

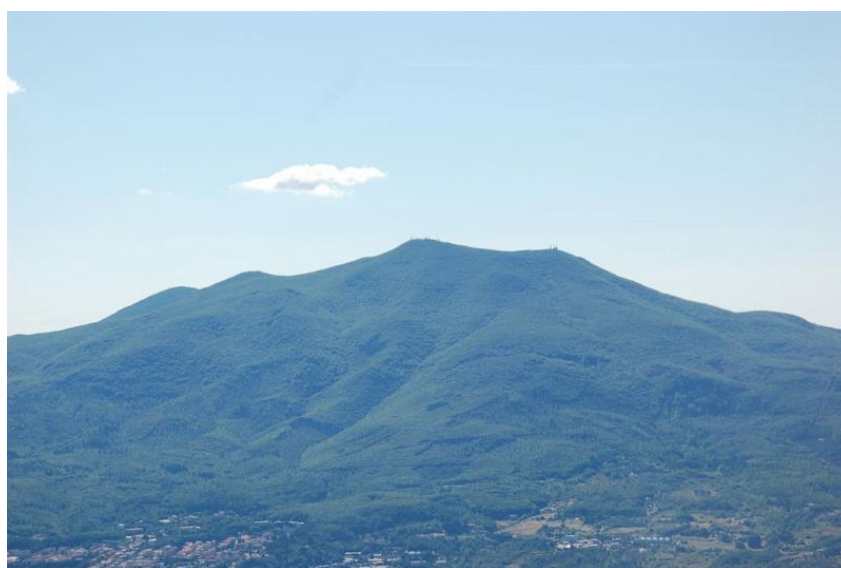


Regione Toscana

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità

**D.G. Politiche Territoriali, Ambientali e per la Mobilità
Settore Prevenzione del Rischio idraulico e Idrogeologico**

Adattamento e implementazione del modello idrologico MOBIDIC per il bilancio dei bacini idrografici e dell'acquifero del Monte Amiata



Relazione Finale, Dicembre 2011

Gruppo di lavoro:

Francesca Caparrini, Eumechanos

Fabio Castelli e Giulia Ercolani, Università di Firenze



eumechanos
Via La Marmora, 22
50121 Firenze
info@eumechanos.it



Indice generale

SCOPO GENERALE DEL PROGETTO	9
RINGRAZIAMENTI	9
SISTEMA MODELLISTICO MOBIDIC PER I BILANCI IDRICI SUPERFICIALI E SUB-SUPERFICIALI	10
Caratteristiche generali	10
DATI	11
Dati meteorologici	11
Omogeneizzazione dei dati idrometeorologici sul periodo di simulazione	12
Dati di portata dalle sorgenti	16
Dati di verifica/calibrazione: idrologia di superficie	17
Dati geografici	18
Ricostruzione della geometria dell'acquifero	20
SCENARI DI SIMULAZIONE	22
IDROLOGIA DI SUPERFICIE	24
RISULTATI SULLA FALDA	31
Geometria CISS	32
Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010	32
Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010	33
Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010	35
Andamento temporale dei livelli piezometrici medi	37
Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda	38
Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta (sogente S. Fiora)	40
Andamento temporale delle fuoriuscite da sorgente Ermicciolo	41
Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010.	42
Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994)	43
Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010)	43
Geometria ENEL	44
Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010	44
Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010	45
Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010	47
Andamento temporale dei livelli piezometrici medi	49

Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda	50
Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta (sogente S. Fiora)	52
Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010	53
Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994)	54
Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010)	55
CONFRONTO CON LE MISURE DISPONIBILI	56
Portate dalla sorgente di S.Fiora	56
Livelli freaticometrici	57
Portate nei corsi d'acqua	59
Stime da satellite del manto nevoso	61
CONCLUSIONI	66
APPENDICE A – IL MODELLO MOBIDIC	68
Caratteristiche generali	68
Il sistema suolo-vegetazione-atmosfera	69
Idrologia del suolo	70
Dinamica del manto nevoso	72
Idrografia	74
Dinamica dell'acquifero freatico	74
Soluzione numerica	75
Parametri del modello	78

Indice delle figure

Figura 1 - Mappa delle stazioni per il periodo 1994-2010.....	12
Figura 2 - Serie pluviometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multi regressivo (1994-2010).	13
Figura 3 - Serie termometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multiregressivo (1994-2010).	13
Figura 4 - Totali pluviometrici annui, dati e ricostruzioni. In alcuni casi il dato ricostruito supera il dato misurato a causa di dati mancanti in alcune serie annuali.	14
Figura 5 - Serie pluviometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multi regressivo (1965-2010).	15
Figura 6 - Dominio di calcolo dell'idrologia di superficie con indicazione del limite dell'acquifero (linea rossa) e delle sorgenti (punti, di cui i rossi sono quelle gestite dall'Acquedotto del Fiora). Nella figura sono indicati anche i due siti (sul Fosso Fosso Cadone e sul Fosso Bugnano) in cui saranno effettuate le misure idrometriche del Servizio Idrologico Regionale.....	18
Figura 7 - Mappa del parametro di velocità di infiltrazione $ks[m/s]$ nella zona dell'Amiata ricavata dalla cartografia pedologica a scala 1:250,000.	19
Figura 8 - Profondità del letto dell'acquifero, in metri sul livello del mare, secondo gli studi del Progetto Corpi Idrici Significativi (CISS, a sinistra) e secondo lo studio ENEL (a destra).	20
Figura 9 - Profondità del letto dell'acquifero, in metri sotto al piano di campagna, secondo gli studi del Progetto Corpi Idrici Significativi (CISS, a sinistra) e secondo lo studio ENEL (a destra).	21
Figura 10 - Schema ipotetico di distribuzione spaziale eterogenea della conducibilità idraulica dell'acquifero.	23
Figura 11 - Mappa della precipitazione cumulata annuale (media del periodo 1990-2010) sull'areale dell'acquifero, ottenuta attraverso l'interpolazione spaziale dei dati puntuali delle 5 stazioni in telemisura. Si evidenzia un gradiente in direzione nord ovest- sud est.....	24
Figura 12 - Istogramma delle precipitazioni cumulate annue mediate sull'areale dell'acquifero nel periodo di analisi (1990-2010).	24
Figura 13 - Mappe di precipitazione cumulata media (1990-2010) suddivisa per trimestri.	25
Figura 14 - Istogramma delle precipitazioni mensili medie (1990-2010) sull'areale dell'acquifero.	25
Figura 15 - Mappe della precipitazione cumulata annuale sull'areale dell'acquifero nell'anno più umido del periodo analizzato (2010, a sinistra) e nel più secco (1994, a destra).	26
Figura 16 - Istogrammi di andamento delle precipitazioni mensili medie nell'anno più umido (2010) e in quello più secco (1994).....	26

Figura 17 - Mappe delle temperature dell'aria massime giornaliere (destra) e minime giornaliere (sinistra) , medie annue 1990-2010, sull'areale dell'acquifero.	27
Figura 18 - Mappe delle temperature massime e minime giornaliere nei mesi di Gennaio e Luglio (media 1990-2010).	27
Figura 19 - Mappa dell'evapotraspirazione reale media annua (incluso il contributo di sublimazione della neve) per il periodo 1990-2010.	28
Figura 20 - Mappa della fusione cumulata annua della neve (media 1990-2010).	28
Figura 21 - Mappa del contenuto d'acqua equivalente della neve medio annuo (media 1990-2010).	29
Figura 22 - Mappa delle portate nel reticolo idrografico medie per l'intero periodo di simulazione (1990-2010. Le frecce rosse indicano le sezioni per le quali sono riportati i risultati nelle figure di seguito.	29
Figura 23 - Andamento giornaliero (sinistra) e curva di durata (destra) delle portate per il Fosso Cadone al ponte di Fornacina.	30
Figura 24 - Come in Fig. 23, ma per il Fosso Bugnano allo sbocco nel Vivo.	30
Figura 25 - Confronto dei livelli medi di falda su una sezione E-O per la geometria CISS e diverse distribuzioni di conducibilità idraulica dll'acquifero.	31
Figura 26 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).	32
Figura 27 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25).	32
Figura 28 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).	33
Figura 29 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).	33
Figura 30 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25).	34
Figura 31 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR). ..	34
Figura 32 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).	35
Figura 33 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25). ...	35
Figura 34 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR). ..	36
Figura 35 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KF4).	37
Figura 36 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KF25).	37
Figura 37 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KFVAR).	38
Figura 38 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione CISS-KF4).	38
Figura 39 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione CISS-KFVAR).	39

Figura 40 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sogente S. Fiora (simulazione CISS-KF4).	40
Figura 41 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sogente S. Fiora (simulazione CISS-KF25).	40
Figura 42 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sogente S. Fiora (simulazione CISS-KFVAR).	41
Figura 43 - Andamento temporale delle fuoriuscite da sogente Ermicciolo (simulazione CISS-KFVAR).	41
Figura 44 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).	42
Figura 45 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).	42
Figura 46 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994) per la simulazione CISS-KF4 (sx) e CISS-KFVAR (dx).	43
Figura 47 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010) per la simulazione CISS-KF4 (sx) e CISS-KFVAR (dx).	43
Figura 48 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).	44
Figura 49 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).	44
Figura 50 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).	45
Figura 51 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).	45
Figura 52 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).	46
Figura 53 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).	46
Figura 54 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).	47
Figura 55 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).	47
Figura 56 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).	48
Figura 57 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KF4).	49
Figura 58 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KF25).	49
Figura 59 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KFVAR).	50
Figura 60 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KF4).	50
Figura 61 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KF25).	51

Figura 62 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KFVAR).	51
Figura 63 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KF4).	52
Figura 64 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KF25).	52
Figura 65 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KFVAR).	53
Figura 66 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).	53
Figura 67 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).	54
Figura 68 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994) per la simulazione ENEL-KF4 (sx) e ENEL-KFVAR (dx).	54
Figura 69 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010) per la simulazione ENEL-KF4 (sx) e ENEL-KFVAR (dx).	55
Figura 70 - Confronto fra le portate simulate in uscita dalla Galleria Alta (Sorgente S. Fiora) e i dati minimi e massimi relativi nel periodo (simulazione CISS-KFVAR).	56
Figura 71 - Confronto con i dati piezometrici della Stazione S.Fiora11bis (simulazione CISS-KFVAR).	57
Figura 72 - Confronto con i dati piezometrici della Stazione S.Fiora11bis (simulazione CISS-KFVAR). Dettaglio degli ultimi anni	58
Figura 73 - Confronto fra le portate simulate (linea blu) e quelle ricavate dalle misure idrometriche sul fosso Bugnago (rosso) nel periodo Maggio-Novembre 2011.	59
Figura 74 - Confronto fra le portate simulate (linea blu) e quelle ricavate dalle misure idrometriche sul fosso Cadone (rosso) nel periodo Maggio-Novembre 2011.	60
Figura 75 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa assente sull'Amiata.	62
Figura 76 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa scarsa sull'Amiata.	62
Figura 77 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa media sull'Amiata.	62
Figura 78 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa elevata sull'Amiata.	62
Figura 79 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa assente.	63
Figura 80 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa scarsa.	63
Figura 81 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa media.	64
Figura 82 - Confronto modello-satellite per due giorni di copertura nevosa elevata.	64

Figura 83 - Andamenti temporali dell'equivalente in acqua del manto nevoso simulato da modello (linea blu) e confronto con la classificazione della sua estensione da Landsat (simboli rossi). 65

Scopo generale del progetto

Lo scopo generale del progetto è la messa a punto e l'utilizzo di un modello numerico distribuito del bilancio idrico superficiale e sub-superficiale della zona del Monete Amiata, con particolare attenzione alla dinamica dell'acquifero vulcanico. Lo scopo generale del progetto è la messa a punto e l'utilizzo di un modello numerico distribuito del bilancio idrico superficiale e sub-superficiale della zona del Monte Amiata, con particolare attenzione alla dinamica dell'acquifero vulcanico. Il modello è costruito a partire dal sistema modellistico MOBIDIC, già utilizzato dalla Regione Toscana per il monitoraggio e la previsione degli eventi di piena e da varie Autorità di Bacino per il bilancio idrico (Arno, Magra, Fiora).

Il modello consente la ricostruzione pluriannuale degli andamenti spaziali (dettaglio 100m) e temporali (dettaglio giornaliero) di tutte le principali componenti del bilancio idrologico superficiale e idrogeologico dell'acquifero vulcanico, coerentemente con le osservazioni già disponibili e in corso di nuova acquisizione.

La versione qui sviluppata estende le potenzialità del modello al calcolo delle dinamiche del manto nevoso. Migliora poi la precedente formulazione per il calcolo degli acquiferi in maniera da consentire un modellazione esplicita della sua interazione sia con la superficie, ed in particolare con sorgenti puntuali, che con acquiferi profondi, tramite acquitardi a permeabilità variabile.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il contributo fattivo, le proficue discussioni, le informazioni e i dati forniti ed il supporto operativo:

- la Direzione Generale Politiche Territoriali, Ambientali e per la Mobilità della Regione Toscana, Settore Prevenzione del Rischio Idraulico e Idrogeologico;
- il Servizio Idrologico della Regione Toscana;
- l'Acquedotto del Fiora;
- l'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Fiora;
- l'Autorità di Bacino Ombrone e Toscana Costa;
- l'Autorità di Bacino del Fiume Tevere.

Si ringraziano inoltre per aver reso disponibili dati, informazioni e studi:

- l'Istituto di Geoscienze e Georisorse del Consiglio Nazionale delle Ricerche;
- Enel Green Power;
- la Comunità Montana Amiata-Val d'Orcia.

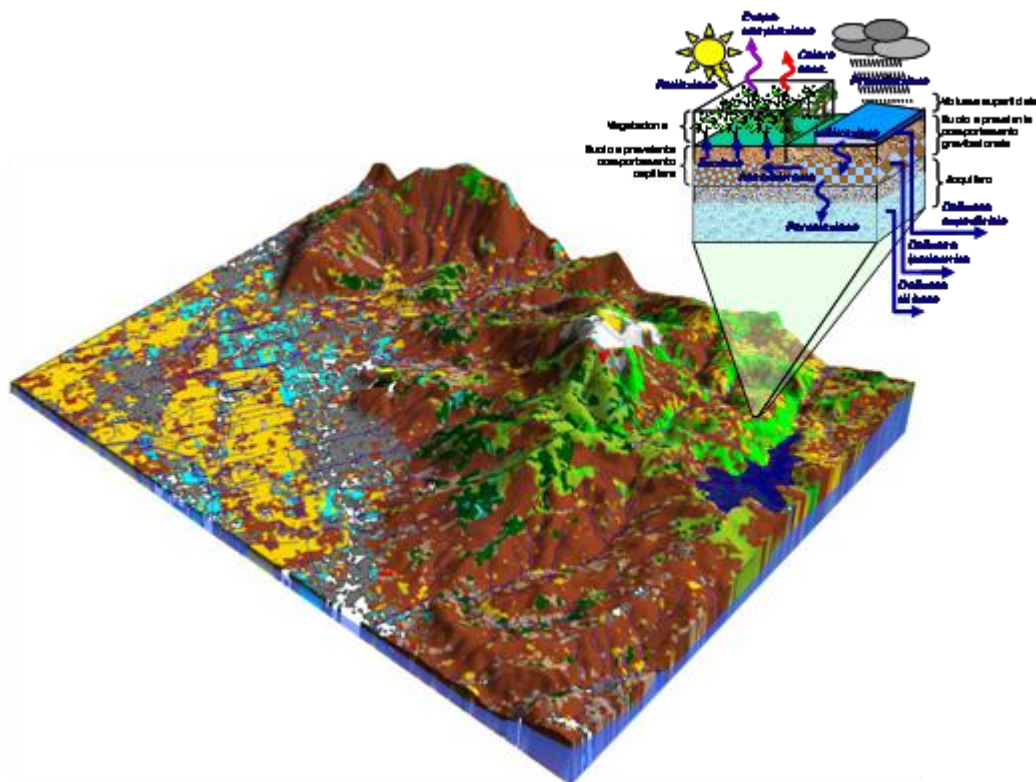
Sistema modellistico MOBIDIC per i bilanci idrici superficiali e sub-superficiali

Caratteristiche generali

MOBIDIC è un sistema modellistico per il calcolo dei bilanci idrici, il monitoraggio quantitativo e qualitativo dell'acqua nel suolo, nel manto nevoso e nei corpi idrici superficiali e sotterranei, le previsioni di piena. Coniuga lo stato dell'arte della modellazione idrologica, meteorologica e idrogeologica con i più moderni strumenti di telerilevamento e di analisi geografica, e avanza dalla ormai consolidata classe dei modelli idrologici a parametri distribuiti verso un più innovativo approccio a parametri e risultati distribuiti. La sua base fisica e la varietà dei processi rappresentati consente di calibrarne i parametri su diverse tipologie di dati, dalle immagini satellitari alle più tradizionali misure e campionamenti puntuali nei corpi idrici. Tenendo conto anche degli effetti antropici, quali prelievi e rilasci da fiumi e laghi, consente quindi di simulare diversi scenari di gestione della risorsa e assetto territoriale. Utilizzando le previsioni meteorologiche fornite dai più avanzati modelli numerici dell'atmosfera, consente di estendere ulteriormente nel tempo le previsioni di piena anche per i torrenti minori. I moduli di calcolo di MOBIDIC forniscono la stima delle componenti idrologiche nel sistema suolo-vegetazione, nel sottosuolo e nei corpi idrici superficiali. La rappresentazione del dominio spaziale si basa su una discretizzazione orizzontale del bacino in forma di griglia a maglia quadrata e su una discretizzazione verticale in più strati: vegetazione, invasi superficiali, manto nevoso, suolo, acquiferi (artesiani e freatici).

MOBIDIC è stato sviluppato nell'ambito di progetti congiunti di ricerca fra Università degli Studi di Firenze / Autorità di Bacino del Fiume Arno / Centro Funzionale della Regione Toscana / Massachusetts Institute of Technology / Eumechanos.

Per una descrizione dettagliata del modello, si rimanda all'appendice A.



Dati

Dati meteorologici

I dati meteorologici da fornire in ingresso al modello MOBIDIC sono stati messi a disposizione dal Servizio Idrologico Regionale.

Le stazioni automatiche all'interno dell'acquifero sono:

- "Castel del Piano" (Comune di Castel del Piano, P, rete SIRT, trasmissione radio – 15 min, TOS03002901);
- "Santa Fiora" (Comune di Santa Fiora, P-T-U, rete ARSIA, trasmissione radio (+ GPRS) – 30 min (5 min), TOS11000052 (TOS19000052));
- "Seggiano" (Comune di Castel del Piano, P-T-U, rete ARSIA, trasmissione radio – 30 min, TOS11000053);
- "Abbadia San Salvatore - Laghetto Verde" (Comune di Abbadia San Salvatore, P-T-U-A-R, rete ARSIA, trasmissione GPRS – 5 min, TOS19000114);
- "Abbadia San Salvatore – Vetta Amiata" (Comune di Abbadia San Salvatore, P-T-U-A-R, rete ARSIA, trasmissione GPRS – 5 min, TOS19000115)

Il Servizio Idrologico Regionale ha inoltre 2 stazioni attive dal 2009 di misura del livello freaticometrico per il monitoraggio automatico e in continuo dei livelli di falda del Corpo Idrico Sotterraneo dell'Amiata.

Una terza stazione è stata attivata nel 2011 in corrispondenza del nuovo piezometro profondo realizzato dal Settore Prevenzione del Rischio Idraulico e Idrogeologico in località Poggio Trauzzolo nel Comune di S.Fiora ("Piezometro David Lazzeretti").

Le stazioni attualmente (2011) attive sono:

1) Stazione S.Fiora8 , Comune di S.Fiora – GR

codice regionale TOS20000003

coordinate GB: 1711267;4745909

profondità: 70m

data di installazione: gennaio 2009

2) Stazione S.Fiora11bis, Comune di S.Fiora – GR

codice regionale TOS20000004

coordinate GB: 1711159; 4745865

profondità: 98m

data installazione: gennaio 2009

3) Stazione "David Lazzeretti"

coordinate GB: X= 1712688,31 Y= 4748592,12

profondità: 1080.80 m

data installazione: 2011

Omogeneizzazione dei dati idrometeorologici sul periodo di simulazione

La zona dell'Amiata, anche a causa della barriera orografica costituita dal monte stesso, presenta notevoli gradienti climatici. I dati pluviometrici mostrano ad esempio medie annuali sensibilmente maggiori in alcune stazioni di più recente installazione. Escludere quindi dall'analisi le stazioni di recente installazione porterebbe ad una sensibile sottostima dell'apporto meteorico e quindi anche della ricarica dell'acquifero.

Si è quindi proceduto ad una omogeneizzazione dei dati idrometeorologici sul periodo di simulazione in due passi. Il primo passo ha riguardato il periodo dal '94 in poi, in cui era disponibile un set di dati giornalieri continui comprendente anche le temperature dell'aria in alcune stazioni nei dintorni dell'Amiata per l'intero periodo e dati anche di altro tipo (radiazioni, umidità, vento) all'interno dell'areale a partire dal 2009. È stato quindi messo a punto un modello auto regressivo fra i due set di dati che ha consentito di estendere temporalmente all'indietro il secondo, come rappresentato nelle figure sottostanti.

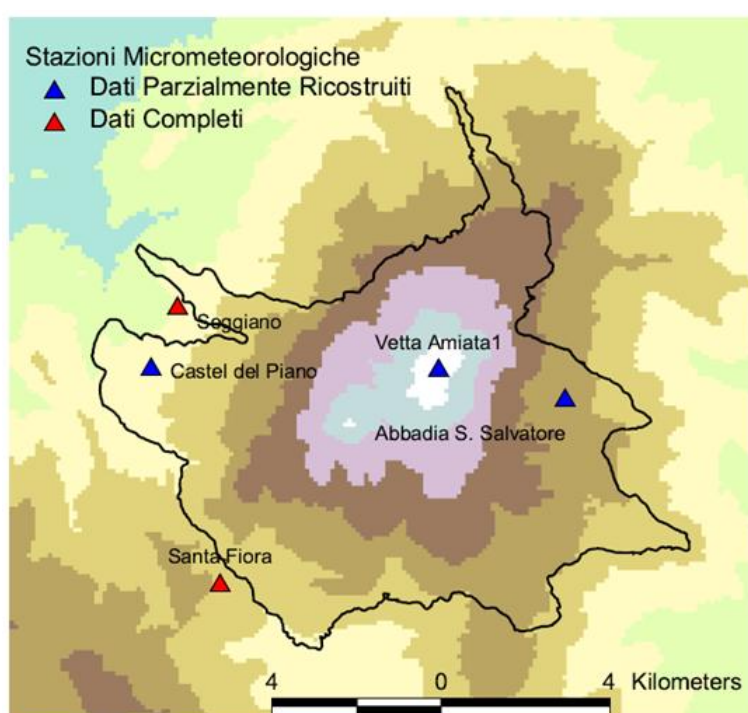


Figura 1 - Mappa delle stazioni per il periodo 1994-2010.

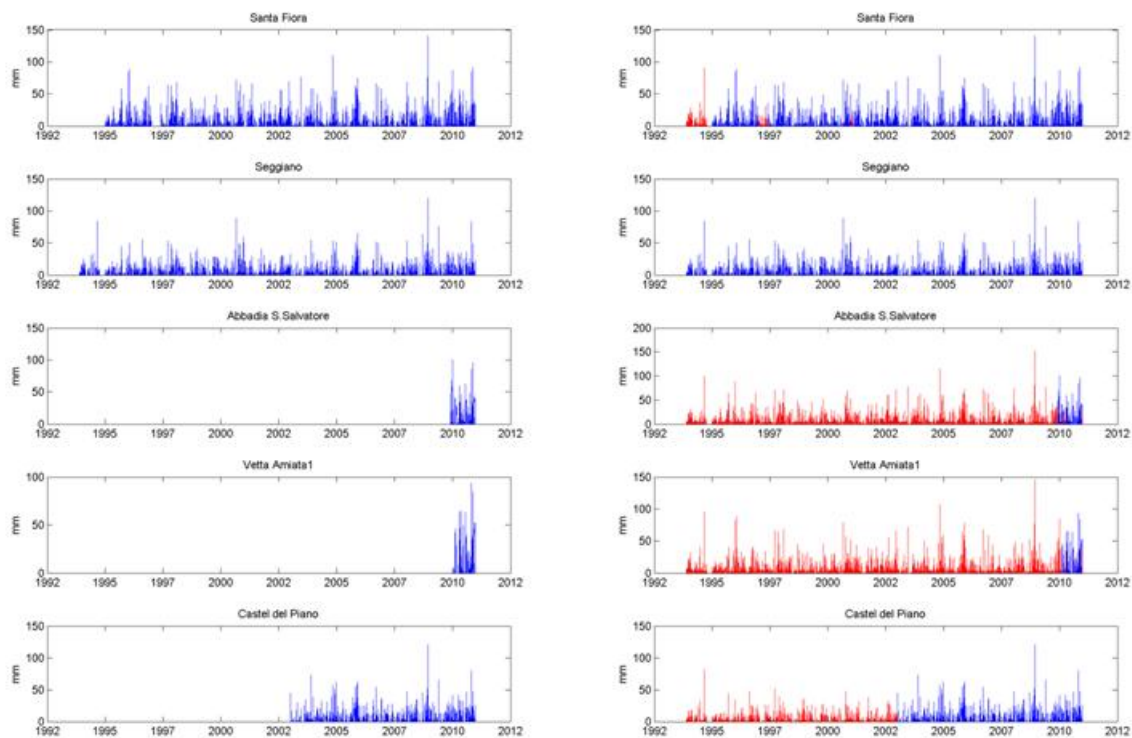


Figura 2 - Serie pluviometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multi regressivo (1994-2010).

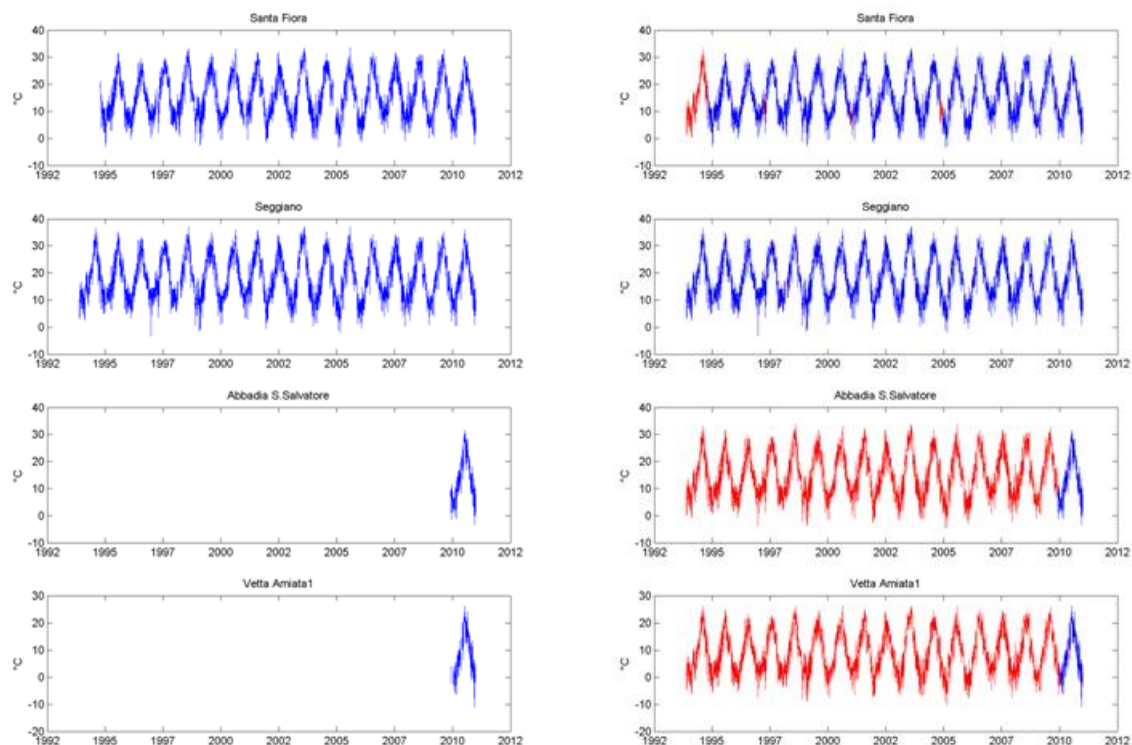


Figura 3 - Serie termometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multiregressivo (1994-2010).

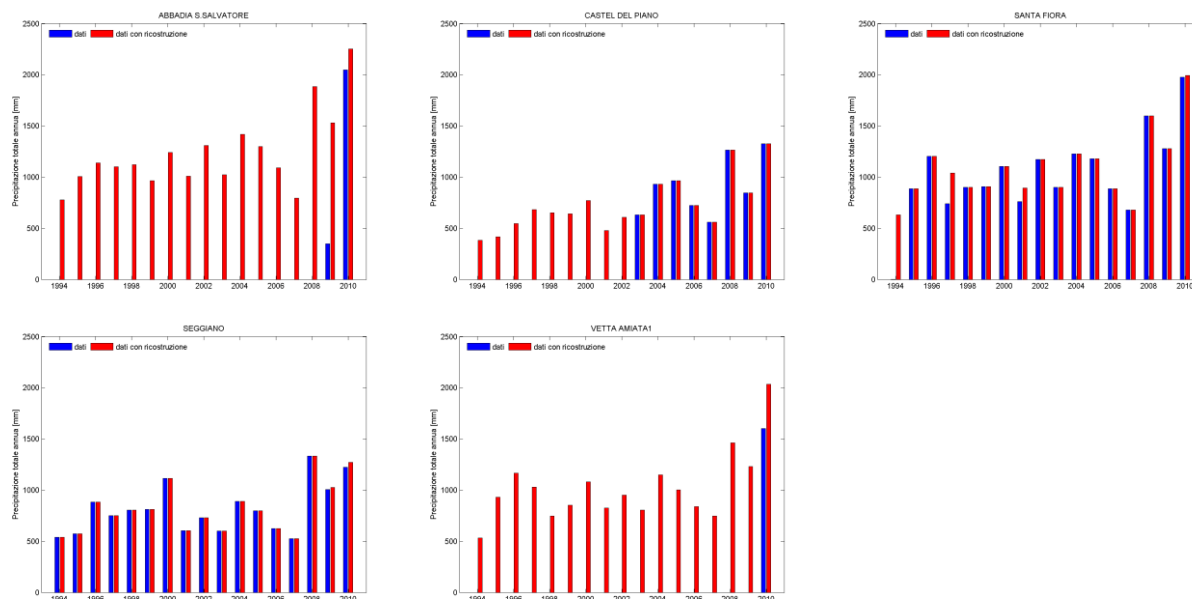


Figura 4 - Totali pluviometrici annui, dati e ricostruzioni. In alcuni casi il dato ricostruito supera il dato misurato a causa di dati mancanti in alcune serie annuali.

In un secondo passo le serie sono state ulteriormente estese indietro fino al 1965, utilizzando però come base i dati della stazione meteorologica di Grosseto Aeroporto. Tale stazione è la più vicina fra quelle di riferimento WMO (World Meteorological Organization) con dati omogenei per diverse variabili meteorologiche, che consentono congiuntamente una migliore ricostruzione dei 'pattern' meteorologici (combinazioni di temperatura, umidità, vento, precipitazioni) dai quali far dipendere la ricostruzione dei dati mancanti.

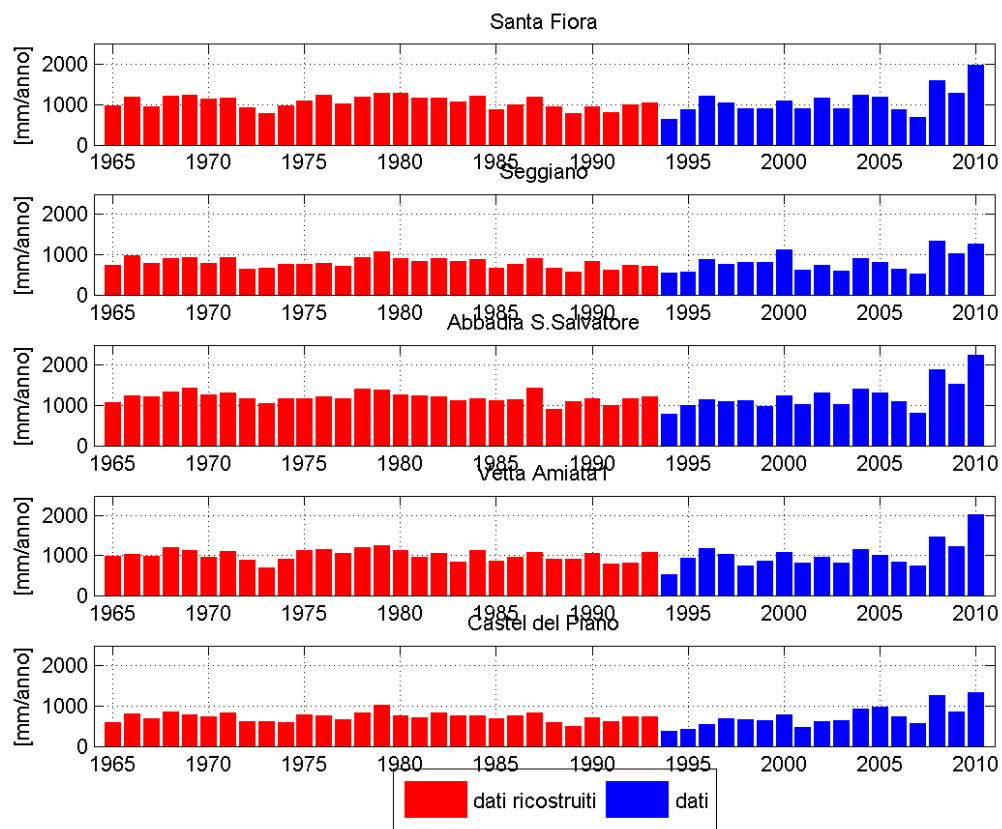


Figura 5 - Serie pluviometriche prima e dopo l'omogeneizzazione con modello multi regressivo (1965-2010).

Dati di portata dalle sorgenti

L'Acquedotto del Fiora ha fornito i dati di portata (aggregazione giornaliera o mensile) di alcune delle sorgenti principali, più le letture manuali da alcune sorgenti minori. I dati disponibili includono le sorgenti di:

- Santa Fiora
- Ermicciolo
- Sorgente Ente
- Seggiano
- Castel del Piano
- Abbadia S. Salvatore

Sono inoltre disponibili i dati di portata raccolti in corrispondenza della “Galleria Italia” con cadenza mensile dalla Comunità Montana.

È in progetto l'attivazione dell'invio in tempo reale dei dati di portata in uscita dalle principali sorgenti gestite dall'Acquedotto del Fiora; tale flusso dati sarà gestito dal suddetto Ente e dal Servizio Idrologico Regionale.

Dati di verifica/calibrazione: idrologia di superficie

Oltre alle misure delle portate in uscita dalle sorgenti , ai fini di calibrazione e verifica del modello si è ritenuto utile disporre di misure delle portate in alcuni corsi d'acqua superficiali in punti di controllo selezionati. Le stime di portata nei corsi d'acqua sono in generale il dato fondamentale per la calibrazione dei parametri che regolano le velocità e le caratteristiche dei processi idrologici di superficie nel modello MOBIDIC.

Nell'applicazione specifica al bilancio dell'acquifero del Monte Amiata le finalità del modello sono dedicate alla ricostruzione delle dinamiche di sottosuolo più che a quelle di superficie; tuttavia la corretta ricostruzione dell'idrologia di superficie (in particolare delle portate di base) rappresenta un'indicazione per valutare il funzionamento della modellazione della falda e la sua interazione col reticolo idrografico.

Poiché nella zona non vi sono stazioni idrometriche della rete in telemisura regionale (tutte poste molto più a valle), a seguito di sopralluogo effettuato in data 14-02-2011 con i tecnici della Regione Toscana, dell'Acquedotto del Fiora e dell'AdB Fiora sono stati individuati due punti in cui installare nuovi strumenti di misura finalizzati al presente progetto: uno sul Fosso Cadone (Comune di Santa Fiora) e uno sul Fosso Bugnano (Comune di Seggiano) , come mostrato in Figura 6. Una ulteriore sezione di controllo è stata individuata in corrispondenza della sorgente del Fiora, dove sono effettuate letture manuali giornaliere del livello idrometrico.

L'installazione è stata effettuata dal Servizio Idrologico Regionale e i primi dati sono disponibili da Maggio-Giugno 2011.

Dati geografici

La base dati geografica necessaria all'esecuzione del modello MOBIDIC è stata costruita a partire dagli strati informativi messi a disposizione dalla Regione Toscana e dall'Autorità di bacino Interregionale del Fiume Fiora.

In particolare le quote (Modello Digitale del Terreno a maglia 10 m) e l'idrografia di superficie sono state estratte dal Sistema delle Acque della Regione Toscana

Il dominio di calcolo su cui viene implementato il modello è definito in modo da coprire interamente la delimitazione delle vulcaniti e si estende oltre tale limite al fine di includere i corsi d'acqua su cui verranno effettuate le misure di portata.

La risoluzione spaziale della cella di calcolo è stata fissata pari a 100 metri.

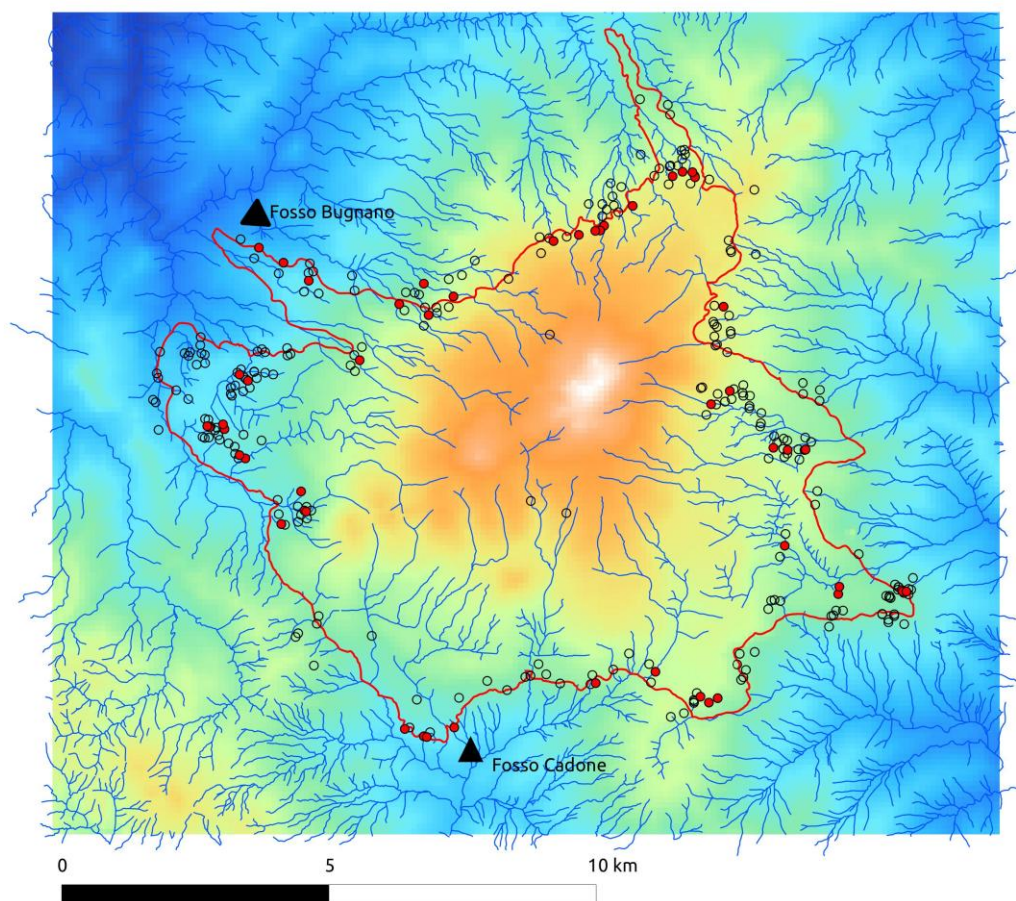


Figura 6 - Dominio di calcolo dell'idrologia di superficie con indicazione del limite dell'acquifero (linea rossa) e delle sorgenti (punti, di cui i rossi sono quelle gestite dall'Acquedotto del Fiora). Nella figura sono indicati anche i due siti (sul Fosso Fosso Cadone e sul Fosso Bugnano) in cui saranno effettuate le misure idrometriche del Servizio Idrologico Regionale.

Le mappe delle proprietà idrologiche dei suoli (velocità di infiltrazione e capacità massima di contenuto idrico nel suolo gravitazionale e capillare) sono quelle utilizzate dal Centro Funzionale Regionale per

l'implementazione del modello MOBIDIC in tempo reale per il monitoraggio e la previsione delle piene. Tali mappe sono realizzate a partire da una classificazione dei suoli della Regione Toscana a scala 1:250,000.

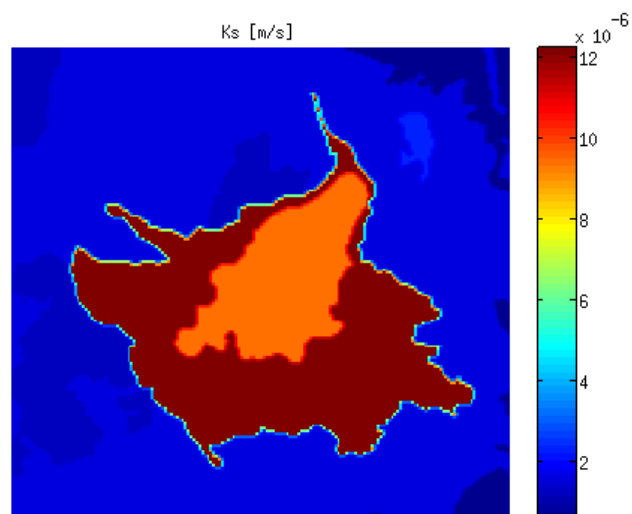


Figura 7 - Mappa del parametro di velocità di infiltrazione k_s [m/s] nella zona dell'Amiata ricavata dalla cartografia pedologica a scala 1:250,000.

Ricostruzione della geometria dell'acquifero

Per quanto riguarda la topografia del letto dell'acquifero, dall'analisi degli studi precedenti è emerso che non vi è una ricostruzione condivisa della reale configurazione del substrato delle vulcaniti che ospitano l'acquifero dell'Amiata. I vari studi difatti, pur contenendo molti aspetti comuni, differiscono in alcuni elementi morfologici rilevanti.

Si è pertanto deciso di effettuare le simulazioni con MOBIDIC con almeno due scenari diversi di geometria sotterranea dell'acquifero:

- La ricostruzione geometrica realizzata nell'ambito del progetto Caratterizzazione geologica, Idrogeologica e Idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS) 99MM020 “Acquifero dell’Amiata” 2009
- La ricostruzione effettuata da ENEL, già pubblicata in uno studio presentato al World Geothermal Congress Indonesia 2010 (I.Dini, A. Ceccarelli, A. Brogi, N. Giorgi, P. Galleni L.Rossi Geological Evaluation of the Base of the Mt. Amiata Volcanic Complex (Tuscany, Italy), e successivamente ri-elaborata.

Le due geometrie differiscono soprattutto per quanto riguarda la presenza di una faglia in direzione NE-SO, evidente nella ricostruzione CISS ma non in quella ENEL.

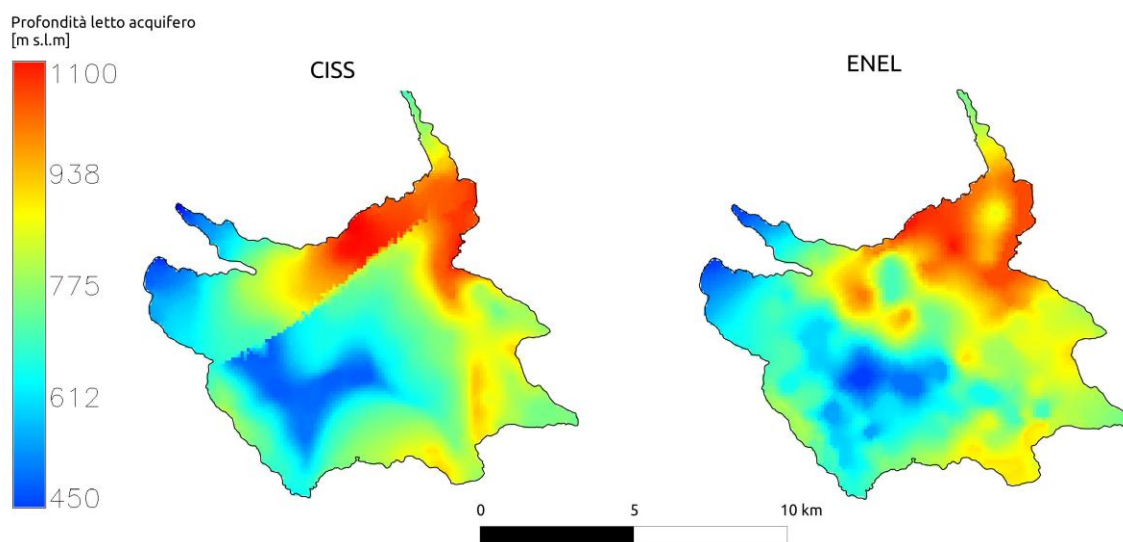


Figura 8 - Profondità del letto dell'acquifero, in metri sul livello del mare, secondo gli studi del Progetto Corpi Idrici Significativi (CISS, a sinistra) e secondo lo studio ENEL (a destra).

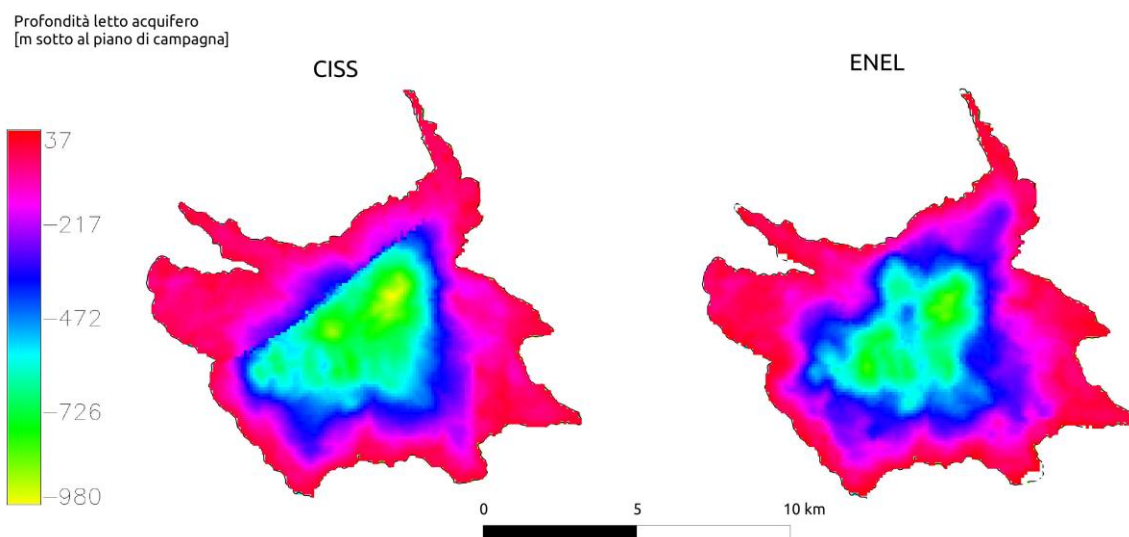


Figura 9 - Profondità del letto dell'acquifero, in metri sotto al piano di campagna, secondo gli studi del Progetto Corpi Idrici Significativi (CISS, a sinistra) e secondo lo studio ENEL (a destra).

Scenari di simulazione

Riconoscendo l'elevato livello di incertezza esistente sulle caratteristiche dell'acquifero vulcanico, sia in termini di geometria che delle sue caratteristiche idrauliche, si è deciso di testare un set con diversi scenari di simulazione. Tali scenari sono definiti come diverse combinazioni fra le due geometrie del letto dell'acquifero sopra richiamate e diverse ipotesi sulla distribuzione spaziale della conducibilità idraulica.

Per quanto riguarda la porosità efficace, in mancanza di indicazioni da studi esistenti, si è assunto un valore pari a 0.25 caratteristico delle colate laviche (Dingman, 2002).

Per quanto riguarda la conducibilità idraulica, valutazioni indirette in diversi studi suggeriscono valori relativamente bassi (10^{-6} m/s) in base a considerazioni sui caratteristici tempi di risposta della falda, e sensibilmente più alti (10^{-5} / 10^{-4} m/s) in base a considerazioni idrauliche.

A raffronto dei risultati delle simulazioni, si hanno valutazioni indirette di portate totali fuoriuscenti dalla falda di circa 2 m³/s e misure sulle sorgenti principali, che portano comunque a ritenere plausibile la presenza di zone e/o fatturazioni ad alta permeabilità

Un primo set di simulazioni, descritte nella relazione intermedia ha messo immediatamente in evidenza l'impossibilità di conciliare, con un campo uniforme di permeabilità dell'acquifero, gli alti valori di portata delle maggiori sorgenti con i tempi pluriennali di risposta e le indicazioni geofisiche sul tetto dell'acquifero.

Oltre quindi alla ipotesi di base di acquifero omogeneo, si è ritenuto utile ottenere delle indicazioni preliminari sul possibile ruolo dell'eterogeneità come fattore discriminante di particolari dinamiche dell'acquifero. In generale, le eterogeneità possono essere di piccola scala, cioè legate alla consistente presenza di porosità secondarie tipiche degli ammassi in roccia fratturati, o legate a fattori di variazione delle caratteristiche fondamentali della formazione su scale comparabili con l'estensione della formazione stessa. Nella formulazione numerica qui adottata, le eterogeneità del primo tipo si riconducono ad una correzione del parametro di conducibilità idraulica omogenea. Ci si è quindi concentrati sulle possibili eterogeneità di grande scala, sulla quale non si hanno informazioni dirette. Ai soli fini di indagine preliminare dal punto di vista numerico, quindi, si è ipotizzato che la presenza di maggiore attività risorgiva sia indicativa di maggior conducibilità idraulica.

In definitiva, si sono considerate le seguenti ipotesi sulla distribuzione spaziale della conducibilità idraulica orizzontale media equivalente sullo spessore dell'acquifero:

- KF4 – Conducibilità idraulica omogenea pari a 10^{-4} m/s;
- KF25 - Conducibilità idraulica omogenea pari a 2×10^{-5} m/s;
- KFVAR – Conducibilità idraulica variabile fra 2×10^{-5} m/s e 10^{-4} m/s, con valori crescenti dal centro verso la periferia (vedi mappa sottostante).

Altro aspetto importante degli scenari di simulazione riguarda la finestra temporale di analisi dei risultati. Le simulazioni preliminari hanno tutte confermato da un lato la presenza di importanti fluttuazioni climatiche su scala pluriennale, dall'altro la forte sensibilità della dinamica dell'acquifero ad una ipotetica condizione iniziale per un periodo di almeno 20 anni. A fronte anche della diversa disponibilità ed affidabilità dei dati meteorologici, si è ritenuto come configurazione di compromesso ottimale l'effettuare

le simulazioni a partire dal 1965 e analizzare i risultati per il solo periodo 1990-2010, in maniera da svincolarsi dall'arbitrarietà della condizione iniziale.

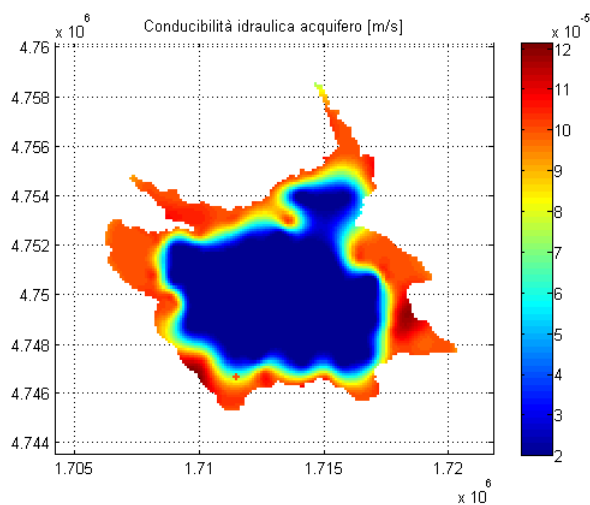


Figura 10 - Schema ipotetico di distribuzione spaziale eterogenea della conducibilità idraulica dell'acquifero.

Idrologia di superficie

Le simulazioni idrologiche effettuate con MOBIDIC hanno permesso di ricostruire, per il periodo di analisi e con passo giornaliero, le varie componenti del bilancio idrologico.

Di seguito si riportano alcune mappe di sintesi delle componenti del bilancio idrologico e della climatologia riferite al periodo 1990-2010.

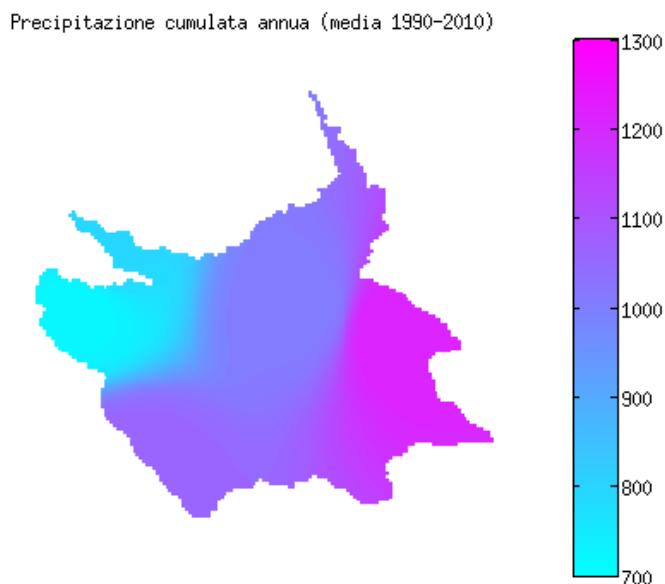


Figura 11 - Mappa della precipitazione cumulata annuale (media del periodo 1990-2010) sull'areale dell'acquifero, ottenuta attraverso l'interpolazione spaziale dei dati puntuali delle 5 stazioni in telemisura. Si evidenzia un gradiente in direzione nord ovest- sud est.

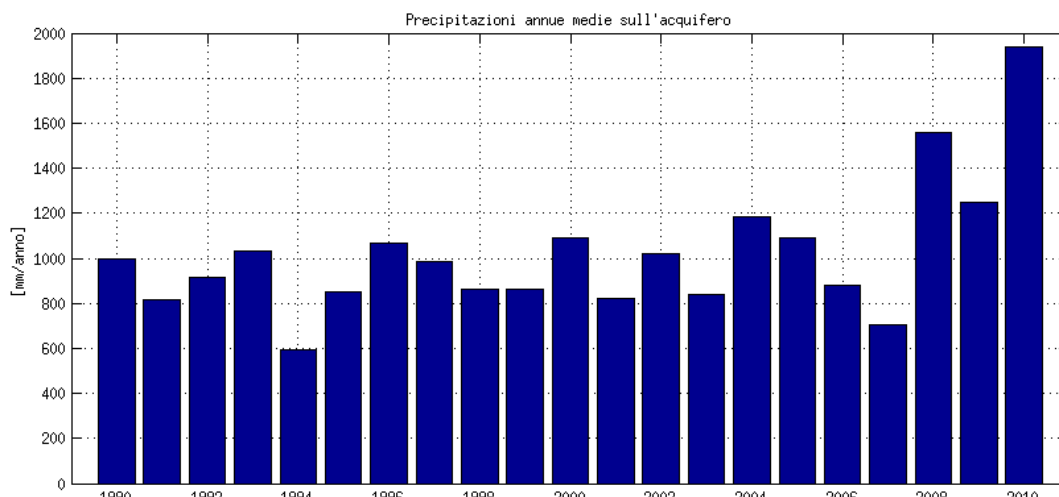


Figura 12 - Istogramma delle precipitazioni cumulate annue mediate sull'areale dell'acquifero nel periodo di analisi (1990-2010).

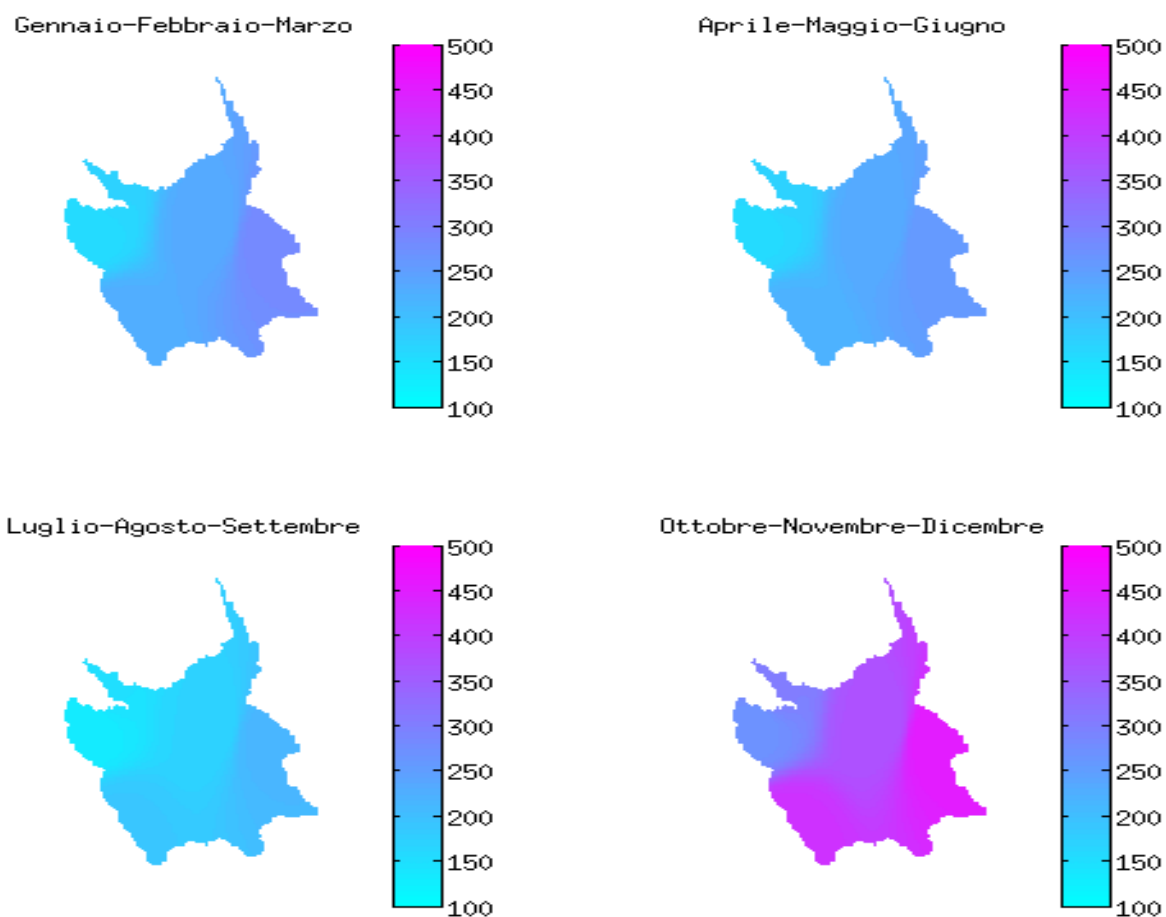


Figura 13 - Mappe di precipitazione cumulata media (1990-2010) suddivisa per trimestri.

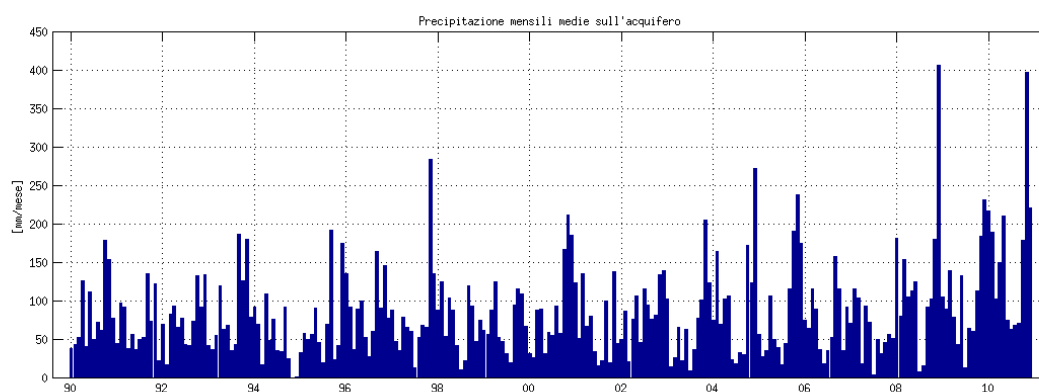


Figura 14 - Istogramma delle precipitazioni mensili medie (1990-2010) sull'areale dell'acquifero.

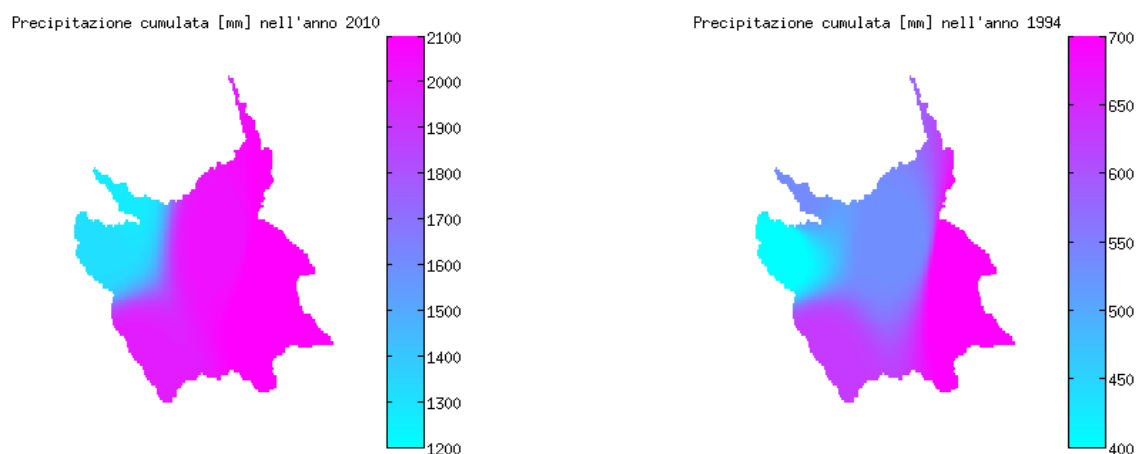


Figura 15 - Mappe della precipitazione cumulata annuale sull'areale dell'acquifero nell'anno più umido del periodo analizzato (2010, a sinistra) e nel più secco (1994, a destra).

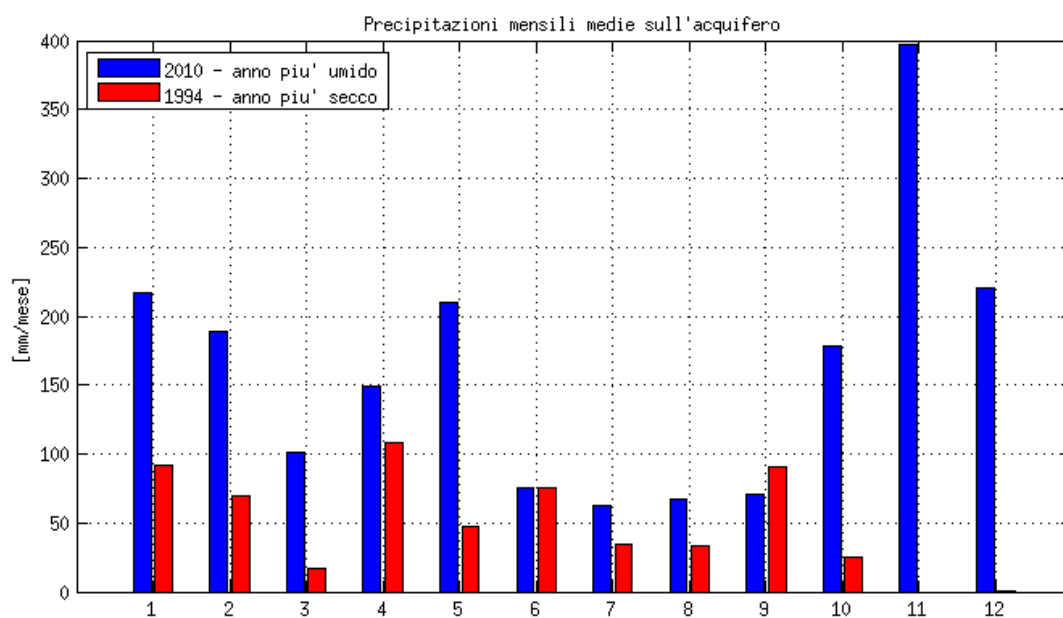


Figura 16 - Istogrammi di andamento delle precipitazioni mensili medie nell'anno più umido (2010) e in quello più secco (1994).

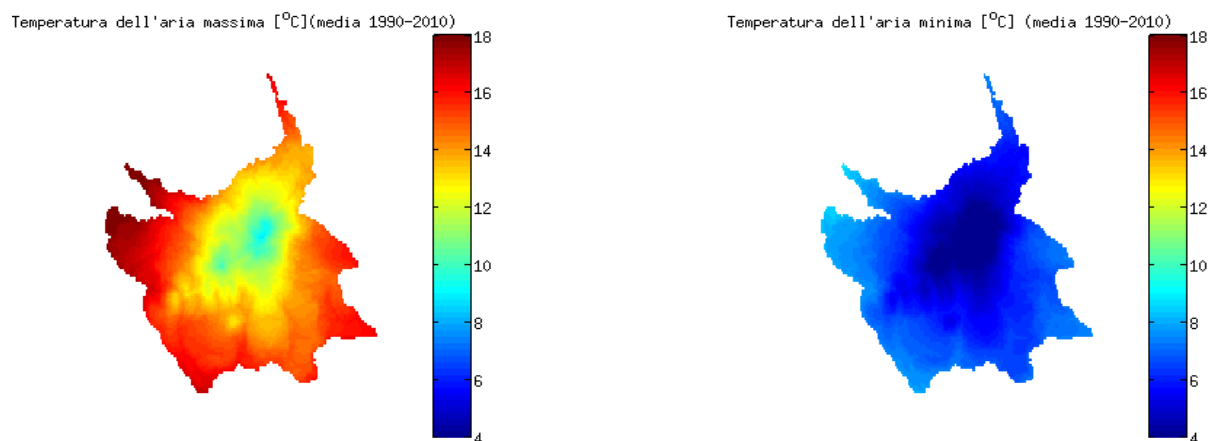


Figura 17 - Mappe delle temperature dell'aria massime giornaliere (destra) e minime giornaliere (sinistra) , medie annue 1990-2010, sull'areale dell'acquifero.

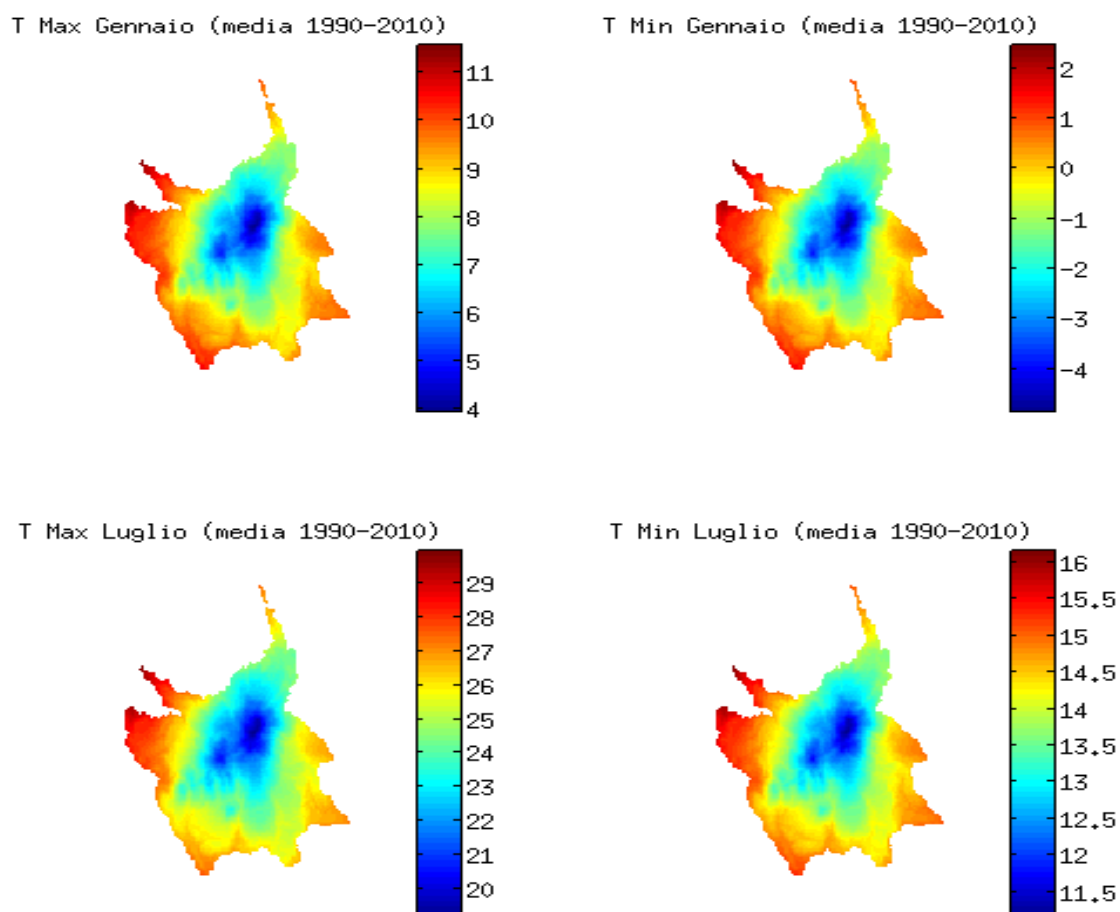


Figura 18 - Mappe delle temperature massime e minime giornaliere nei mesi di Gennaio e Luglio (media 1990-2010).

Le perdite per evapotraspirazione sono sostanzialmente dominate dal gradiente orografico, e quindi il fattore climatico dominante per tale termine di bilancio è la temperatura piuttosto che la precipitazione, a conferma di un clima di tipo sostanzialmente semi-umido.

L'evaporazione totale annua supera i 400 mm per le zone più orientale ed è pari circa a 200 mm sulla vetta.

Evapotraspirazione cumulata annua [mm] (media 1990-2010)

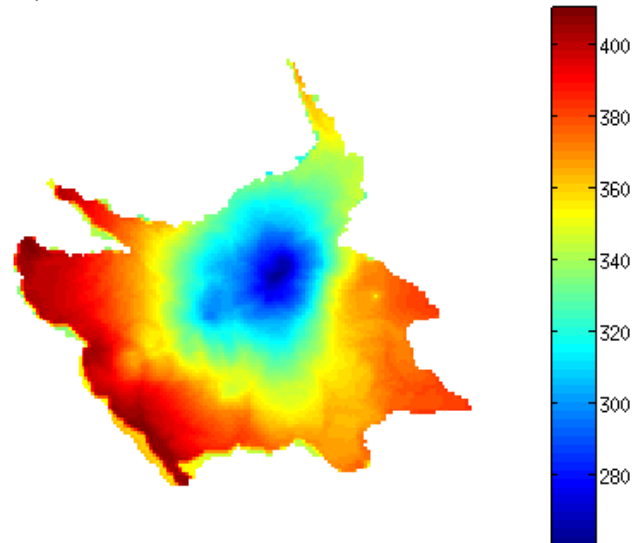


Figura 19 - Mappa dell'evapotraspirazione reale media annua (incluso il contributo di sublimazione della neve) per il periodo 1990-2010.

Il contributo massimo della fusione della neve al bilancio dei volumi idrici annui calcolato da Mobidic è di circa 280 mm / anno sulla vetta.

Fusione della neve cumulata annua [mm] (media 1990-2010)

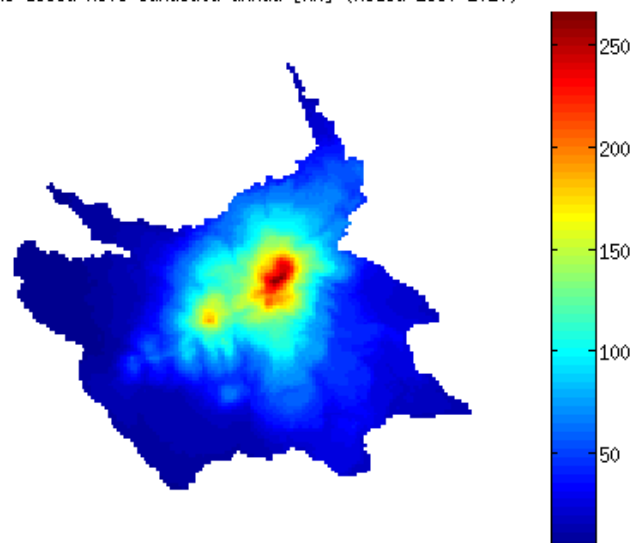


Figura 20 - Mappa della fusione cumulata annua della neve (media 1990-2010).

Contenuto d'acqua equivalente medio annuo della neve [mm] (media 1990-2010)

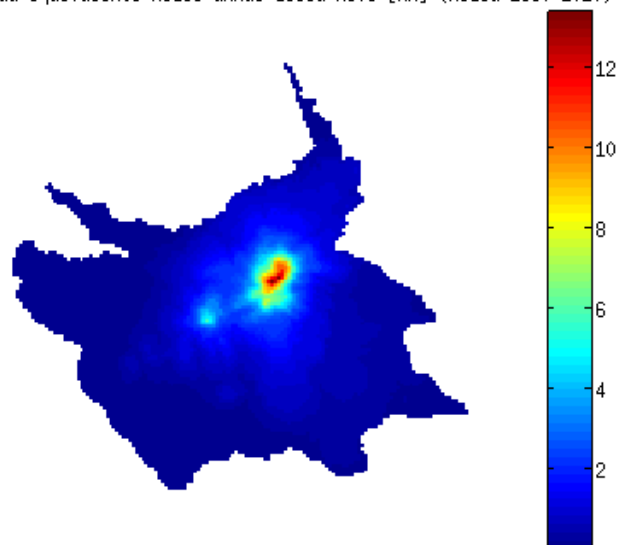


Figura 21 - Mappa del contenuto d'acqua equivalente della neve medio annuo (media 1990-2010).

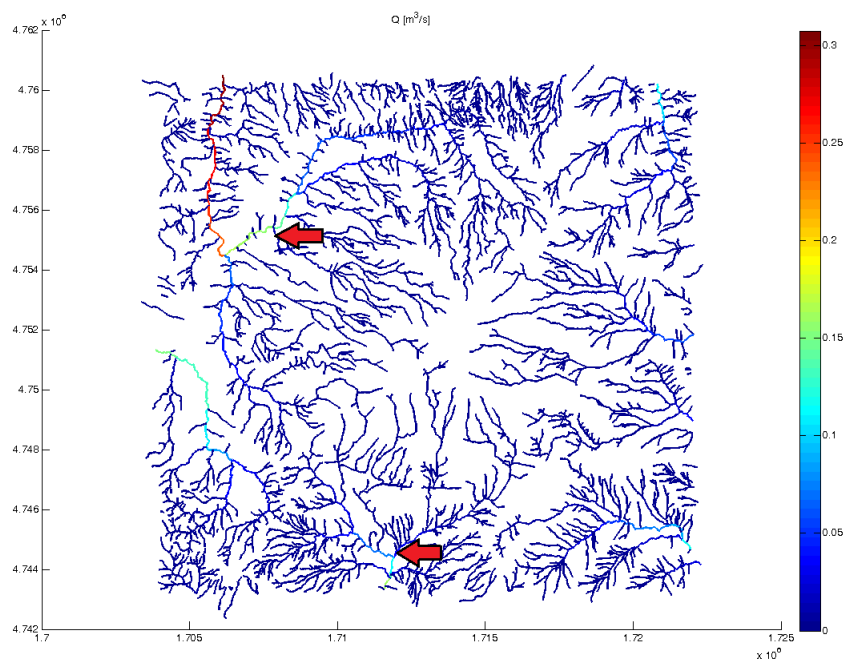


Figura 22 - Mappa delle portate nel reticolo idrografico medie per l'intero periodo di simulazione (1990-2010. Le frecce rosse indicano le sezioni per le quali sono riportati i risultati nelle figure di seguito.

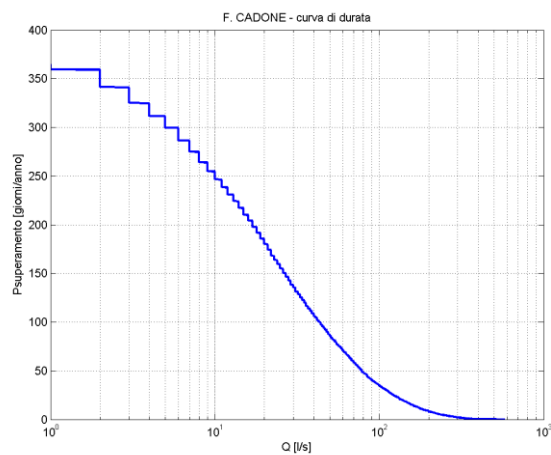
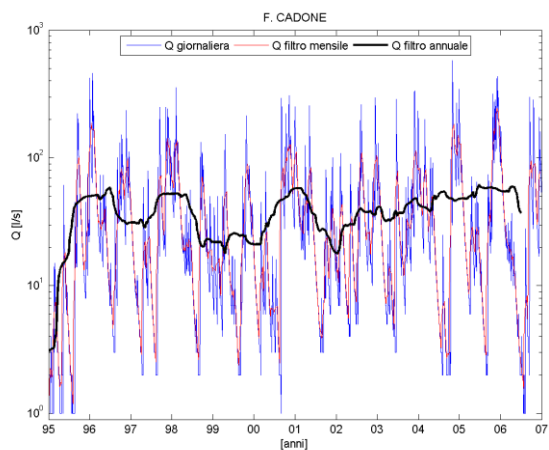


Figura 23 - Andamento giornaliero (sinistra) e curva di durata (destra) delle portate per il Fosso Cadone al ponte di Fornacina.

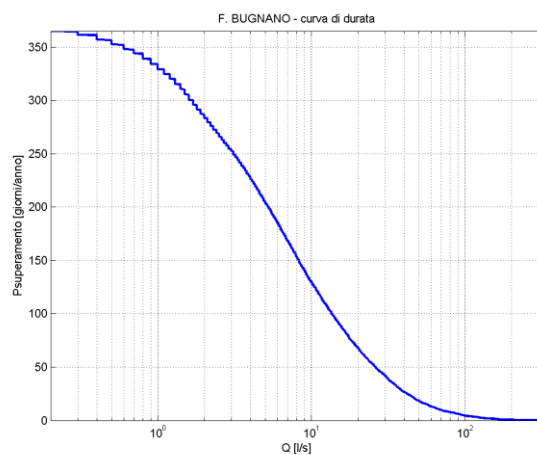
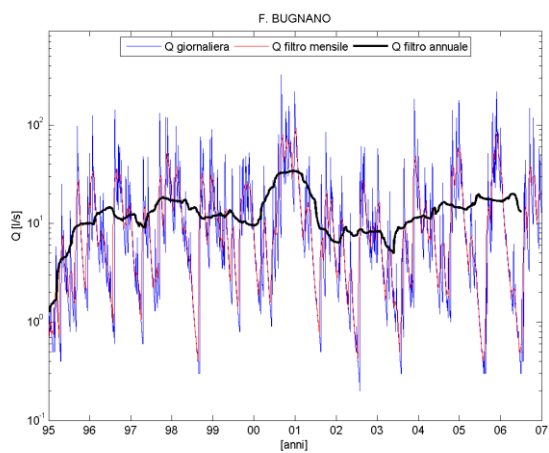


Figura 24 - Come in Fig. 23, ma per il Fosso Bugnano allo sbocco nel Vivo.

Risultati sulla falda

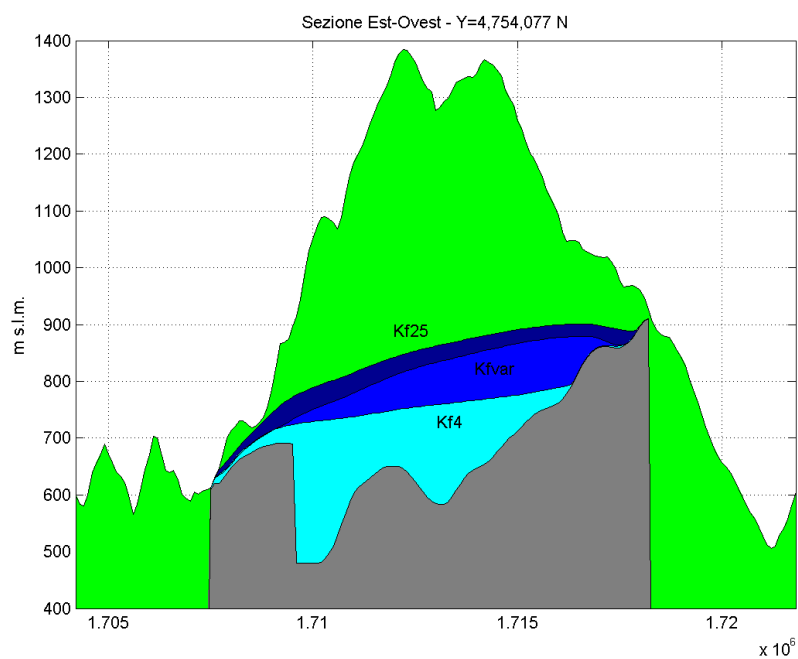


Figura 25 - Confronto dei livelli medi di falda su una sezione E-O per la geometria CISS e diverse distribuzioni di conducibilità idraulica dell'acquifero.

Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010

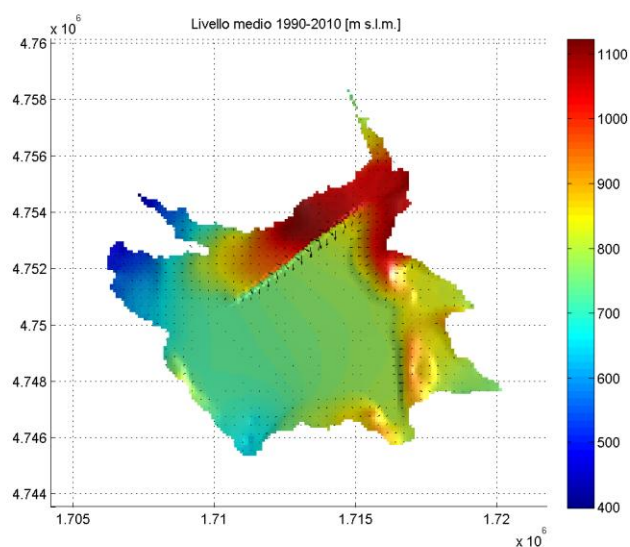


Figura 26 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).

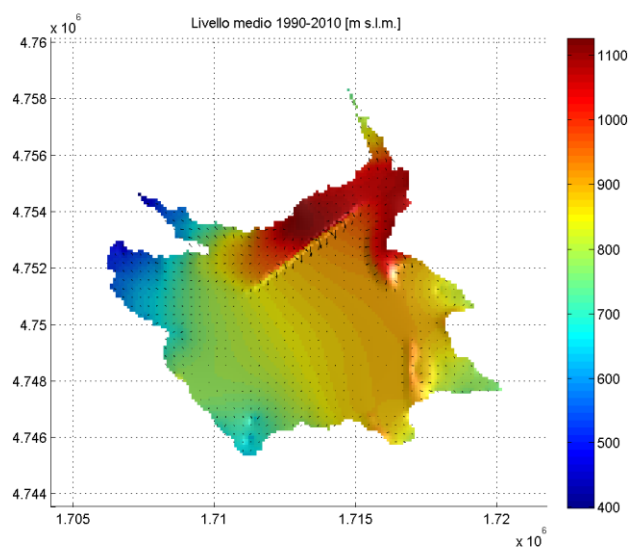


Figura 27 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25).

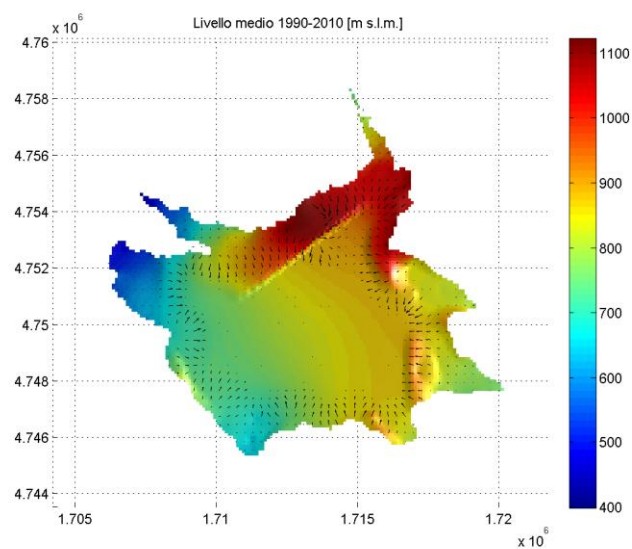


Figura 28 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).

Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010

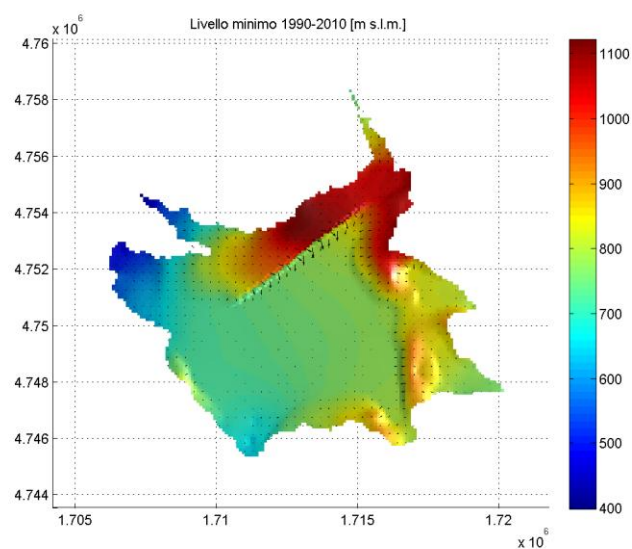


Figura 29 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).

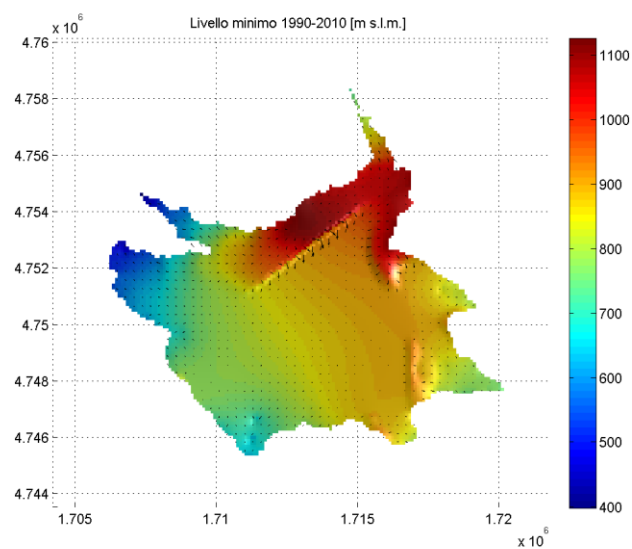


Figura 30 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25).

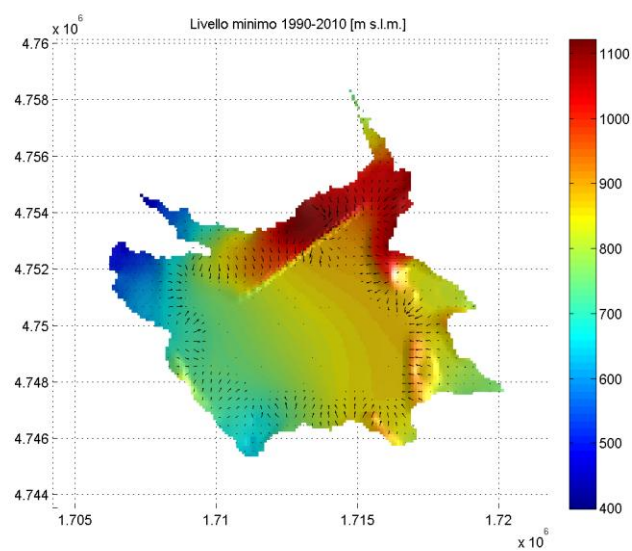


Figura 31 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).

Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010

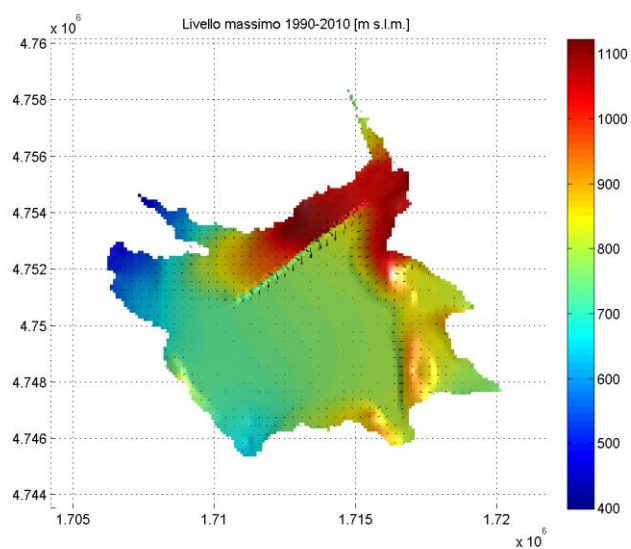


Figura 32 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).

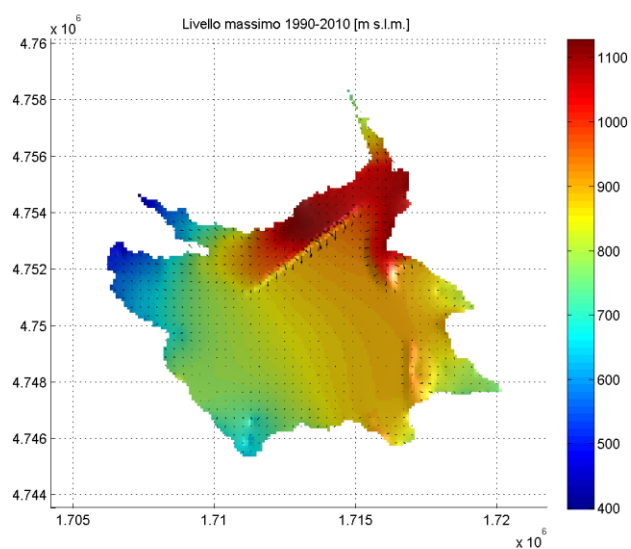


Figura 33 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF25).

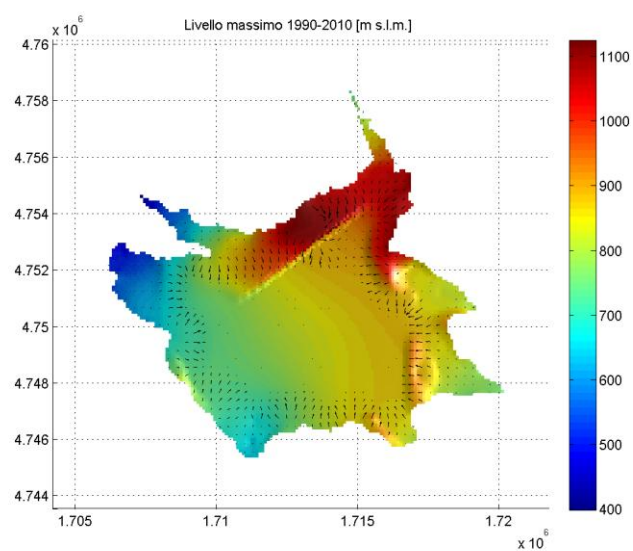


Figura 34 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).

Andamento temporale dei livelli piezometrici medi

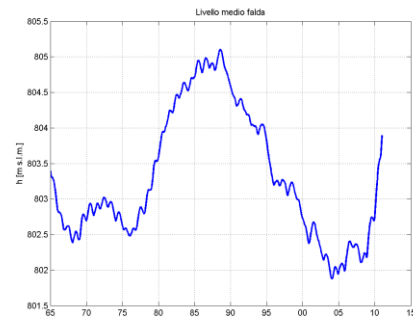
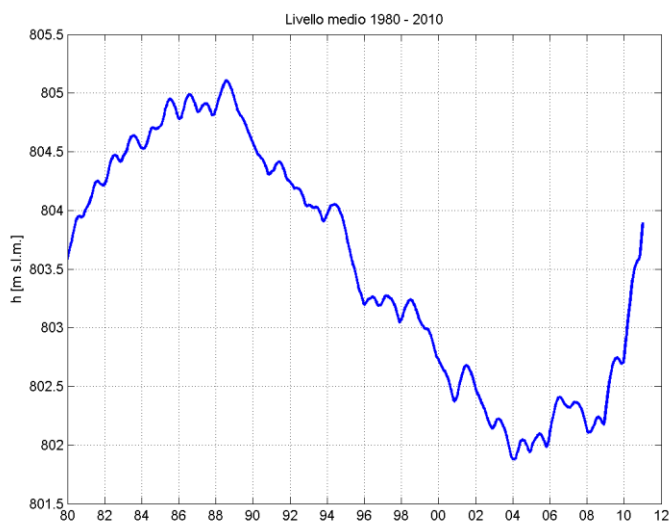


Figura 35 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KF4).

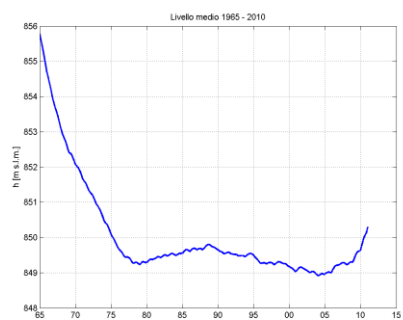


Figura 36 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KF25).

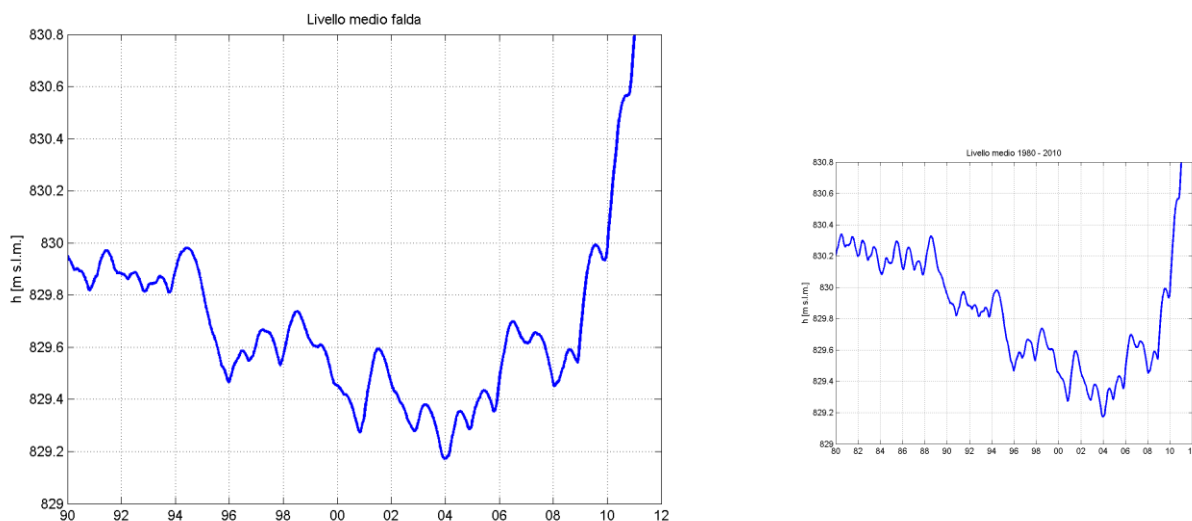


Figura 37 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione CISS-KFVAR).

Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda

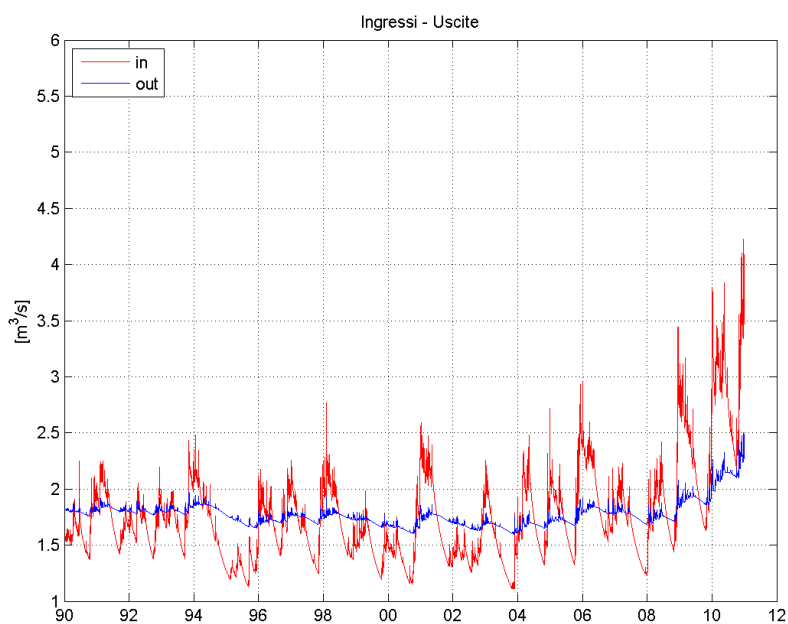


Figura 38 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione CISS-KF4).

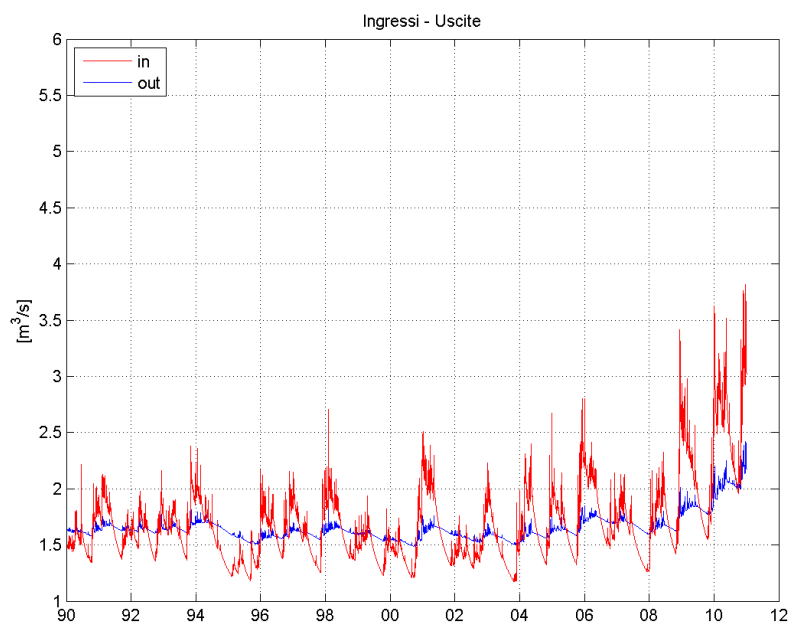


Figura 39 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione CISS-KFVAR).

Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta (sogente S. Fiora)

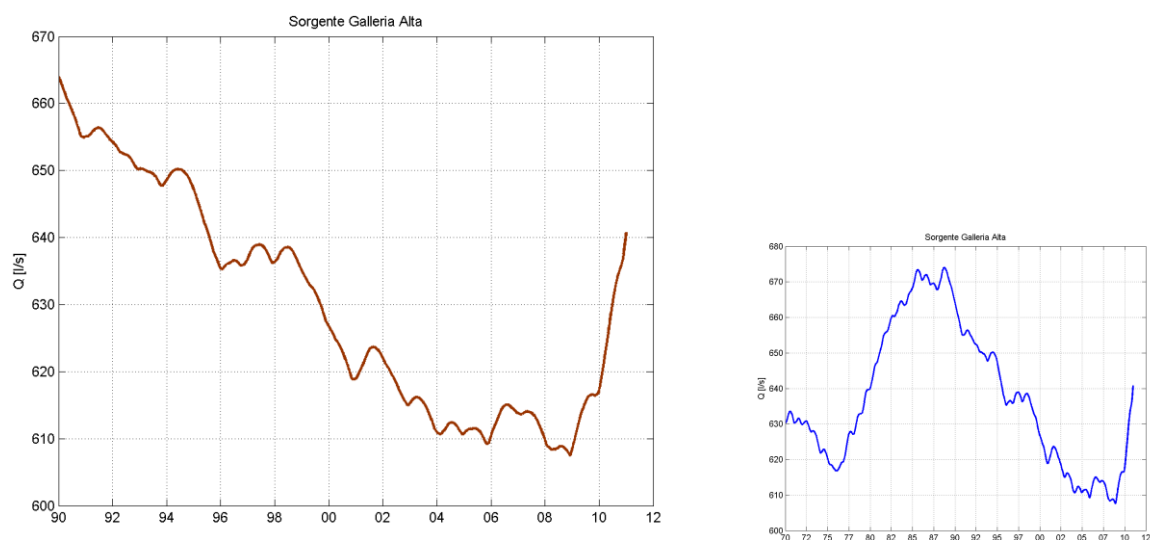


Figura 40 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sogente S. Fiora (simulazione CISS-KF4).

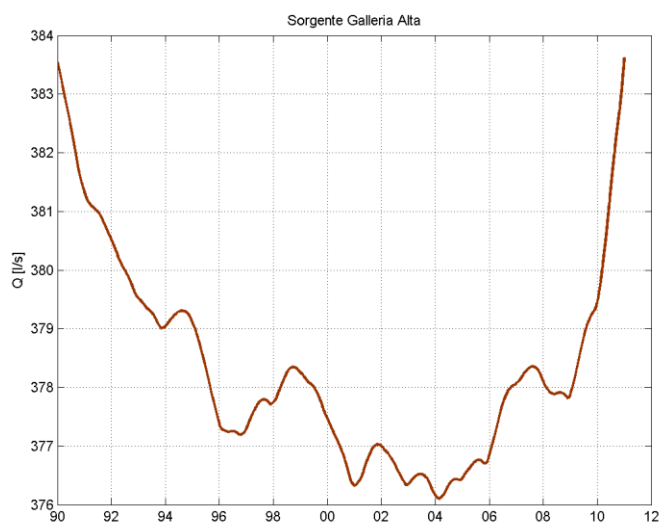


Figura 41 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sogente S. Fiora (simulazione CISS-KF25).

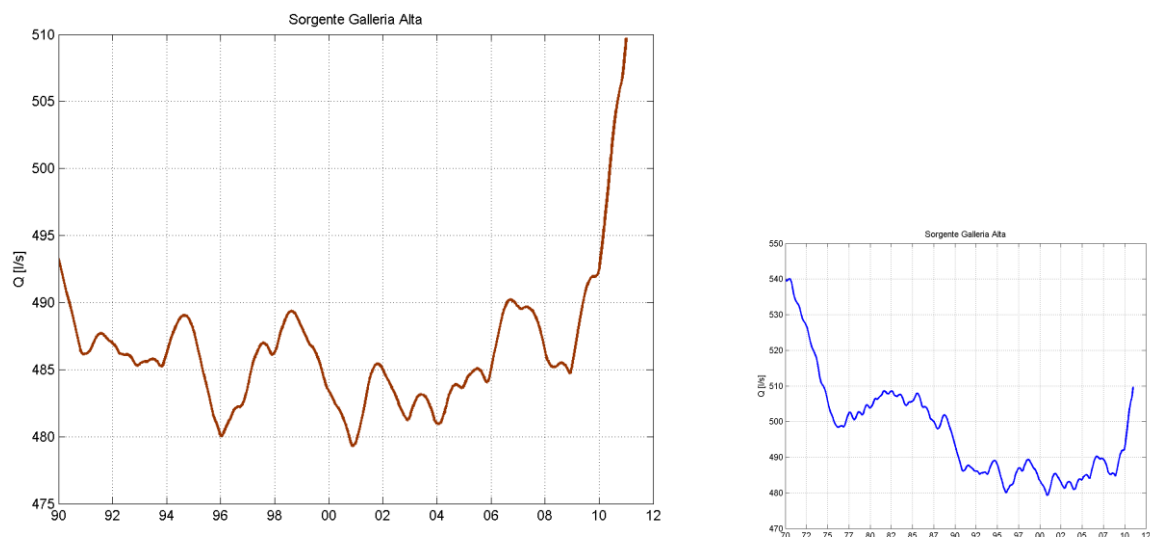


Figura 42 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione CISS-KFVAR).

Andamento temporale delle fuoriuscite da sorgente Ermicciolo

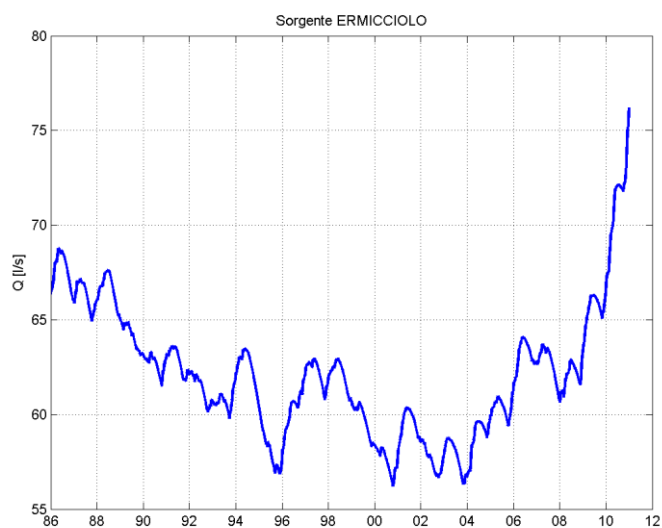


Figura 43 - Andamento temporale delle fuoriuscite da sorgente Ermicciolo (simulazione CISS-KFVAR).

Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010.

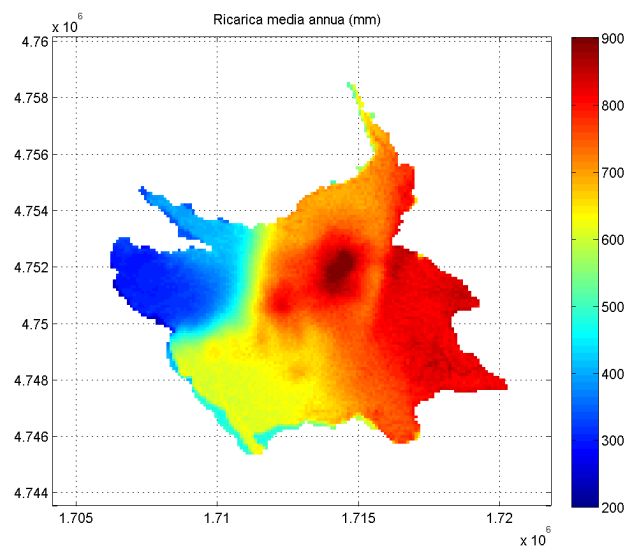


Figura 44 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KF4).

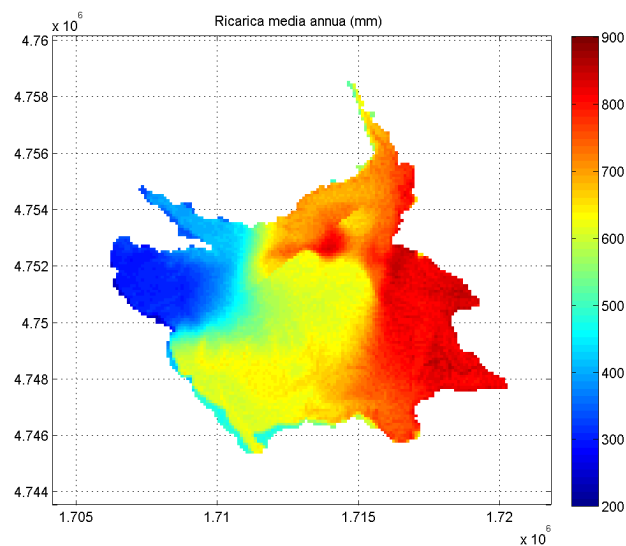


Figura 45 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione CISS-KFVAR).

Dato l'andamento transitorio crescente delle precipitazioni negli ultimi anni, e dato che diversi valori di conducibilità idraulica si riflettono in diversi ritardi fra precipitazione ricarica, anche i valori medi di ricarica sul periodo considerato risultano parzialmente dipendenti dalla conducibilità idraulica.

Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994)

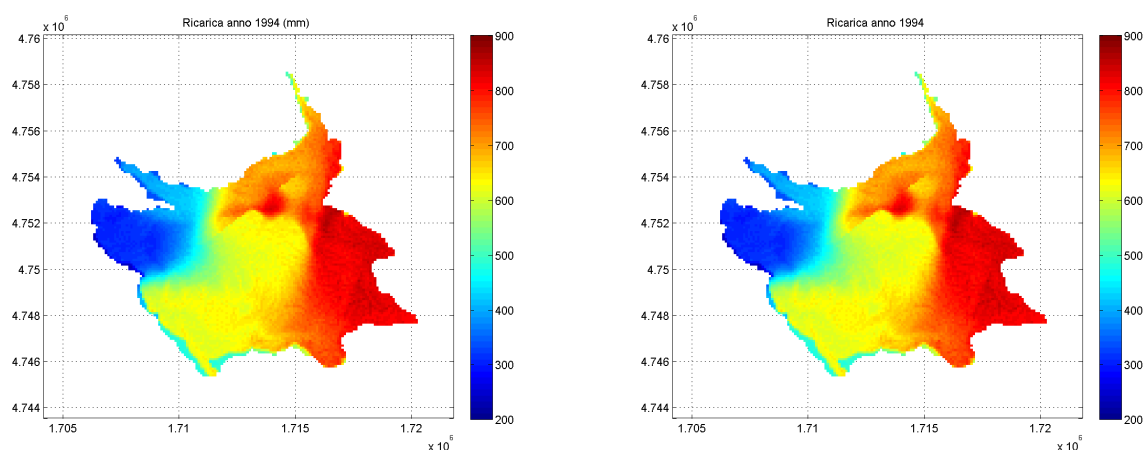


Figura 46 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994) per la simulazione CISS-KF4 (sx) e CISS-KFVAR (dx).

Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010)

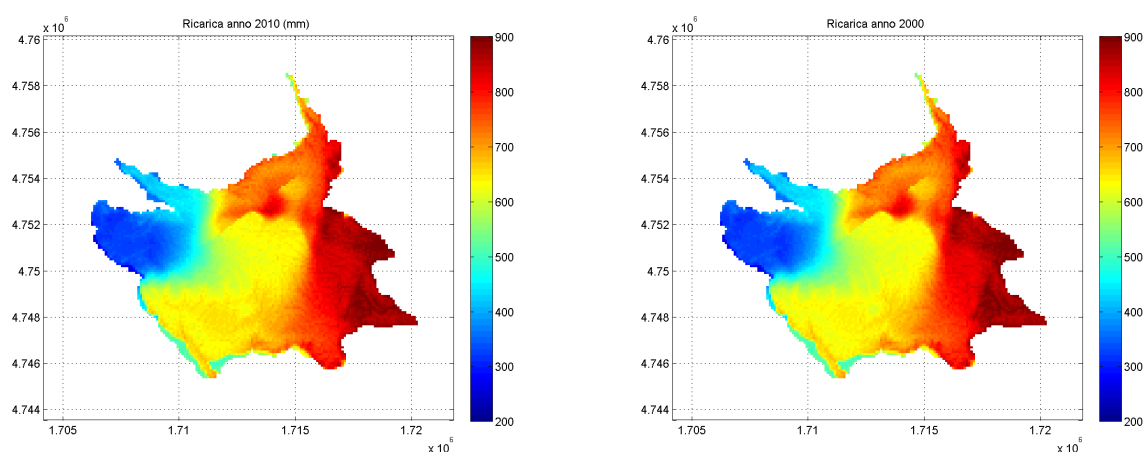


Figura 47 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010) per la simulazione CISS-KF4 (sx) e CISS-KFVAR (dx).

Geometria ENEL

Il secondo set di simulazioni ha preso a riferimento la geometria del letto dell'acquifero freatico qui sinteticamente denominata ENEL. Si riportano qui i soli risultati relativi alla configurazione KF4 con conducibilità idraulica omogenea pari a 10^{-4} m/s.

Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010

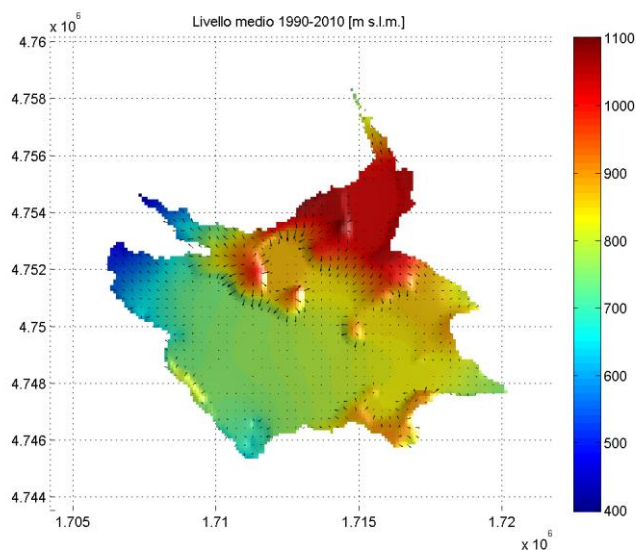


Figura 48 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).

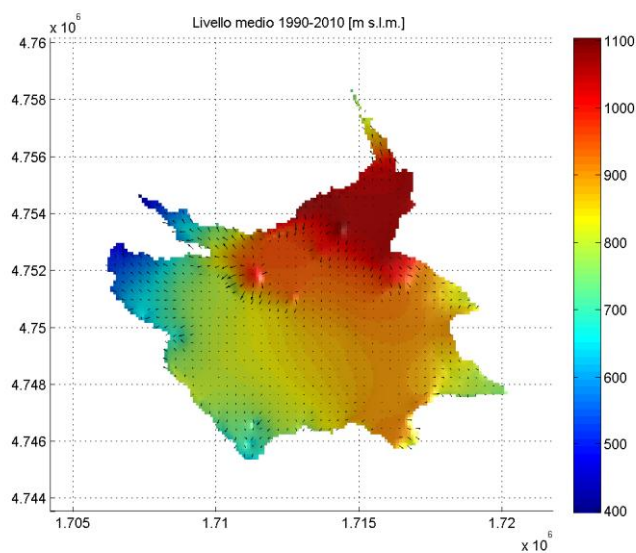


Figura 49 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).

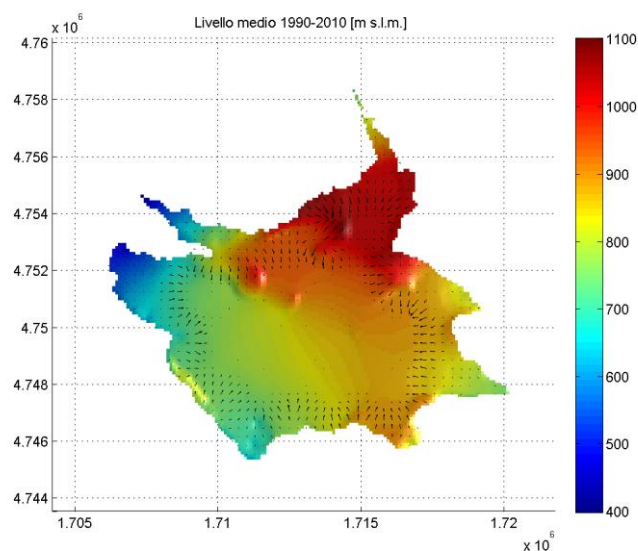


Figura 50 - Distribuzione dei livelli piezometrici medi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).

Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010

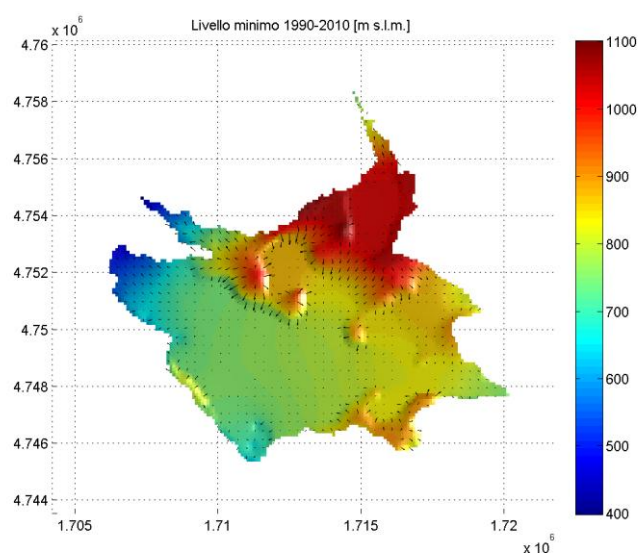


Figura 51 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).

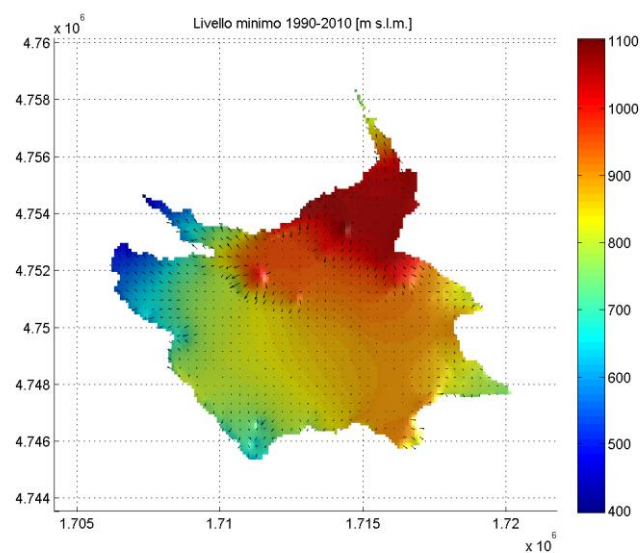


Figura 52 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).

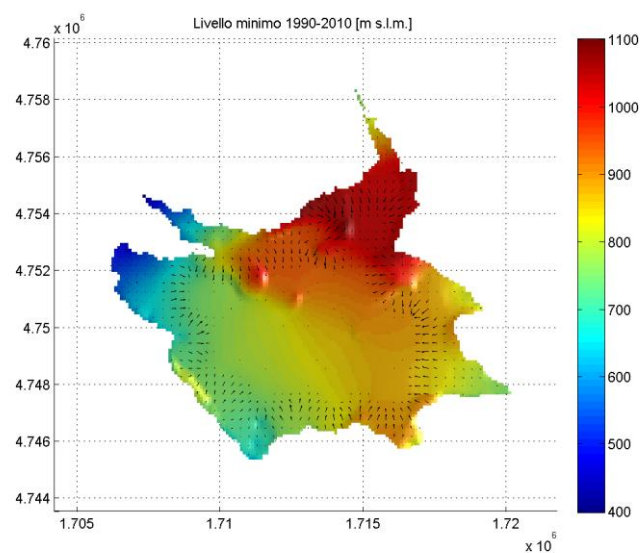


Figura 53 - Distribuzione dei livelli piezometrici minimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).

Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010

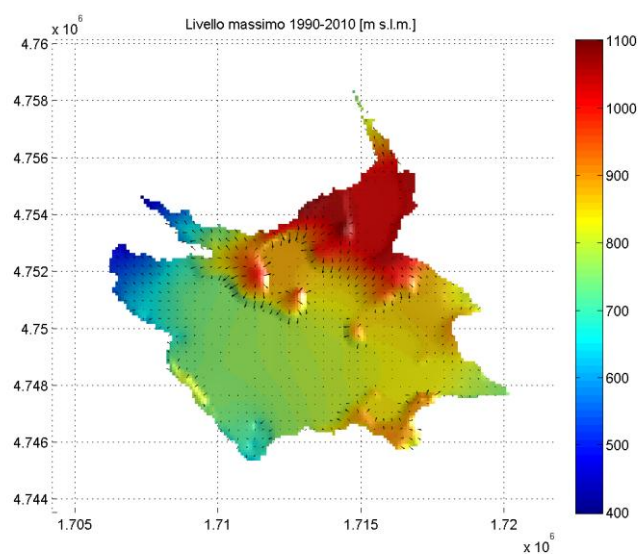


Figura 54 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).

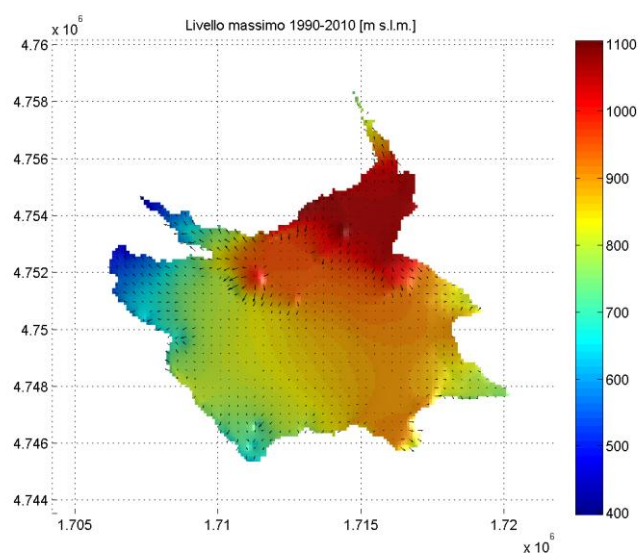


Figura 55 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF25).

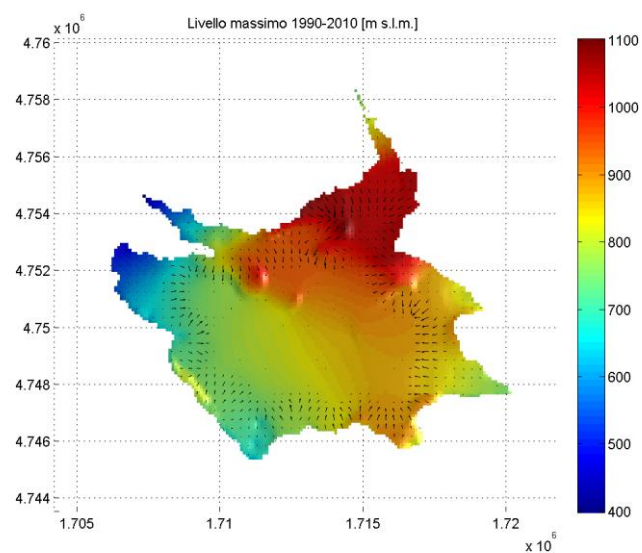


Figura 56 - Distribuzione dei livelli piezometrici massimi sul periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).

Andamento temporale dei livelli piezometrici medi

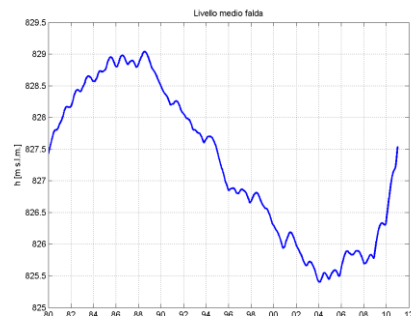
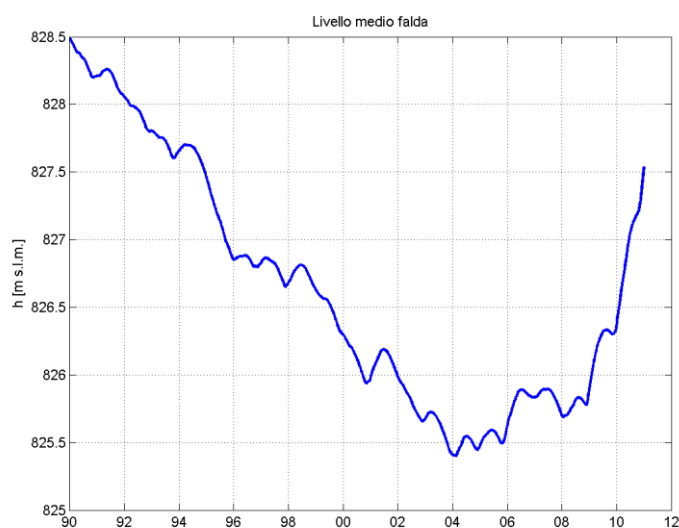


Figura 57 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KF4).

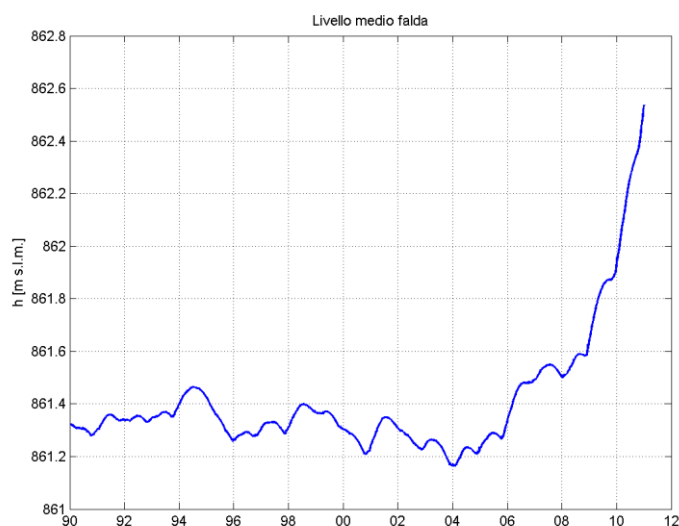


Figura 58 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KF25).

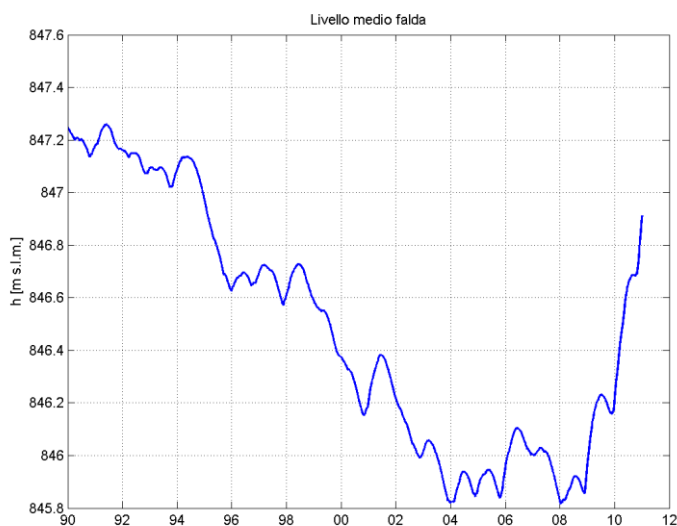


Figura 59 - Andamento temporale del livello piezometrico medio della falda (simulazione ENEL-KFVAR).

Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda

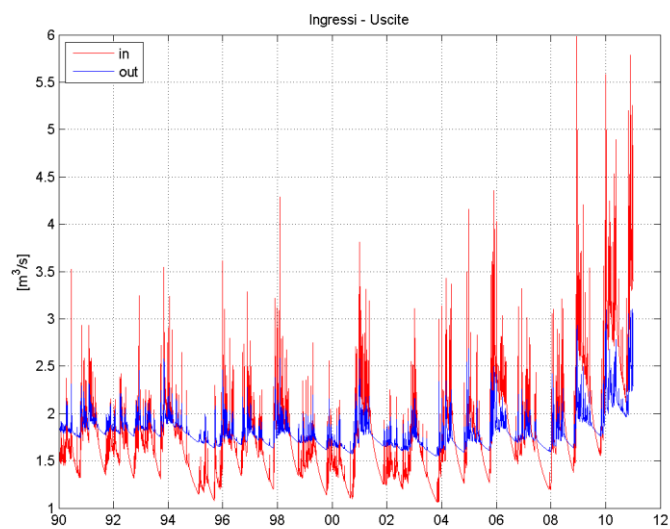


Figura 60 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KF4).

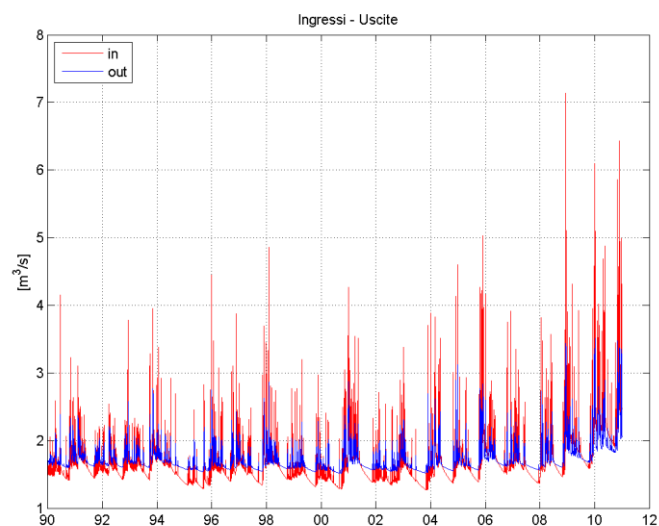


Figura 61 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KF25).

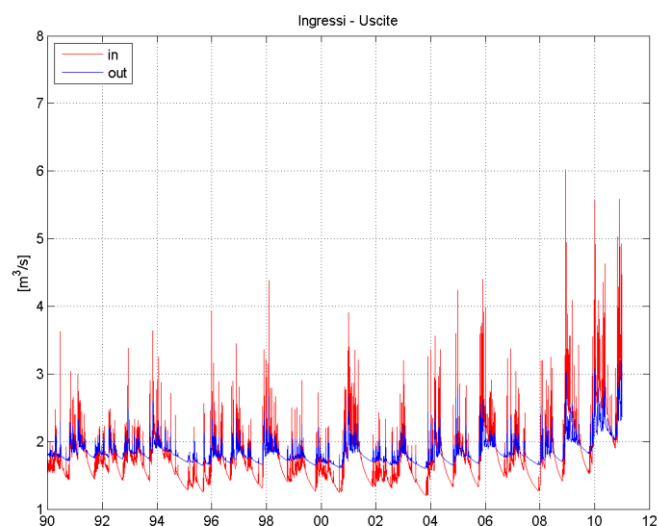


Figura 62 - Andamento temporale della ricarica e delle fuoriuscite totali dalla falda (simulazione ENEL-KFVAR).

Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta (sorgente S. Fiora)

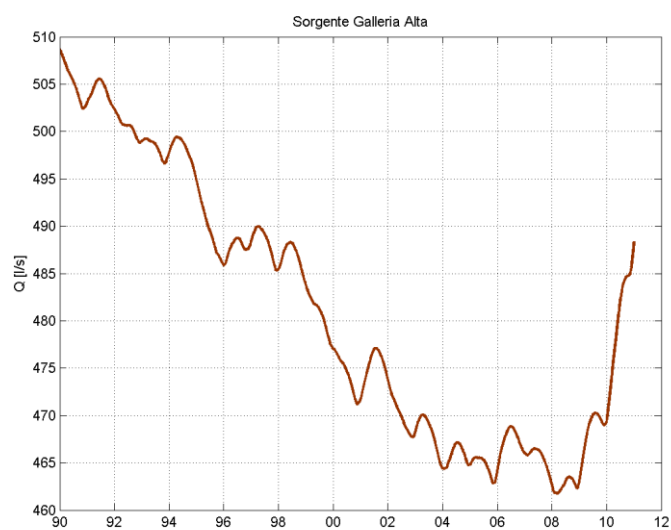


Figura 63 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KF4).

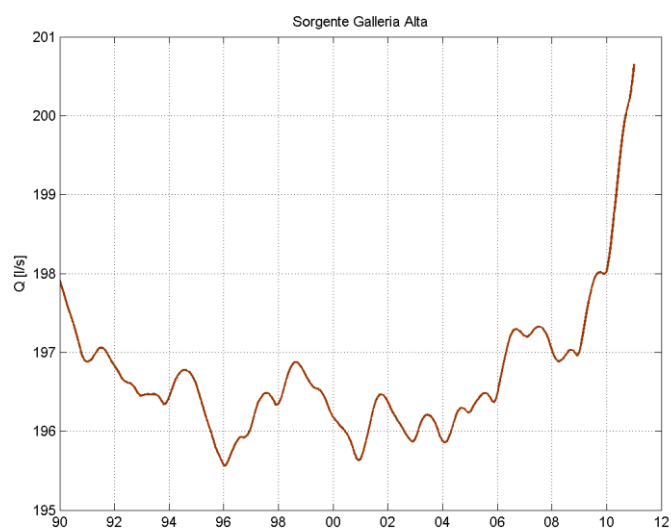


Figura 64 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KF25).

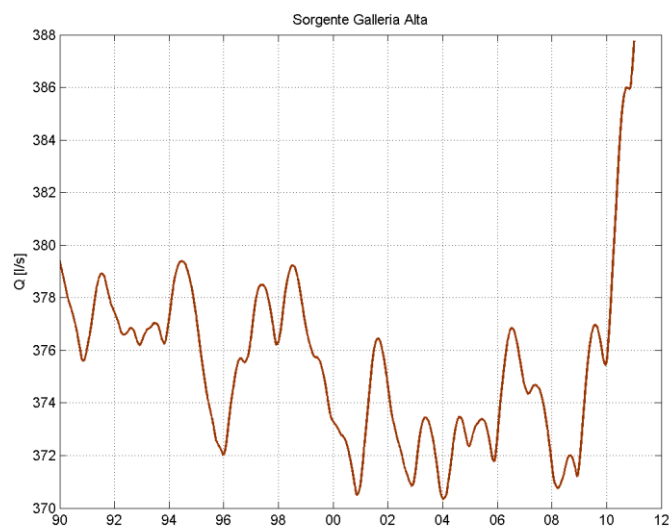


Figura 65 - Andamento temporale delle fuoriuscite da Galleria Alta, sorgente S. Fiora (simulazione ENEL-KFVAR).

Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010

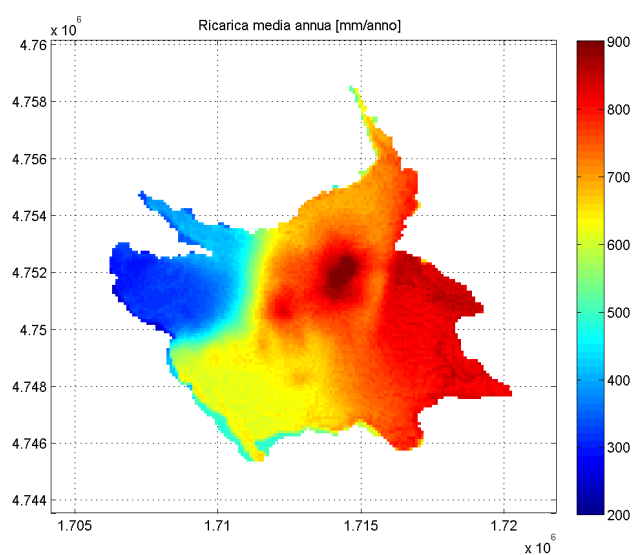


Figura 66 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KF4).

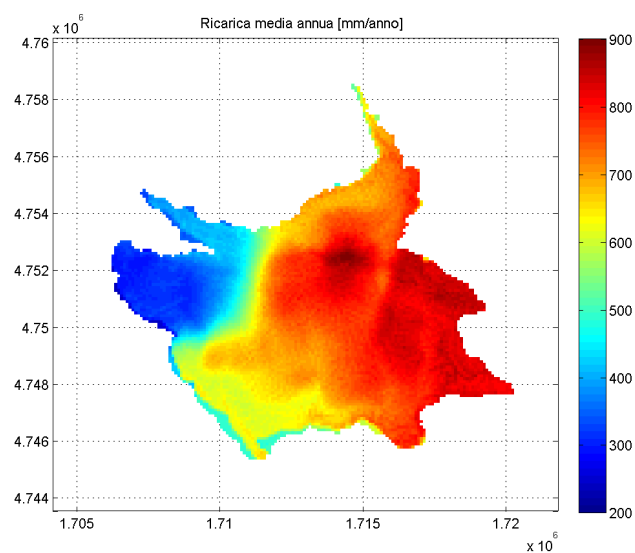


Figura 67 - Ricarica media dell'acquifero nel periodo 1990-2010 (simulazione ENEL-KFVAR).

Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994)

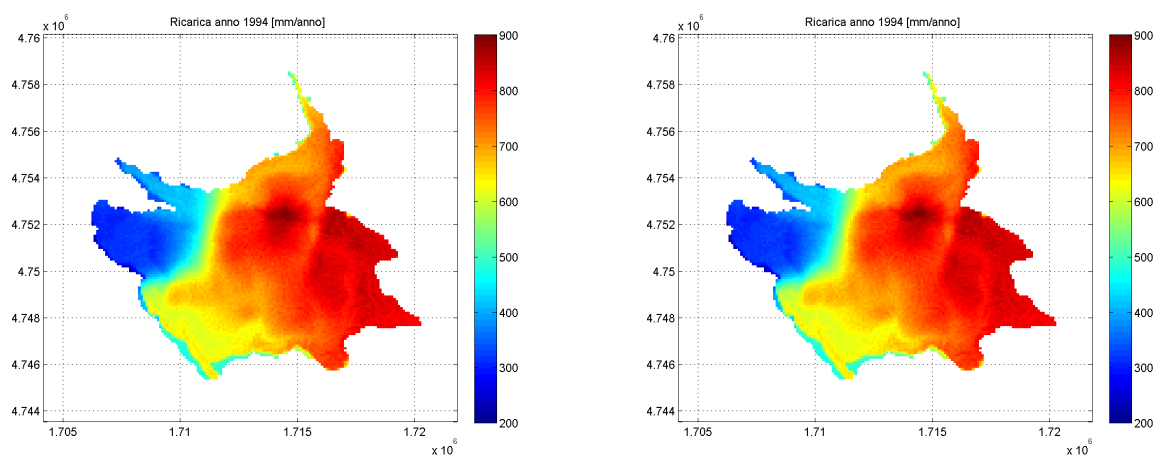


Figura 68 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più siccitoso (1994) per la simulazione ENEL-KF4 (sx) e ENEL-KFVAR (dx).

Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010)

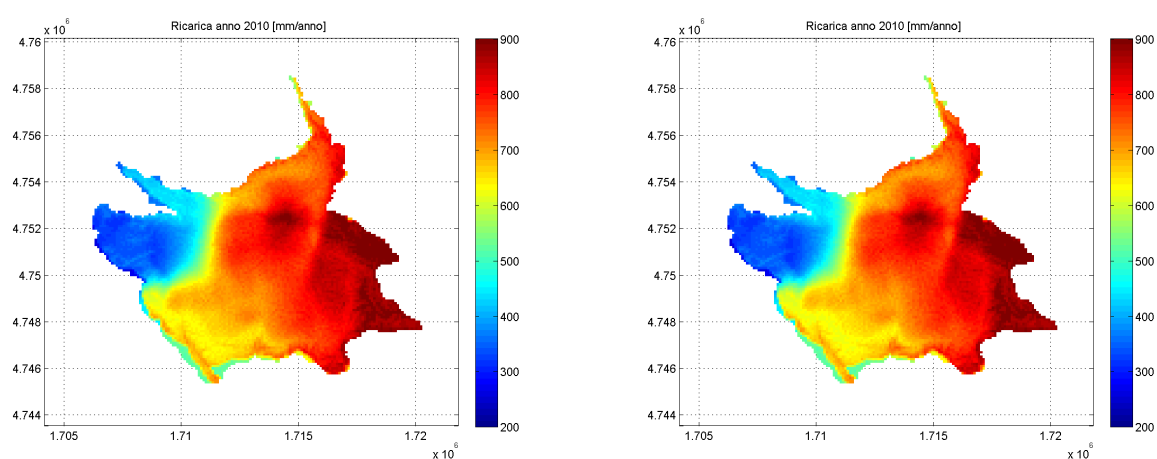


Figura 69 - Ricarica media dell'acquifero nell'anno più umido (2010) per la simulazione ENEL-KF4 (sx) e ENEL-KFVAR (dx).

Confronto con le misure disponibili

Portate dalla sorgente di S.Fiora

Il confronto del modello in configurazione CISS-KFVAR con i dati massimi e minimi di portata in uscita dalla sorgente S.Fiora mostra un discreto accordo in termini di portata media (sottostima di circa 11%) e una più marcata sottostima dell'ampiezza delle fluttuazioni. Sono invece ben riprodotti i tempi con cui si presentano i massimi e minimi relativi delle principali fluttuazioni, soprattutto da metà anni '90.

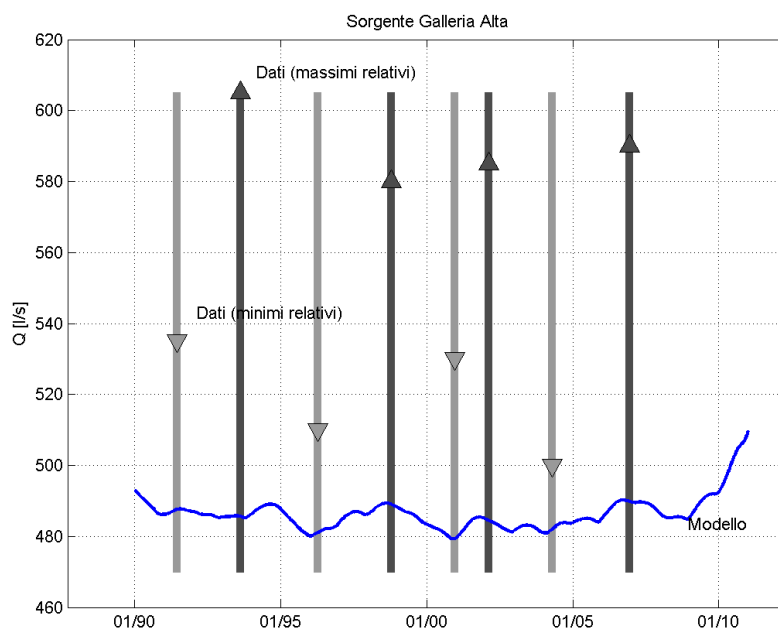


Figura 70 - Confronto fra le portate simulate in uscita dalla Galleria Alta (Sorgente S. Fiora) e i dati minimi e massimi relativi nel periodo (simulazione CISS-KFVAR).

Livelli freaticmetrici

Il confronto del modello in configurazione CISS-KFVAR con i dati piezometrici della Stazione S.Fiora11bis mostra un ottimo accordo in termine di valore medio e trend generale sul periodo di osservazione. Come già osservato per le portate dalla sorgente S. Fiora, il modello nelle configurazioni testate tende a sottostimare sensibilmente l'ampiezza delle variazioni temporali delle misure. Le configurazioni con conducibilità omogenea KF4 e KF25 mostrano inoltre una sensibile sottostima o sovrastima anche della piezometria media.

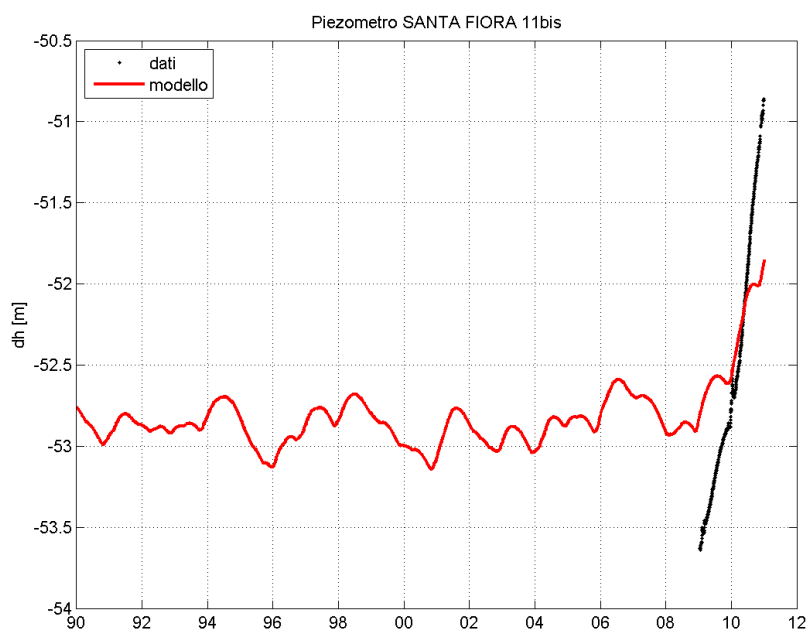


Figura 71 - Confronto con i dati piezometrici della Stazione S.Fiora11bis (simulazione CISS-KFVAR).

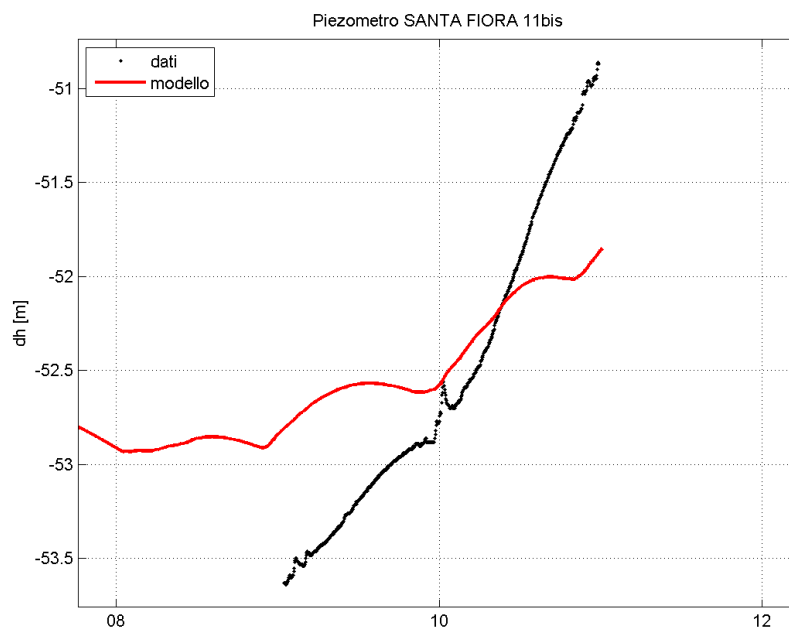


Figura 72 - Confronto con i dati piezometrici della Stazione S.Fiora11bis (simulazione CISS-KFVAR). Dettaglio degli ultimi anni

Portate nei corsi d'acqua

Le prime misure di livello idrometrico con gli strumenti installati ai fini del presente progetto sono state registrate a Maggio 2011, e dall'elaborazione preliminare di tali dati il Servizio Idrologico Regionale ha fornito le stime di portata giornaliera in corrispondenza dei punti monitorati.

Le simulazioni di Mobidic sono state quindi estese a Novembre 2011 al fine di poter effettuare i primi confronti con le stime di portata.

La quantità di misure disponibili è ancora limitata e non copre un sufficiente arco temporale in modo da garantire la variabilità idrologica necessaria per effettuare la calibrazione vera e propria del modello. Inoltre la definizione delle scale di deflusso per la trasformazione dei livelli in portate è anch'essa, per gli stessi motivi, tuttora oggetto di elaborazione e verifica da parte del Servizio Idrologico Regionale.

Tuttavia, il confronto preliminare mostra che nella maggior parte dei casi le portate di base simulate con Mobidic sono coerenti con quelle fornite dalle misure. Le maggiori incongruenze si hanno nel primo periodo di misurazione della stazione sul Fosso Bugnago, dove però le misure hanno un andamento marcatamente discontinuo rispetto al resto della serie.

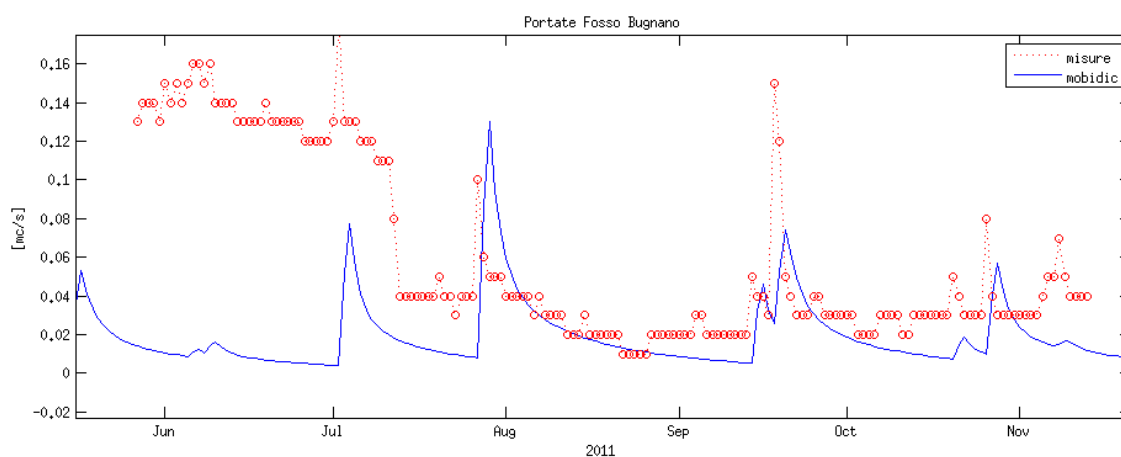


Figura 73 - Confronto fra le portate simulate (linea blu) e quelle ricavate dalle misure idrometriche sul fosso Bugnago (rosso) nel periodo Maggio-Novembre 2011.

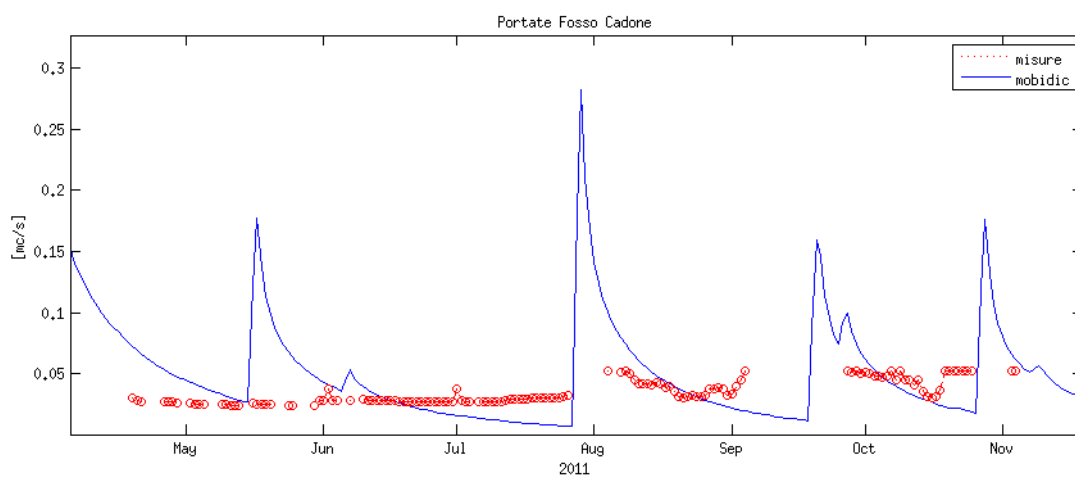


Figura 74 - Confronto fra le portate simulate (linea blu) e quelle ricavate dalle misure idrometriche sul fosso Cadone (rosso) nel periodo Maggio-Novembre 2011.

Stime da satellite del manto nevoso

Misure quantitative dirette sul manto nevoso non sono al momento disponibili nella zona del monte Amiata. Data comunque la rilevanza della dinamica del manto nevoso sulla ricarica dell'acquifero, la correttezza della sua modellazione in MOBIDIC è stata verificata almeno indirettamente tramite confronto con osservazioni satellitari della sua estensione.

La letteratura corrente sull'osservazione da satellite dei manti nevosi propone come algoritmi maggiormente consolidati quelli riguardanti l'estensione tramite osservazioni nelle bande del visibile e dell'infrarosso. Stime del contenuto d'acqua, molto più incerte, utilizzano sensori passivi alle microonde e consentono risoluzioni spaziali a terra dell'ordine delle decine di chilometri.

Data l'estensione relativamente limitata della copertura nevosa del monte Amiata, si è optato per l'utilizzo di immagini Landsat che, se pur con tempi di rivisita sporadici in assenza di copertura nuvolosa, hanno risoluzione a terra di poche decine di metri e quindi consentono una sufficiente accuratezza nella stima di tale estensione. Mappe di copertura nuvolosa disponibili con maggiore frequenza temporale, quali ad esempio prodotte dal sensore MODIS, hanno risoluzione chilometrica e quindi troppo grossolana per questo caso di studio.

Selezionando solo immagini libere da copertura nuvolosa nella zona dell'Amiata, si è analizzato un totale di 39 immagini per il periodo Novembre-Marzo dal 1999 al 2009. La copertura nevosa rilevabile da tali immagini è stata quindi classificata in 4 categorie (0-assente, 1-scarso, 2-media, 3-elevata), come da esempi sottostanti.



Figura 75 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa assente sull'Amiata.

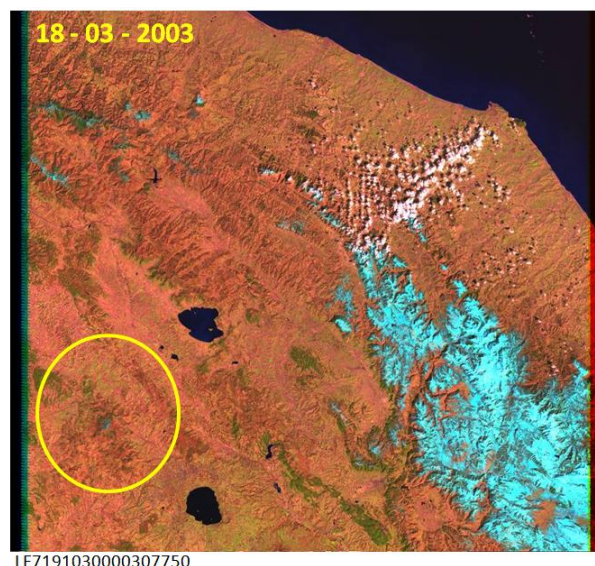


Figura 76 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa scarsa sull'Amiata.

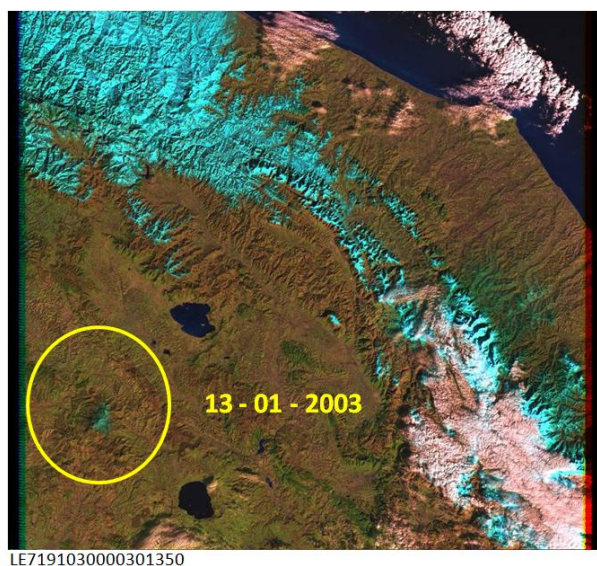


Figura 77 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa media sull'Amiata.

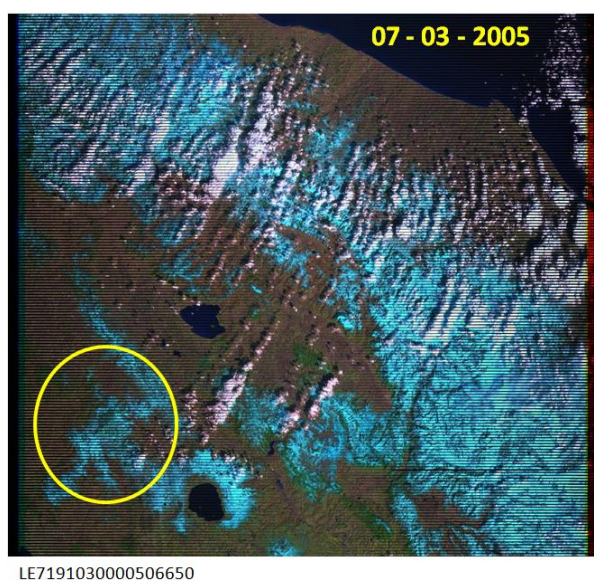


Figura 78 - Esempio di immagine Landsat con copertura nevosa elevata sull'Amiata.

Il confronto fra tali informazioni sull'estensione del manto nevoso e i risultati del modello, come rappresentato nelle figure sottostanti, indica una elevata affidabilità delle ricostruzioni sia in termini di estensione spaziale che di dinamica temporale.

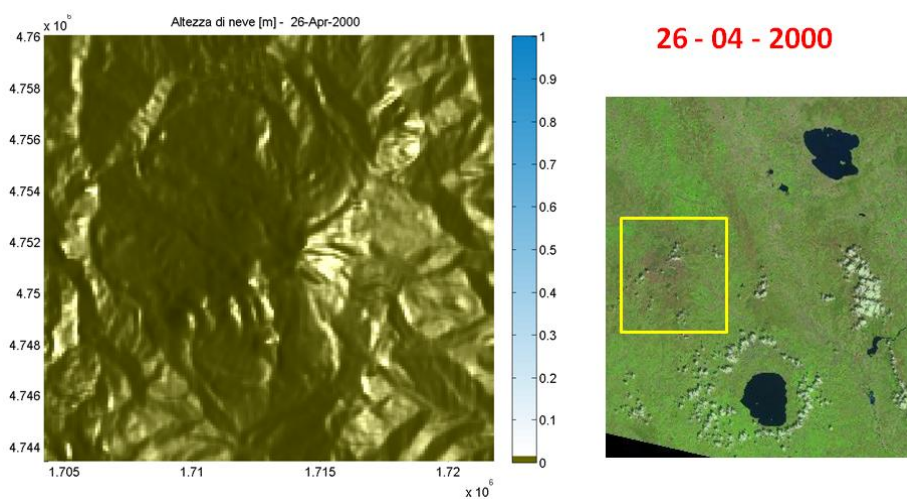


Figura 79 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa assente.

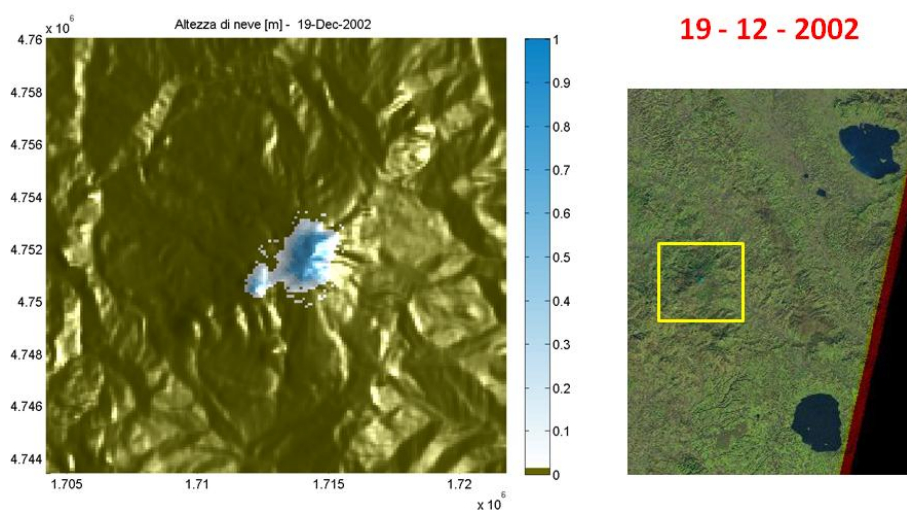


Figura 80 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa scarsa.

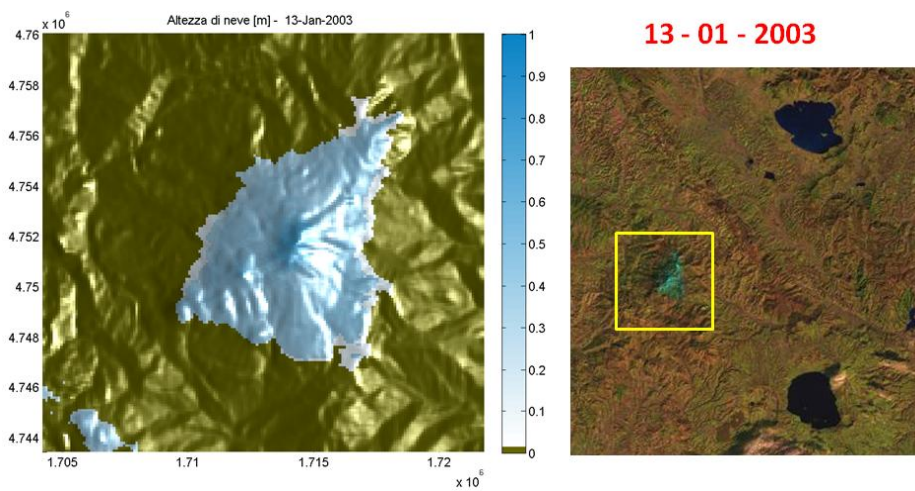


Figura 81 - Confronto modello-satellite per un giorno di copertura nevosa media.

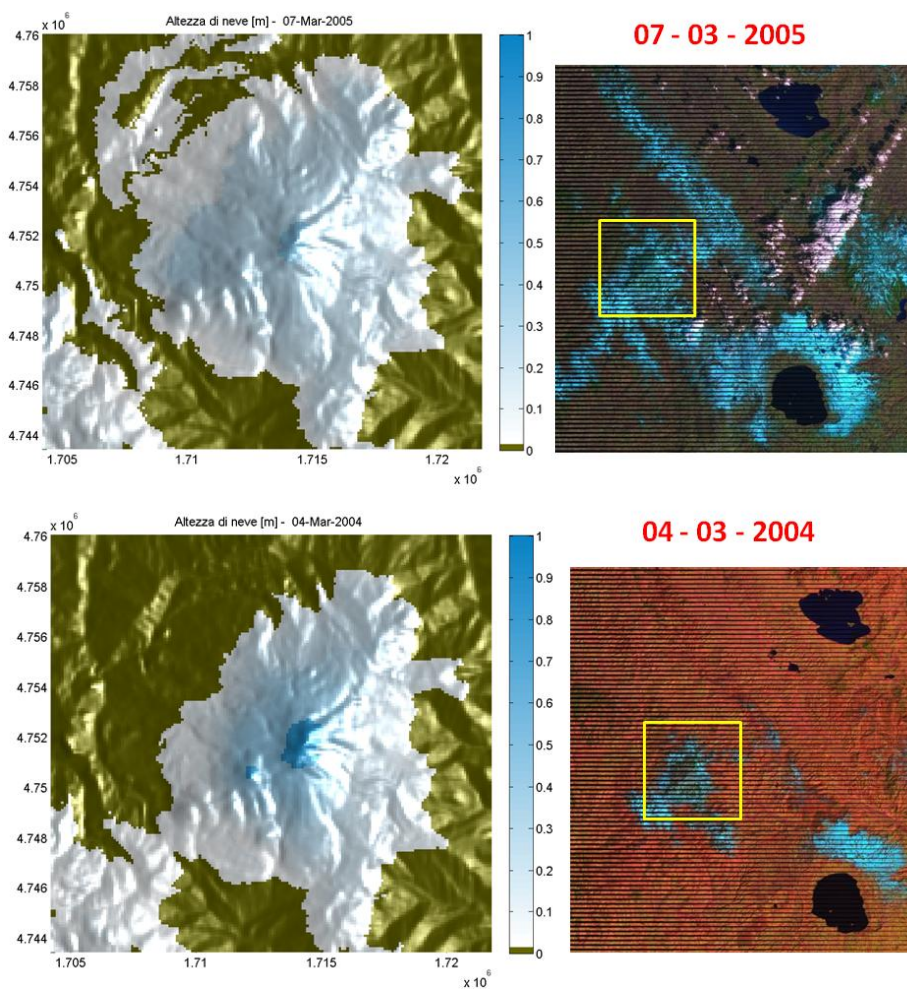


Figura 82 - Confronto modello-satellite per due giorni di copertura nevosa elevata.

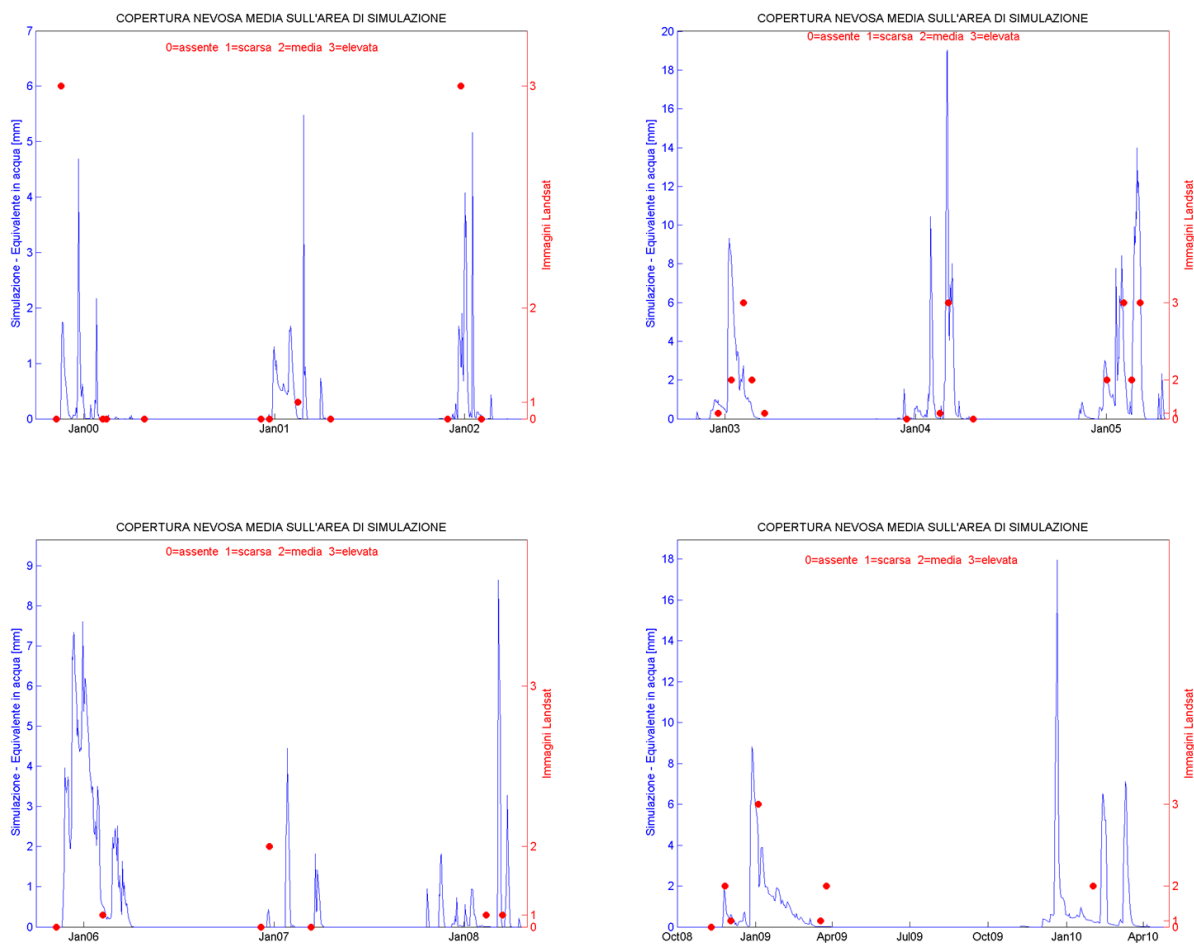


Figura 83 - Andamenti temporali dell'equivalente in acqua del manto nevoso simulato da modello (linea blu) e confronto con la classificazione della sua estensione da Landsat (simboli rossi).

Conclusioni

Le simulazioni effettuate portano alle seguenti conclusioni:

1. Il modello costruito risulta essere numericamente stabile e accurato anche per un'ampia gamma di valori dei parametri relativi all'idrologia di superficie e alla dinamica dell'acquifero vulcanico.
2. I risultati delle simulazioni risultano essere verosimili e largamente coerenti con gli aspetti principali e le informazioni generali esistenti sull'andamento medio della falda e sul totale delle portate fuoriuscenti dalla sorgenti, se pur con disaccordi con aspetti di dettaglio. Tali disaccordi variano da simulazione a simulazione, e al momento nessuna delle ipotesi semplificative fin qui adottate sulla distribuzione delle permeabilità e la loro sovrapposizione su geometrie diverse sembra riprodurre in maniera soddisfacente tutti gli aspetti dinamici osservati.
3. Fra gli aspetti che invece sono confermati dalla modellistica, sia perché coerenti con le osservazioni, sia perché concordi fra le diverse simulazioni e quindi indipendenti dalle ipotesi semplificative adottate, si evidenziano:
 - Una notevole sensibilità dei livelli di falda e degli andamenti delle portate sorge alla fluttuazioni climatiche di scala pluriennale, largamente dipendenti anche dalla dinamica del manto nevoso, e che ha evidenziato il triennio 2008-2010 come periodo di progressivo aumento dei livelli a seguire un periodo di minore disponibilità idrica. Tale importante transitorio risulta influenzare in maniera sensibile le statistiche medie calcolate sull'intero periodo, amplificando quindi la sensibilità rispetto ai parametri, quali la conducibilità idraulica, che controllano i tempi di risposta dell'acquifero. Ciò risulta ad esempio nelle stime leggermente diverse della ricarica per gli scenari testati.
 - L'andamento piezometrico generale della falda è caratterizzato da gradienti moderati (2-3%) su gran parte del dominio del bacino principale (zona centrale e sud-sud ovest) con gradienti notevolmente più alti sulle principali linee di faglia e nelle zone periferiche nord-nord est.
 - La ricarica della falda, complessivamente pari a circa il 65% delle precipitazioni, si concentra principalmente sul versante est del Monte Amiata, risentendo sia del forte gradiente delle precipitazioni in direzione nord ovest- sud est che della distribuzione dei suoli a maggiore permeabilità.
 - All'alto rapporto fra ricarica della falda e precipitazioni contribuisce in modo significativo lo scioglimento nivale nei periodi primaverili, che nelle zone più elevate raggiunge il 25% della precipitazione e supera il 10% su circa un terzo dell'areale dell'acquifero.
 - Le perdite per evapotraspirazione sono sostanzialmente dominate dal gradiente orografico, e quindi il fattore climatico dominante per tale termine di bilancio è la temperatura piuttosto che la precipitazione, a conferma di un clima di tipo sostanzialmente semi-umido.
4. Fra gli aspetti che invece risultano ancora da approfondire c'è sicuramente la difficoltà a conciliare, con le schematizzazioni fin qui testate, l'ampiezza e la bassa frequenza delle oscillazioni nelle portate misurata alla sorgenti principali, in particolare quelle di S. Fiora. Se da un lato il modello riproduce in maniera accurata, soprattutto per gli ultimi 15 anni, la sequenza temporale dei valori massimi e minimi in risposta alle fluttuazioni climatiche ritardate dai processi di ricarica su strati di

spessore consistente, l'ampiezza delle oscillazioni riprodotte risulta sottostimata. Ciò tende a suggerire che la variabilità climatica possa non essere l'unico fattore di controllo di tali oscillazioni, ma che possa potenzialmente giocare un ruolo anche una fluttuazione della pressione inferiore, attualmente non quantificabile, tenuto anche conto del particolare contesto geologico del Monte Amiata.

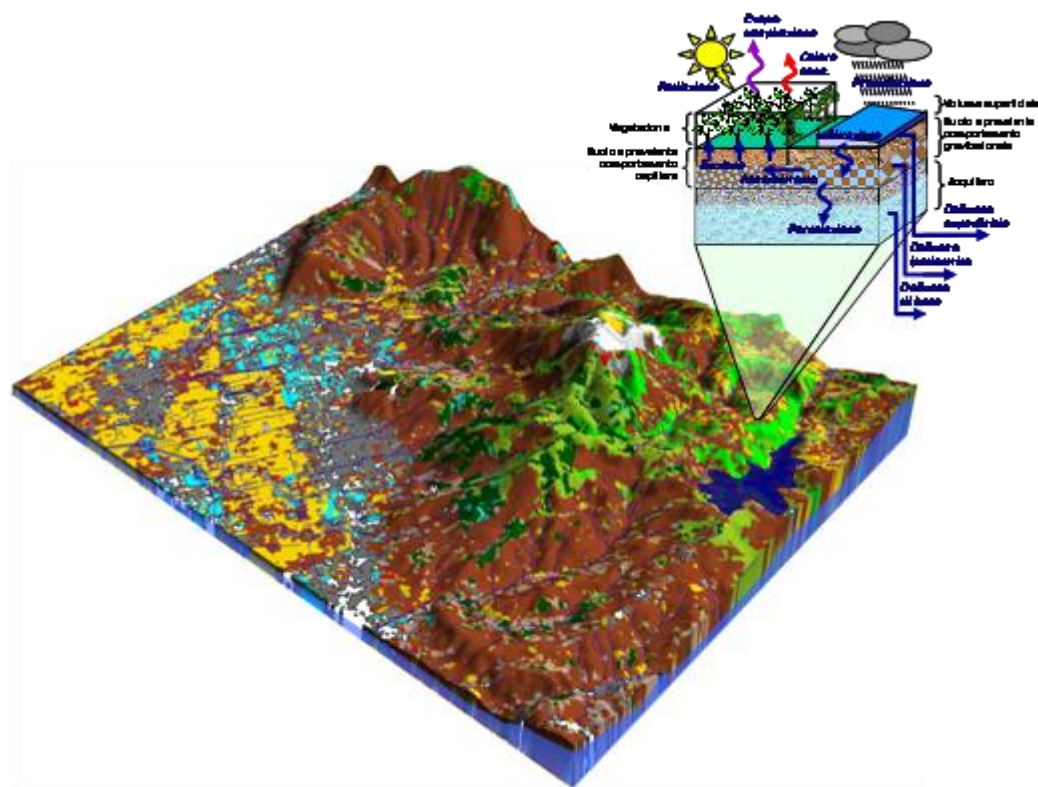
5. Lo stato attuale delle conoscenze generali sull'idrogeologia superficiale e profonda e delle osservazioni quantitative disponibili non consente una sufficiente calibrazione e verifica del modello tale da testare e verificare in modo discriminante diverse ipotesi sulle interazioni fra acquifero profondo e acquiferi superficiali. Comunque la modellistica è già predisposta e sufficientemente validata per quanto riguarda gli aspetti dell'idrologia superficiale. Sarà quindi possibile formulare e testare scenari di interazione fra le suddette falde, riguardanti in particolare l'estensione delle zone di maggior permeabilità (camini vulcanici e faglie profonde) negli strati di separazione e sulle pressioni effettive al di sotto di tali strati.

Appendice A – Il modello MOBIDIC

Caratteristiche generali

MOBIDIC è un sistema modellistico per il calcolo dei bilanci idrici, il monitoraggio quantitativo e qualitativo dell'acqua nel suolo, nel manto nevoso e nei corpi idrici superficiali e sotterranei, le previsioni di piena. Coniuga lo stato dell'arte della modellazione idrologica, meteorologica e idrogeologica con i più moderni strumenti di telerilevamento e di analisi geografica, e avanza dalla ormai consolidata classe dei modelli idrologici a parametri distribuiti verso un più innovativo approccio a parametri e risultati distribuiti. La sua base fisica e la varietà dei processi rappresentati consente di calibrarne i parametri su diverse tipologie di dati, dalle immagini satellitari alle più tradizionali misure e campionamenti puntuali nei corpi idrici. Tenendo conto anche degli effetti antropici, quali prelievi e rilasci da fiumi e laghi, consente quindi di simulare diversi scenari di gestione della risorsa e assetto territoriale. Utilizzando le previsioni meteorologiche fornite dai più avanzati modelli numerici dell'atmosfera, consente di estendere ulteriormente nel tempo le previsioni di piena anche per i torrenti minori. I moduli di calcolo di MOBIDIC forniscono la stima delle componenti idrologiche nel sistema suolo-vegetazione, nel sottosuolo e nei corpi idrici superficiali. La rappresentazione del dominio spaziale si basa su una discretizzazione orizzontale del bacino in forma di griglia a maglia quadrata e su una discretizzazione verticale in più strati: vegetazione, invasi superficiali, manto nevoso, suolo, acquiferi (artesiani e freatici).

MOBIDIC è stato sviluppato nell'ambito di progetti congiunti di ricerca fra Università degli Studi di Firenze / Autorità di Bacino del Fiume Arno / Centro Funzionale della Regione Toscana / Massachusetts Institute of Technology / Eumechanos.



Il sistema suolo-vegetazione-atmosfera

L'evapotraspirazione è calcolata sulla base del bilancio di energia fra il terreno, inteso come insieme di suolo e vegetazione, e l'atmosfera. Tale bilancio costituisce di fatto la condizione al contorno superiore dell'equazione di diffusione di calore nel terreno, suddiviso in due strati di spessore z_d e z_y . Tale discretizzazione verticale consente di rappresentare esplicitamente i processi diffusivi e di trasporto riducendo al minimo l'onere computazionale. Lo spessore del primo strato è determinato in maniera da contenere le escursioni termiche giornaliere, il secondo è determinato in maniera da contenere anche quelle stagionali, consentendo quindi di definire una temperatura 'profonda' costante T_y . Sono invece variabili prognostiche la temperatura in superficie T_0 e quella intermedia T_d :

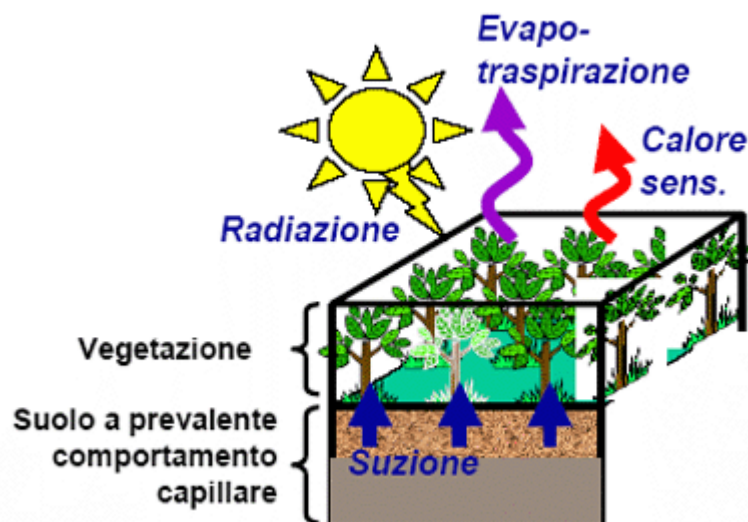
$$\rho_d C_d \frac{dT_0}{dt} = 2K_d \cdot \frac{T_d - T_0 + z_d G_{atm} / K_d}{z_d^2}$$

$$\rho_d C_d \frac{dT_d}{dt} = 2K_d \cdot \frac{(z_y - z_d)T_0 + z_d T_y - z_y T_d}{(z_y - z_d)z_d}$$

Parametri preassegnati sono il calore specifico del terreno C_d , la diffusività termica K_d e la densità del suolo ρ_d . M rappresenta il tasso di fusione della neve in massa per unità di area stimata agli estremi degli strati.

Il flusso G_{atm} di energia alla superficie è calcolato come termine residuo del bilancio fra termini radiativi R e flussi turbolenti di calore sensibile H e calore latente (evapotraspirazione) LE :

$$G_{atm} = R_{in} - R_{out} - H - LE$$



Il termine di radiazione in ingresso è stimato, per la parte a onde corte, a partire da misure della radiazione solare incidente R_s tenendo conto del coefficiente di albedo A della superficie, e per la parte a onde lunghe dalla legge di corpo grigio per l'aria a temperatura T_a , considerando un'emissività ϵ_a dipendente dalla sua umidità e_a :

$$R_{in} = (1 - A)R_s + \varepsilon_a (e_a) \sigma T_a^4$$

Il termine di radiazione in uscita, a sole onde lunghe, utilizza ancora la legge di corpo grigio con emissività prefissata ε_s e temperatura della superficie T_0 calcolata dal bilancio energetico:

$$R_{out} = \varepsilon_s \sigma T_0^4$$

I termini di flusso turbolento vengono infine espressi tramite la classica 'bulk formulation', in funzione dei gradienti di temperatura T e umidità q fra superficie e atmosfera:

$$H = \rho_a C_p C_H U (T_0 - T_a)$$

$$LE = \rho_a L C_H U (q_0 - q_a)$$

dove U è la velocità del vento, C_p è il calore specifico a pressione costante dell'aria, L il calore latente di vaporizzazione. Il parametro adimensionale C_H è il coefficiente di scambio turbolento, funzione sia della scabrezza della superficie che della stabilità dello strato limite atmosferico.

Idrologia del suolo

Il bilancio idrologico del suolo si basa su una suddivisione del suolo in due serbatoi ideali distinti: il serbatoio capillare, formato dai pori più piccoli dove prevalgono le forze capillari, e il serbatoio gravitazionale, formato dai pori più grandi dove prevalgono le forze gravitazionali. I contenuti di acqua per unità di area W_c e W_g nei due serbatoi sono limitati superiormente dalle rispettive capacità massime, W_{cmax} e W_{gmax} , e la loro evoluzione nel tempo è governata dalla seguenti equazioni di bilancio di volume:

$$\frac{dW_g}{dt} = I_{nf} - S_{per} - Q_d - S_{as}$$

$$\frac{dW_c}{dt} = S_{as} - E_T$$

dove I_{nf} è l'infiltrazione, S_{per} la percolazione, Q_d il deflusso ipodermico, S_{as} il trasferimento dal volume gravitazionale a quello capillare per assorbimento e E_T l'evapotraspirazione. L'assorbimento S_{as} è ipotizzato essere un flusso irreversibile proporzionale, attraverso il parametro κ , alla capacità relativa residua nel serbatoio capillare:

$$S_{as} = \kappa \left(1 - \frac{W_c}{W_{cmax}} \right)$$

L'evapotraspirazione E_T è alimentata dal solo serbatoio capillare, cioè la suzione dalle radici è considerata come dominante rispetto all'evaporazione diretta dal suolo, e si mantiene pari al valore potenziale calcolato dal bilancio energetico fino al sostanziale asciugamento del suolo.

Con questa schematizzazione, le capacità W_{gmax} e W_{cmax} possono essere definite come il contenuto idrico massimo nel suolo, rispettivamente, al di sopra la capacità di campo e fra la capacità di campo e il punto di appassimento.

Il serbatoio gravitazionale alimenta i flussi dominati dalla gravità cioè la percolazione verso gli acquiferi S_{per} ed il deflusso ipodermico verso valle Q_d . Ambedue i flussi sono calcolati come proporzionali al contenuto

nel serbatoio gravitazionale tramite i parametri γ e β , dipendenti dalla conducibilità idraulica a saturazione del suolo K_s e dalla dimensione delle celle di calcolo Δx , introducendo i parametri globali di calibrazione β^* , γ^* e C^* :

$$S_{per} = \gamma W_g$$

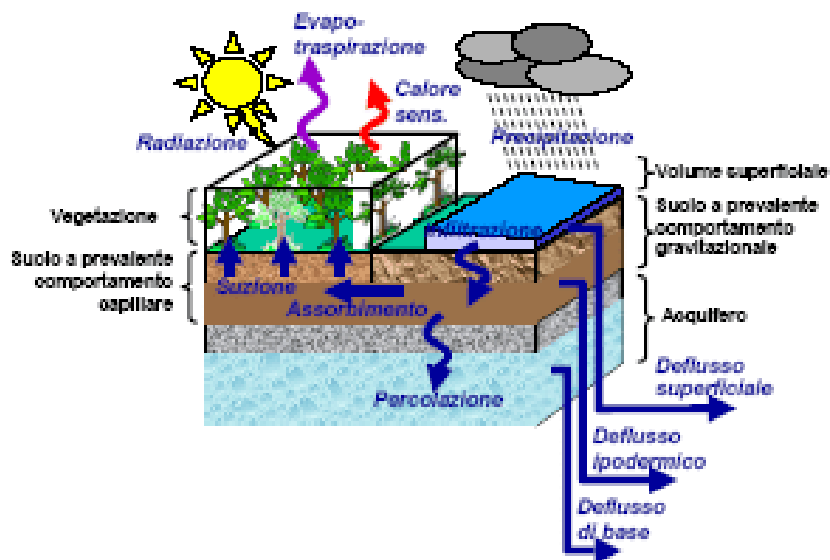
$$Q_d = \beta W_g$$

$$\beta = \beta^* \frac{K_s}{\Delta x}$$

$$\gamma = \gamma^* \left(\frac{K_s}{\Delta x} + C^* \right)$$

Il tasso in infiltrazione nel suolo K_s è limitato dalla conducibilità idraulica a saturazione. Indicando con P l'intensità di precipitazione e con $(Q_d, R_h, R_d)_{up}$ i contributi di deflusso ipodermico e di deflusso superficiale alla Horton e alla Dunne provenienti da monte, l'infiltrazione in ciascuna cella viene calcolata come:

$$I_{nf} = \begin{cases} \left[P + (Q_d + R_h + R_d)_{up} \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-K_s}{P + (Q_d + R_h + R_d)_{up}} \right) \right] & \text{if } W_g < W_{g \max} \\ 0 & \text{if } W_g = W_{g \max} \end{cases}$$



La propagazione verso valle dei deflussi superficiali è ancora schematizzata tramite un ulteriore serbatoio lineare di capacità illimitata e contenuto per unità di area W_s :

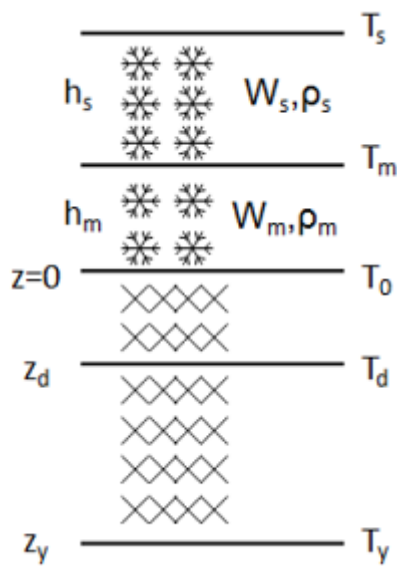
$$\frac{dW_s}{dt} = -\alpha_s W_s + R_H + R_D + q_{up}$$

dove q_{up} è il deflusso superficiale che da monte arriva alla cella. Il parametro di propagazione α_s è stimato, cella per cella, tramite una relazione semi-empirica come funzione dell'area contribuyente A e della pendenza locale i :

$$\alpha_s = \frac{\alpha_0}{\Delta x} \sqrt{Ai}$$

Dinamica del manto nevoso

La dinamica del manto nevoso viene rappresentata risolvendo i bilanci di energia e di massa per il sistema terreno-manto nevoso, ciascuno suddiviso in due strati (Fig. §§). Tale discretizzazione verticale consente di rappresentare esplicitamente i processi diffusivi e di trasporto riducendo al minimo l'onere computazionale. Mentre gli spessori dei due strati di terreno z_d e z_y sono prefissati, il secondo dei quali per definire una temperatura 'profonda' costante T_y , gli spessori h_s e h_m degli strati di neve sono variabili di stato incognite. Sono inoltre incognite anche le densità ρ_s e ρ_m della neve che, moltiplicate per i corrispondente spessori, forniscono i valori del contenuto equivalente in acqua W_s e W_m . Le ulteriori incognite del sistema sono le quattro temperature in sommità degli strati T_d , T_0 , T_m e T_s .



L'equazioni prognostiche per le temperature si ottengono discretizzando alla differenze finite l'equazione di Fourier di diffusione del calore, tenendo conto della variabilità ed eterogeneità degli spessori degli strati e delle loro proprietà termiche:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{2}{W_s C_s} \left[G_{atm} + \rho_s K_s \frac{T_m - T_s}{W_s} - \frac{1}{2} L_M M_s \right]$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{2}{W_s C_s + W_m C_m} \left[\frac{\rho_s K_s}{W_s} T_s + \frac{\rho_m K_m}{W_m} T_0 - \left(\frac{\rho_s K_s}{W_s} + \frac{\rho_m K_m}{W_m} \right) T_m - L_M M_m \right]$$

$$\frac{dT_0}{dt} = \frac{2}{W_m C_m + z_d \rho_d C_d} \left[\frac{\rho_m K_m}{W_m} T_m + \frac{K_d}{z_d} T_d - \left(\frac{\rho_m K_m}{W_m} + \frac{K_d}{z_d} \right) T_0 - \frac{1}{2} L_M M_0 \right]$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{2K_d}{\rho_d C_d} \cdot \frac{(z_y - z_d)T_0 + z_d T_y - z_y T_d}{(z_y - z_d)z_d}$$

Parametri preassegnati sono i calori specifici C e le diffusività termiche K sia per il terreno che per la neve, il calore latente di fusione della neve L_M e la densità del suolo ρ_d . M rappresenta il tasso di fusione della neve in massa per unità di area stimata agli estremi degli strati.

Il flusso G_{atm} di energia alla superficie è calcolato, tramite la classica 'bulk formulation' (vedi calcolo dell'evapotraspirazione) in assenza di neve, come residuo del bilancio fra radiazione e flussi turbolenti di calore, inclusivi della sublimazione E_s .

Il bilancio di massa si scrive in maniera differente nei due strati di neve. Lo strato superiore riceve la precipitazione nevosa S_f , stimata da dati pluviometrici e termometrici, e viene ridotto dalla fusione media di strato M_s^* , dalla sublimazione E_s e da un termine concettuale D di trasferimento fra strati. Intendendo come strato superiore quello di neve più fresca a minor densità, il termine D trasferisce concettualmente massa fra i due strati in funzione del progressivo invecchiamento e compattamento. Lo strato inferiore guadagna massa solo attraverso il trasferimento D , e la perde tramite la fusione media di strato M_m^* .

$$\frac{dW_s}{dt} = S_f - M_s^* - E_s - D$$

$$\frac{dW_m}{dt} = D - M_m^*$$

dove:

$$M_s^* = \frac{1}{2}(M_s + M_m)$$

$$M_m^* = \frac{1}{2}(M_m + M_0)$$

$$D = \max\left\{0, \frac{1}{d}(W_s - W_m)\right\}$$

La densità della neve tende a crescere per compattazione, ad un tasso che è proporzionale alla massa W e alla viscosità v attraverso u fattore empirico f_c . Nello strato superficiale la densità è inoltre alleggerita dalla densità della precipitazione nevosa ρ_f , nello strato sottostante dal termine di trasferimento D :

$$\frac{d\rho_s}{dt} = f_c \frac{g}{v} W_s + \frac{S_f}{W_s}(\rho_f - \rho_s)$$

$$\frac{d\rho_m}{dt} = f_c \frac{g}{v} W_m + \frac{D}{W_m}(\rho_s - \rho_m)$$

Infine, i tassi di fusione sono stimati ipotizzando che questi 'consumino' tutta l'energia in eccesso che porterebbe la temperatura della neve a superare $T_{\text{melt}} \approx 0^\circ\text{C}$.

$$M_s = \max\left\{0, \frac{2}{L_M} \left(G_{\text{atm}} + \rho_s K_s \frac{T_m - T_s}{W_s} \right) \right\} \cdot [T_s = T_{\text{melt}}]$$

$$M_m = \max\left\{0, \frac{1}{L_M} \left[\frac{\rho_s K_s}{W_s} T_s + \frac{\rho_m K_m}{W_m} T_0 - \left(\frac{\rho_s K_s}{W_s} + \frac{\rho_m K_m}{W_m} \right) T_m \right] \right\} \cdot [T_m = T_{\text{melt}}]$$

$$M_s = \max \left\{ 0, \frac{2}{L_M} \left[\frac{\rho_m K_m}{W_m} T_m + \frac{K_d}{z_d} T_d - \left(\frac{\rho_m K_m}{W_m} + \frac{K_d}{z_d} \right) T_0 \right] \right\} \cdot [T_0 = T_{\text{melt}}]$$

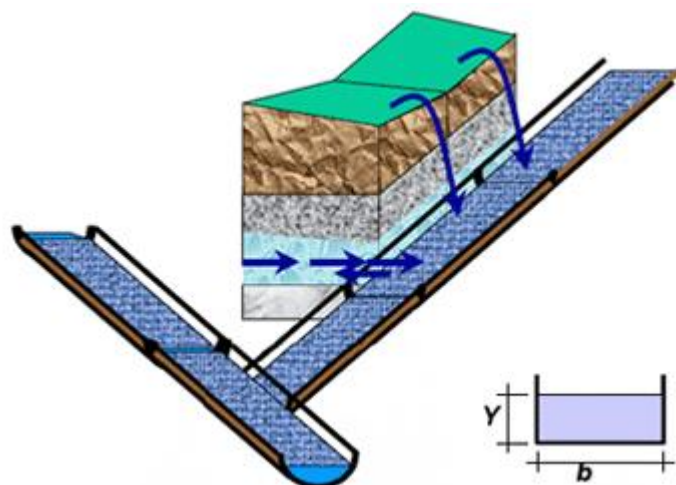
Idrografia

La rete idrografica è rappresentata in forma vettoriale, per tratti cilindrici attraverso i quali la propagazione delle portate può essere calcolata, in funzione delle esigenze applicative, con diversi metodi (lag, serbatoio lineare, Muskingum-Cunge). Ciascuno di tali schemi può essere formalizzato come una diversa semplificazione dell'equazione generale di de Saint-Venant:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + c(q_L + q_D + q_w)$$

dove q_L è l'afflusso laterale (dai deflussi superficiali e ipodermici di versante), q_D è il deflusso di base (dagli acquiferi) e q_w è la somma su ciascun ramo di prelievi e rilasci puntuali. I parametri sono: c , la celerità e μ , la diffusività.

La topologia a rete è ricostruita ed eventualmente corretta automaticamente in fase di preprocessamento, a partire dalla rappresentazione cartografica per 'linee blu'. Anche l'ordinamento di Strahler viene effettuato in maniera automatica, ed i calcoli idraulici possono essere opzionalmente limitati ai soli rami al di sopra di un certo ordine. L'interazione fra rete idrografica, versanti, acquiferi, prelievi e rilasci è anch'essa strutturata nella fase di preprocessamento spaziale sulla base delle rispettive geometrie.



Dinamica dell'acquifero freatico

Il modello descrive le variazioni spazio-temporali del carico piezometrico h all'interno dell'acquifero utilizzando l'approssimazione bidimensionale del moto in falda di Dupuit, da cui si ottiene la seguente equazione differenziale alle derivate parziali di secondo ordine nello spazio:

$$S(x, y) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x, y) \cdot H(x, y, t) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(x, y) \cdot H(x, y, t) \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q(x, y, t)$$

dove t è la coordinata temporale, x, y sono le coordinate spaziali, S [-] è il coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero, k [L/T] il coefficiente di conducibilità idraulica orizzontale a saturazione, H [L] lo spessore locale della falda e q [L/T] la portata netta entrante in falda per unità di superficie della stessa. Tale equazione differenziale è non lineare, poiché lo spessore della falda è dato dalla differenza tra il carico piezometrico e la quota del bedrock Z_b :

$$H(x, y, t) = h(x, y, t) - Z_b(x, y)$$

Il prodotto $k(x, y) \cdot H(x, y, t)$ rappresenta la trasmissività della falda e sarà indicato con $T(x, y, t)$.

Il termine di ingresso netto locale $q(x, y, t)$ comprende i contributi di ricarica per percolazione e immissione laterale, gli efflussi da sorgenti, gli emungimenti da pozzi e gli scambi con un eventuale serbatoio profondo. In particolare la portata effluente dalle sorgenti viene schematizzata come:

$$Q_s = A_s \cdot \varphi_s \cdot \sqrt{2g \cdot (h - Z_s)}$$

dove Z_s è la quota della sorgente [L], A_s ne è l'area della bocca [L²] e φ_s il coefficiente di efflusso [-]. La portata per unità di superficie scambiata con un eventuale serbatoio profondo è invece modellata come:

$$q_p = k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}$$

dove k_z [L/T] è il coefficiente di conducibilità verticale dell'acquifero e $\partial h / \partial z$ [-] il gradiente del carico piezometrico vigente tra falda e serbatoio profondo.

Per l'integrazione dell'equazione di governo del modello, si adotta la condizione al contorno di flusso nullo attraverso la frontiera della falda (F), il cui versore normale è indicato con n :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad \forall (x, y) \in \partial F$$

Il modello prevede una re-immissione nel percorso idrologico superficiale sia delle portate uscenti dalla falda per affioramento naturale, che delle non captate tra le effluenti dalle sorgenti; la falda comunica quindi con la superficie per mezzo di tali flussi e del termine di percolazione.

Soluzione numerica

Il modello di falda viene risolto numericamente alle differenze finite secondo uno schema semi-implicito, adottando una discretizzazione dell'acquifero a maglia rettangolare con passi spaziali Δx e Δy . La necessità di adottare uno schema semi-implicito nasce dalla non linearità del termine diffusivo dell'equazione di governo del modello, la quale deriva dalla capacità di poter trattare geometrie del bedrock complesse (non si assume derivata nulla per la quota del fondo impermeabile della falda). La superficie piezometrica è perciò aggiornata utilizzando la trasmissività T relativa all'istante di calcolo precedente.

Il termine di flusso e la variabile di stato h sono discretizzati su griglie di calcolo sfalsate (*Staggered Grids*) al fine di garantire la totale conservazione della massa anche a livello di soluzione numerica.

Nelle seguenti equazioni l'apice e i pedici di ogni grandezza si riferiscono rispettivamente all'istante e al nodo di calcolo. Il passo temporale è indicato con Δt . Le discretizzazioni dei termini diffusivi al generico istante n e nel generico nodo di calcolo i,j risultano quindi essere:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{i,j}^n = \frac{1}{\Delta x} \left(T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{i+\frac{1}{2},j}^n - T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) = \frac{T_{i+\frac{1}{2},j}^{n-1}}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{T_{i-\frac{1}{2},j}^{n-1}}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^n - h_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{i,j}^n = \frac{1}{\Delta y} \left(T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n - T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) = \frac{T_{i,j+\frac{1}{2}}^{n-1}}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n}{\Delta y} \right) - \frac{T_{i,j-\frac{1}{2}}^{n-1}}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^n - h_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right)$$

dove la trasmissività della falda relativa al generico nodo $i+1/2,j$ è calcolata in funzione del carico piezometrico dei nodi adiacenti i,j e $i+1,j$:

$$T_{i+\frac{1}{2},j}^{n-1} \approx k_{i,j} \cdot \frac{h_{i,j}^{n-1} + h_{i+1,j}^{n-1}}{2}$$

e in maniera equivalente per la direzione y .

Il termine di scambio con il serbatoio profondo è discretizzato come:

$$q_{pi,j}^n = k_{zi,j} \cdot \frac{h_{i,j}^n - h_{rif}}{\Delta z}$$

dove h_{rif} è il carico piezometrico del serbatoio e Δz la distanza di separazione tra di esso e la falda.

Gli efflussi dalle sorgenti sono linearizzati per mantenere un approccio semi-implicito nell'approssimazione numerica, e quindi limitare i vincoli di stabilità sul passo temporale:

$$Q_{si,j}^n \approx Q_{si,j}^{n-1} + \frac{dQ_s}{dh} \Big|_{i,j}^{n-1} \cdot (h_{i,j}^n - h_{i,j}^{n-1}) =$$

$$= A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{i,j}^{n-1} - Z_{si,j})} + \left(\frac{1}{2} \cdot A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{i,j}^{n-1} - Z_{si,j}}} \right) \cdot (h_{i,j}^n - h_{i,j}^{n-1})$$

Inoltre, l'approccio semi-implicito fino a qui descritto è inserito all'interno di un *Fractional Step Method*, in modo da poter utilizzare un sottopasso temporale pari alla metà del principale, mantenendo però pressoché invariato il costo computazionale della soluzione numerica del modello. L'impiego di un sottopasso restituisce una maggiore accuratezza nella stima delle portate delle sorgenti, per cui si mantiene la discretizzazione semi-implicita in entrambi gli step del metodo, mentre la parte diffusiva dell'equazione, nel primo di essi, è risolta con un metodo esplicito. In conclusione per il generico nodo i,j si ottiene:

Step 1:

$$\begin{aligned}
h_{i,j}^{n+1/2} = & h_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{T_{i+1/2,j}^n}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n}{\Delta x} \right) - \frac{T_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^n - h_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) \right) + \\
& + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{T_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n}{\Delta y} \right) - \frac{T_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^n - h_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right) \right) - \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(k_{zi,j} \cdot \frac{h_{i,j}^n - h_{rif}^n}{\Delta z} \right) + \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left(A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{i,j}^n - Z_{si,j})} - \left(\frac{1}{2} \cdot A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{i,j}^n - Z_{si,j}}} \right) \cdot (h_{i,j}^{n+1/2} - h_{i,j}^n) \right) + \\
& + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(p_{i,j}^{n+1/2} + q_{lati,j}^{n+1/2} - q_{pozzi,j}^{n+1/2} \right)
\end{aligned}$$

Step 2:

$$\begin{aligned}
h_{i,j}^{n+1} = & h_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{T_{i+1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i+1,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) - \frac{T_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) \right) + \\
& + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{T_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} \right) - \frac{T_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \cdot \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} \right) \right) - \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(k_{zi,j} \cdot \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{rif}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left(A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{i,j}^{n+1/2} - Z_{si,j})} - \left(\frac{1}{2} \cdot A_{si,j} \cdot \varphi_{si,j} \cdot \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{h_{i,j}^{n+1/2} - Z_{si,j}}} \right) \cdot (h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1/2}) \right) + \\
& + \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(p_{i,j}^{n+1} + q_{lati,j}^{n+1} - q_{pozzi,j}^{n+1} \right)
\end{aligned}$$

Allo *Step 1* deve quindi essere risolto un sistema lineare diagonale, mentre allo *Step 2* il sistema lineare da risolvere è pentadiagonale.

La condizione al contorno di flusso nullo viene imposta tra il nodo di bordo e un nodo virtuale adiacente ad esso dal lato esterno; ad esempio per un generico nodo perimetrale secondo la direzione x dal lato sinistro, si ha:

$$\frac{h_{1,j}^n - h_{0,j}^n}{\Delta x} = 0 \quad \forall n$$

Il modello utilizza la soluzione proposta da *Doherty (2001)* per non escludere le celle di acquifero “secche” dal dominio di calcolo. Si considera infatti che tali celle mantengano sempre uno spessore saturo residuo H_r , e la trasmissività T viene perciò calcolata tenendo conto di esso:

$$T_{i,j}^n = \begin{cases} k_{i,j} \cdot H_r \cdot \exp(-g \cdot H_{i,j}^n) + k_{i,j} \cdot H_{i,j}^n & H_{i,j}^n \geq 0 \\ k_{i,j} \cdot H_r \cdot \exp(f \cdot H_{i,j}^n) & H_{i,j}^n < 0 \end{cases} \quad \text{con} \begin{cases} g = \frac{1}{H_r} - f \\ f < \frac{1}{H_r} \end{cases}$$

Infine, la soluzione numerica del modello stima gli affioramenti naturali della falda operando un confronto, per ogni cella e a ogni istante di calcolo, tra la quota del piano campagna e il carico piezometrico ottenuto dalla risoluzione della sequenza di sistemi lineari precedentemente descritta; parte dell’eventuale eccedenza viene poi riversata nei deflussi idrologici di superficie:

$$q_{ecc,i,j}^n = \frac{(1-\alpha)(h_{i,j}^n - z_{i,j}) \cdot n_{e,i,j}}{\Delta t} \quad \text{se } h_{i,j}^n > z_{i,j}$$

dove q_{ecc} [L/T] è la portata affiorante per unità di area, n_e [-] è la porosità efficace dell’acquifero, z [L] è la quota del piano campagna e α è un coefficiente di rilassamento che tiene conto del fatto che si sta valutando l’affioramento in funzione della quota media della superficie entro la cella di calcolo.

Parametri del modello

Il modello di falda necessita quindi della definizione dei seguenti parametri:

- la conducibilità idraulica orizzontale a saturazione dell’acquifero k , variabile nello spazio;
- la porosità efficace dell’acquifero n_e , variabile nello spazio;
- la conducibilità idraulica verticale a saturazione del bedrock k_z e il corrispondente spessore Δz , variabili nello spazio;
- il coefficiente di efflusso φ_s e l’apertura della bocca delle sorgenti A_s , i quali possono essere differenti per ogni sorgente;
- lo spessore saturo residuo della falda H_r e i coefficienti g e f per il calcolo della trasmissività, unici per l’intera falda;
- il coefficiente di rilassamento α , anch’esso unico per tutta la falda.

I passi spaziali $\Delta x, \Delta y$ e temporale Δt sono invece mutuati dalla sezione superficiale del modello MOBIDIC.

Inoltre i dati geografici necessari, aggiuntivi rispetto alla sezione superficiale di MOBIDIC, sono:

- la grid del bedrock della falda;
- le coordinate piane delle sorgenti e le corrispondenti quote.