



Politecnico di Torino

Dipartimento di Idraulica,
Trasporti e Infrastrutture Civili

Consorzio di Bonifica della

Baraggia Biellese e Vercellese

VALUTAZIONE DEL BILANCIO IDROLOGICO E STIMA DEI FABBISOGNI DEL COMPRENSORIO IRRIGUO "CENTRO SESIA"



Responsabili della ricerca: Pierluigi Claps

Davide Poggi

Collaboratore: Elisa Tosello

Luglio 2010

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Finalità dello studio.....	1
1.2	Il comprensorio irriguo del Centro Sesia.....	3
2	MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO DEL COMPENSORIO IRRIGUO	9
2.1	Descrizione del modello	9
2.2	Descrizione delle componenti.....	13
2.2.1	<i>Volumi in ingresso - Q_i.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Curva obiettivo dei livelli idrici - V_R.....</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Volumi tecnici - V_T.....</i>	<i>18</i>
a)	<i>Saturazione dello strato di terreno agrario - V_{im}.....</i>	<i>19</i>
b)	<i>Volumi di riempimento dei canali - V_{rc}</i>	<i>19</i>
c)	<i>Perdite per filtrazione laterale dei canali - V_{pc}.....</i>	<i>19</i>
2.2.4	<i>Evapotraspirazione - ET.....</i>	<i>21</i>
a)	<i>Stadio di sviluppo del riso, descritto tramite il parametro LAI (Leaf Area Index)</i>	<i>21</i>
b)	<i>Calore sensibile assorbito dalla massa di acqua presente nelle risaie.....</i>	<i>27</i>
c)	<i>Coefficiente colturale.....</i>	<i>27</i>
d)	<i>Applicazione dell'evapotraspirazione sulla sola superficie sommersa</i>	<i>28</i>
2.2.5	<i>Filtrazione - F.....</i>	<i>28</i>
a)	<i>Variabilità della filtrazione in funzione del battente idraulico.....</i>	<i>29</i>
b)	<i>Riduzione nel tempo del coefficiente di permeabilità idraulica satura del terreno</i>	<i>32</i>
c)	<i>Applicazione della filtrazione sulla sola superficie sommersa</i>	<i>33</i>
2.2.6	<i>Volumi in uscita - Q_u.....</i>	<i>33</i>
2.2.7	<i>Precipitazioni - P.....</i>	<i>33</i>
3	TARATURA DEL MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI CAMPO PROVA	35
3.1	Premessa	35

3.2	Taratura dei parametri per il calcolo dell'evapotraspirazione	39
3.3	Taratura dei parametri per il calcolo della filtrazione	43
3.4	Risultati del bilancio idrologico sul campo prova di Lenta	44
4	APPLICAZIONE DEL MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO ALLA SCALA DI COMPENSORIO.....	47
4.1	Riepilogo dei dati disponibili.....	47
4.2	Stima dei parametri del modello	55
4.2.1	<i>Superficie del compensorio</i>	55
4.2.2	<i>Volumi tecnici – V_T.....</i>	56
a)	<i>Saturazione dello strato di terreno agrario - V_{im}.....</i>	56
b)	<i>Volumi di riempimento dei canali - V_{rc}.....</i>	58
c)	<i>Perdite per filtrazione laterale dei canali - V_{pc}.....</i>	59
4.2.3	<i>Evapotraspirazione – ET.....</i>	59
a)	<i>Stadio di sviluppo del riso, descritto tramite il parametro LAI (Leaf Area Index).....</i>	59
b)	<i>Calore sensibile assorbito dalla massa di acqua presente nelle risaie.....</i>	61
c)	<i>Coefficiente colturale.....</i>	63
d)	<i>Applicazione dell'evapotraspirazione sulla sola superficie sommersa</i>	63
4.2.4	<i>Filtrazione – F.....</i>	64
a)	<i>Variabilità della filtrazione in funzione del battente idraulico sul campo</i>	64
b)	<i>Riduzione nel tempo del coefficiente di permeabilità idraulica satura del terreno</i>	65
c)	<i>Applicazione della filtrazione sulla sola superficie sommersa.....</i>	67
4.2.5	<i>Volumi in uscita – Q_u – e volumi in ingresso - Q_i.....</i>	67
4.3	Risultati del modello: confronti con i dati relativi alle stagioni esaminate	68
5	VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO IRRIGUO	76
5.1	Definizione del fabbisogno irriguo del compensorio risicolo	76
5.2	Descrizione del modello di calcolo	79
5.3	Applicazione del modello	88
5.3.1	<i>Condizioni di minimo fabbisogno.....</i>	88
5.3.2	<i>Condizione di massimo fabbisogno</i>	94

5.3.3	<i>Fabbisogno irriguo reale.....</i>	99
5.4	Analisi dei fabbisogni delle annate 2005-2008.....	107
5.4.1	<i>Confronto tra i fabbisogni degli anni 2005-2008.....</i>	108
5.5	Stima dei deficit nelle stagioni 2005 - 2008.....	123
5.6	Valutazioni relative ad anni antecedenti il 2005.....	127
5.7	Analisi statistica dei fabbisogni.....	129
5.7.1	<i>Fabbisogno medio storico</i>	129
5.7.2	<i>Fabbisogno con periodo di ritorno 5 anni.....</i>	131
6	CONCLUSIONI	134
7	BIBLIOGRAFIA CITATA E DI RIFERIMENTO	138
APPENDICE A: ANALISI DELLE MISURE DEI CAMPI PROVA NELLA STAGIONE 2008.....		142
A.1	Caratteristiche generali delle aree adibite a campi prova.....	144
A.1.1	<i>Campo prova Cascina La Rinascita – Lenta.....</i>	145
A.1.2	<i>Campo prova Cascina Nuova – Albano Vercellese.....</i>	146
A.2	Campagna di misure della permeabilità del suolo.....	148
A.3	Monitoraggio dei livelli di falda.....	151
A.3.1	<i>Caratteristiche generali.....</i>	151
A.3.2	<i>Campo prova Cascina La Rinascita - Lenta</i>	151
A.3.3	<i>Campo prova Cascina Nuova – Albano Vercellese.....</i>	164
A.4	Monitoraggio dei livelli idrici per la stima delle portate	173
A.4.1	<i>Caratteristiche generali.....</i>	173
A.4.2	<i>Taratura degli stramazzi</i>	175
A.4.3	<i>Campo prova Cascina La Rinascita – Lenta.....</i>	179
A.4.4	<i>Campo prova Cascina Nuova – Albano Vercellese.....</i>	187
A.5	Monitoraggio dei parametri meteorologici e delle precipitazioni.....	195
A.5.1	<i>Campo prova Cascina La Rinascita – Lenta.....</i>	195

A.5.2	Campo prova Cascina Nuova – Albano Verellese	197
A.5.3	Analisi dei dati meteorologici e delle precipitazioni.....	199
APPENDICE B: VALUTAZIONE DELLE PERDITE PER FILTRAZIONE..		226
B.1	Modellazione del processo di filtrazione in un comprensorio risicolo	228
B.2	Sensitività dei parametri della filtrazione.....	231
B.2.1	Spessore della soletta - S.....	231
B.2.2	Altezza di terreno agrario - h_t	235
B.2.3	Riduzione del coefficiente di permeabilità durante la stagione irrigua - α	237
APPENDICE C: RICHIAMI DI STATISTICA.....		240
C.1.	Distribuzione Gamma a due parametri	242
APPENDICE D: CALCOLO DEL FABBISOGNO NETTO		246
D.1.	Calcolo del fabbisogno netto	248
ALLEGATO 1 – SERIE DI PORTATE IN INGRESSO E IN USCITA DEGLI ANNI 2005, 2006, 2007 E 2008.....		1 - 1
ALLEGATO 2 – DATI METEOROLOGICI MEDI SUL COMPRESORIO DEGLI ANNI 2005, 2006, 2007 E 2008		2 - 1
ALLEGATO 3 – CURVE DEL FABBISOGNO DEGLI ANNI 1994 - 2008..		3 - 1
ALLEGATO 4 – DISTRIBUZIONI GAMMA FABBISOGNI DECADELI E MENSILI		4 - 1

1 INTRODUZIONE

1.1 Finalità dello studio

Il presente studio è stato condotto con lo scopo di individuare i fabbisogni idrici colturali del comprensorio irriguo denominato Centro Sesia con un elevato grado di dettaglio temporale e spaziale e costituisce la naturale prosecuzione di un precedente lavoro relativo alla costruzione del bilancio idrico per l'intera stagione irrigua (Claps, Laio (2008)). La valutazione del fabbisogno a scala stagionale non tiene conto di alcuni fondamentali aspetti, tipici della coltivazione del riso con la pratica della sommersione continua. Un'analisi a scala temporale giornaliera, come quella svolta in questo lavoro, permette invece una più accurata descrizione dei fenomeni che entrano in gioco in un sistema complesso come quello risicolo. Il calcolo del fabbisogno di un comprensorio in cui si pratica la coltivazione del riso con la sommersione continua richiede infatti di tener conto non solo della quota parte di richiesta idrica che non riesce ad essere soddisfatta dalle precipitazioni, come avviene usualmente per le normali colture, ma anche dei volumi necessari al mantenimento di un adeguato battente idrico sul campo di risaia (aspetto tipico delle coltivazioni a sommersione). Inoltre, i risicoltori adottano particolari tecniche di impiego dell'acqua ed utilizzano solo parzialmente i volumi provenienti dalle precipitazioni. Di questi aspetti è necessario tenere conto nel calcolo del fabbisogno.

La messa a punto di un modello adatto alla valutazione del fabbisogno irriguo di un comprensorio risicolo richiede la disponibilità di affidabili serie storiche di portate in ingresso e in uscita e di variabili meteorologiche, necessarie alla costruzione del bilancio. Il dettaglio necessario per gli scopi di questo lavoro corrisponde alla scala giornaliera.

In questo capitolo è riportato un breve inquadramento del comprensorio del Centro Sesia, in riferimento alla sua dislocazione, alle tipologie di colture presenti, alle caratteristiche dei terreni e al reticolo idraulico. Il Capitolo 2 descrive il modello utilizzato per la definizione del bilancio idrologico, con la dettagliata spiegazione dei termini introdotti. Tale modello è stato tarato prima a scala di campo, sfruttando misure di portata e di variabili meteorologiche misurate sul campo prova di Lenta (Capitolo 3). Successivamente il modello è stato applicato

all'intero comprensorio, introducendo delle ipotesi che tengono conto dell'effetto scala dei vari fenomeni (Capitolo 4). Dopo un accurato esame delle tecniche di adattamento adottate nel comprensorio è stato quindi possibile calcolare il fabbisogno irriguo. I risultati di questa attività sono riportati nel Capitolo 5.

1.2 Il comprensorio irriguo del Centro Sesia

Il comprensorio irriguo del Centro Sesia è parte del più esteso comprensorio gestito dal Consorzio di Bonifica della Baraggia Biellese e Vercellese che copre una superficie di circa 25000 ha (Figura 1). L'area studiata è pari a 15494 ha, la maggior parte dei quali coltivati a riso mediante la pratica della sommersione continua. Il comprensorio è delimitato ad Est dal Fiume Sesia e a Ovest in parte dal Torrente Ostola e in parte dal Torrente Cervo, mentre a Nord raggiunge le pendici delle colline nei comuni di Gattinara, Roasio e Brusnengo e a Sud la confluenza del Torrente Cervo nel Fiume Sesia.

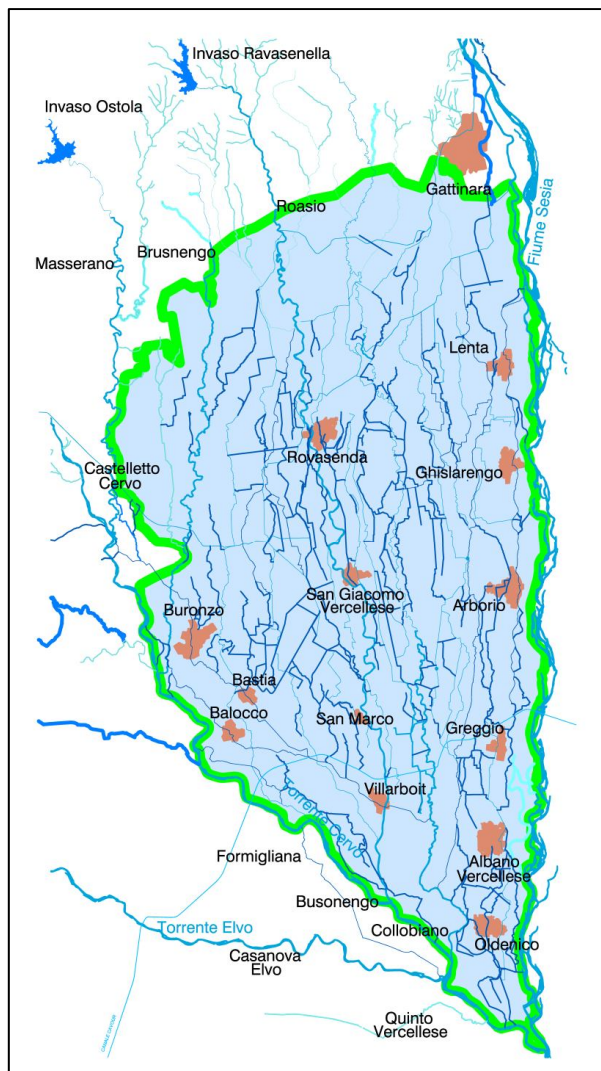


Fig. 1. Individuazione territoriale del comprensorio del Centro Sesia.

L'area agricola è occupata da tre principali colture: 12984 ha (84% del totale) sono coltivati a riso mediante la sommersione continua, 2432 ha (16% del totale) sono dedicati ad altri seminativi (cereali, mais, frumento e soia) e 78 ha (meno dell'1% del totale) sono coltivati a prato (Figura 2).

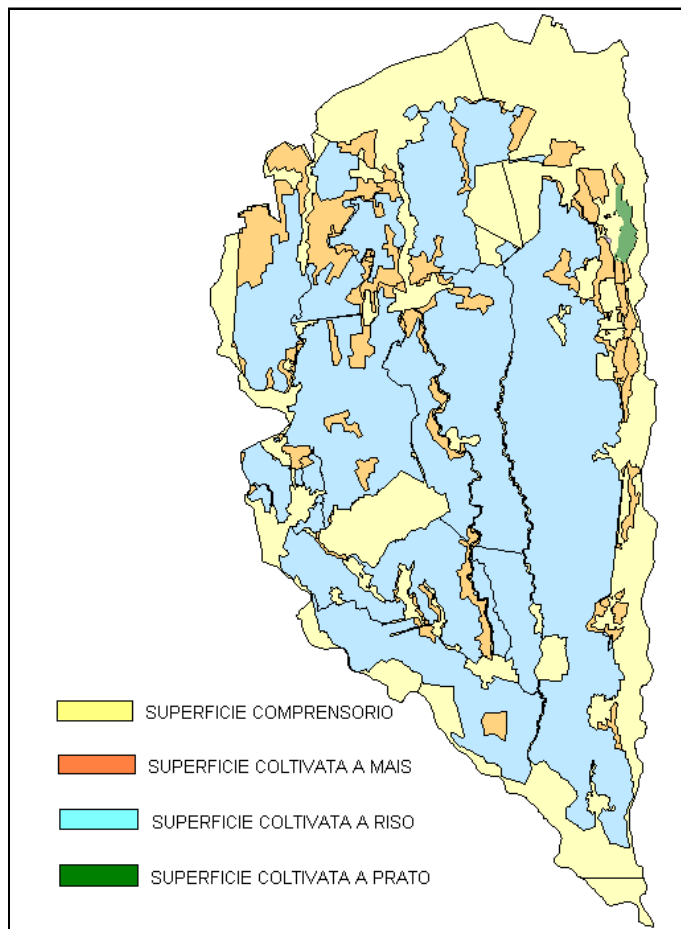


Fig. 2. Suddivisione della superficie del comprensorio secondo la tipologia di coltura adottata.

Il comprensorio del Centro Sesia si estende sulla Baraggia, l'area pedemontana che dalle Prealpi si sviluppa verso la pianura, procedendo da Nord – Ovest a Sud – Est. Il suolo in quest'area è generalmente contraddistinto da terreni molto compatti con preponderante presenza di componenti argilloso – limose che li rendono abbastanza impermeabili, caratteristica fondamentale per la coltivazione del riso. Le caratteristiche pedologiche e

idrauliche del terreno sono state determinate in 32 punti di misura, dislocati sul comprensorio come da Figura 3 e poi raggruppati in sette unità cartografiche, caratterizzate dall'avere un valore omogeneo di coefficiente di permeabilità idraulica a saturazione. Le prove di permeabilità sono state condotte con il metodo dell'infiltrometro a doppio cilindro in una campagna di misura condotta nel 2008 (Megale (2008)).

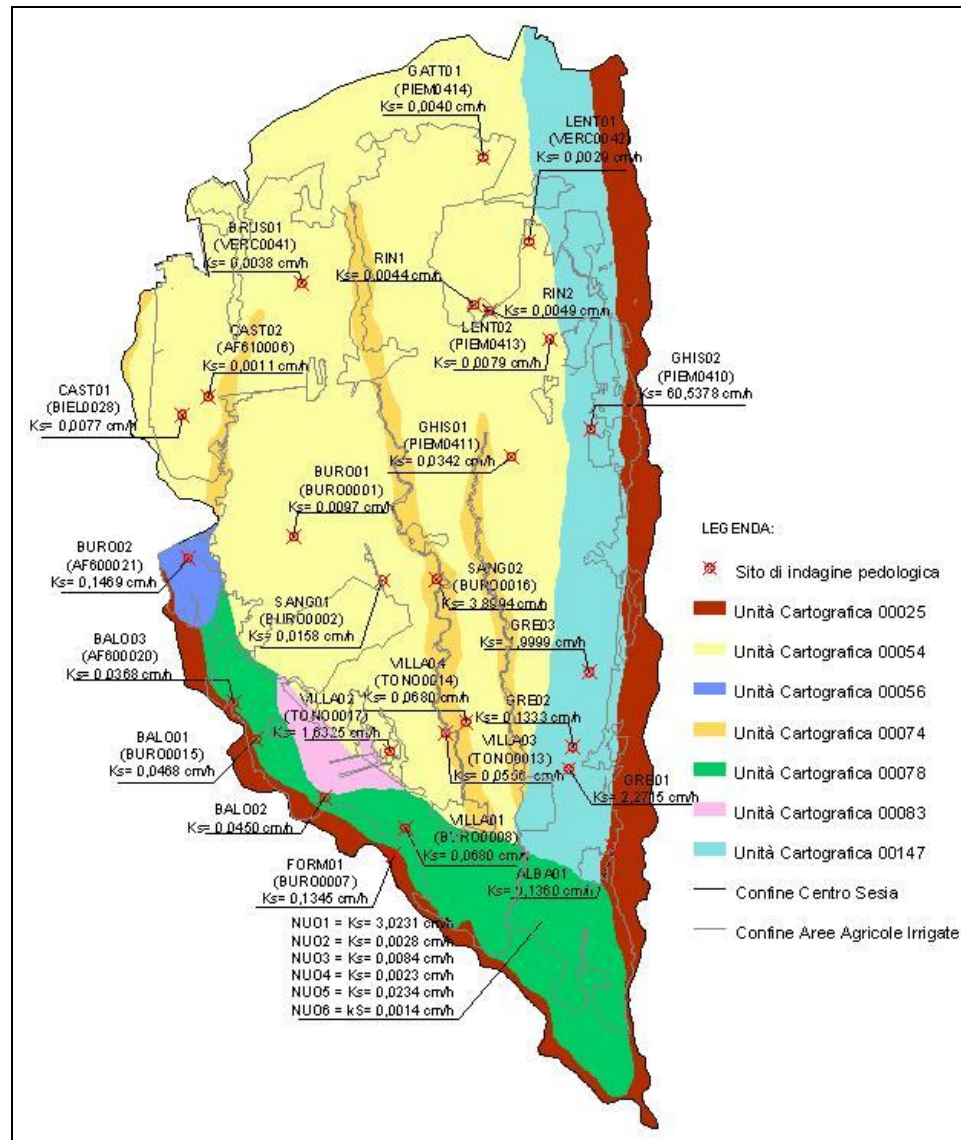


Fig. 3. Punti di campionamento per le prove di permeabilità.

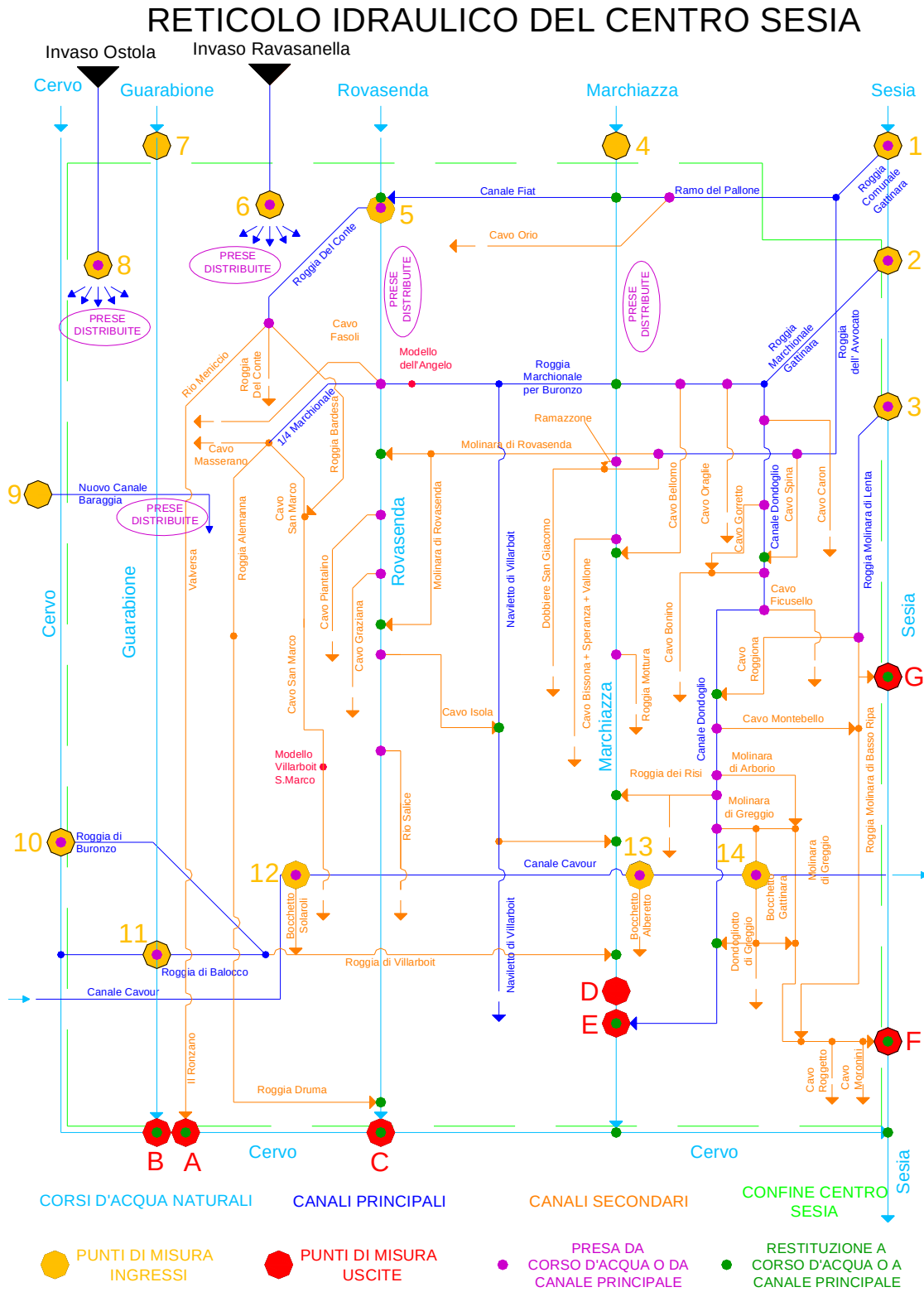
Le serie di misura delle variabili meteorologiche sono state ottenute da stazioni posizionate dentro e fuori l'area di interesse. A tal fine sono state selezionate le stazioni di Albano Vercellese, Masserano e Vercelli della rete gestita da ARPA Piemonte e quelle di Buronzo, Gattinara e Roasio appartenenti alla Rete Agrometeorologica del Piemonte – RAM (Regione Piemonte – Direzione Agricoltura – Settore Fitosanitario – Sezione Agrometeorologia).

Il comprensorio soddisfa il proprio fabbisogno prelevando dai corsi d'acqua principali le portate necessarie che, attraverso la fitta rete di canali e rogge, sono poi distribuite ai singoli appezzamenti. La difficoltà nell'approvvigionamento è insita nella variabilità stagionale delle portate fluviali che, nel periodo di maggiore richiesta, spesso non sono sufficienti a garantire i volumi necessari. La maggior parte dell'apporto idrico è prelevato dalle tre prese sul Fiume Sesia che servono la Roggia Comunale di Gattinara, la Roggia Marchionale di Gattinara e la Roggia Comunale di Lenta. L'altro corso d'acqua che delimita il comprensorio è il Torrente Cervo, che alimenta direttamente due rogge, la Roggia di Balocco e la Roggia di Buronzo. Un importante contributo è erogato dagli invasi sul Torrente Ostola nel comune di Masserano e sul Torrente Ravasanella nel comune di Roasio che servono l'area nord – occidentale del comprensorio. Oltre ai due corsi d'acqua che delimitano il territorio, il Fiume Sesia e il Torrente Cervo, sono poi presenti tre torrenti che attraversano longitudinalmente l'area da Nord a Sud: il Guarabione, il Rovasenda e il Marchiazza. Questi costituiscono principalmente vettori d'acqua che facilitano la distribuzione longitudinale e nella zona centro – meridionale dell'acqua nel comprensorio. L'area centro – orientale è invece servita dal Nuovo Canale della Baraggia, sul quale sono presenti anche tre prese che servono l'area a Sud: il bocchetto Solaroli, il bocchetto Alberetto e il bocchetto Gattinara. Le restituzioni del Rio Ronzano e dei Torrenti Guarabione, Rovasenda e Marchiazza in Cervo e quelle relative al Fiume Sesia costituiscono i flussi uscenti dal comprensorio. I nodi di ingresso e uscita sono riassunti nella Tabella 1, mentre la Figura 4 schematizza il reticolo idraulico del comprensorio.

Tab. 1. Nodi di misura delle portate in ingresso e in uscita dal comprensorio.

Afflusso	Nodo	Deflusso	Nodo
Roggia Comunale di Gattinara	1 (+)	Scarico Rio Ronzano	A (-)
Roggia Marchionale di Gattinara	2 (+)	Traversa Rio Salice scarico	C (-)
Roggia Comunale di Lenta	3 (+)	Traversa Mottura (Marchiazza)	D (-)
Traversa Pubbione	4 (+)	Scarico Rio Dondoglio a C.na Nuova	E (-)
Presa Roggia del Conte	5 (+)	Scarico canale Moronini in Sesia	F (-)
Invaso Ravasanella	6 (+)	Scarichi canale Furno, Tonotto, Roggia Comunale di Lenta in Sesia	G (-)
Torrente Guarabione Bocchetto Doria	7 (+)		
Invaso Ostola	8 (+)	Scarico Fiat in Rovasenda	5 (-)
Nuovo Canale della Baraggia	9 (+)		
Roggia di Balocco	10 (+)		
Roggia di Buronzo	11 (+)		
Bocchetto Solaroli	12 (+)		
Bocchetto Alberetto	13 (+)		
Bocchetto Gattinara	14 (+)		

Fig. 4. Reticolo idraulico del compressorio.



2 MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO DEL COMPRESORIO IRRIGUO

2.1 Descrizione del modello

Nell'irrigazione di un comprensorio coltivato a riso mediante la pratica della sommersione continua, il bilancio idrologico può essere definito, con riferimento ad un generico giorno i , dall'equazione:

$$Q_i(i) - Q_u(i) = ET(i) + F(i) - P(i) + \Delta V(i), \quad (1)$$

dove:

- Q_i = volumi in ingresso [mm];
- Q_u = volumi in uscita [mm];
- ET = perdite per evapotraspirazione [mm];
- F = perdite per filtrazione [mm];
- P = afflusso meteorico [mm];
- ΔV = variazione giornaliera dei volumi tecnici e di riempimento delle risaie [mm].

Al fine di distinguere i termini che compongono il bilancio, i volumi in ingresso Q_i sono considerati come

$$Q_i(i) = Q_e(i) + Q_{Tr}(i), \quad (2)$$

dove:

- Q_e = volume efficace;
- Q_{Tr} = volume in transito sul comprensorio.

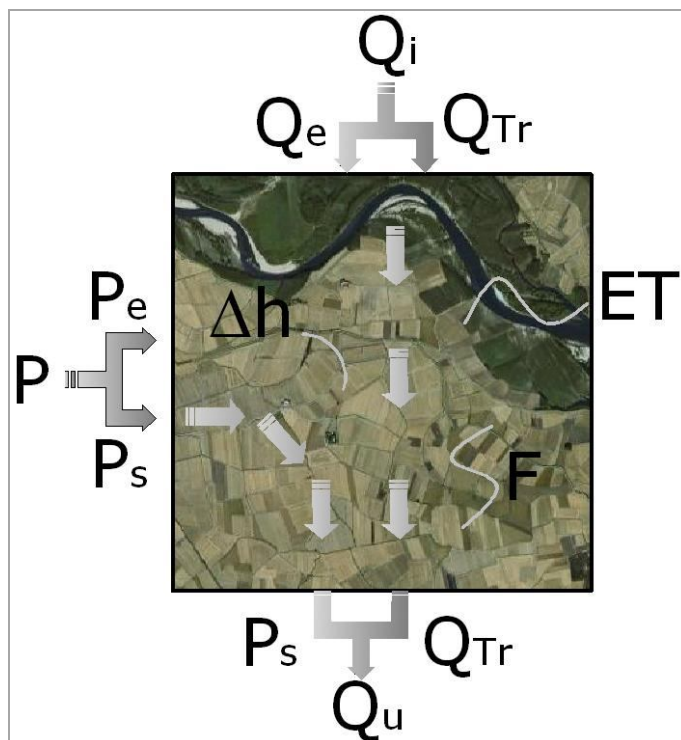


Fig. 5. Componenti del bilancio idrologico.

La componente Q_e è la quota in ingresso strettamente necessaria per soddisfare il fabbisogno irriguo del compensorio (Figura 5). I volumi in transito nei canali (Q_{Tr}) comprendono invece diverse quote, come ad esempio quelle che servono a sostenere le portate di funzionamento dei canali, i volumi che sono scaricati dai campi e non reimpiegati all'interno del compensorio, i volumi di reintegro necessari dopo i periodi di asciutta per i trattamenti al terreno, etc. I volumi di mantenimento delle portate nei canali sono quelli necessari al funzionamento della rete idraulica nei periodi di minore richiesta che seguono l'allagamento iniziale. Questi volumi transitano nella rete irrigua senza essere utilizzati per l'irrigazione. Pur essendo pratica comune che gli agricoltori situati nelle zone più a valle sfruttino l'acqua scaricata da quelli posizionati a monte, può succedere che le tempistiche non coincidano per cui una parte dei volumi venga persa in uscita dal compensorio. Anche gli apporti sotto forma di precipitazione non sono tutti utilizzabili, in quanto, raggiunto un livello ottimale per lo sviluppo delle piante, la pioggia in eccesso è scaricata nei canali. Le precipitazioni totali P sono quindi ripartite in volumi sfiorati P_s e efficaci P_e :

$$P(i) = P_s(i) + P_e(i). \quad (3)$$

I volumi di afflusso meteorico sono quindi utilizzati solo nella loro parte efficace (P_e) che entra in gioco nel soddisfacimento del fabbisogno irriguo del comprensorio e nelle fasi di riempimento delle camere di risaia. La parte in eccesso P_s non è immagazzinata nel comprensorio allorché sia già stato raggiunto in risaia il livello ottimale.

I volumi in transito sul comprensorio, sommati alla quota di precipitazione sfiorata dai campi, formano i volumi in uscita Q_u :

$$Q_u(i) = Q_{Tr}(i) + P_s(i). \quad (4)$$

Si deve poi tener conto che le differenze di volume ΔV che compaiono nell'equazione (1) sono composte dalla somma di

$$\Delta V(i) = \Delta V_R(i) + \Delta V_T(i), \quad (5)$$

dove: ΔV_R = volumi necessari al riempimento delle risaie;

ΔV_T = volumi persi per cause diverse dalla filtrazione ed evaporazione.

I volumi tecnici V_T comprendono:

- a) la quantità impiegata all'inizio della stagione irrigua per imbibire il terreno (V_{im});
- b) i volumi necessari al riempimento iniziale dei canali che, essendo asciutti nel periodo invernale, devono essere portati a regime per poter distribuire l'acqua ai campi (V_{rc});
- c) i volumi persi per filtrazione laterale nei canali e rogge non rivestiti (V_{pc}).

Mentre il primo termine è applicabile anche al bilancio del campo prova, gli altri sono caratteristici del bilancio sul comprensorio. Inoltre, i termini V_{im} e V_{rc} sono componenti necessarie alla messa in funzione della rete irrigua (V_{im}) e per la creazione di un battente sul terreno (V_{rc}) e pertanto sono perdite concentrate virtualmente nel primo giorno della stagione irrigua. I volumi persi per filtrazione laterale dai canali sono invece legati al transito

della portata e quindi sono presenti durante l'intera stagione, anche se non sono considerati variabili da un giorno all'altro. Si ha perciò:

$$\Delta V_T(0) = V_{im} + V_{rc} + \Delta V_{pc}(0) \quad (6)$$

$$\Delta V_T(i) = \Delta V_{pc}(i) \quad (6a)$$

Di seguito vengono dettagliatamente esaminate le singole componenti del bilancio idrologico, facendo riferimento alle equazioni dalla (1) alla (6).

2.2 Descrizione delle componenti

2.2.1 Volumi in ingresso - Q_i

In un generico sistema irriguo, la quantità di acqua che deve essere immessa per soddisfare il fabbisogno è pari alla frazione di esigenza idrica della coltivazione che non riesce a essere soddisfatta dalla pioggia. In un comprensorio risicolo soggetto alla pratica della sommersione permanente, a tale quantità occorre sommare quella necessaria al raggiungimento e al mantenimento di un adeguato battente idrico sul campo di risaia. La somma dei due valori costituisce il termine Q_e (volume efficace) dell'equazione (2). I volumi in ingresso pertanto assumeranno elevati valori nella fase di riempimento delle camere, tenendo conto che è necessario dapprima saturare il terreno e poi procedere con l'allagamento dei campi. Nel periodo estivo, invece, i volumi immessi diminuiscono, essendo introdotti solamente con funzione di mantenimento del livello e di compensazione delle perdite per filtrazione ed evapotraspirazione.

I volumi di transito Q_{Tr} , pur non essendo utilizzati nell'irrigazione, devono essere comunque prelevati dai corsi d'acqua principali e immessi nel reticolo idrografico del comprensorio per garantire il funzionamento del sistema.

2.2.2 Curva obiettivo dei livelli idrici - V_R

La caratteristica peculiare del bilancio idrologico di un comprensorio coltivato a riso è la necessità di considerare i volumi di riempimento delle camere di risaia. Infatti, sul comprensorio l'acqua non è utilizzata solo per mantenere il corretto contenuto di umidità nel suolo come avviene per la maggior parte delle colture irrigue (mais, cereali, frutta...), ma con la sommersione continua è anche necessario realizzare sul campo un accumulo di acqua di adeguato spessore e che garantisca le migliori condizioni di crescita delle piante. L'effetto dello spessore di acqua sul terreno è quello di un "volano termico", cioè di una massa che assorbe calore durante le ore diurne e lo rilascia durante le ore notturne, così da ridurre per le piantine la differenza di temperatura giorno - notte. Questo effetto è molto importante

nelle prime fasi del ciclo colturale, quando la differenza di temperatura tra il giorno e la notte è considerevole e la sensibilità della coltura è maggiore (AA.VV., 2008).

E' quindi necessario definire un livello idrico "obiettivo" (h_R) che rappresenti il battente d'acqua ottimale, cioè quello che andrebbe raggiunto attraverso le necessarie somministrazioni d'acqua.

Le usuali pratiche agricole prevedono l'alternarsi di fasi di sommersione dei campi e di fasi di asciutta. Preparato il terreno si procede con la sommersione iniziale, con circa 10 cm di battente, che viene effettuata prima della semina. Quando il riso ha sviluppato le prime foglie si procede con l'asciutta di radicamento. Nelle fasi successive il livello dell'acqua di sommersione segue progressivamente la crescita della coltura, fino alla seconda asciutta programmata per l'esecuzione dei trattamenti erbicidi e la concimazione. In seguito, il livello dell'acqua di sommersione viene mantenuto intorno ai 15 – 20 cm, mentre con il sopraggiungere delle alte temperature risulta utile aumentare la portata di ricircolo dell'acqua all'interno delle camere. In alcune situazioni è utile effettuare un'ulteriore fase di asciutta per favorire la crescita delle piante. La gestione irrigua si conclude con l'asciutta di raccolta che permette l'esecuzione delle operazioni in modo veloce, di massimizzare la produzione e la qualità del raccolto e di evitare di rovinare eccessivamente il terreno con il passaggio di mezzi pesanti (AA.VV., 2008). Osservando i livelli idrici a scala di singolo campo si possono individuare due fasi principali (Figura 6):

- 1) sommersione iniziale con pochi centimetri di acqua (10 cm) con durata dai 40 ai 60 giorni dall'inizio della stagione irrigua;
- 2) successivo innalzamento del livello idrico fino a 20 cm, mantenuto costante fino allo svuotamento finale delle camere durante il mese di settembre.

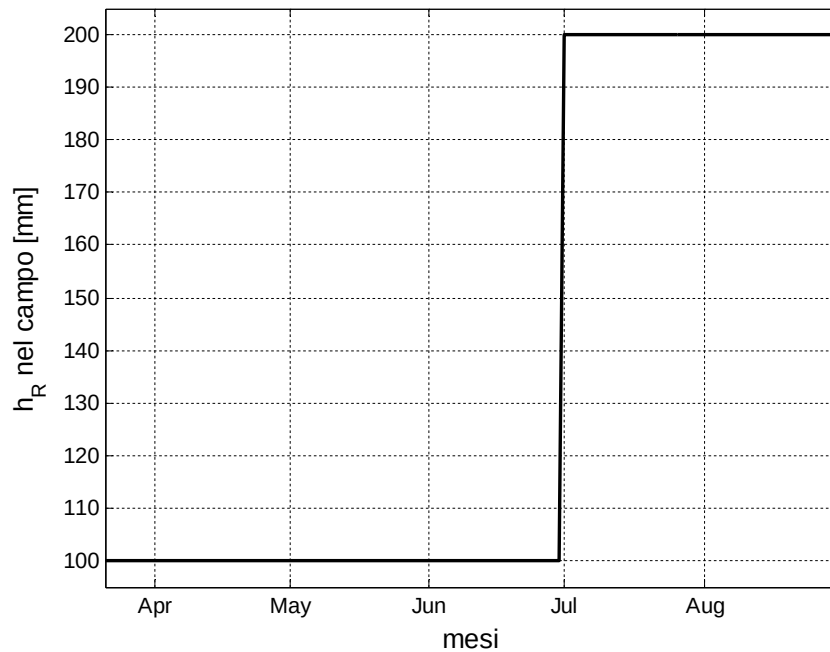


Fig. 6. Andamento tipico del livello idrico a scala di singolo campo.

Osservando le metodologie adottate dagli agricoltori del comprensorio si è notato che ognuno di essi adotta pratiche personalizzate in base all'esperienza, alla disponibilità idrica, alla tipologia di riso coltivata (alcuni agricoltori praticano la semina in sommersione, altri (pochi) in asciutta; durante i primi mesi della stagione irrigua alcune camere sono sommerse da pochi centimetri di acqua, mentre altre, anche adiacenti alle precedenti, sono asciutte; si può verificare la sommersione di alcune camere e contemporaneamente l'abbassamento del livello idrico in altre...) e la distribuzione dell'acqua segue le specifiche richieste di ogni risicoltore. Una gestione complessa del comprensorio non può essere studiata puntualmente, ma richiede una valutazione media globale. Nel modello qui sviluppato il livello idrico medio sul comprensorio è stato ottenuto moltiplicando la curva del battente tipico di un singolo campo per una curva di estensione dell'area allagata ogni giorno. Infatti, il comprensorio non è sempre totalmente sommerso, ma vi sono dei transitori in cui solo parte della superficie è allagata.

Per schematizzare l'area allagata ogni giorno è stato definito un coefficiente areale α compreso tra 0 e 1, variabile secondo cinque fasi (Figura 7):

- 1) fase transitoria iniziale di durata dai 20 ai 30 giorni, in cui si assiste ad un progressivo aumento della superficie allagata. La durata è variabile da stagione a stagione e tiene conto dei tempi tecnici di riempimento delle singole camere di risaia, dei tempi di transito dell'acqua da un appezzamento al successivo e delle tempistiche individuali di ogni agricoltore;
- 2) fase in cui tutta la superficie del comprensorio è sommersa; ha durata variabile tra i 20 e i 30 giorni;
- 3) seconda fase di transitorio in corrispondenza delle asciutte per i trattamenti al terreno e di ripristino del livello idrico necessario. Siccome ogni agricoltore adotta un numero differente di asciutte, con cadenze e durate differenti, si ipotizza che in questa fase la superficie sommersa del comprensorio vari tra il 50% e il 100% per un periodo di durata variabile tra i 20 e i 30 giorni;
- 4) in seguito alle asciutte, il comprensorio è nuovamente allagato nella sua totalità, durante la fase di sviluppo e maturazione delle piante;
- 5) a settembre le camere cominciano ad essere svuotate per la raccolta e quindi la superficie allagata del comprensorio diminuisce.

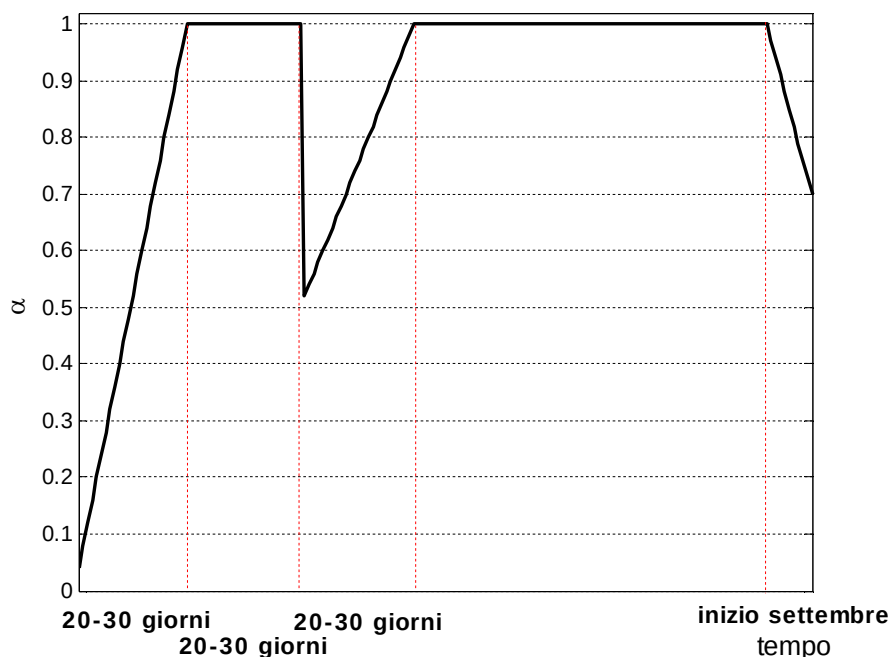


Fig. 7. Curva di estensione dell'area allagata ogni giorno - coefficiente areale α .

Definite quindi la curva dei livelli a scala di campo e l'area allagata quotidianamente è possibile ricavare l'andamento del livello medio sul comprensorio che rappresenta l'obiettivo che si vorrebbe raggiungere in condizioni ottimali di apporto idrico. Le altezze rappresentate nella curva obiettivo dei livelli idrici esprimono il termine V_R dell'equazione (5), cioè la quantità di acqua necessaria per il riempimento delle camere di risaia fino al livello ottimo per la crescita delle piante. Va sottolineato che integrando tale volume sulla stagione irrigua il risultato è nullo (il comprensorio è totalmente sommerso e poi completamente svuotato), ma una valutazione a scala temporale ridotta è necessaria per un'analisi dettagliata delle richieste irrigue. Inoltre, il livello rappresentato è quello medio, cioè si assume che alcuni risicoltori in un dato istante possano disporre di un livello idrico in risaia superiore a quello ipotizzato e contemporaneamente altri ne richiedano uno inferiore. La curva obiettivo dei livelli idrici a scala di comprensorio è definita quindi da cinque fasi (Figura 8):

- 1) durante il mese di aprile si assiste alla sommersione iniziale dei campi, durante la quale, in base alle richieste degli agricoltori, l'acqua è distribuita sul comprensorio fino a raggiungere mediamente in ogni camera un livello di 10 cm;
- 2) dalla fine di aprile a metà maggio tutto il comprensorio è sommerso con un livello di circa 10 cm;
- 3) da maggio a giugno solo parte della superficie del comprensorio è sommersa (trattamenti al terreno) e in seguito il livello è innalzato fino a raggiungere 20 cm;
- 4) nei mesi di luglio e agosto il livello è mantenuto costante a 20 cm;
- 5) a settembre inizia lo svuotamento delle camere di risaia.

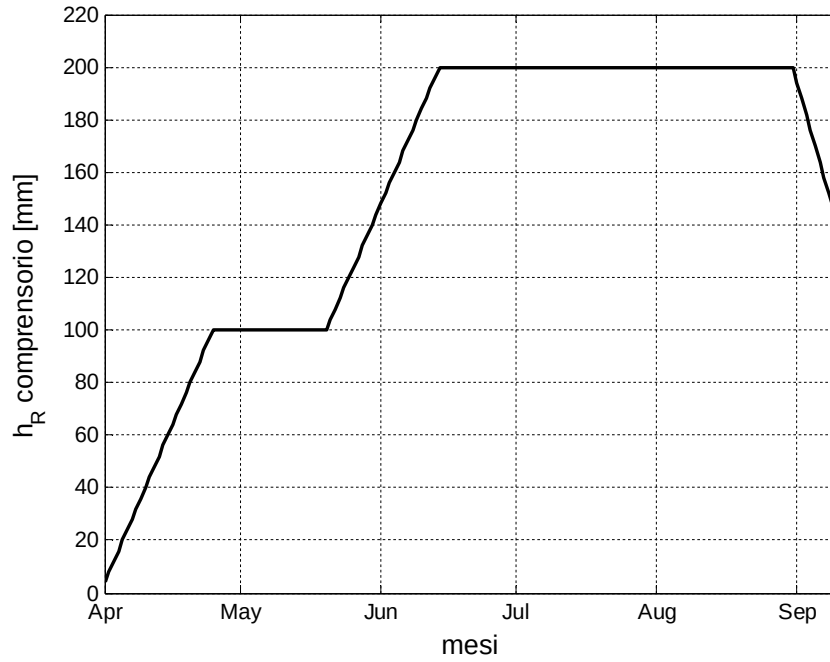


Fig. 8. Curva obiettivo dei livelli idrici a scala di comprensorio.

Facendo riferimento all'equazione (1) del bilancio idrologico, si possono individuare due fasi caratteristiche nella curva obiettivo dei livelli idrici:

- a) *fasi transitorie*, durante le quali il battente sul comprensorio aumenta (accumulo di acqua):

$$\Delta V_R(i) \neq 0 \quad \rightarrow \quad Q_i(i) - Q_u(i) = ET(i) + F(i) - P(i) + \Delta V_T(i) + \Delta V_R(i)$$

- b) *fasi stazionarie*, durante le quali il livello idrico è costante:

$$\Delta V_R(i) = 0 \quad \rightarrow \quad Q_i(i) - Q_u(i) = ET(i) + F(i) - P(i) + \Delta V_T(i)$$

2.2.3 Volumi tecnici – V_T

I volumi tecnici comprendono tre quote principali, qui di seguito descritte.

a) Saturazione dello strato di terreno agrario - V_{im}

Il terreno di risaia è caratterizzato da bassi valori di permeabilità idraulica satura e dalla presenza di uno strato praticamente impermeabile chiamato **soletta** a circa 10 - 15 cm di profondità dal piano campagna (P.C.). Lo strato di terreno compreso tra la soletta e il P.C. è indicato in seguito con il termine **“terreno agrario”**. Durante i mesi precedenti la stagione irrigua tale strato è lavorato (erpicoltura) con lo scopo di ripristinare la sua porosità, così da permettere la crescita delle radici. Questa operazione ha l'effetto di aumentare la porosità del terreno in superficie che può così raggiungere anche valori del 30 - 40%. Il terreno agrario deve essere preventivamente saturato per permettere il riempimento delle camere di risaia. La saturazione può avvenire ad opera delle precipitazioni dei mesi invernali e primaverili oppure con i volumi immessi durante la fase di sommersione iniziale, che determinano un livello di pelo libero coincidente con il P.C.

I volumi necessari alla fase di saturazione sono pertanto corrispondenti allo spessore dello strato moltiplicato per la porosità ed espressi in mm.

b) Volumi di riempimento dei canali - V_{rc}

Prima della stagione irrigua i canali di adduzione dell'acqua e le rogge di distribuzione sono asciutti. Nella fase di apertura delle bocche di adduzione è necessario tenere conto del volume necessario alla messa in funzione della circolazione idrica nella rete irrigua. Tale volume non è trascurabile dato che generalmente la rete di canali è molto sviluppata (decine di chilometri) ed i canali hanno sezioni tali da permettere il trasporto anche di grandi quantitativi di acqua.

c) Perdite per filtrazione laterale dei canali - V_{pc}

Una parte della quantità di acqua derivata e immessa nella rete di irrigazione è persa lungo i canali per filtrazione (nei canali in terra), per fughe in punti critici o per evaporazione (nei tratti rivestiti). Il valore teorico di acqua da somministrare alla coltura deve tenere in considerazione le perdite lungo la rete, la cui determinazione richiede la conoscenza delle caratteristiche geometriche (lunghezza dei canali, forma delle sezioni, ...) e la distribuzione del rivestimento nella rete di canali.

Una delle formule frequentemente adottate per la determinazione delle perdite di trasporto è quella di A. Davis e H. Wilson (vedere in Constantinidis (1970)):

$$p = 0.45 c \frac{x L}{4000000 + 3.650 \sqrt{v}} \sqrt[3]{d} \quad (7)$$

dove: p = perdite per filtrazione su una lunghezza L [m] del canale [m^3/s];
 d = profondità media dell'acqua nel canale [m];
 x = contorno bagnato medio [m];
 v = velocità media dell'acqua nel canale [m/s];
 c = coefficiente funzione del tipo di materiale di cui è costituito il canale (Tabella 2).

Tab. 2. Valori del coefficiente c della formula (7).

Caratteristiche canale	Coefficiente c
canali rivestiti in calcestruzzo	1
canali rivestiti con argille di 150 mm di spessore	4
canali rivestiti con materiale bituminoso di modesto spessore	5
canali rivestiti con argilla di 76 mm di spessore	8
canali rivestiti con uno strato sottile di argilla o di materiale bituminoso	10
canali in terra di natura argillosa	12
canali in terra di natura limosa	15
canali in terra di natura limoso-sabbioso	24
canali in terra di natura sabbioso-limosa	25
canali in terra di natura sabbiosa finissima	30
canali in terra di natura sabbiosa fine	40
canali in terra di natura sabbiosa media	50
canali in terra di natura sabbiosa grossolana	70

2.2.4 Evapotraspirazione – ET

Le perdite per evapotraspirazione sono calcolate con la formulazione di Penman – Monteith (FAO56) come in Allen, Pereira, Raes e Smith (1998) :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

dove:

- ET_0 = evapotraspirazione di riferimento [mm / d];
- Δ = pendenza della curva della pressione di vapore [kPa °C⁻¹];
- R_n = radiazione netta [MJ m⁻² d⁻¹];
- G = calore sensibile [MJ m⁻² d⁻¹];
- T = temperatura media dell'aria a 2 m di altezza [°C];
- u_2 = velocità del vento a 2 m di altezza [m s⁻¹];
- e_s = pressione di vapore alla saturazione [kPa];
- e_a = pressione di vapore attuale [kPa];
- $e_s - e_a$ = deficit della pressione di vapore alla saturazione [kPa];
- γ = costante psicrometrica [kPa °C⁻¹].

Per il calcolo di ET_0 sono stati utilizzati i dati meteorologici registrati dalle stazioni presenti sul comprensorio (ARPA: Albano Vercellese, Masserano, Vercelli – RAM: Buronzo, Gattinara e Roasio). Le variabili necessarie al calcolo sono la temperatura massima, minima e media dell'aria, l'umidità massima e minima dell'aria, la radiazione solare e la velocità del vento. Per i dettagli della procedura si veda Allen, Pereira, Raes e Smith (1998) e Claps (2007). L'usuale formulazione descritta dalla FAO è stata adattata al caso studio e in particolare si è tenuto conto della reale altezza delle piante di riso e dell'entità della radiazione assorbita con il riscaldamento dell'acqua in risaia.

a) Stadio di sviluppo del riso, descritto tramite il parametro LAI (Leaf Area Index)

La formulazione di Penman – Monteith suggerisce una coltura di riferimento con albedo pari a 0.23. Nei terreni coltivati a riso si presenta una prima fase in cui la superficie è ricoperta

solo da acqua, caratterizzata da un albedo decisamente inferiore a quello standard di Penman. In seguito, nei periodi in cui le piantine sono emerse, è necessario tenere in considerazione la copertura fogliare delle piante di riso. E' quindi stata introdotta una relazione di dipendenza dell'albedo dal LAI (Leaf Area Index) del riso.

Il LAI è dato dal rapporto tra la superficie fogliare e la superficie del suolo [$\text{m}^2 \text{ leaf} / \text{m}^2 \text{ soil}$] ed è un parametro fondamentale per lo studio della copertura vegetale. E' estremamente variabile nel tempo. Per il riso, esso può essere espresso dalla seguente relazione, tratta da Bouman et al (2001)

$$LAI = SLA \cdot W_{lv} \quad (9)$$

dove: LAI = Leaf Area Index [$\text{ha leaf} / \text{ha soil}$];
SLA = Specific Leaf Area [$\text{ha leaf} / \text{kg leaf}$];
 W_{lv} = Green Leaf Weight [$\text{kg leaf} / \text{ha soil}$].

Per la valutazione dello sviluppo del riso, la pianta è suddivisa in singole componenti ad ognuna delle quali è associato un determinato peso, come quello delle foglie attive (W_{lv}), delle foglie morte (W_{ld}), del fusto (W_{st}) e delle radici (W_{rt}). Il calcolo del LAI richiede il parametro W_{lv} , facendo il LAI stretto riferimento alla parte fotosinteticamente attiva della pianta (si veda ancora Bouman et al. (2001)).

Il parametro SLA è ricavato empiricamente con una relazione del tipo

$$SLA = a + b \cdot \exp(c \cdot DVS - d) \quad (10)$$

dove $a = 0.0024$; $b = 0.0025$; $c = -4.5$; $d = 0.14$ e DVS (Development Stages) rappresenta il grado di sviluppo delle piantine. In particolare DVS è messo in relazione diretta con il trascorrere del tempo usando un indice adimensionalizzato rispetto alla metà del periodo di vita della coltura; tale parametro assume quindi valori compresi tra 0 e 2. In alternativa alla relazione (10) si possono utilizzare valori tabellari come quelli rappresentati in Tabella 3 (Bouman et al (2001)).

Tab. 3. Relazione tra DVS e SLA tratto da Bouman et al (2001).

DVS	SLA
0	0.0045
0.16	0.0045
0.33	0.0028
0.79	0.0024
1.00	0.0024
2.00	0.0024

I valori di DVS indicano (come riportato in Bouman et al (2001)):

DVS = 0 → semina

DVS = 0.4 → fase vegetativa iniziale (dalla semina all'inizio dell'attività fotosintetica)

DVS = 0.65 → fase di attività fotosintetica (dalla fine della fase vegetativa iniziale
fino all'inizio della fase di sviluppo delle pannocchie)

DVS = 1 → dallo sviluppo delle pannocchie al 50% della spigatura

DVS = 2 → dal 50% della spigatura alla maturazione

Anche i valori di W_{lv} variano in funzione del DVS, secondo la curva rappresentata in Figura 9 (tratta sempre da Bouman et al (2001)).

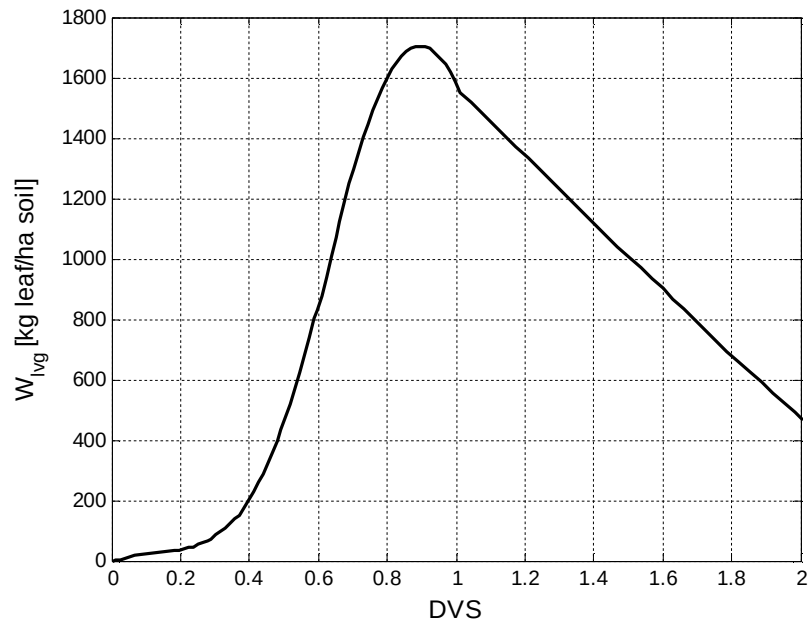


Fig. 9. Curva del Green Leaf Weight in funzione del Development Stages.

E' quindi possibile definire l'andamento del LAI in funzione dello stadio di sviluppo delle piantine (Figura 10), usando le relazioni (9) e (10).

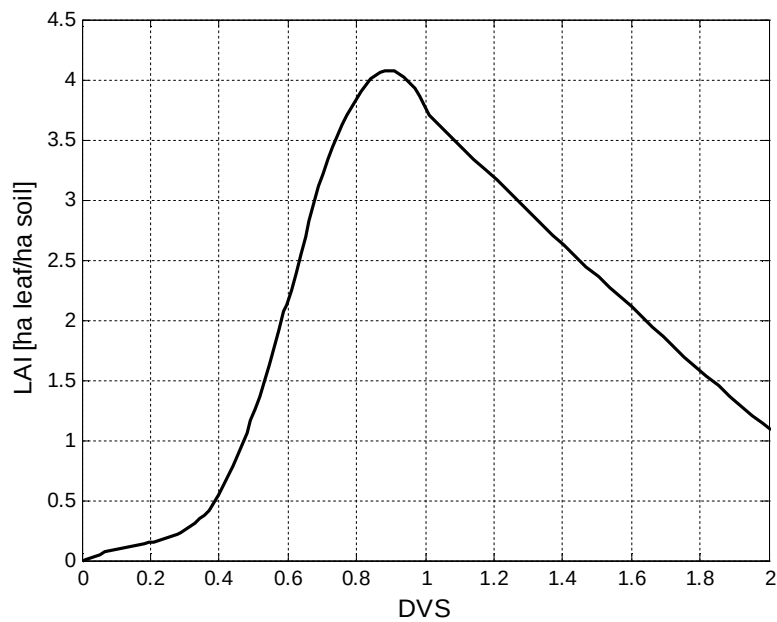


Fig. 10. Curva del Leaf Area Index in funzione del Development Stages.

Il coefficiente di riflessione totale RF utilizzato per definire la quota parte di radiazione netta relativa alle piccole lunghezze d'onda $R_{ns} = (1 - RF) RAD$ è definito come (si veda sempre Bouman et al (2001)):

$$RF = \underbrace{RFS \cdot \exp(-0.5 LAI)}_{\text{terreno}} + \underbrace{ALB \cdot (1 - \exp(-0.5 LAI))}_{\text{vegetazione}} \quad (11)$$

dove: RAD = radiazione solare misurata dalle stazioni meteorologiche;
 RFS = coefficiente di riflessione del terreno = 0.05;
 ALB = coefficiente di riflessione della vegetazione = 0.23;
 LAI = Leaf Area Index [ha leaf / ha soil].

Seguendo la gestione irrigua del comprensorio si possono quindi individuare due fasi principali (Figure 11 e 12):

- o 1 aprile – 30 aprile: la superficie del comprensorio è coperta di acqua e non vi è l'emergenza delle piantine; il coefficiente di riflessione totale è pari a quello dell'acqua ($RFS = 0.05$) ed è nullo il contributo della vegetazione ($LAI = 0$);
- o 1 maggio – 10 settembre: le piantine cominciano a emergere dall'acqua e a crescere; il LAI cresce fino a raggiungere il valore massimo all'inizio di luglio e poi decresce; sono presenti entrambi i contributi alla riflessione.

In particolare si assume che sia $DVS = 0$ per il 1 aprile e $DVS = 2$ per il 10 settembre.

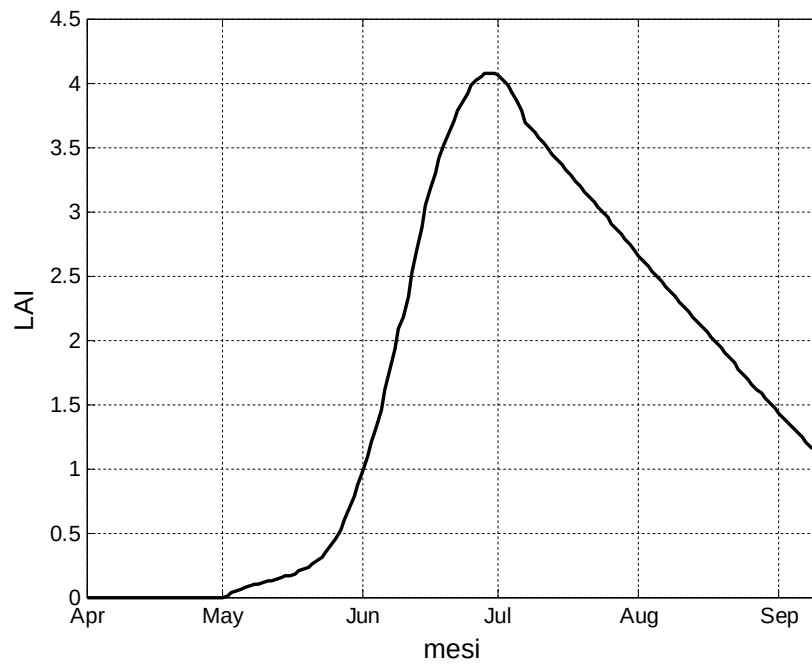


Fig. 11. Leaf Area Index lungo la stagione irrigua.

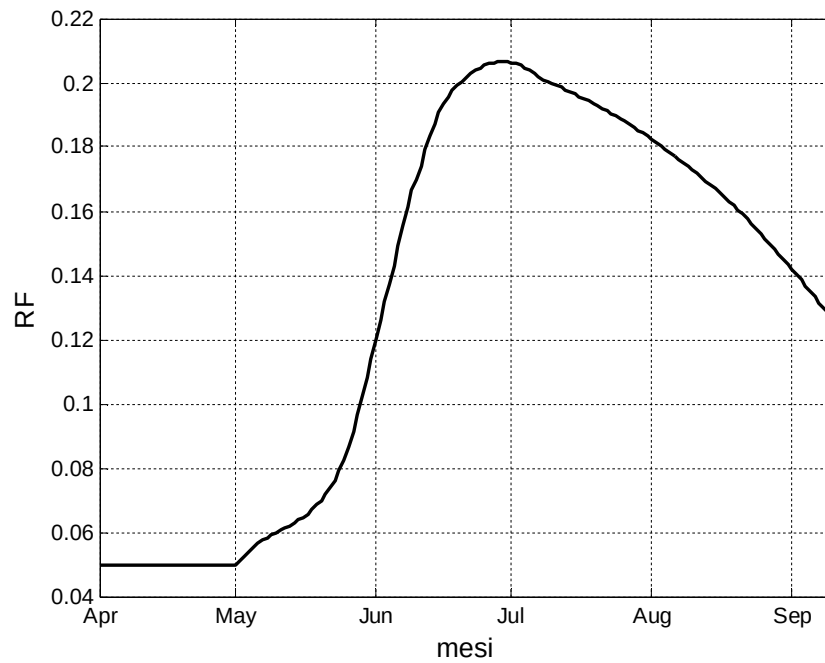


Fig. 12. Coefficiente di riflessione totale lungo la stagione irrigua.

b) Calore sensibile assorbito dalla massa di acqua presente nelle risaie

L'acqua presente nelle camere di risaia è mantenuta in leggero movimento con portate di mantenimento, introdotte per bilanciare le perdite evapotraspirative e per filtrazione e fondamentali per limitare lo sviluppo di alghe ed erbe infestanti. L'acqua immessa nelle camere, proveniente prevalentemente da canali irrigui e fiumi, è piuttosto fredda (circa 20°C nella stagione estiva), ma si riscalda durante la sua permanenza in risaia, fino a raggiungere temperature dell'ordine di 30°C. La quota di calore assorbita dall'acqua per innalzare la propria temperatura e quindi non direttamente utilizzata per l'evapotraspirazione non può essere trascurata. Questa entità di **calore sensibile G**, si può determinare come

$$G = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (12)$$

dove: c = calore specifico dell'acqua = 4186 J kg⁻¹ °C⁻¹;
 m = massa di acqua immessa nel comprensorio (somma dei volumi influenti e delle precipitazioni) [kg];
 ΔT = differenza di temperatura tra l'acqua dei canali irrigui e l'acqua presente nelle camere [°C].

Il calore sensibile assorbito giornalmente G va tenuto in conto esplicitamente nella relazione (8).

c) Coefficiente colturale

I valori di evapotraspirazione ottenuti dalla formulazione di Penman - Monteith sono detti "di riferimento" (ET_0) e rappresentano il potere evaporativo in atmosfera di una coltura erbacea standard. Introducendo un coefficiente colturale K_c è possibile ricavare l'evapotraspirazione reale ET_c che può così riferirsi a una specifica coltura:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (13)$$

Il coefficiente colturale K_c varia anche in funzione dello stadio fenologico.

I valori utilizzati in questo studio sono stati determinati da Allavena (1995) attraverso numerose campagne sperimentali in varie località del territorio biellese e vercellese e sono riportati nella Tabella 4.

Tab. 4. Coefficienti colturali per il calcolo dell'evapotraspirazione ET_c .

Mese	K_c
Aprile	0.90
Maggio	0.90
Giugno	0.90
Luglio	1.15
Agosto	1.15
Settembre	0.90

d) Applicazione dell'evapotraspirazione sulla sola superficie sommersa

Essendo l'evapotraspirazione legata alla presenza dell'acqua sulla superficie del comprensorio, si assume che tali perdite seguano le fasi relative al primo allagamento secondo la curva di estensione dell'area allagata. In questo modo l'evapotraspirazione è applicata alla percentuale irrigata durante il primo transitorio e sull'intera superficie del comprensorio successivamente al primo verificarsi della condizione $\alpha = 1$.

2.2.5 Filtrazione – F

Le perdite per filtrazione sono calcolate in base alla conoscenza del coefficiente di permeabilità idraulica satura, misurato in campo attraverso campagne pedologiche effettuate tramite l'utilizzo del sistema a doppio cilindro, come riportato in Laruccia (2008). Nella stima di tali perdite occorre tenere in considerazione la variabilità del battente idraulico sul piano campagna e la riduzione lungo la stagione irrigua del coefficiente di permeabilità, come di seguito dettagliato.

a) Variabilità della filtrazione in funzione del battente idraulico

La legge di Darcy permette di calcolare la velocità di un flusso transitante in una sezione di spessore S di un mezzo caratterizzato da un generico valore di permeabilità idraulica satura K , soggetto a una differenza di carico ΔH :

$$U = K \frac{\Delta H}{S}. \quad (14)$$

Il coefficiente di permeabilità idraulica satura è misurato in campo mediante il sistema a doppio cilindro. Due cilindri concentrici vengono infissi nel terreno ad una profondità di 10 - 12 cm: l'anello esterno ha il compito di contenere l'espansione laterale dell'acqua, mentre quello interno delimita il terreno destinato alla prova di filtrazione. Attraverso una bottiglia di Mariotte, il livello del cilindro interno è mantenuto costante, cioè il volume di acqua che filtra nel terreno è rimpiazzato da un uguale quantitativo richiamato da un serbatoio a tenuta. Periodicamente sono effettuate delle letture del livello di acqua in questo serbatoio, tramite le quali, noto il diametro interno del serbatoio e il diametro dell'anello interno, è possibile ricavare il valore di permeabilità satura del terreno. Quando la velocità di filtrazione è costante, cioè sono state raggiunte le condizioni stazionarie (individuate da 3 letture consecutive uguali o molto simili), si può assumere che questa sia coincidente con la conducibilità idraulica satura, indicata con K_s (valore misurato in campo).

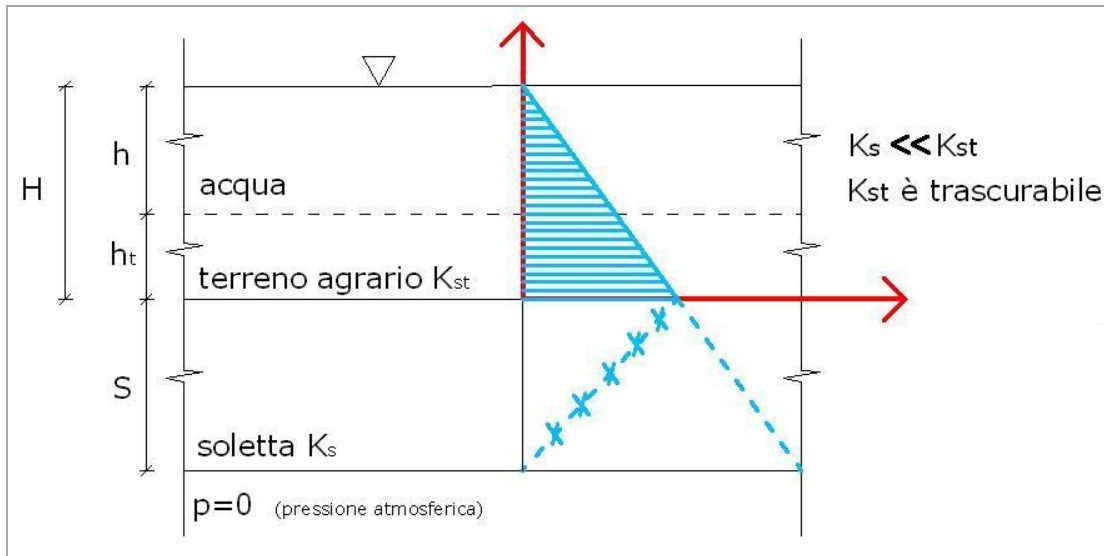


Fig. 13. Schema della filtrazione in un terreno di risaia.

Per ricavare l'andamento dell'altezza di acqua in funzione del tempo è necessario considerare l'equazione di continuità accoppiata alla legge di Darcy

$$\begin{cases} U = K \frac{H + S}{S} \\ \frac{dH}{dt} + U = 0 \end{cases} \quad (15)$$

dove:

- U = velocità di filtrazione [cm / h];
- K = conducibilità idraulica satura [cm / h];
- H = altezza di acqua sul campo (h) + altezza di terreno agricolo (h_t) [mm];
- S = spessore della soletta [mm].

Sulla base della legge di Darcy si può allora scrivere che

$$U = K_s = K \frac{h_m + S}{S}, \quad (16)$$

dove: h_m = carico idraulico utilizzato durante la prova di permeabilità [mm] = 50 mm.

Il valore di **permeabilità idraulica reale K** quindi vale

$$K = K_s \frac{S}{h_m + S} \quad (17)$$

La filtrazione $\frac{dH}{dt}$ è quindi definita come

$$\frac{dH}{dt} = K \frac{H + S}{S} = K_s \frac{H + S}{h_m + S} \quad (18)$$

dove è evidenziata la dipendenza funzionale della velocità di filtrazione dal battente idraulico H sulla soletta, come rappresentato in Figura 14 ($H = h + h_t$, dove h = altezza di acqua sul campo e h_t = altezza di terreno agricolo (vedi Figura 13).

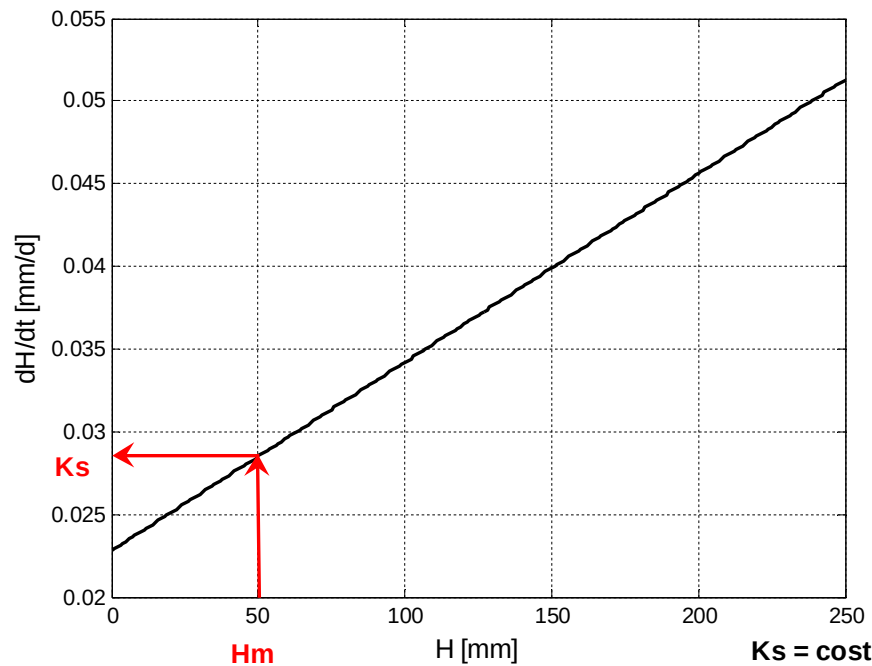


Fig. 14. Andamento della velocità di filtrazione in funzione del battente idraulico per K_s costante (in questo caso $K_s = 0.0285 \text{ cm/h}$).

b) Riduzione nel tempo del coefficiente di permeabilità idraulica satura del terreno

Per effetto dei lunghi periodi di sommersione l'acqua modifica le caratteristiche fisiche del terreno, provocandone una sostanziale distruzione della struttura. Gli aggregati di maggiori dimensioni sono rotti perché con la presenza dell'acqua aumenta la pressione nei pori, parte della sostanza organica si dissolve e gli agenti leganti si solubilizzano, cosa che provoca il depositarsi delle argille e delle particelle organiche. Questi effetti sono tanto più pronunciati quanto minore è il contenuto iniziale di sostanza organica e quante più lavorazioni sono eseguite sul terreno già saturo. Inoltre, più si considera il suolo in profondità, più si notano le modificazioni prodotte dalla sommersione (AA.VV., 2008). La permeabilità idraulica del terreno pertanto non rimane costante lungo l'intera stagione irrigua, ma, a causa del susseguirsi di riempimenti e svuotamenti delle camere di risaia, si registra una progressiva diminuzione del coefficiente di permeabilità idraulica satura del terreno.

c) Applicazione della filtrazione sulla sola superficie sommersa

Le perdite per filtrazione sono applicate sulla sola area sommersa, secondo quanto definito dalla curva di estensione dell'area allagata. Si trascurano quindi le perdite determinatesi per livello idrico pari o inferiore alla quota del piano campagna.

2.2.6 Volumi in uscita – Q_u

I volumi in uscita dal compensorio Q_u sono dati dalla somma dei volumi di transito Q_{Tr} e dalla frazione di precipitazione che è sfiorata dai campi P_s (Equazione (4)). Infatti, secondo l'usuale pratica agricola gli scaricatori sono attivati per eliminare la precipitazione in eccesso oppure durante le fasi di svuotamento delle camere per effettuare i trattamenti, con lo scopo di ridurre i tempi di asciugatura dei campi. A piccola scala spaziale le aperture per le asciutte sono particolarmente evidenti, mentre a scala di compensorio, tenendo conto che l'acqua scaricata da un campo è generalmente impiegata in quelli a valle, gli effetti legati agli scaricamenti per i trattamenti non sono così facilmente individuabili. Le serie di valori di portate in uscita presentano invece dei picchi in corrispondenza di eventi meteorici particolarmente intensi, legati alla frazione di precipitazione sfiorata dai campi perché in eccesso rispetto al livello ottimale. Inoltre, si nota la costante presenza di un valore di base, riconducibile al transito continuo di una portata nella rete irrigua, necessaria al mantenimento in funzione dei canali anche nei periodi di minore richiesta idrica.

2.2.7 Precipitazioni - P

Nella conduzione irrigua del compensorio le precipitazioni sono soggette ad una particolare gestione. Durante le fasi transitorie, in cui si sta realizzando un accumulo di acqua nei campi, l'intervento di un evento di pioggia può essere vantaggioso per accelerare le operazioni di riempimento delle camere: tutta la precipitazione può essere immagazzinata, così da poter contemporaneamente ridurre il flusso delle portate in ingresso. Quando invece il livello deve essere mantenuto costante, il volume in eccesso proveniente da un evento di precipitazione è immediatamente scaricato nei canali (pioggia sfiorata P_s). In corrispondenza di questa situazione si notano picchi di portate in uscita che sono rilevati dagli strumenti di misura.

Prende il nome di pioggia efficace P_e (Maione, Moisello (1993)) il termine che comprende i volumi meteorici immagazzinati nel campo di risaia che contribuiscono al raggiungimento e al mantenimento di un adeguato tirante idrico.

L'individuazione della quota di precipitazione sfiorata P_s e della frazione di pioggia efficace P_e non è di semplice definizione. Tenendo conto però della particolare gestione irrigua del comprensorio risicolo, è possibile stimare la quota P_s e ricavare la frazione P_e per differenza dal valore totale, utilizzando le misure dei volumi in uscita dai campi prova e dall'intero comprensorio per risalire alle capacità di immagazzinamento della precipitazione in diversi momenti della stagione. Tale capacità potrà essere assegnata attraverso la definizione di un incremento di livello Δh che sia accettabile quale superamento dei livelli obiettivo rappresentati in Figura 8.

In linea generale, è possibile individuare tre casi:

- a) $P_s(i) = 0 \Rightarrow P(i) = P_e(i)$: non c'è precipitazione sfiorata, ma tutta l'acqua proveniente da afflusso meteorico è usata per creare volume nei campi e contribuisce al soddisfacimento del fabbisogno irriguo. Si considera quindi che le risaie abbiano sufficiente spazio per assorbire la totalità del volume di precipitazione;
- b) $P_s(i) = P(i) \Rightarrow P_e(i) = 0$: tutto il volume proveniente dalle precipitazioni è sfiorato e quindi non è né immagazzinato nei campi né contribuisce al soddisfacimento del fabbisogno irriguo. In questo caso, si considera che le risaie siano mantenute sempre alla massima capacità di invaso e non possano assorbire ulteriore volume;
- c) $0 < P_s(i) < P(i) \Rightarrow P(i) = P_s(i) + P_e(i)$: solo una parte delle precipitazioni è sfiorata, mentre la quota efficace entra in gioco nel soddisfacimento del fabbisogno. Le risaie sono in grado di assorbire parte del volume proveniente dall'afflusso meteorico.

3 TARATURA DEL MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI CAMPO PROVA

3.1 Premessa

La disponibilità di misure continue e affidabili è fondamentale per una corretta impostazione del bilancio idrologico. Nondimeno, tali misure sono di difficile reperimento allorché si sia interessati a lavorare a scala di comprensorio. Infatti, essendo le aree coltivate molto vaste, le dinamiche irrigue molto complesse e le interconnessioni con l'ambiente circostante molto numerose e difficilmente controllabili, è spesso molto difficile disporre di dati affidabili con cui tarare i modelli di bilancio. E' dunque molto importante, per poter verificare il funzionamento e tarare i parametri del modello di bilancio presentato nel presente paragrafo, disporre di un campo prova di piccola scala in cui poter misurare le variabili di interesse con buona risoluzione spaziale e temporale.

A tal fine nel 2008 è stato appositamente attrezzato un campo prova dettagliatamente descritto nell'appendice A. Il campo prova è stato realizzato in modo da misurare a) la totalità delle portate in ingresso e in uscita, b) le variabili meteorologiche e le precipitazioni attraverso l'uso di una stazione di misura, e c) le caratteristiche del terreno conducendo alcuni campionamenti specificamente predisposti.

L'appendice A presenta una dettagliata descrizione dei due campi prova predisposti sul comprensorio e delle campagne di misura realizzate durante la stagione irrigua 2008.

Il campo prova utilizzato per la taratura del modello è quello realizzato nel comune di Lenta, scelto per la sua semplicità geometrica (il campo è quadrato) e per la maggiore facilità di controllo dei volumi immessi e uscenti e delle condizioni al contorno. In questo campo ci sono otto punti di misura delle portate (Figura 15), di cui uno localizzato all'ingresso principale (M1), due alle uscite continue (attive per l'intera stagione irrigua – M7 e M8), tre alle uscite stagionali (attive solo durante lo svuotamento delle camere per accelerare le operazioni – M2, M5 e M6) e due nella camera di indagine, uno all'ingresso (M3) e uno all'uscita (M4). La stazione meteorologica rileva la temperatura e l'umidità dell'aria, la velocità del vento, la radiazione solare incidente e le precipitazioni. Le caratteristiche del

terreno, in particolare la permeabilità idraulica satura, sono state direttamente ricavate in due punti di misura sul campo di risaia (Figura 16), il quale misura, al netto, 23.53 ha.

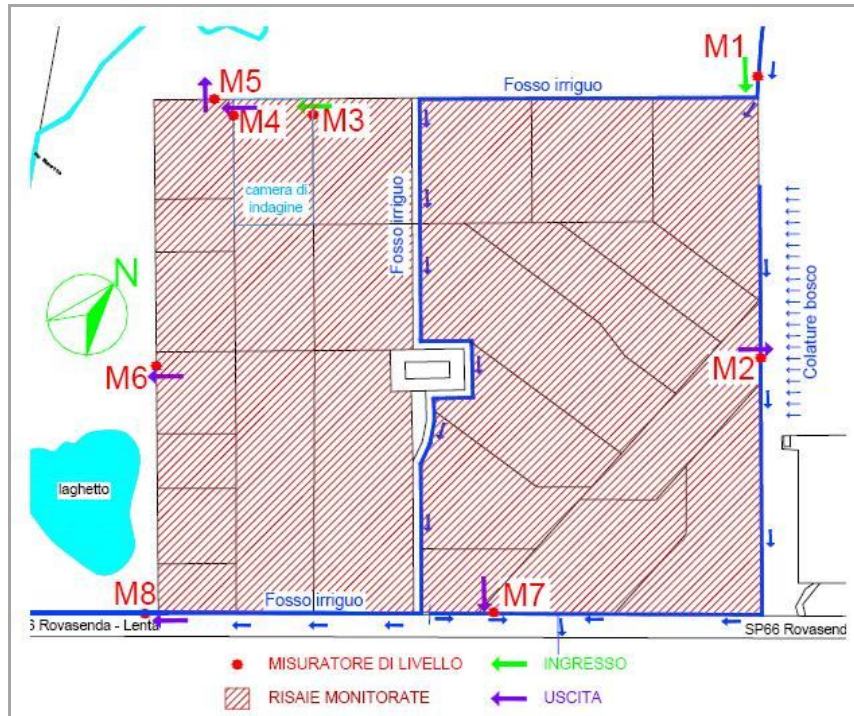


Fig. 15. Campo prova di Lenta: disposizione dei misuratori di livello.

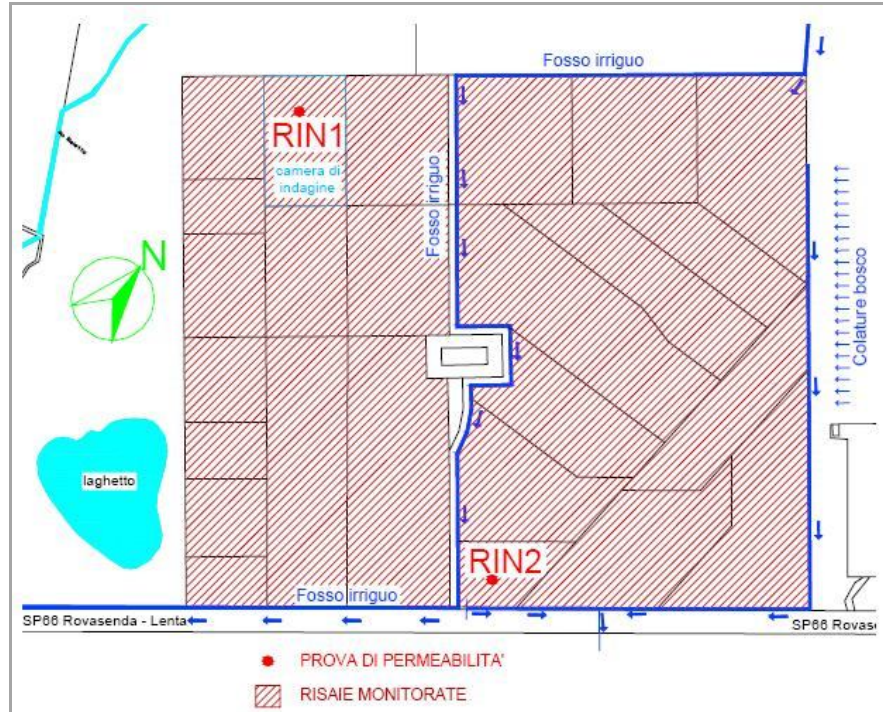


Fig. 16. Campo prova di Lenta: disposizione dei punti di rilievo delle caratteristiche pedologiche e della determinazione della permeabilità idraulica satura.

Il modello del bilancio idrologico utilizza quindi le seguenti grandezze, misurate durante la stagione irrigua 2008 (22 marzo – 1 settembre):

- serie giornaliere dei volumi in ingresso ai punti di misura (M1);
- serie giornaliere dei volumi in uscita ai punti di misura (M2, M5, M6, M7, M8);
- serie giornaliere delle variabili meteorologiche;
- coefficienti di permeabilità idraulica satura misurati in campo prima della stagione irrigua 2008;

Le variabili del bilancio idrologico sono espresse in termini di altezze (mm) sul campo prova, per facilità di congruenza tra gli apporti e le perdite naturali.

E' importante osservare che il modello che si adotta in questa fase è di tipo diagnostico, in quanto tutte le grandezze utilizzate sono misurate ed è possibile verificare l'altezza idrica teorica con quella che si ha sul campo. In particolare, si valuterà se le portate introdotte e

quelle scaricate, tenendo conto degli apporti meteorici e delle perdite naturali (filtrazione ed evapotraspirazione), determinano giorno dopo giorno un battente sufficientemente prossimo a quello effettivamente osservato.

A questo fine, alcuni dei parametri introdotti nel calcolo dell'evapotraspirazione e della filtrazione necessitano di una specifica taratura, come di seguito dettagliato.

3.2 Taratura dei parametri per il calcolo dell'evapotraspirazione

Le perdite per evapotraspirazione sono stimate con la formulazione di Penman – Monteith (equazione (8)), tenendo in considerazione lo stadio di sviluppo delle piante di riso, il calore sensibile assorbito dalla massa di acqua in risaia e il coefficiente colturale K_c .

Lo stadio di sviluppo delle piante di riso è descritto attraverso il parametro LAI che segue l'andamento riportato in Figura 11 ed è introdotto nella relazione (11) per il calcolo del coefficiente di riflessione (Figura 12) utilizzato nella formulazione di Penman – Monteith. Il coefficiente colturale K_c permette di riferire l'evapotraspirazione alla specifica coltura, secondo i valori riportati in Tabella 4. Per il calcolo della quantità di calore assorbita dal volume di acqua presente sul terreno è stata realizzata un'apposita campagna di misure della temperatura nei canali adduttori e nei fossi che attraversano longitudinalmente e trasversalmente il campo e nelle camere di risaia (Figura 17). Tali misure (riportate in Tabella 5) sono state eseguite il giorno 1 luglio 2009 nelle ore centrali del giorno, in condizioni di cielo sereno e con temperatura dell'aria di 33°C. Come si nota dalla Tabella 5, la differenza di temperatura tra l'acqua nei canali e quella nelle risaie è di circa 5 - 10°C. Pertanto nel calcolo del calore sensibile si considera un $\Delta T = 7^\circ\text{C}$.

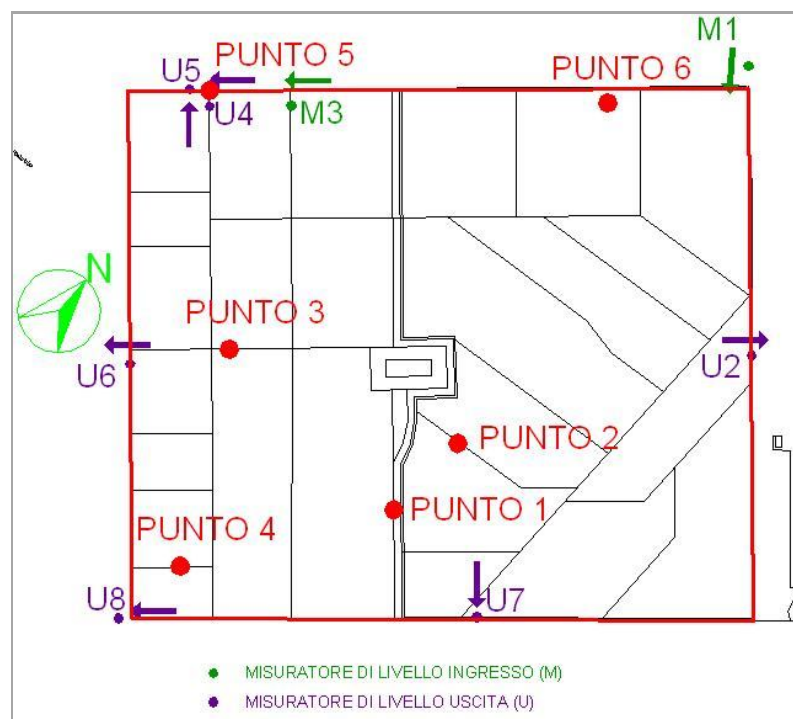
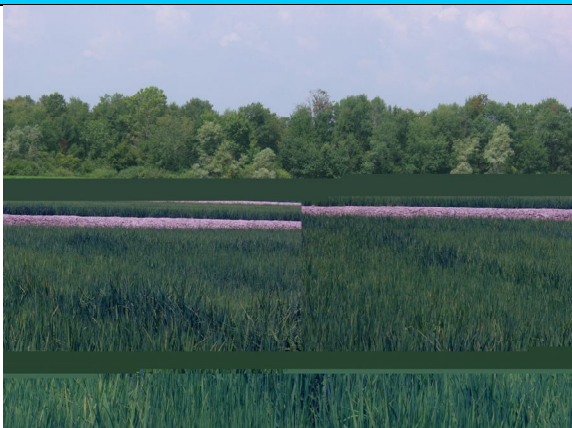
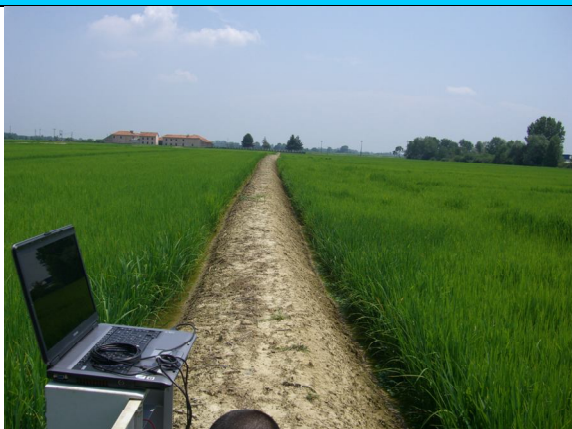


Fig. 17. Disposizione dei punti di misura della temperatura dell'acqua nei fossi e nelle risaie

Tab. 5. Risultati della campagna di misure della temperatura dell'acqua nei fossi e nelle risaie, effettuata al campo prova di Lenta il 1 luglio 2009, in condizioni di cielo sereno.

h acqua		PUNTO 1: vicino al piezometro P7
13 cm		
T acqua risaia		
30.3°C		
T acqua fosso		
24°C		
h acqua		PUNTO 2: scolo tra due camere
≈ 15 cm		
T acqua risaia		
29.9°C		
T acqua fosso		
24°C		
h acqua		PUNTO 3: camera che scola in M6
13 cm		
T acqua risaia		
27.7°C		
T acqua fosso		
24°C		

h acqua		
14 cm		
T acqua risaia		
30.7°C		
T acqua fosso		
24°C	PUNTO 4: camera lontana da misuratori	
h acqua		
12 cm		
T acqua risaia		
30.2°C		
T acqua fosso		
24°C	PUNTO 5: vicino arginello tra M4 e M5	
h acqua		
10-15 cm		
T acqua risaia		
31°C		
T acqua fosso		
20.5°C	PUNTO 6: risaia irrigata da M1	

3.3 Taratura dei parametri per il calcolo della filtrazione

La determinazione delle perdite per filtrazione richiede la conoscenza del coefficiente di permeabilità idraulica e l'individuazione delle caratteristiche geometriche del terreno.

La permeabilità idraulica a saturazione è stata determinata in campo in due siti di misura, utilizzando un carico idraulico h_m pari a 50 mm. Il valore di K_s adottato è pari alla media dei due dati, cioè **$K_s = 0.0046 \text{ cm/h}$** (coefficiente di permeabilità idraulica: $K = 0.0037 \text{ cm/h}$ – equazione (17)). Tale parametro è l'unico che può essere direttamente misurato e verificato in campo, mentre gli altri necessitano di una fase di taratura. Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche del terreno, i parametri richiesti sono lo spessore della soletta S e del terreno agrario h_t . Due valori accettabili sono **$S = 200 \text{ mm}$** e **$h_t = 150 \text{ mm}$** . La determinazione del coefficiente descrittivo della riduzione della permeabilità durante la stagione irrigua è invece tutt'altro che immediata. Da valutazioni effettuate sulla base delle esperienze del Prof. Allavena, si può considerare una riduzione variabile tra un terzo e un mezzo. A scala di campo prova, il coefficiente che sembra fornire i migliori risultati è **1/3**. Sotto questa ipotesi, il coefficiente di permeabilità segue l'andamento rappresentato in Figura 18.

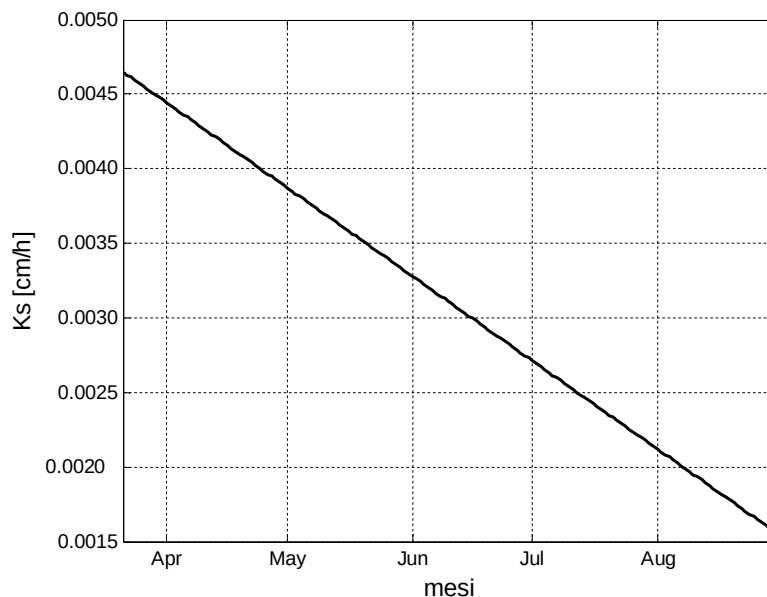


Fig. 18. Riduzione del coefficiente di permeabilità idraulica saturata del terreno durante la stagione irrigua

3.4 Risultati del bilancio idrologico sul campo prova di Lenta

Avendo a disposizione le serie giornaliere dei volumi immessi e uscenti dal campo prova, i valori giornalieri di precipitazione ed avendo definito i parametri necessari al calcolo delle perdite per evapotraspirazione e per filtrazione è quindi possibile sviluppare l'equazione (1) del bilancio idrologico. La disponibilità di misure di tutte le variabili necessarie al bilancio permette di ricavare l'andamento dell'altezza di acqua sul campo, h , risultato della differenza tra gli ingressi (volumi immessi e precipitazioni) e le uscite (volumi uscenti, filtrazione ed evapotraspirazione), tenendo conto del volume già immagazzinato fino all'istante di calcolo. L'altezza di acqua modellata è quindi confrontata con quella ideale ("obiettivo"), schematizzata mediante la funzione "a gradino" rappresentata in Figura 6. Nel primo periodo si potrebbero presentare anche dei momenti con livello idrico prossimo a zero in corrispondenza delle asciutte per i trattamenti al terreno, particolarmente evidenti in uno studio ad una scala spaziale così ridotta.

Le serie temporali delle variabili del bilancio e l'altezza idrica sul campo ricostruita con il modello sono riassunte nella scheda posta a fine paragrafo.

Nell'andamento temporale delle portate in ingresso sono facilmente individuabili due fasi tipiche: 1) nei mesi primaverili i valori elevati (allagamenti) si alternano ai valori ridotti (asciutte); 2) nella stagione estiva è necessario immettere portate continue per bilanciare le perdite per filtrazione ed evapotraspirazione e mantenere un adeguato livello idrico nelle camere di risaia.

La serie temporale delle portate in uscita invece presenta dei picchi più pronunciati, riconducibili a due specifiche situazioni. In primo luogo, le uscite stagionali sono attivate solo durante le operazioni di svuotamento delle camere per permettere una rapida asciugatura del terreno così da poter eseguire i trattamenti necessari. L'andamento registrato in corrispondenza di questi nodi è quindi caratterizzato da picchi particolarmente accentuati e brevi. In secondo luogo, confrontando la serie di volumi uscenti con la serie delle precipitazioni si nota che i picchi cadono immediatamente dopo un evento di pioggia intenso: se le risaie sono alla loro massima capacità di invaso parte dell'acqua derivante dalla

precipitazione è scaricata nei canali (P_s). Invece, nelle fasi di crescita del livello idrico il volume meteorico è accumulato nel campo.

Le piogge sono generalmente più intense nei mesi primaverili rispetto a quelli estivi: in particolare, si nota un periodo particolarmente piovoso tra la metà del mese di maggio e la metà di giugno.

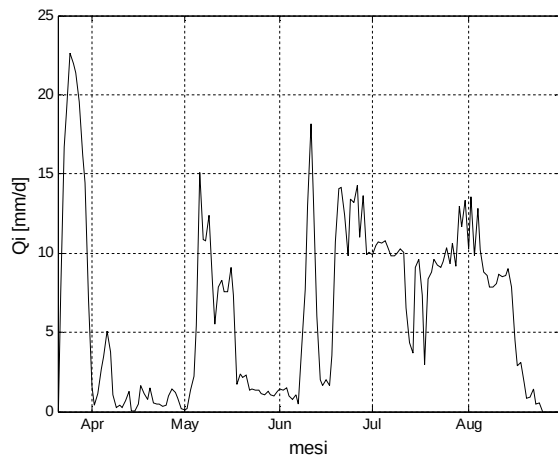
L'evapotraspirazione mostra i valori maggiori durante il periodo estivo, in cui la temperatura è più elevata, la radiazione solare è più intensa ed è massima la capacità traspirativa delle piante di riso.

I valori di filtrazione seguono la serie storica del tirante idrico sul campo e tenendo conto della riduzione della permeabilità, l'andamento che ne risulta è decrescente nel tempo.

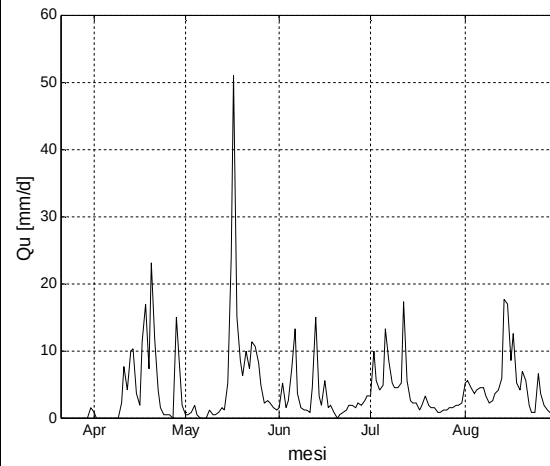
Il tirante idrico che deriva dall'applicazione dell'equazione del bilancio sul campo prova di Lenta approssima abbastanza bene quello atteso (vedi pannello in basso a destra), pur essendo caratterizzato da una successione di netti innalzamenti seguiti da abbassamenti durante i primi mesi.

RISULTATI BILANCIO IDROLOGICO CAMPO PROVA DI LENTA

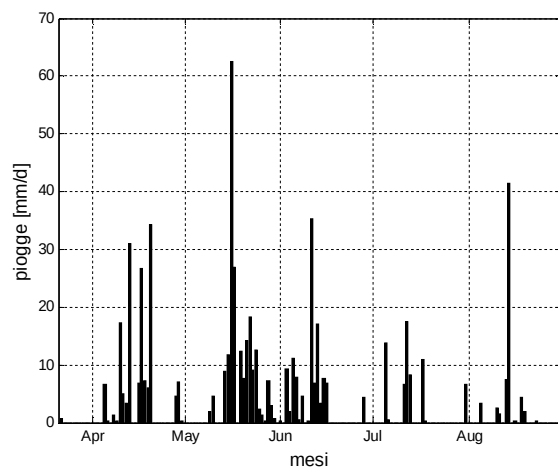
Portate in ingresso



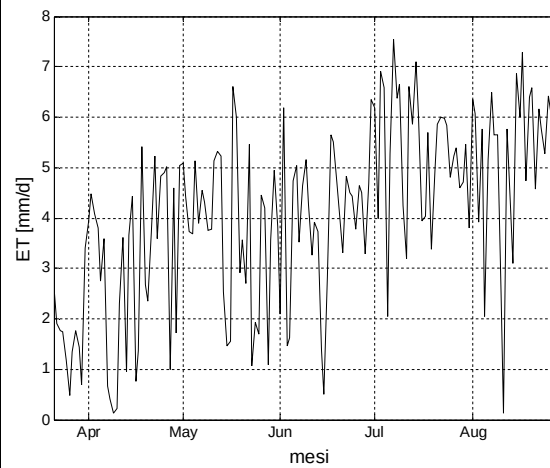
Portate in Uscita



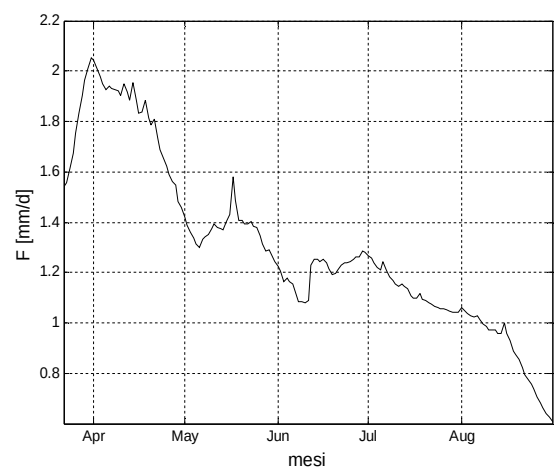
Precipitazioni



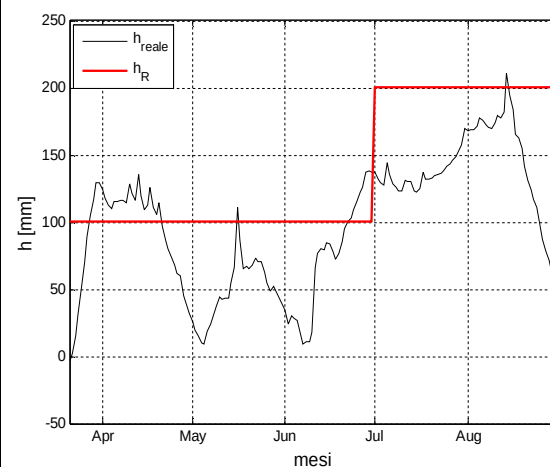
Evapotraspirazione



Filtrazione



Curva di stato del livello idrico



4 APPLICAZIONE DEL MODELLO DI BILANCIO IDROLOGICO ALLA SCALA DI COMPRESORIO

L'applicazione del modello alla scala del comprensorio richiede elementi di passaggio aggiuntivi legati alla complessità del sistema esaminato. Il comprensorio prevede una gestione irrigua molto complessa che evolve secondo specifiche richieste degli agricoltori, i quali definiscono le tempistiche di adacquamento in modo coordinato. E' quindi necessario definire le condizioni medie nel comprensorio, sia per quanto riguarda la curva obiettivo dei livelli idrici sia per alcune delle grandezze usate nel bilancio. Il riferimento è quello descritto nello schema del Capitolo 1, e rappresentato in Figura 4.

4.1 Riepilogo dei dati disponibili

Tenendo conto della disponibilità di dati di portata, il modello è stato sviluppato per gli anni dal 2005 al 2008. Per queste stagioni, infatti, si disponeva della misurazione pressoché continua delle serie di valori dei volumi immessi e uscenti in quasi tutti i nodi di misura. Nei nodi di ingresso/uscita non monitorati con continuità o nei quali si dispone del solo valore totale stagionale, il dato medio giornaliero è stato ottenuto utilizzando un criterio di proporzionalità, secondo quanto già definito nel precedente lavoro (Claps, Laio (2008)). Va precisato che tali incertezze si riferiscono a volumi di entità poco rilevante sull'insieme degli apporti considerati. Nello sviluppo del modello è stato considerato il comprensorio compartimentato, cioè senza perdite secondarie verso l'ambiente circostante. In questo modo i volumi immessi e uscenti sono pari alla somma di quelli misurati nei singoli nodi (Figure 19 e 20). Le serie storiche dei volumi in ingresso e in uscita dal comprensorio negli anni 2005, 2006, 2007 e 2008 sono riportate nell'Allegato 1.

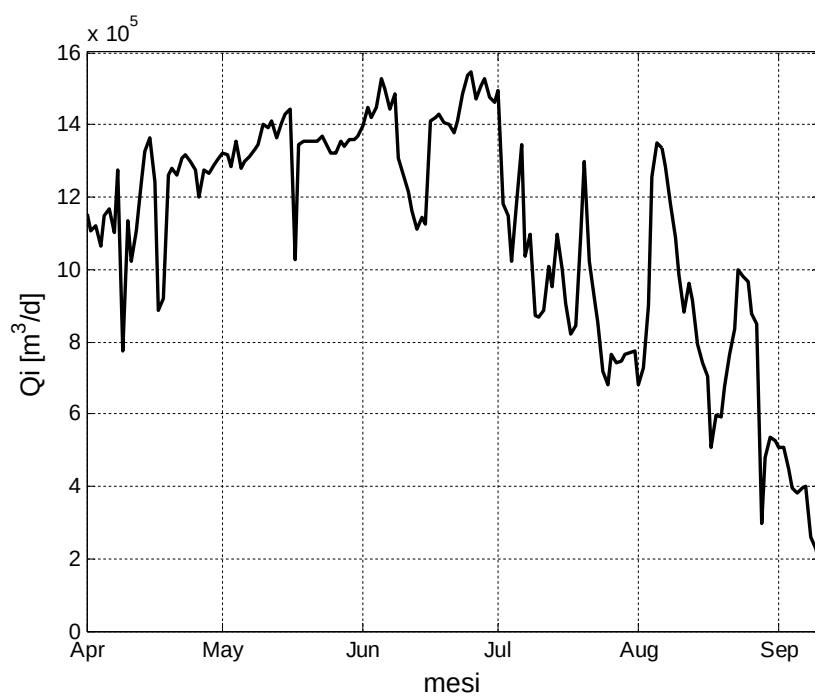


Fig. 19. Esempio di serie temporale dei volumi giornalieri in ingresso al comprensorio (anno 2005).

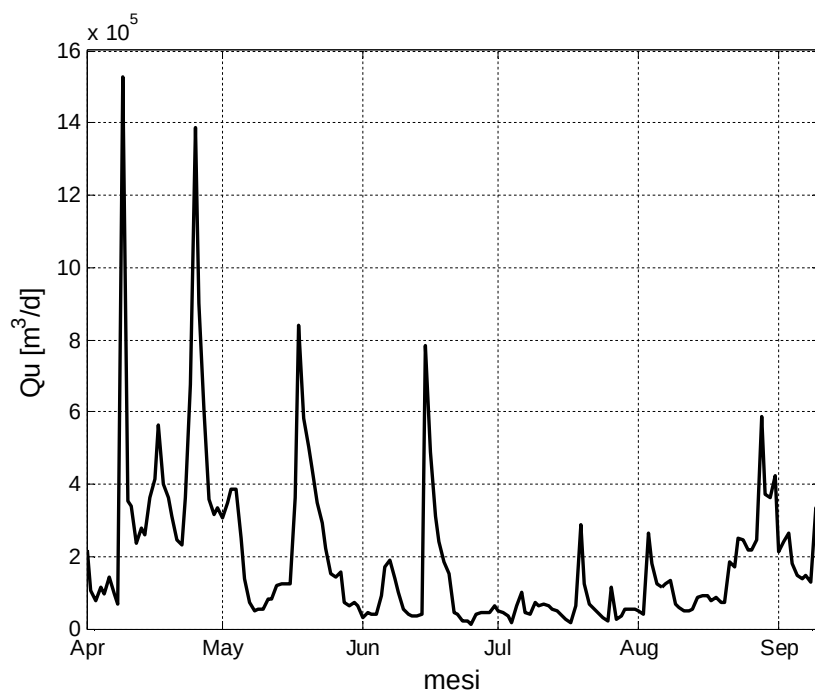


Fig. 20. Esempio di serie temporale dei volumi giornalieri in uscita dal comprensorio (anno 2005).

I dati meteorologici per la stima dell'evapotraspirazione sono misurati da sei stazioni dislocate sul comprensorio: Albano Vercellese, Masserano e Vercelli della rete ARPA Piemonte e Buronzo, Gattinara e Roasio della rete Agrometeorologica della Regione Piemonte. L'area di influenza di ogni stazione è stata determinata col metodo dei topoi (vedere Claps, Laio (2008)) (Tabella 6).

Tab. 6. Area di influenza delle stazioni meteorologiche.

Stazione	Area di influenza	% sul totale
Albano Vercellese	5065 ha	32.69 %
Buronzo	4360 ha	28.14 %
Gattinara	1092 ha	7.05 %
Masserano	4257 ha	27.48 %
Roasio	720 ha	4.64 %
Vercelli	0 ha	0 %

Come si può notare, la stazione di Vercelli ha un'area di influenza nulla, ma è stata comunque presa in considerazione in quanto presenta misura di velocità del vento e radiazione solare incidente, grandezze che sono state assunte valide per tutto il comprensorio, non essendo misurate nelle altre cinque stazioni. Le serie storiche dei dati meteorologici medi sul comprensorio dall'anno 2005 all'anno 2008 sono riassunte nell'Allegato 2.

L'analisi delle serie di dati delle stazioni meteorologiche ha mostrato la presenza di un buon grado di omogeneità sul comprensorio nella distribuzione della temperatura e dell'umidità dell'aria (Figure 21 e 22), per cui è lecito attendersi perdite per evapotraspirazione omogenee sul territorio.

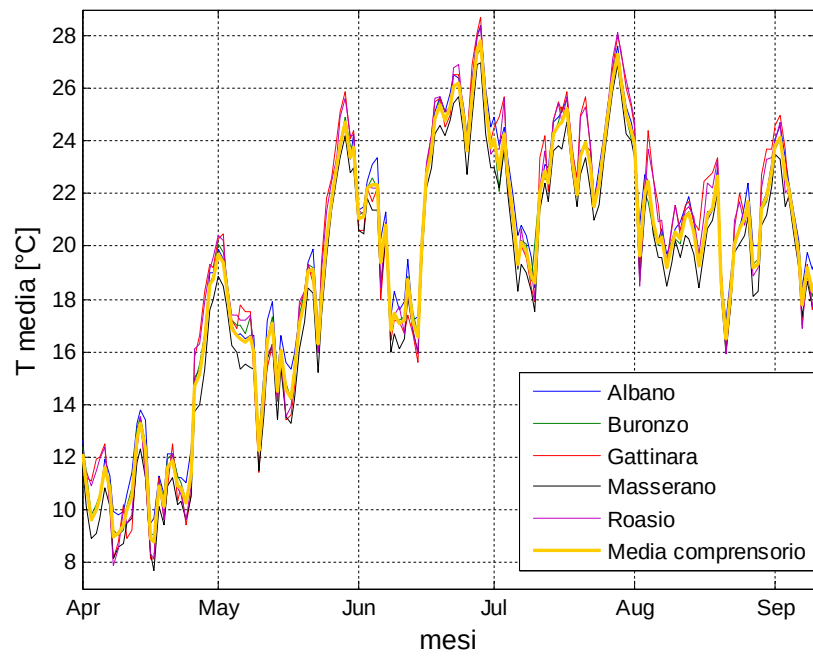


Fig. 21. Serie storiche di temperatura media registrate nelle stazioni meteorologiche sul comprensorio e curva media adottata (anno 2005).

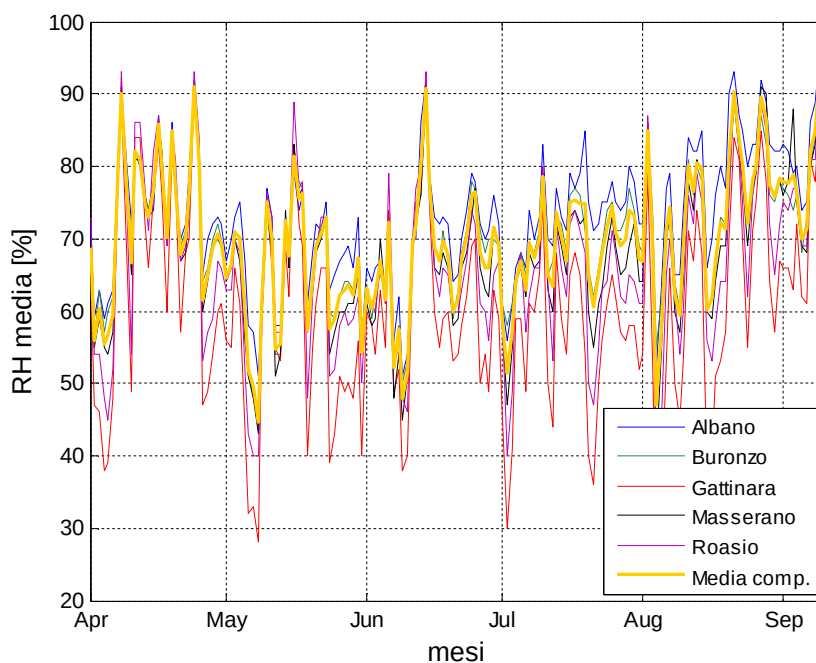


Fig. 22. Serie storiche di umidità media dell'aria registrate nelle stazioni meteorologiche sul comprensorio e curva media adottata (anno 2005).

Le stazioni meteorologiche dotate di pluviometro per le serie delle precipitazioni sono rappresentate in Figura 23. Osservando le serie temporali si può rilevare che le stazioni a Nord (Gattinara, Masserano e Roasio) mostrano valori mediamente più elevati di quelle a sud dove sono localizzate le stazioni di Buronzo e Albano Vercellese. Inoltre, i picchi di precipitazione sono quasi sincroni in tutte le serie esaminate. Il valore medio sul comprensorio è calcolato con una media pesata sull'area di influenza di ogni stazione, secondo il classico metodo dei poligoni di Thiessen.

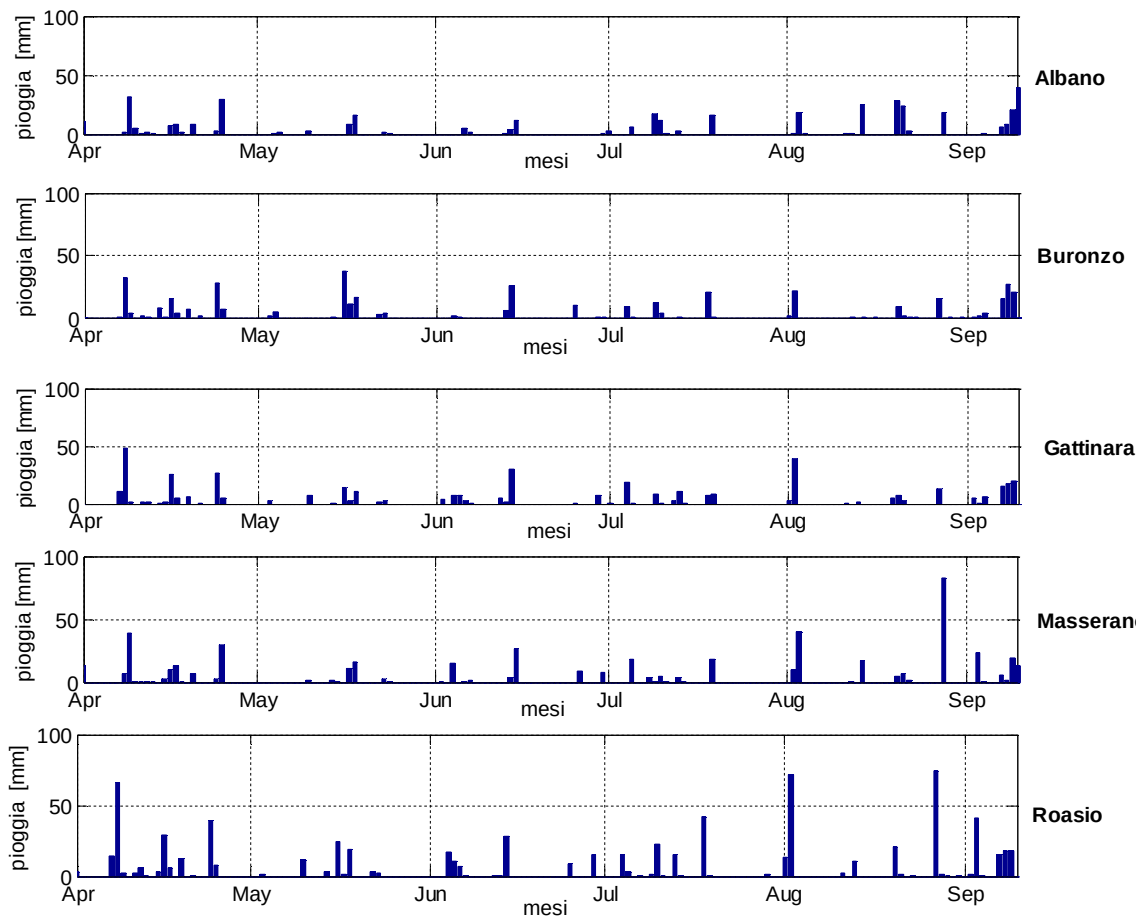


Fig. 23. Serie temporali di precipitazione registrate nelle stazioni considerate (anno 2005).

Per quanto riguarda la filtrazione, il coefficiente di permeabilità idraulica satura del suolo (K_s) è il parametro di cui considerare con cura la variabilità spaziale sul comprensorio. I campionamenti effettuati dal Dott. Laruccia (2008) in 71 punti di misura mostrano valori di K_s molto differenti, che presentano anche un graduale incremento da Nord verso Sud. I valori misurati sono stati raggruppati in venticinque aree con caratteristiche omogenee (Unità Cartografiche, U.C.), ad ognuna delle quali è stato attribuito un K_s pari alla media geometrica dei valori rappresentativi ottenuti dalle prove realizzate. La Tabella 7 riassume il valore di permeabilità idraulica satura associato ad ogni U.C. con l'indicazione della relativa superficie coltivata a riso. La Figura 24 riassume graficamente la distribuzione spaziale delle classi di permeabilità ricomprese all'interno di valori commisurabili.

Tab. 7. Unità Cartografiche e valori assunti per il coefficiente di permeabilità idraulica a saturazione del terreno.

U.C.	Superficie a risaia (ha)	K _s (cm/h)	U.C.	Superficie a risaia (ha)	K _s (cm/h)
U1231	357	0,07930	U1247	38	0,05560
U1236	982	0,12000	U1127	452	0,10000
U0372	2	0,00300	U0391	55	0,00210
U1230	282	0,08380	U1229	4	0,00740
U1230	31	0,08380	U1237	1373	1,69640
U1235	3869	0,00930	U1238	32	0,05560
U0321	32	0,05560	U1238	24	0,05560
U0321	38	0,05560	U1238	1	0,05560
U0313	91	1,69640	U1229	20	0,00740
U0341	17	0,10000	U0391	398	0,00210
U0372	1501	0,00290	U1230	27	0,08380
U0391	773	0,00210	U1230	187	0,08380
U0391	290	0,00210	U1230	8	0,08380
U0391	751	0,00210	U1247	423	0,05560
U0364	132	0,14690	U1229	23	0,00740
U0380	344	0,12000	U1228	183	0,03180
U1229	49	0,00740	U1230	8	0,08380
U0391	37	0,00210	U1230	8	0,08380
U1229	12	0,00740	U1230	28	0,08380
U1230	19	0,08380	U0372	638	0,01020
U1229	9	0,00740	U0372	3098	0,01180
U1225	557	0,07930	U1301	374	0,01810
U1226	84	1,69640	U1229	63	0,00740
U1229	17	0,00740	U1247	579	0,05560
U1228	350	0,03180	U1301	443	0,09670
U0380	38	0,12000	U1301	103	0,01810
U1227	435	0,17440	U1301	590	0,09670
U1229	51	0,00740	U1230	147	0,08380
U1229	284	0,00740	U1301	560	0,09670
U1229	16	0,00740	U1301	608	0,09670
U1229	18	0,00740	U1227	421	0,03090
U1229	136	0,00740	U1229	3	0,00740
U1230	52	0,08380	U0321	248	0,05560
U1230	42	0,08380	U1302	506	0,12090
U0349	67	0,00210	U1226	26	1,69640

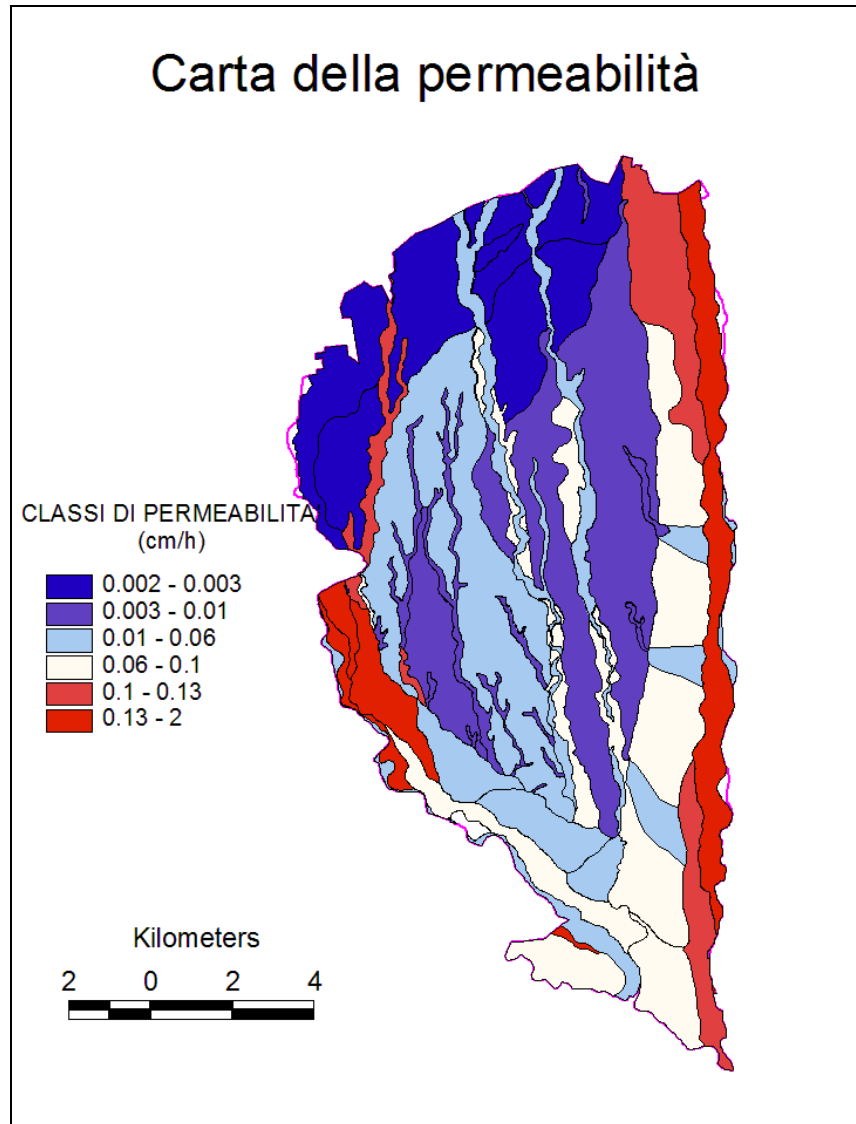


Fig. 24. Distribuzione delle classi di permeabilità del Centro Sesia.

Come si può notare, i valori medi di permeabilità variano di un ordine di grandezza ($K_{s \min} = 0.0021 \text{ cm/h}$ e $K_{s \max} = 1.69640 \text{ cm/h}$). Un'analisi spaziale di dettaglio nel calcolo della filtrazione sarebbe fondamentale per stimare in modo accurato le perdite, variabili con la porzione di terreno allagato. Volendo esaminare il funzionamento complessivo del comprensorio conviene tuttavia adottare un valore di permeabilità medio, anche perché le grandezze richiamate nel paragrafo 2.2.5 (relazione 18) richiedono di indicare spessori medi H e h sull'intera superficie considerata. Il valore di K_s medio del comprensorio è pari alla media pesata sulle aree dei valori associati ad ogni U.C. e vale **$K_s = 0.0285 \text{ cm/h}$** .

4.2 Stima dei parametri del modello

Noti i volumi in ingresso ed uscita dal comprensorio, le precipitazioni, i parametri meteorologici e il coefficiente medio di permeabilità idraulica a saturazione del terreno si possono ora definire i parametri del modello, introdotti nel Capitolo 2. Come già fatto per il campo prova, le variabili partecipanti al bilancio idrologico sono espresse in termini di altezze (mm) di acqua sul comprensorio.

4.2.1 *Superficie del comprensorio*

Un'attenzione particolare viene dedicata all'area del comprensorio da considerare nelle elaborazioni. Nel modello del bilancio idrologico è stata presa in considerazione la sola superficie coltivata a riso che ha un'estensione pari a 12984 ha contro i 15494 ha di superficie totale. Quest'ultima comprende, in aggiunta alla superficie a risaia, 2432 ha coltivati a mais, frumento, soia e cereali e 78 ha di prato. Va tenuto presente che, secondo la gestione irrigua adottata, raramente si ha la sommersione della totalità della superficie. Infatti è possibile riscontrare lungo la stagione irrigua la presenza di una porzione asciutta più o meno estesa. Indipendentemente da problematiche di rotazione culturale, in situazioni di carenza idrica la gestione irrigua prevede di ridurre la superficie allagata invece che il tirante idrico.

Sulla base di queste osservazioni, l'area allagata che si è considerata nel modello a bilancio varia secondo la disponibilità idrica. Con riferimento alle stagioni irrigue di cui si hanno dati di dettaglio, i tecnici del consorzio hanno suggerito le seguenti superfici coltivate:

- Anno 2005: $S = 11945$ ha (92% del totale);
- Anno 2006: $S = 11036$ ha (85% del totale);
- Anno 2007: $S = 11945$ ha (92% del totale);
- Anno 2008: $S = 11945$ ha (92% del totale).

Le considerazioni sulla carenza o abbondanza di acqua della stagione irrigua sono basate sui dati riportati in Tabella 8. Gli anni 2005, 2007 e 2008 mostrano totali stagionali di precipitazioni e portate immesse molto simili. In particolare, nel 2007 è stato erogato un volume totale minore rispetto agli altri anni, ma le precipitazioni sono state abbondanti. Il

2006 invece è stato l'anno maggiormente deficitario in termini di piogge. La prolungata assenza di acqua ha determinato anche una netta riduzione delle portate erogate, soprattutto in corrispondenza dei mesi tardo primaverili ed estivi (da maggio a luglio) durante i quali invece la richiesta irrigua è molto intensa ed importante per la produzione.

Tab. 8. Totali stagionali delle variabili del bilancio idrologico per gli anni considerati.

Totale stagionale (1 aprile -10 settembre)	2005	2006	2007	2008
	<i>m³</i>	<i>m³</i>	<i>m³</i>	<i>m³</i>
Volume ingresso	178.838.468	170.947.871	163.863.267	177.023.848
Volume uscita	31.400.371	26.456.198	47.223.755	72.787.507
Precipitazioni	69.792.864	39.822.818	83.937.028	98.890.098
Evapotraspirazione	54.173.242	58.857.537	59.447.530	48.100.467
Filtrazione	152.546.033	143.102.013	150.987.943	155.988.670

4.2.2 Volumi tecnici – V_T

a) Saturazione dello strato di terreno agrario - V_{im}

L'allagamento delle camere di risaia richiede la preventiva saturazione dello strato di terreno agrario soprastante la soletta. La saturazione può avvenire con l'intervento delle precipitazioni (pioggia e neve) durante i mesi invernali e primaverili oppure con i volumi immessi all'inizio della stagione irrigua che dapprima imbibiscono tale strato e poi creano l'accumulo di acqua.

Per l'iniziale imbibizione del terreno è necessario un volume una-tantum che è stato sommato al fabbisogno del mese di aprile. L'analisi di questa condizione iniziale è necessaria per sviluppare il modello del bilancio idrologico considerando come stagione irrigua il periodo compreso tra l'1 aprile e il 10 settembre, in modo da assumere per la curva di stato del livello idrico che $h = 0$ coincidesse con il P.C. (Figura 25).

Ipotizzando uno spessore di terreno agrario $h_t = 100$ mm con porosità $n = 30\%$ il volume necessario per ottenere la saturazione è pari a $h_{eff} = h_t \cdot n = 30$ mm.

Analizzando l'afflusso meteorico del mese di marzo (Tabella 9) si nota che questi volumi sarebbero sufficienti per la saturazione dello strato agrario, raggiungendo e superando il valore teorico calcolato. Occorre però considerare un'altra componente presente in questa fase, cioè l'evapotraspirazione da suolo nudo. Usando la classica formulazione di Penman – Monteith basata sui valori delle variabili meteorologiche di marzo e imponendo un coefficiente di riflessione del suolo pari a 0.1 si ha un valor medio di evapotraspirazione giornaliera pari a 2 mm/d. Il totale mensile di perdita per evapotraspirazione vale pertanto circa 60 mm. Da questo, pur approssimato, bilancio risulta quindi che la precipitazione che mediamente cade nel mese di marzo sarebbe da considerare totalmente persa per evapotraspirazione.

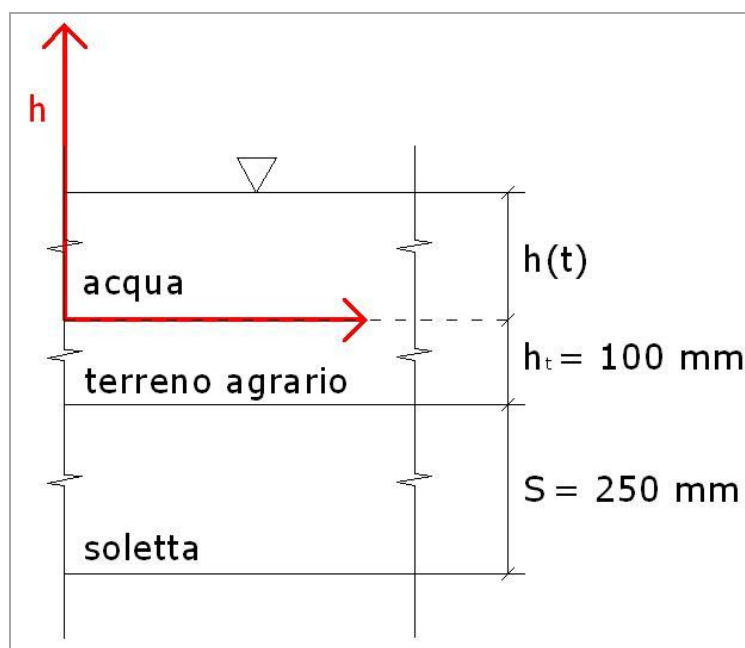


Fig. 25. Sistema di riferimento per la curva di stato del livello idrico.

Tab. 9. Altezze di pioggia del mese di marzo.

Anno	Altezza pioggia marzo [mm]
2005	69.94
2006	33.73
2007	30.87
2008	34.66
Media dei 4 anni	42.30

La componente che allora si presenta finalizzata anche alla saturazione dello strato di terreno agrario è la somministrazione di volumi irrigui immessi sul comprensorio prima della vera e propria stagione irrigua. Avendo a disposizione i volumi erogati dal 15 marzo al 31 marzo, si nota che in media in questo periodo sono erogati circa **40 mm** di acqua sul comprensorio. Tale altezza è quindi da considerarsi utilizzata per la completa saturazione dello strato soprastante la soletta.

b) Volumi di riempimento dei canali - V_{rc}

Nella fase iniziale occorre tenere in considerazione il fatto che, all'apertura delle bocche, i canali devono essere preventivamente riempiti per convogliare l'acqua alle camere di risaia. La rete di canali principali e secondari si estende su una lunghezza complessiva di circa 565 km. Ipotizzando una sezione media di tipo rettangolare con larghezza pari a 1.5 m e altezza 1 m, il volume necessario per il loro riempimento vale $0.85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, equivalenti a circa **5 mm** di acqua distribuiti sulla superficie del comprensorio.

Anche in questo caso, come per il volume necessario alla saturazione del terreno, le portate di riempimento dei canali non sono funzione del tempo, ma rappresentano una quota parte del fabbisogno concentrata ad inizio stagione e compatibili con la quantità di acqua immessa prima del 1° aprile.

c) Perdite per filtrazione laterale dei canali - V_{pc}

La determinazione delle perdite per filtrazione laterale dai canali richiede la conoscenza delle caratteristiche geometriche (lunghezza dei canali, forma delle sezioni, ...) e meccaniche dei canali (canali in terra o rivestiti).

La formula utilizzata per il calcolo del volume perso lungo la rete irrigua è quella di Davis e Wilson (relazione (7)). I canali del comprensorio sono per la maggior parte in terra e in brevi tratti rivestiti. Anche in questo caso si è definita una sezione media dei canali. I dati richiesti dalle relazioni sono stati assegnati come segue:

- d = profondità media dell'acqua nel canale = 0.7 m
- x = contorno bagnato medio = 2.9 m (sezione rettangolare con base larga 1.5 m e altezza 1 m)
- v = velocità media dell'acqua nel canale = 1 m/s
- c = coefficiente funzione del tipo di materiale di cui è costituito il canale (Tabella 2) = 12 (canali in sabbia fine – argilla)

Sotto queste condizioni le perdite sono pari a $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ($44593 \text{ m}^3/\text{g} \rightarrow 0.34 \text{ mm/d}$).

A differenza dei due contributi precedenti, queste perdite sono funzione del tempo e si considerano costanti lungo l'intera stagione irrigua.

4.2.3 Evapotraspirazione – ET

Le perdite per evapotraspirazione sono calcolate con la formulazione di Penman – Monteith (relazione (8)), opportunamente modificata per tenere conto dello stadio di sviluppo del riso e della radiazione assorbita per il riscaldamento dell'acqua in risaia.

a) Stadio di sviluppo del riso, descritto tramite il parametro LAI (Leaf Area Index)

Lo stadio di sviluppo del riso è stato descritto tramite il parametro LAI definito dalla relazione (9) e introdotto nel calcolo del coefficiente di riflessione RF (relazione (11)) che sostituisce l'usuale valore pari a 0.23 nella classica formulazione di Penman. Lungo la stagione irrigua si individuano due periodi caratteristici: dal 1 aprile al 30 aprile si assume la sola presenza dell'acqua sul terreno (LAI nullo e RF pari a 0.05), mentre dal 1 maggio al 10

settembre le piante di riso sono emergenti dall'acqua e sono presenti sia il contributo di evaporazione sia quello di traspirazione.

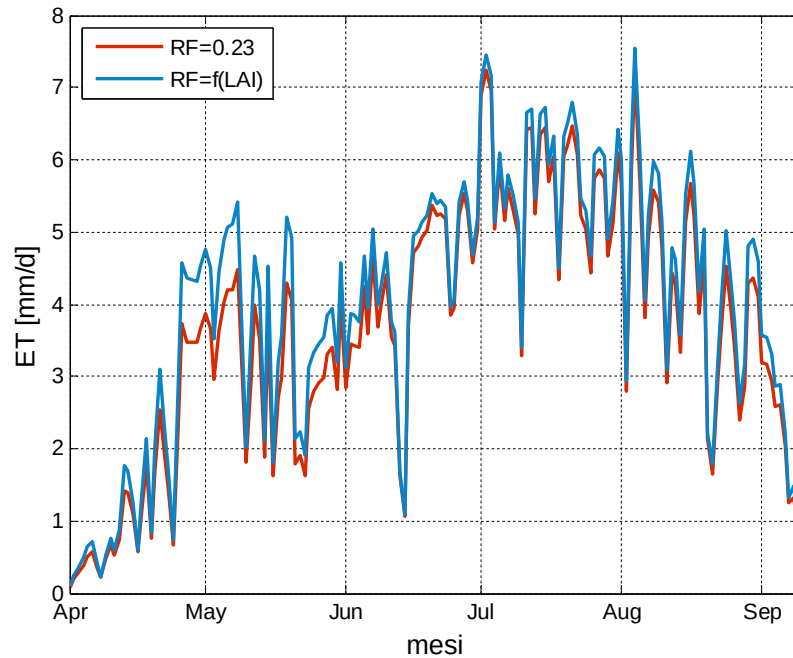


Fig. 26. Confronto tra evapotraspirazione calcolata con $RF = 0.23$ e $RF = f(LAI)$ (anno 2005).

La Figura 26 presenta un confronto tra i valori di evapotraspirazione calcolati con la classica formulazione di Penman – Monteith ($RF = 0.23$) e con la formulazione modificata per il caso qui esaminato ($RF = f(LAI)$). Come si può notare, tenere conto dello stadio di sviluppo del riso implica ottenere dei valori leggermente superiori a quelli calcolati ad albedo costante. Infatti, definendo RF secondo l'equazione (11) il valore massimo ottenuto è 0.21 (Figura 12), inferiore a quello 0.23 usualmente adottato. Ciò significa che a parità di radiazione solare si ottengono dei valori di R_n più elevati (Figura 27) e quindi evapotraspirazione più accentuata.

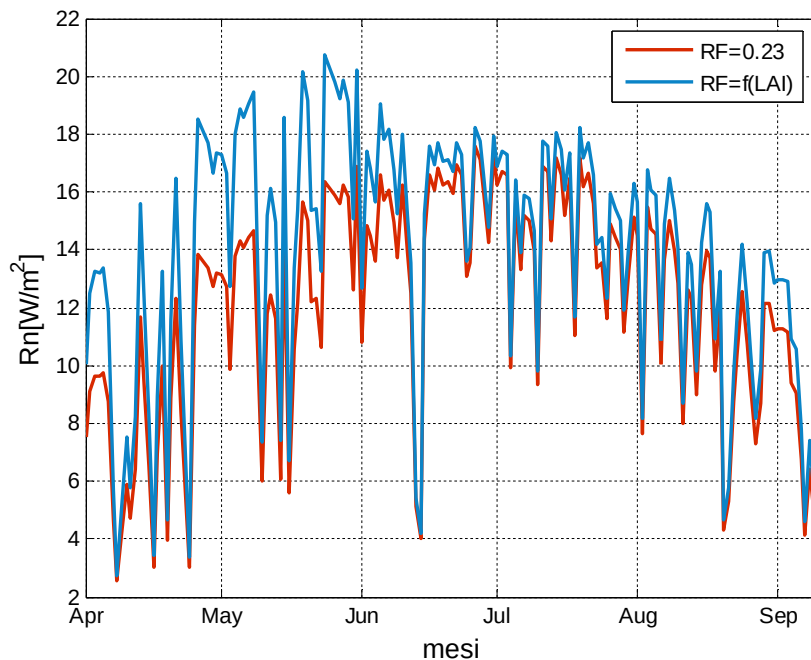


Fig. 27. Confronto tra R_n calcolato imponendo $RF = 0.23$ e $RF = f(LAI)$ (anno 2005).

b) Calore sensibile assorbito dalla massa di acqua presente nelle risaie

Il volume di acqua immagazzinato nelle risaie presenta una temperatura superiore a quella dell'acqua nei canali grazie all'assorbimento di una quota non trascurabile di radiazione solare incidente. Il calore sensibile G è calcolato secondo la relazione (12) che richiede la definizione della differenza di temperatura ΔT tra l'acqua nella rete irrigua e l'acqua nelle camere, fissato il calore sensibile dell'acqua ($c = 4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e misurata la massa di acqua immessa quotidianamente sul comprensorio (somma dei volumi influenti e delle precipitazioni). Seguendo le indicazioni dedotte dalla campagna di misura della temperatura dell'acqua realizzata nel campo prova di Lenta (Tabella 5), si ipotizza che la temperatura dell'acqua nella rete irrigua sia pari a 20°C , mentre quella nelle camere di risaia raggiunga i 35°C , così da ottenere $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

Tenere conto del calore assorbito dalla massa di acqua in risaia per il proprio riscaldamento riduce il totale annuo delle perdite per evapotraspirazione di circa 200 mm (Figura 28).

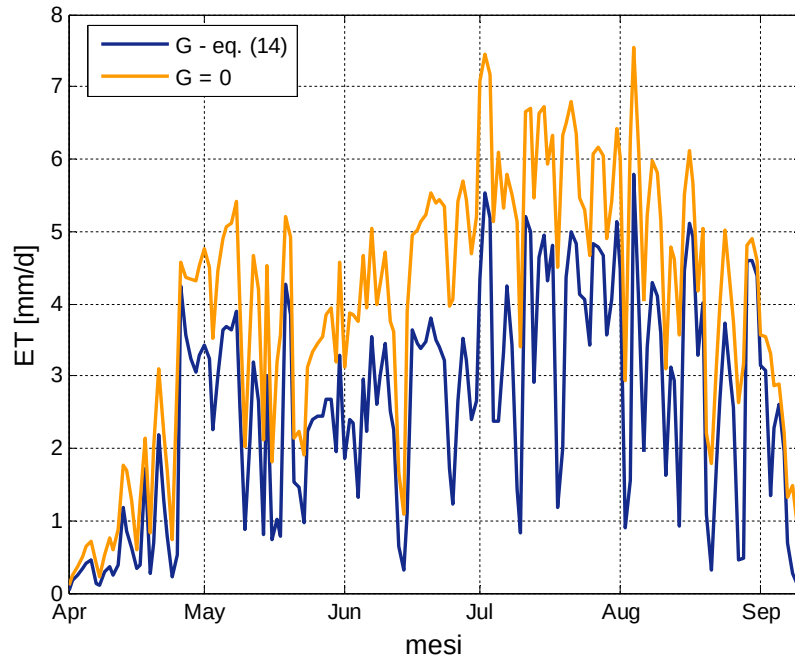


Fig. 28. Confronto tra ET calcolata con $G = 0$ e G calcolato con l'equazione (14).

Se non si hanno a disposizione misure di portata, è possibile calcolare un valore totale di calore sensibile assorbito nell'intera stagione irrigua, ipotizzando di dover riscaldare un'altezza di acqua pari a 1.5 m, valore dedotto calcolando una media della somma delle altezze totali stagionali di precipitazione e delle altezze totali stagionali di volumi influenti dal 2000 al 2007 (Tabella 10). Dal calore sensibile totale è quindi possibile ottenere un valore medio giornaliero.

Tab. 10. Totali stagionali di precipitazione e volumi in ingresso al comprensorio per la stima del calore sensibile totale stagionale.

Anno	Piogge [mm]	Portate ingresso [mm]	Totale [mm]
2000	662	877	1539
2001	429	896	1325
2002	1025	756	1781
2003	238	730	968
2004	520	1024	1544
2005	508	1377	1885
2006	283	1316	1599
2007	552	1626	2178
2008	761	1363	2124
Media	553.11	1107.22	1660.33

c) Coefficiente colturale

L'evapotraspirazione calcolata con la formulazione di Penman - Monteith deve essere moltiplicata per un coefficiente colturale K_c per poterla riferire ad una specifica coltura. I valori mensili adottati sono riportati in Tabella 4 – paragrafo 2.2.4 c.

d) Applicazione dell'evapotraspirazione sulla sola superficie sommersa

L'evapotraspirazione, come descritta nel Capitolo 2, è legata alla presenza dell'acqua e quindi va applicata sulla sola superficie allagata del comprensorio. Per tenere conto di ciò, la serie temporale di ET è moltiplicata per la curva di estensione dell'area allagata (Figura 7), così da essere estesa a tutta la superficie durante le fasi stazionarie e alla sola quota parte sommersa durante il transitorio iniziale.

4.2.4 Filtrazione – F

Misurato in campo il coefficiente di permeabilità satura è possibile ricavare le perdite per filtrazione. Nel particolare sistema studiato, nel quale il terreno è perennemente sommerso, la filtrazione non è costante nel tempo, ma dipende dal battente presente in un determinato momento. Anche il coefficiente di permeabilità idraulica satura varia durante la stagione irrigua, come accennato in precedenza.

a) Variabilità della filtrazione in funzione del battente idraulico sul campo

La legge che definisce la perdita per filtrazione in funzione del battente idraulico sul campo si ricava dall'accoppiamento dell'equazione di continuità e della legge di Darcy (relazione (16)). Noto il valore della permeabilità idraulica satura e ipotizzate le caratteristiche geometriche medie del terreno è quindi possibile determinare la serie temporale delle perdite per filtrazione secondo l'equazione (19).

E' però necessario premettere alcune considerazioni. Innanzitutto va ricordato che il valore di permeabilità misurato in campo (K_s) non corrisponde a quello reale (K) che deve invece essere definito sulla base della legge di Darcy (relazione (18)). Essendo il coefficiente moltiplicativo $\frac{S}{h_m + S} < 1$ (dove S = spessore della soletta e h_m = carico idraulico utilizzato

durante la prova di permeabilità = 50 mm), ne deriva che il valore effettivo è inferiore a quello misurato, cioè $K < K_s$.

Inoltre, è necessario definire una configurazione media della geometria del terreno, cioè definire i parametri S (spessore della soletta) e h_t (spessore terreno agrario) dell'equazione (19) in modo che rappresentino valori medi validi per tutto il comprensorio. Questi valori possono essere determinati solo per taratura, verificando che si riescano a ricostruire serie storiche di volume invasato sufficientemente attendibili (per maggiori dettagli si veda l'Appendice B). A seguito di queste operazioni si sono fissati i valori per il comprensorio, che sono: **$S = 250$ mm e $h_t = 100$ mm.**

L'equazione (19) evidenzia la dipendenza diretta della filtrazione $F = \frac{dH}{dt}$ dal battente idraulico sul campo $H = h + h_t$, dove h = altezza di acqua e h_t = spessore del terreno agrario (vedi Figura 13): maggiori altezze idriche implicano maggiori perdite per filtrazione. La serie

temporale delle perdite per filtrazione è ricostruita mediante un procedimento iterativo che richiede una condizione iniziale di livello idrico utilizzata poi per calcolare i valori negli istanti seguenti. Il primo giorno della stagione irrigua le bocche vengono aperte e i primi campi sono irrigati, ma la filtrazione si attiva quando è presente un battente. In accordo con tale osservazione è quindi lecito ipotizzare che

$$F(t = 0) = 0 \Rightarrow H(t = 0) = h_t + Q_i(t = 0) - Q_u(t = 0) + P(t = 0) - ET(t = 0)$$

Dal secondo giorno della stagione irrigua con ogni iterazione è calcolata la filtrazione in funzione del battente all'istante precedente e con tale valore si ottiene l'altezza di acqua nell'i-esimo giorno:

1. $F(i) = K_s \frac{H(i-1) + S}{h_m + S};$
2. $H(i) = H(i-1) + Q_i(i) - Q_u(i) + P(i) - ET(i) - F(i);$
3. $h(i) = H(i) - h_t.$

b) Riduzione nel tempo del coefficiente di permeabilità idraulica satura del terreno

Il susseguirsi di allagamenti e asciutte nella coltivazione del riso mediante sommersione continua determina una graduale riduzione della permeabilità. Posto il valore di permeabilità idraulica satura del terreno il 1° aprile pari a quello medio sul comprensorio ($K_s = 0.0285 \text{ cm/h}$), si deve valutare il tasso di riduzione di K_s con il tempo. Nel campo prova si era stimata una riduzione fino ad 1/3 alla fine della stagione. Sul comprensorio, le valutazioni fatte sui bilanci degli anni di test portano a stimare una riduzione del 50%. Un'analisi di sensitività del fenomeno di filtrazione al variare di questo parametro è riportata nell'Appendice B.

La serie temporale della filtrazione segue puntualmente quella della curva di stato del livello idrico, essendo le due grandezze direttamente proporzionali, ma presenta un andamento medio decrescente durante la stagione irrigua, che segue la riduzione del coefficiente di permeabilità (Figura 29).

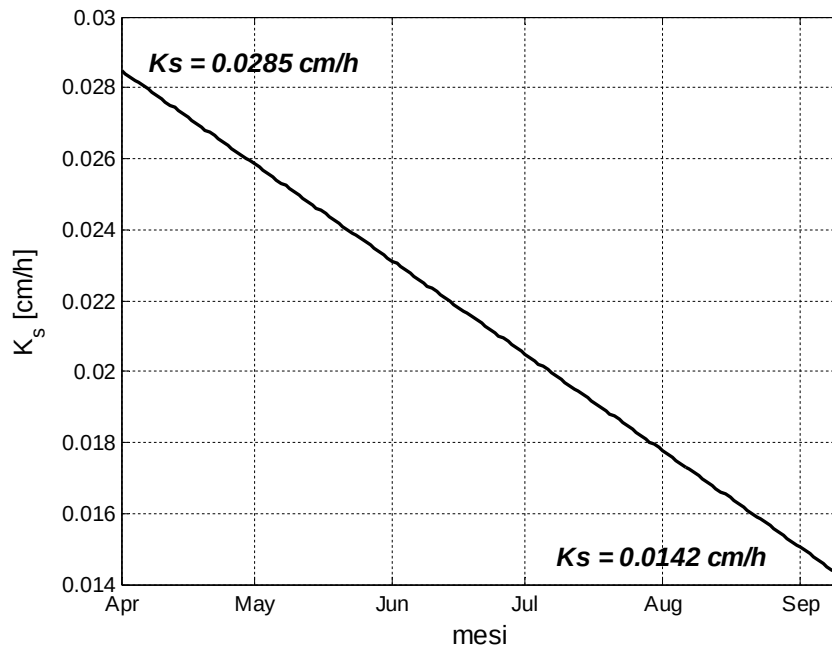


Fig. 29. Legge di riduzione del coefficiente di permeabilità idraulica saturata del terreno durante la stagione irrigua.

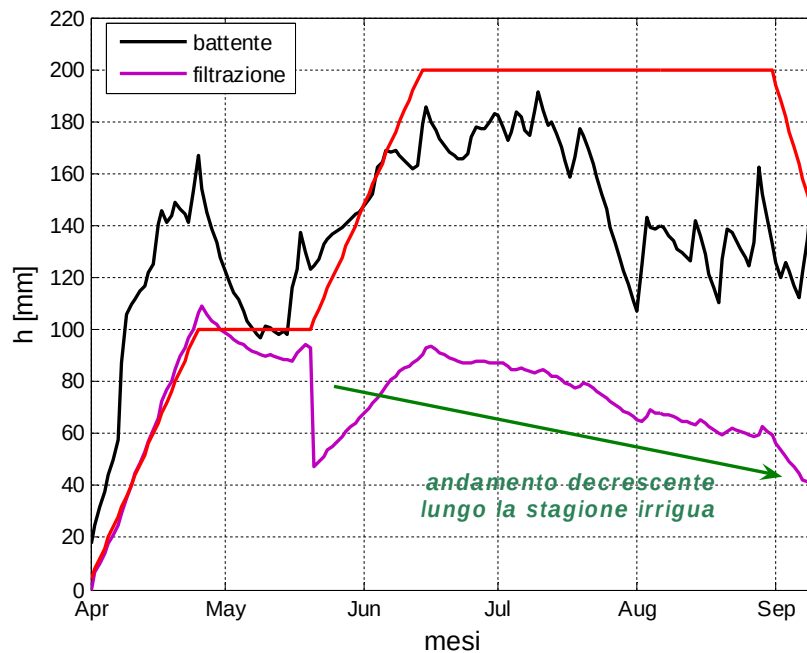


Fig. 30. Esempio di serie temporale delle perdite per filtrazione che evidenzia l'andamento decrescente lungo la stagione irrigua, in confronto con la curva di stato del livello idrico (anno 2005).

c) Applicazione della filtrazione sulla sola superficie sommersa

La filtrazione è legata alla presenza dell'acqua e quindi il suo effetto deve essere applicato alla sola porzione di superficie sommersa del comprensorio. Per questo motivo la serie temporale della filtrazione è moltiplicata per la curva di estensione dell'area allagata. Come si nota dalla Figura 30 tali perdite mostrano una rapida decrescita a metà maggio, dovuta alla netta riduzione della superficie irrigata a causa dei trattamenti al terreno (Figura 7).

4.2.5 Volumi in uscita – Q_u – e volumi in ingresso - Q_i

Secondo quanto introdotto nel Capitolo 2, i volumi in ingresso al comprensorio sono pari alla somma dei volumi efficaci Q_e e dei volumi di transito Q_{Tr} , mentre quelli in uscita sono dati dalla quota Q_{Tr} e dalla frazione di precipitazione sfiorata P_s . In questa fase della modellazione, indirizzata alla ricostruzione dei bilanci in anni recenti, in cui le principali grandezze sono state misurate, i volumi in ingresso e in uscita sono grandezze monitorate in specifici nodi del reticolo idrografico e pertanto non sono modellati. I risultati che si ottengono sono di tipo diagnostico, cioè descrittivi delle situazioni effettivamente riscontrabili sul comprensorio e dedotte dalla misurazione delle portate influenti e defluenti, dal monitoraggio delle precipitazioni e dalla stima delle grandezze incognite (evapotraspirazione e filtrazione).

4.3 Risultati del modello: confronti con i dati relativi alle stagioni esaminate

L'equazione (1) del bilancio idrico è stata applicata, su tutto il comprensorio, a serie storiche osservate di volumi in ingresso e in uscita (in mm), altezze di afflusso meteorico e temperature minime e massime giornaliere per determinare la curva di stato dell'altezza idrica media sul comprensorio e le relative condizioni nelle quali si sono trovate le colture irrigue.

Le tabelle seguenti riassumono le varie componenti del bilancio idrologico e la curva ricostruita dei livelli idrici ottenuta dal modello confrontata con la curva obiettivo dei livelli idrici. E' ovvio che tanto più la curva ricostruita si discosta da quella teorica, tanto maggiore è la situazione di deficit idrico.

Dall'analisi dei risultati ottenuti risultano evidenti i vantaggi derivanti dall'adottare una scala temporale di dettaglio giornaliero. Gli anni 2005, 2007 e 2008 presentano un volume di precipitazione dal 1 aprile al 10 settembre di entità simile (Tabella 8), ma con diversa distribuzione temporale. Questo determina altezze idriche e quindi fabbisogni differenti: nel 2005 l'altezza di acqua si mantiene elevata fino a settembre, grazie all'apporto delle piogge estive; nel 2007 dall'inizio di agosto si assiste ad un progressivo abbassamento del livello a causa di una minore incidenza delle piogge estive. L'anno 2008 ha un totale stagionale prossimo a quello del 2007, ma la curva di stato si mantiene a valori elevati fino alla fine della stagione, come quella del 2005. Tale comportamento deriva dalla distribuzione delle piogge simile per gli anni 2005 e 2008. Nel 2008 si osserva un maggior apporto meteorico nel mese di giugno, che determina livelli superiori a quelli del 2005 mantenuti poi fino a settembre (Figure 30 e 31).

Tra gli anni esaminati, il 2006 è quello maggiormente caratterizzato da scarsità idrica soprattutto in termini di precipitazioni. Dall'inizio di giugno fino a metà agosto le piogge sul comprensorio sono state scarse così come le portate nei fiumi: infatti, se negli anni 2005 e 2007 i volumi in ingresso presentano una riduzione dai primi giorni di luglio, per l'anno 2006 tale diminuzione inizia un mese prima (Figura 33). Il risultato è un progressivo abbassamento del livello idrico medio sul terreno fin dal mese di giugno. Nel periodo estivo il livello medio si riduce ulteriormente, mostrando puntuali risalite solamente in corrispondenza degli eventi di precipitazione. Di particolare importanza è stata la pioggia di

metà agosto che ha permesso di raggiungere un livello medio sufficiente a salvare almeno una parte del raccolto.

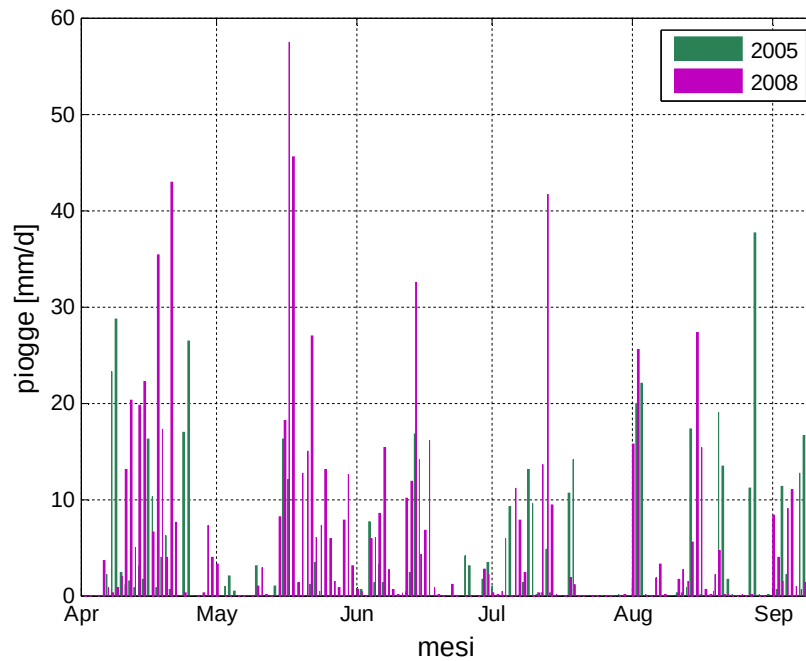


Fig. 31. Confronto tra la serie temporale delle piogge per gli anni 2005 e 2008.

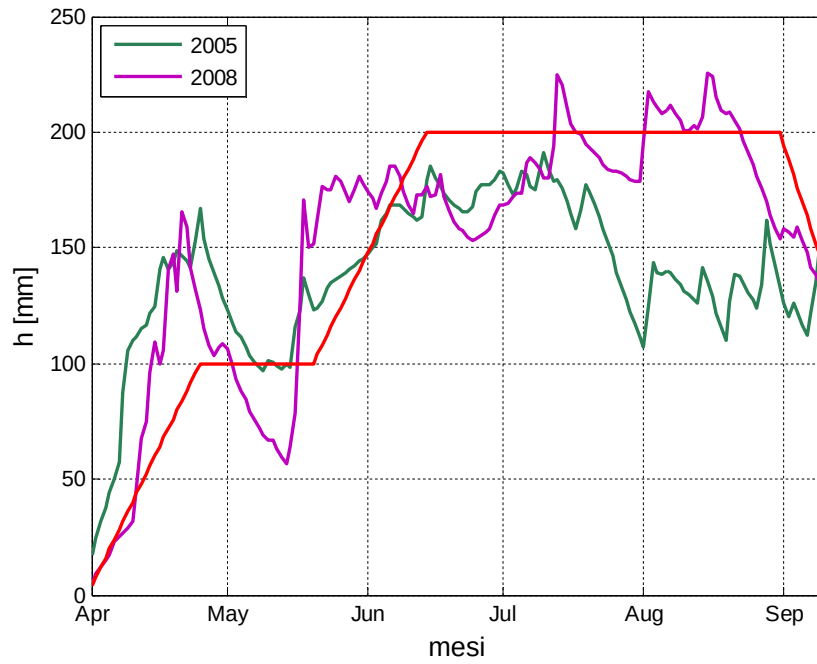


Fig. 32. Confronto tra la curva di stato dei livelli idrici per gli anni 2005 e 2008.

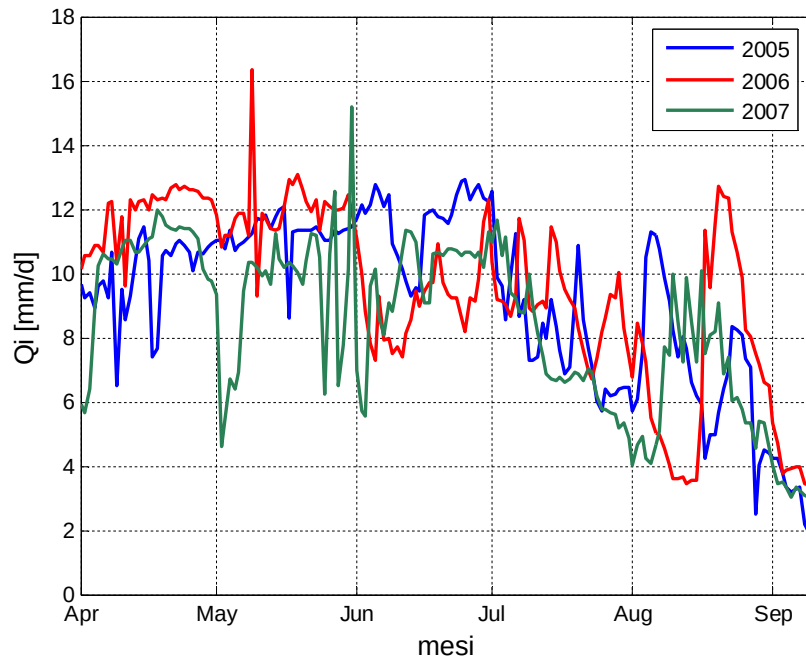
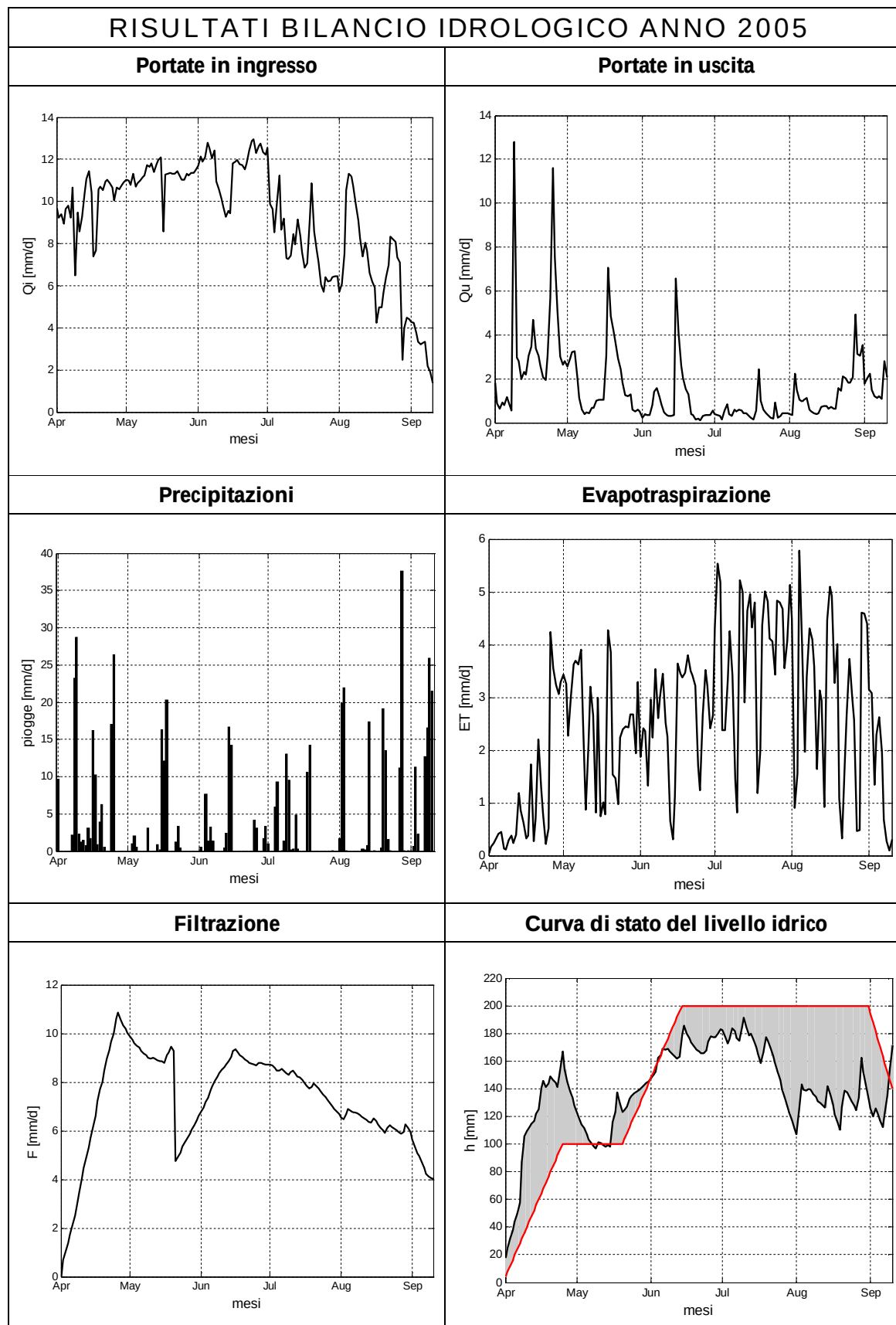


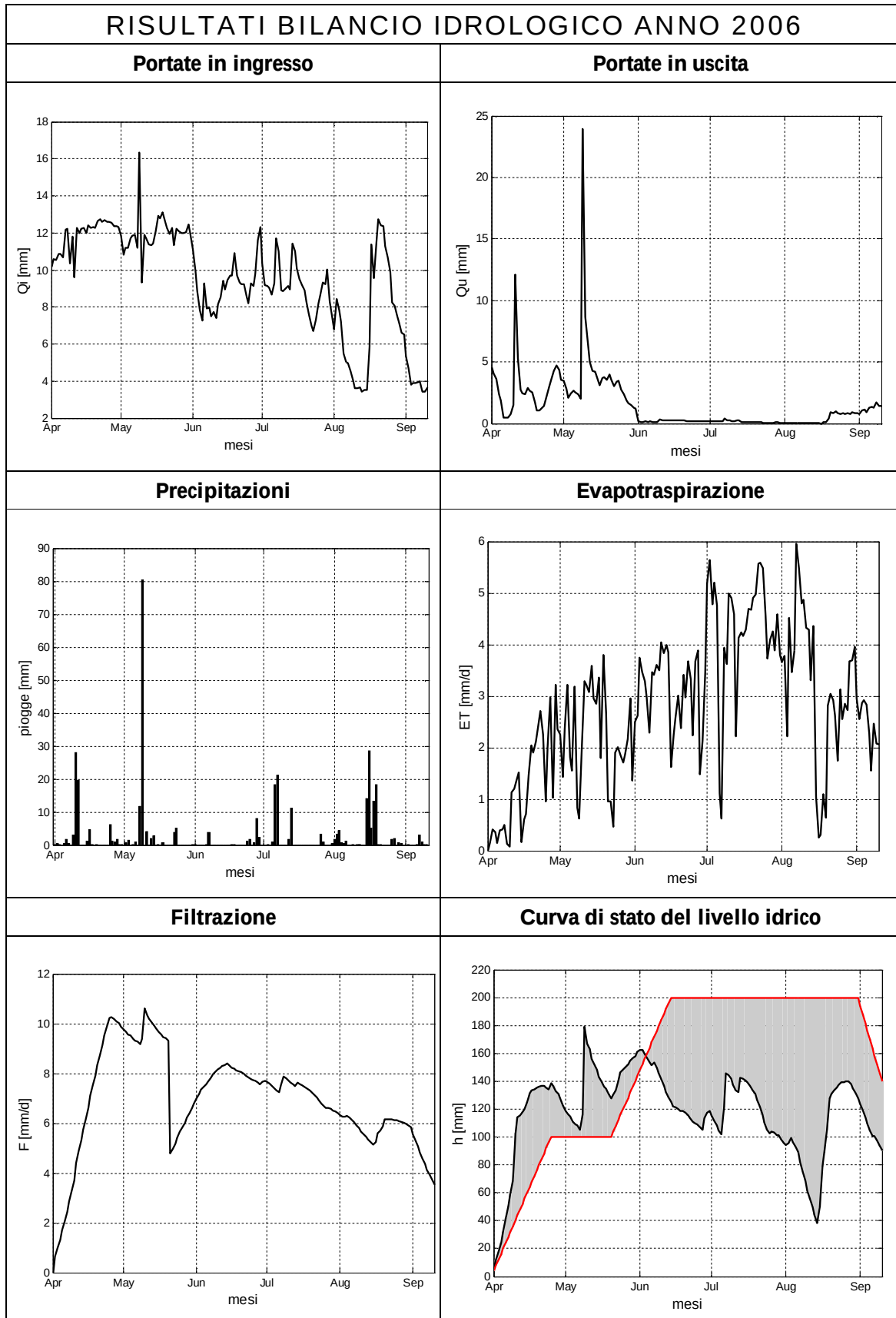
Fig. 33. Confronto tra le serie temporali dei volumi in ingresso per gli anni 2005, 2006 e 2007.

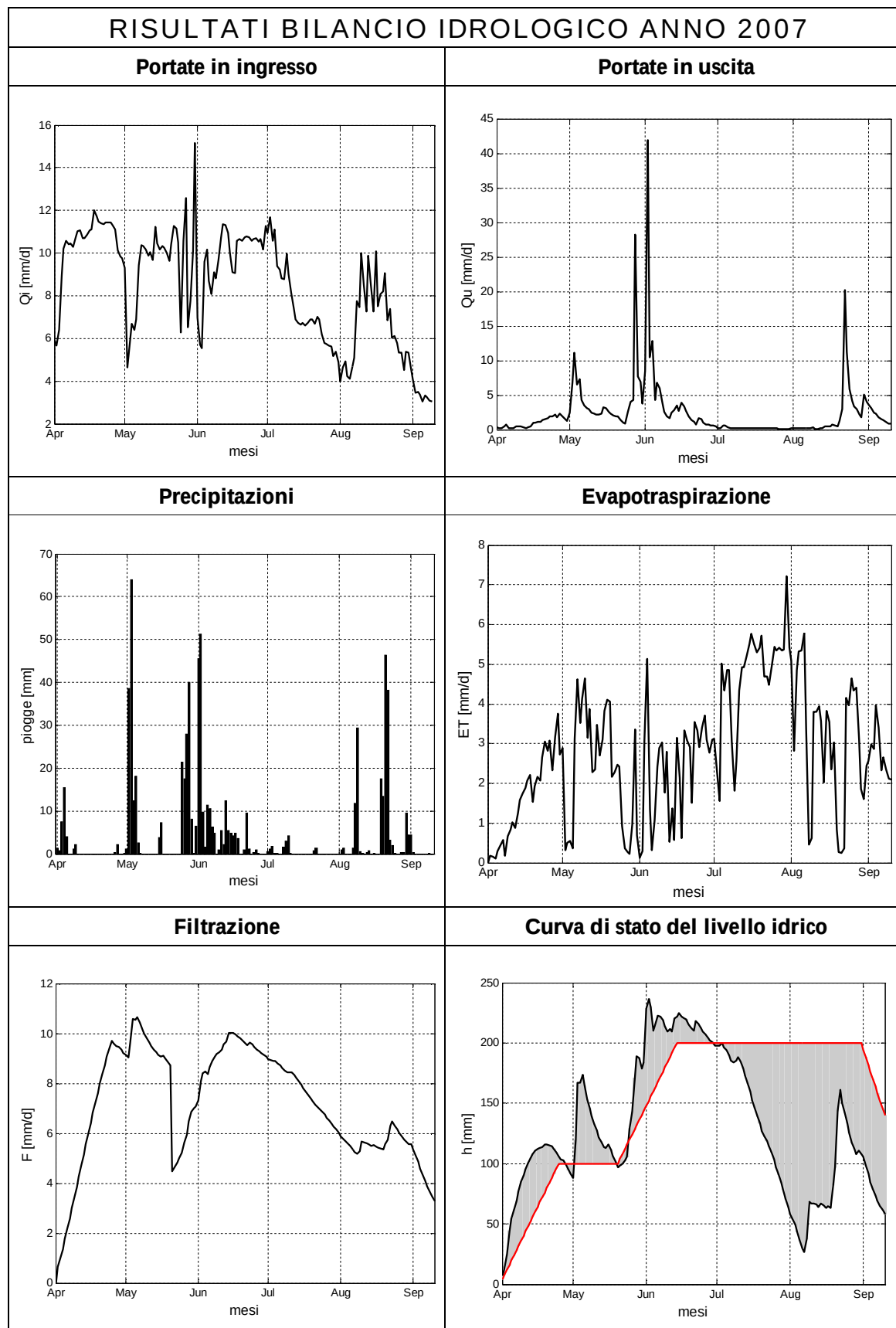
Osservando le curve di stato dei livelli idrici ottenute dal modello si può notare come in alcuni casi l'altezza reale superi quella teorica. Tale fatto avviene solitamente in corrispondenza di:

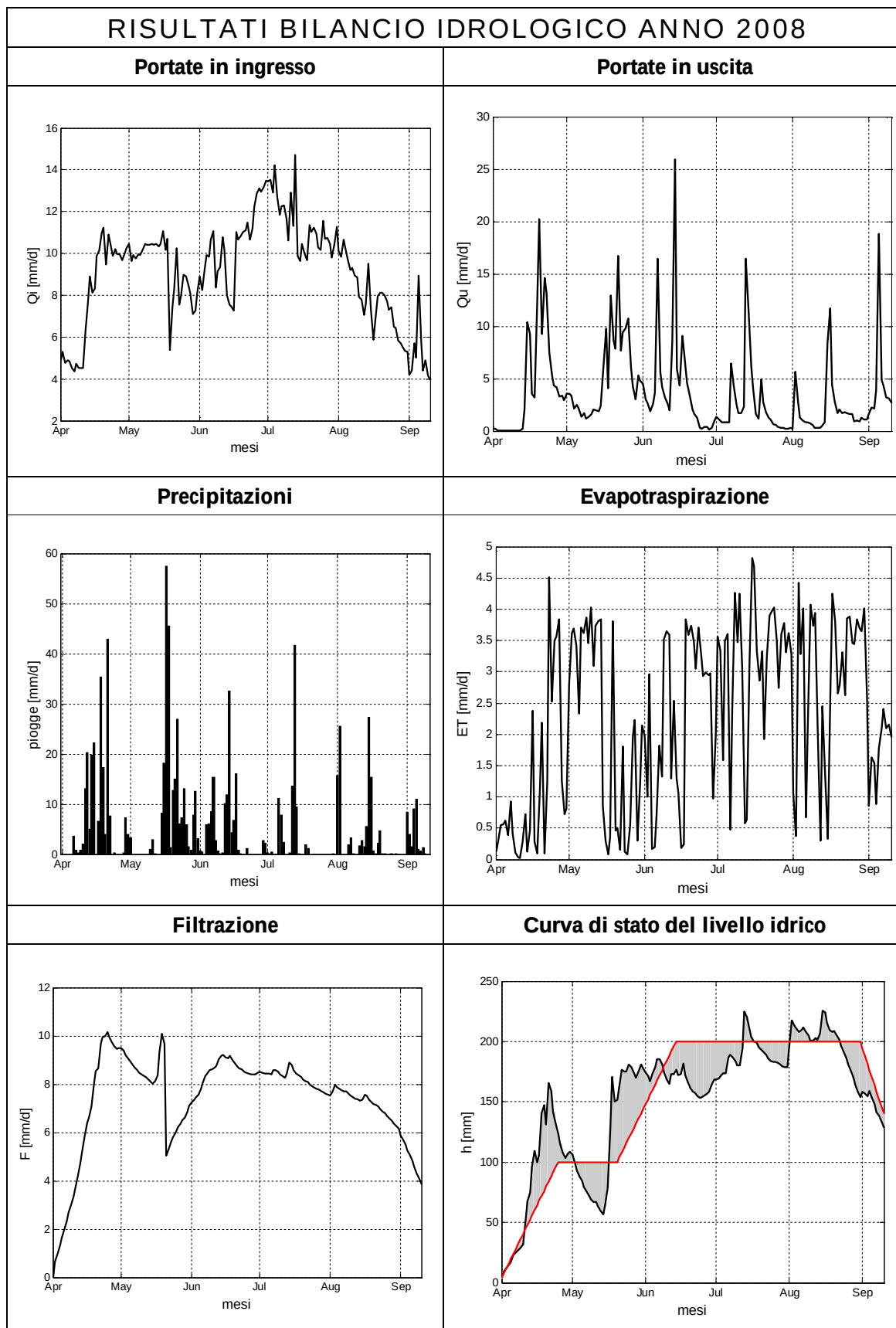
- inizio della stagione irrigua, durante la quale si immettono grandi volumi, ma le superfici da irrigare sono di dimensione limitata e pertanto le perdite per evapotraspirazione e per filtrazione sono ridotte. Inoltre, essendo il livello medio molto basso, è possibile accumulare sul comprensorio grandi quantità di volumi di pioggia;
- eventi di precipitazione particolarmente intensi o di lunga durata durante i periodi stazionari, cioè quando le risaie sono allagate e alla loro massima capacità di invaso. In questo caso, di cui si nota chiaramente un esempio nei mesi di luglio e agosto del 2008, i picchi hanno forma molto stretta, a dimostrazione di come il volume caduto durante l'evento di pioggia (rapida salita del livello) venga quasi immediatamente scaricato dal comprensorio (immediata discesa del livello).

Il superamento dell'altezza teorica può essere visto come un immagazzinamento temporaneo di un volume che permette, nelle fasi successive, una riduzione nell'immissione di nuovi volumi, fase descritta da una curva decrescente del livello immediatamente dopo il superamento.









5 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO IRRIGUO

5.1 Definizione del fabbisogno irriguo del comprensorio risicolo

In un comprensorio coltivato a riso con la tecnica della sommersione continua, il bilancio idrico determina condizioni ottimali quando la differenza tra i volumi entranti e uscenti, in aggiunta all'apporto meteorico e al netto delle perdite per evapotraspirazione e filtrazione, genera un livello idrico sul campo tale da garantire le migliori condizioni di crescita delle piante. In generale, la stima del fabbisogno deve dunque tenere conto del complesso equilibrio tra le perdite dovute all'evapotraspirazione e alla filtrazione, l'accumulo di risorsa in termini di volume immagazzinato sul comprensorio, ed il contributo, sia esso efficace o sfiorato, delle precipitazioni (vedi equazioni dalla 1 alla 3).

E' qui necessario introdurre alcune definizioni basilari relativamente al concetto di fabbisogno. Nel seguito del lavoro verranno definiti:

- a) Fabbisogno Totale (nel seguito indicato con il simbolo R): la quantità totale di risorsa idrica che deve essere prelevata dai corpi idrici al fine di raggiungere e mantenere durante la stagione le condizioni colturali ottimali. Da questa definizione di fabbisogno e dalle relazioni presentate nel Capitolo 2 è possibile riconoscere che il fabbisogno totale equivale ai volumi in ingresso Q_i ;
- b) Fabbisogno Irriguo (R_i): la quota parte di risorsa idrica che deve essere fornita ai campi coltivati allo scopo di garantire il bilancio idrico ottimale. A questa definizione di fabbisogno irriguo è possibile associare i volumi in ingresso efficaci Q_e ;
- c) Fabbisogno netto (R_N), la differenza tra i volumi prelevati e quelli restituiti ai corsi d'acqua. R_N rappresenta il consumo effettivo di risorsa idrica superficiale da parte del comprensorio e può essere assimilato alla differenza $Q_i - Q_u$ descritta nel Capitolo 2.

In particolare, utilizzando le relazioni dalla 1 alla 4 si può scrivere:

$$R(i) = ET(i) + F(i) + Q_{Tr}(i) - P_e(i) + \Delta V(i) \quad (19)$$

$$R_I(i) = ET(i) + F(i) - P_e(i) + \Delta V(i) \quad (20)$$

$$R_N(i) = ET(i) + F(i) - P(i) + \Delta V(i) \quad (21)$$

Si noti che la differenza tra le definizioni di fabbisogno totale ed irriguo consiste solo nel termine Q_{Tr} corrispondente ai volumi in transito nel compresorio. In particolare, mentre R_I tiene solo in conto della quantità d'acqua strettamente necessaria al bilancio ottimale a scala di campo, la grandezza R , comprendendo i volumi in transito, caratterizza i fabbisogni a scala di compresorio. E' facile verificare come il fabbisogno totale sia più rispetto agli altri, risultando dipendente dal termine Q_{Tr} , volume che, si ribadisce, viene restituito interamente a valle.

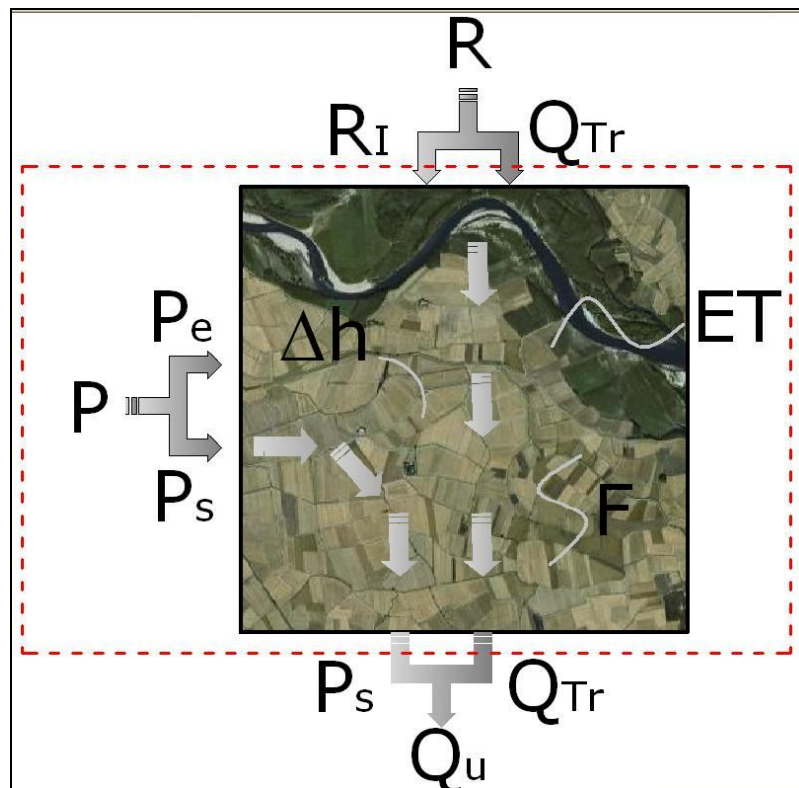


Fig. 34. Componenti del fabbisogno irriguo del compresorio risicolo.

Le espressioni del fabbisogno sopra riportate altro non sono che la generalizzazione di quelle comunemente adottate per un generico sistema agricolo coltivato con pratiche differenti dalla sommersione permanente. Nei sistemi tradizionali, infatti, il calcolo del fabbisogno presuppone un completo utilizzo dell'acqua fornita alle piante, situazione che comporta necessariamente volumi in uscita nulli e assenza di piogge sfiorate. Inoltre, non essendoci necessità di mantenere un battente, anche i volumi immagazzinati sono nulli. Conseguentemente, nei sistemi classici le tre espressioni coincidono e si ha che

$$R(i) = R_I(i) = R_N(i) = ET(i) + F(i) - P(i) \quad (22)$$

Nel caso di un complesso risicolo coltivato con la sommersione continua, oltre alla necessità di mantenere battenti adeguati, solo una parte della precipitazione può essere utilizzata (P_e). Inoltre, devono essere sempre garantiti dei volumi in transito (Q_{Tr}) che non sono direttamente impiegati nel soddisfacimento del fabbisogno irriguo e possono provenire indirettamente dallo svuotamento delle risaie per pratiche colturali oppure direttamente dai volumi in ingresso.

Nella definizione di fabbisogno totale (equazione (19)) si possono individuare i due contributi fondamentali del fabbisogno di un sistema irrigato a sommersione permanente:

- $R_1 = ET(i) + F(i) - P_e(i)$: rappresenta la classica formulazione del fabbisogno irriguo ed equivale alla frazione di esigenza idrica della pianta che non riesce a essere soddisfatta dall'apporto meteorico;
- $R_2 = \Delta V(i) + Q_{Tr}(i)$: è la quota caratteristica da aggiungere a R_1 per le coltivazioni a sommersione continua ed indica i volumi necessari al raggiungimento di un determinato battente idrico sul campo ed a quelli tecnici legati ai trattamenti ed al mantenimento di un battente adeguato nella rete irrigua di distribuzione.

5.2 Descrizione del modello di calcolo

Il principio portante del modello per il calcolo del fabbisogno è la ricostruzione delle serie temporali dei volumi in ingresso che garantiscano l'ottimale andamento del battente idrico sul comprensorio. Tale battente è chiamato "curva obiettivo dei livelli idrici" ed è descritto nel Paragrafo 2.2.2. In particolare, in base al volume apportato dalle precipitazioni efficaci ed al relativo livello idrico raggiunto sul comprensorio (tenendo sempre in conto le perdite per filtrazione ed evapotraspirazione) è possibile stimare il fabbisogno irriguo necessario al raggiungimento della curva obiettivo. Sommando al fabbisogno irriguo le portate in transito è possibile stimare il fabbisogno totale. L'individuazione della quota di precipitazione efficace non è però immediata, ma richiede un approfondito studio delle pratiche agricole adottate nel comprensorio. Infatti, in funzione del livello del battente comunemente mantenuto sul comprensorio, all'altezza degli argini, alla posizione degli organi di sfioro ed alla relativa gestione, la quota parte di pioggia efficace può essere estremamente variabile e può impattare sensibilmente, di conseguenza, sul fabbisogno irriguo.

Facendo riferimento alla definizione del fabbisogno totale

$$R(i) = ET(i) + F(i) + Q_{Tr}(i) - P_e(i) + \Delta V(i) \quad (23)$$

è utile riassumere le caratteristiche e la modalità di ricostruzione dei singoli termini:

- la serie temporale delle perdite per evapotraspirazione ET, essendo indipendente dal battente idrico presente sul campo, coincide con quella introdotta nel bilancio idrologico (vedi Paragrafo 4.3.3). L'evapotraspirazione infatti tiene conto solamente della reale densità fogliare delle piante di riso e dell'entità della radiazione solare assorbita col riscaldamento dell'acqua in risaia. Per tutti i casi di carenza idrica si tenga conto che quest'ultimo termine interviene a vantaggio di sicurezza, in quanto riduce la frazione di energia che è destinata all'evaporazione vera e propria.
- le perdite per filtrazione F dipendono, come descritto nei capitoli precedenti, dalle caratteristiche del terreno e dal battente idrico raggiunto sul comprensorio. Sebbene

le caratteristiche del terreno siano descritte con gli stessi parametri introdotti nel bilancio idrologico, il battente è ora imposto dalla curva obiettivo e non è più variabile. In particolare, per definizione, la curva dei livelli obiettivo è quasi sempre superiore ai livelli realmente raggiunti nel comprensorio e descritti nel Capitolo 4. Ciò comporta che il contributo delle perdite per filtrazione è sempre maggiore nel caso del calcolo del fabbisogno. A titolo di esempio si riporta in Figura 35 il confronto tra un esempio di serie temporale delle perdite per filtrazione derivanti dal bilancio idrologico e quelle ottenute nel calcolo del fabbisogno.

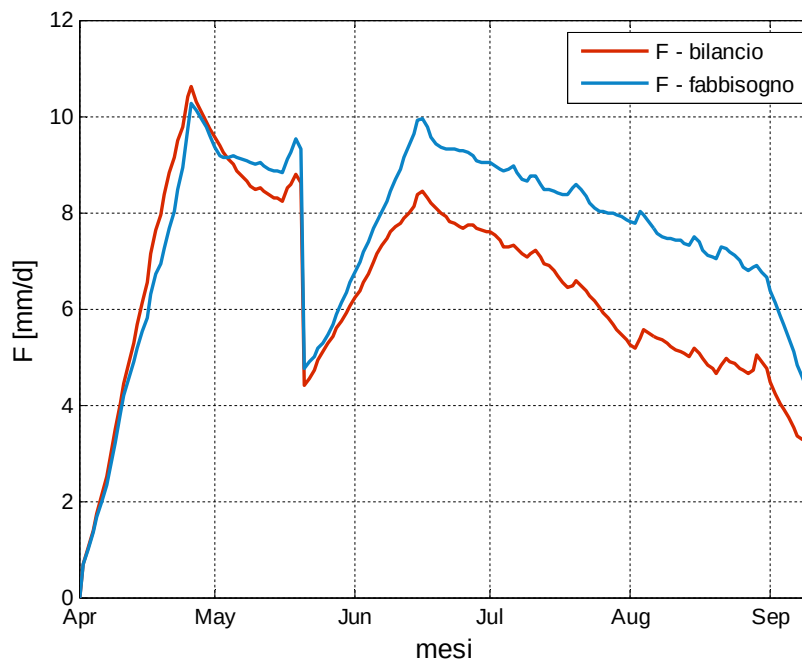


Fig. 35. Confronto tra serie temporali di filtrazione utilizzate nel bilancio idrologico e nel calcolo del fabbisogno (anno 2005).

- il termine ΔV esprime i volumi necessari al riempimento e al mantenimento di un adeguato battente nelle camere di risaia ed è la frazione di fabbisogno caratteristica delle coltivazioni a sommersione. Nel modello esso rappresenta il termine cruciale per il raggiungimento e mantenimento della curva obiettivo dei livelli idrici;

- i volumi in transito sul comprensorio Q_{Tr} comprendono i volumi necessari al mantenimento di un tirante idrico adeguato nella rete di distribuzione e quelli necessari per il ricambio d'acqua nelle camere di risaia. I volumi di transito sono stimati dal battente raggiunto giornalmente secondo la relazione $Q_{Tr}(i) = \omega \cdot h(i)$, dove ω è un coefficiente che è stato modellato utilizzando un andamento linearmente decrescente durante la stagione irrigua (Figura 36) e tarato sui volumi in uscita relativi all'anno 2008. Tale scelta si basa sull'analisi, come evidenziato nei paragrafi successivi, delle serie temporali misurate in uscita dal comprensorio negli anni usati come riferimento. In particolare si rileva come che nei primi mesi della stagione i trattamenti colturali dei campi giochino un ruolo fondamentale nella quantificazione di Q_{Tr} . Diversamente, nei mesi finali i trattamenti ed i valori di portata nella rete di canali decrescono fino a divenire nulli. Un esempio di serie temporale di volumi di transito è riportato nella Figura 37.

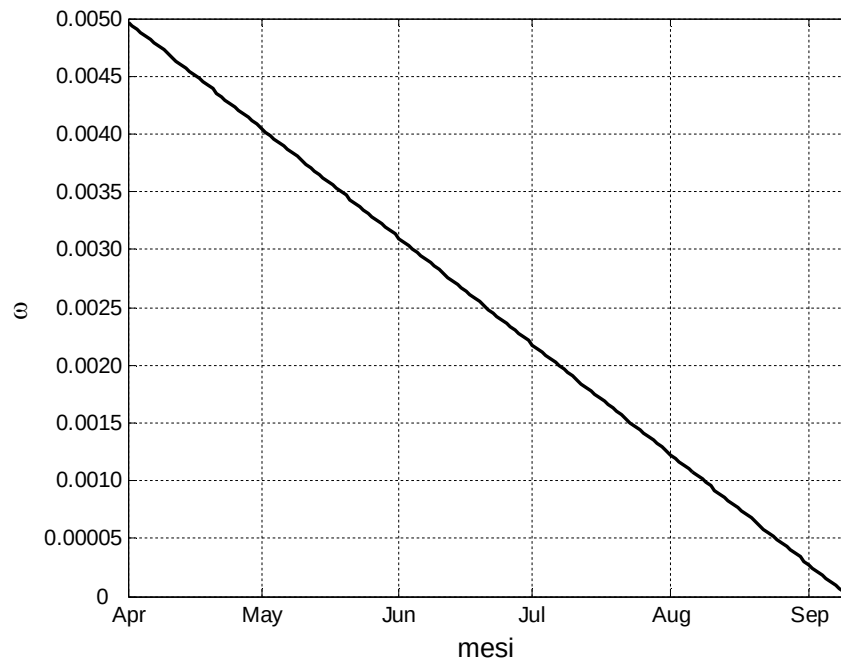


Fig. 36. Coefficiente di definizione dei volumi di transito.

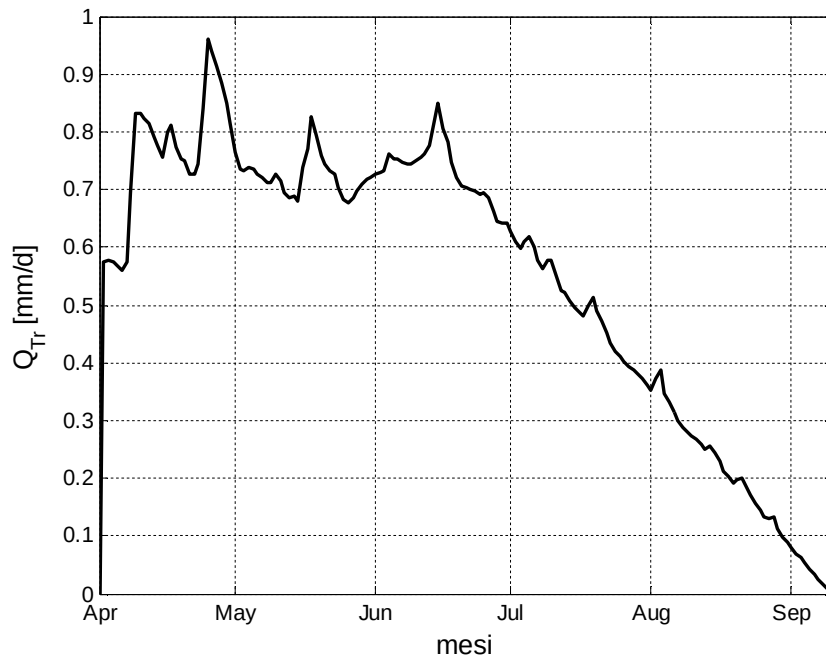


Fig. 37. Esempio di serie temporale dei volumi di transito (anno 2005).

- L'utilizzo del modello per il calcolo del fabbisogno si differenzia sostanzialmente da quello per il calcolo del bilancio idrico. Infatti, nel caso del fabbisogno le portate in uscita dal comprensorio non sono note ma devono essere desunte dalla stima delle piogge efficaci e di quelle sfiorate. In particolare, la quota di pioggia efficace P_e deve essere stimata come quota complementare delle portate sfiorate dalle camere di risaia a causa del raggiungimento del massimo valore di invaso. La determinazione della P_s , e di conseguenza di P_e , richiede un approfondito studio delle pratiche irrigue adottate nel comprensorio. Osservando l'andamento temporale delle piogge e delle portate in uscita misurate nel campo prova di Lenta (Figura 38) si nota una forte correlazione tra le due serie. In particolare, immediatamente dopo ogni evento di pioggia si ha generalmente un picco di portata scaricata. Inoltre, il volume delle precipitazioni è sempre superiore al volume in uscita, a dimostrazione del fatto che almeno una parte della pioggia è sempre impiegata per alzare il battente all'interno delle camere di risaia. Inoltre, è lecito ipotizzare che il volume di un evento di precipitazione primaverile possa essere immagazzinato, contribuendo così alla fase di

allagamento delle risaie. Diversamente, la pioggia estiva incontra situazioni nelle quali si è già raggiunto il livello obiettivo. E' quindi lecito ritenere che possa essere scaricata quasi totalmente.

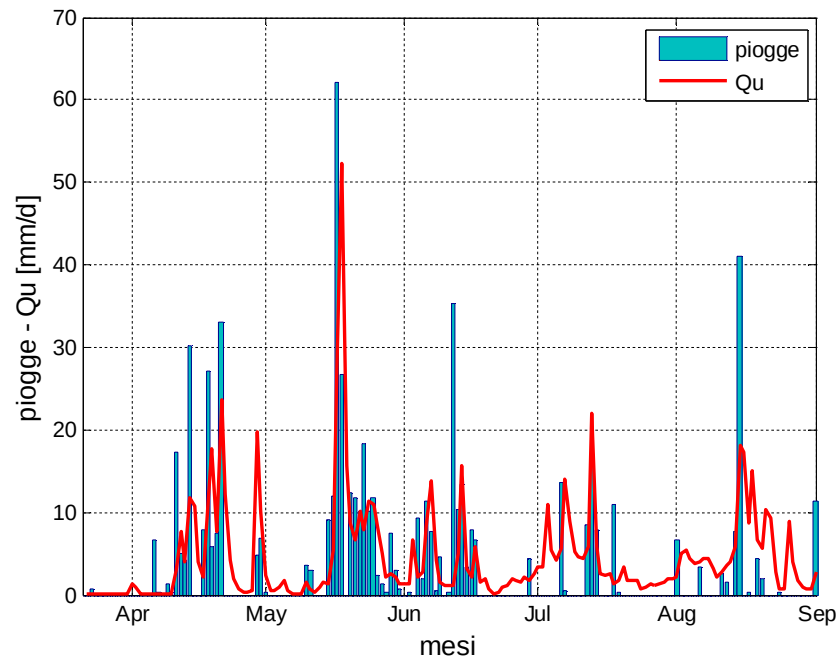


Fig. 38. Eventi di precipitazione e picchi di portata in uscita dal campo prova di Lenta.

Sulla base di queste considerazioni, sono stati definiti due particolari periodi che caratterizzano il diverso utilizzo delle precipitazioni durante la stagione irrigua:

Fase 1: sommersione iniziale

Nei mesi primaverili i campi sono progressivamente allagati e l'intervento delle piogge è fondamentale nella fase di riempimento delle camere poiché permette di ridurre il prelievo di acqua dai fiumi principali. In questa fase quindi il volume di afflusso meteorico è accumulato nelle camere di risaia fino al raggiungimento di un determinato livello. Un evento di pioggia che crea un elevato battente sul campo determina una progressiva chiusura delle bocche di ingresso al compresorio che dipende dall'importanza dell'evento

di precipitazione: tanto maggiore è il volume apportato dalla pioggia, tanto maggiore è la riduzione del flusso in ingresso. Si noti che questa analisi è valida solo a scala di comprensorio. A scala puntuale le camere ancora vuote si riempiono parzialmente, mentre quelle già piene sfioreranno i volumi meteorici in ingresso. Nondimeno, eventuali sfiori in camere già allagate possono essere recuperati a valle nei prelievi necessari per camere ancora vuote.

Fase 2: livello idrico in risaia costante

Nel periodo estivo il livello idrico nelle risaie dovrebbe essere mantenuto, per definizione, costante e pari a quello ottimale. Si ipotizza, inoltre, che siano possibili piccoli innalzamenti del livello utili all'accumulo di preziose porzioni del volume della precipitazione. Al fine di evitare il collasso degli argini delle risaie, al superamento del livello critico la pioggia in eccesso è scaricata nei fossi di raccolta. Inoltre, come detto in precedenza, il modello considera che ad ogni evento di precipitazione sia associata una riduzione del flusso in ingresso.

Dall'analisi delle pratiche agricole e dall'osservazione dei battenti reali ricostruiti dal modello del bilancio idrologico sono stati individuati due livelli caratteristici che permettono di discriminare il differente impiego del volume di afflusso meteorico durante la stagione irrigua. Questi livelli definiscono una soglia di pioggia che schematizza le due fasi appena introdotte ed è descritta dai seguenti valori (Figura 39):

- *Fase 1:* detto $S1$ il livello obiettivo, $\Delta1$ è l'incremento massimo di livello consentito durante la fase primaverile. Esso è molto ampio poiché la capacità di accumulo delle risaie, essendo esse non ancora completamente riempite, è molto elevata. Il valore di $\Delta1$ è stimato dalle curve di stato dei livelli idrici ricostruite con il modello del bilancio idrologico. Il livello critico raggiunto sommando $\Delta1$ a $S1$ è detto $S2$;
- *Fase 2:* $\Delta2$ è l'incremento massimo di livello consentito durante la fase estiva. Questo termine è relativamente modesto essendo le risaie ormai piene. $\Delta2$ può essere stimato assumendo che sia possibile accumulare una quantità in eccesso di risorsa idrica prima che la coltura o gli argini della risaia possano presentare delle criticità legate al superamento del battente ottimale.

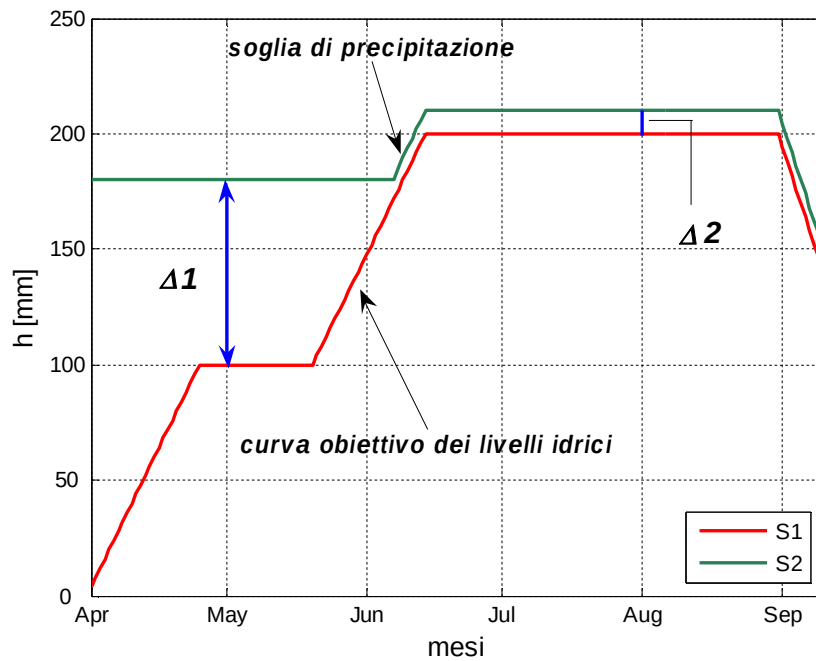


Fig. 39. Curva obiettivo dei livelli di risorsa e soglia di precipitazione.

I valori $\Delta 1$ e $\Delta 2$ da usare nel modello devono essere stimati dall'osservazione del comportamento reale dei battenti ricostruiti dal modello di bilancio idrologico e dallo studio delle pratiche agricole adottate nel comprensorio.

Ricordando che il livello idrico che si vuole raggiungere e mantenere è quello obiettivo ($S1(i)$), è possibile modellare il livello idrico di primo tentativo come quello raggiunto sommando all'altezza idrica del giorno precedente le precipitazioni totali ed i termini di evapotraspirazione e filtrazione.

$$h(i,1) = h(i-1) + P(i) - ET(i) - F(i) \quad (24)$$

Successivamente si definiscono i valori di portata in ingresso Q_e (pari al fabbisogno irriguo R_i) e in uscita Q_u in funzione di uno dei tre seguenti casi in cui il battente viene a trovarsi:

- $h(i,1) < S1(i)$: essendo il livello idrico inferiore a quello ottimale è necessario introdurre sul comprensorio un volume netto di entità tale da consentire di

raggiungere il livello obiettivo, pari a $Q_e(i) = S1(i) - h(i)$. E' chiaro che in questo caso l'intero volume di pioggia è immagazzinato ($P_s(i) = 0$) ed il flusso in uscita è solo pari alle portate in transito ($Q_u(i) = Q_{Tr}(i)$);

- $S1(i) < h(i,1) < S2(i)$: Il livello raggiunto è superiore a quello ottimale ma inferiore a quello critico. Di conseguenza, le bocche di ingresso vengono chiuse al fine di favorire l'abbassamento del livello fino al valore teorico. Non conoscendo precisamente l'evoluzione delle precipitazioni nei giorni successivi ed essendo l'inerzia della rete di distribuzione molto alta, la chiusura non può essere istantanea. In particolare si assume che ogni giorno si riduca il flusso in ingresso di una percentuale costante del valore in ingresso il giorno precedente: $Q_e(i) = Q_e(i-1) \cdot \beta$ dove $0 < \beta < 1$. Si può ipotizzare un coefficiente $\beta = 0.85$. La totalità del volume della precipitazione è ancora trattenuta e la portata in uscita è ancora pari a quella in transito ($Q_u(i) = Q_{Tr}(i)$). L'abbassamento del livello viene raggiunto grazie alla chiusura delle bocche di immissione dell'acqua sul compresorio ed alle perdite per evapotraspirazione e filtrazione;
- $h(i,1) > S2(i)$: Il livello raggiunto è superiore a quello critico. Come nel caso precedente, il volume in ingresso è ridotto secondo la funzione $Q_e(i) = Q_e(i-1) \cdot \beta$. Diversamente dal punto precedente, in questo caso si attivano anche le bocche di uscita per scaricare dal compresorio una portata sufficiente a riportare il livello idrico sotto il livello di criticità. Risulta pertanto $Q_u(i) = h(i,1) - S2(i) + Q_{Tr}(i)$, con Q_u suddivisa in precipitazioni in eccesso e portate immesse "ad inerzia".

Una volta calcolato il volume teorico in ingresso e in uscita, il livello idrico reale $h(i)$ è pari alla somma di quello di primo tentativo e dei termini Q_e e Q_u ricavati dalla procedura appena descritta: $h(i) = h(i,1) + Q_i(i) - Q_u(i)$.

Con questa procedura è quindi possibile definire giornalmente il valore di volume in ingresso necessario al mantenimento del livello idrico obiettivo. Ricostruite così le serie di valori di volumi in ingresso Q_e e in uscita Q_u si determina la curva del fabbisogno irriguo R_i . In particolare:

- a) avendo assunto il fabbisogno irriguo del comprensorio pari al volume efficace in ingresso, la curva di R_i sarà equivalente alla curva dei valori di Q_e .
- b) sommando giornalmente ai volumi efficaci quelli di transito, si può ricavare l'andamento dei volumi in ingresso Q_i . La curva risultante equivale alla curva dei fabbisogni totali R .
- c) Dalla differenza tra i valori di Q_i e di Q_u si può ricavare il fabbisogno netto R_N .

Dalle considerazioni fin qui riportate risulta ovvio che la principale discriminante nella stima del fabbisogno è la frazione di pioggia efficace. Si possono quindi individuare due casi limite:

- a) $P_e(i) = P(i)$: completo utilizzo del volume delle precipitazioni nel soddisfacimento del fabbisogno. Le risaie hanno sempre spazio sufficiente per assorbire la totalità del volume meteorico;
- b) $P_e(i) = 0$: utilizzo nullo delle precipitazioni, cioè ad ogni evento meteorico le bocche scaricano un volume pari a quello meteorico. Le risaie non hanno mai spazio sufficiente per assorbire il volume di pioggia.

Entrambi i casi non sono realistici, ma sono comunque utili per avere delle indicazioni sull'entità minima e massima del fabbisogno, tenendo conto che quello reale sarà determinato ipotizzando un utilizzo ottimale delle precipitazioni.

5.3 Applicazione del modello

Lo sviluppo del modello per il calcolo del fabbisogno irriguo sull'intero comprensorio richiede la preventiva stima dei valori $\Delta 1$ e $\Delta 2$ che definiscono la soglia di massimo accumulo, parametro fondamentale per distinguere la frazione di precipitazione efficace da quella sfiorata. Per semplicità operativa e di interpretazione dei risultati è utile dapprima studiare i due casi limite precedentemente introdotti, ipotizzando adeguati valori per $\Delta 1$ e $\Delta 2$. In questo modo, seppur tenendo presente che i casi limite studiati non sono rappresentativi della realtà, si possono ottenere delle utili indicazioni sul valore massimo e minimo del fabbisogno. Stimando poi, dalle curve di stato dei livelli idrici e dallo studio delle pratiche irrigue utilizzate dagli agricoltori, dei valori accettabili di S_1 e S_2 si otterrà un valore più realistico di fabbisogno irriguo del comprensorio.

5.3.1 *Condizioni di minimo fabbisogno*

Come comunemente fatto per le usuali pratiche agricole, anche per il comprensorio risicolo si ipotizza un utilizzo completo del volume di afflusso meteorico, cioè

$$P_s(i) = 0 \Rightarrow P_e(i) = P(i). \quad (25)$$

Per conservare nel calcolo del fabbisogno tutti i valori di pioggia, la soglia di precipitazione introdotta nel modello deve essere definita come

$$\Delta 1 = \Delta 2 \rightarrow \infty. \quad (26)$$

Imporre una soglia di pioggia di questo tipo, dal punto di vista fisico, equivale a ipotizzare una capacità infinita delle risaie di immagazzinare l'acqua proveniente dalle piogge: i campi ed i relativi argini hanno sempre lo spazio sufficiente ad accogliere la totalità del volume di afflusso meteorico. Sotto questa condizione si può allora scrivere che

$$\begin{cases} R(i) = ET(i) + F(i) + Q_{Tr}(i) - P(i) + \Delta V(i) \\ Q_u(i) = Q_{Tr}(i) \end{cases} \quad (27)$$

In questa situazione la precipitazione efficace assume i massimi valori, essendo coincidente con la pioggia totale misurata nelle stazioni meteorologiche. Secondo la definizione stessa di fabbisogno, introdurre il massimo valore di pioggia implica ottenere il minimo valore di R .

Le figure che seguono mostrano, per gli anni per i quali ci sono dati, le serie temporali dei volumi in ingresso e in uscita stimati dal modello (Q_i e Q_u stimate), confrontati con quelli reali misurati nelle bocche dislocate sul comprensorio (Q_i e Q_u misurate). Il confronto tende ad evidenziare le situazioni di squilibrio (o deficit) che si sono eventualmente determinate negli anni di disponibilità della misura. Avendo assunto $S_2 = \infty$ non ci sono valori di picco nelle portate ricostruite in uscita ed i picchi si notano solo sui livelli stimati in risaia. Si può ancora notare come a seguito di un rilevante evento piovoso (es. quello a fine luglio 2005) le portate richieste (stimate) in ingresso si riducano significativamente, in base alla regola di chiusura delle bocche di ingresso.

Fig. 40. Curve osservate e stimate – ANNO 2005.

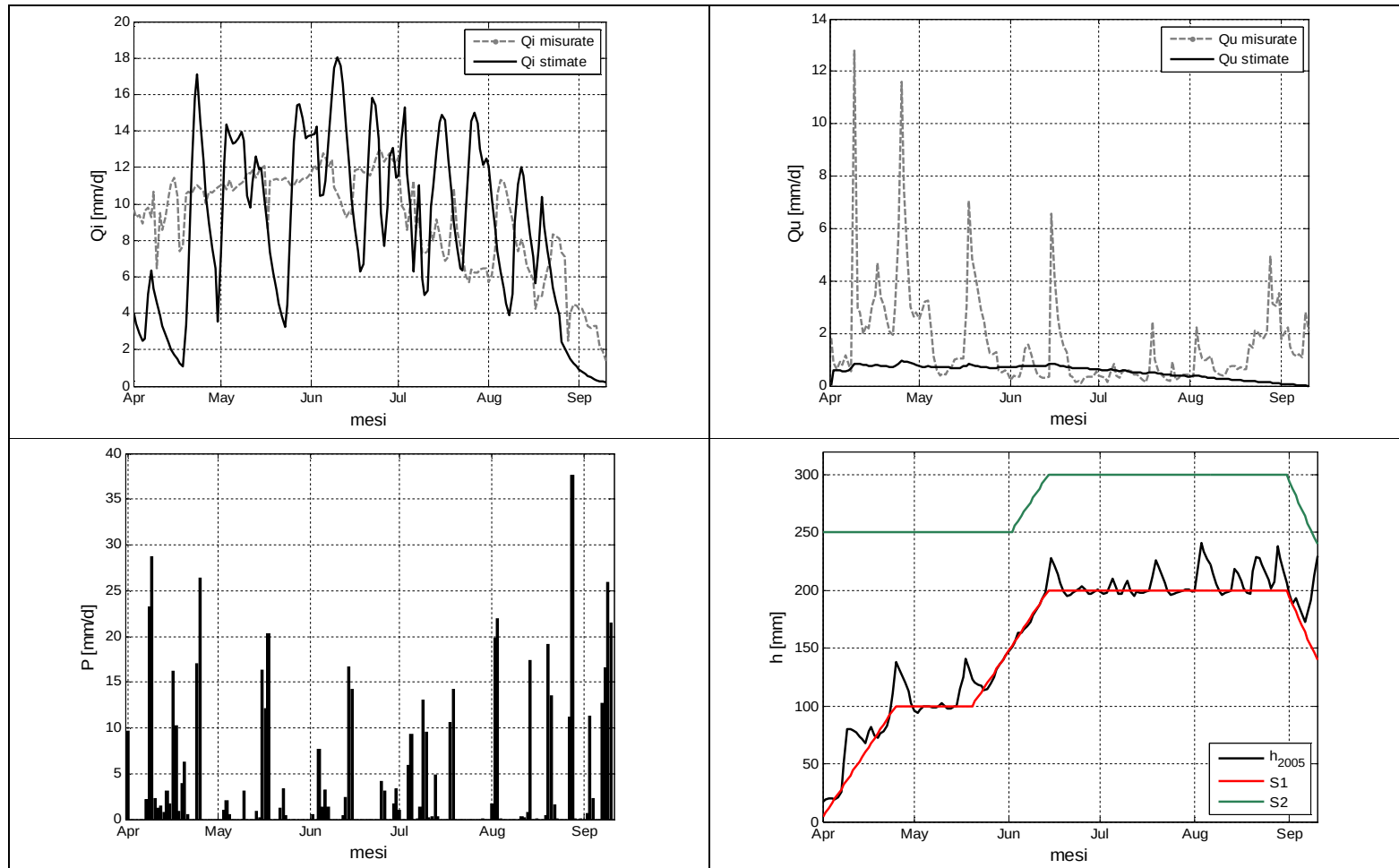


Fig. 41. Curve osservate e stimate – ANNO 2006.

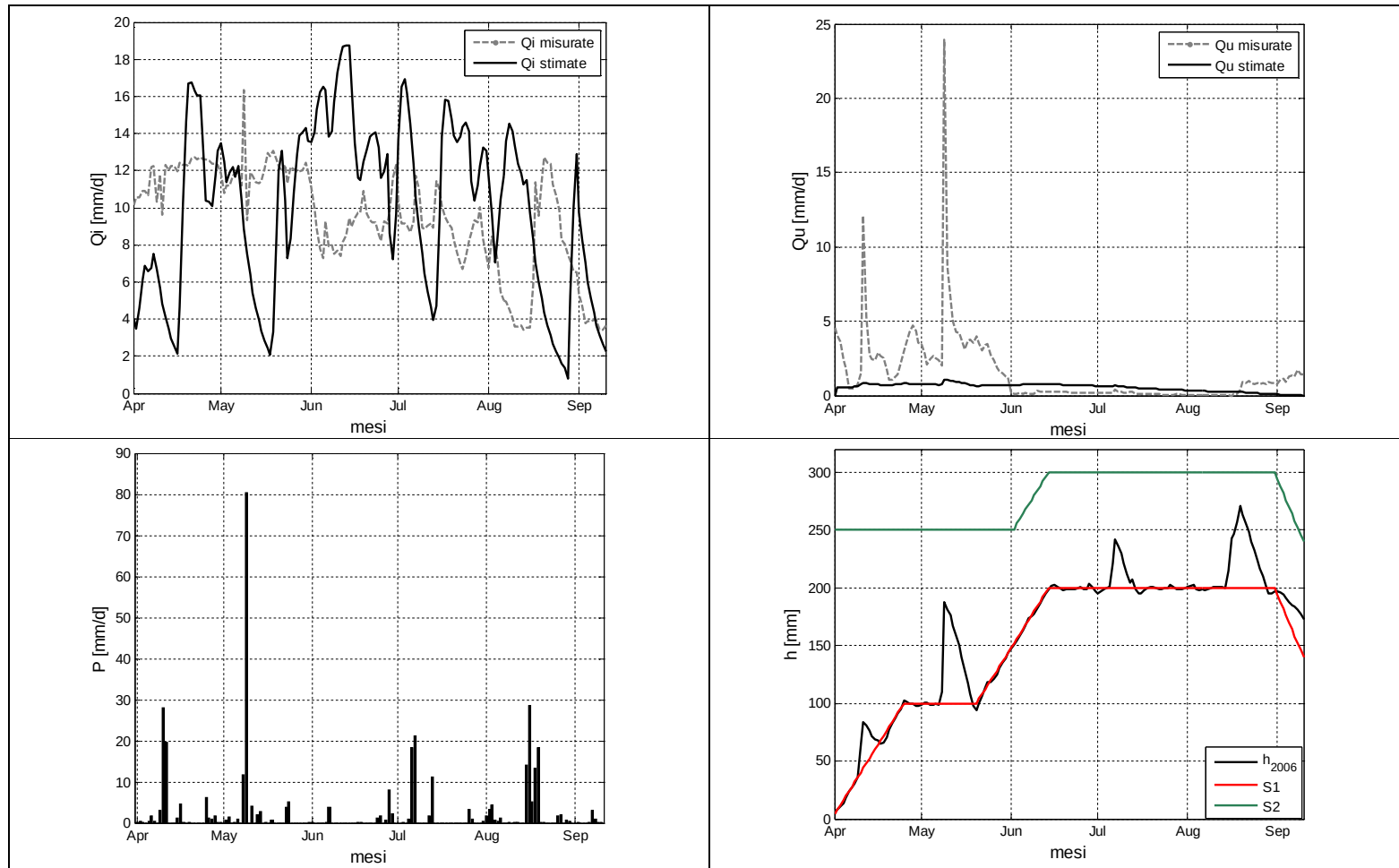


Fig. 42. Curve osservate e stimate – ANNO 2007.

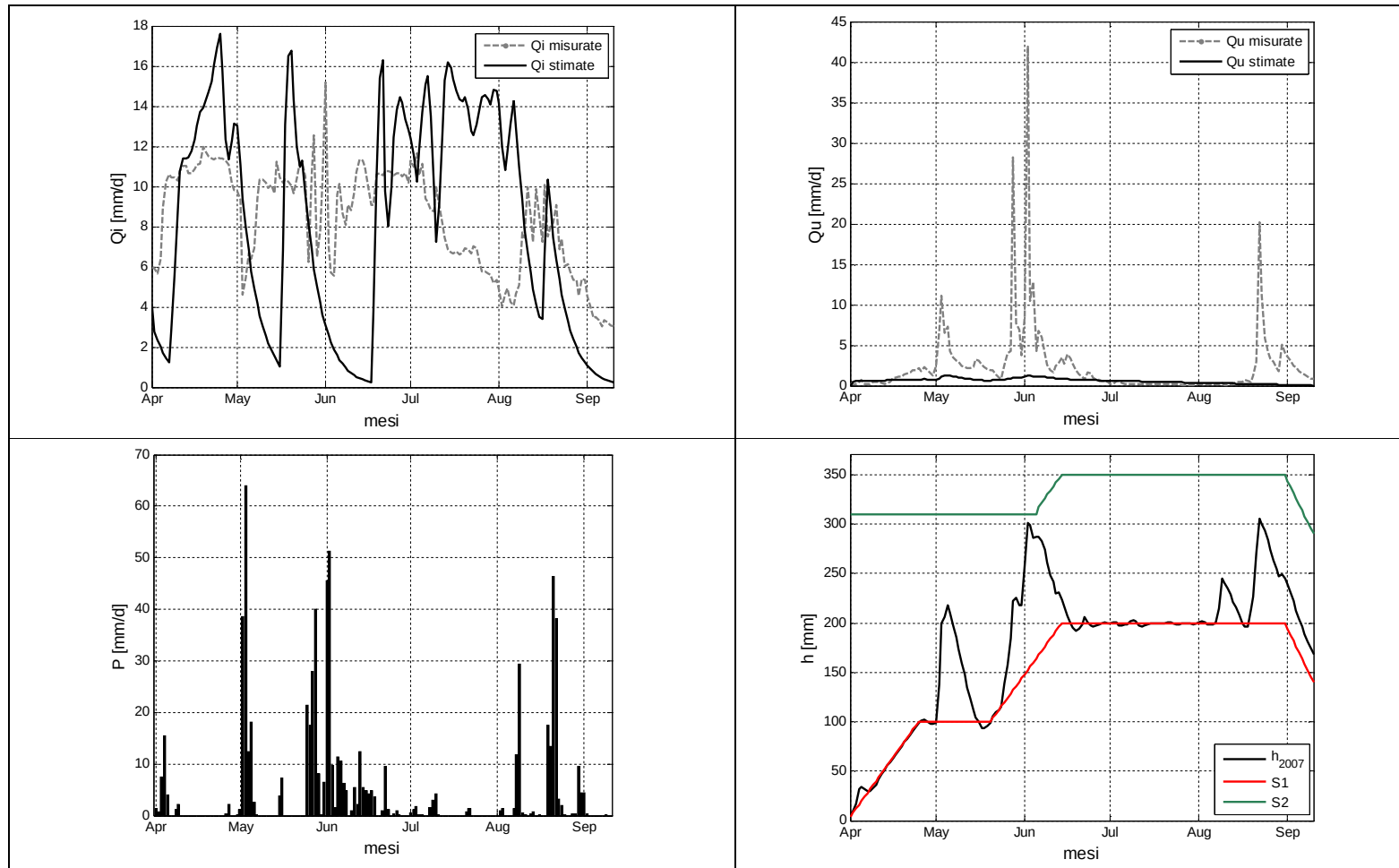
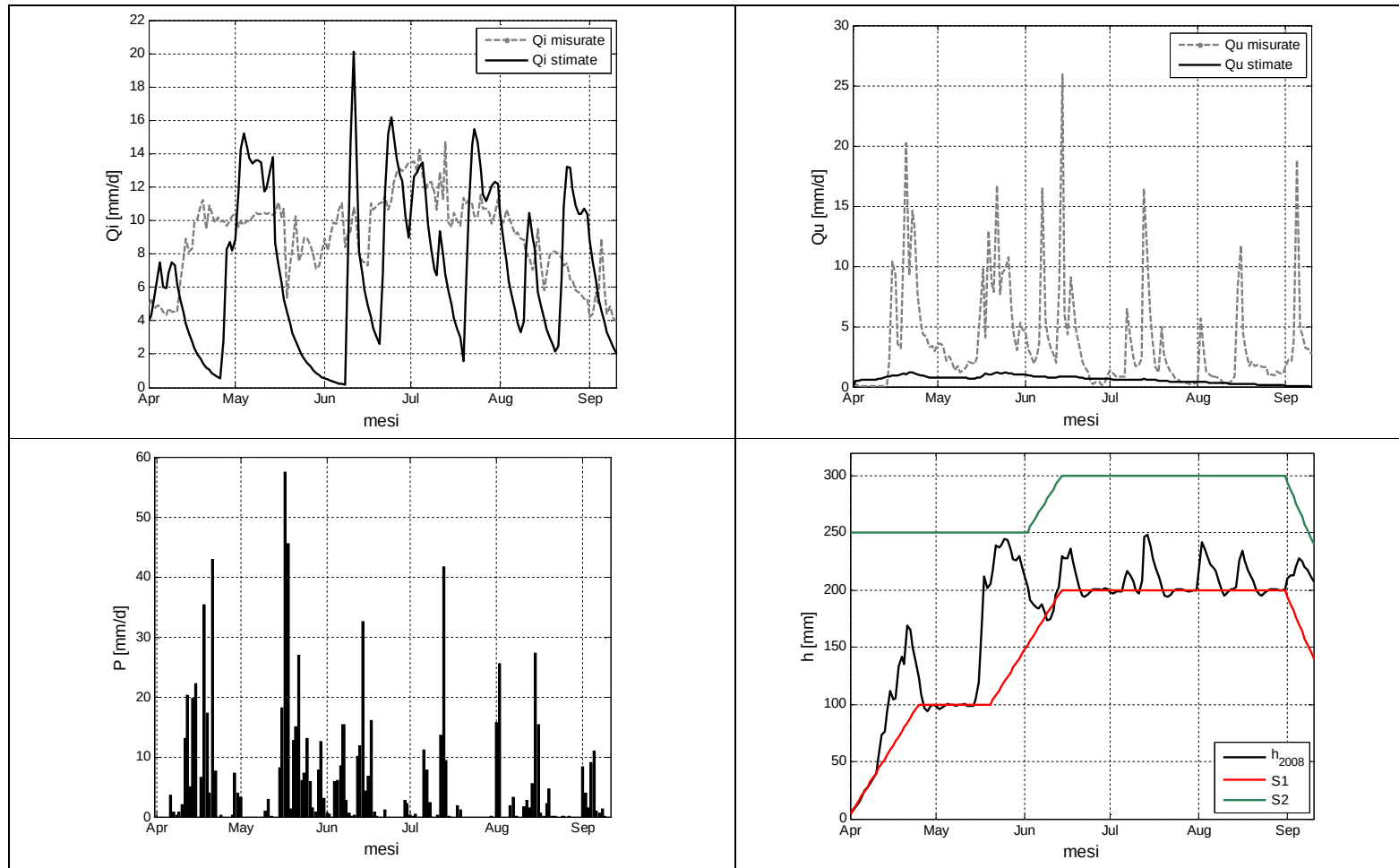


Fig. 43. Curve osservate e stimate – ANNO 2008.



5.3.2 Condizione di massimo fabbisogno

In opposizione al caso appena esaminato, il secondo caso limite nella determinazione della frazione di pioggia efficace è rappresentato dall'assegnare contributo nullo alle precipitazioni, vale a dire

$$P_s(i) = P(i) \Rightarrow P_e(i) = 0. \quad (28)$$

Per ottenere precipitazione efficace nulla, la soglia di pioggia deve essere definita come

$$\Delta 1 = \Delta 2 = 0 \quad (29)$$

che impone $S2 \equiv S1$, cioè la soglia di pioggia è assunta coincidente con la curva obiettivo dei livelli idrici. Fisicamente, questo significa che le risaie hanno capacità di laminazione nulla e quindi ogni leggera variazione di livello rispetto a quello ottimale è contrastata attraverso l'apertura delle bocche di uscita. Siccome l'apertura non è immediata, vi sarà sempre un minimo volume immagazzinato nelle camere (leggero spostamento dal livello idrico obiettivo), ma è comunque un valore trascurabile rispetto al caso reale. In questa condizione, si ottiene

$$\begin{cases} R(i) = ET(i) + F(i) + Q_{Tr}(i) + \Delta V(i) \\ Q_u(i) = P(i) + Q_{Tr}(i) \end{cases} \quad (30)$$

Se nel caso precedente al massimo valore di afflusso meteorico corrispondeva il minimo valore di fabbisogno, sotto la presente ipotesi si annulla il contributo della pioggia e si ottengono quindi i massimi valori di R . Infatti, mancando l'apporto delle precipitazioni, in questa situazione l'intero fabbisogno della coltivazione dovrà essere soddisfatto con l'immissione di portate adeguate. E' ovvio che anche questo caso non è rappresentativo della realtà, ma è utile per individuare un limite superiore ai valori di fabbisogno.

Le figure dalla 43 alla 47 mostrano gli effetti già detti di questa ipotesi sui livelli e sulle portate. E' immediato riscontrare l'effetto derivante dall'assumere $S2 = S1$ se si confrontano le uscite stimate con quelle relative al caso precedente.

Fig. 44. Curve osservate e stimate – ANNO 2005.

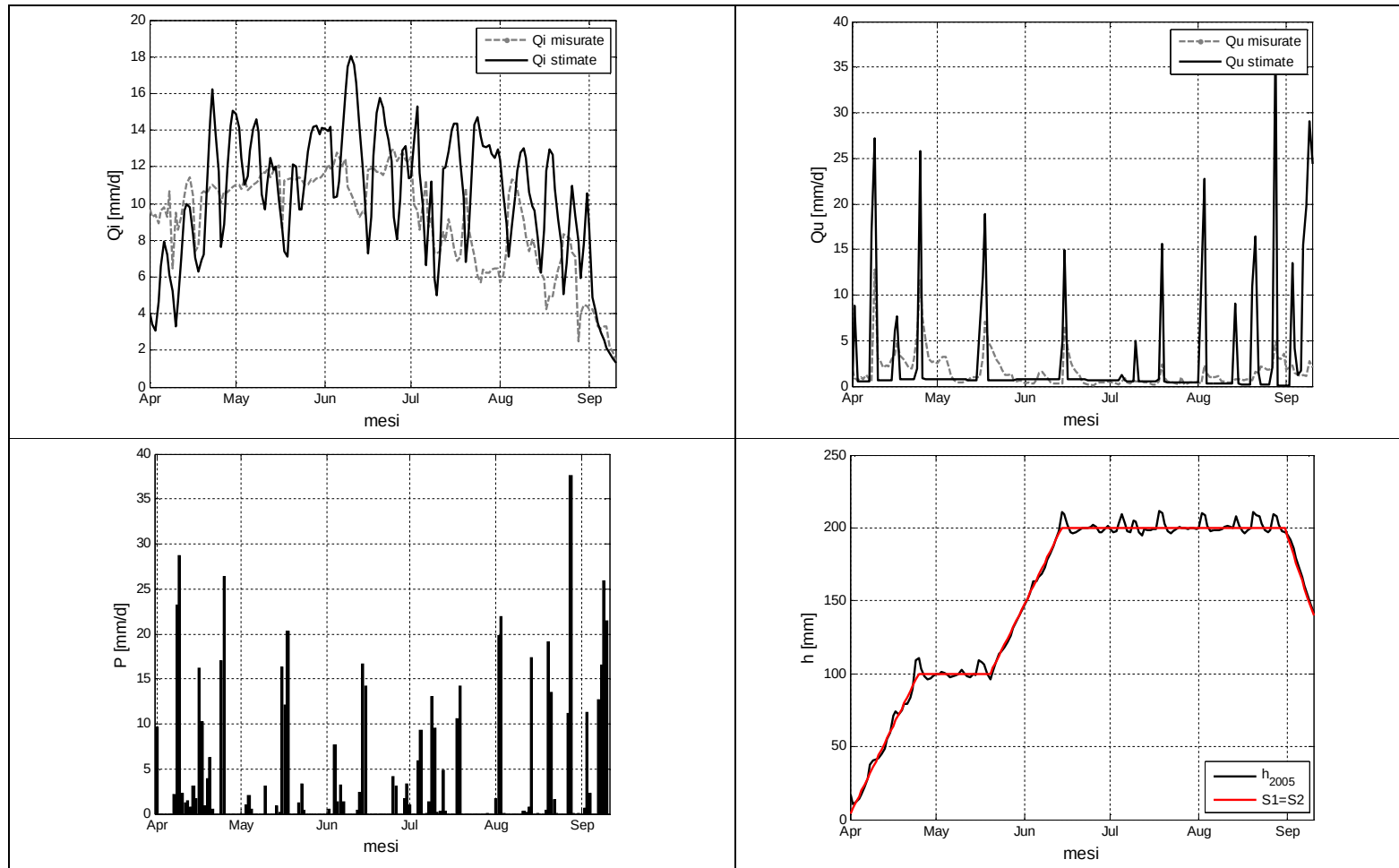


Fig. 45. Curve osservate e stimate – ANNO 2006.

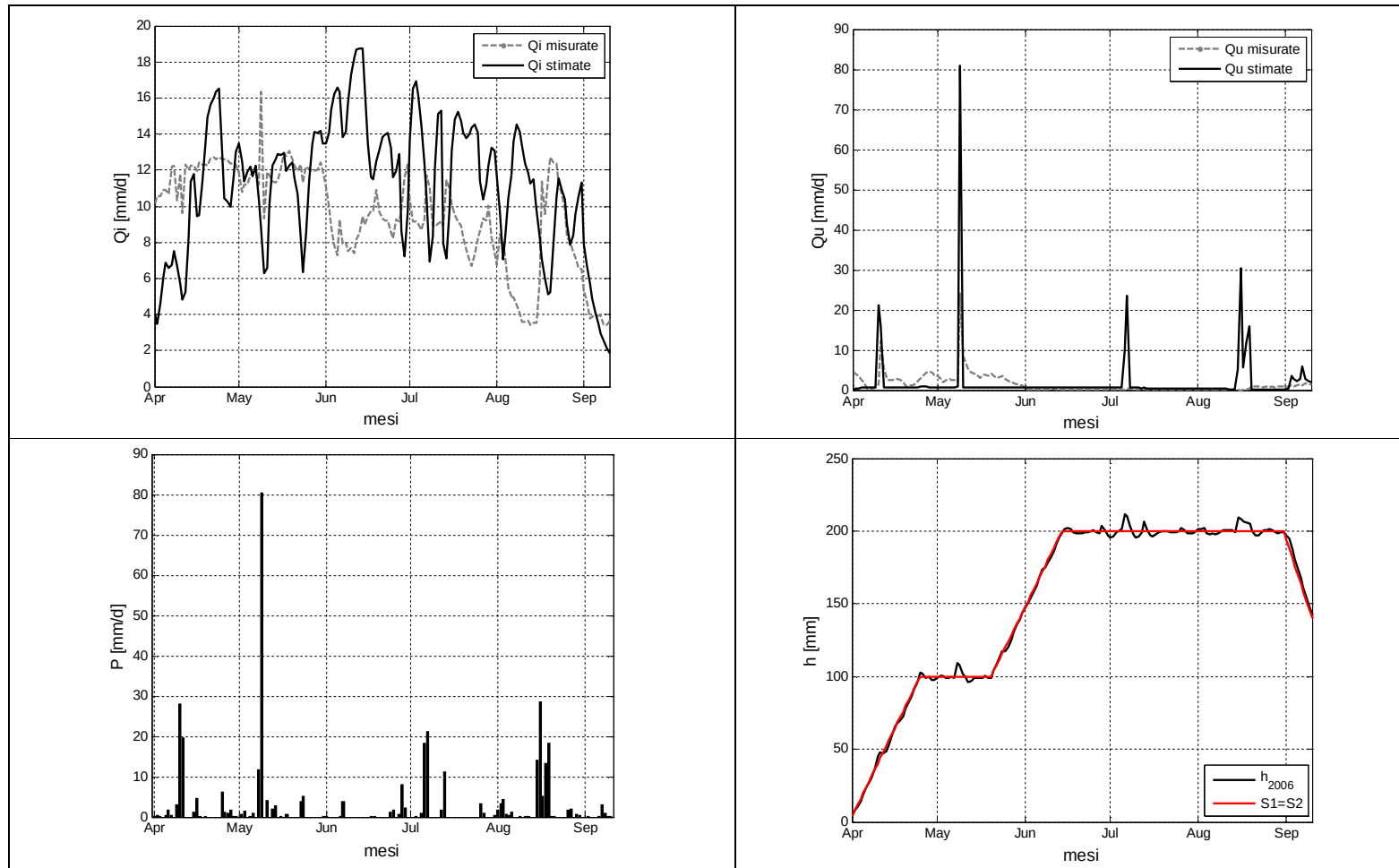


Fig. 46. Curve osservate e stimate – ANNO 2007.

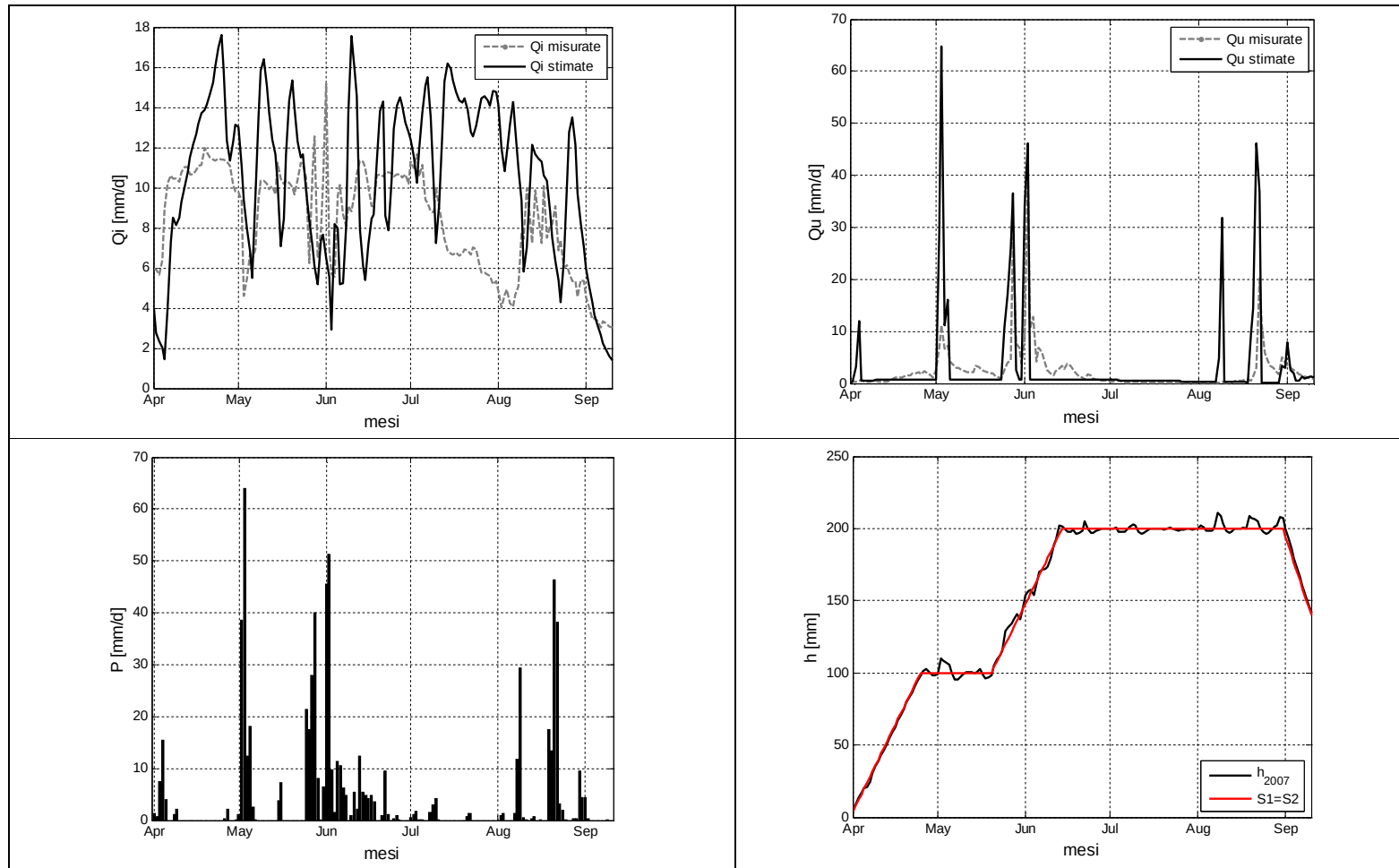
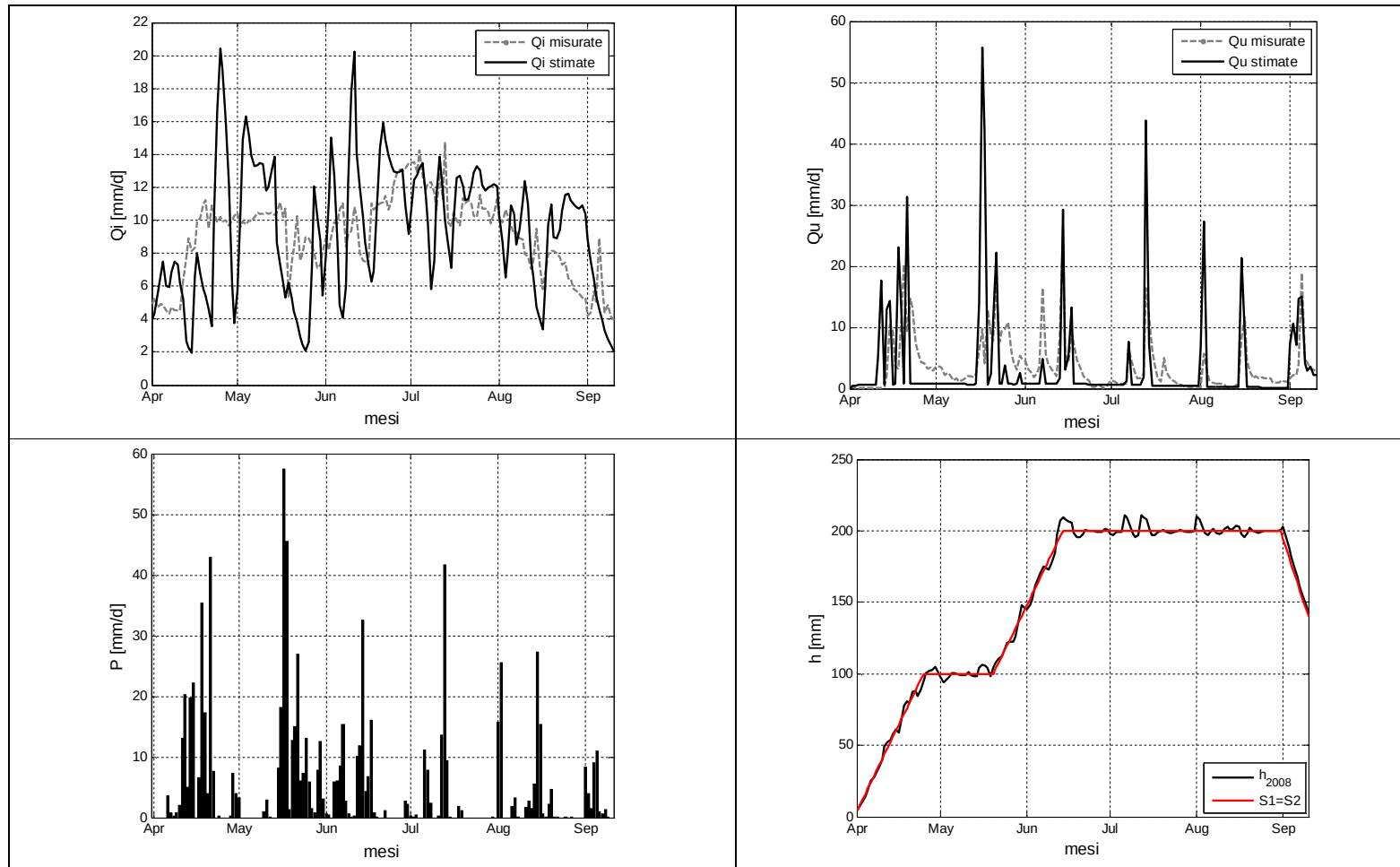


Fig. 47. Curve osservate e stimate – ANNO 2008.



5.3.3 Fabbisogno irriguo reale

Tra i due casi limite appena esaminati si trova la condizione ottimale di gestione delle precipitazioni. Mentre nella fase di riempimento iniziale il volume meteorico è quasi completamente accumulato nelle camere e contribuisce al raggiungimento del battente idrico ottimale, nel periodo estivo eventi gravosi di pioggia determinano l'apertura delle bocche di scarico al fine di contrastare eccessivi innalzamenti del livello idrico nelle risaie. In questo caso si ha un utilizzo solo parziale del volume meteorico, che può essere ricostruito attraverso l'analisi del superamento o meno delle soglie definite in precedenza.

La stima dei valori $\Delta 1$ e $\Delta 2$ si basa sull'osservazione dei livelli idrici reali e misurati dell'anno 2008, stagione particolarmente ricca di acqua e non soggetta a particolari deficit né in termini di precipitazioni né in termini di portate nei corsi d'acqua. Facendo riferimento alla Figura 48 si può notare che:

- nel periodo primaverile le piogge sono temporaneamente immagazzinate, generando dei livelli superiori a quello della curva obiettivo. I valori raggiunti sono pari a circa 170 – 190 mm. Per questo periodo assumiamo che **$\Delta 1 = 80 \text{ mm}$** ;
- nel periodo estivo i livelli sono, come era da attendersi, solo leggermente superiori a quelli della curva obiettivo. Come sottolineato in precedenza, le piogge possono essere accumulate solo parzialmente essendo la maggior parte delle risaie già piene. Ogni evento di pioggia gravoso è scaricato, ma dato che l'apertura delle bocche non è immediata si assume possibile un lieve innalzamento. Per questo periodo assumiamo che **$\Delta 2 = 10 \text{ mm}$** .

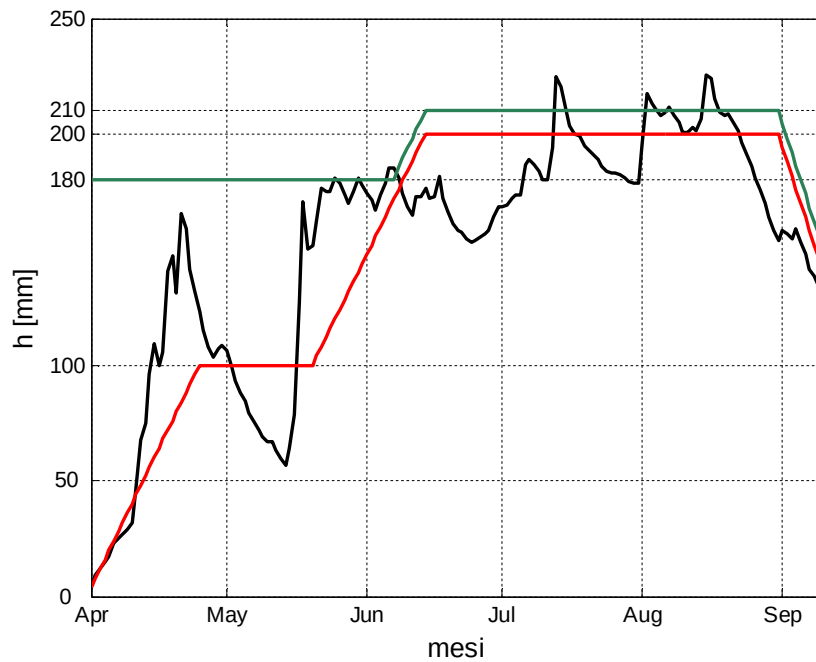


Fig. 48. Curva di stato dei livelli idrici per l'anno 2008 ricostruita dal modello di bilancio idrologico e utilizzata per stimare $\Delta 1$ e $\Delta 2$.

Un altro parametro stimato dalle misure dell'anno 2008 è il volume in transito Q_{Tr} . Secondo le usuali pratiche agricole gli scaricatori sono attivati per l'eliminazione della frazione di precipitazione in eccesso rispetto al valore ottimale: le serie di volumi in uscita mostrano dei picchi in corrispondenza di ogni evento di precipitazione particolarmente intenso (Figura 49). Una più attenta osservazione delle serie di Q_u permette di evidenziare la costante presenza di un valore di base anche nei periodi non piovosi (Figura 51), imputabile a volumi che semplicemente transitano nella rete irrigua oppure sono scaricati e non riutilizzati (Q_{Tr}). I volumi di transito sono stimati, come già accennato, come frazione dell'altezza idrica raggiunta ogni giorno durante la stagione irrigua. La serie stimata di valori di portata Q_{Tr} segue con buona approssimazione i valori di Q_u misurati in assenza di eventi piovosi (Figura 51).

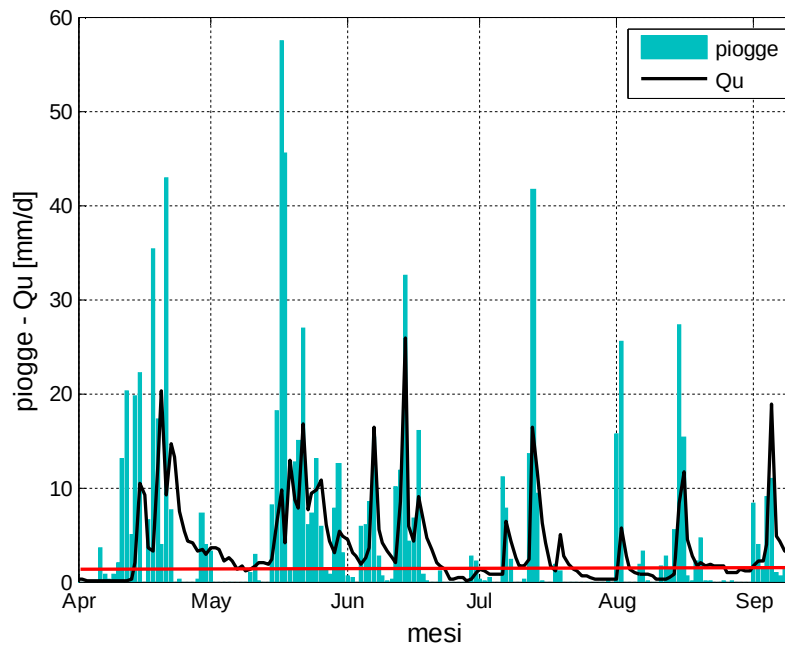


Fig. 49. Serie temporale delle portate in uscita e delle piogge per l'anno 2008 e individuazione dei volumi di transito Q_{Tr} .

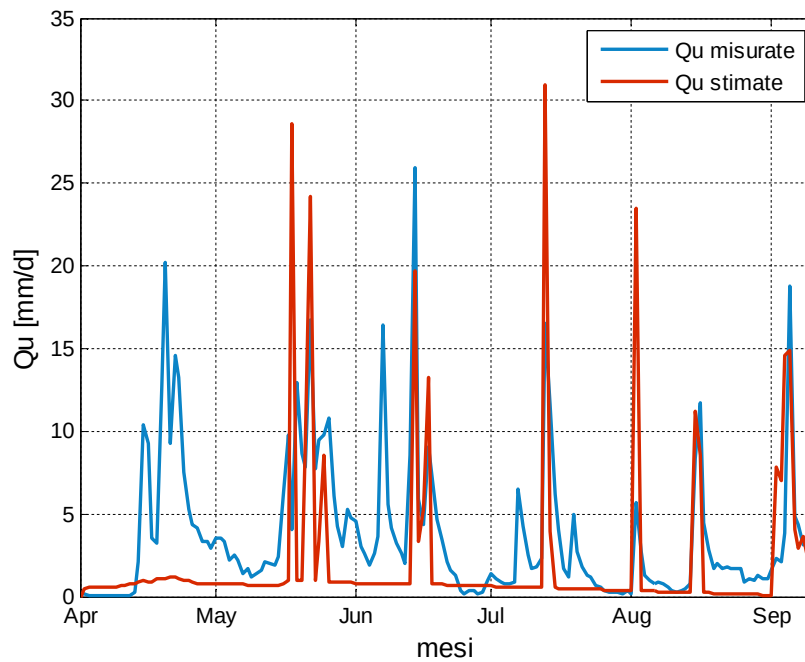


Fig. 50. Serie temporale delle portate in uscita misurate e stimate dal modello, tenendo conto della stima dei volumi di transito

Fissate le soglie di massimo accumulo e stimati i volumi in transito è ora possibile ricostruire l'andamento del fabbisogno R e dei relativi volumi in uscita. Gli andamenti dei livelli, delle portate in ingresso e di quelle in uscita per gli anni 2005-2008 sono riportati nelle figure dalla 50 alla 53.

Fig. 51. Curve osservate e stimate – ANNO 2005.

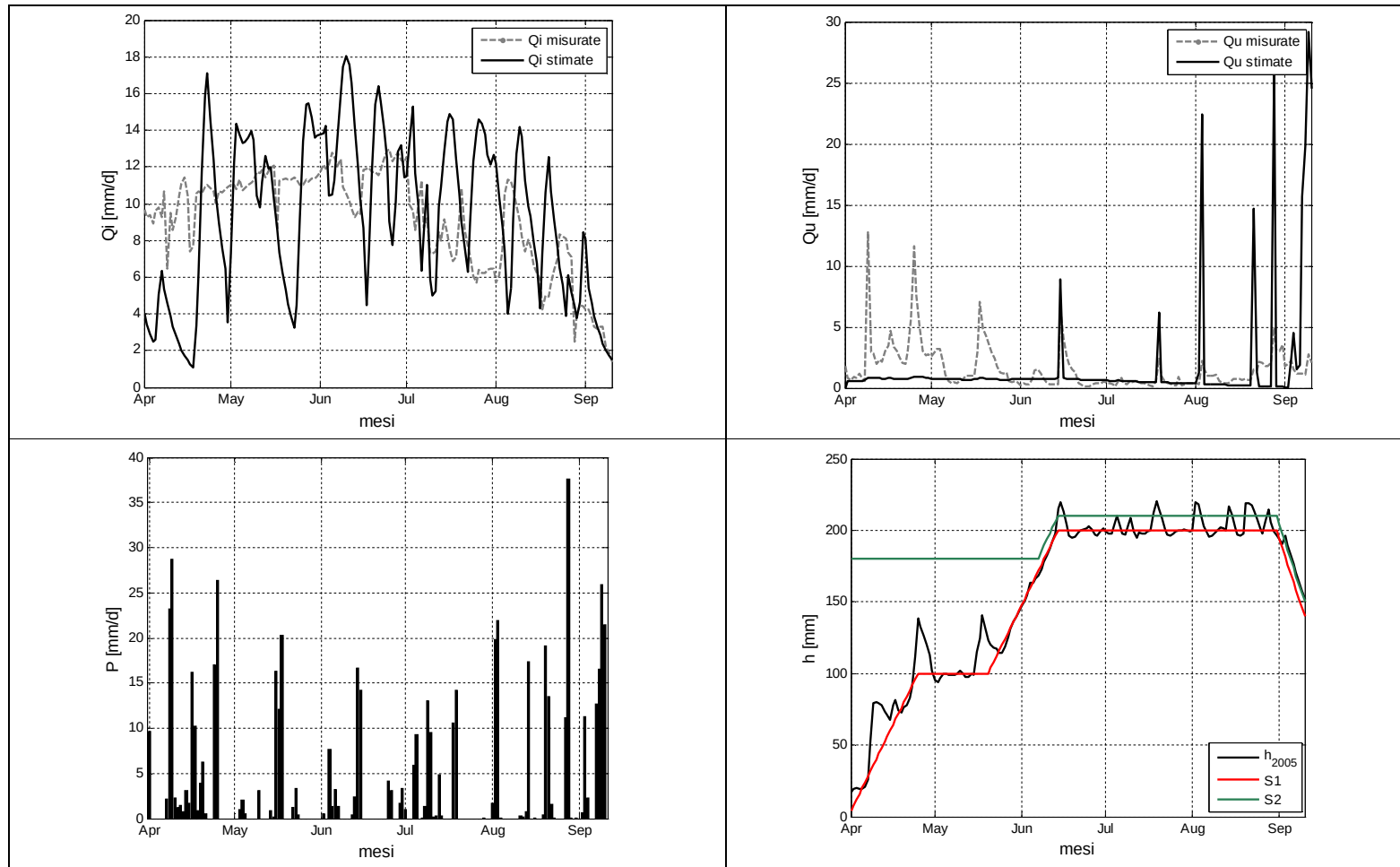


Fig. 52. Curve osservate e stimate – ANNO 2006.

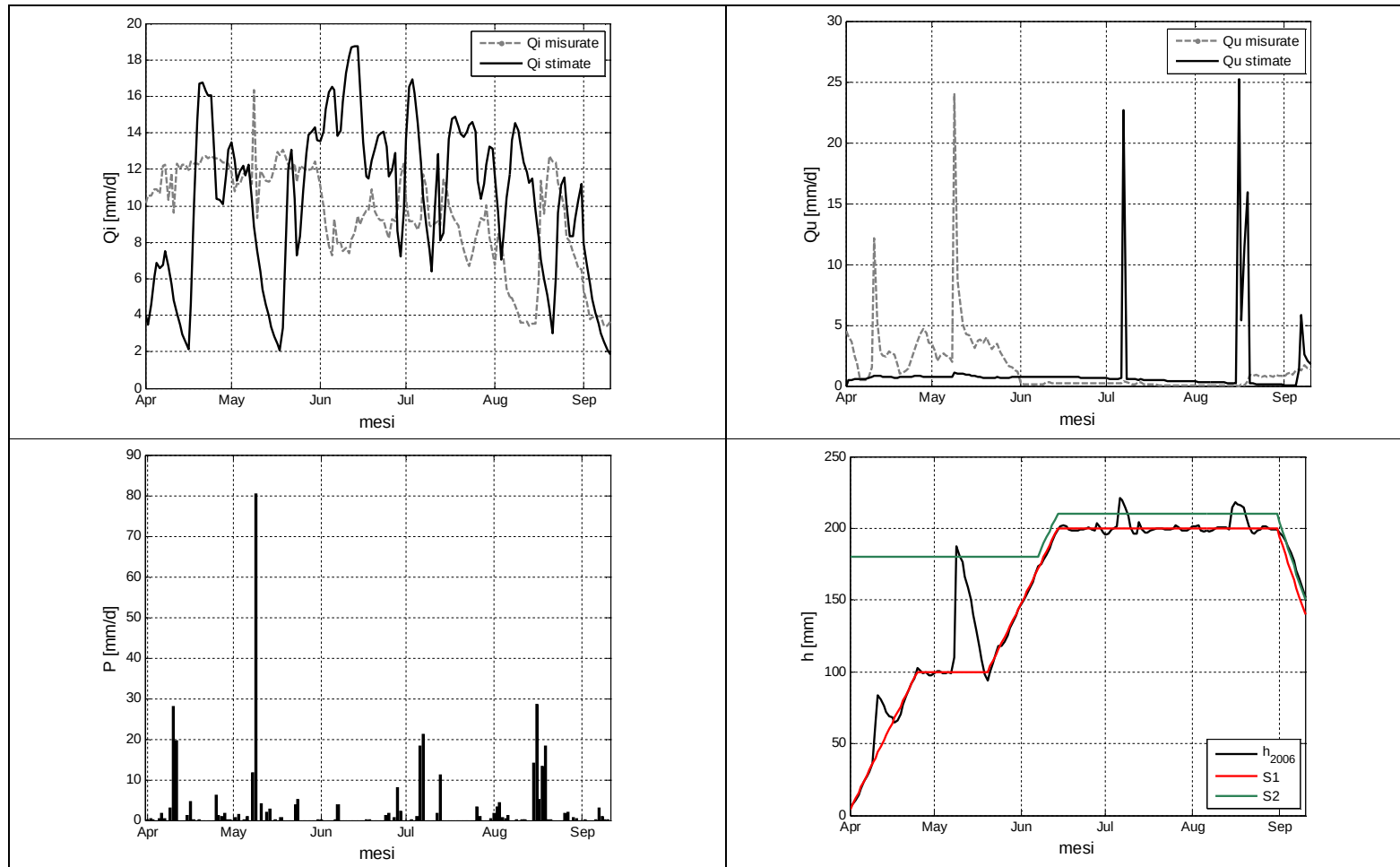


Fig. 53. Curve osservate e stimate – ANNO 2007.

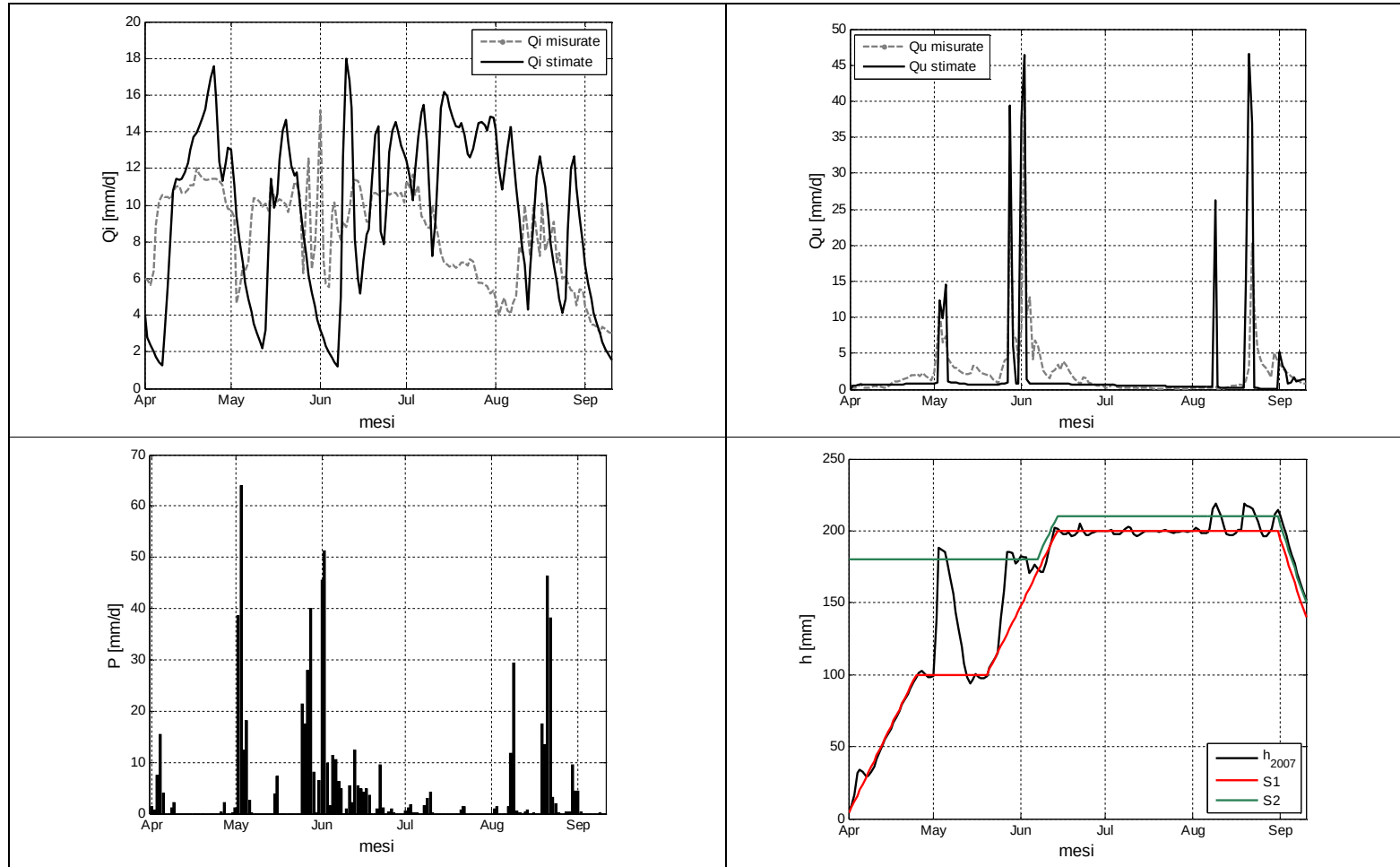
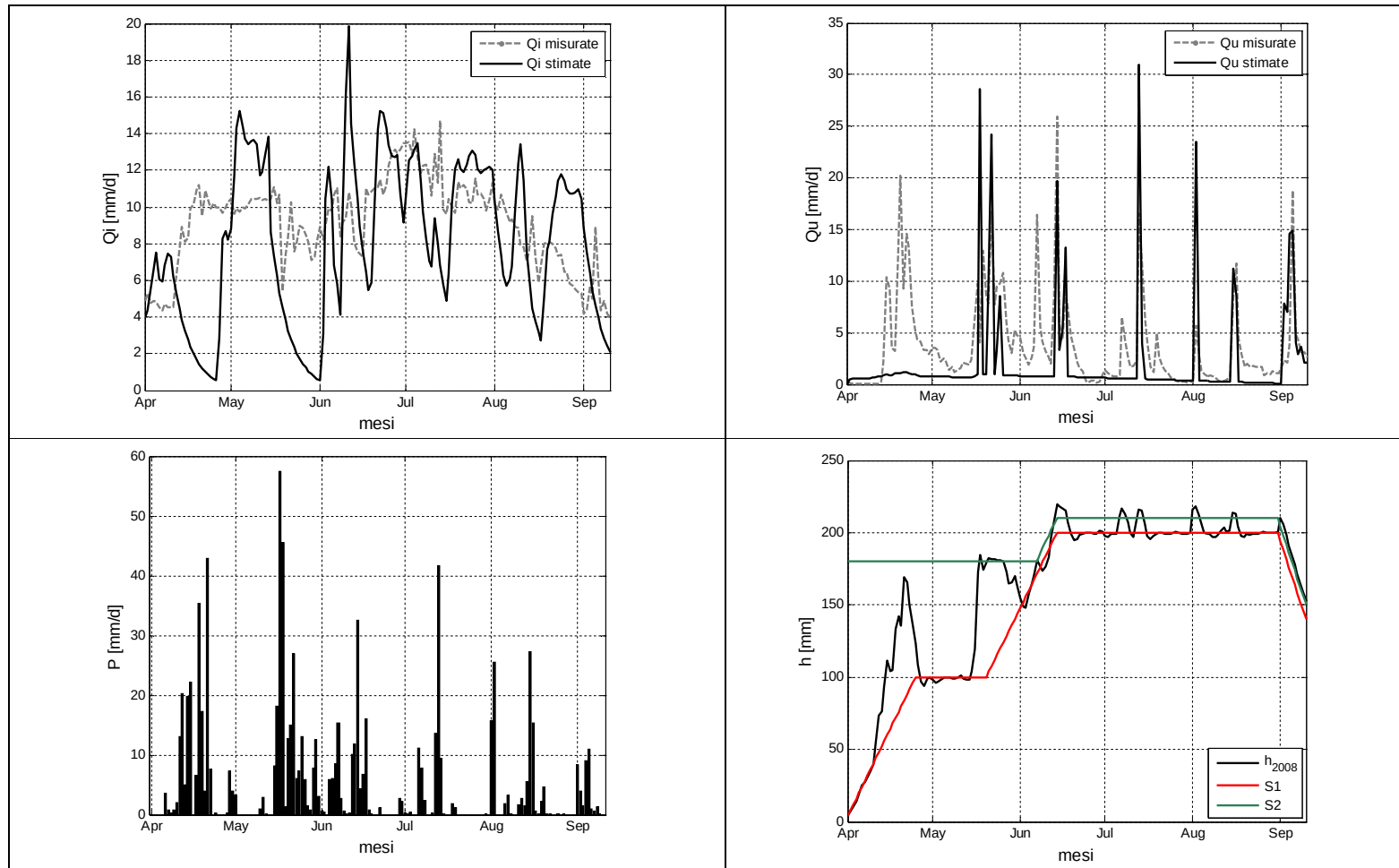


Fig. 54. Curve osservate e stimate – ANNO 2007.



5.4 Analisi dei fabbisogni delle annate 2005-2008

In questo paragrafo si presentano gli andamenti del fabbisogno totale ottenuti dal modello. Lo scopo di questa parte della relazione è analizzare i fabbisogni totali, netti ed il deficit delle quattro stagioni 2005-2008. Inoltre le due stagioni del 2003 e 2004, pur non essendo confrontabili con le altre per l'indisponibilità di dati di portate in uscita, essendo state particolarmente critiche vengono analizzate alla fine del paragrafo. In particolare, al fine di comprendere e quantificare le criticità idriche di ogni stagione, il fabbisogno verrà rappresentato in forma di curva cumulata, producendo, in particolare: a) la curva cumulata del fabbisogno a sala giornaliera, b) i volumi di fabbisogno annuali, c) i volumi di fabbisogno a scala mensile e d) i volumi di fabbisogno a scala decadale. L'istogramma del fabbisogno mensile (o decadale) è stato costruito valutando la differenza tra i valori di fabbisogno cumulato (Figura 55) alla fine di ogni mese (o dieci giorni). Per semplicità di interpretazione dei risultati ogni valore è stato poi trasformato da altezza (mm) in volume di acqua (10^6 m^3) sul comprensorio. Le tabelle seguenti riassumono i valori minimo, massimo e reale del fabbisogno ottenuti dal modello applicato agli anni 2005, 2006, 2007 e 2008, confrontate con il valore medio storico.

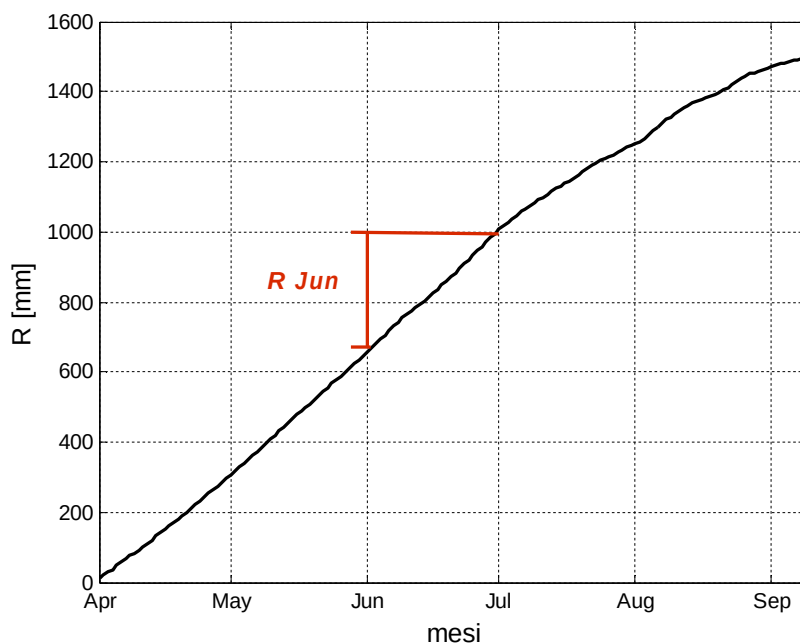


Fig. 55. Esempio di curva del fabbisogno cumulato e determinazione del fabbisogno a scala mensile.

5.4.1 Confronto tra i fabbisogni degli anni 2005-2008

In questo paragrafo si confrontano i fabbisogni minimi, massimi ed ottimali per gli anni 2005-2008 ricavati nei precedenti paragrafi.

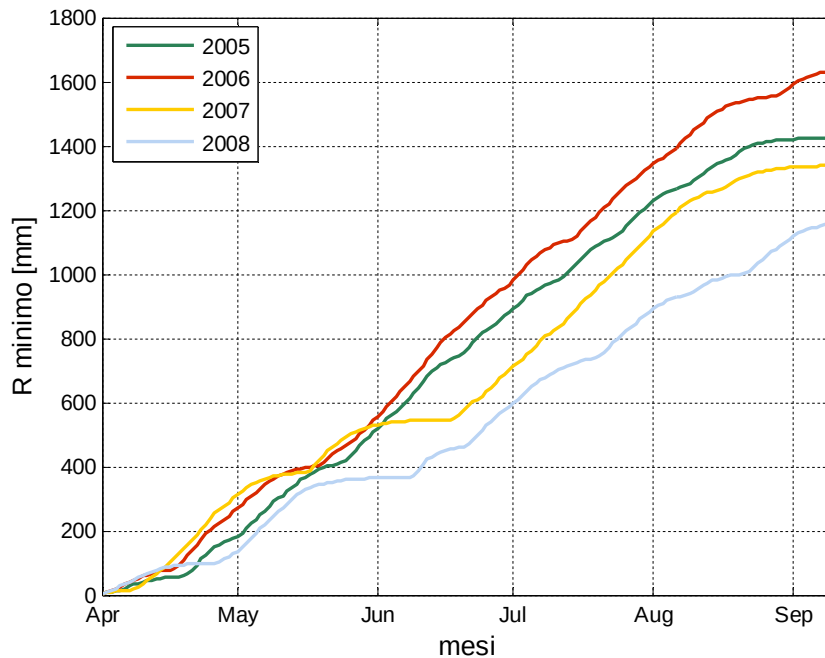


Fig. 56. Confronto tra i valori minimi di fabbisogno per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008.

Fabbisogni minimi: confrontando i valori minimi di fabbisogno (Figura 56) calcolati ipotizzando nulla la precipitazione sfiorata e tenuto presente che la totalità del volume meteorico è immagazzinato si nota come la stagione del 2006, come aspettato, è la più critica mentre quella del 2008 quella che presenta il minor fabbisogno. E' immediato chiedersi se tali differenze siano da attribuirsi completamente ai fenomeni meteorologici. Dall'analisi della Tabella 11, si può asserire che a un maggior totale stagionale di pioggia corrisponde un minore fabbisogno. Infatti, l'anno 2008 è quello caratterizzato dalla precipitazione più abbondante, mentre il 2006 ha un totale stagionale di pioggia ridotto: il 2008 mostra quindi il minimo fabbisogno, mentre il 2006 ha il massimo fabbisogno. Va però osservato che non solo è importante il totale di precipitazione, ma per l'analisi puntuale delle curve del fabbisogno, e di conseguenza del fabbisogno a scala mensile e decadale, occorre tenere conto anche della

sua distribuzione temporale e delle caratteristiche degli eventi (concentrati o distribuiti). Ad esempio, l'anno 2005 ha una serie temporale di pioggia con eventi distribuiti lungo l'intera stagione irrigua, mentre il 2007 presenta eventi maggiormente concentrati, soprattutto nel mese di maggio - giugno (Figura 57). Una precipitazione distribuita durante la stagione determina una curva del fabbisogno con andamento uniformemente crescente, mentre per precipitazioni più concentrate la curva del fabbisogno presenta dei tratti di forte pendenza alternati ad altri quasi piatti determinati da una prolungata e rapida diminuzione dei valori di volumi in ingresso (Figura 58).

Tab. 11. Confronto tra valore totale stagionale di precipitazione e valore del fabbisogno minimo per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008.

Anno	Pioggia	Fabbisogno minimo
-	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
2005	69.79	185.01
2006	39.82	212.22
2007	83.94	173.72
2008	98.89	150.31
	<i>mm</i>	<i>mm</i>
2005	537.50	1424.90
2006	306.68	1634.47
2007	646.49	1337.98
2008	761.63	1157.67

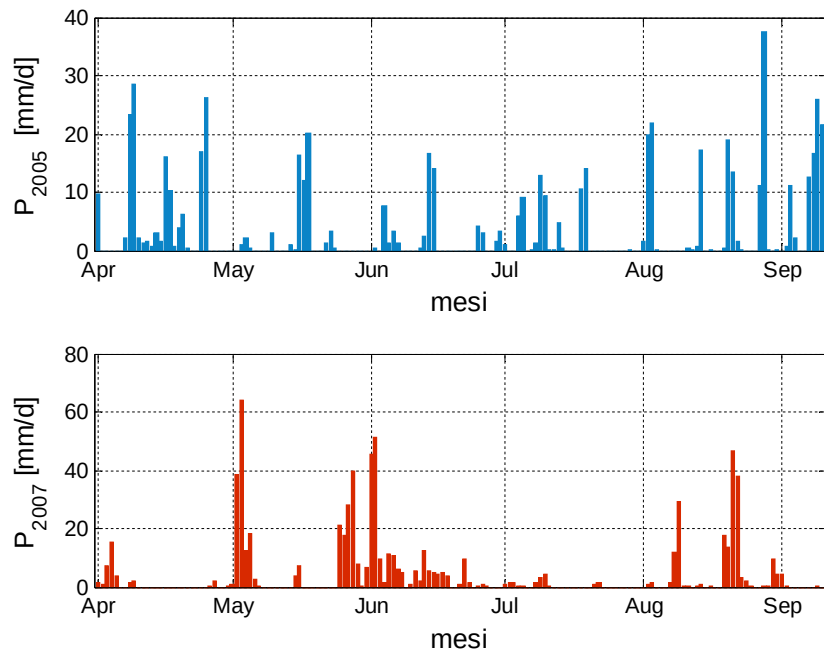


Fig. 57. Confronto tra le serie di precipitazione degli anni 2005 e 2007.

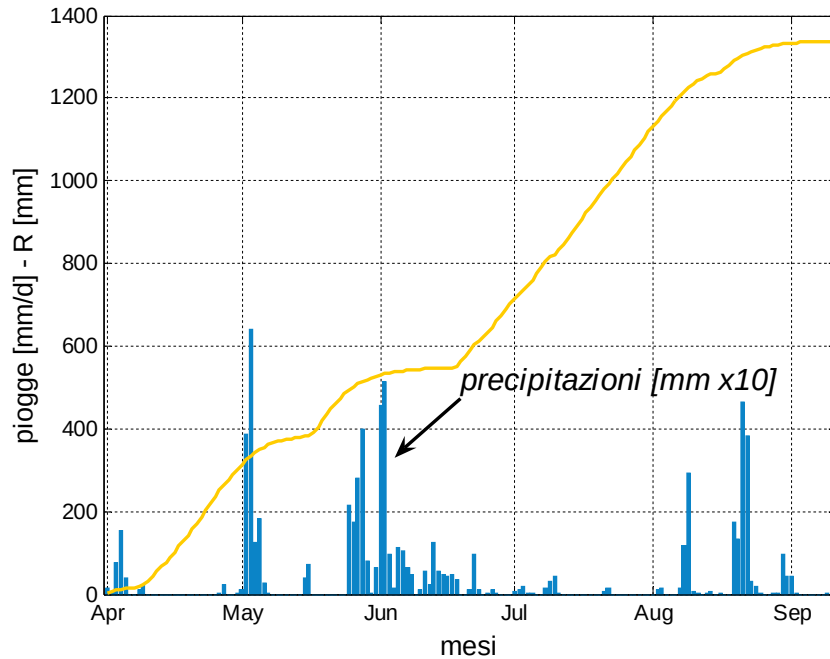


Fig. 58. Confronto tra le serie temporali di precipitazione e fabbisogno irriguo per l'anno 2007.

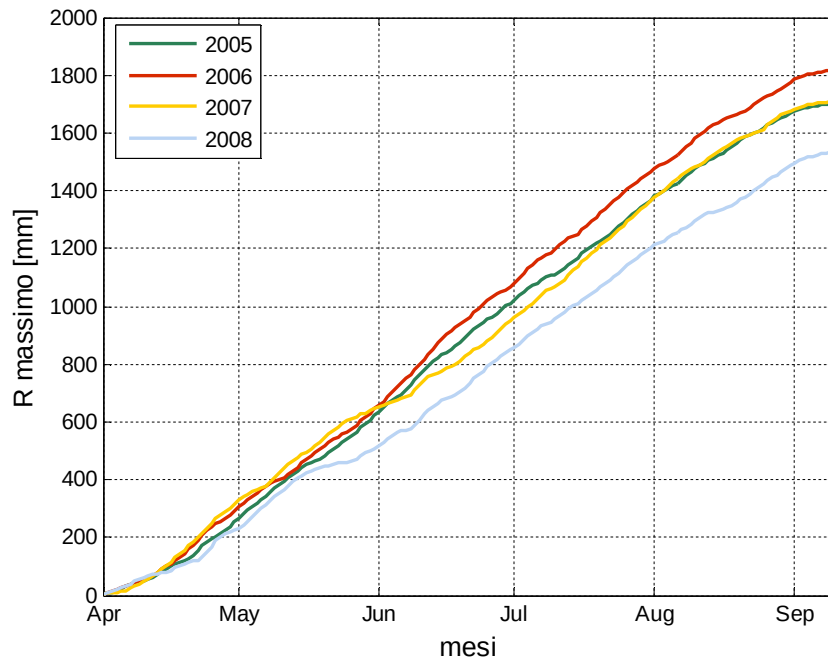


Fig. 59. Confronto tra i valori massimi di fabbisogno per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008.

Fabbisogni minimi: in Figura 59 sono riportate le curve del fabbisogno in assenza del contributo delle precipitazioni (valore massimo). Come si nota, annullando l'effetto delle piogge si perde la peculiarità che caratterizza ogni singolo anno e tutte le curve presentano un andamento molto simile. Le perdite per filtrazione dipendono dal battente idrico sul campo che, essendo sempre prossimo a quello obiettivo, non presenta ampie variazioni tra gli anni esaminati. Solo i valori di evapotraspirazione, essendo tipici di ogni anno, possono influenzare le curve del fabbisogno. Annullando l'effetto delle piogge è possibile ottenere delle utili indicazioni inerentemente alle condizioni climatiche del periodo considerato. Confrontando ad esempio le temperature medie dell'aria del 2007 e del 2008 (Figura 60), si nota che il 2007 è stato mediamente più caldo del 2008. Questo fatto ha determinato maggiori perdite per evapotraspirazione nel 2007 e quindi una crescita del valore del fabbisogno di quest'anno rispetto al successivo (Figura 61). Gli anni 2005 e 2006 sono stati invece caratterizzati da condizioni climatiche simili al 2007 (Tabella 13).

Tab. 12. Confronto tra valore totale stagionale di precipitazione e valore del fabbisogno massimo per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008.

Anno	Evapotraspirazione	Fabbisogno massimo
-	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
2005	54.18	220.94
2006	58.86	236.11
2007	59.45	221.92
2008	48.10	199.26
	mm	mm
2005	417.28	1701.63
2006	453.33	1818.50
2007	457.87	1709.14
2008	370.45	1534.63

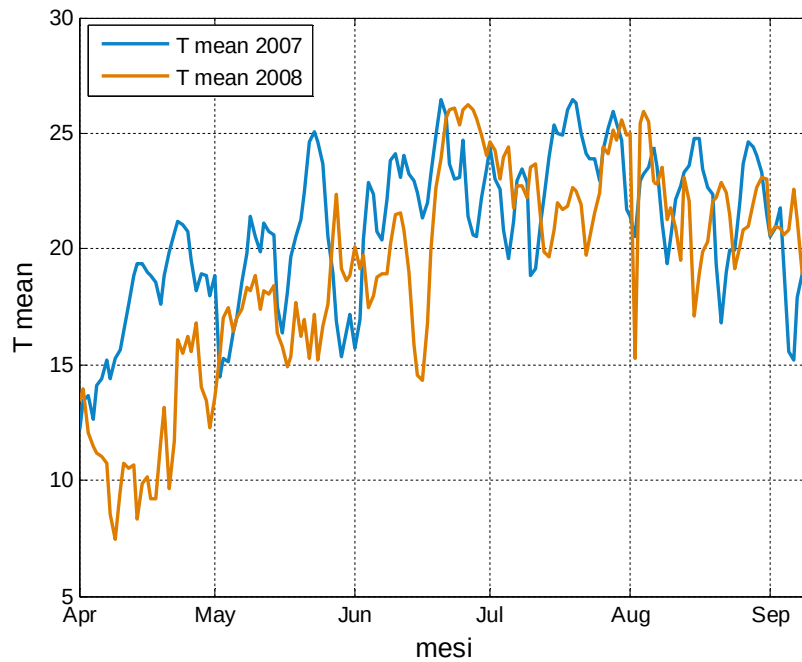


Fig. 60. Confronto tra le serie temporali di temperatura media dell'aria degli anni 2005 e 2007.

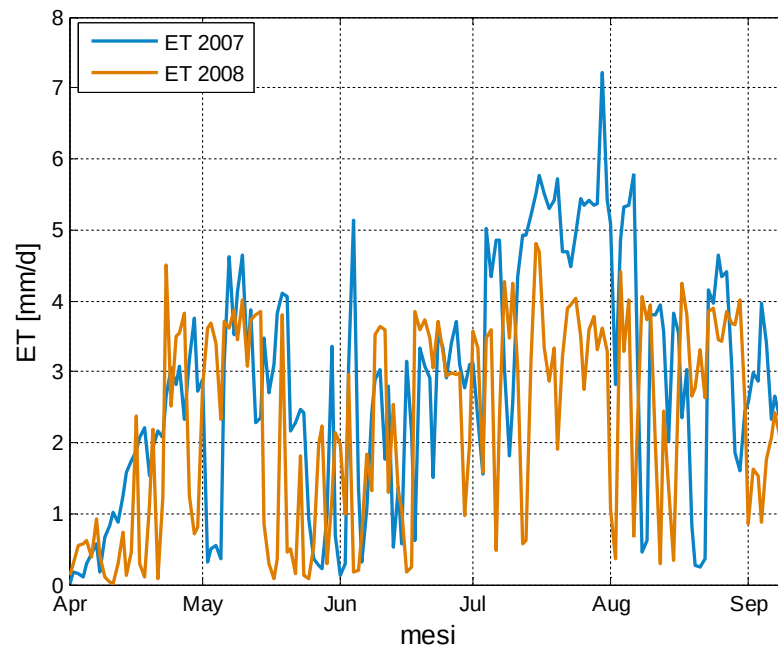


Fig. 61. Confronto tra le serie temporali di evapotraspirazione degli anni 2005 e 2007.

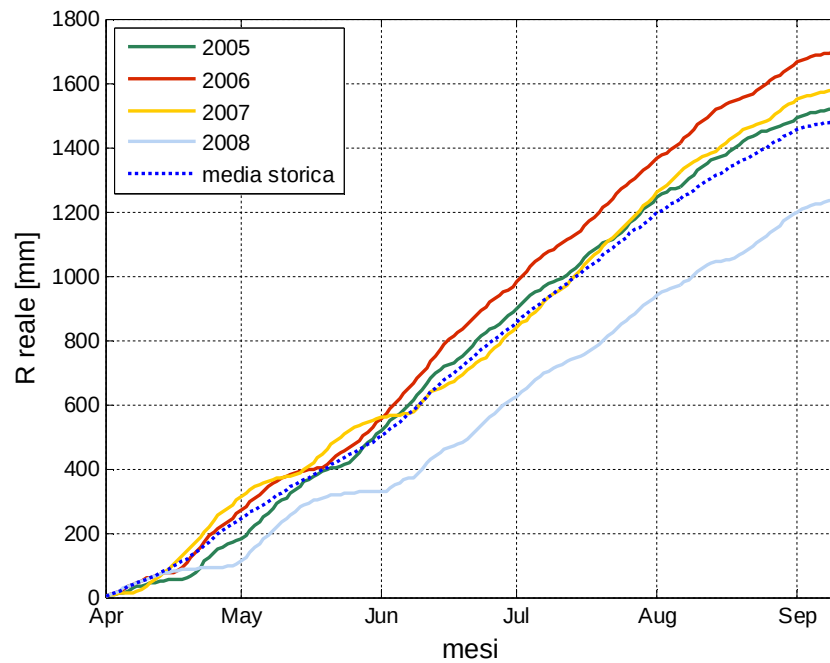


Fig. 62. Confronto tra i valori reali di fabbisogno per gli anni dal 2005 al 2008. La media storica è calcolata nel 5.7.

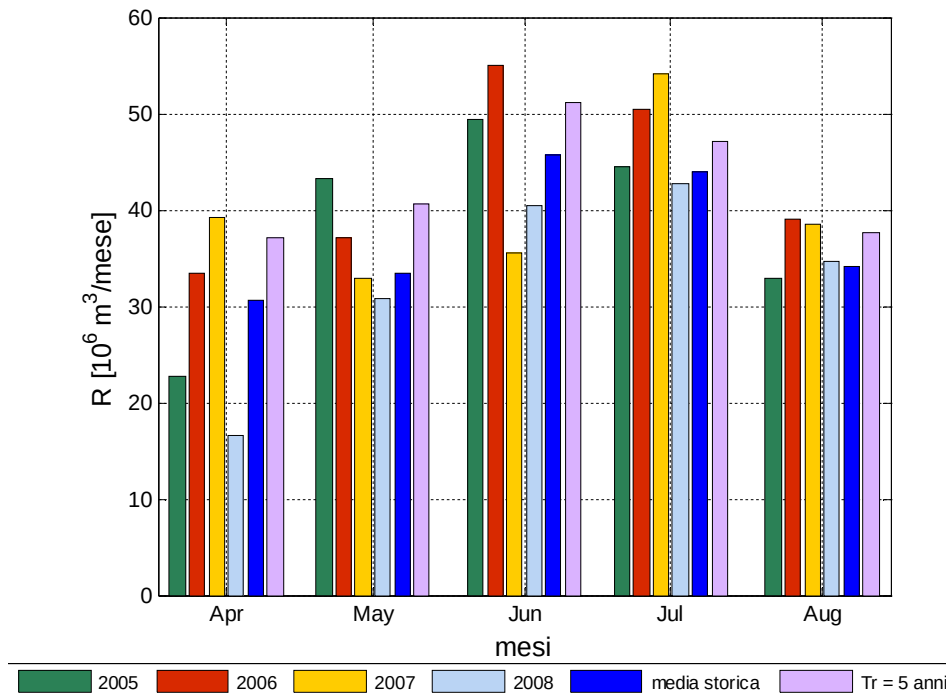


Fig. 63. Confronto tra i valori mensili di fabbisogno per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008 con la media storica e il valore con tempo di ritorno 5 anni (definiti nel paragrafo 5.7)

Fabbisogni reali: di sicuro maggiore interesse è il valore reale del fabbisogno, calcolato ipotizzando un utilizzo ottimale delle precipitazioni (Figura 62). In generale, durante i mesi primaverili (fase di sommersione iniziale) l'andamento delle curve del fabbisogno reale è prossimo a quelle del valore minimo (immagazzinamento dell'acqua). Nei mesi estivi invece queste si discostano sempre di più a causa dell'entrata in funzione delle bocche di uscita che scaricano la precipitazione in eccesso e la curva del fabbisogno reale diventa pressoché parallela a quella del fabbisogno massimo (scaricamento totale delle piogge). La differenza tra le due curve equivale alla frazione di precipitazione che è sfiorata durante la stagione primaverile.

Confrontando poi i valori stagionali di fabbisogno, si nota che gli anni 2006 e 2008 sono caratterizzati rispettivamente dal minimo e massimo valore di fabbisogno, mentre il 2005 e il 2007 hanno andamenti simili e prossimi al valor medio storico. Va osservato che nella valutazione del reale fabbisogno, determinato ipotizzando un impiego ottimale delle

precipitazioni, assume fondamentale importanza la conoscenza della serie temporale delle piogge. Eventi di forte intensità e breve durata creano picchi di livello che possono superare i limiti accettabili e mettere in funzione gli scaricatori di portata anche nella fase di riempimento, generando così un volume inutilizzabile. Inoltre, anche i volumi in ingresso devono subire una netta riduzione per contenere il brusco innalzamento di livello generato dalla precipitazione. Con una pioggia di lunga durata e minore intensità invece è più agevole immagazzinare i volumi e ne consegue una migliore gestione della risorsa. Per questo motivo il 2007 e il 2005 hanno valori di fabbisogno molto simili, nonostante il 2007 sia stato più piovoso rispetto al 2005.

Osservando i valori mensili (Figura 63) si nota che in genere si hanno valori di fabbisogno crescenti nel periodo primaverile che raggiungono un massimo in giugno o luglio e infine decrescono: nei mesi di aprile – giugno occorre introdurre sul comprensorio una portata adeguata a ottenere il livello ottimale, mentre a luglio e agosto i volumi introdotti devono bilanciare le perdite per filtrazione ed evapotraspirazione. In questo periodo però tali perdite sono più intense rispetto a quello precedente, dato che a battenti sul campo maggiori corrispondono perdite per filtrazione più intense e tenendo conto del fatto che nel periodo estivo le temperature e la radiazione raggiungono i loro massimi valori, generando così evapotraspirazione maggiore. Nel caso in cui si verificano degli eventi di precipitazione particolarmente intensi e prolungati, come nel 2007, il fabbisogno in corrispondenza di questi mesi decresce.

L'anno 2006 infine è quello che presenta dei valori mensili di fabbisogno maggiormente prossimi al valore con periodo di ritorno 5 anni (vedi paragrafo 5.7): come già si era notato nelle curve di stato dei livelli idrici, questo anno è caratterizzato da un particolare deficit idrico, dato confermato anche dal calcolo del fabbisogno.

Fig. 64. Confronto tra i valori reali di fabbisogno con la media storica – ANNO 2005.

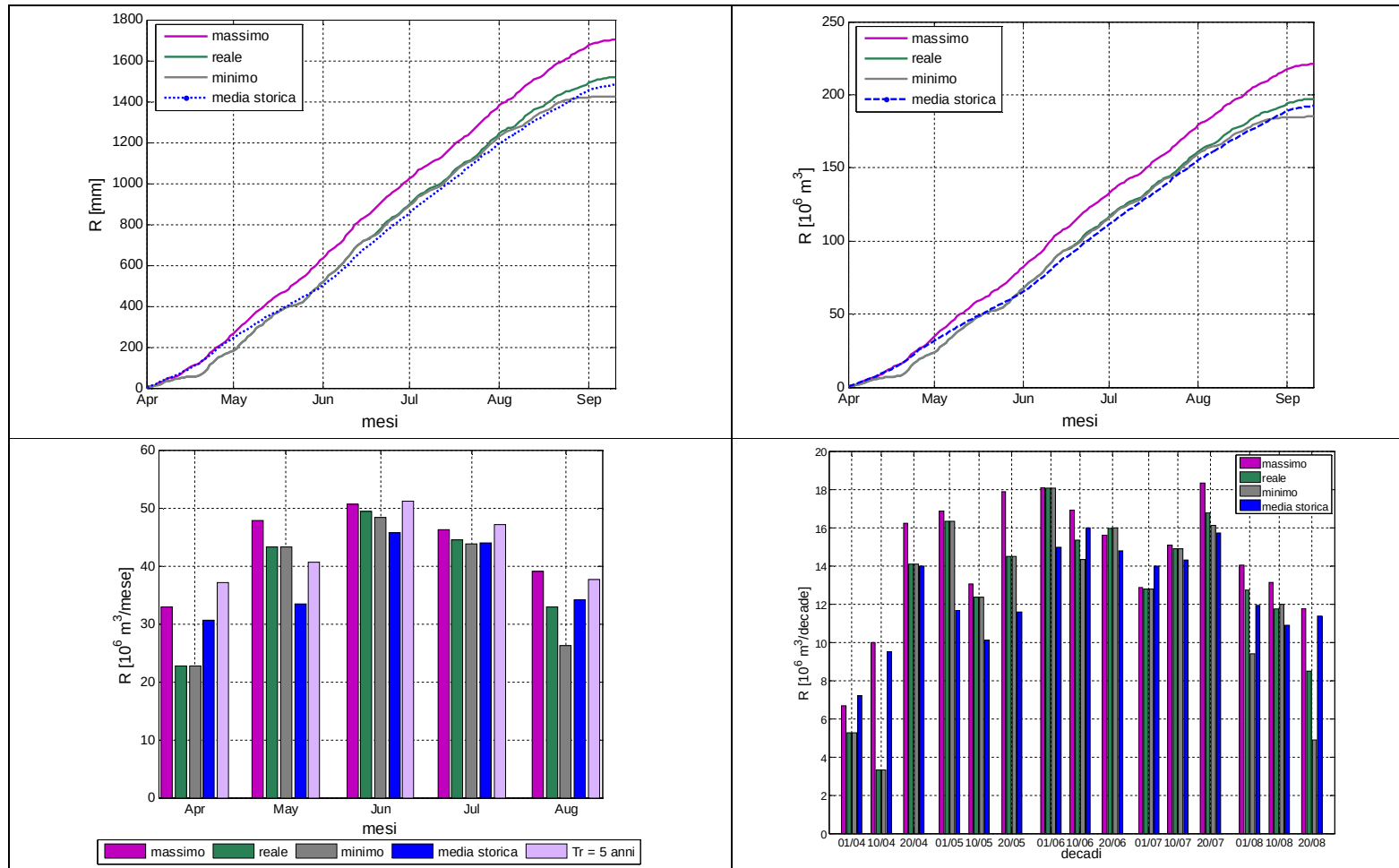


Fig. 65. Confronto tra i valori reali di fabbisogno con la media storica – ANNO 2006.

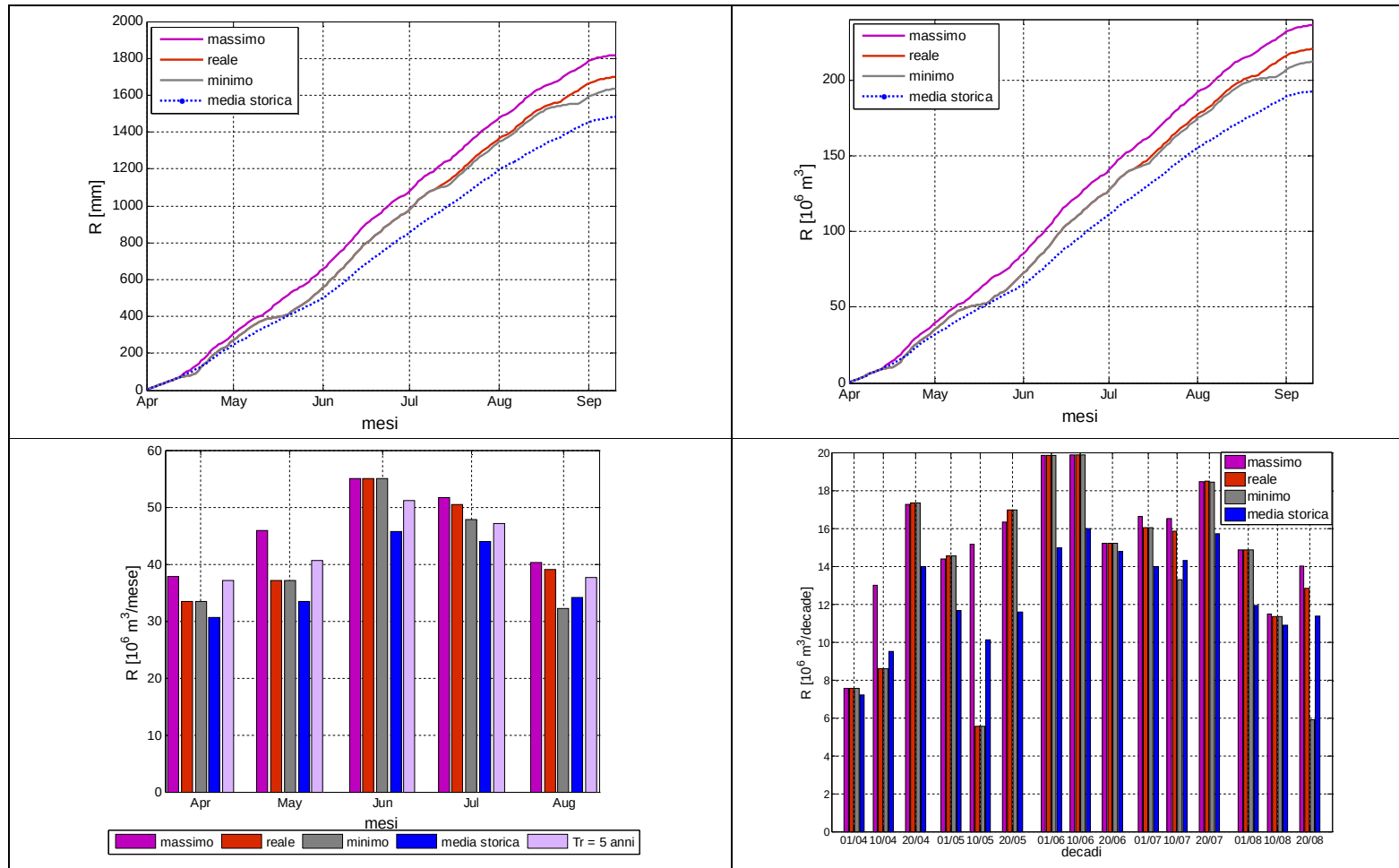


Fig. 66. Confronto tra i valori reali di fabbisogno con la media storica – ANNO 2007.

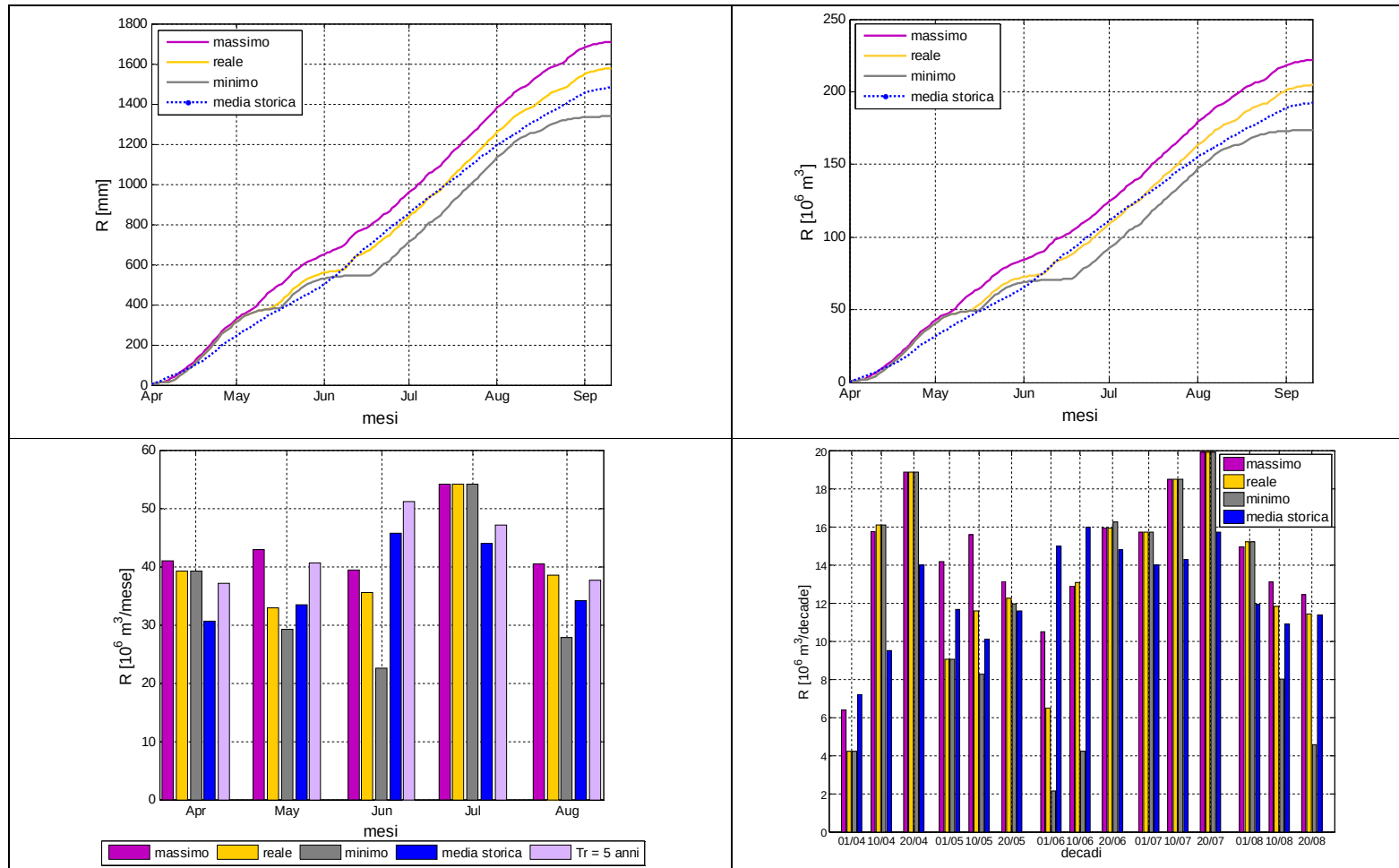
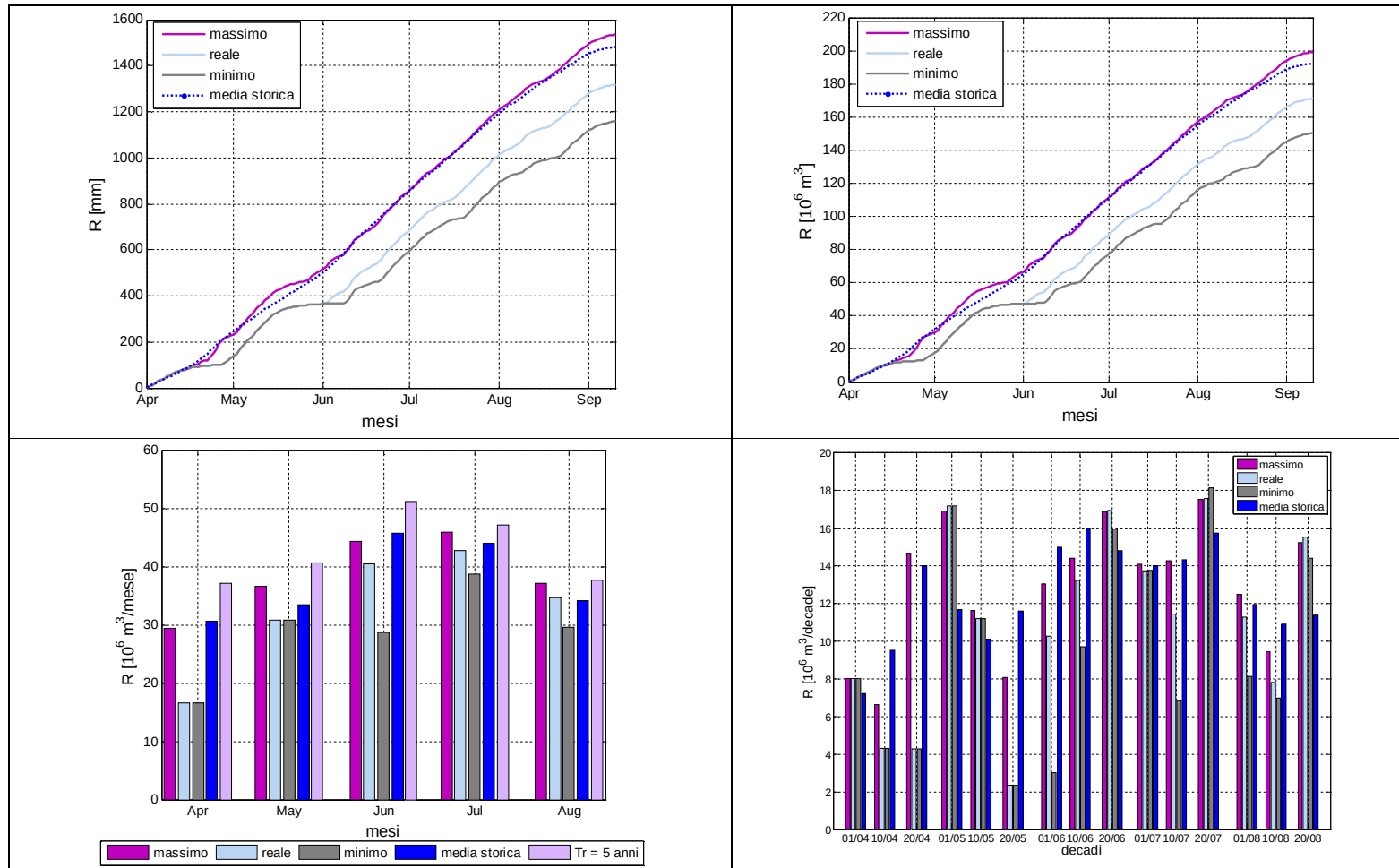


Fig. 67. Confronto tra i valori reali di fabbisogno con la media storica – ANNO 2008.



Tab. 13. Fabbisogno minimo, massimo e reale mensile per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008 e confronto con il valore di fabbisogno medio storico.

		aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
		10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3
2005	<i>Minimo</i>	22.69	43.18	48.40	43.82	26.29	185.01
	<i>Reale</i>	22.69	43.18	49.38	44.47	32.98	197.33
	<i>Massimo</i>	32.88	47.82	50.64	46.28	38.96	220.94
2006	<i>Minimo</i>	33.49	37.08	54.94	47.79	32.13	212.22
	<i>Reale</i>	33.49	37.08	54.94	50.40	39.05	220.47
	<i>Massimo</i>	37.81	45.91	54.94	51.62	40.33	236.11
2007	<i>Minimo</i>	39.22	29.27	22.60	54.10	27.80	173.72
	<i>Reale</i>	39.22	32.89	35.51	54.10	38.44	204.85
	<i>Massimo</i>	41.00	42.88	39.31	54.10	40.49	221.92
2008	<i>Minimo</i>	16.61	30.71	28.66	38.70	29.48	150.31
	<i>Reale</i>	16.61	30.71	40.40	42.71	34.58	171.18
	<i>Massimo</i>	29.30	36.58	44.28	45.83	37.13	199.26
Media storica		30.68	33.37	45.74	44.01	34.20	192.29
Tr = 5 anni		37.07	40.64	51.21	47.16	37.68	206.45
		aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
		<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
2005	<i>Minimo</i>	174.74	332.54	372.76	337.49	202.50	1424.90
	<i>Reale</i>	174.74	332.54	380.28	342.52	253.99	1519.78
	<i>Massimo</i>	253.24	368.31	390.06	356.46	300.07	1701.63
2006	<i>Minimo</i>	257.94	285.59	423.16	368.09	247.47	1634.47
	<i>Reale</i>	257.94	285.59	423.16	388.16	300.74	1697.98
	<i>Massimo</i>	291.22	353.59	423.17	397.58	310.63	1818.50
2007	<i>Minimo</i>	302.05	225.45	174.05	416.66	214.08	1337.98
	<i>Reale</i>	302.05	253.33	273.49	416.70	296.07	1577.73
	<i>Massimo</i>	315.76	330.22	302.78	416.70	311.81	1709.14
2008	<i>Minimo</i>	127.95	236.55	220.73	298.06	227.07	1157.67
	<i>Reale</i>	127.95	236.55	311.15	328.98	266.31	1318.41
	<i>Massimo</i>	225.68	281.71	341.03	353.01	285.94	1534.63
Media storica		236.31	257.03	352.30	338.98	263.37	1480.99
Tr = 5 anni		285.50	313.00	394.41	363.22	290.20	1590.03

Tab. 14. Fabbisogno minimo, massimo e reale decadale per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008.

		2005			2006			2007			2008			Media storica	Tr 5 anni
		Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo		
		10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³	10 ⁶ m ³		
aprile	1 decade	5.26	5.26	6.68	7.56	7.56	7.56	4.24	4.24	6.38	8.01	8.01	8.01	7.20	8.92
	2 decade	3.33	3.33	9.98	8.59	8.59	13.00	16.11	16.11	15.75	4.31	4.31	6.63	9.51	13.73
	3 decade	14.10	14.10	16.23	17.34	17.34	17.25	18.87	18.87	18.88	4.29	4.29	14.67	13.97	17.66
maggio	1 decade	16.33	16.33	16.88	14.55	14.55	14.40	9.05	9.05	14.16	17.17	17.17	16.90	11.67	14.74
	2 decade	12.35	12.35	13.06	5.56	5.56	15.17	8.27	11.59	15.58	11.20	11.20	11.63	10.13	13.50
	3 decade	14.49	14.49	17.88	16.97	16.97	16.34	11.95	12.25	13.13	2.35	2.35	8.05	11.58	16.66
giugno	1 decade	18.06	18.06	18.10	19.86	19.86	19.86	2.14	6.50	10.50	3.04	10.25	13.03	14.97	18.91
	2 decade	14.34	15.35	16.93	19.88	19.88	19.88	4.22	13.08	12.88	9.69	13.22	14.39	15.98	18.07
	3 decade	15.99	15.96	15.62	15.20	15.20	15.20	16.24	15.93	15.93	15.94	16.93	16.86	14.79	16.37
luglio	1 decade	12.80	12.78	12.88	16.05	16.05	16.62	15.71	15.71	15.71	13.75	13.72	14.07	13.98	15.64
	2 decade	14.90	14.90	15.08	13.30	15.86	16.52	18.49	18.49	18.49	6.83	11.44	14.25	14.30	16.54
	3 decade	16.12	16.79	18.32	18.44	18.50	18.48	19.90	19.90	19.90	18.12	17.56	17.51	15.73	17.82
agosto	1 decade	9.40	12.74	14.04	14.86	14.86	14.86	15.21	15.21	14.94	8.12	11.26	12.48	11.92	13.79
	2 decade	11.98	11.75	13.15	11.36	11.36	11.47	8.01	11.82	13.10	6.97	7.81	9.45	10.90	12.52
	3 decade	4.90	8.49	11.78	5.91	12.83	14.00	4.58	11.41	12.45	14.40	15.51	15.20	11.37	13.41
totale stagionale		185.01	197.33	220.94	212.22	220.47	236.11	173.72	204.85	204.85	150.31	171.18	199.26	192.29	206.45

Capitolo 5 – Valutazione del fabbisogno irriguo

		2005			2006			2007			2008			Media storica	Tr 5 anni
		Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo	Minimo	Reale	Massimo		
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
aprile	1 decade	40.53	40.53	51.42	58.23	58.23	58.23	32.64	32.64	49.10	61.68	61.68	61.68	55.48	68.73
	2 decade	25.64	25.64	76.83	66.18	66.18	100.09	124.04	124.04	121.28	33.21	33.21	51.04	73.21	105.77
	3 decade	108.57	108.57	124.99	133.52	133.52	132.89	145.37	145.37	145.37	33.06	33.06	112.97	107.62	136.01
maggio	1 decade	125.77	125.77	129.99	112.08	112.08	110.89	69.69	69.69	109.08	132.21	132.21	130.14	89.88	113.51
	2 decade	95.14	95.14	100.61	42.79	42.79	116.84	63.70	89.26	120.01	86.25	86.25	89.54	78.00	103.95
	3 decade	111.63	111.63	137.71	130.72	130.72	125.86	92.05	94.38	101.14	18.08	18.08	62.04	89.16	128.31
giugno	1 decade	139.12	139.12	139.36	152.97	152.97	152.99	16.47	50.08	80.90	23.38	78.95	100.37	115.31	145.59
	2 decade	110.47	118.24	130.40	153.09	153.09	153.09	32.48	100.75	99.21	74.61	101.85	110.84	123.05	139.20
	3 decade	123.17	122.92	120.29	117.09	117.09	117.09	125.10	122.66	122.67	122.74	130.36	129.82	113.94	126.09
luglio	1 decade	98.58	98.45	99.20	123.62	123.58	128.01	120.99	121.03	121.03	105.88	105.64	108.39	107.70	120.49
	2 decade	114.79	114.79	116.15	102.46	122.13	127.27	142.39	142.40	142.40	52.59	88.10	109.73	110.12	127.35
	3 decade	124.12	129.29	141.11	142.01	142.46	142.29	153.28	153.28	153.28	139.58	135.23	134.89	121.17	137.24
agosto	1 decade	72.43	98.15	108.13	114.42	114.42	114.42	117.16	117.16	115.03	62.52	86.73	96.11	91.83	106.24
	2 decade	92.30	90.48	101.24	87.49	87.49	88.37	61.66	91.00	100.91	53.65	60.14	72.75	83.97	96.46
	3 decade	37.76	65.36	90.69	45.55	98.83	107.84	35.26	87.91	95.87	110.90	119.44	117.08	87.58	103.26
totale stagionale		1424.90	1519.78	1701.63	1634.47	1697.98	1818.50	1337.98	1577.73	1577.73	1157.67	1318.41	1534.63	1480.99	1590.03

5.5 Stima dei deficit nelle stagioni 2005 - 2008

Stimati i volumi necessari al soddisfacimento del fabbisogno irriguo del comprensorio è possibile realizzare un confronto con i valori erogati negli anni 2004-2008. Per evidenziare l'entità dei deficit verificatisi, la Tabella 15 mostra i valori di fabbisogno reale e il totale stagionale dei volumi immessi sul comprensorio. Come si può notare, solamente il 2008 non presenta un deficit dei volumi introdotti rispetto a quelli necessari.

Tab. 15. Confronto tra i volumi stimati e i volumi erogati negli anni 2005, 2006, 2007 e 2008, nel caso di calcolo del fabbisogno con utilizzo ottimale delle piogge.

Anno	Fabbisogno	Fornitura	Differenza
	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
2005	197.33	178.84	-18.49
2006	220.47	170.95	-49.52
2007	204.85	163.86	-40.99
2008	171.18	177.02	5.84
	mm	mm	mm
2005	1519.79	1377.39	-142.41
2006	1698.01	1316.62	-381.39
2007	1577.71	1262.01	-315.70
2008	1318.39	1363.37	44.98

Come detto in precedenza, è interessante confrontare il fabbisogno stimato e quello effettivamente erogato anche a scala mensile e decadale. Nelle due tabelle successive sono riportati i confronti a scala mensile e decadale.

Tab. 16. Fabbisogno mensile per gli anni 2005, 2006, 2007 e 2008 e entità delle erogazioni effettive e deficit conseguente. La media storica è calcolata nel 5.7.

		aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
		$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
2005	R	22.69	43.17	49.37	44.47	32.98	197.33
	Q_i	35.49	40.24	41.76	29.84	26.27	178.84
	Deficit	12.80	-2.93	-7.61	-14.63	-6.71	-18.49
2006	R	33.49	37.08	54.94	50.41	39.05	220.47
	Q_i	39.22	39.62	30.20	30.66	24.59	170.95
	Deficit	5.73	2.54	-24.74	-19.75	-14.46	-49.52
2007	R	39.22	32.89	35.51	54.10	38.44	204.85
	Q_i	36.64	33.22	35.52	28.70	23.82	163.86
	Deficit	-2.58	0.33	0.01	-25.40	-14.62	-40.99
2008	R	16.61	30.72	40.40	42.72	34.58	171.18
	Q_i	27.98	33.54	36.56	41.31	29.56	177.02
	Deficit	11.37	2.82	-3.84	-1.41	-5.02	5.84
Media storica		30.68	33.37	45.74	44.01	34.20	192.29
Tr = 5 anni		37.07	40.64	51.21	47.16	37.68	206.45
		aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
		mm	mm	mm	mm	mm	mm
2005	R	174.74	332.47	380.22	342.48	253.99	1519.78
	Q_i	273.36	309.91	321.64	229.80	202.32	1377.39
	Deficit	98.61	-22.56	-58.57	-112.68	-51.67	-142.41
2006	R	257.92	285.57	423.11	388.23	300.74	1697.98
	Q_i	302.06	305.12	232.58	236.16	189.35	1316.62
	Deficit	44.14	19.55	-190.53	-152.07	-111.39	-381.39
2007	R	302.05	253.30	273.48	416.64	296.04	1577.73
	Q_i	282.18	255.87	273.54	221.01	183.44	1262.01
	Deficit	-19.87	2.57	0.06	-195.63	-112.60	-315.70
2008	R	127.92	236.5865	311.1359	329.0031	266.3138	1318.41
	Q_i	215.4998	258.3021	281.5863	318.1177	227.6296	1363.37
	Deficit	87.57985	21.71564	-29.5496	-10.8854	-38.6843	44.98
Media storica		236.31	257.03	352.30	338.98	263.37	1480.99
Tr = 5 anni		285.50	313.00	394.41	363.22	290.20	1590.03

Tab. 17. Fabbisogno stimato, portate erogate e deficit decadali per le stagioni dal 2004 al 2008.

		2005			2006			2007			2008		
		<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>
		10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s	10 ⁶ m ³ /s
aprile	1 decade	5.26	11.05	5.79	7.56	12.16	4.60	4.24	10.14	5.90	8.01	5.65	-2.36
	2 decade	3.33	11.65	8.32	8.59	13.21	4.62	16.11	13.25	-2.86	4.31	10.29	5.98
	3 decade	14.10	12.79	-1.31	17.34	13.85	-3.49	18.87	13.24	-5.63	4.29	12.05	7.76
maggio	1 decade	16.33	13.24	-3.09	14.55	12.95	-1.60	9.05	9.47	0.42	17.17	12.08	-5.09
	2 decade	12.35	13.53	1.18	5.56	13.37	7.81	11.59	12.21	0.62	11.20	11.57	0.37
	3 decade	14.49	13.47	-1.02	16.97	13.30	-3.67	12.25	11.54	-0.71	2.35	9.89	7.54
giugno	1 decade	18.06	14.34	-3.72	19.86	9.89	-9.97	6.50	10.64	4.14	10.25	11.13	0.88
	2 decade	15.35	12.68	-2.67	19.88	9.93	-9.95	13.08	12.14	-0.94	13.22	11.13	-2.09
	3 decade	15.96	14.74	-1.22	15.20	10.38	-4.82	15.93	12.73	-3.20	16.93	14.31	-2.62
luglio	1 decade	12.78	11.84	-0.94	16.05	10.99	-5.06	15.71	12.18	-3.53	13.72	15.33	1.61
	2 decade	14.90	9.48	-5.42	15.86	10.60	-5.26	18.49	8.94	-9.55	11.44	13.21	1.77
	3 decade	16.79	8.51	-8.28	18.50	9.07	-9.43	19.90	7.57	-12.33	17.56	12.77	-4.79
agosto	1 decade	12.74	10.26	-2.48	14.86	7.28	-7.58	15.21	5.62	-9.59	11.26	11.91	0.65
	2 decade	11.75	8.17	-3.58	11.36	5.76	-5.60	11.82	10.05	-1.77	7.81	9.15	1.34
	3 decade	8.49	7.84	-0.65	12.83	11.55	-1.28	11.41	8.15	-3.26	15.51	8.50	-7.01
totale stagionale		197.33	178.84	-18.49	220.47	170.95	-49.52	204.85	163.86	-40.99	171.18	177.02	5.84

		2005			2006			2007			2008		
		<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>	<i>R</i>	<i>Q_i</i>	<i>Deficit</i>
		<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
aprile	1 decade	40.51	85.13	44.62	58.22	93.68	35.46	32.65	78.10	45.45	61.69	43.50	-18.19
	2 decade	25.65	89.72	64.08	66.15	101.73	35.57	124.07	102.08	-21.99	33.19	79.23	46.04
	3 decade	108.59	98.50	-10.09	133.54	106.65	-26.89	145.33	102.00	-43.32	33.04	92.77	59.73
maggio	1 decade	125.76	101.99	-23.78	112.06	99.72	-12.33	69.70	72.95	3.25	132.23	92.99	-39.24
	2 decade	95.11	104.18	9.07	42.82	102.98	60.17	89.26	94.02	4.76	86.26	89.12	2.87
	3 decade	111.59	103.73	-7.86	130.69	102.41	-28.28	94.34	88.91	-5.43	18.10	76.18	58.09
giugno	1 decade	139.09	110.47	-28.61	152.95	76.15	-76.80	50.06	81.98	31.92	78.94	85.69	6.75
	2 decade	118.22	97.68	-20.54	153.10	76.48	-76.62	100.73	93.50	-7.23	101.81	85.70	-16.11
	3 decade	122.91	113.49	-9.42	117.06	79.94	-37.12	122.68	98.06	-24.63	130.38	110.20	-20.19
luglio	1 decade	98.42	91.21	-7.21	123.61	84.67	-38.93	120.99	93.81	-27.18	105.66	118.06	12.40
	2 decade	114.75	73.03	-41.72	122.14	81.61	-40.53	142.40	68.88	-73.52	88.10	101.73	13.63
	3 decade	129.31	65.56	-63.75	142.48	69.87	-72.60	153.26	58.33	-94.93	135.24	98.33	-36.91
agosto	1 decade	98.12	79.02	-19.09	114.44	56.06	-58.38	117.14	43.31	-73.83	86.72	91.72	5.00
	2 decade	90.49	62.95	-27.54	87.49	44.37	-43.11	91.03	77.40	-13.63	60.15	70.44	10.29
	3 decade	65.38	60.34	-5.04	98.81	88.91	-9.89	87.87	62.74	-25.14	119.45	65.47	-53.98
totale stagionale		1519.78	1377.39	-142.41	1698.01	1316.62	-381.39	1577.71	1262.01	-315.70	1318.39	1363.37	44.98

5.6 Valutazioni relative ad anni antecedenti il 2005

Il calcolo del deficit idrico per gli anni antecedenti il 2005 è reso difficoltoso dalla scarsa disponibilità di dati riguardanti le portate influenti e defluenti dal comprensorio. Tuttavia, avendo a disposizione i dati meteorologici è comunque possibile procedere alla valutazione del fabbisogno irriguo mediante l'applicazione del modello di bilancio precedentemente descritto. Inoltre, nel precedente lavoro (Claps, Laio (2008)) è stato realizzato un calcolo approssimativo dei volumi erogati dall'anno 2000 al 2004 mediante similitudini con le serie complete a disposizione (2005 – 2008). E' quindi possibile procedere con un confronto seppur molto approssimativo tra fabbisogno irriguo e volumi erogati per le stagioni 2003 e 2004. I risultati sono presentati nelle seguenti tabelle.

Tab. 18. Valori mensili di fabbisogno e deficit per gli anni 2003 e 2004.

	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
	<i>10⁶ m³</i>	<i>10⁶ m³</i>	<i>10⁶ m³</i>	<i>10⁶ m³</i>	<i>10⁶ m³</i>	<i>10⁶ m³</i>
2003	35.41	47.21	54.65	42.58	39.22	224.46
2004	23.75	31.69	52.64	47.10	31.19	191.75
Media storica	30.68	33.37	45.74	44.01	34.20	192.29
Tr = 5 anni	37.07	40.64	51.21	47.16	37.68	206.45
	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	totale stagionale
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
2003	272.76	363.62	420.89	327.98	302.10	1728.72
2004	182.93	244.05	405.43	362.73	240.22	1476.84
Media storica	236.31	257.03	352.30	338.98	263.37	1480.99
Tr = 5 anni	285.50	313.00	394.41	363.22	290.20	1590.03

Tab. 19. Valori decadali di fabbisogno irriguo per gli anni 2003 e 2004.

		2003		2004		Media storica	
		$10^6 m^3$	mm	$10^6 m^3$	mm	$10^6 m^3$	mm
aprile	1 decade	8.03	61.88	7.82	60.22	7.20	55.48
	2 decade	10.93	84.18	3.25	25.00	9.51	73.21
	3 decade	16.45	126.69	12.69	97.71	13.97	107.62
maggio	1 decade	14.94	115.03	6.44	49.59	11.67	89.88
	2 decade	15.25	117.47	9.71	74.80	10.13	78.00
	3 decade	17.02	131.12	15.54	119.66	11.58	89.16
giugno	1 decade	19.01	146.41	19.67	151.51	14.97	115.31
	2 decade	19.04	146.63	16.79	129.32	15.98	123.05
	3 decade	16.60	127.85	16.18	124.60	14.79	113.94
luglio	1 decade	16.69	128.54	14.24	109.68	13.98	107.70
	2 decade	16.38	126.17	16.96	130.60	14.30	110.12
	3 decade	9.51	73.26	15.90	122.45	15.73	121.17
agosto	1 decade	13.84	106.62	9.74	75.05	11.92	91.83
	2 decade	12.12	93.34	10.23	78.83	10.90	83.97
	3 decade	13.26	102.14	11.21	86.35	11.37	87.58
totale stagionale		224.46	1782.72	191.75	1476.84	192.29	1480.99

Tab. 20. Confronto tra Fabbisogno totale e volumi erogati per gli anni 2003 e 2004.

	Fabbisogno (R)	Fornitura (Q _i)	Differenza (R-Q _i)
	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
2003	224.46	113.16	-111.3
2004	191.75	158.76	-32.99
	Fabbisogno (R)	Fornitura (Q _i)	Differenza (R-Q _i)
	mm	mm	mm
2003	1728.72	871.55	-857.17
2004	1476.84	1222.64	-254.2

5.7 Analisi statistica dei fabbisogni

In questo paragrafo si presentano le analisi statistiche condotte su quindici anni di misure relative ad alcune stazioni agrometeorologiche presenti nel comprensorio della baraggia. Le stazioni meteorologiche dislocate sul territorio presentano serie storiche di precipitazione e di variabili meteorologiche con cadenza giornaliera di lunghezza differente secondo l'anno di messa in funzione (Tabella 21). Le grandezze agrometeorologiche disponibili (radiazione, temperatura, etc) saranno utilizzate per ottenere: 1) il valor medio del fabbisogno, 2) il fabbisogno di stagioni siccitose che si verificano in media una volta ogni cinque anni (periodo di ritorno, $Tr=5$).

5.7.1 *Fabbisogno medio storico*

Il fabbisogno medio storico ha il senso di parametro di riferimento nella valutazione dei volumi necessari annualmente per la coltura del riso.

Tab. 21. Stazioni meteorologiche sul comprensorio e relativo anno di inizio attività.

Stazione	Anno inizio attività
Albano Vercellese	Aprile 1988
Buronzo	Febbraio 1999
Gattinara	Febbraio 1999
Masserano	Novembre 1990
Roasio	Settembre 2004
Vercelli	Giugno 1993

Tra le stazioni prese in esame per la stima della media, riportate in Tabella 21, la più completa è quella di Albano Vercellese, che presenta una serie di dati di lunghezza pari a 20 anni. Le altre sono di più recente introduzione, fino ad arrivare alla stazione di Roasio, entrata in attività solamente nel 2004. Le stazioni sono parte della Rete Agrometeorologica Regionale (RAM), gestita dall'Assessorato all'Agricoltura della Regione Piemonte. I dati di

temperatura e umidità dell'aria utilizzati nella stima dell'evapotraspirazione sono misurati in tutte le stazioni, mentre i valori di radiazione solare e velocità del vento sono registrati nella sola stazione di Vercelli. Essendo questi ultimi fondamentali nel calcolo dell'evapotraspirazione, ne deriva che la ricostruzione della curva del fabbisogno è stata possibile dall'anno 1994 all'anno 2008.

L'applicazione del modello di bilancio sul comprensorio fornisce serie di valori di volumi in ingresso e in uscita, che sono riportati in Allegato 3. La Figura 68 mostra la curva del fabbisogno medio storico cumulato. I valori mensili e decadali del fabbisogno sono riportati in Tabella 22.

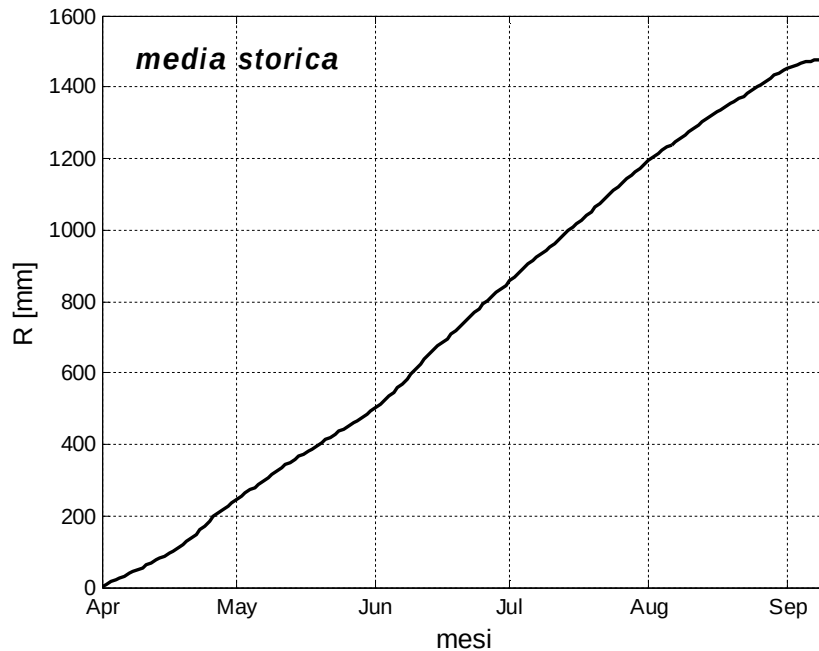


Fig. 68. Curva del fabbisogno medio storico.

Tab. 22. valori mensili e decadali del fabbisogno medio storico.

		Media storica	
		decadale	mensile
		10^6 m^3	10^6 m^3
aprile	1 decade	7.20	30.68
	2 decade	9.51	
	3 decade	13.97	
maggio	1 decade	11.67	33.37
	2 decade	10.13	
	3 decade	11.58	
giugno	1 decade	14.97	45.74
	2 decade	15.98	
	3 decade	14.79	
luglio	1 decade	13.98	44.01
	2 decade	14.30	
	3 decade	15.73	
agosto	1 decade	11.92	34.20
	2 decade	10.90	
	3 decade	11.37	
totale stagionale		192.29	

5.7.2 Fabbisogno con periodo di ritorno 5 anni

Per effettuare valutazioni obiettive sull'entità del fabbisogno degli anni a venire è stato calcolato, in aggiunta al valore medio storico, anche un valore di fabbisogno con prefissato periodo di ritorno. Per la tipologia di sistema considerato si è assunto **Tr = 5 anni**. Il calcolo del fabbisogno è stato effettuato sui valori mensili e decadali di fabbisogno ricavati dall'applicazione del modello alle serie temporali di dati meteorologici per gli anni dal 1994 al 2008. I valori di R così ottenuti sono poi stati raggruppati secondo il mese corrispondente (aprile, maggio, ... , settembre) e secondo la relativa decade e su queste serie di dati sono stati ricercati i valori con fissato periodo di ritorno.

La figura seguente mostra il fabbisogno annuo stimato mediante adozione della distribuzione Gamma (Appendice C). Nell'Allegato 4 si riportano le figure relative alle stime decadali. I valori mensili e decadali con periodo di ritorno 5 anni sono riportati nella Tabella 23.

Tab. 23. Valori mensili e decadali annuo del fabbisogno con periodo di ritorno 5 anni.

		Media storica	
		decadale	mensile
		10^6 m^3	10^6 m^3
aprile	1 decade	8.93	40.32
	2 decade	13.73	
	3 decade	17.66	
maggio	1 decade	14.74	42.15
	2 decade	12.79	
	3 decade	14.62	
giugno	1 decade	16.76	51.20
	2 decade	17.88	
	3 decade	16.56	
luglio	1 decade	14.98	47.16
	2 decade	15.32	
	3 decade	16.86	
agosto	1 decade	13.14	40.32
	2 decade	13.30	
	3 decade	13.88	
totale stagionale		221.15	

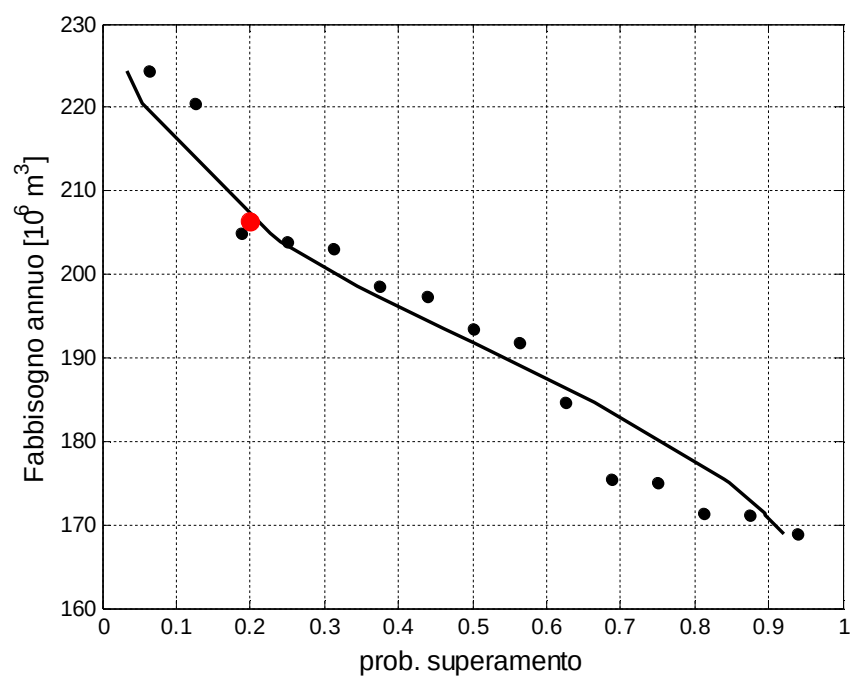


Fig. 69. Stima del fabbisogno annuo.

6 CONCLUSIONI

Il principale obiettivo di questo lavoro è stato quello di impostare un modello di bilancio idrico del comprensorio irriguo del Consorzio della Baraggia basato sulla connessione tra elementi modellistici -idraulici ed idrologici- e l'insieme delle pratiche agricole ed irrigue che da secoli connotano la conduzione di sistemi tanto complessi. Il processo di concettualizzazione delle pratiche operative è stato messo in atto sulla base di numerosi confronti e verifiche esperiti con i tecnici del Consorzio ed è certamente perfezionabile. Rappresenta, tuttavia, il primo esempio - a quanto ci è dato sapere - di impostazione di un apparato modellistico che possa avere anche la funzione di supporto alla gestione operativa - idrologica ed idraulica - di comprensori irrigui in cui il riso sia coltivato con la pratica della sommersione continua.

In termini pratici, in questo lavoro il fabbisogno irriguo è stato messo in relazione con l'andamento temporale del carico idraulico sul terreno durante la stagione irrigua, oltre che con le componenti meteorologiche che rappresentano principali forzanti del bilancio idrico. Il modello di bilancio è stato quindi sviluppato tenendo conto di tutte le componenti tipiche di un comprensorio risicolo coltivato con la pratica della sommersione continua: le portate in ingresso e in uscita, le precipitazioni, le perdite per evapotraspirazione e filtrazione, ma si è tenuto esplicitamente conto dei volumi immagazzinati per il riempimento delle risaie, delle portate di transito necessarie per mantenere l'operatività dei canali e stabilizzare le temperature nelle camere di risaia.

Molto importante è la distinzione tra gli aspetti relativi al bilancio di una singola camera di risaia e quelli caratteristici di un insieme complesso come quello dell'intero comprensorio, di oltre 12.000 ettari. Per la prima componente, si è costruito il nucleo del modello idrologico di bilancio effettuandone una preliminare taratura a scala di dettaglio (singole camere di risaia), potendo usufruire di un campo prova appositamente attrezzato per la misurazione in continuo di tutte le portate in ingresso e in uscita, oltre che di tutte le variabili meteorologiche locali. I parametri stimati sono stati la differenza di temperatura tra l'acqua in risaia e quella nei fossi per il calcolo della frazione di radiazione trasferita in calore sensibile, la valutazione di massima dei flussi laterali, poi trascurati nel modello, le caratteristiche relative agli spessori del terreno e della soletta a bassa permeabilità, i flussi di

mantenimento durante i mesi più caldi, le modalità di scarico delle precipitazioni più significative e l'entità dei battenti idrici tenuti nel corso della stagione irrigua. Localmente, sono stati utilizzati i valori di coefficiente di permeabilità idraulica a saturazione determinati a seguito di campagne di misura. Le perdite per filtrazione sono state considerate sia usando il concetto della riduzione nel tempo del coefficiente di permeabilità, che rivedendo gli effetti della variabilità del battente idrico sull'entità della perdita.

La componente di modello relativa alla gestione dell'intero comprensorio ha richiesto la considerazione di ulteriori elementi, alcuni dei quali hanno un importante effetto di scala sulla quantificazione del fabbisogno. Ci si riferisce in particolare a parametri come quello che definisce la percentuale di campi di risaia contemporaneamente allagati, che ha significativo impatto sui fabbisogni, soprattutto nella prima parte della stagione irrigua.

Dovendo operare globalmente sul comprensorio, è stato necessario operare con valori medi dei parametri che sono caratterizzati da variabilità spaziale, come ad esempio il coefficiente di permeabilità dei suoli, che era stato oggetto di valutazioni sperimentali nel lavoro precedentemente svolto (Claps, Laio (2008)) per conto del Consorzio. I dati relativi al parametro permeabilità sono stati utilizzati pesandoli sistematicamente con le aree corrispondenti alle Unità Pedologiche a cui erano stati attribuiti.

Molta importanza è stata data, sia a scala di campo che di comprensorio, all'impiego della curva di stato del livello idrico quale fattore di vincolo, oltre che di controllo, per la conduzione del modello. In altri termini, avere sempre a disposizione un dato relativo all'altezza idrica, che risulta dallo sviluppo del modello fino al generico giorno di modellazione, consente una verifica dei parametri e delle ipotesi del modello che ha grande importanza per l'affidabilità dei risultati ottenuti.

La costruzione del citato modello consente di determinare le grandezze su cui fondare la valutazione del fabbisogno a scala di comprensorio. Le peculiarità dei sistemi irrigui a sommersione fanno sì che le sole forzanti meteorologiche non siano sufficienti ad ottenere una quantificazione univoca del fabbisogno neanche se riferite ad anni pregressi. In questo lavoro si sono considerati i vincoli e forzanti di natura idraulica che possono condizionare il risultato finale, con il necessario aiuto da parte dei tecnici del Consorzio. Il risultato ottenuto si presenta compatibile con le condizioni osservate durante le stagioni irrigue del recente passato, in particolare con quelle siccitose. Tuttavia, bisogna aggiungere che la complessità del modello idraulico-idrologico merita quello sforzo in più che potrebbe portare alla costruzione di un sistema di supporto alle decisioni utile per un impiego operativo nella

gestione di compresori di questo tipo, specie se associati a sistemi con capacità di regolazione dei deflussi.

7 BIBLIOGRAFIA CITATA E DI RIFERIMENTO

- [1] AUTORI VARI (2008) – *Il riso*. Collana: Coltura e cultura
- [2] ALLAVENA L. (1995) – *Coefficienti colturali per la stima dell'evapotraspirazione del riso nell'ambiente climatico della pianura padana nord-occidentale*. Irrigazione e drenaggio, XLII, 4, 28-35
- [3] ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. (1998) – *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma
- [4] BOUMAN B. A. M., KROPFF M. J., TUONG T. P., WOPEREIS M. C. S., TEN BERGE H. F. M., VAN LAAR H. H. (2001) – *ORYZA2000: Modeling Lowland Rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines and Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands. Materiale disponibile all'indirizzo:
<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/>
- [5] CLAPS P., F. LAIO. *Valutazione dei consumi e dei fabbisogni idrici nel comprensorio irriguo denominato centro Sesia su una superficie di 15.500 ettari* POLITECNICO DI TORINO (2008) Disponibile all'indirizzo: www.idrologia.polito.it/Baraggia/relazionefinale.pdf
- [6] CLAPS P., Estimation of the reference crop evapotranspiration: practical application of the FAO Penman-Monteith method, Politecnico di Torino, 2007, Documento scaricabile all'indirizzo http://www.idrologia.polito.it/Baraggia/FAO_PENMAN_Claps.pdf
- [7] CONSTANTINIDIS C. (1970) – *Bonifica ed irrigazione. Edagricole*
- [8] LARUCCIA N. (2008) – *Relazione conclusiva sulla caratterizzazione della permeabilità dei suoli nel Centro Sesia*

- [9] MEGALE P.G. (2008) – *Quaderni di idraulica agraria*
- [10] MAIONE U., MOISELLO U. (1993) – *Elementi di statistica per l'idrologia*. La Goliardica Pavese