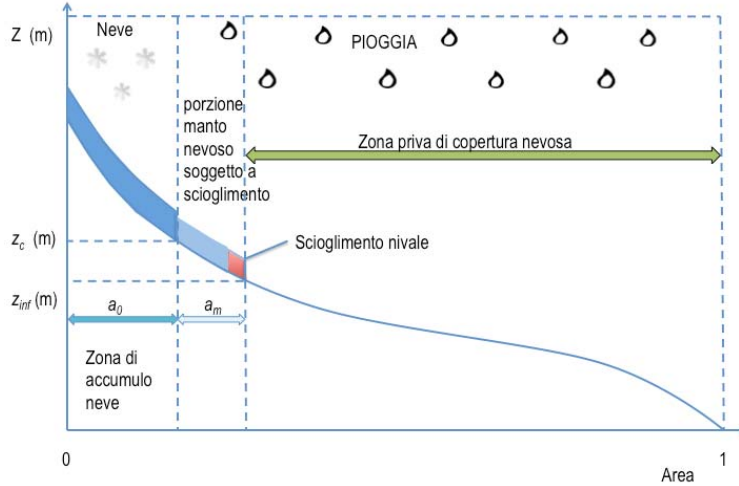


Figura 1. Schematizzazione delle caratteristiche principali del modulo neve.

Il modulo è basato sul metodo gradi-giorno e stima il bilancio nivale su due bucket di dimensione variabile in base alle fluttuazioni delle temperature. Ciascuno di questi è caratterizzato dalla temperatura media presente nell'area di riferimento. In particolare, le temperature medie relative alle due componenti SWE_0 e SWE_{sm} sono calcolate in funzione delle quote della porzione di bacino considerato. Tale quota z_m può essere calcolata mediante l'eq. 1 integrata in funzione di f_c utilizzando come limiti di integrazioni gli estremi della fascia altimetrica considerata ($f_{c2} - f_{c1}$). L'espressione generale assume la seguente forma

$$z_m = \frac{\int_{f_{c1}}^{f_{c2}} \left(\frac{f_c \cdot (z_{\max} - z_{\min})}{1 + l(1 - f_c)} + z_{\min} \right) df_c}{f_{c2} - f_{c1}} = \frac{(z_{\max} + (l-1)z_{\min})}{l} + \frac{(1+l)(z_{\max} - z_{\min})(\text{Log}[(f_{c1}-1)l-1] - \text{Log}[(f_{c2}-1)l-1])}{(f_{c1} - f_{c2})l^2} \quad (3)$$

dove f_{c1} e f_{c2} sono i limiti dell'area di riferimento in termini di frazione di bacino con temperature inferiori ad un dato valore.

Nota z_m è possibile stimare la temperatura media dell'area nella porzione di bacino in cui la neve è in scioglimento (T_{sm}) come

$$T_{sm} = T_b - lr \cdot (z_0 - z_m) \quad (4)$$

Definite le porzioni di bacino nelle diverse condizioni in funzione della distribuzione delle temperature è possibile applicare il bilancio nivale basato sul metodo gradi-giorno. La prima fascia (detta fredda) è identificata in base alla posizione T_b , mentre la seconda inizia in corrispondenza della quota in cui si riscontra T_b e si chiude in corrispondenza della quota, z_{inf} , entro cui il manto nevoso viene contenuto in funzione delle fasi di bilancio. Lo scioglimento nivale è pensato come una riduzione dell'estensione di questa fascia piuttosto che una riduzione di altezza nevosa sull'intera fascia. La restante parte di bacino è invece libera da neve e segue un bilancio idrologico ordinario.

L'aliquota di scioglimento si calcola facendo riferimento al metodo dei gradi-giorno definito su una temperatura oraria:

$$r_s = M_f \cdot (T_{sm} - T_b) \cdot a_m \quad (5)$$

dove M_f è il fattore di scioglimento espresso in $mm/^\circ C$, a_m è l'area del bacino dove si ha della neve soggetta a scioglimento (m^2).

L'area della seconda fascia occupata dalla neve si riduce provocando una riduzione dell'area pari a:

$$a_{inf} = \frac{(SWE_{sm} - r_s)}{SWE_{sm} / a_m} \quad (6)$$

È opportuno sottolineare che il modello viene qui descritto nelle sue caratteristiche principali per ragioni di brevità e pertanto vengono trascurati alcuni passaggi ritenuti di minore interesse e secondari rispetto alle finalità del presente lavoro, ma saranno oggetto di approfondimento in successivi lavori.

3.2 Stima delle portate di base

Le portate di base sono stimate tramite interpolazione, mediante spline di cubiche, effettuata sulla serie dei valori minimi registrati ed identificati mediante la funzione "findpeaks" di Matlab applicata ai valori registrati di portate inferiori alla media più la deviazione standard (si veda figura 2). È opportuno sottolineare che, a causa delle fluttuazioni indotte durante la giornata dalle operazioni di modulazione degli impianti idroelettrici, si è scelto di lavorare sulla serie di portate aggregate a scala giornaliera per eliminare tale segnale.

In fase di previsione invece, è possibile avere a disposizione i valori di deflusso dei giorni precedenti la previsione effettuata al tempo t , quindi ci si trova nella condizione di dover effettuare un'estrapolazione per tutti i giorni a partire dall'ultimo punto di minimo noto. Tuttavia è possibile vincolare la stima dell'interpolazione ad un valore del deflusso di base dedotto come differenza tra deflusso registrato e ruscellamento superficiale simulato al giorno t -esimo. In tal modo, è possibile eseguire delle stime più attendibili del deflusso di base nei giorni successivi al tempo t .

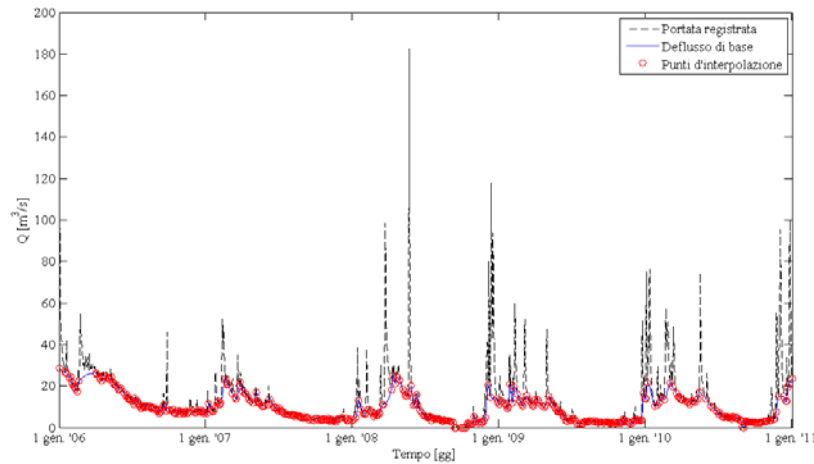


Figura 2. Deflusso di base definito con interpolazione mediante spline di cubiche.

4 CALIBRAZIONE, VALIDAZIONE E DISCUSSIONE

La calibrazione ha riguardato separatamente i parametri delle componenti superficiali e quelli del modulo neve. Per calibrare i parametri del modulo neve sono state utilizzate le stime di copertura nevosa messe a disposizione dal National Snow & Ice Data Center ed ottenute mediante l'algoritmo di *Salomonson e Appel* (2004). Questo database fornisce mappe di copertura nevosa e nuvolosa che possono essere messe a confronto con la percentuale di area coperta da neve ottenuta dal modulo neve descritto nei paragrafi precedenti. In figura 3 si riportano i valori di area coperta da neve relativi al periodo di calibrazione. L'area calcolata è rappresentata insieme a due grandezze telerilevate: la copertura nevosa stimata eliminando i pixel con nuvole (limite inferiore) e un'altra data dalla somma tra questa e l'area occupata da nuvole (limite superiore). Si riportano le due informazioni perché ovviamente l'area coperta da neve è certamente un valore compreso tra questi due valori, considerato che la copertura nuvolosa potrebbe mascherare una porzione di copertura nevosa. I valori calibrati dei parametri del modulo neve sono i seguenti: $M_{fr} = 0.01 \text{ mm/}^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, $M_f = 0.15 \text{ mm/}^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, $T_b = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. La calibrazione è effettuata imponendo che i valori simulati di area coperta dalla neve rientrasse entro i due limiti suddetti.

I dati rilevati ovviamente non sono continui a causa della copertura nuvolosa che durante alcuni giorni dell'anno può essere eccessiva. Un interessante riscontro grafico tra dati misurati e registrati è fornito nella figura seguente in cui si riporta il limite inferiore definito dal modello per la copertura nevosa e la mappa della copertura nevosa stimata da satellite per un periodo di validazione (31/01/2007). In questo caso si osserva un ottimo accordo tra il confine della copertura nevosa simulato, rappresentato dalla quota z_{inf} , e la distribuzione della neve misurata da satellite.

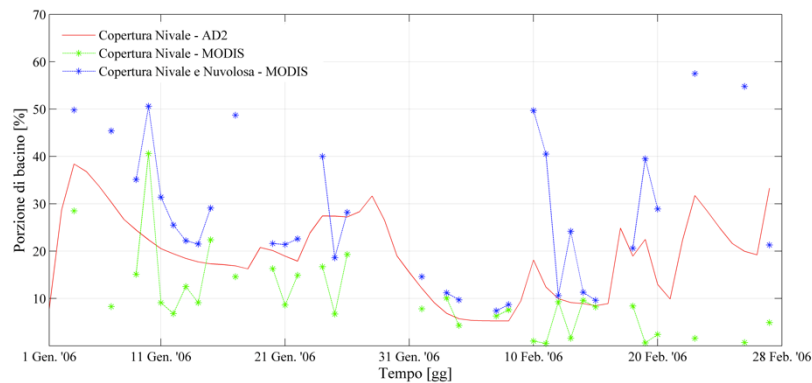


Figura 3. Area simulata con copertura nevosa confrontata con i valori di copertura nevosa e nuvolosa telerilevati da MODIS durante il periodo gennaio – febbraio 2006.

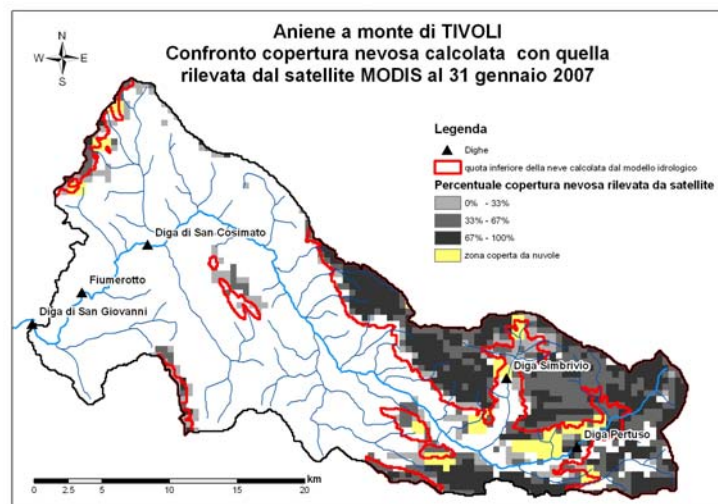


Figura 4. Confronto tra il limite inferiore dell'area coperta da neve simulato e la copertura nevosa misurata da satellite (NASA MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid V005) relativamente al 31/01/2007. Le aree in giallo sono zone coperte da nuvole.

La calibrazione dei parametri responsabili del ruscellamento superficiale è stata svolta utilizzando la serie dei soli deflussi superficiali dedotti a valle della procedura di filtro precedentemente descritta. La calibrazione è stata condotta utilizzando i primi due anni di dati, mentre la validazione ha interessato il periodo 1/1/2008 - 31/12/2010. L'intero periodo considerato è descritto in figura 5, dove sono riportate le portate in alveo simulate e registrate. Il grafico conferma l'ottimo adattamento delle portate previste da AD2 rispetto ai valori registrati sia nel periodo di calibrazione sia in quello di validazione.

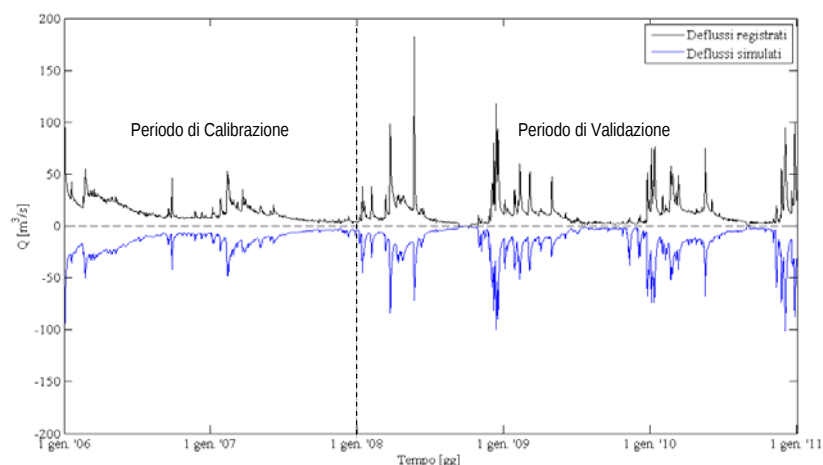


Figura 5. Grafico a specchio delle portate osservate e portate calcolate da AD2 relative al periodo 1/1/2006 - 31/12/2010 (Fiume Aniene a San Giovanni).

4.1 La previsione idrologica

I modelli di tipo meteorologico si possono distinguere secondo due categorie: modelli globali (GM = Global Model), che prendono in considerazione tutta l'atmosfera terrestre, e modelli ad area limitata (LAM = Limited Area Model), che lavorano su parti più ristrette di territorio. I GM operano con risoluzioni comprese tra 40 e 100 km in orizzontale, mentre i LAM impiegano una griglia più fine, con passo di 5÷20 km, su un'area ristretta e sfruttano le condizioni iniziali e al contorno definite dai GM. I GM producono previsioni anche su orizzonti temporali lunghi, mentre si utilizzano i LAM per avere previsioni più dettagliate su aree ristrette. È prassi comune far girare i LAM solo per tempi limitati, generalmente non si superano le 72 ore. Ciò non è semplicemente legato ai tempi di calcolo, ma è dovuto al fatto che i LAM necessitano delle condizioni al contorno definite dai GM.

Dall'archivio del gruppo di Meteorologia di RSE sono state estratte le previsioni meteorologiche a 24, 48 e 72 ore ottenute dal modello COSMO-LAMI per il caso studio descritto. Il modello meteo fornisce le previsioni meteorologiche con una scansione temporale di tre ore. Per le finalità di questo lavoro, si è preferito lavorare con tale scansione temporale piuttosto che effettuare una successiva disaggregazione a scale temporali inferiori. Questo comporta un certo smorzamento dei picchi di precipitazione e quindi delle portate.

Le simulazioni con piogge previste dal modello COSMO-LAMI sono state svolte utilizzando la simulazione idrologica con piogge registrate alla quale ogni giorno è associata una simulazione in previsione basata sui dati di pioggia previsti nelle successive 24, 48 e 72 ore previste da modello COSMO-LAMI. I risultati sono presentati nella figura seguente.

Le prestazioni del modello sono state valutate attraverso l'errore quadratico medio (Root Mean Square Error - RMSE), l'errore medio assoluto (MAE), l'errore medio

assoluto percentuale (MAPE), il coefficiente di efficienza (NSE) di *Nash e Sutcliffe* (1970) e l'errore relativo nella stima del deflusso totale (RVE). Nella tabella 1 sono riportati i valori di questi indici di prestazione valutati sulle previsioni a passo giornaliero con 1, 2 e 3 giorni di anticipo e per l'applicazione con precipitazioni registrate relativamente al periodo di 5 anni 2006-2010. Le simulazioni riportate in figura 6 e sintetizzate in termini di prestazioni nella tabella 1 mostrano nel complesso un buon adattamento ai dati di portata registrati. Le prestazioni del modello idrologico applicato utilizzando dati di pioggia previsti piuttosto che registrati peggiorano con l'aumentare del tempo di preannuncio utilizzato. È interessante notare la differenza tra le prestazioni di un modello idrologico applicato con i soli dati registrati e la versione che utilizza 24 ore di dati previsti da modello COSMO-LAMI sono molto simili tra loro. Si osserva solo un piccolo incremento degli errori nel caso della previsione a 24ore. La riduzione di precisione delle previsioni è certamente più marcata passando dalle previsioni a 1 giorno a quelle a 2 e 3 giorni, questo verisimilmente è dovuto sia al fatto che nella previsione del primo giorno si risente ancora dell'influenza della condizione iniziale calcolata con le precipitazioni osservate sia al fatto che le previsioni del modello LAM con 1 giorno di preavviso sono più affidabili rispetto a quelle a 2 e 3 giorni. Dal secondo giorno in avanti, superato il tempo di corrivazione del bacino, che è inferiore ad un giorno, l'incertezza delle previsioni meteorologiche diventa relativamente più importante ed influenza maggiormente i risultati.

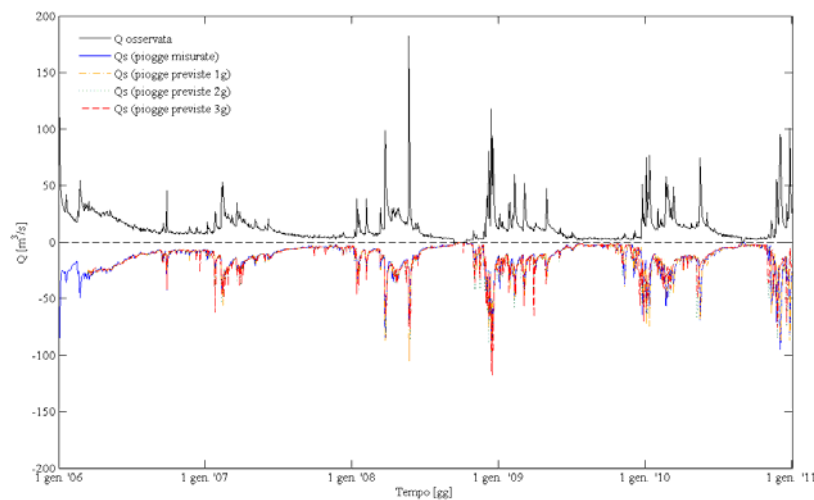


Figura 6. Grafico a specchio di confronto tra portate osservate e simulate mediante modello AD2 utilizzando precipitazioni misurate da pluviometri e simulate da modello COSMO-LAMI con 1, 2 e 3 giorni di anticipo.

Si fa presente che le portate osservate contengono delle fluttuazioni artificiali dovute alle modulazioni delle centrali idroelettriche che non sono simulate dal modello. Queste fluttuazioni sono trascurabili alla scala giornaliera, in quanto gli impianti in esercizio nel bacino effettuano un compenso giornaliero. Per tale ragione si è preferito svolgere le valutazioni sulle prestazioni delle simulazioni alla sola scala giornaliera.

Indice	Pioggie osservate	Previsione a 1 giorno	Previsione a 2 giorni	Previsione a 3 giorni
RMSE (m ³ /s)	4.41	4.92	6.20	6.35
MAPE (%)	17.78	18.80	23.12	25.44
MAE (m ³ /s)	1.81	1.90	2.48	2.71
NSE (%)	89.67	86.04	77.82	76.67
RVE (%)	3.62	6.44	6.97	7.61

Tabella 1. Prestazione del modello AD2 basato su precipitazioni misurate da pluviometri e simulate da modello COSMO-LAMI con 1, 2 e 3 giorni di anticipo.

5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro descrive i risultati di un'attività di ricerca volta a definire nuovi strumenti per migliorare i sistemi di produzione energetica. Il modello concettuale descritto è stato accoppiato al modello di previsione COSMO-LAMI. L'approccio modellistico utilizzato in questa fase del lavoro ha consentito di fornire previsioni di tipo deterministico delle portate, evidenziando le criticità in termini d'incertezza delle previsioni specie a 2 e 3 giorni. Il lavoro svolto è stato mirato prevalentemente a migliorare il modello idrologico e sviluppare una robusta procedura di calibrazione per tale strumento. Le analisi mostrano le enormi potenzialità che questi strumenti forniscono per ottimizzare lo sfruttamento degli impianti idroelettrici esistenti.

Ringraziamenti. Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Programma tra RSE (ex ERSE) ed il Ministero dello Sviluppo Economico - D.G.E.R.M. stipulato in data 29 luglio 2009 in ottemperanza del DM, 19 marzo 2009. Gli autori ringraziano il Servizio Idrografico di Roma per i dati forniti e Teresa Pizzolla e Raffaele Giuzio per la collaborazione fornita durante la stesura del lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- Fiorentino, M. & Manfreda, S. La stima dei volumi di piena dell'Adige a Trento con riferimento al rischio di inondazione, *XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 2004.
- Kirchner, J.W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, *Water Resources Research*, 2006, 42, W03S04.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models, Part 1 – a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3), 282-290.
- Rosano, R., Manfreda, S. Fiorentino M., Sole, A. Sviluppo ed ingegnerizzazione di un modello per la simulazione idrologica a scala di bacino, *XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 2008.
- Salomonson, V.V. & Appel, I. Estimating the fractional snow covering using the normalized difference snow index, *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89:351-360.
- Strahler, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Bulletin Geological Society of America*, 1952, 63, 1117-1142.
- Terna, Dati Statistici sull'energia elettrica in Italia: Dati Generali, pp. 21, 2010.