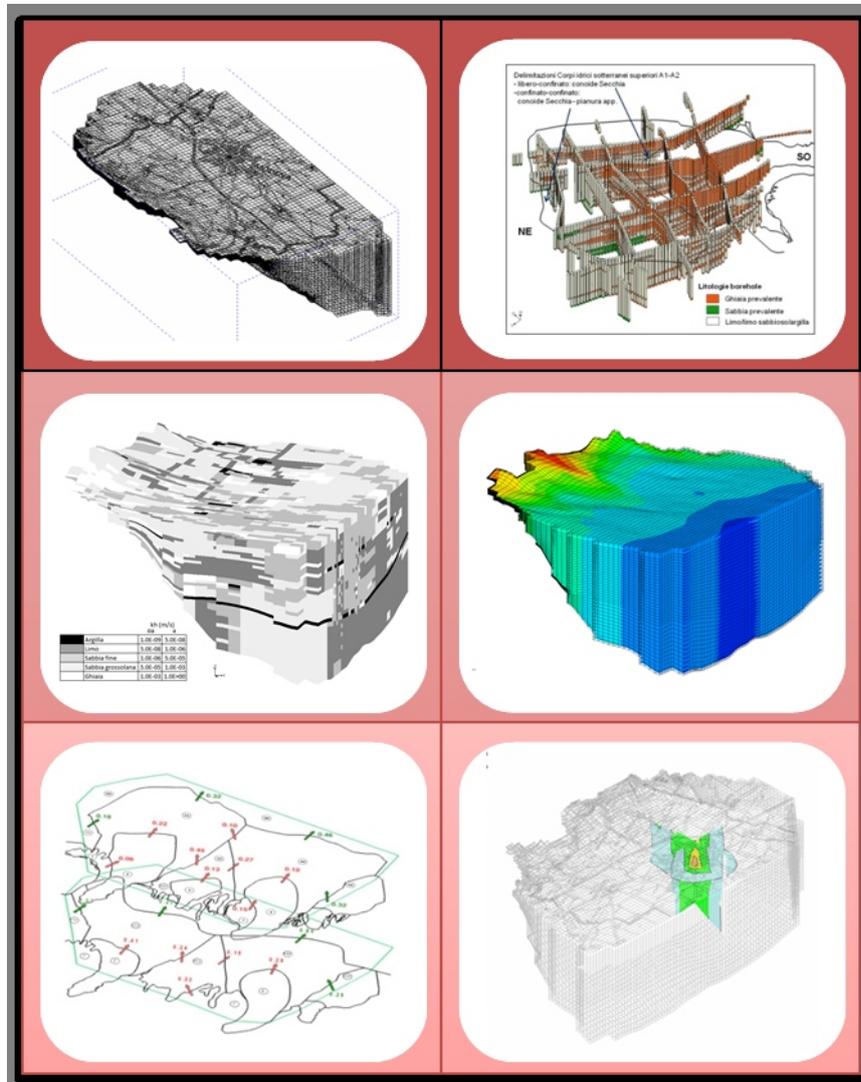


## Implementazione della modellistica di flusso delle acque sotterranee della provincia di Modena a supporto della pianificazione e gestione della risorsa idrica



Bologna, marzo 2013





## **ATERSIR EMILIA-ROMAGNA**

Agenzia Territoriale dell'Emilia-Romagna per i Servizi Idrici e Rifiuti  
Ing. Vito Belladonna

## **ARPA**

**Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente**

### **Arpa Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale Sistemi Idrici**

Dott.ssa Donatella Ferri – Responsabile del CTR Sistemi Idrici

Ing. Andrea Chahoud – Responsabile di progetto

Dott. Luca Gelati

Dott. Giacomo Zaccanti

### **Arpa Sezione Provinciale di Modena**

Dott. Vittorio Boraldi – Direttore di Arpa Sezione Provinciale di Modena

Dott.ssa Daniela Sesti - Responsabile Servizio Sistemi Ambientali della Sezione Provinciale di Modena

Dott.ssa Anna Maria Manzieri – Responsabile di progetto

### **La grafica di copertina è stata curata da:**

Sig.ra Leda Ferrari – Arpa Direzione Tecnica

### **Si ringraziano per la collaborazione prestata e/o i dati forniti:**

- Dott. William Praticcoli - ARPA SIMC
- Ing. Silvano Pecora - ARPA SIMC
- Dott. Mauro Del Longo - ARPA SIMC
- Ing. Cinzia Alessandrini - ARPA SIMC
- Dott. Paolo Severi - SGSS-RER
- Dott. Lorenzo Calabrese – SGSS RER
- Dott. ssa Luciana Bonzi - SGSS-RER
- Dott. Marco Marcaccio - ARPA DT
- Ing. Paolo Spezzani - ARPA DT
- Ing. Daniele Cristofori - ARPA DT
- Dott.ssa Francesca Carla Lupoli - ATERSIR

# SOMMARIO

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ATTIVITÀ SVOLTE.....</b>	<b>1</b>
2.1 ATTIVITÀ 1: ACQUISIZIONE E VALUTAZIONE DEI DATI DISPONIBILI .....	1
2.2 ATTIVITÀ 2: VALUTAZIONE DELLE SCELTE OPERATIVE PER LA REALIZZAZIONE DEL MODELLO.....	2
2.3 ATTIVITÀ 3: IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE .....	3
2.3.1 <i>Definizione e conferma del modello concettuale (circolazione idrica sotterranea)</i> .....	3
2.3.2 <i>Analisi della disponibilità dei dati piezometrici</i> .....	6
2.3.3 <i>Scelta della discretizzazione spaziale del modello</i> .....	12
2.3.4 <i>Scelta della discretizzazione temporale del modello</i> .....	14
2.3.5 <i>Le condizioni iniziali ed al contorno del modello di flusso (analisi del carico idraulico)</i> .....	15
2.3.6 <i>La geometria e la struttura del sistema</i> .....	17
2.3.7 <i>La parametrizzazione del sistema</i> .....	22
2.3.8 <i>La valutazione dei prelievi di acque sotterranee nello spazio e nel tempo</i> .....	23
2.3.8.1 I prelievi civili acquedottistici .....	24
2.3.8.2 I prelievi complessivi .....	32
2.3.9 <i>La valutazione della ricarica meteorica</i> .....	34
2.3.10 <i>La ricarica operata dai principali corsi d'acqua (Panaro, Secchia e Tiepido)</i> .....	36
2.3.10.1 Valutazione del tipo di rapporto falda-fiume sulla base degli studi idrogeologici disponibili.....	36
2.3.10.2 Possibile quantificazione dei volumi di ricarica .....	40
2.4 ATTIVITÀ 4: CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO .....	42
2.4.1 <i>Assetto delle permeabilità</i> .....	42
2.4.2 <i>Assetto del flusso</i> .....	46
2.4.3 <i>Controllo della taratura</i> .....	50
2.4.4 <i>Analisi del bilancio</i> .....	57
2.4.4.1 <i>Analisi del bilancio della conoide del Secchia</i> .....	61
2.4.4.2 <i>Analisi del bilancio della conoide del Tiepido</i> .....	63
2.4.4.3 <i>Analisi del bilancio della conoide del Panaro</i> .....	66
2.5 ATTIVITÀ 5: SVILUPPO DI SCENARI ESEMPLIFICATIVI .....	68
2.5.1 <i>Esempio 1: analisi della circolazione idrica sotterranea in funzione dell'ipotesi di azzeramento dei prelievi Aimag ed Hera di Cognento</i> .....	68
2.5.2 <i>Esempio 2: analisi della circolazione idrica sotterranea in funzione del ripristino ai valori storici dei prelievi Hera di Modena Sud</i> .....	74
2.6 ATTIVITÀ 6: VERIFICA DELLE POSSIBILITÀ DI AGGIORNAMENTO E VERIFICA DEL MODELLO.....	78
2.6.1 <i>Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati di prelievo di acque sotterranee</i> .....	79
2.6.2 <i>Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati delle ricariche del sistema in funzione delle condizioni meteo-climatiche</i> .....	80
2.6.3 <i>Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati piezometrici di controllo</i> .....	80
2.6.4 <i>Prime proposte operative</i> .....	82
2.6.4.1 <i>Aggiornamento e verifica del modello</i> .....	82
2.6.4.2 <i>Utilizzo del modello</i> .....	82
<b>3. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>83</b>



## 1. PREMESSA

La presente attività riguarda la realizzazione del modello di flusso delle acque sotterranee della Provincia di Modena, con particolare riferimento alle falde acquifere maggiormente sfruttate a scopo idropotabile. La finalità principale è la creazione di uno strumento di carattere operativo che possa supportare la pianificazione e la gestione della risorsa idrica sotterranea modenese, e quindi essere supporto decisionale per il corretto utilizzo della risorsa idrica sotterranea. Questo implica che alla fase di realizzazione del modello, che viene qui presentata, debba necessariamente seguire la fase di aggiornamento dello stesso per poter così via via seguire il comportamento del sistema nel tempo, così come descritto nell'impostazione di tale attività proposta a conclusione del progetto (attività 6, paragrafo 2.6).

Nei paragrafi seguenti vengono descritte le modalità di svolgimento di tutte le attività oggetto del disciplinare di affidamento dell'incarico e riportate in Tabella 1.1.

Tabella 1.1 Elenco delle attività

Attività	Descrizione attività
<input checked="" type="checkbox"/> att.1	acquisizione e valutazione dei dati disponibili
<input checked="" type="checkbox"/> att.2	valutazione delle scelte operative per la realizzazione del modello
<input checked="" type="checkbox"/> att.3	implementazione del modello di flusso delle acque sotterranee
<input checked="" type="checkbox"/> att.4	calibrazione del modello di flusso
<input checked="" type="checkbox"/> att.5	sviluppo di scenari esemplificativi
<input checked="" type="checkbox"/> att.6	verifica delle possibilità di aggiornamento e verifica del modello

## 2. ATTIVITÀ SVOLTE

### 2.1 ATTIVITÀ 1: ACQUISIZIONE E VALUTAZIONE DEI DATI DISPONIBILI

Sono state acquisite presso la Provincia di Modena le banche dati disponibili e tutta la documentazione di possibile impiego ai fini del presente lavoro. In tal modo il quadro informativo risultante è costituito da:

1. studi geologici ed idrogeologici relativi all'area in esame condotti a diversa scala (campo acquifero, territorio comunale, conoide, ecc.), e da diversi soggetti a diverso titolo (studi professionali, tesi di Laurea o di Dottorato);
2. documentazione tecnica prodotta dai vari Enti (Regione, Provincia, Arpa, ATO) nell'ambito delle proprie attività istituzionali (ad es. quadro conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque, attività per l'implementazione della Direttiva Quadro sulle Acque, Piani delle attività estrattive, Piano di conservazione della risorsa, ecc);
3. relazioni/report sullo stato quali-quantitativo delle acque sotterranee della Provincia di Modena, ed a livello di intera Regione Emilia-Romagna e relative banche dati;
4. bibliografia di settore.

Tutto il materiale è stato valutato al fine del suo possibile impiego per le fasi successive di implementazione del modello numerico e verrà di volta in volta richiamato a partire dalla raccolta bibliografica opportunamente realizzata e riportata al successivo paragrafo 3.

Per il presente lavoro è stato assunto come punto di partenza il modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (che nel seguito verrà indicato con *Emiro-II*) sviluppato a supporto del Piano di Tutela delle acque regionale ([7], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003c). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico, Bologna.) ed aggiornato a più riprese ([10], Arpa Emilia-

Romagna e Regione Emilia-Romagna (2007). *Elaborazione ed analisi dati raccolti sulle acque superficiali e sotterranee a livello locale per lo sviluppo dei piani di tutela delle acque. Attività B. Modello di flusso e di trasporto dei nitrati nelle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico.* e [12], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009a). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi.* Rapporto tecnico.).

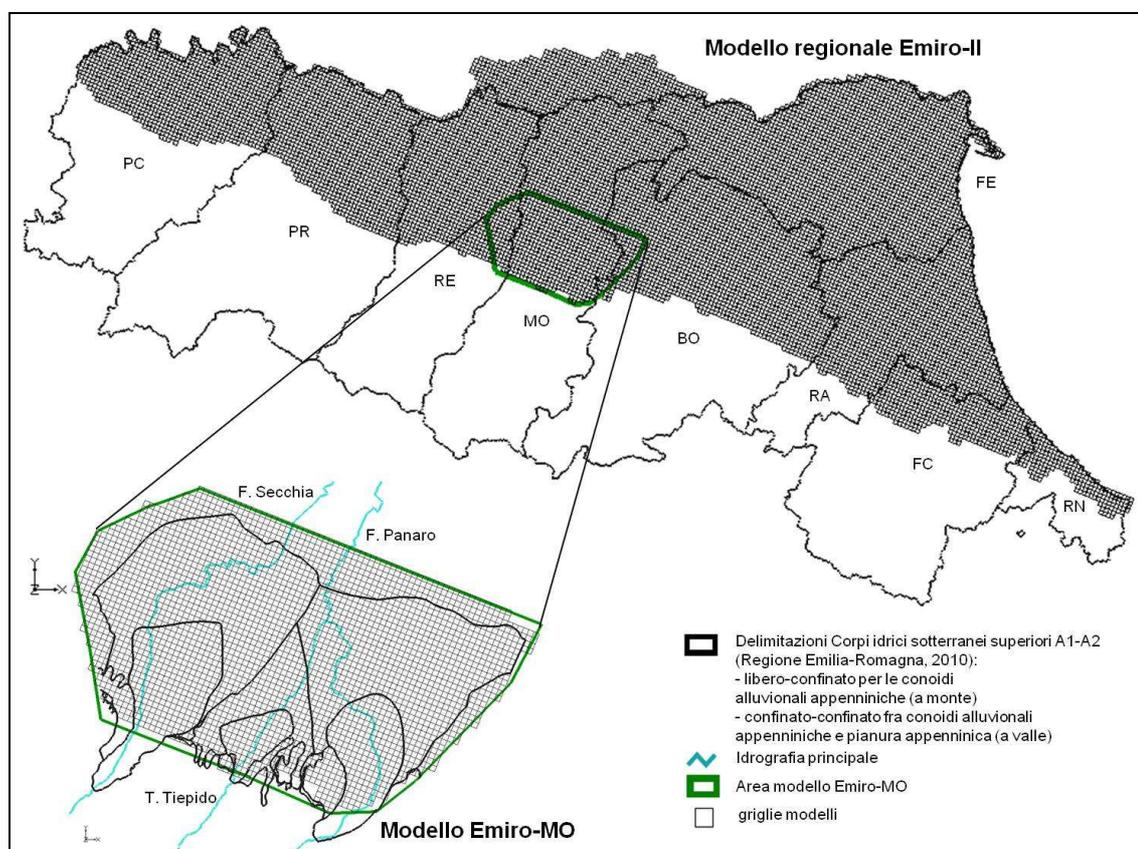
Da Emiro-II è stata operata una opportuna discesa di scala che ha permesso di approfondire e meglio dettagliare, rispetto al livello regionale di provenienza, le maggiori informazioni disponibili per la costruzione del nuovo modello (che nel seguito verrà indicato con *Emiro-MO*), realizzando così un'applicazione dedicata agli acquiferi della provincia di Modena, in corrispondenza delle conoidi del F. Secchia, del F. Panaro e del T. Tiepido.

## 2.2 ATTIVITÀ 2: VALUTAZIONE DELLE SCELTE OPERATIVE PER LA REALIZZAZIONE DEL MODELLO

Come già anticipato, è stata realizzata una discesa di scala territoriale alla Provincia di Modena dall'intero modello di flusso delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna, elaborato a supporto del Piano di Tutela delle Acque e rispetto al quale, la precedente attività di raccolta degli studi disponibili, ha permesso già di individuare gli elementi di possibile approfondimento ed integrazione (dati stratigrafici, dati piezometrici, dati di prelievo, ecc).

L'area di studio è stata assunta pari all'intera estensione delle conoidi del Secchia, del Tiepido e del Panaro operando un taglio a monte all'altezza del margine appenninico e posizionandosi a valle secondo un allineamento parallelo al precedente e posto circa 7 km a Nord della città di Modena.

Figura 2.1 Individuazione dell'area di studio



Quest'ultimo è inoltre funzionale alla definizione della condizione al contorno sulla base dei carichi idraulici misurati in una serie di pozzi situati proprio su tale allineamento (Figura 2.1). L'estensione

dell'area di studio risulta di circa 750 km<sup>2</sup>, all'interno della quale ricadono tutti i principali punti di approvvigionamento idropotabile a sostegno della città di Modena e provincia (Figura 2.21).

I principali elementi geometrici (piano campagna, superfici notevoli riconosciute dal modello, base del modello, orientamento del reticolo di discretizzazione) sono stati conservati rispetto allo schema del modello base regionale (Emiro-II), consentendo così la creazione di opportune banche dati di riferimento spaziale che mantengono il collegamento tra le caratteristiche strutturali dei due modelli. Si è invece ritenuto opportuno migliorare il dettaglio di acquisizione delle informazioni sul modello in senso orizzontale operando una diminuzione della dimensione laterale della maglia che da 1 km del modello regionale è diventata di 500 m (paragrafo 2.3.3).

Al momento non si è ritenuto opportuno infittire la scansione temporale del modello numerico Emiro-MO rispetto alla stagionalità già presente in Emiro-II, avendo però cura di allineare gli istanti terminali dei vari periodi con l'effettiva presenza delle misure disponibili (paragrafo 2.3.4). Le elaborazioni piezometriche condotte a partire dai dati disponibili dalle reti di monitoraggio presenti sul territorio (paragrafo 2.3.2) hanno permesso quindi la definizione delle condizioni al contorno ed iniziale come descritto al paragrafo 2.3.5.

Il cospicuo lavoro di allineamento delle basi dati e di integrazione e verifica dei dati disponibili sui prelievi di acque sotterranee a scopo civile-acquedottistico è descritto nel successivo paragrafo 2.3.8.1. Per la stima della ricarica, come contributo meteorico, è stato confermato l'utilizzo dei risultati del modello di bilancio idrico dei suoli della Regione Emilia-Romagna denominato Criteri e sviluppato da ARPA Servizio Idro-Meteo-Clima (paragrafo 2.3.9) mentre per la valutazione delle ricarica operata dei principali fiumi appenninici si è reso necessario uno specifico approfondimento (paragrafo 2.3.10).

## **2.3 ATTIVITÀ 3: IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE**

Il modello di flusso delle acque sotterranee è stato implementato con il codice di calcolo MODFLOW-2000 ([25], [28]) in ambiente di sviluppo GMS (Groundwater Modeling System, [3]) attraverso i passaggi che vengono descritti nei paragrafi seguenti.

### **2.3.1 Definizione e conferma del modello concettuale (circolazione idrica sotterranea)**

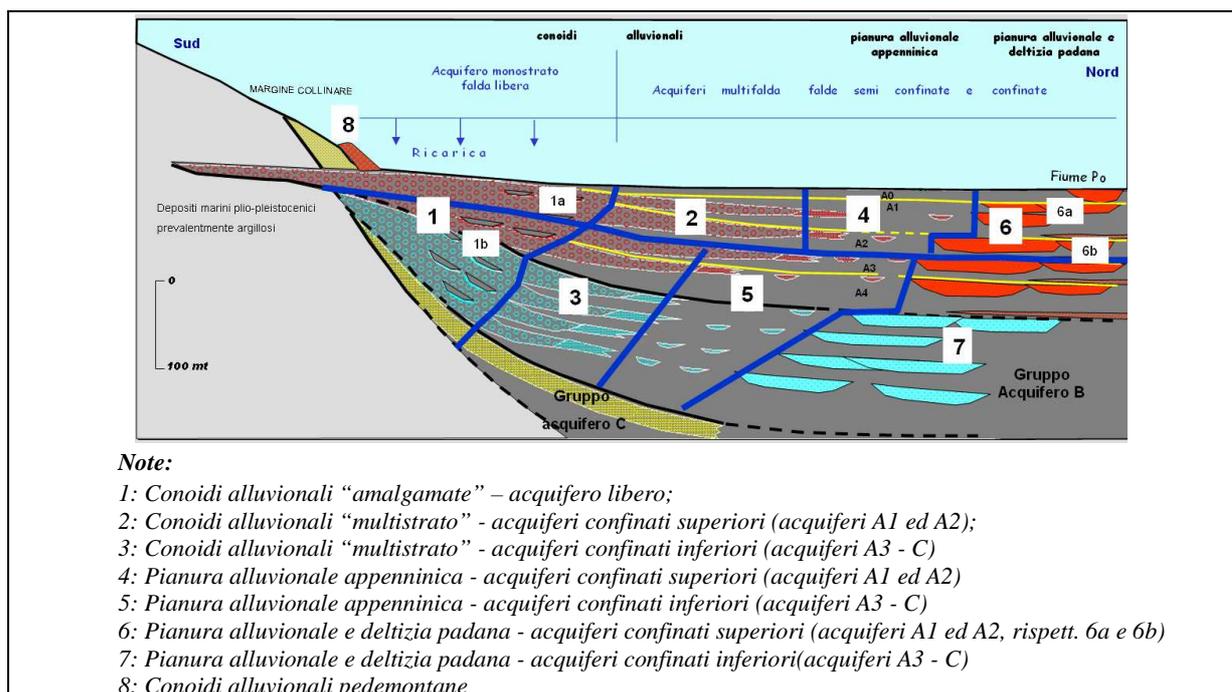
E' noto che uno schema concettuale di circolazione idrica sotterranea debba essere generalmente conosciuto a priori almeno nei suoi tratti essenziali, in modo da poter essere ricostruito, sviluppato e completato nei suoi termini quantitativi dal modello numerico. Il modello numerico deve essere quindi in grado di ricostruire la dinamica di flusso sotterraneo già nota sulla base del modello concettuale.

Il modello concettuale delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna è stato sintetizzato a livello regionale nell'ambito del quadro conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque [5]. La sintesi è stata elaborata attraverso la sovrapposizione dei seguenti elementi:

- la struttura idrostratigrafica definita dal RIS [37] (sovrapposizione in senso verticale di gruppi e complessi acquiferi);
- i complessi idrogeologici (Conoidi alluvionali appenniniche, Pianura alluvionale appenninica e Pianura alluvionale e deltizia padana) appartenenti a tre distinti sistemi deposizionali;
- l'origine ed età del fluido individuata sulla base dei dati isotopici ([4] e [19]).

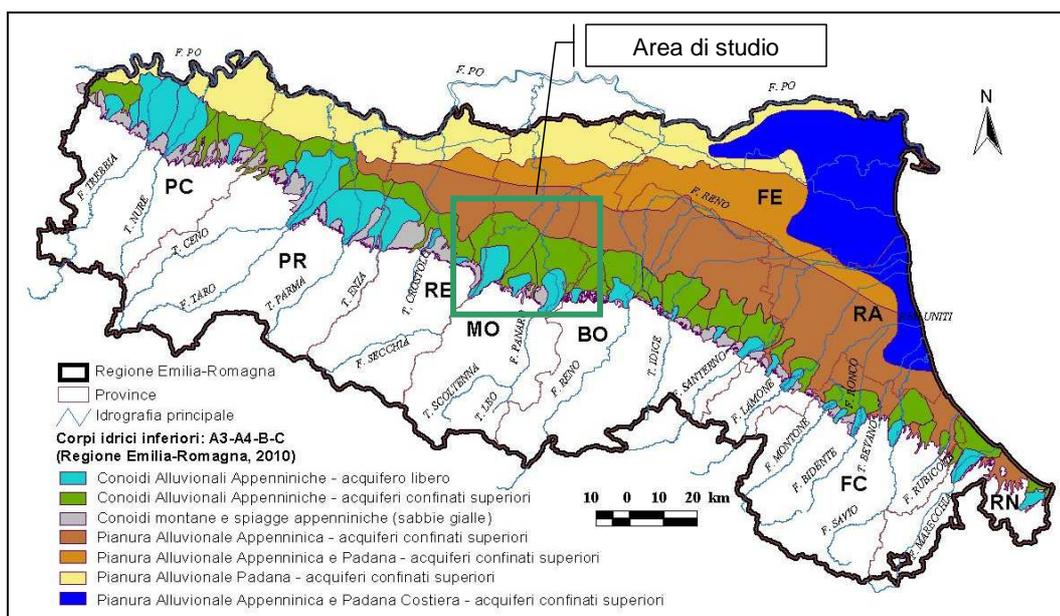
Il quadro appena descritto è stato ulteriormente sviluppato attraverso le attività legate al processo di implementazione ed adeguamento rispetto alle direttive 2000/60/CE e 2006/118/CE che ha portato alla definizione dei corpi idrici sotterranei considerando anche la terza dimensione secondo lo schema richiamato in Figura 2.2. La base del Complesso Acquifero A2 è stata individuata come limite per la separazione degli acquiferi superiori ed inferiori delle porzioni confinate delle conoidi alluvionali e dei sistemi di pianura. Tale limite è origine anche della distinzione in due differenti cartografie delle delimitazioni dei corpi idrici sotterranei così individuati, per i Complessi Acquiferi A1 ed A2 da una parte (Figura 2.3) e per i Complessi Acquiferi A3 ed A4 e Gruppi Acquiferi B e C dall'altra (Figura 2.4).

Figura 2.2: sezione geologica schematica di sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con indicazione dei corpi idrici sotterranei individuati.



In riferimento ai corpi idrici sotterranei della pianura la Figura 2.3 riporta i corpi idrici superiori (A1-A2) che coincidono con le porzioni libere delle conoidi alluvionali e con le porzioni confinate superiori delle conoidi alluvionali e dei corpi idrici di pianura alluvionale (la pianura alluvionale appenninica, la pianura alluvionale padana, la transizione tra le due pianure e il confinato costiero). Sono inoltre cartografate le conoidi montane e le sabbie gialle che insieme costituiscono 2 corpi idrici di cui il primo è costituito dalle unità cartografate nella porzione occidentale (da Piacenza a Modena) e il secondo nella porzione orientale (da Bologna a Rimini).

Figura 2.3: corpi idrici sotterranei della pianura: liberi e confinati superiori (A1 e A2).



La Figura 2.4 schematizza invece i corpi idrici inferiori della pianura (A3-C), coincidenti con le porzioni libere delle conoidi alluvionali e il confinato costiero che modificano i limiti cartografici con

la profondità, e le porzioni confinate inferiori delle conoidi alluvionali e del corpo idrico di pianura alluvionale. Sono anche in questo caso riportate le conoidi montane e le sabbie gialle. In entrambe le figure viene evidenziata l'area di studio mentre nella successiva Tabella 2.1 I sono elencati i corpi idrici sotterranei ivi presenti.

Figura 2.4: corpi idrici sotterranei della pianura: liberi e confinati inferiori (A3, A4, B e C).

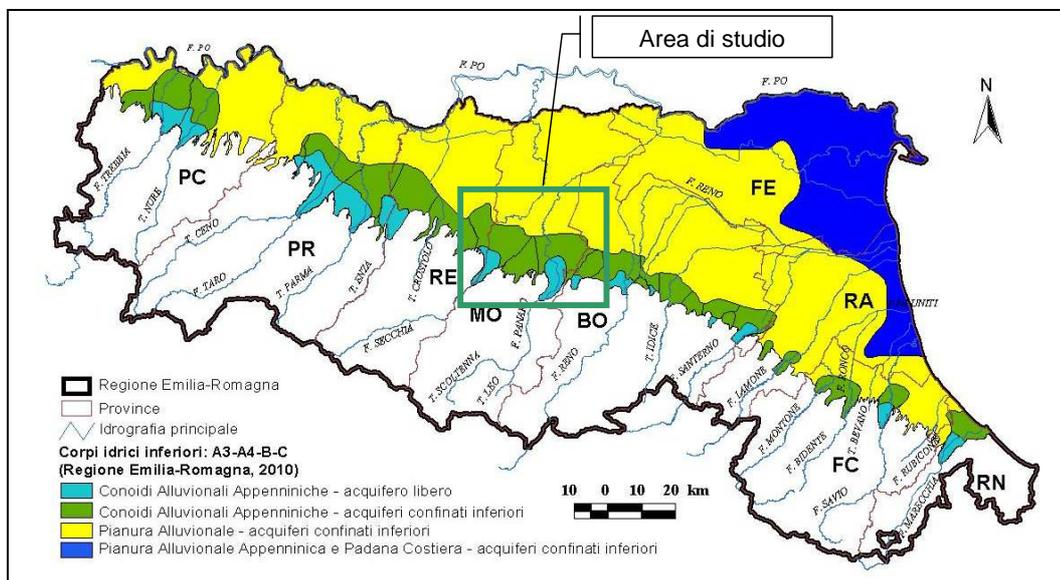


Tabella 2.1: elenco dei corpi idrici sotterranei ricadenti all'interno del territorio della provincia di Modena. I raggruppamenti dei corpi idrici sono finalizzati all'organizzazione del monitoraggio

Corpo Idrico	Codice gruppo	Nome gruppo
Freatico di pianura fluviale	1	Freatico di pianura fluviale
Conoide Tresinaro - libero	6	Crostolo-Tresinaro - libero
Conoide Secchia - libero	7	Secchia-Tiepido-Panaro - libero
Conoide Tiepido - libero		
Conoide Panaro - libero		
Conoide Samoggia - libero		
Conoide Reno-Lavino - libero	8	Samoggia-Reno_Lavino - libero
Conoide Crostolo-Tresinaro - confinato superiore	21	Crostolo-Tresinaro - superiore
Conoide Secchia - confinato superiore	22	Secchia-Tiepido-Panaro - superiore
Conoide Tiepido - confinato superiore		
Conoide Panaro - confinato superiore		
Conoide Samoggia - confinato superiore	23	Samoggia-Ghironda-Reno-Lavino - superiore
Conoide Crostolo-Tresinaro - confinato inferiore	35	Crostolo-Tresinaro - inferiore
Conoide Secchia - confinato inferiore	36	Secchia-Tiepido-Panaro - inferiore
Conoide Tiepido - confinato inferiore		
Conoide Panaro - confinato inferiore		
Conoide Samoggia - confinato inferiore	37	Samoggia-Ghironda-Reno-Lavino - inferiore
Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	45	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore
Pianura Alluvionale - confinato inferiore	49	Pianura Alluvionale - confinato inferiore
Conoidi montane e Sabbie gialle occidentali	50	Conoidi montane e Sabbie gialle occidentali

### 2.3.2 Analisi della disponibilità dei dati piezometrici

La disponibilità dei dati piezometrici è da riferirsi principalmente alla esistenza delle reti di monitoraggio regionale e provinciale la cui distribuzione dei punti di misura è riportata in Figura 2.5. Nel dettaglio:

- La Rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee è attiva dal 1976 per il rilievo del livello piezometrico con estensione dal 1988 anche alla componente qualitativa. Ha subito negli anni diverse ridefinizioni in adeguamento al mutare del quadro normativo di riferimento, l'ultima delle quali realizzata in base alla DQ 60/2000/CE e riportata in [34] (Regione Emilia-Romagna (2010a). Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 2 “Tipizzazione/caratterizzazione e individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio”). Dal 2007 la rete di monitoraggio regionale è stata integrata con strumenti di misurazione in continuo (40 centraline automatiche) del livello piezometrico ([16], Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2011a). Elaborazione dati acquisiti dalla rete automatica di monitoraggio della piezometria con restituzione e visualizzazione in continuo dei dati sul portale web. Rapporto tecnico, 27 pp). Nell'area di studio sono presenti 2 centraline sulla conoide del Fiume Secchia (codici MO81-00, MO72-01) ed 1 sul Panaro (MO64-00).
- La Rete provinciale (di II grado) è attiva dal 1977 per il rilievo piezometrico con estensione alla componente qualitativa dal 1979. Variabile nel corso degli anni è stato il numero di pozzi della rete. Si passa dai 40 del 1976 (stesso numero della rete regionale), ai 109 del 1977, ai 168 del 1988, ai 195 del 1997, per poi calare ai 125 del 2002, ai 70 del 2003, fino ai 12 del 2006. Dal 2009 la rete si sovrappone alla regionale.

L'analisi della disponibilità nel tempo dei pozzi con misure utili alla implementazione del modello numerico è riportata in Tabella 2.2 e nella Figura 2.5 e nella Figura 2.6 come distribuzione spaziale in funzione della rete di appartenenza e della disponibilità temporale delle misure rispettivamente.

Tabella 2.2: Numero di pozzi con misure disponibili per le diverse fasi di implementazione del modello.

<b>Totale per periodo</b>	<b>103</b>	<b>76</b>	<b>56</b>		
<b>POZZO-RETE</b>	<b>CALIBRAZIONE ANNO 2003</b>	<b>VERIFICA ANNI 2004-2006</b>	<b>AGGIORNAMENTO ANNI 2007-2011</b>	<b>Totale</b>	
Rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee	SI	SI	SI	46	
			NO	6	
	SI Totale			52	
	SI Totale				52
	NO	NO	SI	10	
		NO Totale		10	
NO Totale				10	
<i>Rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee Totale</i>				<i>62</i>	
Rete provinciale di monitoraggio delle acque sotterranee	SI	NO	NO	27	
		NO Totale		27	
		SI	NO	24	
		SI Totale		24	
	SI Totale				51
<i>Rete provinciale di monitoraggio delle acque sotterranee Totale</i>				<i>51</i>	
<b>Totale complessivo</b>				<b>113</b>	

Figura 2.5: distribuzione spaziale dei pozzi con misure disponibili relativamente al periodo di calibrazione e verifica del modello (2003-2006). Rete di monitoraggio di appartenenza e codifica dei pozzi.

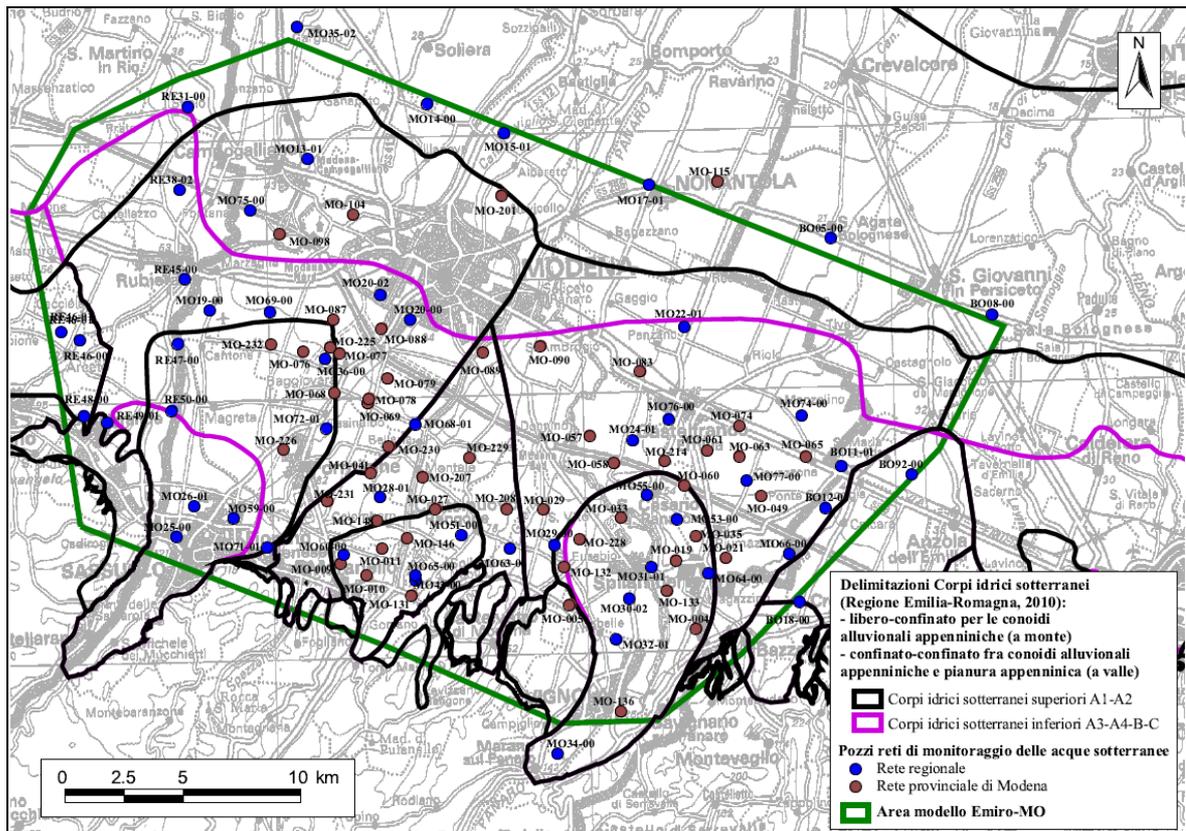


Figura 2.6: distribuzione spaziale dei pozzi con misure disponibili per le diverse fasi di implementazione del modello.

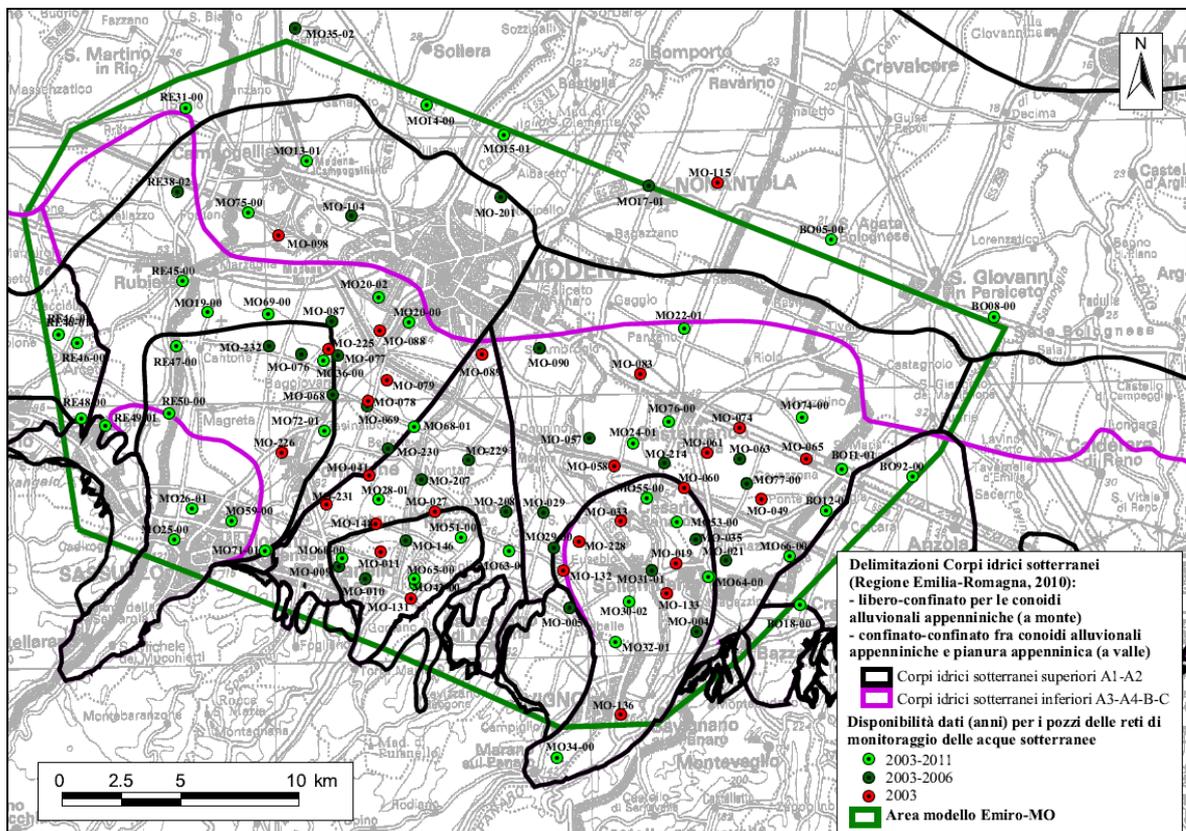


Tabella 2.3 caratteristiche costruttive dei pozzi della Rete Regionale di Monitoraggio (RRM) e della Rete della Provincia di Modena (MO) e relativi periodi con misure disponibili per la costruzione, calibrazione (CALIB) e verifica (VERIF) del modello numerico.

Rete	Codice pozzo	X UTM	Y UTM	Prof. (m)	p.c. (m s.l.m.)	Filtri		Complesso/Gruppo Acquifero	Corpo idrico (Regione Emilia-Romagna, 2010)	CALIB-2003	VERIF-04-06	AGGIOR. 07-11
						da (m)	a (m)					
RRM	BO05-00	669219	947283	177.0	22.2	168.0	172.0	A3	Pianura Alluvionale - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	BO06-00	674216	946898	615.0	17.9	73.5	615.2	A2,A3,A4,B,C	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	NO	NO	SI
RRM	BO08-00	676094	943989	106.0	25.3	103.0	106.0	A3	Pianura Alluvionale - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	BO11-01	669692	937518	175.9	44.0	84.0	171.4	A2,A3,A4	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	BO12-00	669039	935743	54.0	48.0			A	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	BO18-00	667927	931714	99.0	68.5	52.0	97.0	C	Conoide Samoggia - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	BO92-00	672665	937171	150.0	35.7	88.5	147.0	A,B	Conoide Samoggia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO13-01	647050	950640	110.0	36.5			A1,A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO14-00	652118	953006	121.0	25.9	116.0	121.0	A2	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO15-01	655382	951739	120.0	29.3			A1,A2	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO17-01	661528	949552	300.0	24.3			A	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	SI	SI	NO
RRM	MO19-00	642864	944166	68.0	56.9	17.0	68.0	A1,A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO20-00	651391	943770	82.0	37.2	64.0	75.5	A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO20-02	650128	944829	71.0	36.0	61.0	71.0	A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO22-01	663015	943476	62.0	33.3			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO24-01	660849	938611	45.0	44.9			A0,A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO25-00	641467	934486	61.0	109.9	37.5	59.5	B	Conoide Secchia - libero	SI	SI	SI
RRM	MO26-01	642240	935810	70.0	103.1			A	Conoide Secchia - libero	SI	SI	SI
RRM	MO28-01	650107	936197	70.0	84.0	35.0	59.5	A2,A3	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO29-00	657521	934145	97.5	63.8	16.5	97.5	amalgama A	Conoide Panaro - libero	SI	SI	NO
RRM	MO29-01	657936	933172	110.0	70.8	0.0	42.0	amalgama A	Conoide Panaro - libero	NO	NO	SI
RRM	MO30-00	660617	932961	118.0	73.0	23.0	100.0	amalgama A2,A3,A4	Conoide Panaro - libero	NO	NO	SI
RRM	MO30-02	660699	931852	90.0	79.5			amalgama A	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI
RRM	MO31-01	661634	933187	60.0	69.0			amalgama A1,A2	Conoide Panaro - libero	SI	SI	NO
RRM	MO31-02	663529	934507	57.0	58.2			amalgama A1,A2	Conoide Panaro - libero	NO	NO	SI
RRM	MO32-01	660132	930123	54.0	95.0			amalgama A,B,C	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI

Rete	Codice pozzo	X UTM	Y UTM	Prof. (m)	p.c. (m s.l.m.)	Filtri		Complesso/Gruppo Acquifero	Corpo idrico (Regione Emilia-Romagna, 2010)	CALIB-2003	VERIF-04-06	AGGIOR. 07-11
						da (m)	a (m)					
RRM	MO34-00	657638	925213	8.5	128.7	0.0	8.5	A0	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI
RRM	MO35-02	646582	956286	130.0	31.0			A1,A2,A3	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	SI	SI	NO
RRM	MO35-03	646596	956290	105.0	31.0	100.0	105.0	A2	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	NO	NO	SI
RRM	MO36-00	647780	942110	51.0	52.7	42.0	51.0	A1,A2	Conoide Secchia - libero	SI	SI	SI
RRM	MO42-00	651634	932616	90.0	115.2			A1,A2,B,C	Conoide Tiepido - libero	SI	SI	SI
RRM	MO51-00	653576	934561	120.0	82.0	67.0	120.0	B,C	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	MO53-00	662712	935249	40.0	58.0			amalgama A1	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI
RRM	MO55-00	661443	936275	110.0	54.0			amalgama A	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI
RRM	MO56-02	660564	941686	100.0	38.0				Pianura Alluvionale Padana - confinato superiore	NO	NO	SI
RRM	MO59-00	643890	935290	93.0	105.5	34.5	69.0	A2,A3,A4	Conoide Secchia - libero	SI	SI	SI
RRM	MO60-00	648573	933716	95.0	117.2			A	Conoide Tiepido - libero	SI	SI	SI
RRM	MO62-00	662740	931355	108.0	81.7			amalgama A	Conoide Panaro - libero	NO	NO	SI
RRM	MO63-00	655620	934000	156.0	72.0			A,B,C	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO64-00	664061	932914	73.0	65.0			amalgama A1,A2,A3	Conoide Panaro - libero	SI	SI	SI
RRM	MO65-00	651621	932837	100.0	113.6	67.5	73.5	C	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	MO66-00	667464	933785	120.0	59.2			A	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO68-01	651610	939291	40.0	53.3			A1	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO69-00	645450	944102	43.5	47.3			A0,A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO71-01	645325	934036	116.5	116.4			A,B	Conoide Secchia - libero	SI	SI	SI
RRM	MO72-01	647830	939129	104.0	65.0	93.0	104.0	A3	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	MO74-00	668000	939675	52.0	36.0	42.0	48.0	A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO75-00	644593	948448	60.0	46.0	37.0	56.0	A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO76-00	662375	939518	123.0	68.0	75.0	121.0	A2,A3	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	MO77-00	665665	936900	66.0	46.6			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
RRM	MO77-01	666283	936239	30.0	43.0			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	NO	NO	SI
RRM	MO-F01-00	658925	947730	12.0	28.2				Freatico di pianura	NO	NO	SI
RRM	MO-F02-00	651069	949084	3.8	36.2				Freatico di pianura	NO	NO	SI
RRM	RE31-00	641973	952868	165.0	38.3	152.5	157.5	A4	Pianura Alluvionale - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	RE38-02	641612	949322	106.0	45.4	100.0	105.0	A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	NO

Rete	Codice pozzo	X UTM	Y UTM	Prof. (m)	p.c. (m s.l.m.)	Filtri		Complesso/Gruppo Acquifero	Corpo idrico (Regione Emilia-Romagna, 2010)	CALIB-2003	VERIF-04-06	AGGIOR. 07-11
						da (m)	a (m)					
RRM	RE45-00	641834	945512	305.0	53.4	242.0	293.5	B	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	RE46-00	637367	942885	48.0	67.7	0.0	48.0	A1,A2	Conoide Crostolo-Tresinaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	RE46-01	636587	943232	64.0	70.9			A1,A2	Conoide Crostolo-Tresinaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	RE47-00	641544	942731	258.0	62.3	213.5	247.6	C	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	SI
RRM	RE48-00	637549	939646	30.0	94.1			amalgama A1,A2	Conoide Crostolo-Tresinaro - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	RE49-01	638544	939359	80.0	88.9			amalgama A	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	SI
RRM	RE50-00	641265	939878	158.0	79.9	55.0	156.0	A3,A4,B	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	SI
MO	MO-004	663535	930571	85.0	77.8			C	Conoide Panaro - libero	SI	SI	NO
MO	MO-005	658153	931590	65.0	87.5			A1	Conoidi montane e Sabbie gialle	SI	SI	NO
MO	MO-009	648428	933355	70.0	143.3			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-010	649538	932830	43.0	124.8			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-011	650188	933985	27.0	106.0			A2	Conoide Tiepido - libero	SI	NO	NO
MO	MO-019	662678	933480	60.0	67.0			A2	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-021	664785	933600	76.0	63.0			A2	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-027	652478	935690	73.0	77.5			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-029	657058	935665	36.0	56.0			A2	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-033	660353	935310	40.0	55.9			A2	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-035	663528	934510	57.0	58.2			A2	Conoide Panaro - libero	SI	SI	NO
MO	MO-041	649703	937230	142.0	74.4			B	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-049	666281	936233	30.0	48.9			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-057	659023	938820	37.0	45.5			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-058	660051	937638	22.0	48.3			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-060	663008	936705	56.0	49.2			A1	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-061	663998	938185	24.0	45.1			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-063	665373	937925	27.0	42.3			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-065	668173	937930	60.0	42.4			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-068	648163	940655	50.0	56.0			A1	Conoide Secchia - libero	SI	SI	NO
MO	MO-069	649603	940200	130.0	52.0			A3-A4	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-074	665368	939240	44.0	39.8			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO

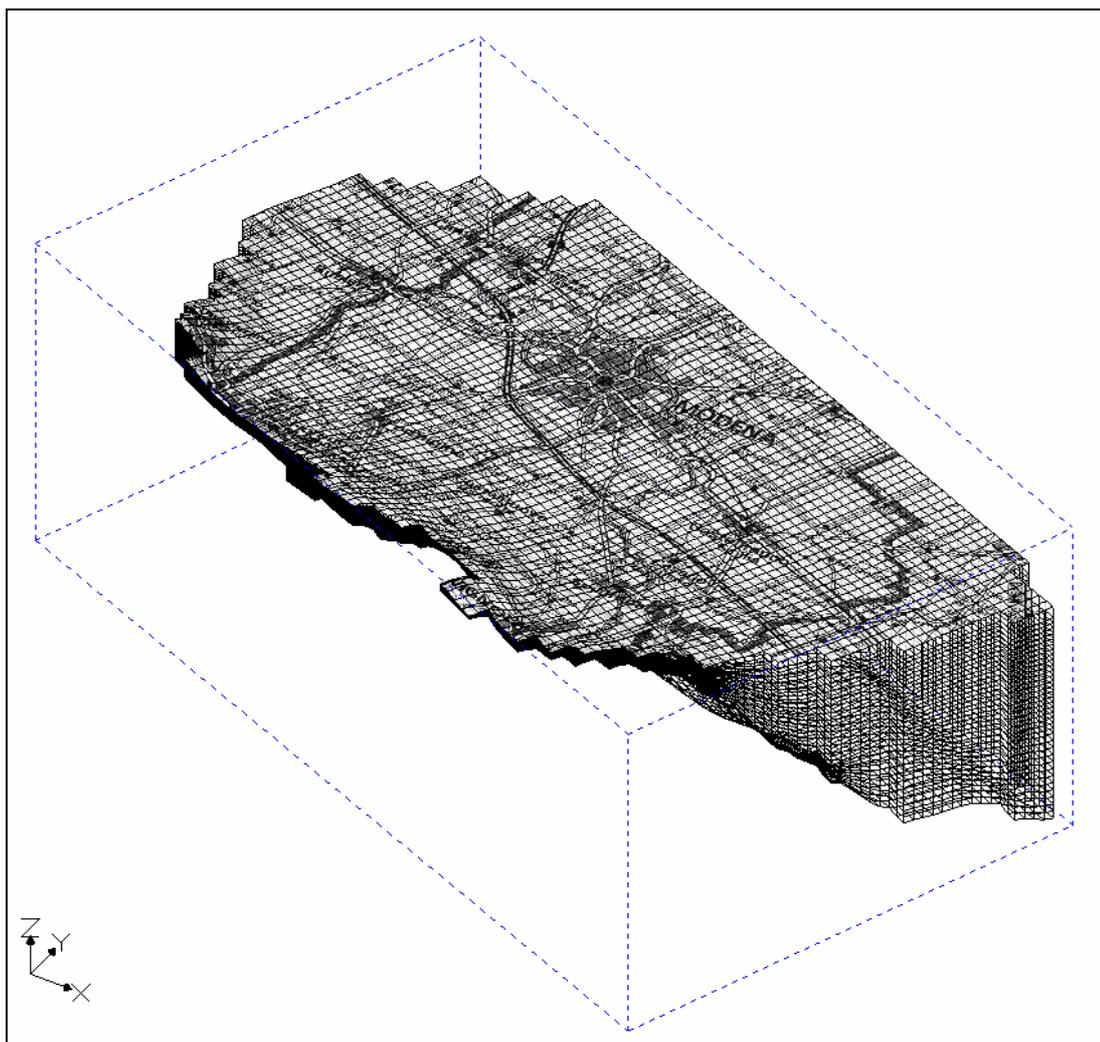
Rete	Codice pozzo	X UTM	Y UTM	Prof. (m)	p.c. (m s.l.m.)	Filtri		Complesso/Gruppo Acquifero	Corpo idrico (Regione Emilia-Romagna, 2010)	CALIB-2003	VERIF-04-06	AGGIOR. 07-11
						da (m)	a (m)					
MO	MO-076	646843	942415	47.5	50.4			A1	Conoide Secchia - libero	SI	SI	NO
MO	MO-077	648383	942350	45.0	50.5			A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-078	649643	940405	35.0	46.5			A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-079	650443	941270	59.0	47.4			A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-083	661153	941560	100.0	37.0			A2	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-087	648133	943785	35.0	48.0			A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-088	650173	943405	35.0	42.8			A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-089	654481	942397	23.3	36.5			A1	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-090	656918	942650	28.0	36.0			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-098	645863	947430	30.0	43.7			A1	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-104	648958	948280	100.0	39.2			A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-115	664428	949705	90.0	24.0			A1	Pianura Alluvionale Appenninica - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-131	651453	931980	63.0	122.5			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-132	657923	933180	100.0	70.8			A3-A4	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-133	662298	932200	55.0	73.9			A2	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-136	660353	927040	10.0	105.7			A2	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-146	651261	934427	70.0	95.8			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-148	649983	935178	40.0	92.4			A2	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	NO	NO
MO	MO-201	655278	949080	110.0	31.0			A2	Conoide Secchia - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-207	651928	937055	103.0	65.0			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-208	655505	935688	30.0	56.8			A2	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-214	662188	937735	32.0	46.5			A1	Conoide Panaro - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-225	647989	942581	180.0	28.5			B	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-226	646028	938208	108.0	78.8			B	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-228	658593	934394	70.0	59.0			A3-A4	Conoide Panaro - libero	SI	NO	NO
MO	MO-229	653918	937873	50.0	55.8			A1	Conoide Tiepido - confinato superiore	SI	SI	NO
MO	MO-230	650494	938359	120.0	61.5			A3-A4	Conoide Secchia - confinato inferiore	SI	SI	NO
MO	MO-231	647883	935999	58.0	90.0			A3-A4	Conoide Tiepido - confinato inferiore	SI	NO	NO
MO	MO-232	645474	942722	79.5	52.0			A2	Conoide Secchia - libero	SI	SI	NO

Dall'analisi è derivata la scelta del periodo nel quale collocare la condizione iniziale e come suddividere in stress periods l'arco temporale oggetto della modellazione. Ciò a favore della costruzione delle condizioni di carico idraulico eventualmente imposte al contorno (si veda il successivo paragrafo 2.3.5 e la Tabella 2.4). I dati delle reti di monitoraggio servono inoltre per la calibrazione del modello in quanto il modello deve restituire tali valori in corrispondenza dei punti di misura (x, y, z). Dei pozzi con misure disponibili occorre quindi la conoscenza sia della posizione in planimetria sia del filtraggio dei pozzi. In Tabella 2.3 è riportato l'elenco completo di tutti i pozzi con misure disponibili utilizzati per l'implementazione del modello e le relative caratteristiche costruttive che hanno permesso la corretta attribuzione sia al complesso o gruppo acquifero captato secondo lo schema idrostratigrafico di riferimento [37], sia al corpo idrico sotterraneo di appartenenza secondo la nuova definizione proposta in [34].

### 2.3.3 Scelta della discretizzazione spaziale del modello

La discretizzazione orizzontale dell'area di studio è stata effettuata con celle quadrate di lato 500 m, quindi con un dettaglio maggiore rispetto alla maglia chilometrica del modello regionale Emiro-II. Lo spessore delle celle è invece variabile in funzione dello spessore totale del sistema modellato che viene suddiviso in 35 layer lungo la verticale (23 layer per il Gruppo Acquifero A e 12 layer per il Gruppo Acquifero B). Il numero di celle attive nel modello è pari a 101.516. Nella Figura 2.7 viene riportata la visualizzazione tridimensionale dell'intero sistema.

Figura 2.7: discretizzazione spaziale del modello con orientazione OSO-ENE Vista 3-D



Nelle figure che seguono vengono invece riportati alcuni tagli orizzontali (Figura 2.8 e Figura 2.9) e verticali (Figura 2.10, Figura 2.11, e Figura 2.12) operati sulla discretizzazione tridimensionale del modello.

Figura 2.8: discretizzazione orizzontale del modello (layer 1-23), maglia di lato 500 m. Col tratteggio sono indicate le tracce delle sezioni verticali riportate come esempio nelle figure successive.

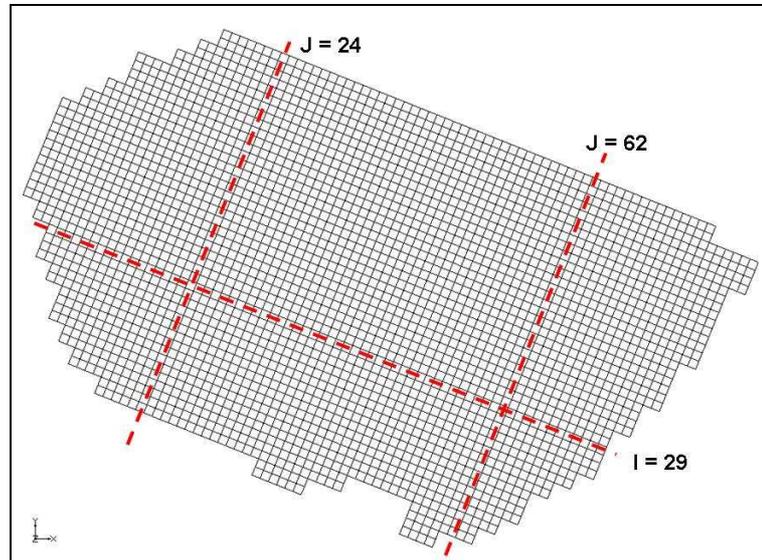


Figura 2.9 discretizzazione orizzontale del modello (layer 24-35), maglia di lato 500 m.

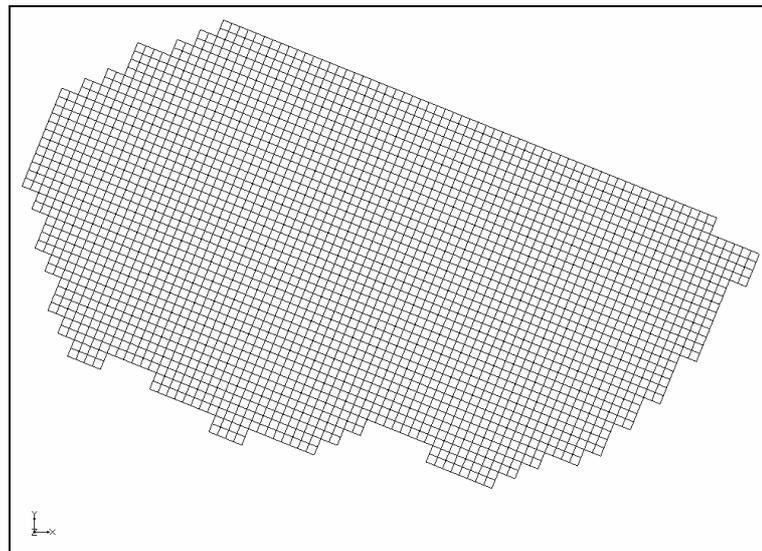


Figura 2.10: discretizzazione verticale del modello, esempio di una sezione verticale (I=29), orientata in senso NO-SE.

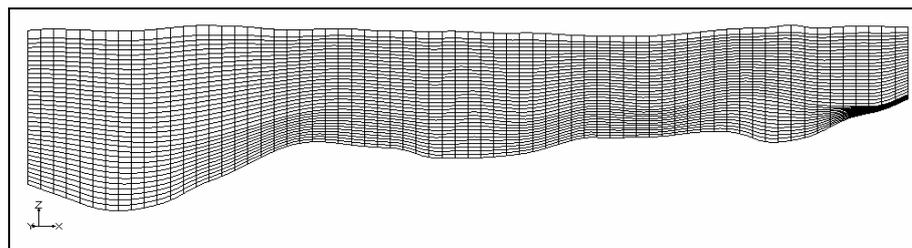


Figura 2.11: discretizzazione verticale del modello, esempio di una sezione verticale (J=24), orientata in senso SO-NE, appartenente alla conoide del Fiume Secchia.

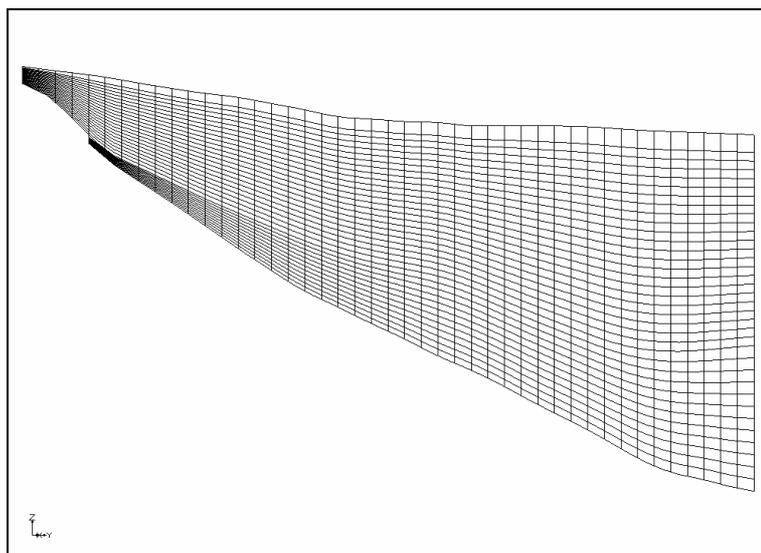
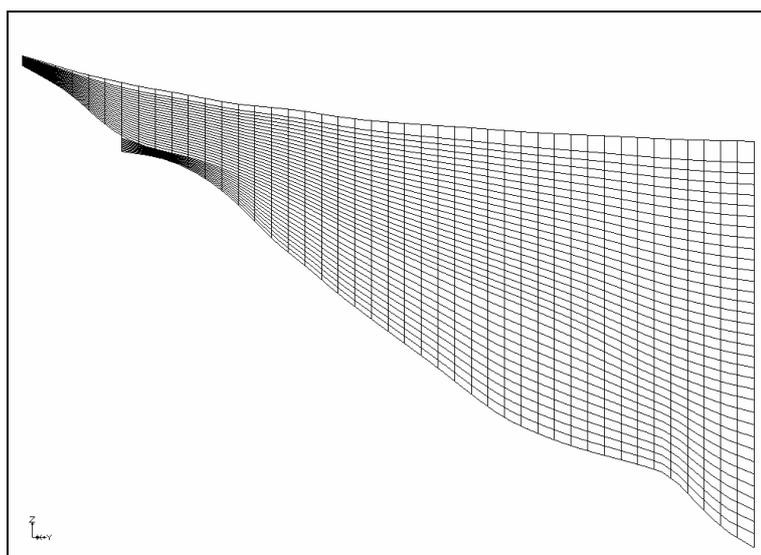


Figura 2.12: discretizzazione verticale del modello, esempio di una sezione verticale (J=62), orientata in senso SO-NE, appartenente alla conoide del Fiume Panaro.



#### 2.3.4 Scelta della discretizzazione temporale del modello

La discretizzazione temporale del modello corrisponde alla definizione dei periodi all'interno dei quali sono da considerarsi costanti le variabili esterne costituenti le sollecitazioni imposte al sistema (ricariche, prelievi, condizioni al contorno). È stata definita sulla base dell'analisi della disponibilità di dati piezometrici (si veda il precedente paragrafo 2.3.2) e sulla base della disponibilità dei dati sui prelievi (paragrafo 2.3.8). È stato quindi individuato il periodo di tempo all'interno del quale effettuare la calibrazione del modello (2003, 132 pozzi disponibili) ed il successivo periodo per la verifica dello stesso (2004-2006, 97 pozzi disponibili). Gli intervalli di tempo costituenti gli stress period del modello sono su base trimestrale; l'arco temporale di copertura del modello è riferibile al periodo compreso tra inizio febbraio 2003 e fine ottobre 2006 (Tabella 2.4).

### 2.3.5 Le condizioni iniziali ed al contorno del modello di flusso (analisi del carico idraulico)

L'assegnazione delle condizioni piezometriche di riferimento iniziali rappresenta un elemento basilare per l'implementazione del modello di simulazione matematica del flusso in un acquifero. La ricostruzione della superficie piezometrica di riferimento iniziale è stata eseguita (con alcuni adattamenti manuali), spazializzando i dati piezometrici relativi a 128 pozzi dalle reti di monitoraggio, relativi al trimestre marzo-aprile-maggio del 2003. Rispetto al numero di pozzi indicato in Tabella 2.2 il numero dei pozzi utilizzato è superiore in quanto comprensivo di alcuni punti posti al di fuori dell'area di studio e funzionale ad una migliore descrizione delle condizioni al contorno.

Tale regionalizzazione è stata eseguita con uno dei metodi più diffusi in geostatistica, il kriging ordinario, che si basa sulla condizione di stazionarietà della funzione variogramma (e quindi delle realizzazioni che essa rappresenta). Attraverso lo studio e l'applicazione di tale funzione è stato possibile stimare la variabile di interesse in tutti i punti dello spazio nell'ambito del dominio di calcolo del modello, con buona approssimazione secondo il piano geografico x y (frequenza del dato adeguata) e maggiori gradi di approssimazione lungo l'asse z (densità dei dati disponibili sensibilmente più limitata). La Figura 2.13 mostra la condizione iniziale implementata nel modello.

Le elaborazioni effettuate mostrano che le falde sia superficiali che profonde presentano un verso di propagazione principale monte-valle, da SO verso NE (dagli apici delle conoidi del Panaro, Tiepido e Secchia verso il complessi acquiferi di pianura). Le misure piezometriche più alte (113 m s.l.m.) si riscontrano presso la zona apicale della conoide del Tiepido a sud di Maranello (alto strutturale e piezometrico), mentre il "basso" piezometrico si incontra in corrispondenza di Nonantola (14 m s.l.m.) nel margine più a valle dell'area di studio. L'andamento abbastanza regolare delle isolinee viene perturbato in un'ampia zona situata tra i campi pozzi di Cognento e nella periferia Ovest di Modena; la causa è imputabile al consistente prelievo idrico nei campi pozzi ad uso civile della zona.

Tabella 2.4: definizione della discretizzazione temporale del modello

Stress period	Data iniziale	Data finale	Numero di giorni	Numero di secondi	
1	01/02/03	30/04/03	89	7689600	fase di calibrazione del modello
2	01/05/03	31/07/03	92	7948800	
3	01/08/03	31/10/03	92	7948800	
4	01/11/03	31/01/04	92	7948800	
5	01/02/04	30/04/04	90	7776000	fase di verifica del modello
6	01/05/04	31/07/04	92	7948800	
7	01/08/04	31/10/04	92	7948800	
8	01/11/04	31/01/05	92	7948800	
9	01/02/05	30/04/05	89	7689600	
10	01/05/05	31/07/05	92	7948800	
11	01/08/05	31/10/05	92	7948800	
12	01/11/05	31/01/06	92	7948800	
13	01/02/06	30/04/06	89	7689600	
14	01/05/06	31/07/06	92	7948800	
15	01/08/06	31/10/06	92	7948800	

Le condizioni al contorno attribuite al modello sono di tipo misto e simulano la presenza di un serbatoio d'acqua infinito ad una distanza prefissata dai confini del modello. Lo scambio d'acqua tra questo serbatoio e il modello, viene regolato mediante due parametri:

- il carico idraulico sul contorno del modello (head, m);

- il valore di permeabilità di un condotto ipotetico fra serbatoio e modello (conductance,  $m^2/s$ ) di solito parametrizzato con lo stesso ordine di grandezza della conducibilità idraulica della cella considerata.

Alle celle di calcolo situate ai bordi del modello sono state associate condizioni di pressione imposta (head, m) dipendenti dal tempo, e quindi calcolate per tutti e 15 gli istanti temporali del modello stesso. In Figura 2.14 sono evidenziate le celle del modello alle quali è stato associato un potenziale imposto:

- margine a monte sud-ovest indicativo degli sbocchi vallivi del fiume Panaro, Tiepido e Secchia (in rosso);
- margine laterale nord-ovest, indicativo del contatto interconoide fra la conoide del Secchia e la conoide del Crostolo (in verde);
- margine laterale sud-est, indicativo del contatto fra la conoide del Panaro e la conoide del Samoggia (in azzurro);
- margine a valle nord est, indicativo del passaggio fra acquiferi di conoide e acquiferi di pianura alluvionale appenninica (in giallo).

Figura 2.13: condizione iniziale del sistema. Vista 3D e dettaglio per il layer 1 del modello.

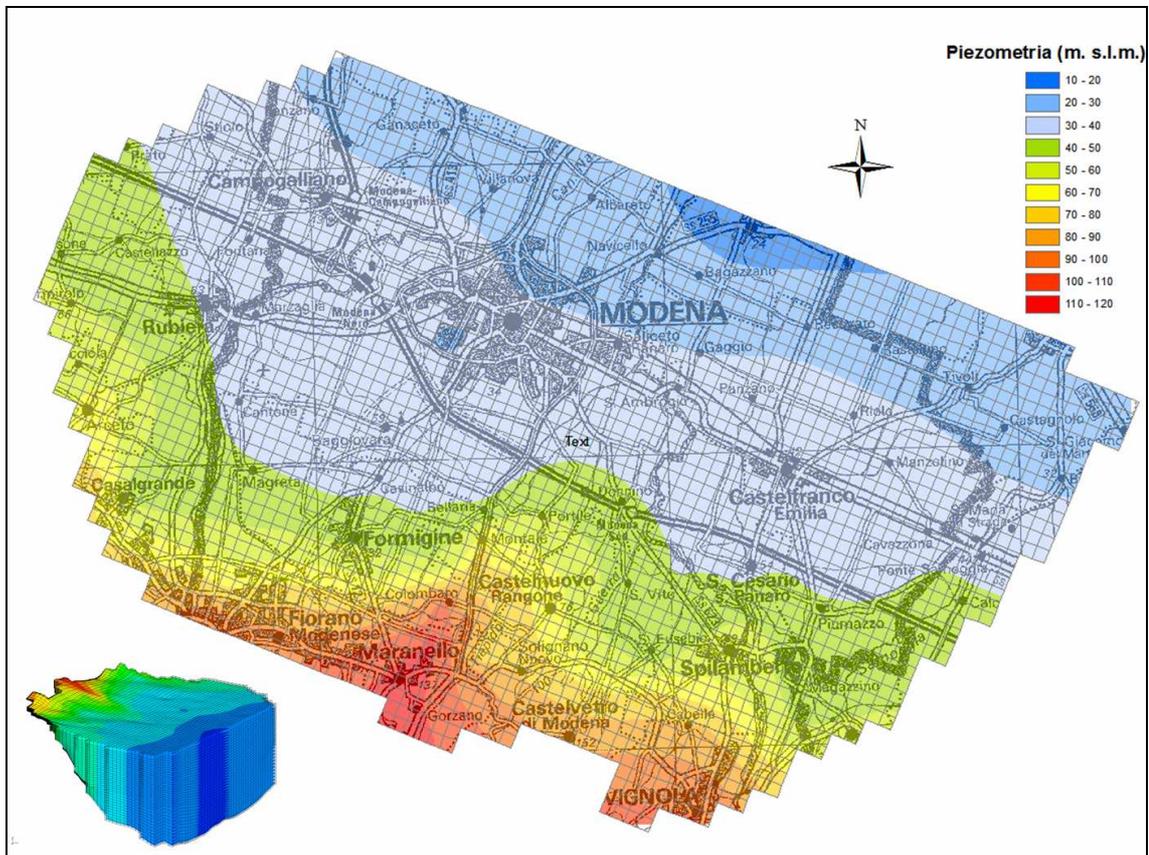
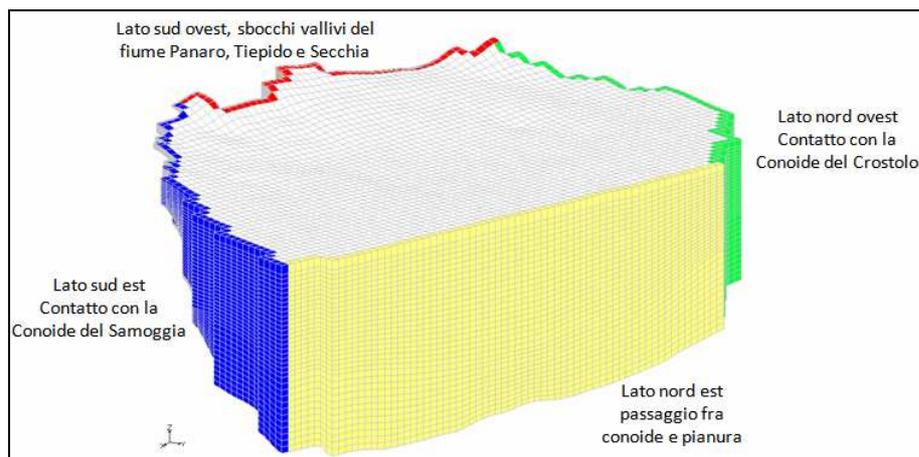


Figura 2.14: Condizione al contorno del sistema.



### 2.3.6 La geometria e la struttura del sistema

La geometria del sistema ha previsto l'acquisizione degli elementi già presenti all'interno del modello regionale Emiro-II ed in particolare la superficie topografica e la suddivisione in verticale tenendo conto degli andamenti delle basi dei principali Gruppi Acquiferi (A, B) definiti in RIS [37]. In particolare le basi dei Gruppi Acquiferi A e B sono state poste in coincidenza delle basi dei layer 23 e 35 del modello numerico.

La struttura del sistema è data dalla distribuzione delle litologie prevalenti sulle celle del modello, ed è stata ottenuta in primo luogo attraverso l'associazione di ciascuna cella di Emiro-MO alla relativa cella appartenente al modello regionale (Emiro-II).

Successivamente è stato fatto un lavoro di verifica e correzione delle litologie sulla base delle fonti informative censite dalla precedente attività 1 e riportate nella Figura 2.15 come quadro d'insieme. Esse corrispondono a:

- Banca dati geognostica del SGSS, le cui informazioni derivano per lo più dalla perforazione di pozzi per acqua, ma anche da sondaggi geognostici di diverso tipo, quali carotaggi continui, trivellazioni e penetrometrie;
- Stratigrafie e sezioni idrostratigrafiche (interpretate).

Sono state analizzate le seguenti sezioni idrostratigrafiche longitudinali e trasversali rispetto al margine appenninico (Figura 2.15):

1. Progetto sul Distretto Ceramico del 2009. ([13], ARPA Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009b). Sito nazionale *Sassuolo-Scandiano. Progetto di fattibilità per la bonifica dell'acquifero superficiale dell'area del Distretto ceramico di Modena e Reggio Emilia. Relazione preliminare.*): le 13 sezioni disponibili (8 trasversali e 5 longitudinali), le quali ricadono prevalentemente nel territorio delle conoidi del Secchia e del Tiepido, sono state tutte implementate nel modello Emiro-MO;
2. Progetto CARG del 2009 ([38], Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Progetto CARG - Carta Geologica d'Italia, scala 1:50.000. Foglio 201: Modena. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/geologia/progetto-carg-carta-geologica-ditalia-scala-1-50.000>): delle 12 sezioni disponibili nell'area di studio, sono state effettivamente implementate nel modello Emiro-MO le 3 trasversali (12, 66 e 13) ricadenti nella conoide del Panaro, in quanto quelle ricadenti nella conoide del Secchia sono praticamente coincidenti con le sezioni del Progetto sul Distretto Ceramico, che ne costituiscono un ulteriore aggiornamento/interpretazione;
3. RIS ([37], Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna.* A cura di G. Di Dio, Selca, Firenze.): le 4 sezioni disponibili (2 trasversali: 31-32 e 2 longitudinali: 26-27) ubicate nell'area di studio e ad Ovest e a Sud di essa erano già state implementate nel modello regionale Emiro-II e quindi non sono state inserite nuovamente in questa fase;

4. Tesi di laurea Università di Milano del 2005; ([27], Gangemi M.R. (2005). *Studio idrogeologico dell'alta-media pianura modenese Settore Fiume Panaro*. Tesi di laurea Università degli Studi di Milano - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali - Corso di laurea in Scienze Geologiche - Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio". e [1], Russo A. (2005). *Studio idrogeologico dell'alta-media pianura modenese Settore Fiume Secchia*. Tesi di laurea Università degli Studi di Milano - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali - Corso di laurea in Scienze Geologiche - Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio"): delle 17 sezioni disponibili (8 trasversali: da 1 a 8 e 9 longitudinali: da A ad I), ubicate su tutto il territorio dell'area di studio, eccetto che nella porzione più orientale della conoide del Panaro, sono state implementate nel modello Emiro-MO le 7 sezioni (3 trasversali: 6-7-8 e 4 longitudinali: A-B-C-D) ubicate nelle porzioni centro-occidentali della conoide del Panaro, ovvero nelle zone con minore disponibilità delle sezioni geologiche di rilievo di cui ai punti sopra;
5. Studio AMCM 1996, ([2], AMCM Azienda Municipalizzata Comune di Modena (1996). *Protezione statica e dinamica nelle aree interessate dalle captazioni di acque sotterranee dell'A.M.C.M. di Modena mediante l'applicazione di un modello numerico.*); 7 sezioni disponibili (4 trasversali: 1-2-3-4 e 3 longitudinali: A-B-C) descrivono il sottosuolo delle conoidi del Secchia e della parte occidentale del Panaro, ed altre 7 sezioni, ad orientazione variabile, dettagliano localmente i singoli campi pozzi. Non sono state implementate nel modello Emiro-MO, in quanto meno recenti delle altre di cui ai punti sopra e di minore dettaglio (distinzione solo fra acquiferi e acquitardi) e realizzate con il vecchio approccio tradizionale in cui si distingueva solo un sistema acquifero superficiale (o I° Acquifero) di tipo libero da un sistema profondo multistrato (o II° Acquifero) di tipo semi-confinato e confinato.

La Tabella 2.5 riporta quindi l'elenco delle sezioni che, tra quelle rappresentate nel quadro di insieme di Figura 2.15, sono state utilizzate per le verifiche di dettaglio della struttura del modello Emiro-MO. Per queste sezioni è stato effettuato un cospicuo lavoro di digitalizzazione ed elaborazione numerica che ha permesso di trasformare le sezioni idrostratigrafiche cartacee in batterie di "stratigrafie equivalenti" (Borehole) da inserire nell'ambiente tridimensionale del modello numerico. In particolare per le sezioni di Tabella 2.5 sono stati condotti i seguenti passaggi esemplificati nella Figura 2.16 e nella successiva Figura 2.17:

- scansione
- digitalizzazione in ambiente GIS;
- trasformazione in log stratigrafici virtuali a spaziatura costante pari a 300 m. Tali log stratigrafici sono stati georeferenziati nelle 3 dimensioni, ovvero sono state attribuite la longitudine e la latitudine e, sulle verticali di ognuno di essi, anche le quote s.l.m. del tetto e della base di ciascun strato;
- inserimento di tali log nell'interfaccia GMS e sovrapposizione alla griglia 3D del modello.

Il passaggio successivo è consistito nell'attribuzione delle litologie: prima alle celle del modello ricadenti in corrispondenza dei borehole e poi a tutte le altre celle del modello, correlando laddove possibile i dati derivanti dai borehole nelle tre dimensioni spaziali.

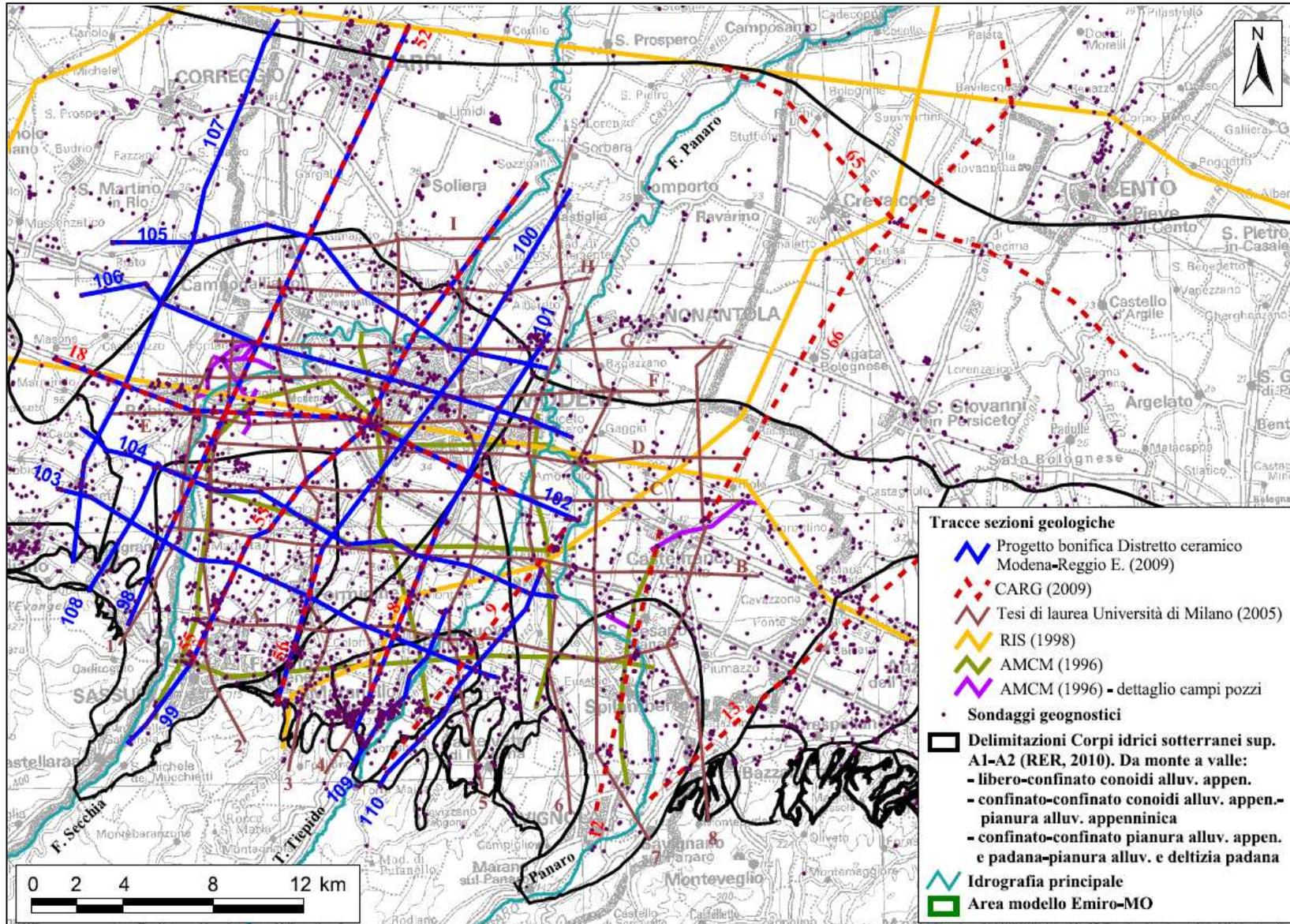


Figura 2.15: quadro d'insieme delle sezioni idrostratigrafiche disponibili. Quelle utilizzate per l'implementazione delle litologie del modello di flusso Emiro-MO sono riportate in Tabella 2.5.

Tabella 2.5: elenco delle sezioni idrostratigrafiche profonde utilizzate.

<b>Codice identificativo sezione</b>	<b>Orientazione rispetto al margine appenninico</b>	<b>Fonte</b>	<b>spessore max (m)</b>	<b>fattore di esagerazione verticale</b>	<b>lungh. (m)</b>
107	trasversale	(1)	240	25	25.683
108	trasversale	(1)	150	25	6.476
98	trasversale	(1)	230	25	28.980
99	trasversale	(1)	250	25	30.610
100	trasversale	(1)	200	25	26.314
101	trasversale	(1)	380	25	19.479
109	trasversale	(1)	200	25	8.441
110	trasversale	(1)	180	25	12.122
103	longitudinale	(1)	180	25	21.295
104	longitudinale	(1)	320	25	22.821
102	longitudinale	(1)	300	25	24.456
106	longitudinale	(1)	250	25	23.216
105	longitudinale	(1)	300	25	21.376
12	trasversale	(2)	540	10	12.959
66	trasversale	(2)	690	25	25.704
13	trasversale	(2)	110	50	18.276
6	trasversale	(3)	310	10	30.458
7	trasversale	(3)	310	10	25.750
8	trasversale	(3)	310	10	23.000
A	longitudinale	(3)	190	10	22.588
B	longitudinale	(3)	240	10	27.607
C	longitudinale	(3)	250	10	26.786
D	longitudinale	(3)	250	10	24.786

**Fonte**

(1)	Progetto bonifica distretto ceramico Modena-Reggio E.
(2)	Progetto CARG
(3)	Tesi di laurea Università di Milano

Figura 2.16: esempio di trasformazione di una sezione idrostratigrafica (sez. 98 trasversale - Progetto bonifica distretto ceramico Modena-Reggio E.) in una serie di borehole in ambiente GIS.

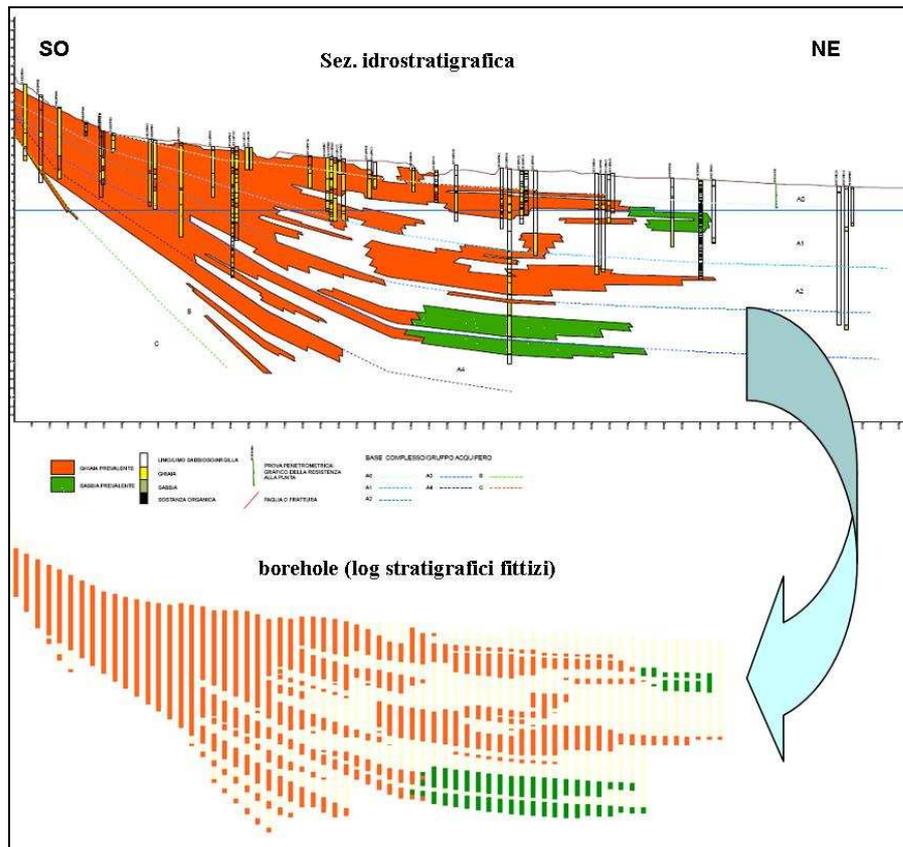
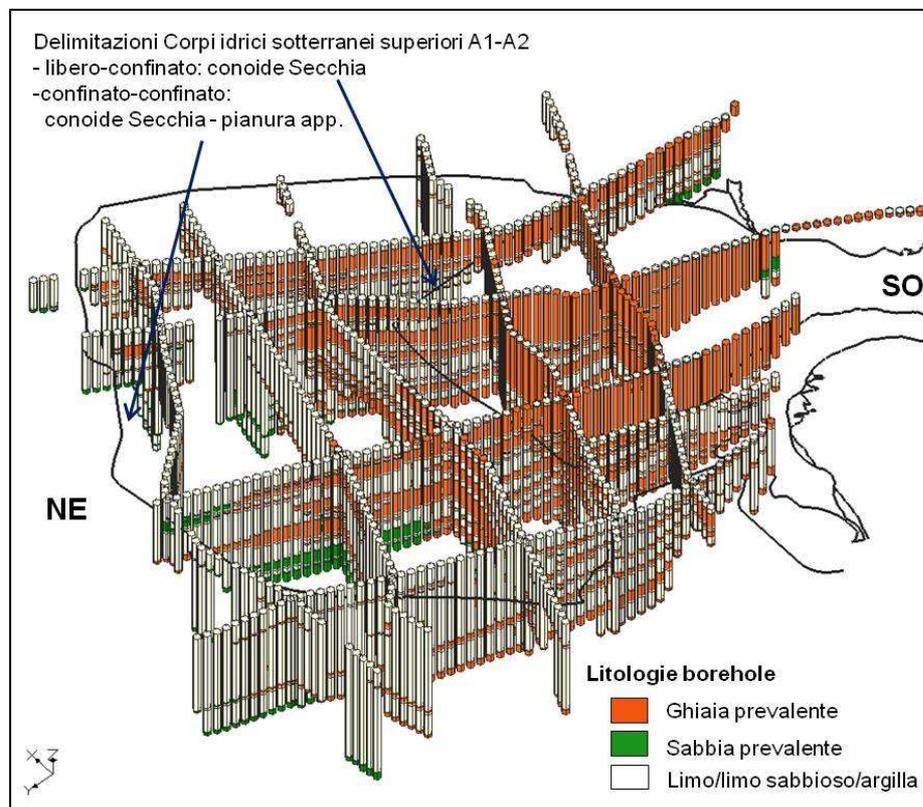


Figura 2.17: vista 3-D in ambiente GIS dei borehole relativi all'elaborazione delle sezioni disponibili nel Progetto bonifica distretto ceramico Modena-Reggio E. [13] ubicate nella conoide del Secchia.

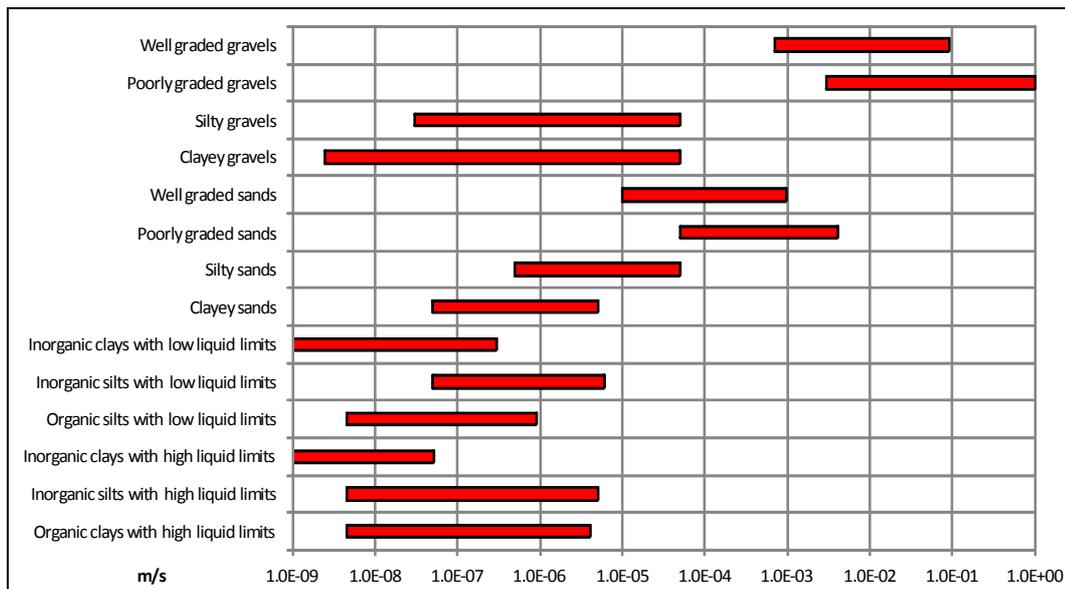


### 2.3.7 La parametrizzazione del sistema

La parametrizzazione del sistema avviene per attribuzione dei valori dei parametri idrogeologici per ciascuna maglia costituente la discretizzazione spaziale del sistema.

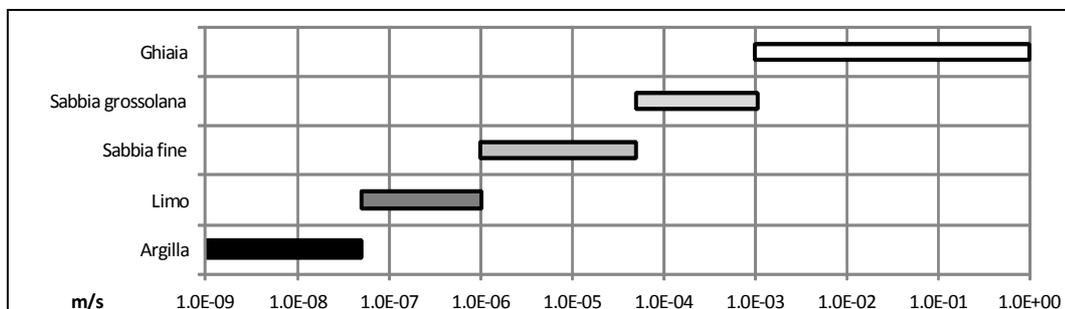
Le conducibilità idrauliche orizzontali ( $k_h$ ) sono state spazialmente distribuite in funzione della discretizzazione litologica ottenuta secondo quanto descritto al paragrafo precedente; la relazione fra litologia e conducibilità idraulica non è univoca, in quanto litologie differenti possono presentare caratteristiche idrogeologiche analoghe. La Figura 2.18 mostra una correlazione bibliografica fra classi litologiche e valori del coefficiente di permeabilità per una serie di terreni classificati mediante il metodo Unified Soil Classification System [40]. Le bande rosse rappresentano la variazione di conducibilità per ogni singola classe litologica; si osservi come almeno 8 litologie, nell'intervallo di  $k$  compreso fra  $1E^{-7}$  m/s e  $1E^{-6}$  m/s, presentino valori di conducibilità idraulica analoghi.

Figura 2.18: coefficienti di permeabilità bibliografici per terreni classificati mediante metodo USCS [40].



L'attribuzione dei valori di conducibilità idraulica alle litologie discretizzate nel modello, è stata effettuata secondo lo schema di Figura 2.19; ai principali tipi litologici costituenti l'acquifero (ghiaie, sabbie, limi, argille) sono stati associati specifici intervalli di variazione di conducibilità idraulica. L'eliminazione delle sovrapposizioni di Figura 2.18 permette in fase di calibrazione del modello di effettuare una correlazione più accurata all'interno di intervalli di  $k_h$  specifici.

Figura 2.19: classi di conducibilità idraulica orizzontale per le principali litologie implementate nel modello.



Per via della natura stratificata dei terreni, il valore del coefficiente di permeabilità verticale ( $k_v$ ) risulta inferiore a quello orizzontale ( $k_h$ ). Nel modello, mediamente il rapporto fra  $k_h$  e  $k_v$  si attesta intorno a 10.

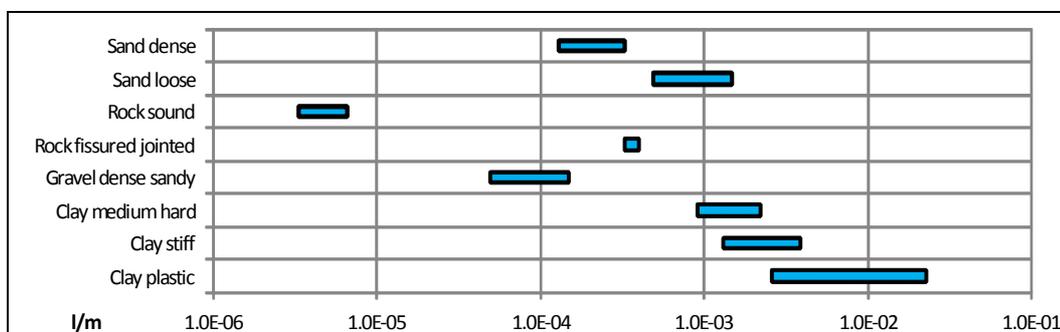
L'attribuzione dei valori di immagazzinamento specifico ( $S_s$ ) è stata in prima battuta effettuata secondo correlazioni empiriche ricavate dalla bibliografia (Figura 2.20).

Tali correlazioni hanno una valenza tipicamente orientativa. Il mezzo più affidabile per caratterizzare trasmissività, conducibilità idraulica, diffusività, coefficiente di immagazzinamento di un acquifero di interesse, rimane essere la prova di pompaggio in situ.

A tal proposito in fase di calibrazione, la parametrizzazione idraulica delle litologie del modello è stata opportunamente controllata e verificata, mediante la consultazione di dati specifici ricavati dall'analisi bibliografica di studi precedenti effettuati nell'area di studio. Questi studi sono stati raccolti in [22] (EG Engineering Geology, ATO 4 MO Agenzia d'Ambito per i Servizi Pubblici di Modena (2007). *Piano d'Ambito del Servizio Idrico Integrato. Risorse idriche sotterranee della pianura modenese. Fase I- Revisione e omogeneizzazione degli studi idrogeologici. Relazione tecnica.*) e fanno riferimento a:

1. metodi diretti (20 pozzi con prove di pompaggio a Q costante);
2. metodi indiretti (metodo di Cassan su 50 pozzi, partendo da portate specifiche Qs si ricava T) e dove i valori di k e T ottenuti non sono attribuibili ai diversi Complessi Acquiferi;
3. prove di pompaggio a portata variabile a gradini su 11 pozzi acquedottistici Hera S.p.A. (ricavati k, T ed efficienza idraulica).

Figura 2.20: valori di immagazzinamento specifico [21].



Altri valori sono riportati in [37] (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna.* A cura di G. Di Dio, Selca, Firenze.) dove i dati ricadenti nelle province di MO, RE e BO (stratigrafie, unità idrostratigrafica filtrata, sistemi deposizionali, spessore totale acquiferi filtrati e relativa % dei singoli complessi acquiferi captati, k media e T, coeff. immagazzinamento specifico medio) sono stati attribuiti ai singoli complessi acquiferi.

La maggior parte degli elementi costituenti queste due fonti principali sono state per la gran parte già sistematizzate in [6] (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003b) *Creazione di una banca dati informatizzata per la parametrizzazione idrodinamica degli acquiferi.* In: Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna, alle Province ed alle Autorità di Bacino per la elaborazione del Piano Regionale Di Tutela delle Acque e Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (Art. 44 del D. Lgs. 152/99 e Art. 115 L.R. 3/99) - Quadro conoscitivo Attività C. Rapporto tecnico, Bologna.) nell'ambito delle attività connesse alla costruzione del quadro conoscitivo del PTA e quindi sono già state utilizzate per l'implementazione della modellistica di livello regionale (Emiro-II).

### 2.3.8 La valutazione dei prelievi di acque sotterranee nello spazio e nel tempo

La valutazione dei prelievi di acque sotterranee da imporre come termine in ingresso al modello di flusso prevede sia la conoscenza in termini volumetrici dei quantitativi estratti sia l'esatta posizione nello spazio 3-D del modello dove tale prelievo avviene. L'informazione relativa all'ubicazione planimetrica dell'opera di captazione deve quindi essere accompagnata dai dati relativi alla profondità del prelievo. Se per i prelievi acquedottistici queste informazioni sono generalmente note, per i prelievi per gli altri usi ciò è vero solo parzialmente e quindi si deve ricorrere a delle procedure di stima come verrà descritto nei prossimi paragrafi.

### 2.3.8.1 I prelievi civili acquedottistici

Questa parte del lavoro ha previsto la verifica della posizione e delle caratteristiche costruttive di tutti i pozzi acquedottistici, nonché l'attribuzione del relativo prelievo. Ha costituito quindi una parte rilevante del lavoro in cui è stato operato il confronto delle banche dati già disponibili dal quadro conoscitivo del PTA con le nuove informazioni resi fruibili in tempi successivi dai Gestori e sintetizzate in [22] (EG Engineering Geology, ATO 4 MO Agenzia d'Ambito per i Servizi Pubblici di Modena (2007). *Piano d'Ambito del Servizio Idrico Integrato. Risorse idriche sotterranee della pianura modenese. Fase I- Revisione e omogeneizzazione degli studi idrogeologici. Relazione tecnica.* Ciò è stato realizzato per tutti i pozzi che abbiano avuto una attività di estrazione dal 2003 ad oggi. In tal modo il modello numerico è in grado di rappresentare i passati periodi di funzionamento di pozzi non più in uso e nello stesso tempo di poter ricevere i dati di prelievo relativi a pozzi di più recente costruzione.

Andando più nel dettaglio nell'analisi delle banche dati disponibili, sono state effettuate attente verifiche ed integrazioni fra tali dati, che sono consistite prima di tutto nell'allineamento della nomenclatura (dei singoli pozzi e dei campi pozzi), quando diversa, e nella integrazione dei pozzi e/o informazioni relative a: ubicazione (provincia, comune, longitudine, latitudine, quota p.c. s.l.m.), caratteristiche costruttive (profondità, n° filtri e loro posizione rispetto al p.c.), Gestore, stato o meno di attività e in caso di informazioni non esattamente coincidenti, nella scelta di quelle ritenute più attendibili al fine di ottenere una nuova banca dati aggiornata. L'elenco di tutti i pozzi acquedottistici censiti è riportato in Tabella 2.6 unitamente alle loro principali caratteristiche costruttive. L'ubicazione è invece rappresentata nella successiva Figura 2.21. Il prelievi acquedottistici complessivi ammontano a circa 86 milioni di metri cubi all'anno con una variabilità interannuale trascurabile. Il dettaglio dei prelievi suddiviso per i singoli campi pozzi e per gestore è riportato in Tabella 2.7.

Figura 2.21: ubicazione dei principali poli di approvvigionamento idropotabile.

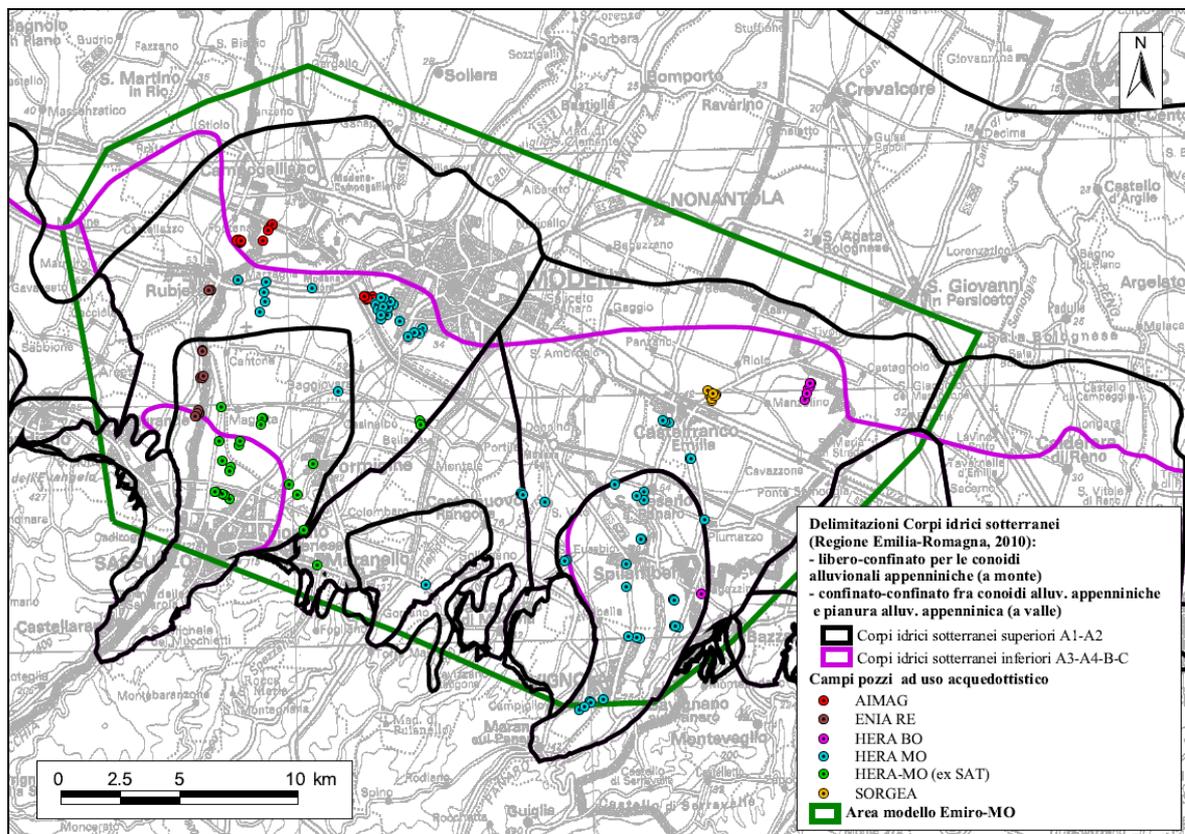


Tabella 2.6: elenco dei pozzi ad uso acquedottistico.

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	5	43.20	57	
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	6	46.40	140	
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	1	46.40	140	
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	2	42.00	140	
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	4	46.20	60	
AIMAG	Campogalliano Possessione Riva	3 bis	42.00	57	
AIMAG	Cognento	1	38.00	50	
AIMAG	Cognento	2	38.00	45	
AIMAG	Cognento	3	38.00	50	
AIMAG	Cognento	4	38.00	50	
AIMAG	Cognento	5	38.00	109	
AIMAG	Cognento	6	38.00	108	
AIMAG	Cognento	7	38.00	45	
AIMAG	Cognento	8	38.00	45	
AIMAG	Cognento	9	38.00	45	
AIMAG	Cognento	10	38.00	127	
AIMAG	Cognento	11	38.90	130	come il 13 e più profondi
AIMAG	Cognento	12	38.10	150	come il 13 e più profondi
AIMAG	Cognento	13	38.90	93	69.5-71.5;74-78.5;83-92.5
AIMAG	Rubiera	1	42.00	50	
AIMAG	Rubiera	4	42.00	51	
AIMAG	Rubiera	6	42.00	81	
AIMAG	Rubiera	8	42.00	44	
AIMAG	Rubiera	9	42.00	77	
AIMAG	Rubiera	10	42.00	119	

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
AIMAG	Rubiera	11	42.00	107	
AIMAG	Rubiera	12	42.00	107	
AIMAG	Rubiera	13	42.00	107	
AIMAG	Rubiera	14	42.00	107	
AIMAG	Rubiera	15	42.00	80	15-18; 20.3-26.3; 27.6-44.6; 69-75
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 1	30.50	97	
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 2	30.00	100	
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 3	32.00	110	
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 4	30.40	200	
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 6	30.40	106	
HERA BO	Castelfranco Manzolino	Pozzo 7	31.50	107	86-96
HERA BO	Magazzino	MA0001	73.00	70	
HERA BO		"Bazzano"			
HERA MO	Baggiovara	Baggiovara	59.40	114	82.5-87; 108.4-111.9
HERA MO	Campo pozzi di Via Muzzo Corona	2bis	46.00	100	60-70; 80-90
HERA MO	Campo pozzi di Via Muzzo Corona	Rurale 1	46.00	91	60.5-70.8; 79.8-91.3
HERA MO	Campo pozzi di Via Muzzo Corona	Rurale 2	46.00	34	10-12; 23-30
HERA MO	Campo pozzi di Via Muzzo Corona	Rurale 3	46.00	75	60.4-71.6
HERA MO	Castelfranco-Via Loda	Pozzo 1	42.00	123	74.5-86.5; 93.5-95.7; 106-114; 116-120
HERA MO	Castelfranco-Via Loda	Pozzo 2	42.00	123	75-81; 83-86.5; 93-97; 109-121
HERA MO	Castelfranco-Via Loda	Pozzo 3	42.00	124	76-80; 84-88; 95-97; 109-112; 116.5-118; 121.5-123.5
HERA MO	Castelnuovo	Pozzo 1	55.00	163	
HERA MO	Castelnuovo	Pozzo 2	55.00	160	
HERA MO	Castelnuovo	Pozzo 3	55.00	166	
HERA MO	Castelnuovo	Pozzo 4	55.00	166	
HERA MO	Castelvetro	Pozzi 1 e 2 S. Eusebio	71.60	120	
HERA MO	Castelvetro	Pozzo B (Villa Fiocchi)	123.00	110	

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
HERA MO	Cittanova	Cittanova	44.30	30	
HERA MO	Cognento	A1	38.00	72	61-71
HERA MO	Cognento	A10	39.60	95	59.5-61.5; 65-69; 77.5-81.5
HERA MO	Cognento	A11	38.60	92	65-71; 80-86
HERA MO	Cognento	A12	39.30	84	47-55; 59-61; 65-69; 75-79
HERA MO	Cognento	A2	37.80	71	67-70
HERA MO	Cognento	A3	39.00	122	41.8-48.2; 49.6-52.6; 59-64.4; 69.5-72.5; 76-79; 103.5-106.5; 114-117
HERA MO	Cognento	A5	37.50	93	61-65; 81-89
HERA MO	Cognento	A6	38.50	82	
HERA MO	Cognento	A7	38.50	130	56.5-61.5; 67-70.5; 74.8-79; 115.9-118
HERA MO	Cognento	A8	38.50	89	42-45; 61-65; 80-85
HERA MO	Cognento	A9	39.20	211	74-76; 77.4-79.5; 81-84.5
HERA MO	Marzaglia	Marzaglia	51.70	92	
HERA MO	Marzaglia (C)	C 1	48.00	226	97-99; 105-110; 115-123; 131.2-135.2; 167.5-177.5; 194-201
HERA MO	Marzaglia (C)	C 2	48.00	210	82.9-86; 90.2-92.5; 116.9-120; 143.5-149; 162.2-164.5; 181.1-189
HERA MO	Marzaglia (C)	C 3	48.30	161	58-64; 79.5-81.5; 85.5-87.5; 99.5-105.5; 136-142; 147-153
HERA MO	Marzaglia (C)	C 4	50.20	145	76-82; 86-91; 95-100; 126-130; 133-137
HERA MO	Modena sud (B)	B1	41.30	130	53.7-63.7; 67.5-69.5; 76.7-79.7; 117.2-119
HERA MO	Modena sud (B)	B2	38.00	82	64-67; 74.9-77.5
HERA MO	Modena sud (B)	B3	40.00	107	49-51.5; 63.7-65.2
HERA MO	Modena sud (B)	B4	40.50	94	55.2-57.5; 63.2-65.5; 74.8-76.3
HERA MO	Modena sud (B)	B5	41.60	91	47.5-48.5; 55-59.5; 65-66.5
HERA MO	Piumazzo	Piumazzo	55.00	85	
HERA MO	S. Cesario	Pozzo comunale	55.30	160	
HERA MO	S.Cesario (D)	D 1	57.00	139	42-47; 51-58; 63-68; 72-83; 88-93; 97-102; 106-109; 113-115; 124.5-126.5; 132-137
HERA MO	S.Cesario (D)	D 5	51.30	130	46-56; 60-70; 78-81; 97-103; 106-118; 122-127
HERA MO	S.Cesario (D)	D 6	55.50	107	54-60; 63.5-66.5; 73-93

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
HERA MO	Savignano - Bocchirolo	Pozzo 1	82.00	106	60-105
HERA MO	Savignano - Bocchirolo	Pozzo 2	82.00	106	60-105
HERA MO	Savignano - Bocchirolo	Pozzo 3	82.00	106	60-105
HERA MO	Savignano - Bocchirolo	Pozzo 4	82.00	106	60-105
HERA MO	Savignano - via Mannelle	Pozzo 5	77.00	86	63-85
HERA MO	Savignano - via Mannelle	Pozzo 6	77.00	86	63-85
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 1 - S. Vito-via Viazza	55.00	83	49-54;71-72;81-83
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 1-Pozzo Coccola	79.00	79	
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 2-Pozzo via del Carmine	69.80	70	
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 5 S3-Via Castellaro	64.00	65	
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 6 S2-Via Castellaro	64.70	65	
HERA MO	Spilamberto	Pozzo 9 S1-Via Castellaro	64.70	65	
HERA MO	Vignola	Pozzo 1	118.44	8	
HERA MO	Vignola	Pozzo 2	114.00	8	
HERA MO	Vignola	Pozzo 3	114.00	8	
HERA MO	Vignola	Pozzo 4	110.00	8	
HERA MO	Vignola	Pozzo 5	88.00	60	
HERA MO	Vignola	Pozzo 6	86.00	60	
HERA MO	Vignola	Pozzo 7	96.00	60	
HERA MO	Vignola	Pozzo 8	117.00	8	
HERA MO		3 Simonini	73.00	107	38.1-47.5; 49.5-57.8
HERA MO (Ex-SAT)	Fiorano	B1 - Cameazzo	111.50	99	95.5-99.4
HERA MO (Ex-SAT)	Fiorano	Tosi	130.80		
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	C03-V.Gramsci	81.00	75	
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	C06-Ghiarola	92.00	83	53-55; 57-59; 64-73
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	C08-Via Sassuolo	93.30	70	
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Campo pozzi Tomaselli (C01)	72.40	138	45-48; 61-65; 75-78; 92-95; 119-124; 128-133

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Campo pozzi Tomaselli (C02)	72.40	140	
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Campo pozzi Tomaselli (C07)	72.40	131	68-95.5; 112-129.5
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Campo pozzi Tomaselli (C10)	72.40	145	75-83; 90-96; 121-137
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Campo pozzi Tomaselli (C12)	74.30	135	112-118; 120-123; 126-135
HERA MO (Ex-SAT)	Formigine	Magreta	78.00	128	65-75; 88-94; 103-109; 118-125
HERA MO (Ex-SAT)	Maranello	D1	53.20	120	
HERA MO (Ex-SAT)	Maranello	D2	53.20	120	
HERA MO (Ex-SAT)	Maranello	D3-Martignana	52.20	120	
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A12	91.20	88	57-65; 68.3-73.3; 77.9-82.9
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A14	91.00	97	57-62; 72-78; 91-96
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A15	85.50	119	75.5-78.5; 95-100; 108-116
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A16	85.50	110	81-87; 93-99; 105-108
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A17	83.60	117	90-96; 99-102; 106-115
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A2	101.00	90	62-66.5; 73.5-76.5; 81.5-86
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A3	99.30	86	74-80
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A4	99.30	98	74-80; 82-85; 95.5-96.5
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A5	99.60	83	59-62; 69-72; 76-78
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A6	99.50	84	55.9-61.9; 67.85-71.35; 75-78
HERA MO (Ex-SAT)	Sassuolo	A9	92.00	116	27-33; 44-50; 53-56; 80-86
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 10	35.36	96	90-94
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 11	35.32	97	79-94
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 12	34.00	100	
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 13	37.00	100	
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 14			
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 15			
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 5	35.50	80	
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 6	35.21	87	80-85

Gestore	Campo Pozzi	Pozzo	p.c. (m s.l.m.)	Prof. (m)	Posizione filtri rispetto al p.c.: da_a_ (m)
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 7	33.76	87	80-85
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 8	34.22	87	80-85
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	Pozzo 9	35.11	85	79-85
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	3	32.00	149	33; 44.8; 142
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	19	32.00	146	100-105; 124.4-131.4; 138.8-146.4
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	20	32.00	322	81.5-82.2; 99.7-103.5; 121.2-125.5
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	21	32.00	95	89-94
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	22	32.00	361	221-231; 353-356
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	Fondo Galasso 1	32.00		
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara	Fondo Galasso 2	34.00		
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara		32.00	150	87; 105; 145
SORGEA	Ex Acquedotto Ferrara		32.00	143	46.5; 124; 140
ENIA RE	Rubiera-RE	PAS001 (Via Mari)	53.00	195	
ENIA RE	Rubiera-RE	PAS002 (Via Mari)	53.00	305	
ENIA RE	Rubiera-RE	PAS003 (Via Mari)	53.00	162	
ENIA RE	Salvaterra	SAL001	80.00	158	
ENIA RE	Salvaterra	SAL002	80.00	128	
ENIA RE	Salvaterra	SAL003	79.00	154	
ENIA RE	Salvaterra	SAL004	80.00	160	
ENIA RE	Salvaterra	SAL005	81.00	154	
ENIA RE	Salvaterra	SAL006	81.00	123	
ENIA RE	Salvaterra nord	SAL_N1	69.20	70	
ENIA RE	Salvaterra nord	SAL_N2	70.00	74	
ENIA RE	Salvaterra nord	SAL_N3	70.00	105	
ENIA RE	Salvaterra nord	SAL_N4	71.10	105	
ENIA RE	San Donnino	DON001	66.00	200	
ENIA RE	San Donnino	DON002	66.00	305	

Tabella 2.7: prelievi acquedottistici 2002-2006 (milioni di m<sup>3</sup>), per gestore e campo pozzi.

Gestore	Campo pozzi	N° pozzi	Quota media p.c. (m s.l.m.)	Prelievo (Mm <sup>3</sup> /anno)					
				media 2002-2006	2002	2003	2004	2005	2006
AIMAG	Cogento	13.0	38.1	9.13	9.39	8.94	8.66	9.17	9.51
	Rubiera	11.0	42.0	7.98	7.61	8.21	8.57	8.00	7.52
	Campegalliano-Possessione Riva	6.0	44.4	4.21	4.47	3.78	4.20	4.43	4.15
<b>AIMAG Totale</b>		30.0	40.8	21.32	21.47	20.92	21.44	21.60	21.18
HERA MO	Baggiovara	1.0	59.4	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	Castelfranco-Via Loda	3.0	42.0	2.49	2.56	2.42	2.52	2.47	2.48
	Castelnuovo	4.0	55.0	0.40	0.50	0.45	0.35	0.41	0.30
	Castelvetro	2.0	97.3	0.74	1.06	1.04	0.80	0.42	0.40
	Cittanova	1.0	44.3	0.10	0.01	0.09	0.20	0.19	0.00
	Cogento (A)	11.0	38.6	9.04	9.11	8.91	9.06	8.96	9.16
	Marzaglia	1.0	51.7	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Marzaglia (C)	4.0	48.6	10.25	9.80	10.36	10.55	10.40	10.14
	Piumazzo	1.0	55.0	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18
	S. Cesario	4.0	54.8	5.32	4.98	4.99	5.31	5.52	5.80
	Spilamberto	6.0	66.2	1.65	1.79	1.63	1.51	1.77	1.54
	Vignola	8.0	105.4	2.19	2.10	2.10	2.03	2.40	2.30
	Modena sud (B)	5.0	40.3	1.42	1.21	1.46	1.51	1.40	1.54
	Savignano - via Mannelle	2.0	77.0	0.25	0.25	0.25	0.23	0.27	0.25
	Savignano - Bocchirolo	4.0	82.0	0.50	0.50	0.50	0.46	0.54	0.51
Campo pozzi di Via Muzzo Corona	4.0	46.0	0.48	0.49	0.47	0.49	0.48	0.48	
<b>HERA MO Totale</b>		61.0	60.8	35.02	34.56	34.85	35.21	35.40	35.07
HERA-MO (Ex SAT)	Fiorano	2.0	121.2	0.19	0.00	0.20	0.19	0.24	0.31
	Sassuolo	11.0	93.4	4.86	4.92	5.05	4.76	4.67	4.93
	Formigine	9.0	78.7	7.27	7.04	7.71	7.61	6.72	7.27
	Maranello	3.0	52.9	0.09	0.20	0.25	0.01	0.00	0.00
<b>HERA-MO (Ex SAT) Totale</b>		25.0	85.5	12.41	12.16	13.21	12.57	11.63	12.51
SORGEA	Castelfranco-Manzolino-Via Larga	11.0	35.1	7.20	7.00	7.15	7.30	7.45	7.11
<b>SORGEA Totale</b>		11.0	35.1	7.20	7.00	7.15	7.30	7.45	7.11
ENIA RE	Rubiera-RE	3.0	53.0	1.37	1.32	1.28	1.52	1.42	1.31
	Salvaterra	6.0	80.2	1.73	1.70	1.68	1.86	1.41	2.00
	Salvaterra nord	4.0	70.1	3.10	3.16	3.11	3.04	3.35	2.83
	San Donnino	2.0	66.0	1.49	1.67	1.60	1.45	1.38	1.36
<b>ENIA RE Totale</b>		15.0	70.2	7.69	7.85	7.67	7.87	7.55	7.51
HERA BO	Castelfranco Manzolino	6.0	30.8	2.42	2.25	2.13	2.16	2.68	2.85
	Magazzino	1.0	73.0	0.44	0.34	0.43	0.41	0.45	0.54
<b>HERA BO Totale</b>		7.0	36.8	2.85	2.59	2.55	2.58	3.14	3.39
<b>TOTALE COMPLESSIVO</b>		149.0	58.3	86.50	85.64	86.35	86.96	86.76	86.77

### 2.3.8.2 I prelievi complessivi

Per i prelievi relativi agli altri usi, industriali ed irrigui principalmente, i volumi e l'attribuzione spaziale sono quelli del modello regionale Emiro-II opportunamente trasferite nella nuova discretizzazione spazio-temporale del modello Emiro-MO.

Nelle figure che seguono i prelievi vengono analizzati complessivamente per l'intero modello di flusso (Figura 2.22) sia in funzione dell'uso sia nella ripartizione tra le tre conoidi appartenenti interamente all'area di studio (Secchia, Tiepido e Panaro). Nelle successive figure (da Figura 2.23 a Figura 2.25) vengono invece analizzati singolarmente i prelievi rispettivamente per le tre conoidi, anche in questo caso in funzione dell'uso e nella ripartizione tra i corpi idrici costituenti ogni singola conoide.

Figura 2.22: sintesi dei prelievi di acque sotterranee in input al modello di flusso. Suddivisione per uso e per conoide.

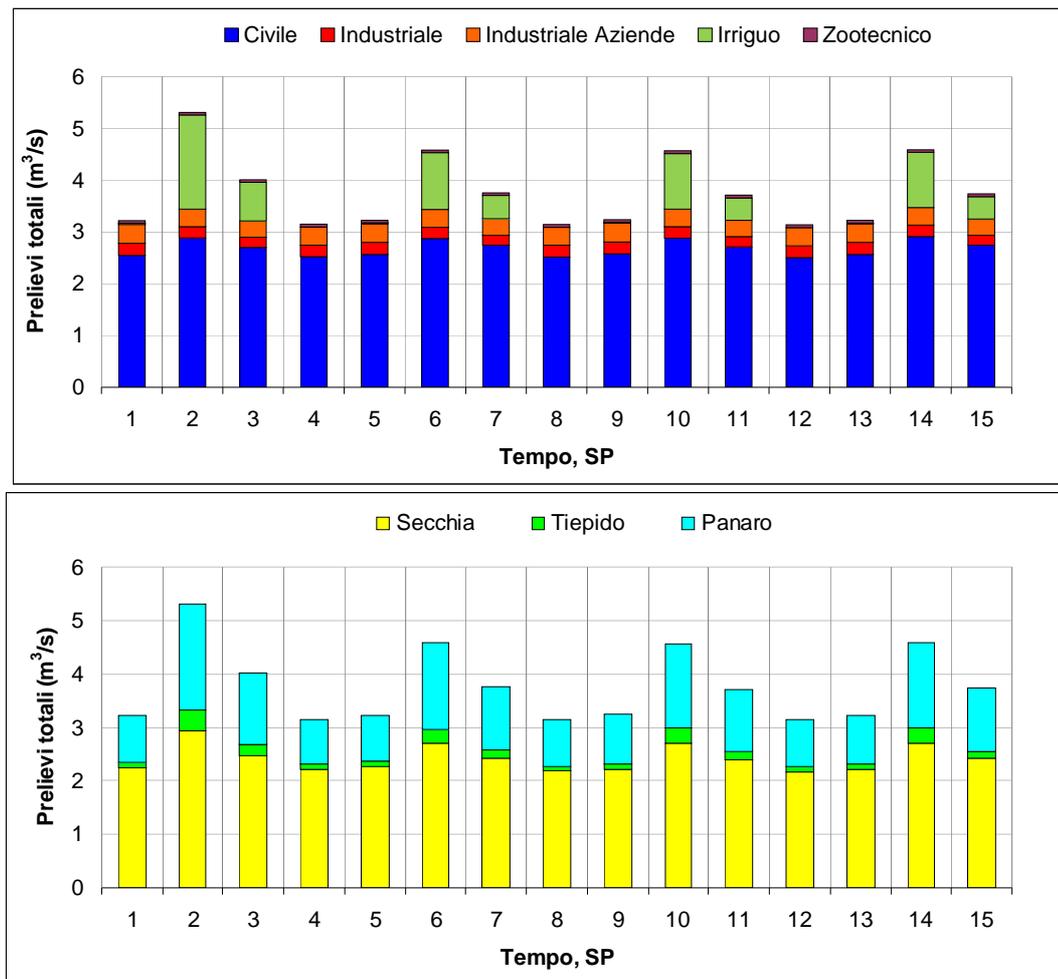


Figura 2.23: prelievi di acque sotterranee per i diversi usi nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Secchia.

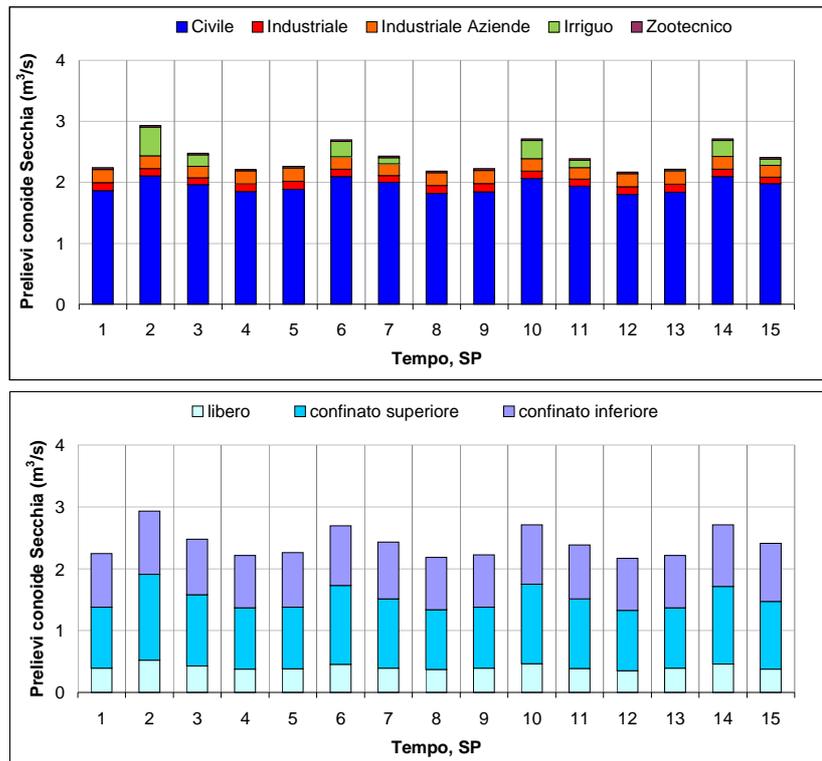


Figura 2.24: prelievi di acque sotterranee per i diversi usi nei corpi idrici sotterranei della conoide del Torrente Tiepido.

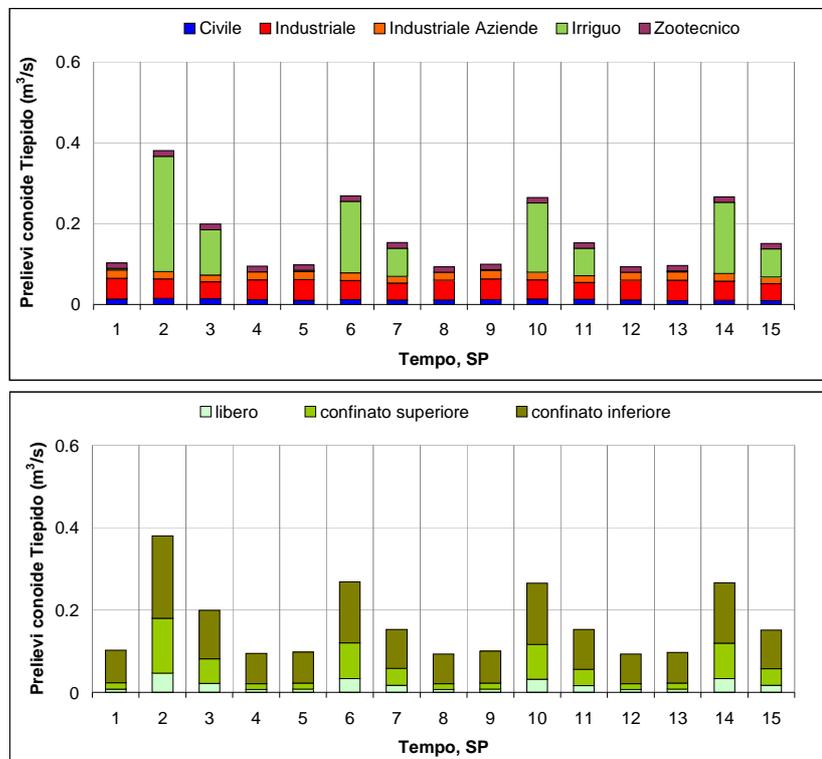
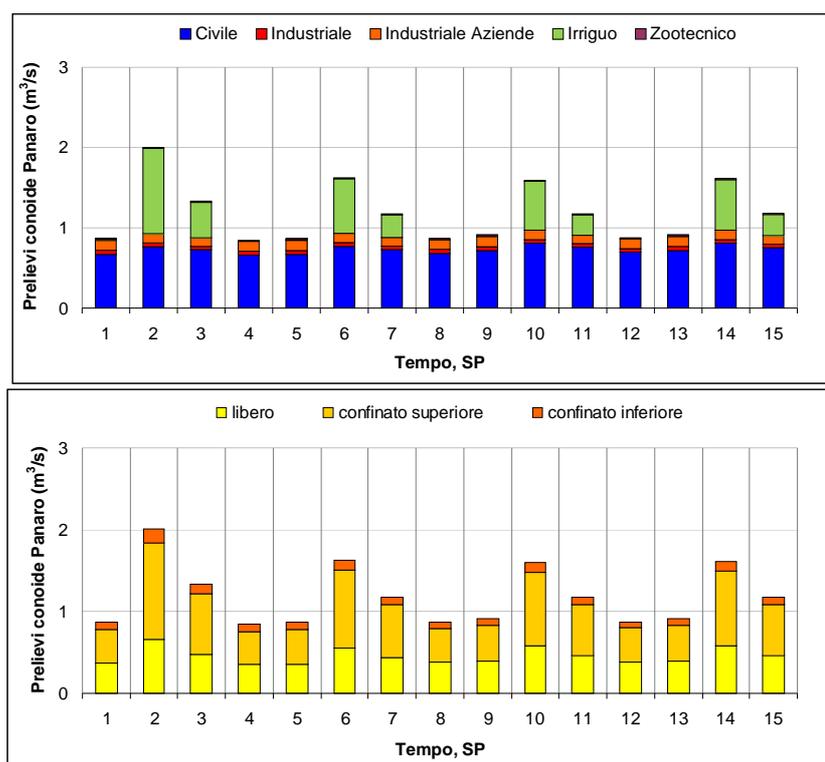


Figura 2.25: prelievi di acque sotterranee per i diversi usi nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Panaro.



### 2.3.9 La valutazione della ricarica meteorica

La valutazione della ricarica dovuta alle piogge avviene attraverso opportune elaborazioni dei risultati del modello di bilancio idrico del suolo CRITERIA elaborato da Arpa Servizio Idro-Meteo-Clima ([39], [41], [33]). Il modello calcola, in funzione del tipo di suolo presente ed in base all'andamento giornaliero della precipitazione e delle temperature i quantitativi di acqua disponibili per il drenaggio verso il basso e quindi l'alimentazione della falda sottostante.

Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti a confronto della precipitazione e della ricarica meteorica per i corpi idrici sotterranei delle conoidi appartenenti all'area di studio. I dati sono espressi in m³/s quindi come portate complessive ricadenti sugli areali di Figura 2.3.

Figura 2.26: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda (m³/s) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Secchia. Acquifero libero.

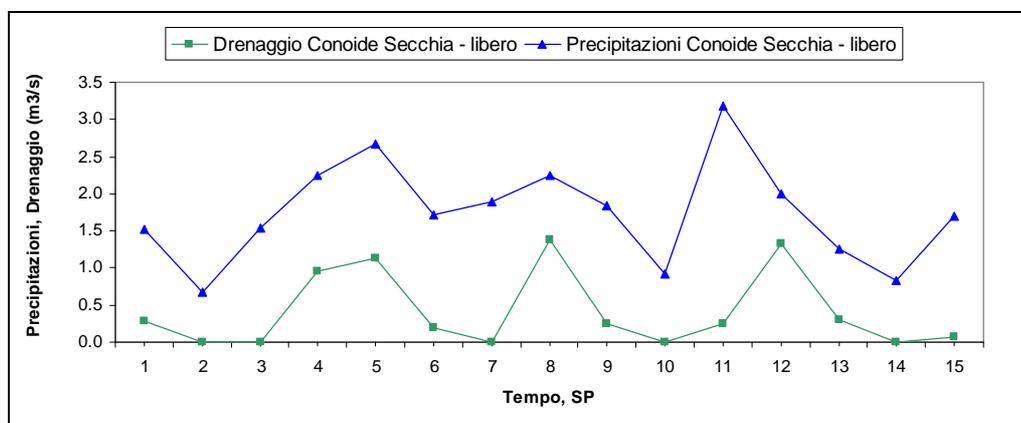


Figura 2.27: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda ( $m^3/s$ ) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Secchia. Acquifero confinato superiore.

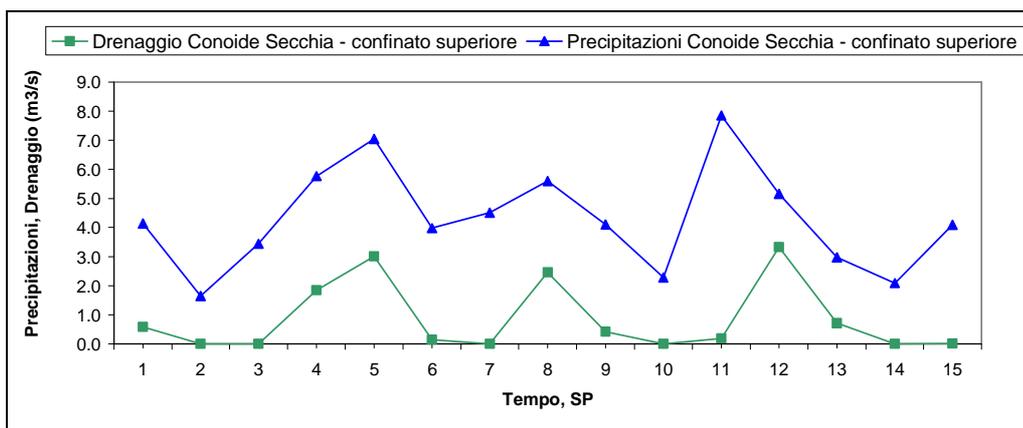


Figura 2.28: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda ( $m^3/s$ ) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Torrente Tiepido. Acquifero libero.

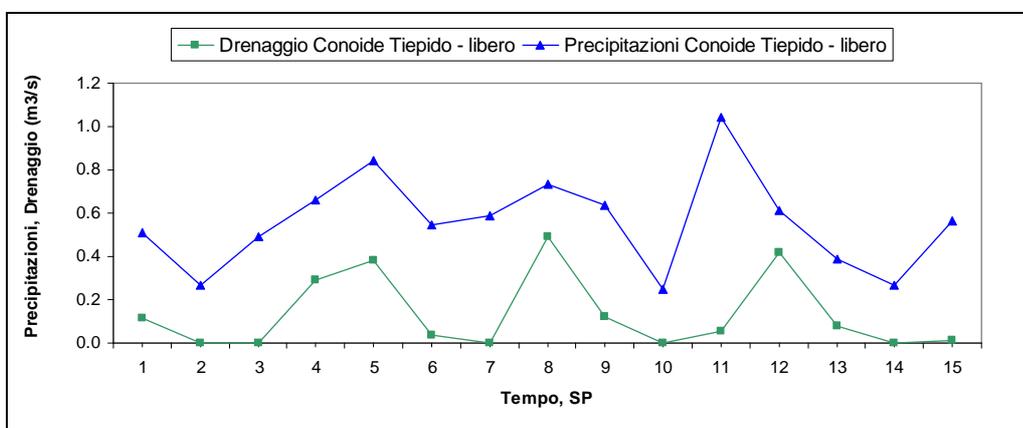


Figura 2.29: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda ( $m^3/s$ ) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Torrente Tiepido. Acquifero confinato superiore.

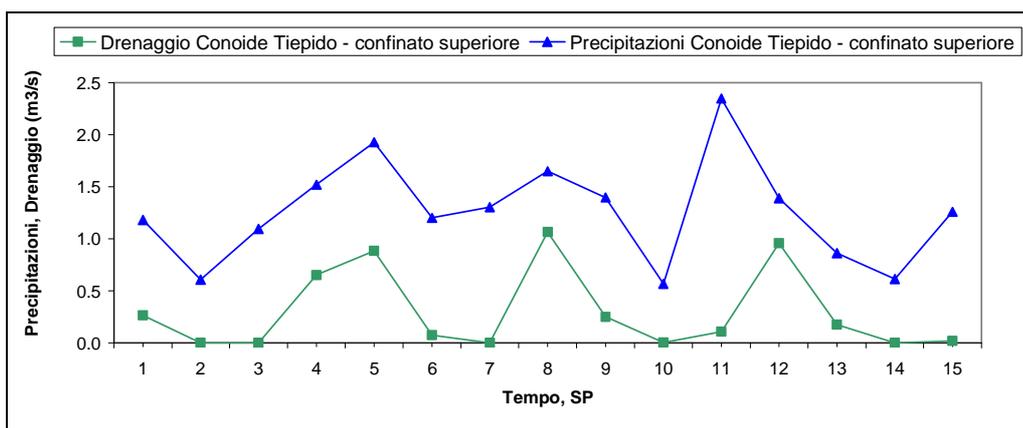


Figura 2.30: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda ( $m^3/s$ ) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Panaro. Acquifero libero.

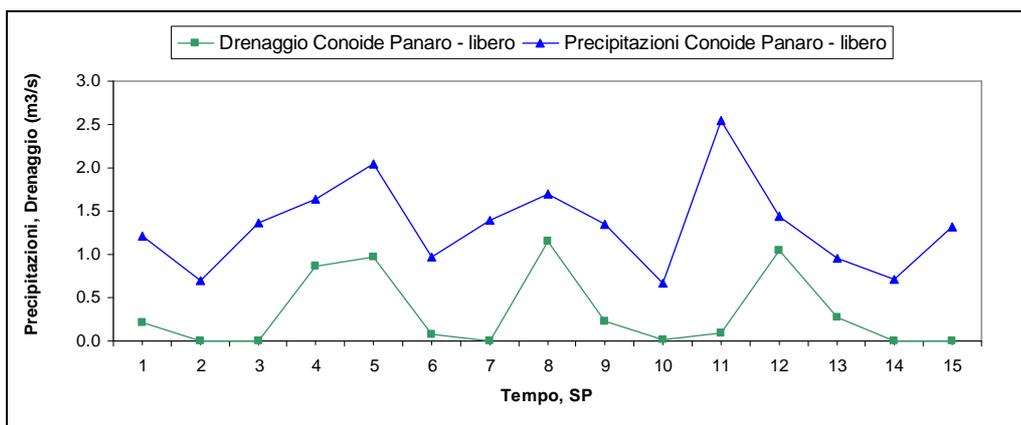
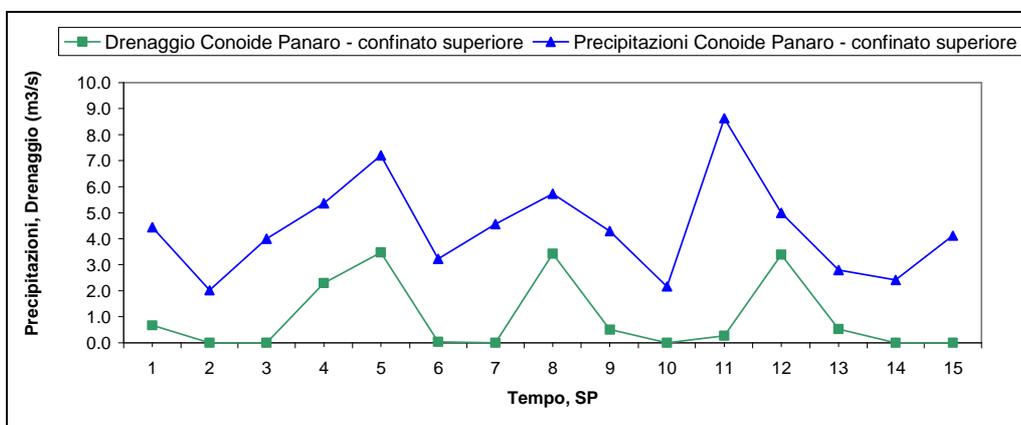


Figura 2.31: precipitazioni e drenaggi medi verso la falda ( $m^3/s$ ) nei corpi idrici sotterranei della conoide del Fiume Panaro. Acquifero confinato superiore.



### 2.3.10 La ricarica operata dai principali corsi d'acqua (Panaro, Secchia e Tiepido)

La valutazione della ricarica operata dai principali corsi d'acqua appenninici deve necessariamente essere condotta per passaggi successivi individuando prima le aree dove effettivamente avviene la principale ricarica degli acquiferi profondi da parte dei corsi d'acqua, poi il carattere stagionale o permanente dell'alimentazione ed infine la quantificazione delle portate in gioco. Ciò permetterà di impostare una portata di acqua in ingresso al sistema nella porzione di questo dove il corso d'acqua opera effettivamente la ricarica.

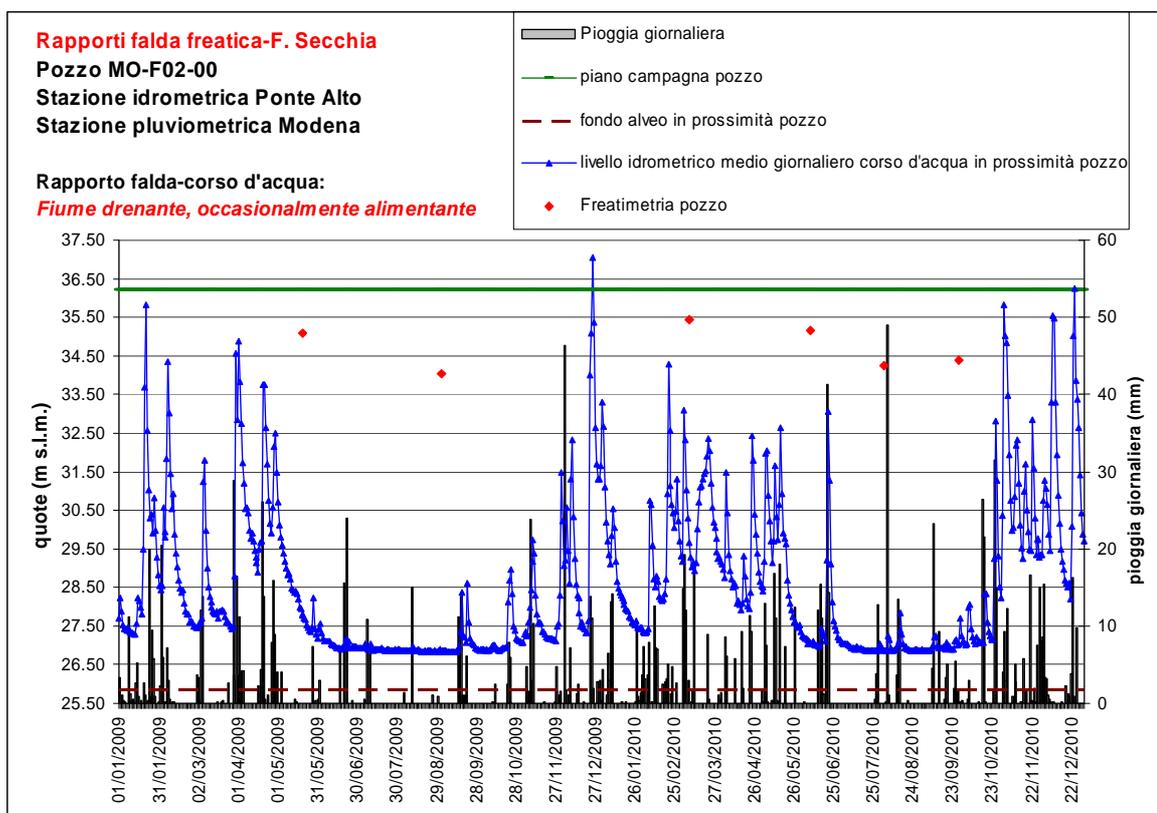
#### 2.3.10.1 Valutazione del tipo di rapporto falda-fiume sulla base degli studi idrogeologici disponibili

Al fine di valutare i rapporti falda-fiume si è proceduto in primo luogo reperendo informazioni da studi idrogeologici disponibili.

Per le porzioni distali delle conoidi del Secchia e del Panaro, in particolare si è fatto riferimento allo studio di approfondimento sugli acquiferi freatici di pianura della Regione Emilia-Romagna realizzato da ARPA nel 2011 [17]. In tale studio sono stati messi a confronto per il biennio 2009-2010 i livelli idrometrici del F. Secchia e del F. Panaro misurati in continuo in corrispondenza rispettivamente delle due stazioni idrometriche Ponte Alto e Navicello ed i livelli freatici (misure semestrali per il 2009 e trimestrali per il 2010) rispettivamente dei due pozzi MO-F02-00 (a NO di Modena) e MO-F01-00 (presso Navicello) della Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee, ubicati in prossimità delle stazioni idrometriche. Da tale confronto è emerso che in corrispondenza dei pozzi

MO-F02-00 e MO-F01-00 il F. Secchia ed il F. Panaro drenano la falda freatica e solo occasionalmente la alimentano (Figura 2.32 e Figura 2.33).

Figura 2.32: analisi dei rapporti falda fiume, caso Fiume Secchia in prossimità del pozzo MO-F02-00 [17].



Utilizzando la stessa metodologia dello studio appena menzionato, si è proceduto a effettuare un'analisi simile nel caso delle porzioni apicali delle conoidi del Secchia e del Panaro, ovvero in presenza di acquiferi monostrato con falda libera, confrontando i livelli idrometrici del F. Secchia e del F. Panaro per il periodo 2009-2011 in corrispondenza rispettivamente delle due stazioni idrometriche Ponte Veggia e Spilamberto con misure in continuo ed i livelli freatici in continuo rispettivamente dei due pozzi MO81-00 (a NO di Sassuolo) e MO64-00 (a Est di Spilamberto) della Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee, ubicati in prossimità delle stazioni idrometriche (Figura 2.36). In realtà, nel caso della stazione idrometrica Ponte Veggia non è disponibile l'esatto punto quotato (zero idrometrico), rispetto al quale sono effettivamente riferite le altezze idrometriche del F. Secchia (dati tratti dal sistema "Dexter" del portale del Servizio Idro-Meteo-Clima dell'ARPA), per cui non è stato possibile ricavare le quote assolute s.l.m. dei livelli idrometrici del F. Secchia da mettere a confronto con i livelli freaticometrici del pozzo MO81-00. Dalla Sezione. 182-00-SC, rilevata nel 2002 sul F. Secchia, ubicata in corrispondenza del pozzo MO81-00, si può vedere che il fondo alveo risulta avere quota 93.87 m s.l.m., quindi è incassato rispetto al piano campagna circostante, ma si trova a quote più elevate di circa 26-31 m rispetto a livelli freaticometrici del pozzo MO81-00 quindi è possibile affermare che in tale sezione il F. Secchia è sempre alimentante (Figura 2.34).

Figura 2.33: analisi dei rapporti falda fiume, caso Fiume Panaro in prossimità del pozzo MO-F01-00 [17].

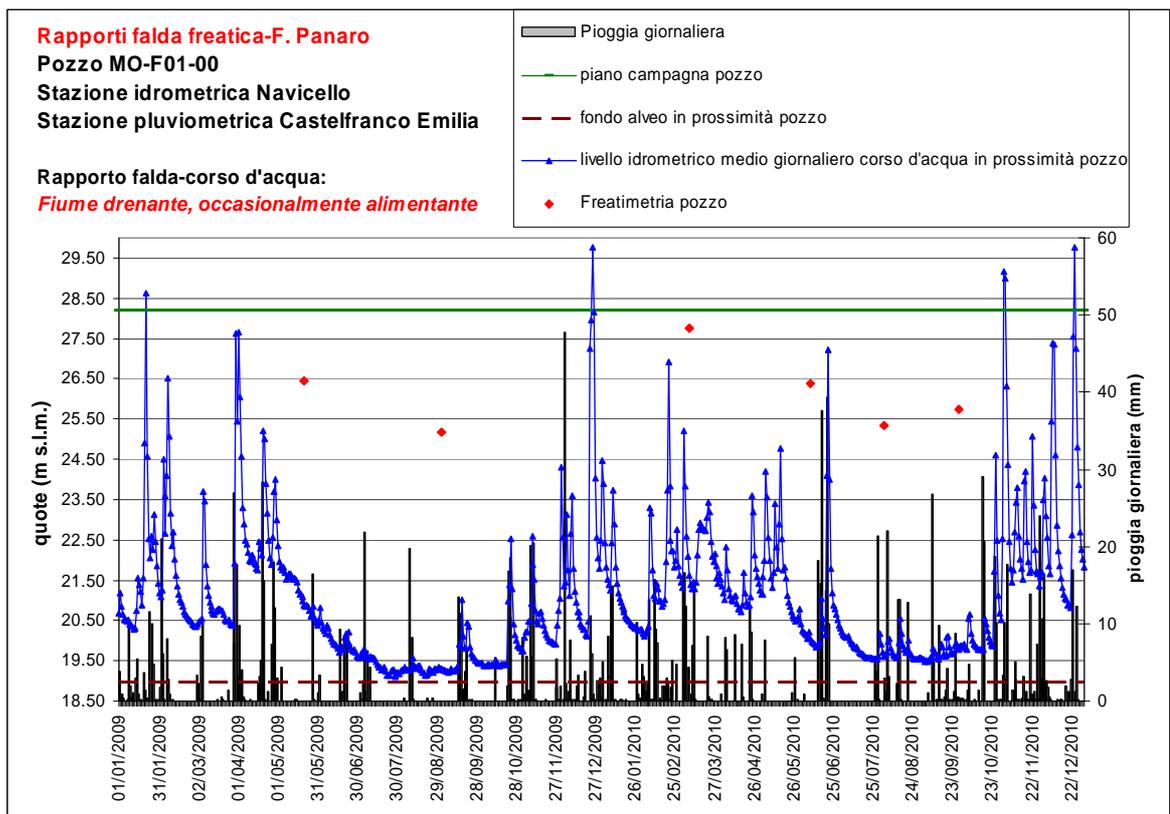
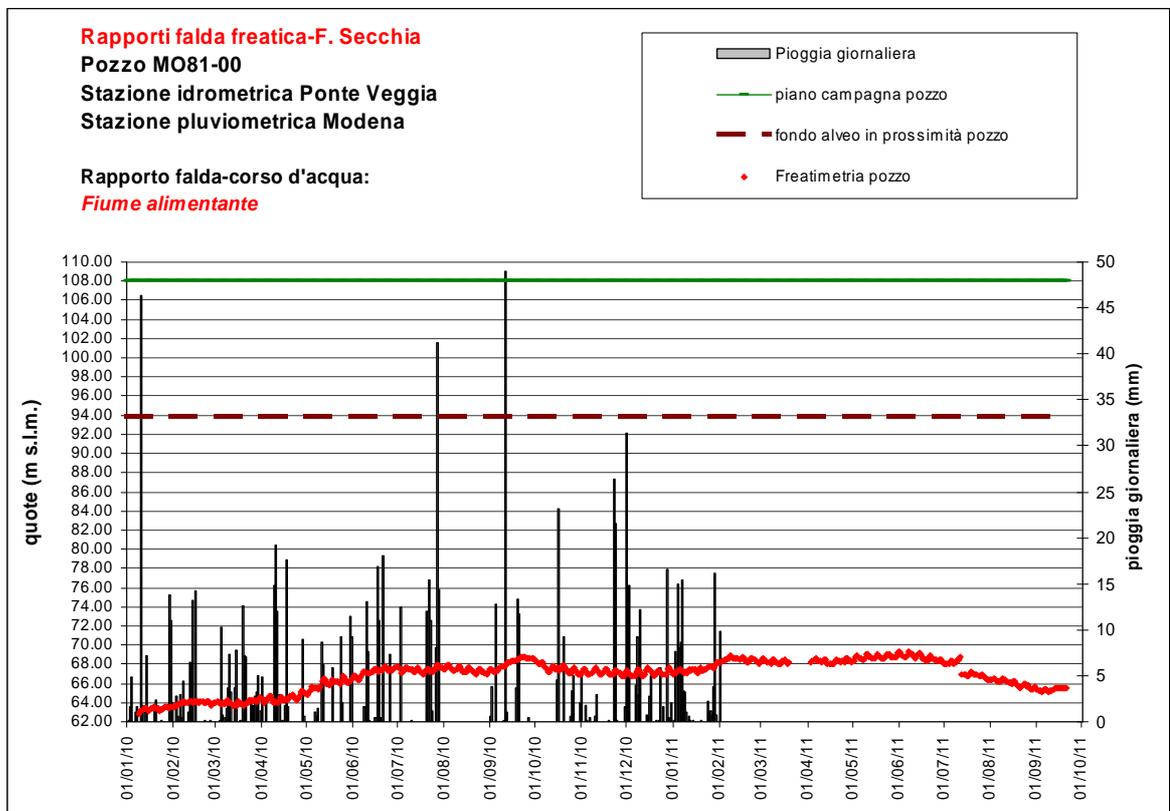


Figura 2.34: analisi dei rapporti falda fiume, caso Fiume Secchia in prossimità del pozzo MO81-00



Nel caso della stazione idrometrica Spilamberto, le altezze idrometriche risultano attendibili rispetto alla quota dello zero idrometrico (62.76 m s.l.m.) tratta dagli annali idrologici 2008 e 2009 e in accordo con la quota di fondo alveo (62.72 m s.l.m.) della vicina Sezione 23 A rilevata nel 1991 sul F. Panaro e con la quota della C.T.R. in corrispondenza di una barra fluviale 130 m più a monte (64.2 m s.l.m.).

Partendo dai tiranti idrici riferiti al fondo alveo della sezione 23 A, questi sono poi stati opportunamente ricalcolati in corrispondenza della Sezione 20 (del rilievo Panaro 69) ubicata circa 1600 m più a monte nel punto più vicino al pozzo MO64-00. Per i calcoli è stata utilizzata la formula di Manning semplificata, riportata qui di seguito, ipotizzando sezioni fluviali di forma rettangolare e con larghezze significative:

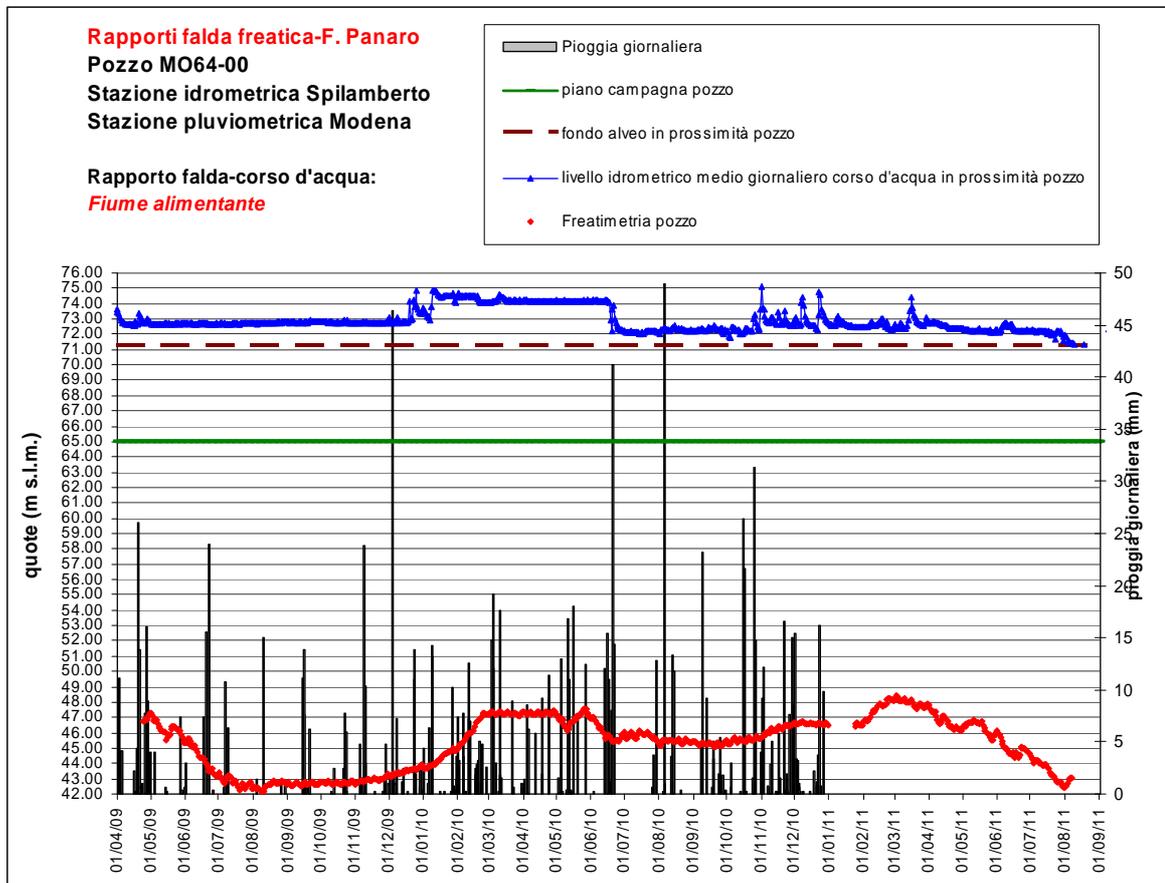
$$h_2 = h_1 (L_1/L_2)^{0.6}, \quad \text{dove:}$$

- $h_2$  è il tirante idrico del corso d'acqua nella sezione più vicina al pozzo;
- $h_1$  è il tirante idrico del corso d'acqua nella sezione in corrispondenza della stazione idrometrica;
- $L_1$  è la larghezza dell'alveo bagnato del corso d'acqua nella sezione in corrispondenza della stazione idrometrica;
- $L_2$  è la larghezza dell'alveo bagnato del corso d'acqua nella sezione più vicina al pozzo.

Una volta calcolati i valori di  $h_2$ , questi sono poi stati sommati alla quota di fondo alveo più prossima al pozzo, in modo da ottenere così i livelli idrometrici assoluti nella sezione più vicina al pozzo.

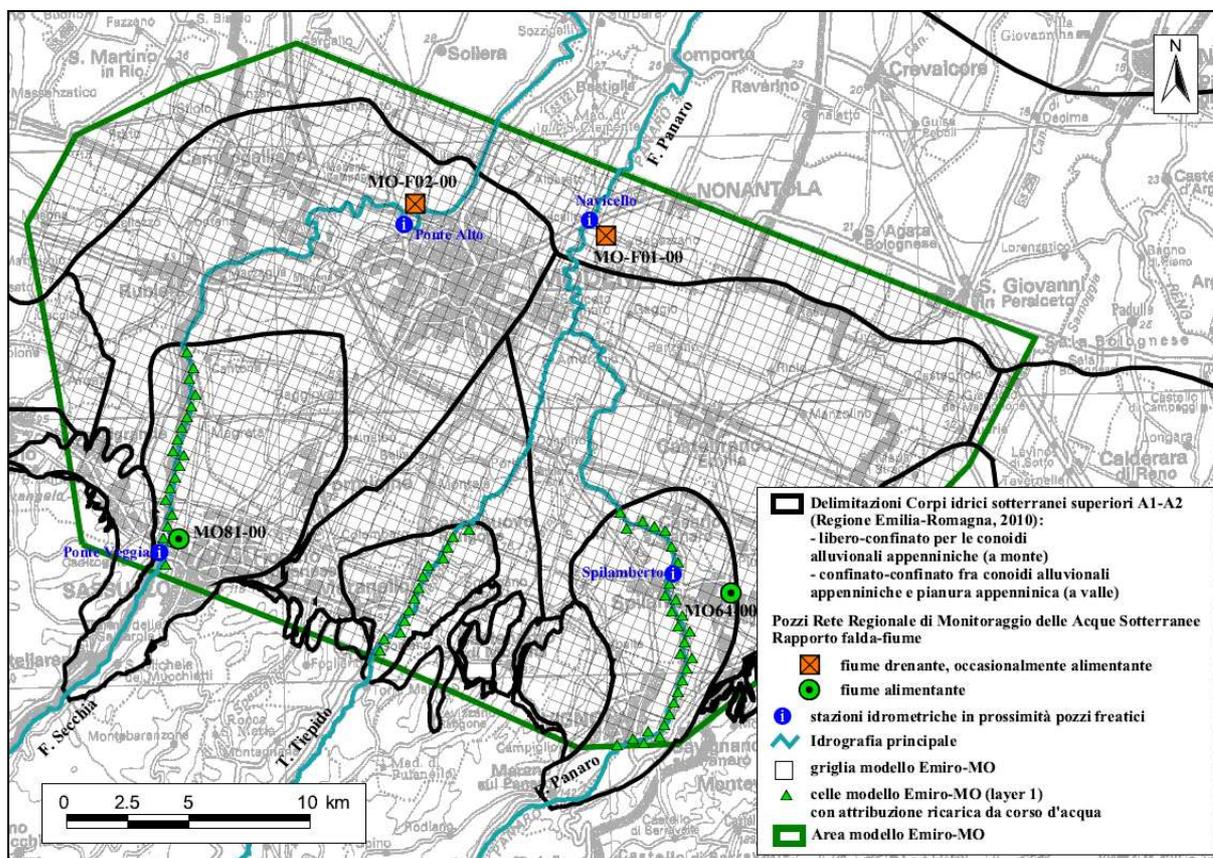
Concludendo dal grafico di Figura 2.35. si evince che il F. Panaro all'altezza del pozzo MO64-00, durante l'anno idrologico, è sempre alimentante, (in accordo con quanto già espresso nei lavori precedenti) in quanto la falda presenta livelli freaticometrici inferiori dai 24 ai 32 m rispetto ai livelli idrometrici del F. Panaro e comunque sempre al di sotto del fondo alveo di 23-29 m..

Figura 2.35: analisi dei rapporti falda fiume, caso Fiume Panaro in prossimità del pozzo MO64-00



In Figura 2.36 viene riportata l'attribuzione alle celle del modello Emiro-MO della ricarica dovuta al contributo del F. Secchia, del T. Tiepido e del F. Panaro. Si può vedere che le celle scelte sono quelle del layer 1 del modello ricadenti in corrispondenza dei tratti dei suddetti corsi d'acqua ubicati nelle porzioni apicali e centrali delle rispettive conoidi, laddove secondo la recente classificazione dei corpi idrici (Regione Emilia-Romagna (2010a). Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 2 “Tipizzazione/caratterizzazione e individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio”), si riscontra la presenza di falde libere in acquiferi di tipo monostrato costituiti per lo più da ghiaie amalgamate. L'analisi dei rapporti falda-fiume sui punti di controllo descritti in precedenza è stata condotta come ulteriore verifica ai fini della corretta individuazione delle zone di ricarica da parte dei F. Secchia e Panaro e conferma che tali corsi d'acqua alimentano la falda per tutto l'anno nelle porzioni apicali delle rispettive conoidi, mentre nelle porzioni distali si assiste ad un comportamento opposto in cui drenano la falda, eccetto che per episodi del tutto occasionali.

Figura 2.36: attribuzione alle celle del modello Emiro-MO della ricarica dei corsi d'acqua .



### 2.3.10.2 Possibile quantificazione dei volumi di ricarica

Per la quantificazione dell'alimentazione operata dai principali corsi d'acqua appenninici nei confronti delle acque sotterranee dell'area di studio si è fatto riferimento ai seguenti set di dati/informazioni:

1. ricostruzioni afflussi-deflussi per il periodo 1991-2001 del Piano di Tutela delle Acque [8] (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003d). *Bilanci idrici: aggiornamento dello stato attuale, scenari evolutivi e di azioni e misure di razionalizzazione, risparmio e riutilizzo*. Elaborato di supporto alla Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna);
2. dati relativi alle misure di ARPA SIMC per il periodo 2003-2010 per le stazioni di Bomporto per il Fiume Panaro e per le stazioni di Rubiera e Lugo per il Fiume Secchia;
3. misure sperimentali disponibili e correlazioni empiriche tra i valori di ricarica e quelli di portata in alveo relativamente ai Fiumi Secchia e Panaro [14] (Arpa Emilia-Romagna e

Regione Emilia-Romagna (2010a). Individuazione dei fattori correttivi costituenti la componente morfologia-ambientale del DMV e definizione dei tratti di loro applicazione, come da Art. 55 delle norme del Piano di Tutela delle Acque regionale. Elaborato: relazione valutazione del drenaggio verso le falde. Rapporto tecnico, 64 pp.);

4. i dati di livello della falda disponibili nei pozzi in conoide libera ed in prossimità dell'alveo del Fiume.

La modulazione dei dati di ricarica fluviale posta in ingresso al modello di flusso è riportata nelle seguenti figure e posta a confronto con i valori di ricarica meteorica, con le portate fluenti in alveo e con i dati piezometrici disponibili in prossimità dell'alveo fluviale.

Figura 2.37: Fiume Secchia, stima della ricarica verso le falde e confronto con le quote della falda in corrispondenza del fiume e con i valori di portata fluente in alveo.

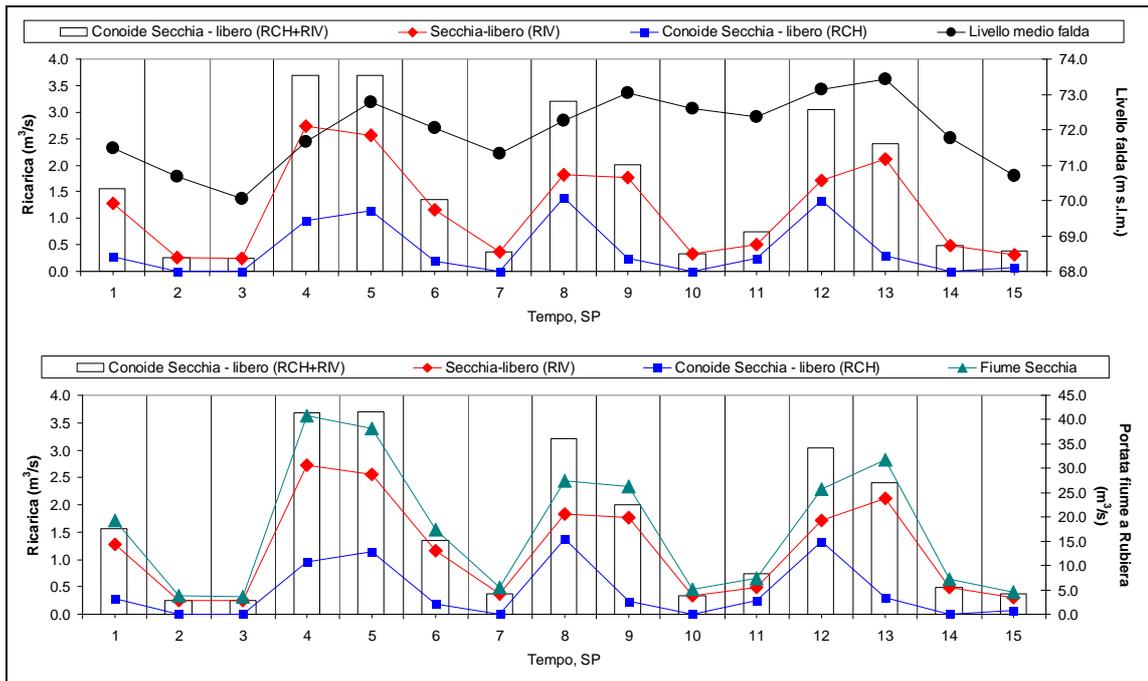


Figura 2.38: Torrente Tiepido, stima della ricarica verso le falde e confronto con le quote della falda in corrispondenza del fiume.

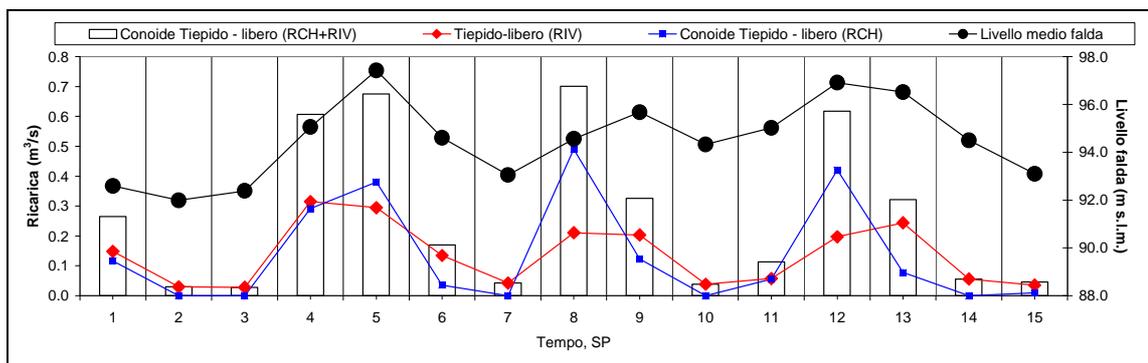
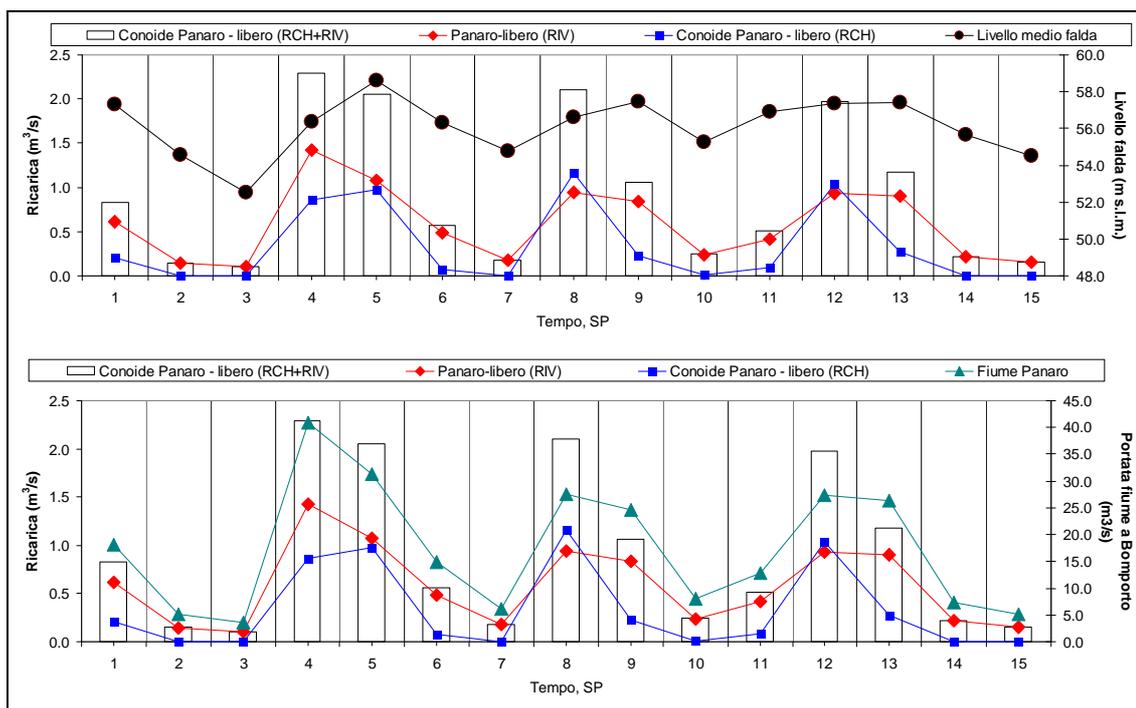


Figura 2.39: Fiume Panaro, stima della ricarica verso le falde e confronto con le quote della falda in corrispondenza del fiume e con i valori di portata fluente in alveo.



## 2.4 ATTIVITÀ 4: CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

La calibrazione del modello numerico è stata condotta all'interno del periodo 2002-2006 e quindi per i 15 stress periods indicati nella precedente Tabella 2.4.

### 2.4.1 Assetto delle permeabilità

Nella Figura 2.40 è riportata la frequenza di distribuzione delle permeabilità al termine della taratura, in funzione delle 5 principali classi litologiche di Figura 2.19. Nella Figura 2.41 viene invece riportata la distribuzione del coefficiente di immagazzinamento specifico.

Figura 2.40: Frequenza di distribuzione delle permeabilità orizzontali (m/s) a fine taratura.

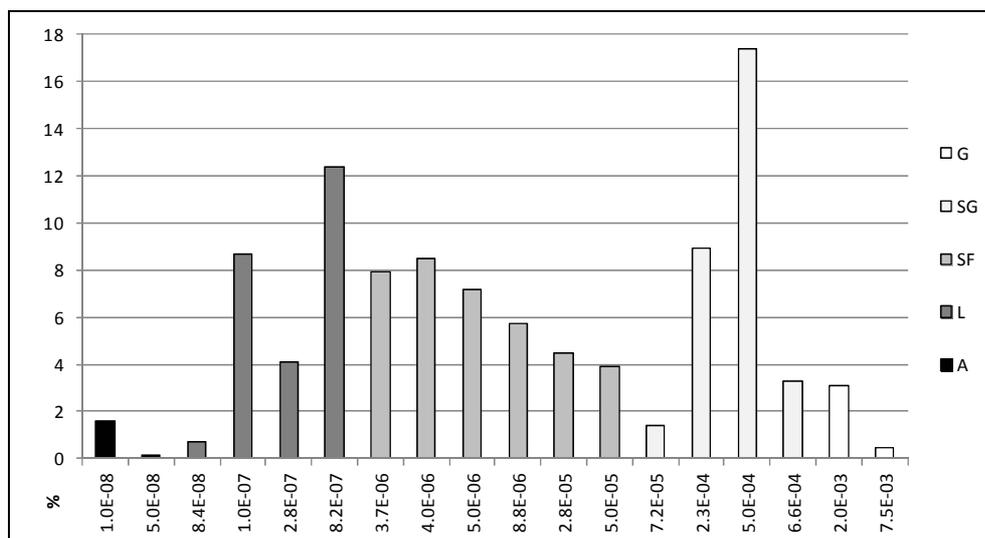
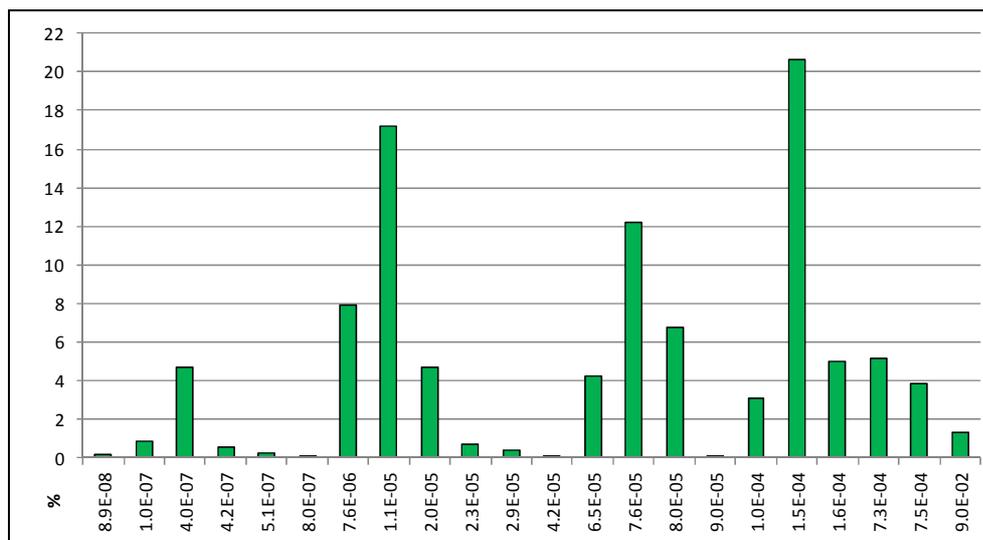


Figura 2.41: Frequenza di distribuzione del coefficiente di immagazzinamento specifico (1/m) a fine taratura.



L'analisi della distribuzione litologica del modello a fine taratura, permette di effettuare alcune considerazioni di massima riguardanti la ripartizione delle ghiaie, delle sabbie, dei limi e delle argille nei principali sistemi idrogeologici sedi degli acquiferi di interesse.

Complessivamente il 72.1% del volume degli acquiferi del modello risulta essere occupato da litologie riconducibili alle sabbie, di cui il 34.4% sono sabbie fini ( $k_h$  compreso fra  $1e^{-6}$  e  $5e^{-6}$  m/s) e il 37.8% sono sabbie grossolane ( $k_h$  compreso fra  $5e^{-5}$  e  $1e^{-3}$  m/s).

Le litologie asserite a litotipi limosi ( $k_h$  fra  $5e^{-8}$  e  $1e^{-6}$  m/s) occupano il 20.8% del volume totale, le ghiaie ( $k_h < di 1e^{-3}$  m/s) il 5.5% e infine le argille ( $k_h > di 5e^{-8}$  m/s) solo l'1.6%.

La Figura 2.42 mostra in percentuale la ripartizione litologica del modello, suddivisa nei 3 principali sistemi idrogeologici del modello quali la conoide del Panaro, la conoide del Tiepido e la conoide del Secchia. Confrontando fra di loro le litologie dei tre sistemi di conoide del modello, normalizzando a 100 i loro volumi (Figura 2.43), risulta che in gli acquiferi della conoide del Panaro sono in percentuale composti da litotipi sensibilmente più fini rispetto a quelli della conoide del Secchia. La conoide del Tiepido, in posizione mediana rispetto a quella del Panaro e del Secchia presenta valori intermedi fra le due.

Figura 2.42: Distribuzione litologica del modello.

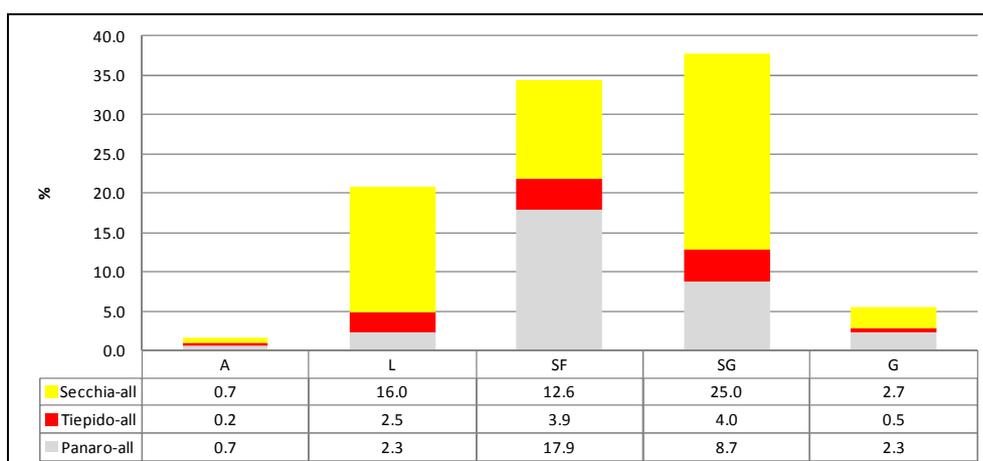
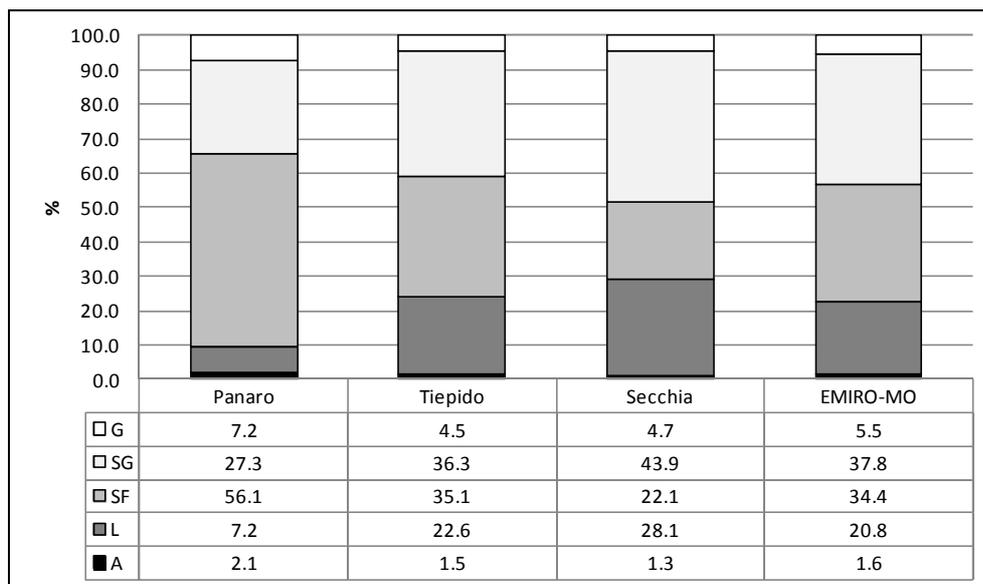


Figura 2.43: Distribuzione litologica relativa delle conoidi del Panaro, del Tiepido e del Secchia.



Nelle figure successive viene invece mostrata la distribuzione spaziale delle permeabilità lungo alcuni tagli del modello realizzati lungo alcune sezioni verticali appartenenti rispettivamente alla conoide del Secchia, del Tiepido e del Panaro.

Figura 2.44: distribuzione della permeabilità orizzontale a fine taratura. Vista 3D.

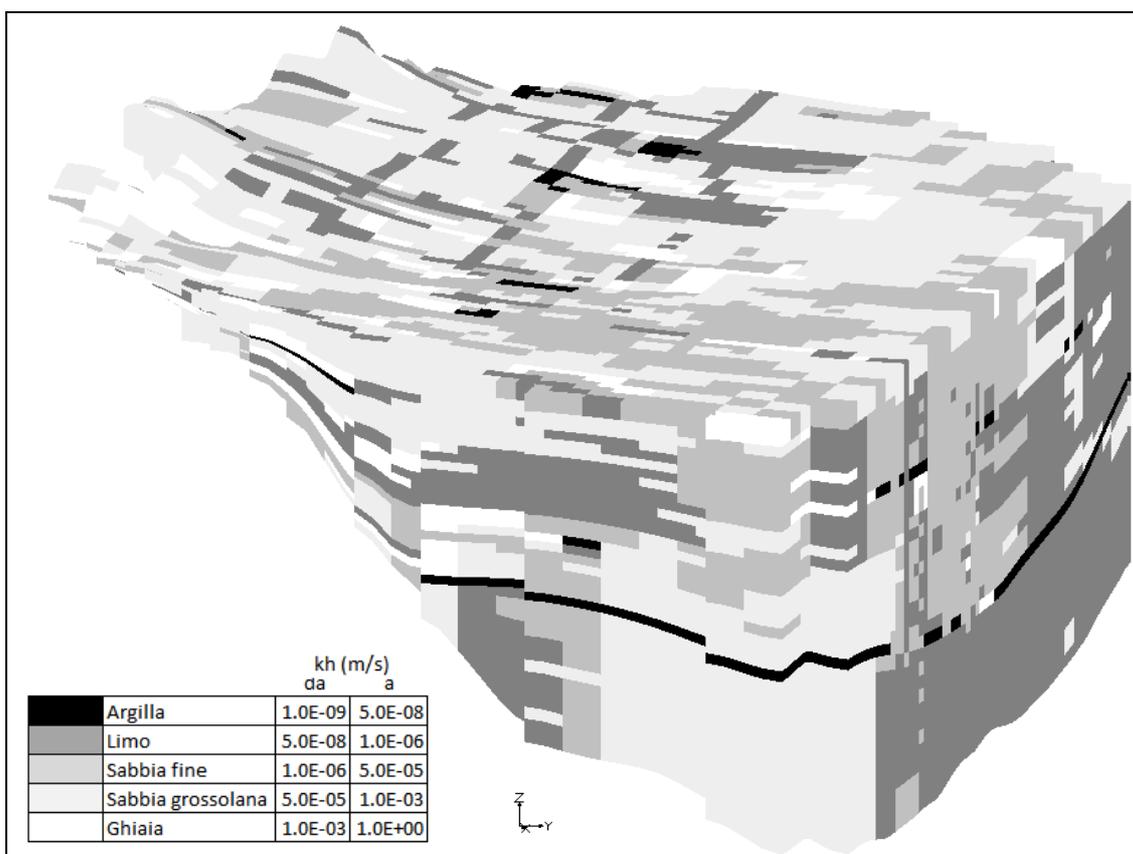


Figura 2.45: distribuzione della permeabilità orizzontale a fine taratura lungo una sezione trasversale della conoide del Secchia (J22).

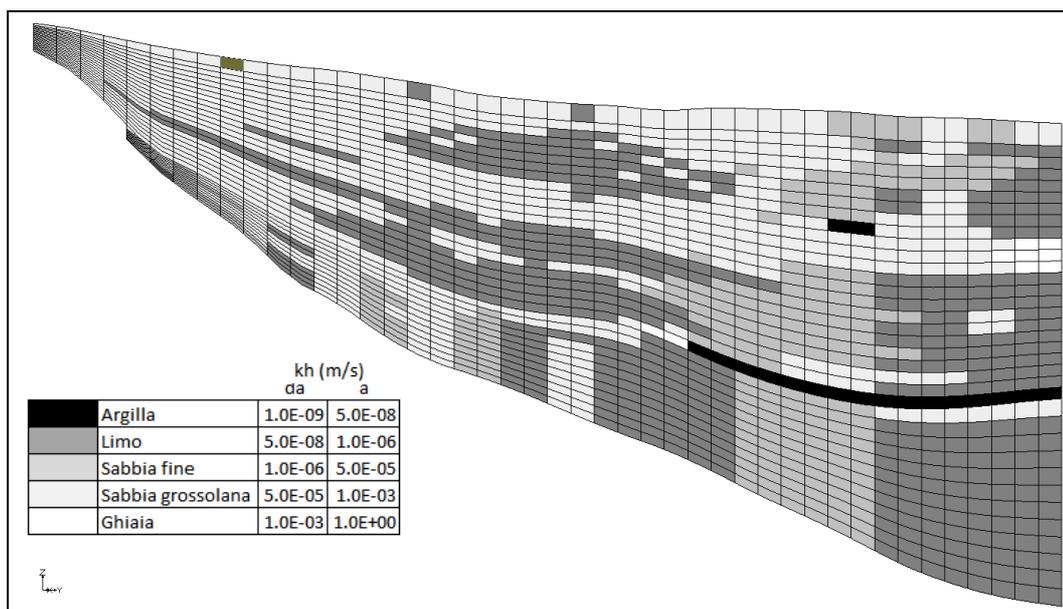


Figura 2.46: distribuzione della permeabilità orizzontale a fine taratura lungo una sezione trasversale della conoide del Tiepido (J45).

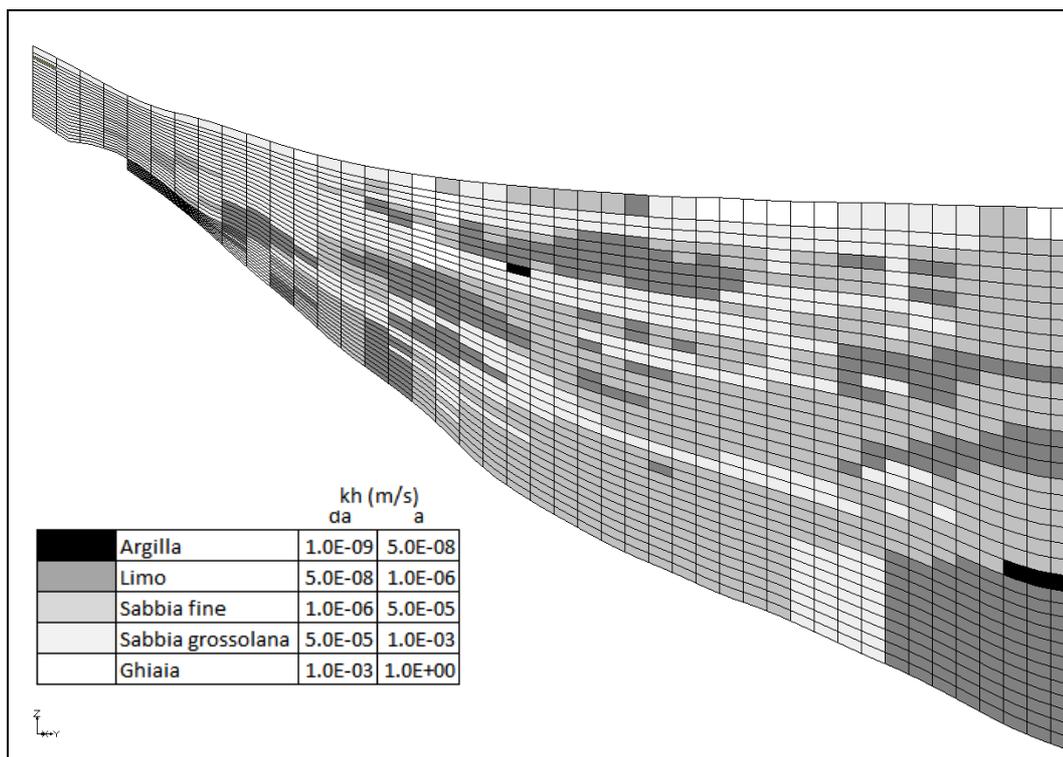


Figura 2.47: distribuzione della permeabilità orizzontale a fine taratura lungo una sezione trasversale della conoide del Panaro (J60).

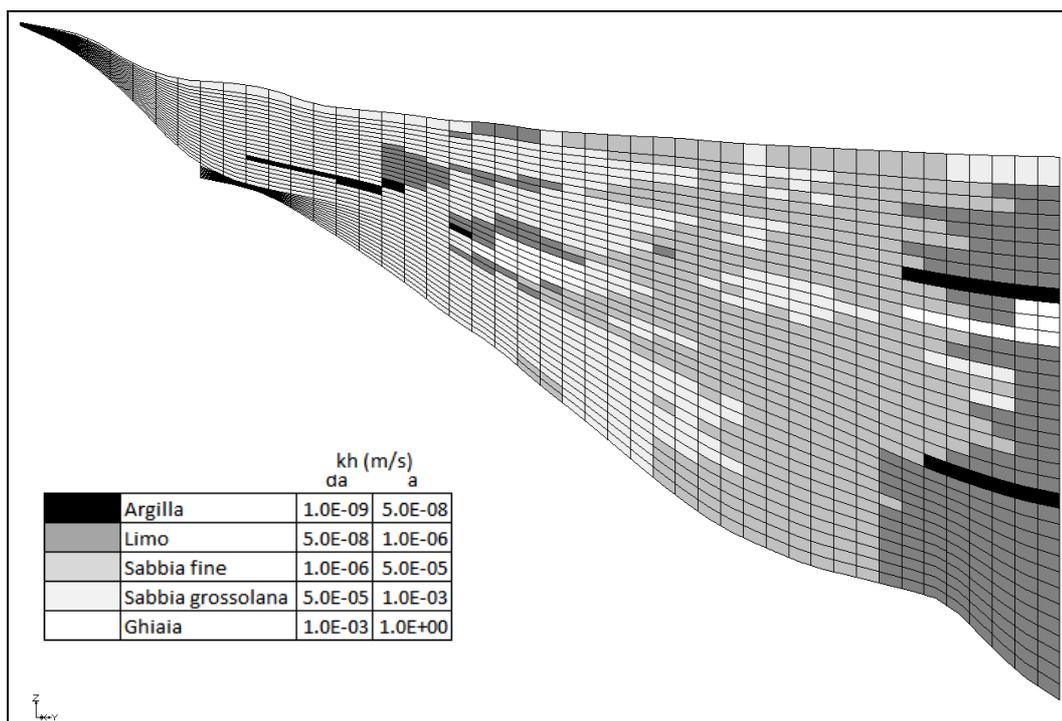
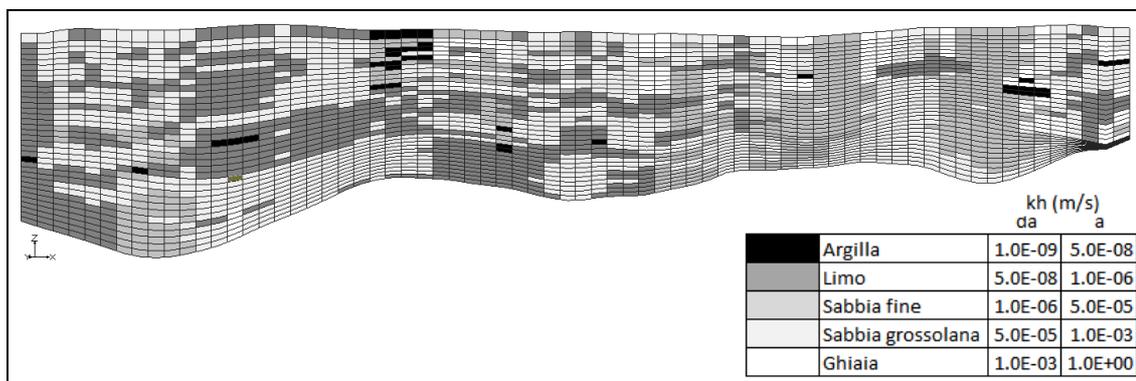


Figura 2.48: distribuzione della permeabilità orizzontale a fine taratura lungo una sezione longitudinale (I28).



## 2.4.2 Assetto del flusso

Il modello di flusso delle acque sotterranee Emiro-MO restituisce nel tempo, per ognuno dei 15 stress period precedentemente definiti in Tabella 2.4 i valori dei carichi idraulici calcolati su ciascuna delle celle del modello.

Qui di seguito vengono riportati alcuni esempi della distribuzione dei carichi idraulici, visualizzabili sia in pianta sui singoli layer del modello (da Figura 2.49 a Figura 2.51), sia in sezioni trasversali (da Figura 2.52 a Figura 2.57) e sia in sezioni longitudinali (Figura 2.58).

È possibile osservare la presenza di un alto piezometrico nella porzione apicale e centrale della conoide del Tiepido, mentre le adiacenti conoidi del Secchia e del Panaro richiamano acqua dai bordi verso le porzioni centrali; invece più a valle nelle porzioni distali si assiste ad una inversione di comportamento, ovvero l'acqua si muove verso i bordi delle conoidi.

Si può inoltre osservare nel complesso che il trend dei carichi idraulici nel periodo di simulazione 2003-2006 mostra un'evoluzione crescente, ovvero il sistema accumula acqua.

I gradienti idraulici sono più elevati nelle porzioni apicali delle conoidi e, come è logico aspettarsi, diminuiscono via via spostandosi verso valle. Schematicamente è possibile a grandi linee individuare tre fasce dell'area di studio modellata, caratterizzate da gradienti idraulici con valori dell'ordine di

grandezza dello 0.7-2 %, per le porzioni apicali delle conoidi, 0.2-0.5 % per le porzioni centrali e 0.15-0.1 % per quelle distali.

Figura 2.49: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.): visualizzazione in pianta - layer 23 - stress period 1.

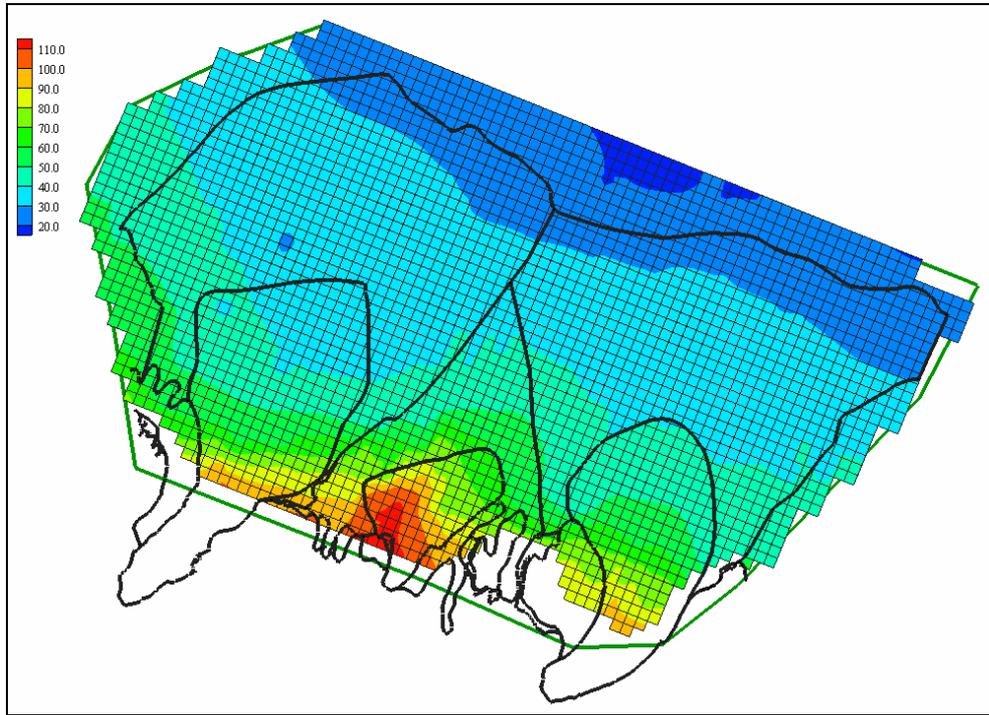


Figura 2.50: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.): visualizzazione in pianta - layer 23 - stress period 5.

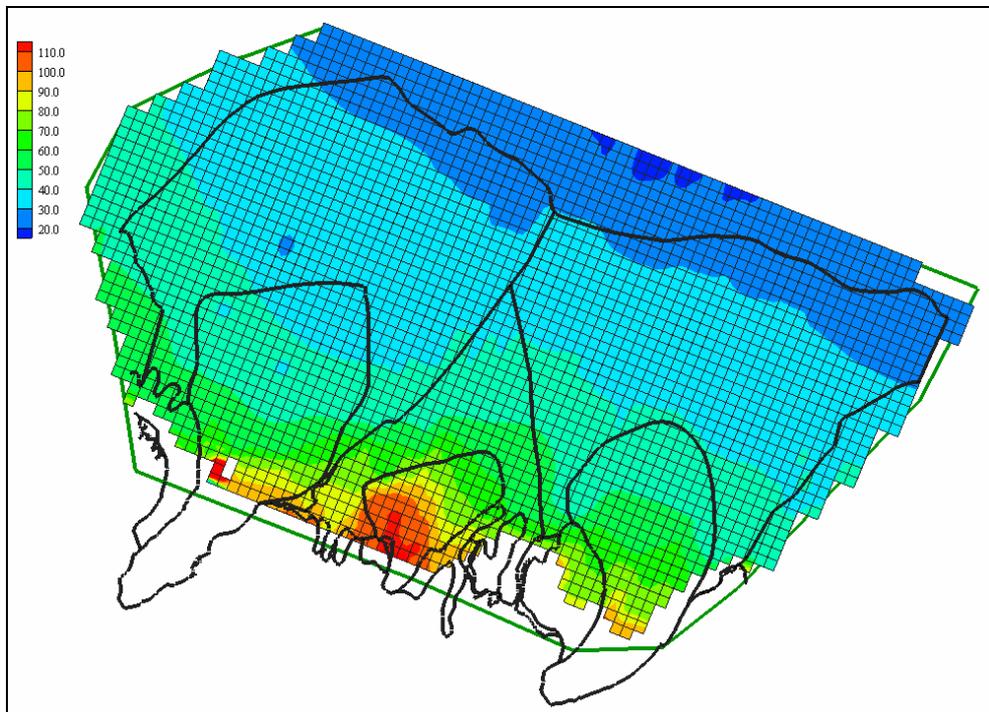


Figura 2.51: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.): visualizzazione in pianta layer 23 - stress period 13.

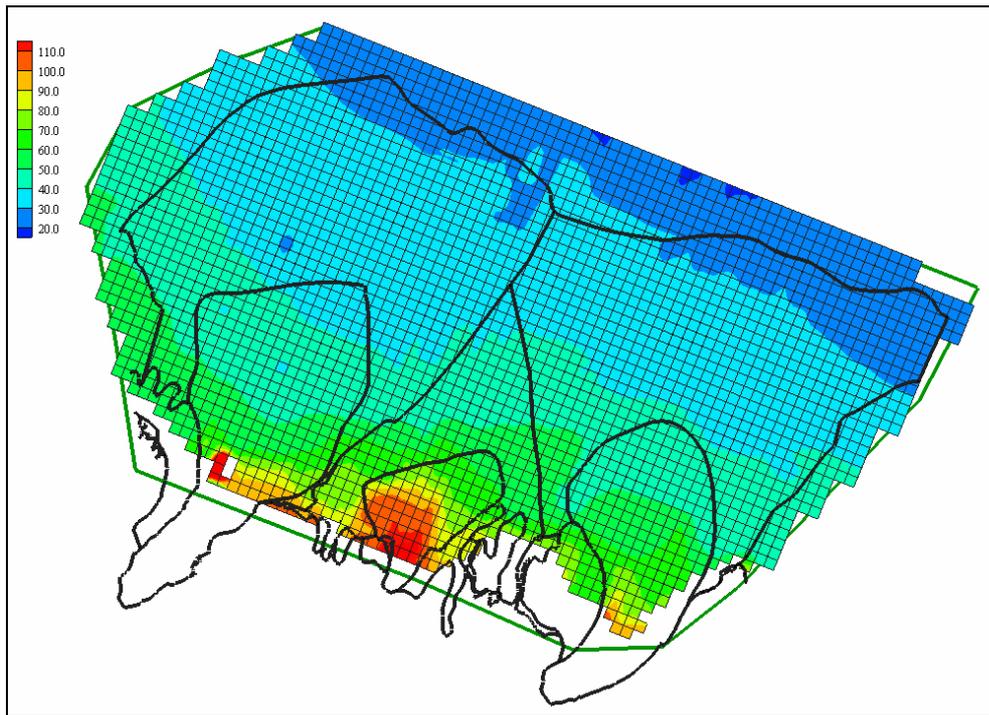


Figura 2.52: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.): visualizzazione in sezione trasversale (J24) sulla conoide del Secchia - stress period 1. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

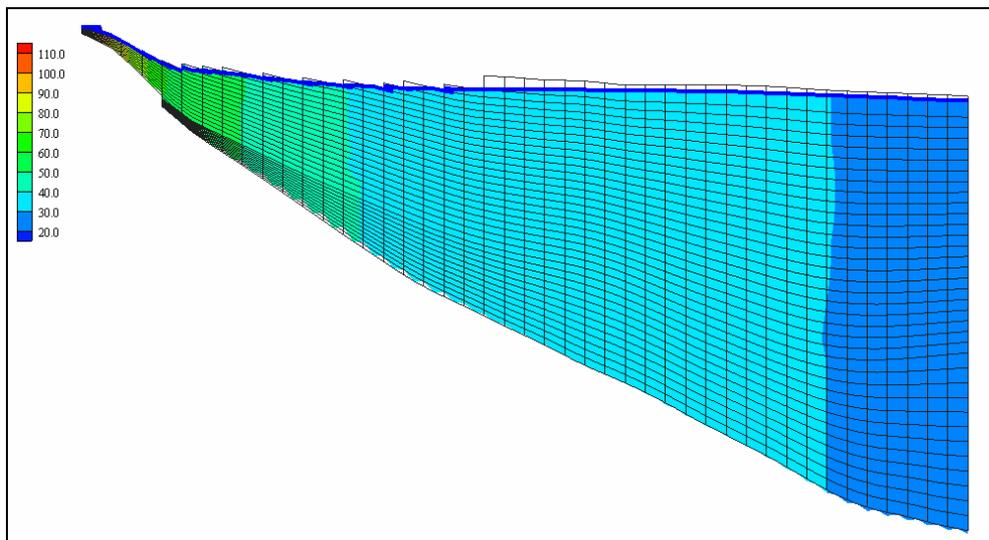


Figura 2.53: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione trasversale (J24) sulla conoide del Secchia - stress period 13. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

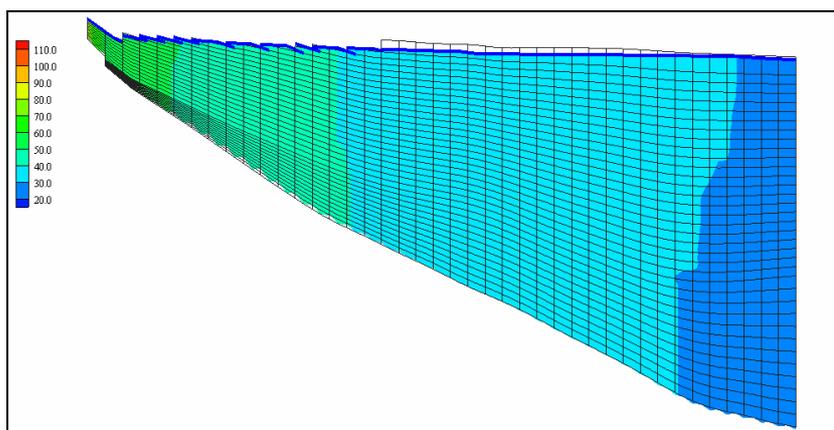


Figura 2.54: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione trasversale (J42) sulla conoide del Tiepido - stress period 1. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

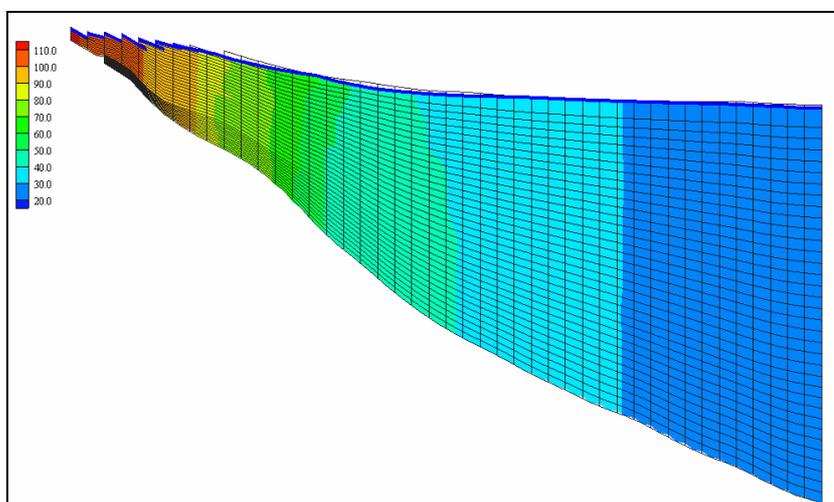


Figura 2.55: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione trasversale (J42) sulla conoide del Tiepido - stress period 13. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

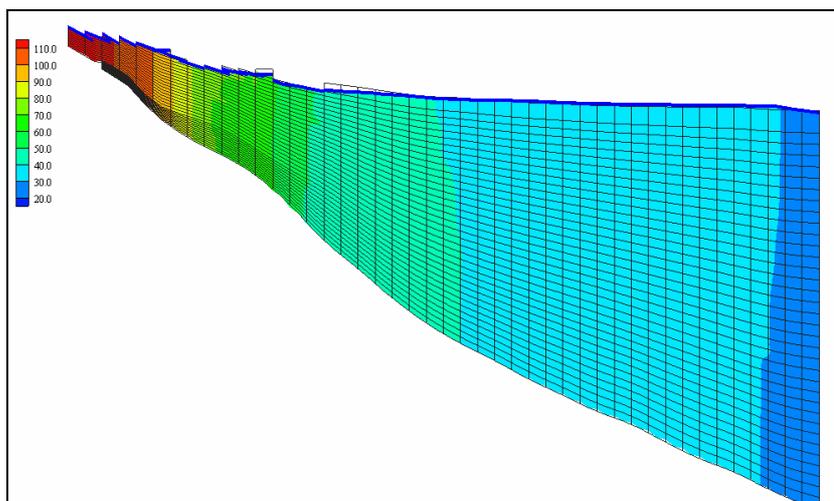


Figura 2.56: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione trasversale (J64) sulla conoide del Panaro - stress period 1. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

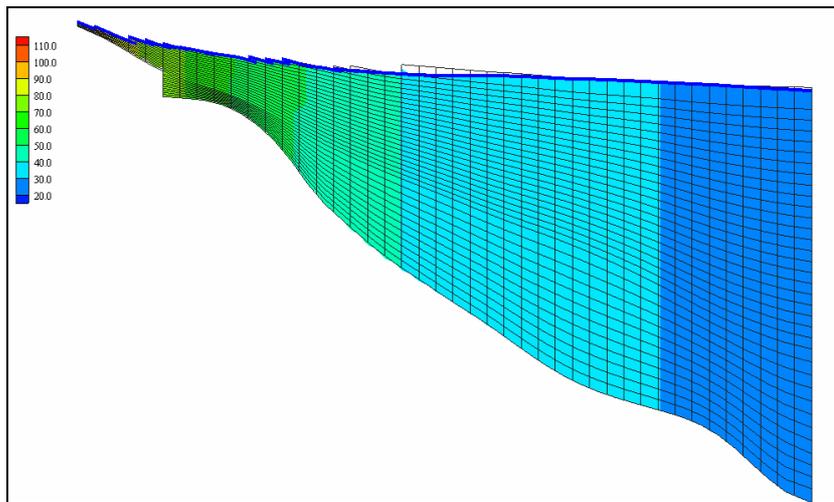


Figura 2.57: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione trasversale (J64) sulla conoide del Panaro - stress period 13. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.

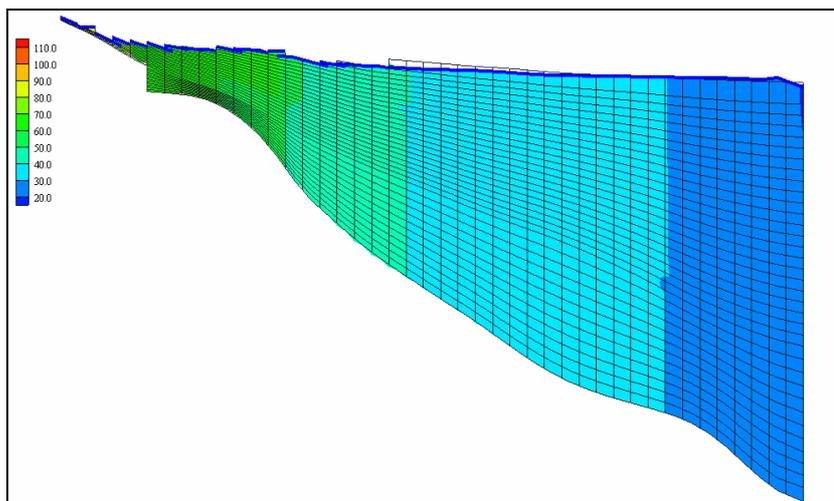
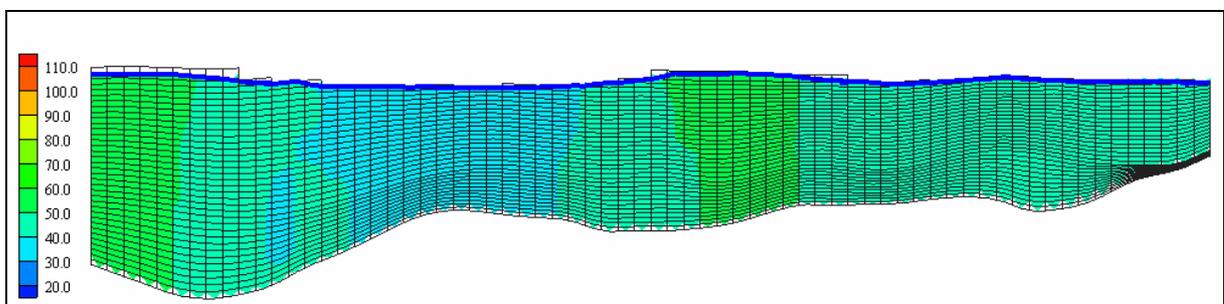


Figura 2.58: distribuzione dei carichi idraulici (m s.l.m.) :esempio di visualizzazione in sezione longitudinale I29 - stress period 1. Note: la linea blu rappresenta la tavola d'acqua.



### 2.4.3 Controllo della taratura

Il controllo della taratura del modello avviene attraverso la verifica diretta della corrispondenza fra i valori dei carichi idraulici calcolati dal modello e le serie storiche osservate. La taratura è stata condotta attraverso il controllo di complessivi 113 punti di misura secondo la disponibilità temporale

articolata in Tabella 2.2. Sono stati quindi utilizzati 103 pozzi per la calibrazione del primo anno, in corrispondenza dei primi 4 stress periods del modello e 76 per i successivi 11 istanti temporali. L'attuale copertura temporale del modello copre l'intervallo di tempo compreso tra il mese di febbraio 2003 ed il mese di ottobre 2006.

Nelle figure che seguono sono riportati i grafici rappresentativi del livello di affinamento ottenuto dalla fase di calibrazione del modello.

Nelle figure comprese tra la Figura 2.59 e la Figura 2.66 è riportato l'usuale confronto tra i valori calcolati dal modello ed i valori osservati in tutti i punti utilizzati per il controllo della calibrazione ed in alcuni istanti di tempo. Rispetto alla discretizzazione temporale adottata per il modello (Tabella 2.4) vengono rappresentati gli istanti più vicini all'effettiva disponibilità delle misure nel tempo.

Nelle successive figure (da Figura 2.67 a Figura 2.75) vengono invece riportati gli andamenti dei carichi idraulici nei 15 stress period su alcuni punti di controllo per ciascuna conoide dell'area di studio, ritenuti esempi rappresentativi del comportamento dei principali corpi idrici sotterranei: libero, confinato superiore e confinato inferiore.

Figura 2.59: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T1.

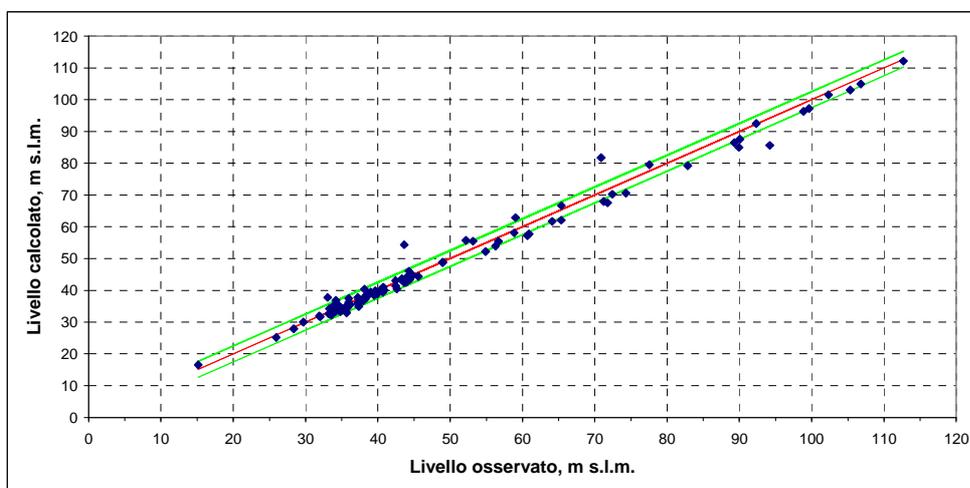


Figura 2.60: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T3.

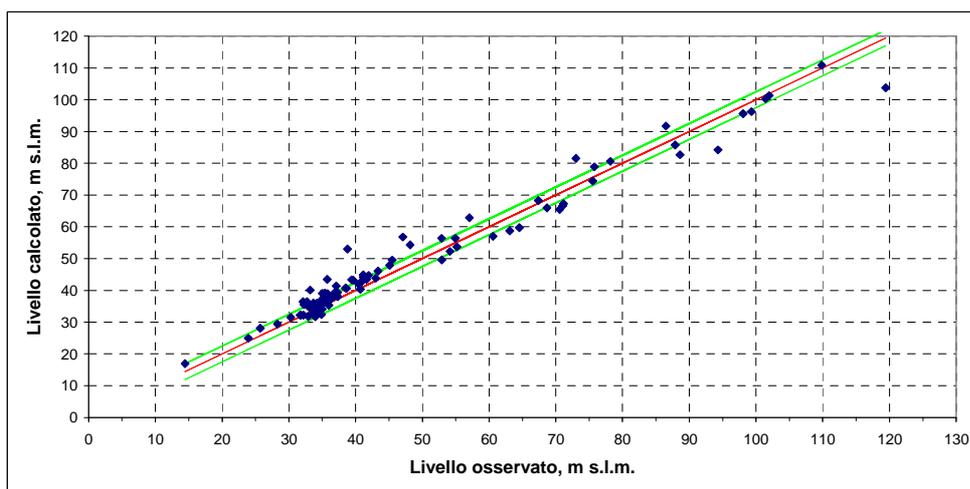


Figura 2.61: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T5.

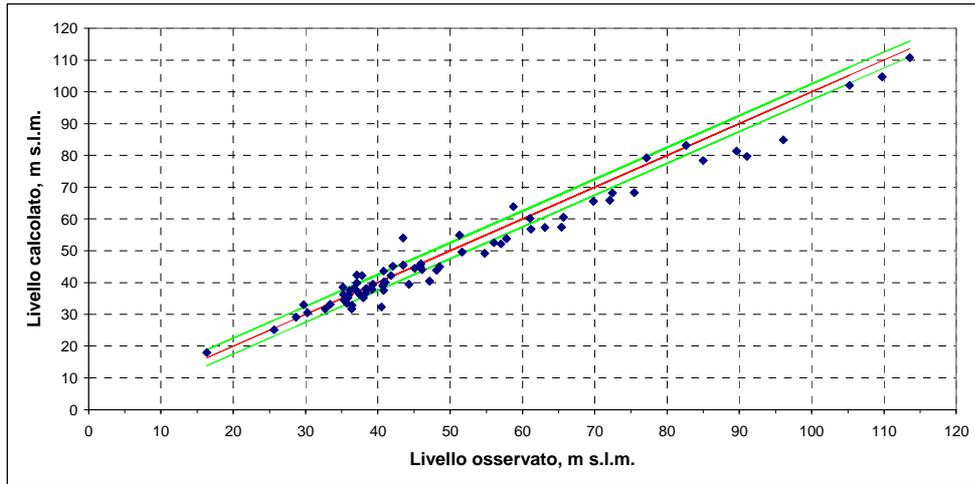


Figura 2.62: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T7.

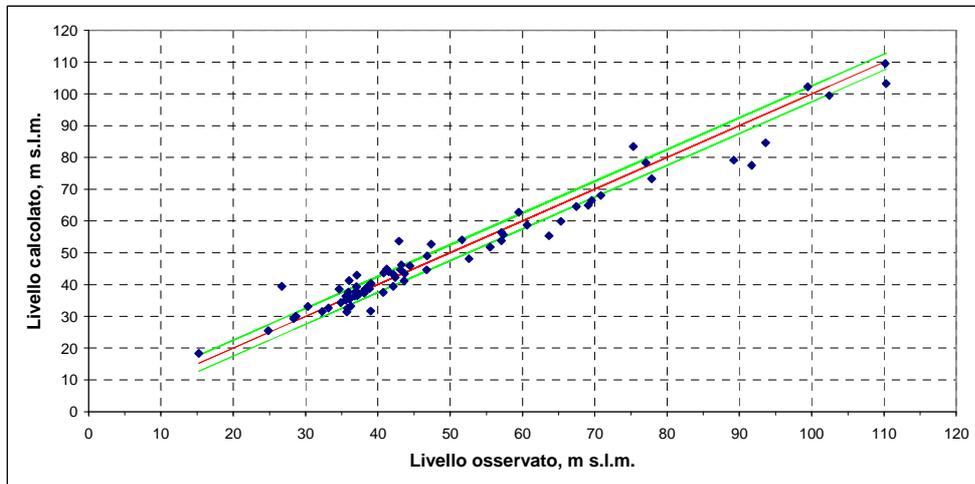


Figura 2.63: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T9.

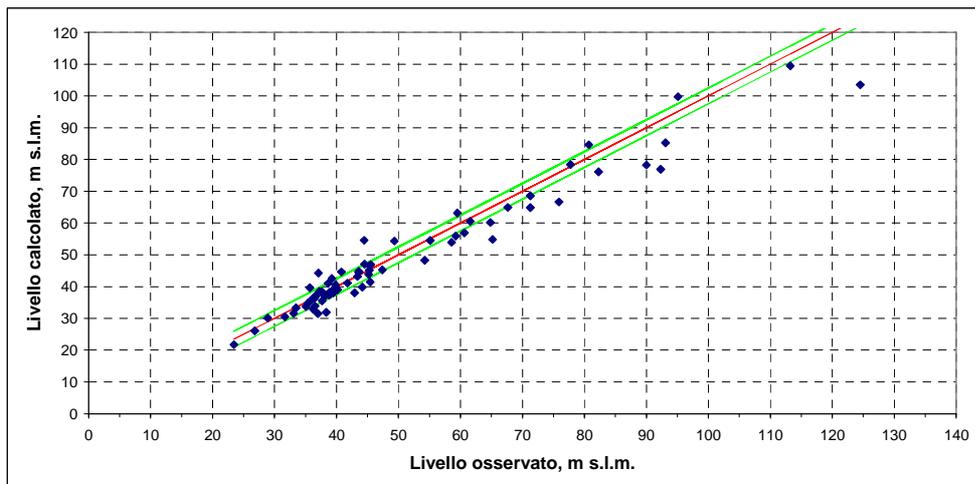


Figura 2.64: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T11.

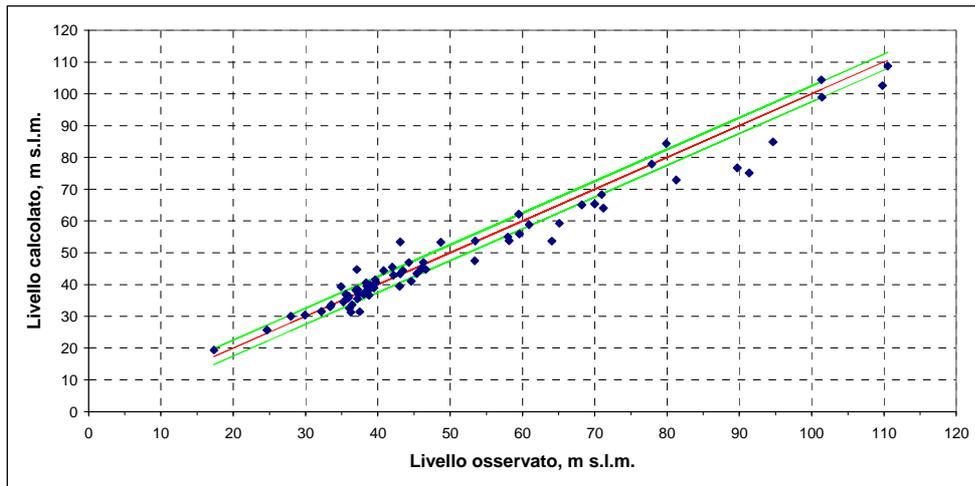


Figura 2.65: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T13.

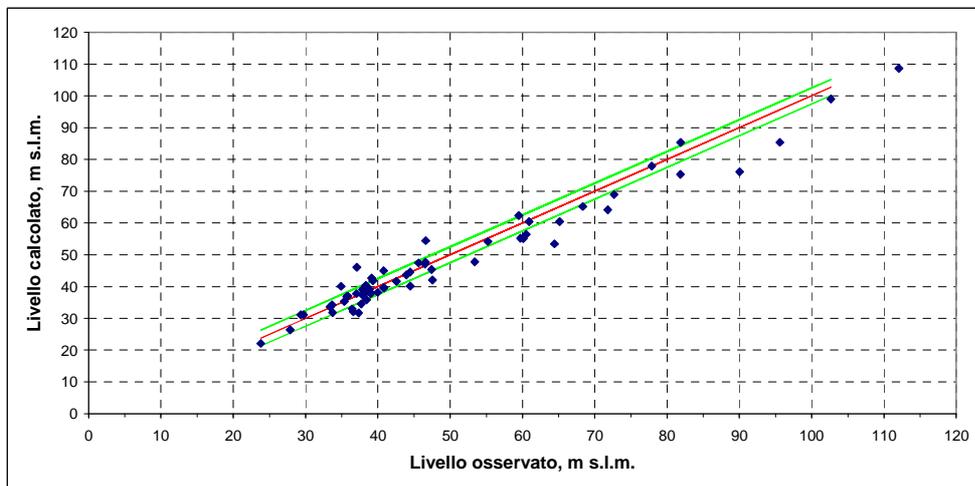


Figura 2.66: confronto tra i carichi idraulici osservati e calcolati dal modello (scatter plot): istante T15.

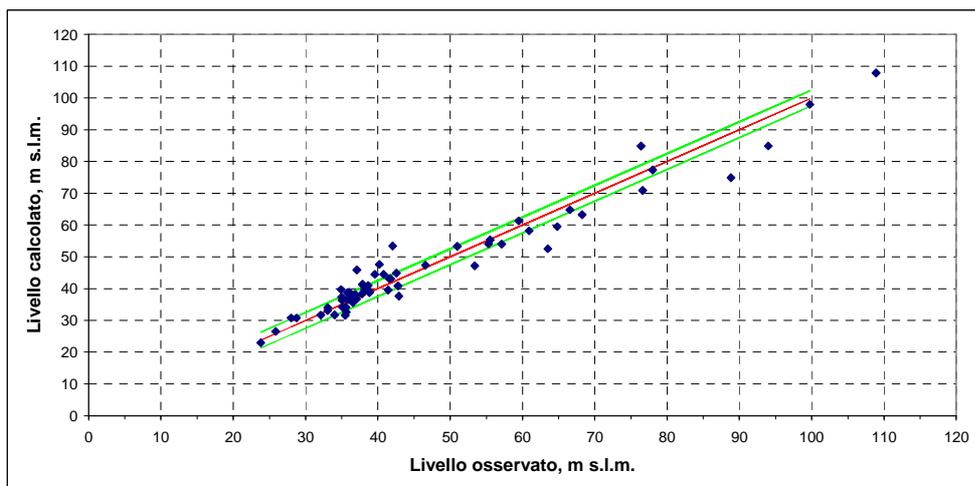


Figura 2.67: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo di controllo MO36-00, conoide del Secchia, Complessi Acquiferi A3-A4-libero.

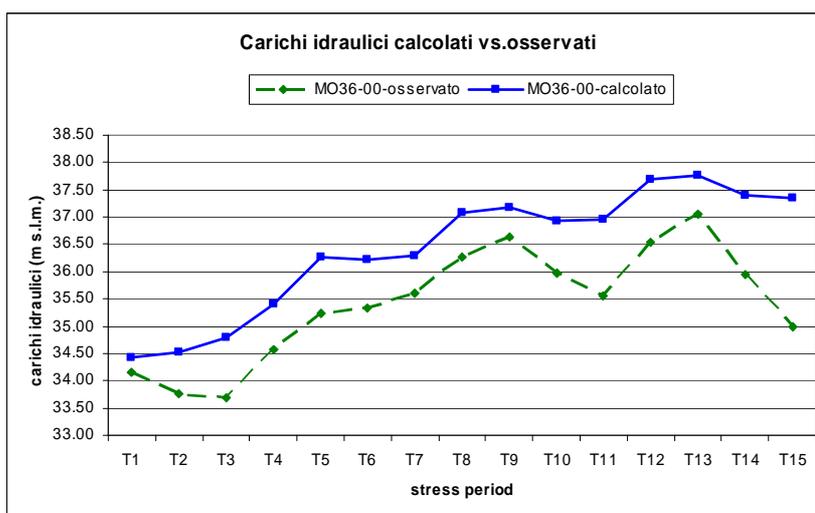


Figura 2.68: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo di controllo MO19-00, conoide del Secchia, Complessi Acquiferi A1-A2-confinato superiore.

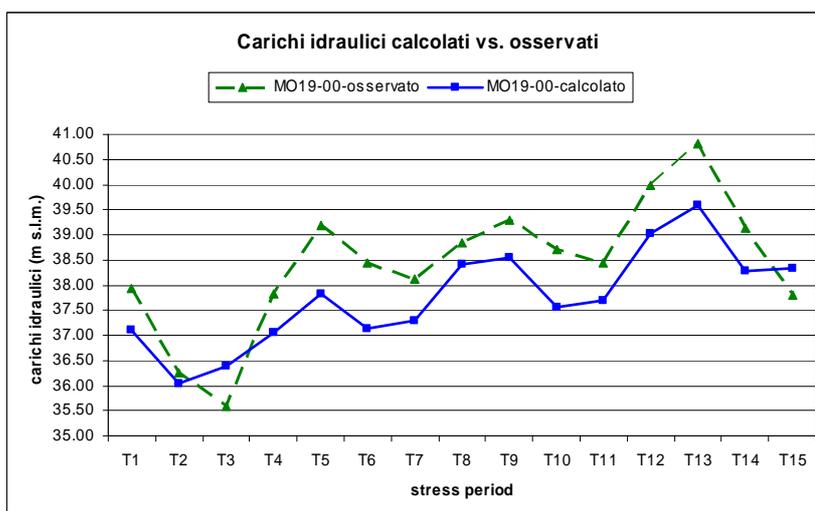


Figura 2.69: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo di controllo MO72-01, conoide del Secchia, Complessi Acquiferi A3-A4-confinato inferiore.

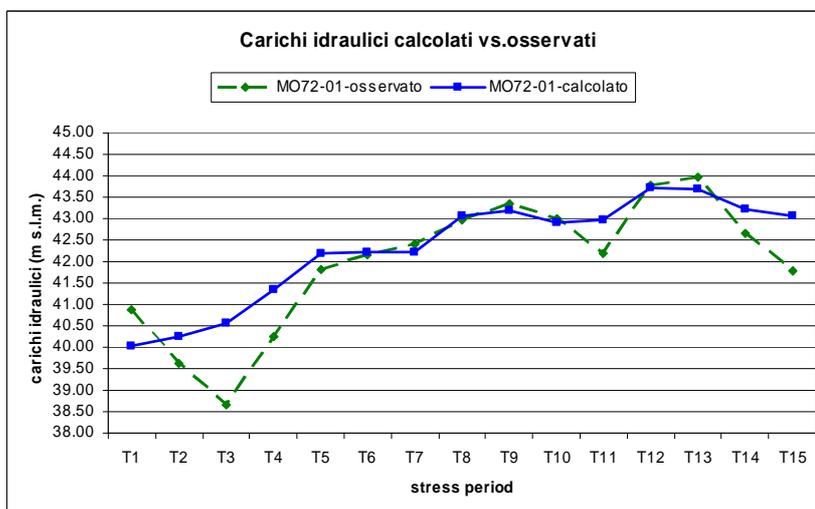


Figura 2.70: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo di controllo MO53-00, conoide del Panaro, Complesso Acquifero A1- libero.

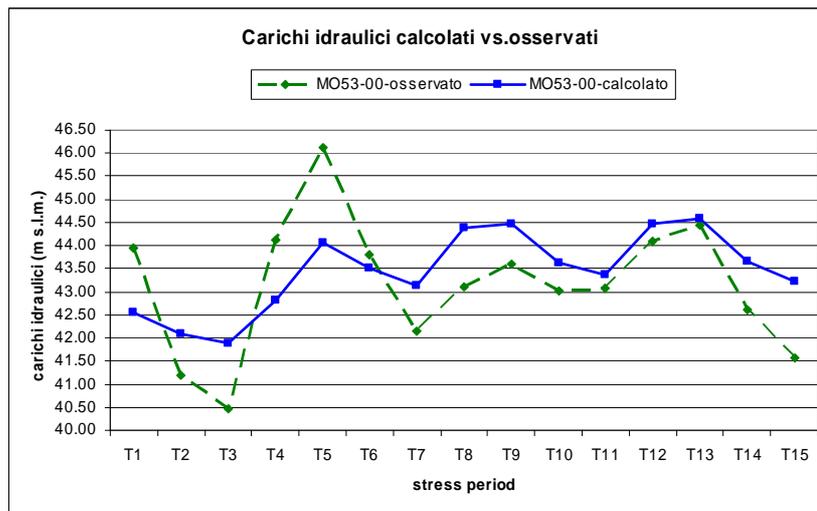


Figura 2.71: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo di controllo MO22-01, conoide del Panaro, Complesso Acquifero A1-confinato superiore.

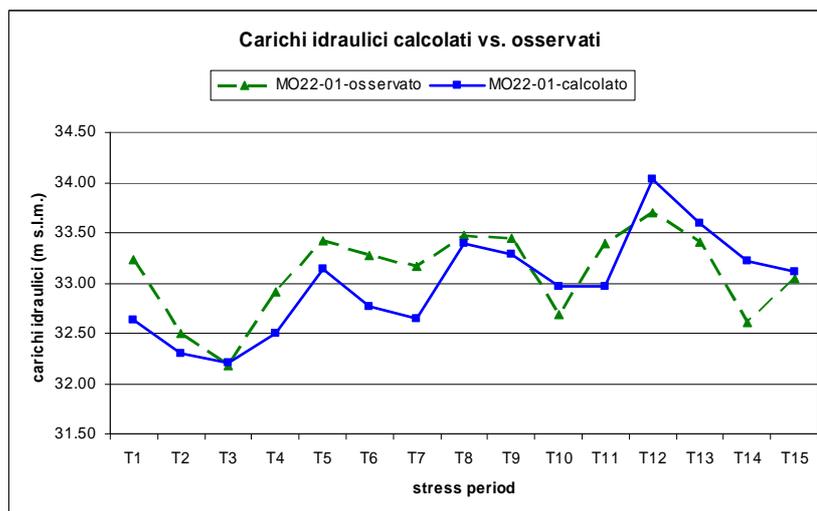


Figura 2.72: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello e quelli osservati sul pozzo BO11-01, conoide del Panaro, Complessi Acquiferi A2-A3-A4-confinato superiore e confinato inferiore.

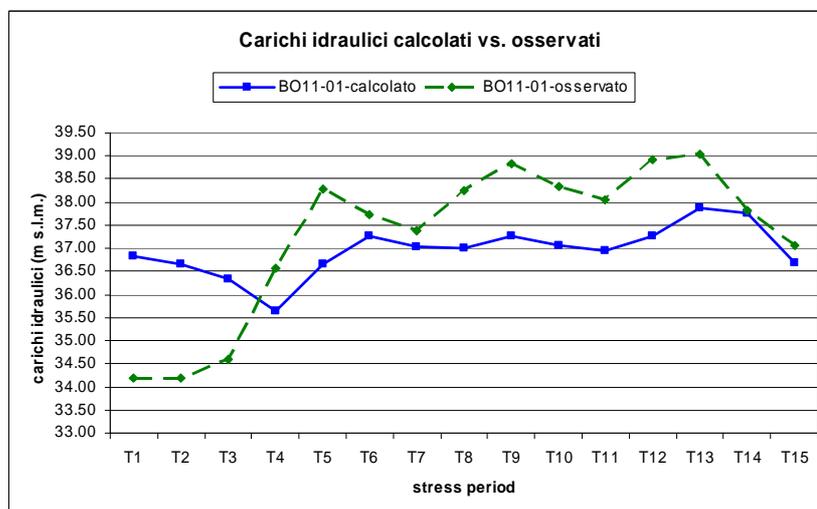


Figura 2.73: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello Emiro-MO e quelli osservati sul pozzo di controllo MO-011, conoide del Tiepido, Complesso Acquifero A2-libero.

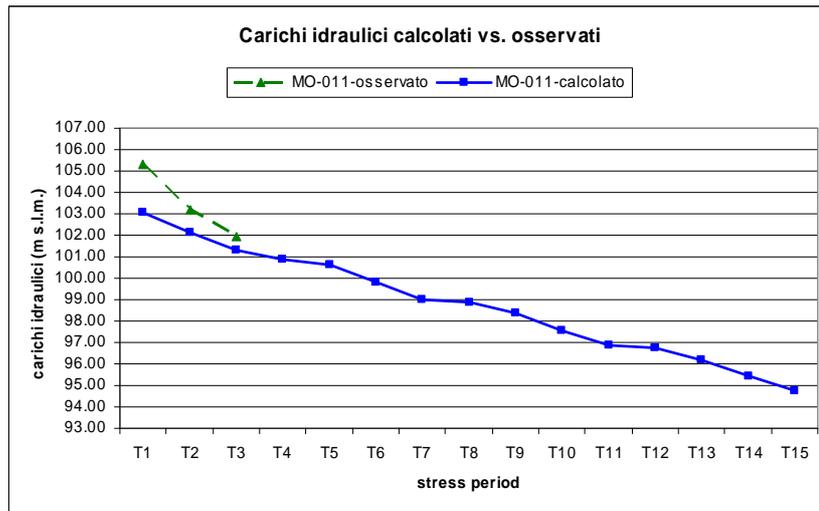


Figura 2.74: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello Emiro-MO e quelli osservati sul pozzo di controllo MO28-01, conoide del Tiepido, Complesso Acquifero A2-confinato superiore.

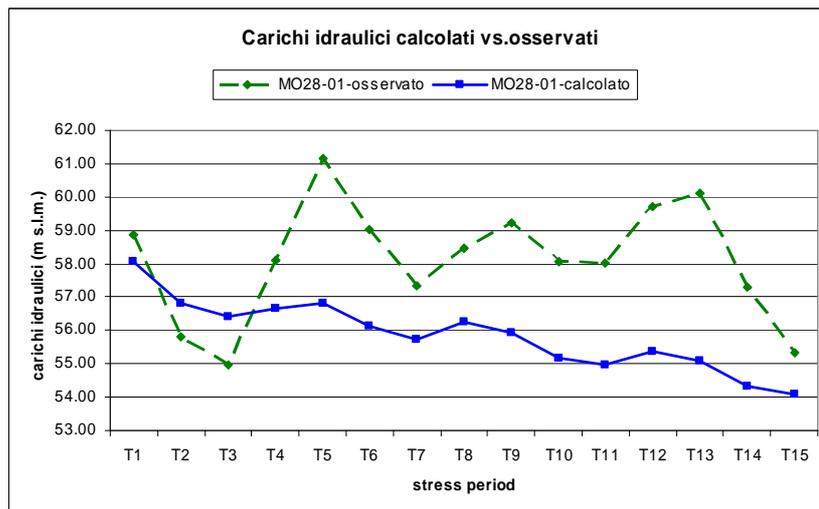
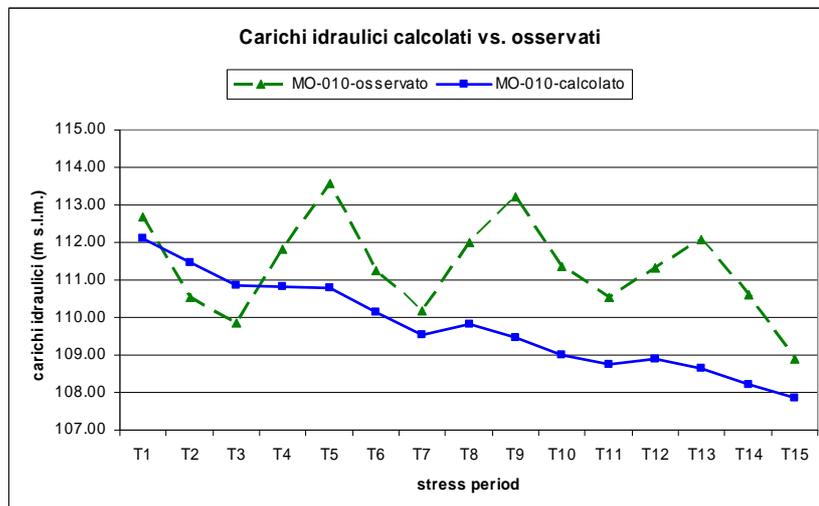


Figura 2.75: confronto tra i carichi idraulici calcolati dal modello Emiro-MO e quelli osservati sul pozzo di controllo MO-010, conoide del Tiepido, Complessi Acquiferi A3-A4-confinato inferiore.

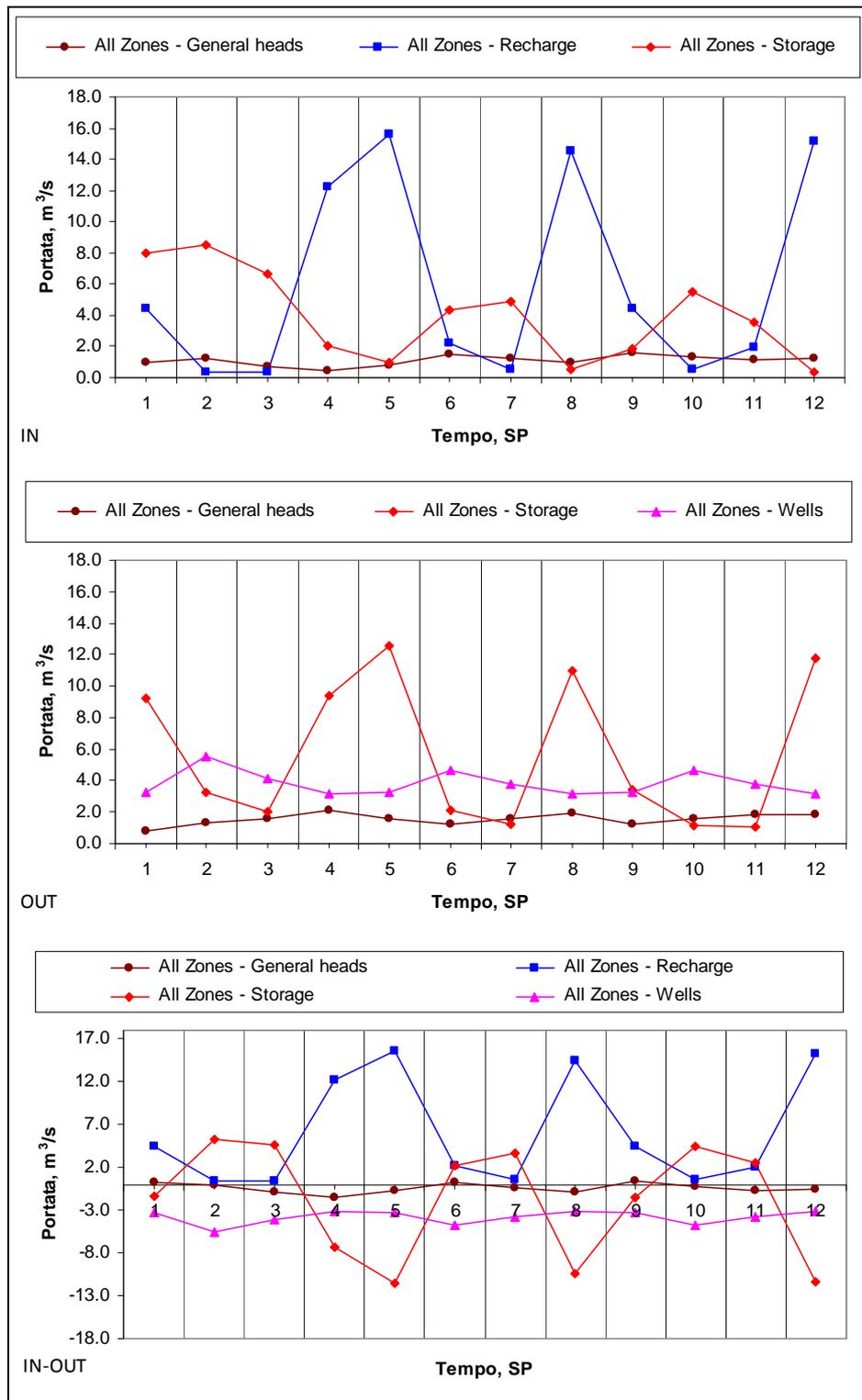


## 2.4.4 Analisi del bilancio

Un ulteriore controllo della bontà del modello matematico si effettua verificando il bilancio idrogeologico. In questo modo si può verificare se viene rispettata l'equazione del bilancio ed i termini che la compongono nel corso di ognuno degli istanti del periodo di taratura del modello.

In Figura 2.76 è riportata la rappresentazione del bilancio complessivo dell'intero modello, nella sua evoluzione temporale in corrispondenza dei primi 12 stress periods (SP) del modello, che corrispondono a tre anni idrologici presi per intero.

Figura 2.76: bilancio idrogeologico dell'intero modello, termini in ingresso, in uscita e flussi netti.



I dati rappresentano le portate espresse in  $m^3/s$  relativamente alle principali voci costituenti il bilancio. Generalmente il modello riporta i dati sotto forma di parità di bilancio tra ingressi (IN) ed uscite (OUT), ma risulta particolarmente significativo affiancare a questi andamenti quello del loro saldo (IN-OUT) che permette di evidenziare al meglio il comportamento stagionale del sistema nella sua alternanza dei periodi a prevalente ricarica o prevalente consumo della risorsa idrica sotterranea.

Nel dettaglio le singole voci costituenti il bilancio sono:

- *Recharge* (Ricarica): rappresenta il termine di alimentazione dell'intero sistema dovuta alla pioggia ed ai fiumi;
- *Wells* (Prelievi): rappresenta l'estrazione di acqua sotterranea dovuta alla presenza di prelievi da pozzo;
- *General heads* (Condizione al contorno): rappresenta il termine di scambio attraverso il contorno dell'intero sistema;
- *Storage* (Immagazzinamento): rappresenta la variazione di acqua presente all'interno del sistema. I valori positivi dello storage evidenziano una diminuzione della risorsa idrica immagazzinata; i valori negativi viceversa ne evidenziano un aumento. Di conseguenza il segno del saldo tra i due valori (IN-OUT) evidenzia se mediamente nel periodo si assiste ad una diminuzione ( $DS > 0$ ) o ad un accumulo ( $DS < 0$ ) di risorsa idrica immagazzinata.

Attraverso l'utilizzo dello strumento del water budget applicato ai risultati della simulazione numerica ottenuta dal modello è possibile inoltre evidenziare le singole voci costituenti il bilancio per le singole celle del modello e di conseguenza in forma aggregata per un insieme prestabilito di esse. Risulta quindi possibile aggregare le celle del modello sulla base delle geometrie dei corpi idrici sotterranei presenti all'interno dell'area di studio e calcolarne il relativo bilancio.

In questo caso verranno evidenziati sia i termini "esterni" (ricarica, prelievi, immagazzinamenti), già presenti come voci del bilancio totale, sia quelli "interni" costituenti i flussi di scambio tra le varie parti del sistema ed in definitiva tra i vari corpi idrici sotterranei.

La rappresentazione dell'elaborazione così condotta può essere realizzata:

1. *nello spazio* attraverso la valutazione dei flussi di acqua mediati negli anni di simulazione disponibili dal modello e riportati all'interno di uno "schema di flusso" di valenza tridimensionale. In questo caso si è scelto di considerare le medie dei primi 12 stress periods del modello a formare così un periodo di tre anni completi (2003-2005). In Figura 2.77 sono riportati i flussi di scambio tra le varie parti del sistema rispettivamente per la parte superiore (acquifero libero e Complessi Acquiferi A1 ed A2) ed inferiore (acquifero libero e Complessi Acquiferi A3-A4 e Gruppo Acquifero B) del modello. Le successive Figure (Figura 2.78, Figura 2.82 e Figura 2.86) collegano in senso verticale le rappresentazioni planimetriche relativamente alle conoidi del Secchia del Tiepido e del Panaro.
2. *nel tempo* attraverso l'analisi delle variazioni temporali negli anni di simulazione del modello, delle singole voci di bilancio (rch, storage, well, ghb, flussi di scambio). Tale analisi è stata condotta in termini di flussi netti (IN-OUT) per i corpi idrici sotterranei appartenenti alle tre conoidi che ricadono nell'area di studio: conoide del Secchia (Figura 2.79, Figura 2.80 e Figura 2.81), conoide del Tiepido (Figura 2.83, Figura 2.84 e Figura 2.85) ed infine conoide del Panaro (Figura 2.87, Figura 2.88 e Figura 2.89).

In tutte le figure è riportato un numero identificativo per ciascun corpo idrico sotterraneo dell'area di studio secondo lo schema riportato in Tabella 2.8.

In linea generale l'analisi del bilancio consente di:

- valutare la consistenza delle voci del bilancio tra e per i diversi corpi idrici sotterranei;
- verificare la dinamica generale dell'acqua all'interno delle intere conoidi, evidenziando e quantificando gli scambi idrici tra i corpi idrici individuati al loro interno con particolare interesse agli scambi tra le porzioni di acquifero libero e le porzioni confinate superiori ed inferiori ed agli scambi di queste ultime con i sistemi di pianura situati più a valle;
- evidenziare la pressione dei prelievi idrici nella intera conoide ed all'interno dei corpi idrici che la costituiscono, ed il relativo rapporto sia con le variazioni stagionali degli immagazzinamenti al

- fine di individuare l'eventuale sofferenza stagionale del sistema, sia con i trasferimenti di fluido da altre porzioni del sistema;
- evidenziare il rapporto tra le capacità di immagazzinamento delle alimentazioni del sistema ed i conseguenti trasferimenti di fluido verso altre zone;
  - effettuare l'analisi delle variazioni temporali degli immagazzinamenti netti ( $\Delta S = \text{Storage IN} - \text{Storage OUT}$ ) nel periodo 2003-2005 al fine di evidenziare i corpi idrici che manifestano un deficit idrico ( $\Delta S > 0$ ) nei 3 anni di simulazione analizzati e la dinamica stagionale di accumulo e rilascio di acqua dallo storage.

Tabella 2.8: codici identificativi dei corpi idrici sotterranei necessari per la lettura del bilancio idrogeologico.

	<b>libero</b>	<b>confinato superiore</b>	<b>confinato inferiore</b>
Conoide Tresinaro	1	11	111
Conoide Secchia	2	22	222
Conoide Tiepido	3	33	333
Conoide Panaro	4	44	444
Conoide Samoggia	5	55	555
Conoidi montane e Sabbie gialle	7		
Pianura Alluvionale Appenninica		99	
Pianura Alluvionale			888

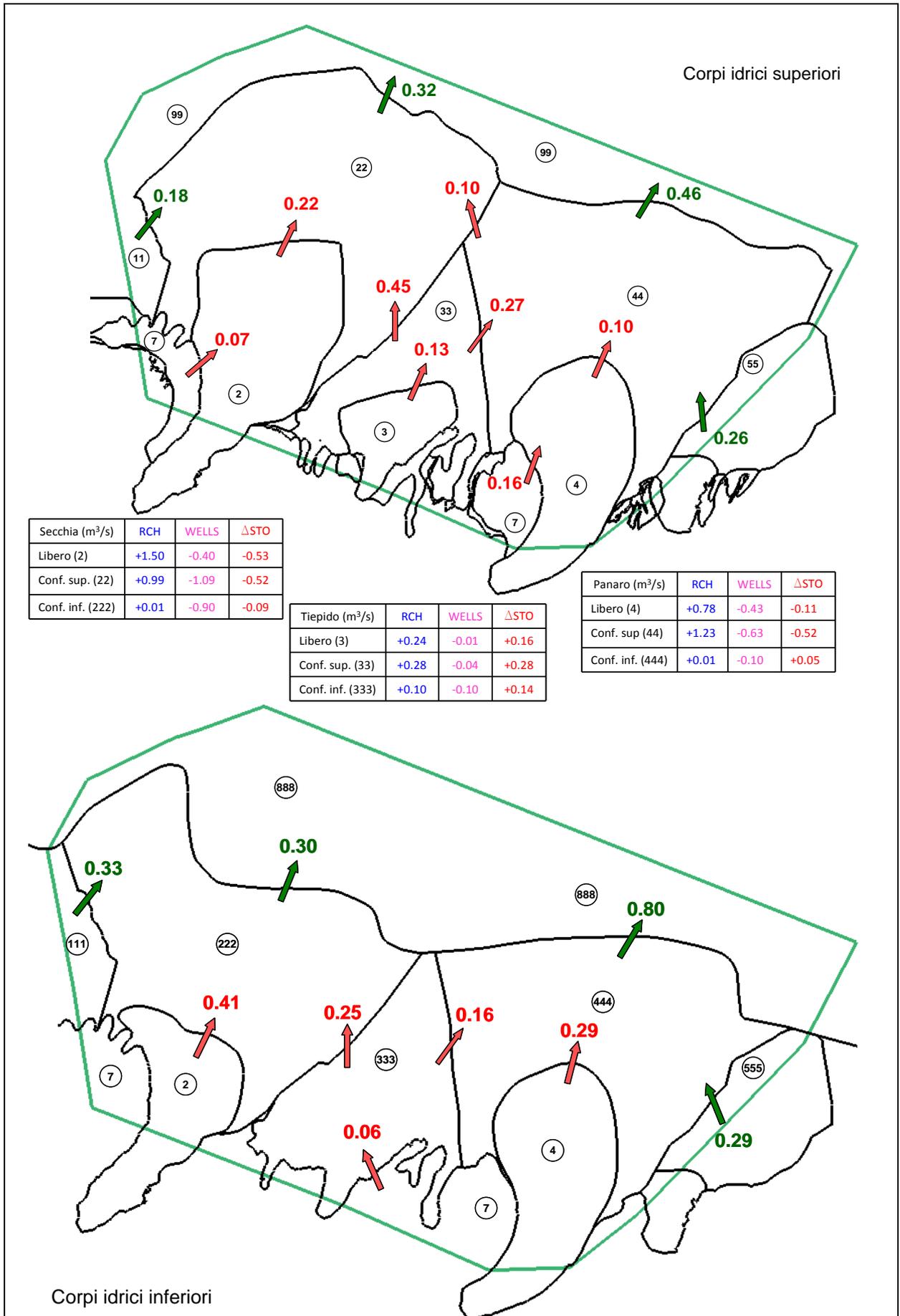
Nei paragrafi che seguono viene fornita una lettura del bilancio idrogeologico separatamente per le tre conoidi del Secchia, del Tiepido e del Panaro appartenenti all'area di studio. Per ognuna di queste, le successive figure (Figura 2.78, Figura 2.82 e Figura 2.86) mostrano i relativi schemi di flusso in sezione, la cui lettura deve essere necessariamente integrata con gli schemi di flusso in pianta di Figura 2.77, in modo da avere il quadro d'insieme del bilancio idrogeologico nelle tre dimensioni.

I singoli termini costituenti il bilancio sono mediati sul triennio 2003-2005 (SP1-SP12) e vengono riportati all'interno di una sezione idrogeologica tipo, rappresentativa dei principali acquiferi (libero, confinato superiore e confinato inferiore) costituenti i corpi idrici sotterranei delle conoidi.

Tale analisi permette di ricostruire la dinamica del moto dell'acqua all'interno dei complessi acquiferi investigati, e consente di evidenziare gli scambi "interni" tra i singoli corpi idrici sotterranei.

In tutte le figure le portate sono espresse in  $m^3/s$ , mentre le frecce indicano la direzione prevalente del flusso dell'acqua. I termini di ricarica sono comprensivi delle precipitazioni efficaci, della ricarica da parte del fiume e degli apporti idrogeologici derivanti dal margine collinare e sono schematizzati con le frecce blu. I prelievi sono indicati con la lettera W in magenta; gli immagazzinamenti sono schematizzati con la sigla  $\Delta S$  in rosso. Inoltre gli scambi di flusso fra acquiferi liberi e acquiferi confinati di conoide sono schematizzati con le frecce rosse orizzontali, mentre quelli fra questi ultimi e gli acquiferi confinati della pianura alluvionale appenninica sono schematizzati con le frecce verdi orizzontali. Nelle rappresentazioni in sezione gli apporti laterali provenienti dalle conoidi adiacenti sono complessivamente ed idealmente rappresentati da un unico valore che accompagna una freccia bianca con bordo in tratteggio.

Figura 2.77: bilancio idrogeologico ottenuto dal modello numerico: portate medie 2003-2005 (SP1-SP12). Dati in m<sup>3</sup>/s. Vista in pianta dei corpi idrici superiori (in alto) ed inferiori (in basso).

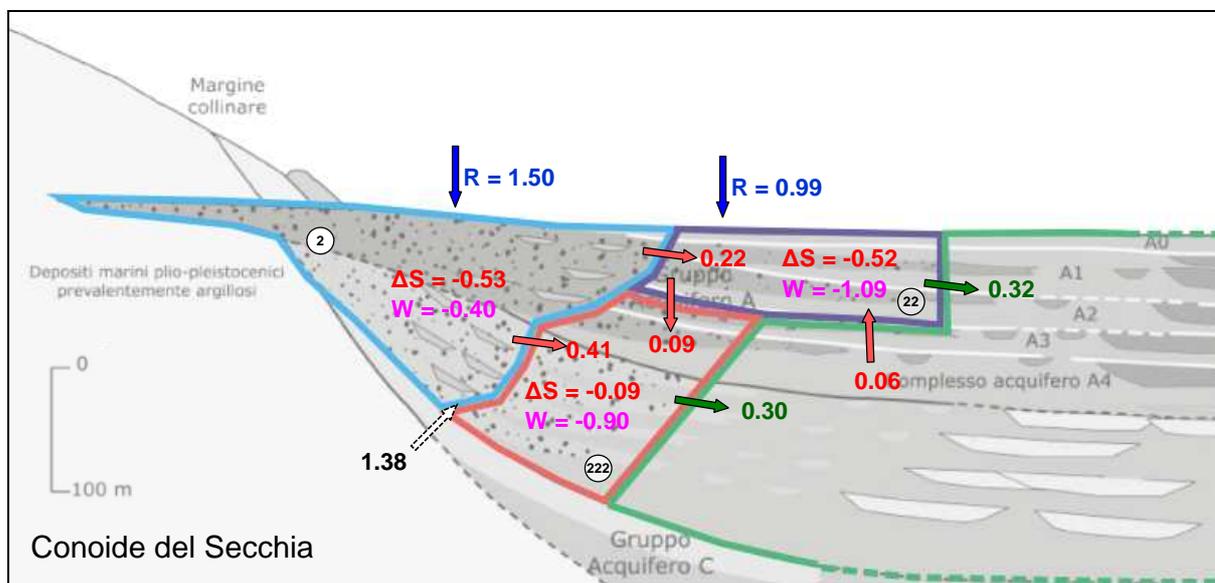


### 2.4.4.1 Analisi del bilancio della conoide del Secchia

La Figura 2.78 mostra lo schema di flusso della conoide del Secchia. Analizzando i singoli termini di bilancio di tale conoide, si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- i termini di ricarica della conoide che alimentano l'acquifero libero ed il confinato superiore sono di  $2.49 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- i prelievi idrici della conoide complessivamente ammontano a circa  $2.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ; negli acquiferi confinati sono intorno al  $\text{m}^3/\text{s}$  (confinato superiore  $1.09 \text{ m}^3/\text{s}$ , confinato inferiore  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mentre nell'acquifero libero si dimezzano a  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- analizzando gli immagazzinamenti ( $\Delta S$ ) si evidenzia un surplus idrico medio a carico dell'intero sistema pari a  $1.14 \text{ m}^3/\text{s}$ ; tale immagazzinamento avviene prevalentemente nell'acquifero libero ( $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e nell'acquifero confinato superiore ( $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ); la rimanente quota parte di  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$  si riferisce agli acquiferi confinati inferiori;
- il deflusso idrogeologico principale della conoide presenta una direzione monte-valle con  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$  al passaggio fra acquifero libero e acquiferi confinati e  $0.62 \text{ m}^3/\text{s}$  al passaggio fra gli acquiferi confinati di conoide e gli acquiferi confinati della pianura alluvionale appenninica;
- localmente si osserva un flusso idrogeologico dovuto ai richiami idrici dei prelievi, con direzione verticale, dal basso verso l'alto, dagli acquiferi della pianura appenninica verso gli acquiferi confinati superiori della conoide e pari a  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- il deflusso idrogeologico della conoide del Secchia è inoltre alimentato lateralmente da  $1.38 \text{ m}^3/\text{s}$ , somma del contributo proveniente dal margine occidentale (conoide del Tresinaro e conoidi montane)  $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$  e dal margine orientale (conoide del Tiepido e bordo NO della conoide del Panaro)  $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 2.78: Sezione schematica di flusso della conoide del Secchia: bilancio idrogeologico ottenuto dal modello numerico, portate medie 2003-2005 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).



Le successive figure da Figura 2.79 a Figura 2.81 riportano invece l'analisi del bilancio nell'evoluzione temporale prodotta dai 12 Stress Period del modello. Nei 3 principali corpi idrici costituenti gli acquiferi della conoide del Secchia, i termini di ricarica e gli immagazzinamento mostrano la consueta ciclicità stagionale caratterizzata dall'alternanza dei periodi a prevalente ricarica (primo ed ultimo trimestre di ogni anno) con quelli a prevalente consumo della risorsa idrica (trimestri centrali); questo è evidente sia per gli acquiferi liberi e confinati singolarmente sia nel loro insieme.

Figura 2.79: bilancio idrogeologico della conoide del Secchia, acquifero libero, flussi netti. (2=libero; 22=confinato superiore, 222=confinato inferiore).

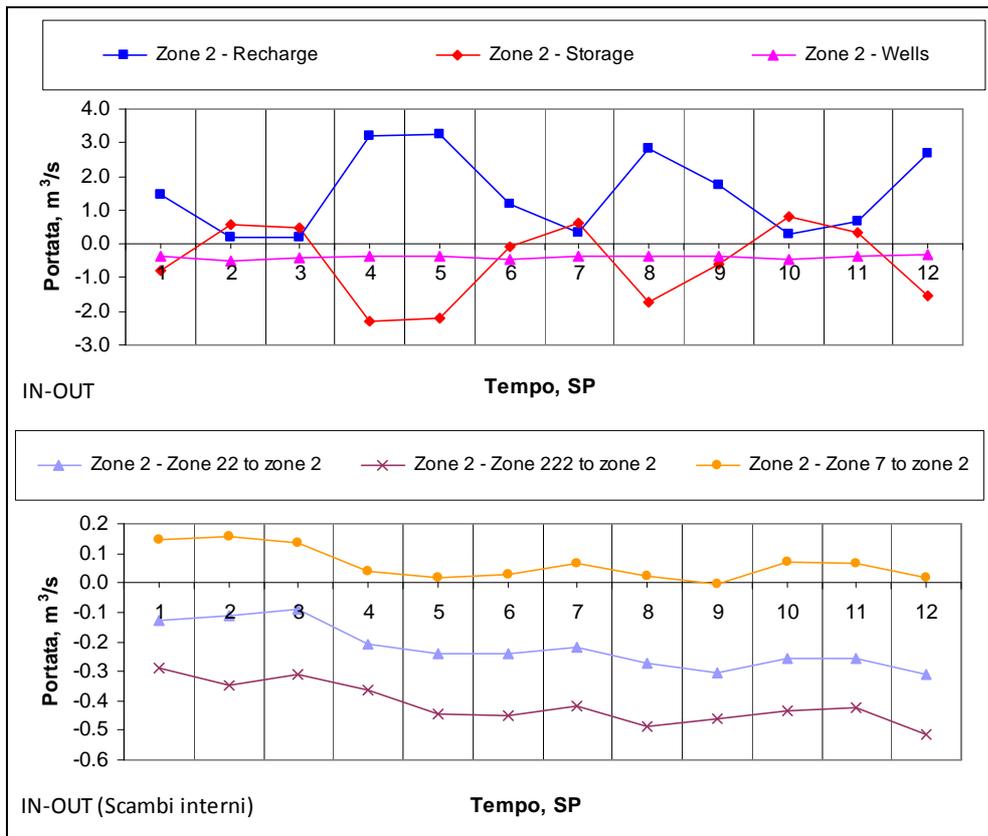


Figura 2.80: bilancio idrogeologico della conoide del Secchia, acquifero confinato superiore, flussi netti. (2=libero; 22=confinato superiore, 222=confinato inferiore).

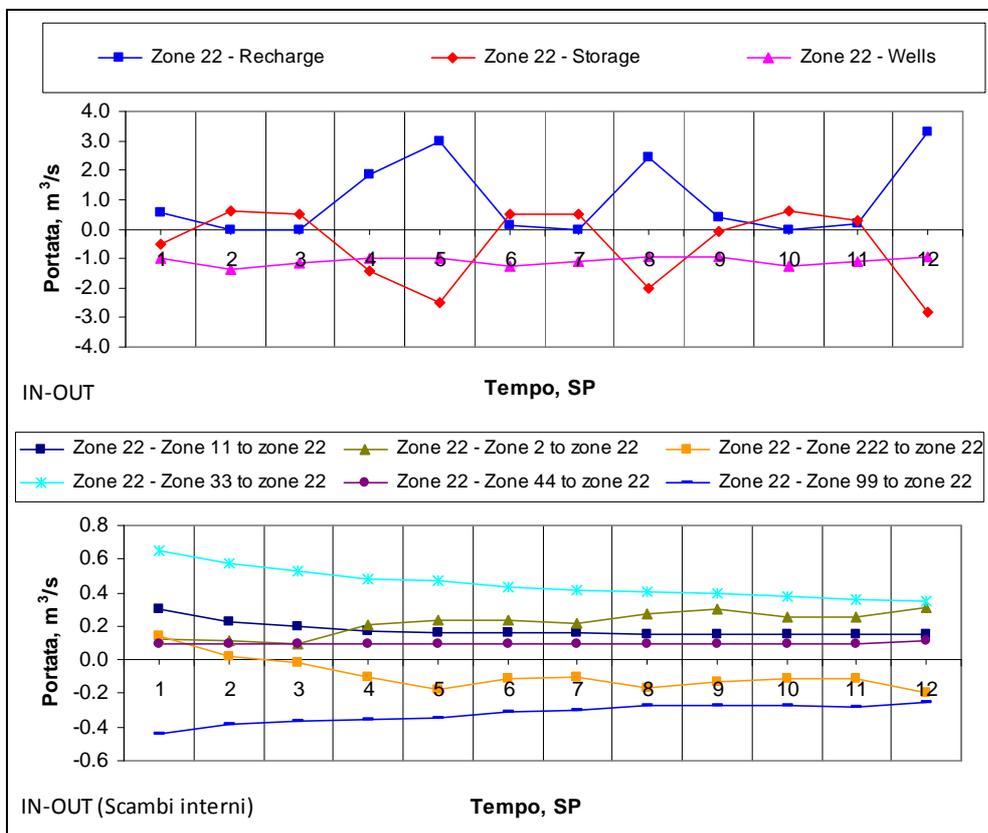
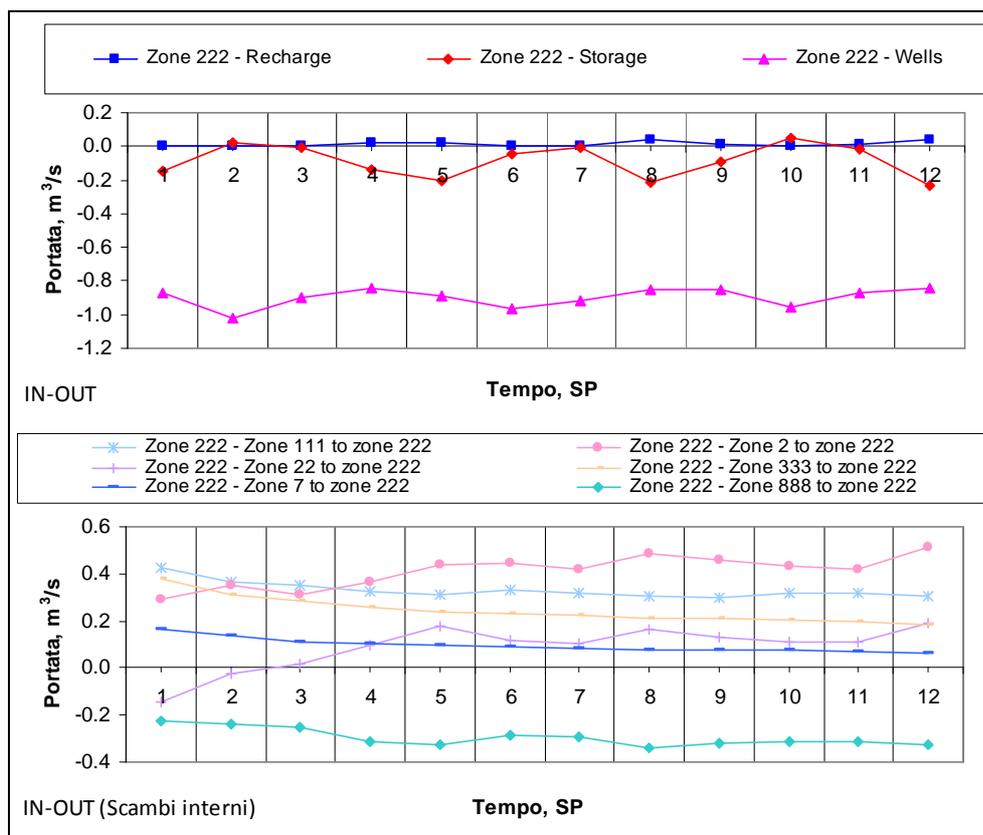


Figura 2.81: bilancio idrogeologico della conoide del Secchia, acquifero confinato inferiore, flussi netti. (2=libero; 22=confinato superiore, 222=confinato inferiore).

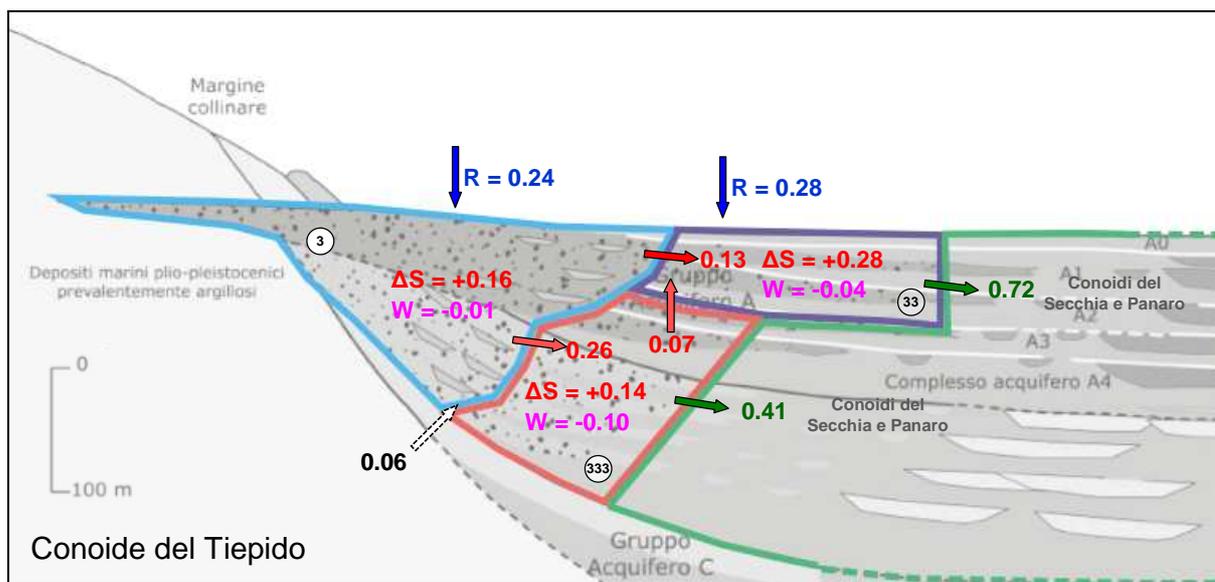


#### 2.4.4.2 Analisi del bilancio della conoide del Tiepido

La Figura 2.82 mostra lo schema di flusso della conoide del Tiepido. Analizzando i singoli termini di bilancio di tale conoide, si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- i termini di ricarica della conoide, che alimentano l'acquifero libero ed il confinato superiore sono di  $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- i prelievi idrici della conoide sono relativamente esigui e ammontano a  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  e sono prevalentemente concentrati negli acquiferi confinati (confinato inferiore  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , confinato superiore  $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ );
- a differenza della conoide del Secchia, analizzando gli immagazzinamenti ( $\Delta S$ ) della conoide del Tiepido si evidenzia un deficit idrico medio pari a  $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- il deflusso idrogeologico principale della conoide presenta una direzione monte-valle con  $0.39 \text{ m}^3/\text{s}$  al passaggio fra acquifero libero e acquiferi confinati e  $1.13 \text{ m}^3/\text{s}$  al passaggio fra gli acquiferi confinati della conoide e gli acquiferi confinati delle conoidi del Secchia e del Panaro che vengono alimentate rispettivamente da  $0.70 \text{ m}^3/\text{s}$  e da  $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- localmente, si osserva un flusso idrogeologico dovuto ai richiami idrici dei prelievi, con direzione verticale, dal basso verso l'alto, dall'acquifero confinato inferiore della conoide del Tiepido verso quello confinato superiore e pari a  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- il deflusso idrogeologico della conoide del Tiepido è inoltre alimentato lateralmente (conoide montane e sabbie gialle) da  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 2.82: Sezione schematica di flusso della conoide del Tiepido: bilancio idrogeologico ottenuto dal modello numerico, portate medie 2003-2005 (m<sup>3</sup>/s)..



Le successive figure da Figura 2.83 a Figura 2.85 riportano invece l'analisi del bilancio nell'evoluzione temporale prodotta dai 12 Stress Period del modello. Nei 3 principali corpi idrici costituenti gli acquiferi della conoide del Tiepido i termini di ricarica e di immagazzinamento mostrano la consueta ciclicità stagionale caratterizzata dall'alternanza dei periodi a prevalente ricarica (primo ed ultimo trimestre di ogni anno) con quelli a prevalente consumo della risorsa idrica (trimestri centrali); questo è evidente sia per gli acquiferi liberi e confinati singolarmente sia nel loro insieme.

Figura 2.83: bilancio idrogeologico della conoide del Tiepido, acquifero libero, flussi netti. (3=libero; 33=confinato superiore, 333=confinato inferiore).

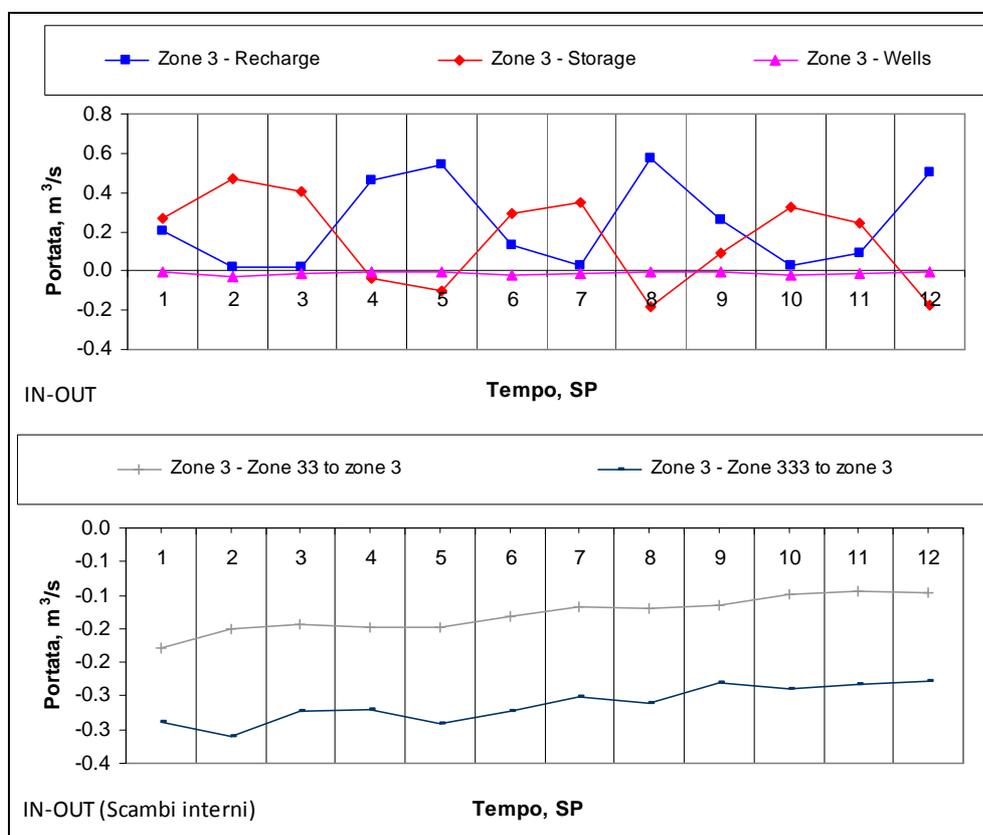


Figura 2.84: bilancio idrogeologico della conoide del Tiepido, acquifero confinato superiore, flussi netti. (3=libero; 33=confinato superiore, 333=confinato inferiore).

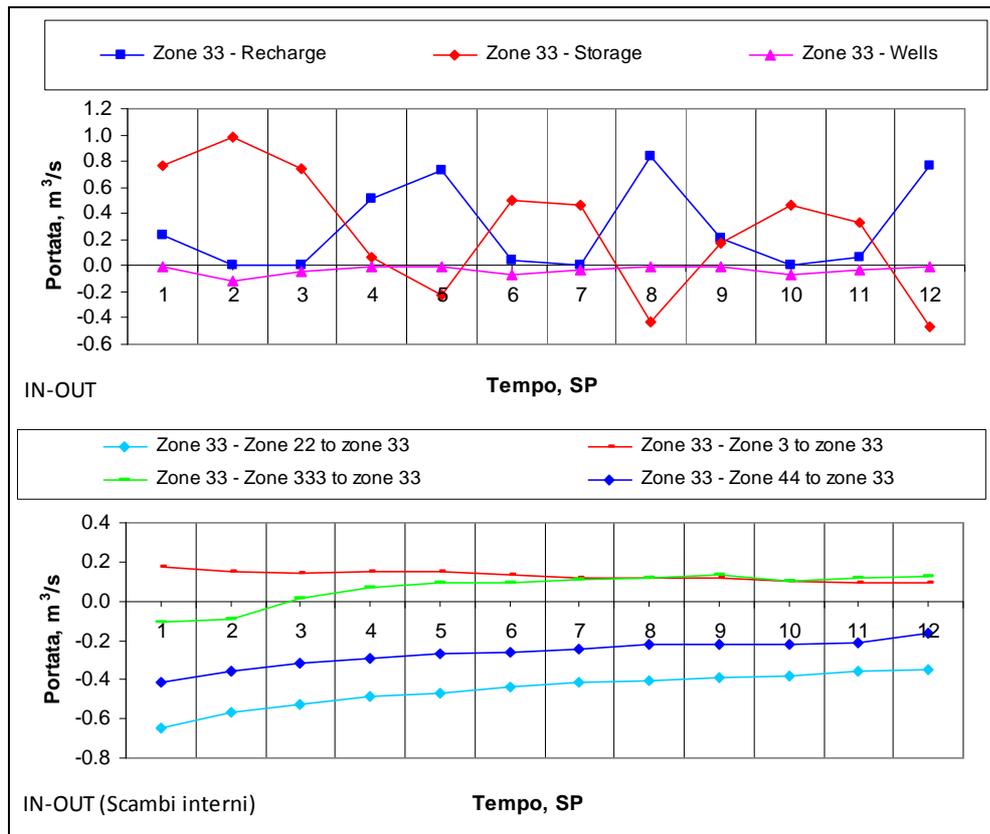
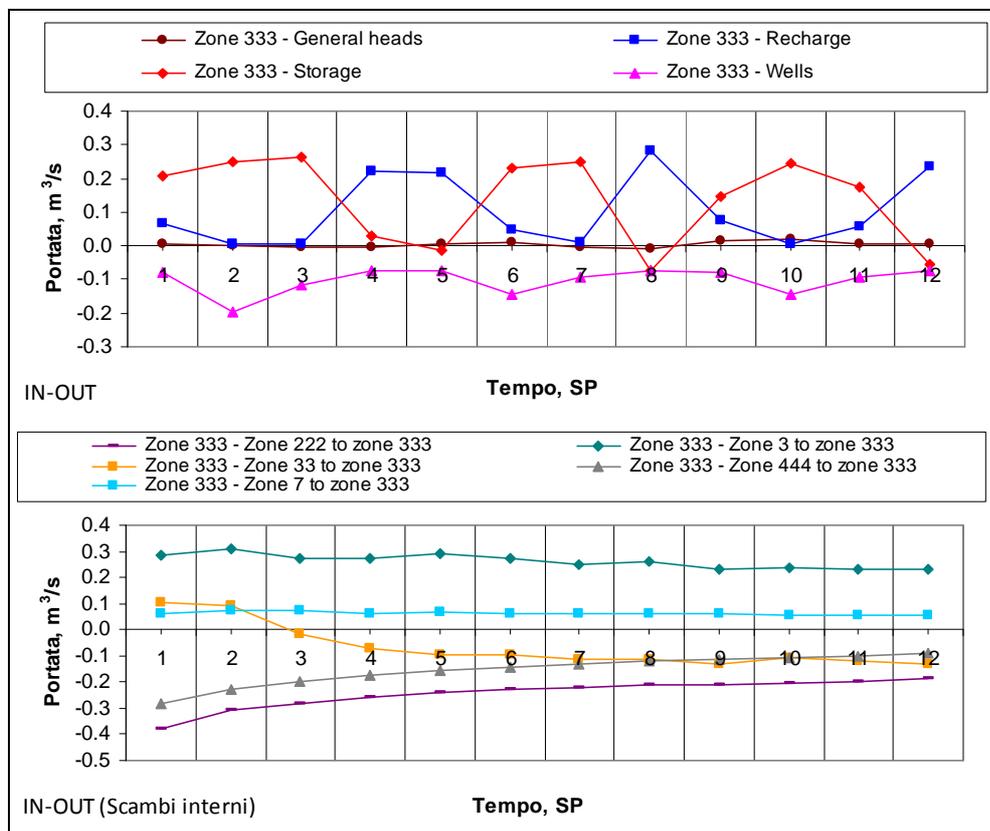


Figura 2.85: bilancio idrogeologico della conoide del Tiepido, acquifero confinato inferiore, flussi netti. (3=libero; 33=confinato superiore, 333=confinato inferiore).



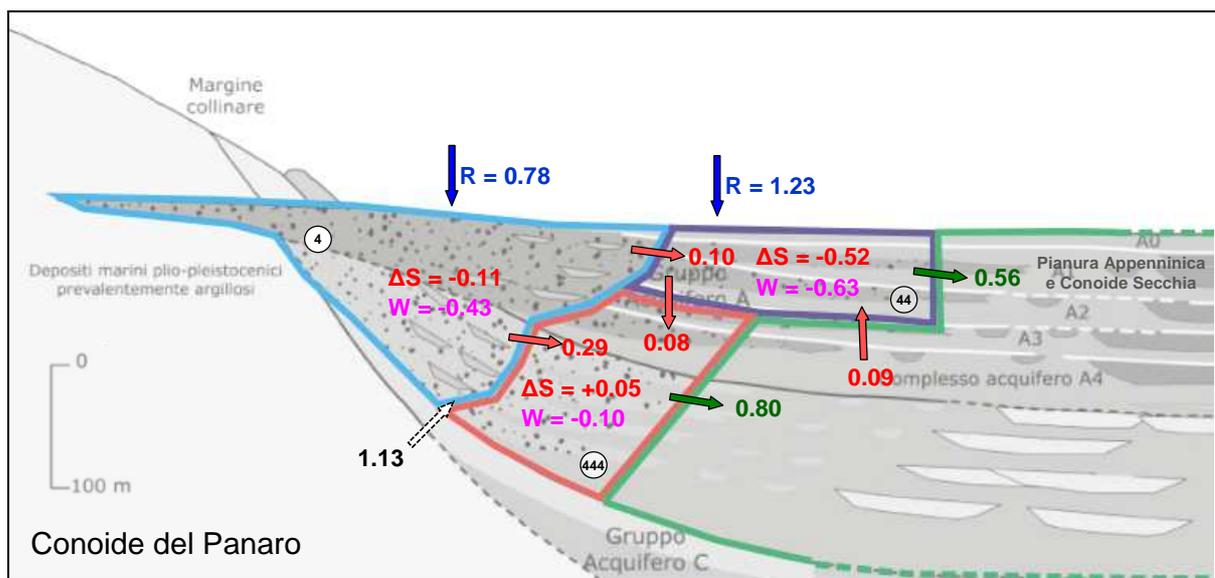
Il deficit idrico osservato nei termini di immagazzinamento negli acquiferi costituenti la conoide del Tiepido non è relazionabile ai prelievi idrici, esigui in questa porzione di territorio, ma piuttosto ad una dinamica di deflusso idrico sotterraneo monte-valle piuttosto pronunciata, probabilmente imputabile alla posizione mediana e topograficamente rialzata della conoide del Tiepido, rispetto alle due conoidi “maggiori” del Secchia e del Panaro.

### 2.4.4.3 Analisi del bilancio della conoide del Panaro

La Figura 2.86 mostra lo schema di flusso della conoide del Panaro. Analizzando i singoli termini di bilancio di tale conoide si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- i termini di ricarica della conoide, che alimentano l’acquifero libero ed il confinato superiore, sono di 2.01 m<sup>3</sup>/s;
- i prelievi idrici della conoide complessivamente ammontano a 1.16 m<sup>3</sup>/s e sono distribuiti principalmente nell’acquifero confinato superiore (0.63 m<sup>3</sup>/s) e a differenza della conoide del Secchia, anche nell’acquifero più apicale libero (0.43 m<sup>3</sup>/s);
- analizzando gli immagazzinamenti ( $\Delta S$ ) si evidenzia mediamente un surplus idrico a carico dell’intero sistema pari a 0.58 m<sup>3</sup>/s; tale immagazzinamento avviene nell’acquifero confinato superiore (0.52 m<sup>3</sup>/s) e nell’acquifero libero (0.11 m<sup>3</sup>/s). L’acquifero confinato inferiore chiude in un sostanziale pareggio, con un deficit medio pari a 0.05 m<sup>3</sup>/s;
- il deflusso idrogeologico principale della conoide presenta una direzione naturale monte valle con 0.39 m<sup>3</sup>/s al passaggio fra acquifero libero e acquiferi confinati e 1.26 m<sup>3</sup>/s al passaggio fra gli acquiferi confinati della conoide e gli acquiferi confinati della pianura alluvionale appenninica una ulteriore portata pari 0.10 m<sup>3</sup>/s evidenzia un flusso tra i corpi idrici confinati superiori, dalla conoide del Panaro a quella del Secchia;
- localmente, si osserva un flusso idrogeologico dovuto ai richiami idrici dei prelievi, con direzione verticale, dal basso verso l’alto, dall’ acquifero confinato inferiore della conoide del Tiepido verso quello confinato superiore e pari a 0.09 m<sup>3</sup>/s;
- il deflusso idrogeologico della conoide del Panaro è inoltre alimentato lateralmente da 1.13 m<sup>3</sup>/s, somma del contributo proveniente dal margine orientale della conoide (sistema Samoggia Lavino Reno) 0.55 m<sup>3</sup>/s e dal margine occidentale (conoide del Tiepido) 0.58 m<sup>3</sup>/s.

Figura 2.86: Sezione schematica di flusso della conoide del Panaro: bilancio idrogeologico ottenuto dal modello numerico, portate medie 2003-2005 (m<sup>3</sup>/s).



Le figure da Figura 2.87 a Figura 2.89 riportano invece l’analisi del bilancio nell’evoluzione temporale prodotta dai 12 Stress Period del modello.

Figura 2.87: bilancio idrogeologico della conoide del Panaro, acquifero libero, flussi netti. (4=libero; 44=confinato superiore, 444=confinato inferiore).

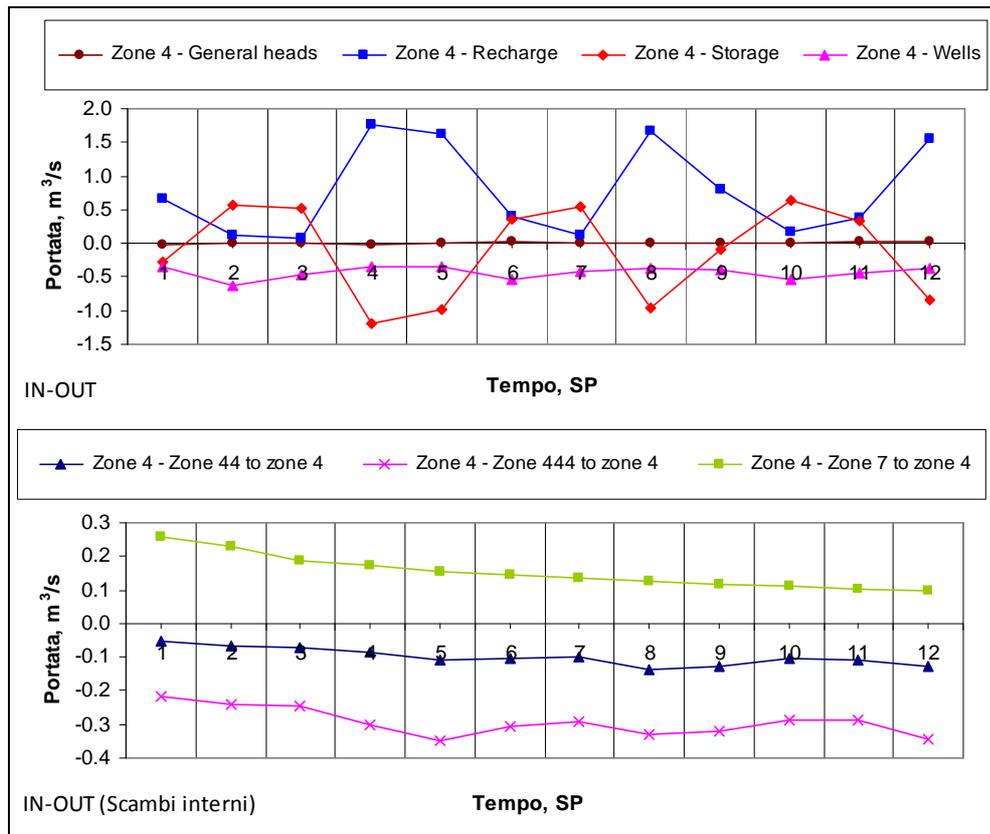


Figura 2.88: bilancio idrogeologico della conoide del Panaro, acquifero confinato superiore, flussi netti. (4=libero; 44=confinato superiore, 444=confinato inferiore).

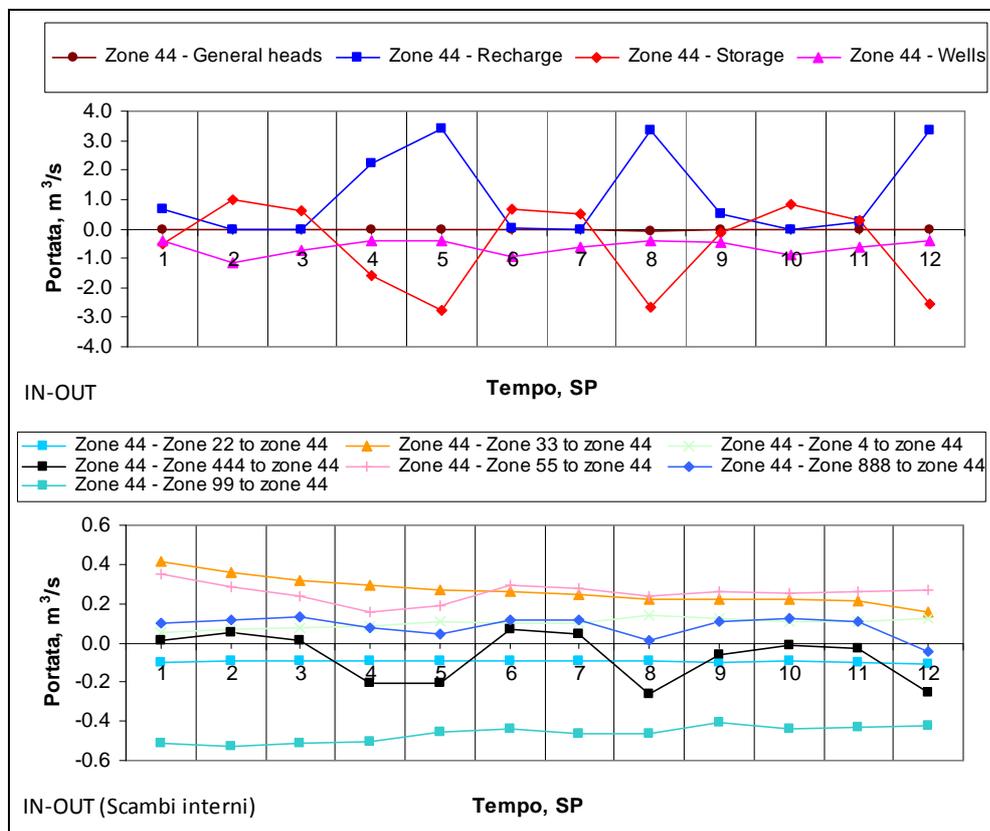
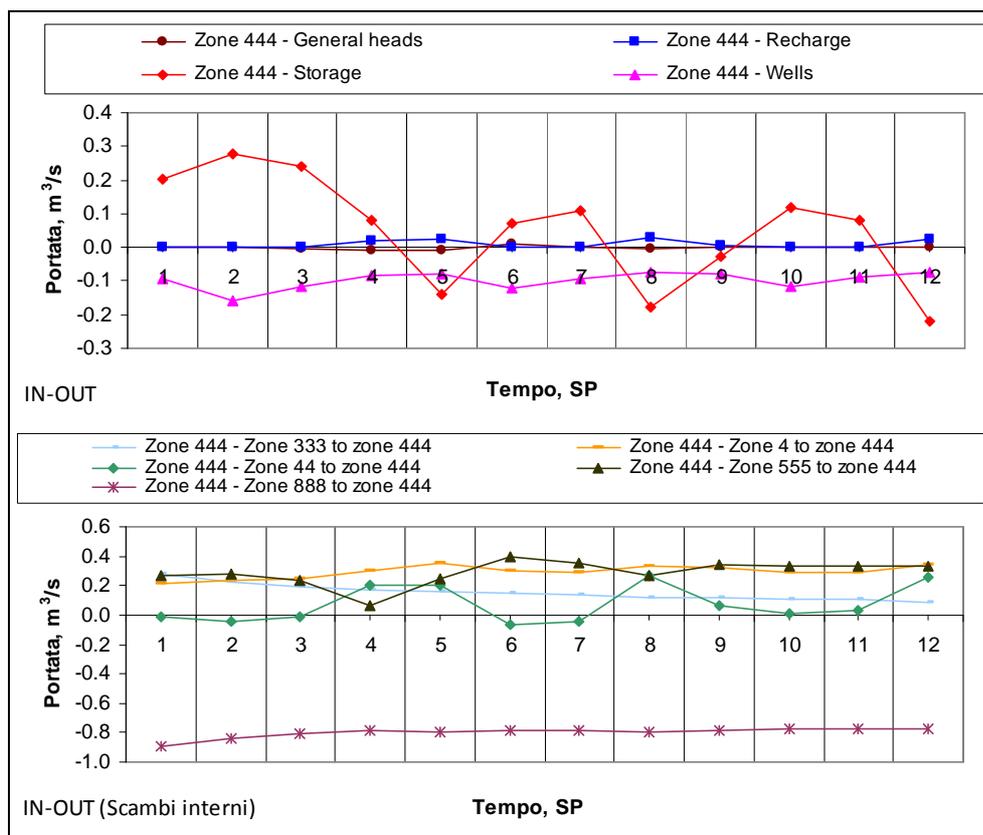


Figura 2.89: bilancio idrogeologico della conoide del Panaro, acquifero confinato inferiore, flussi netti. (4=libero; 44=confinato superiore, 444=confinato inferiore).



Nei tre principali corpi idrici costituenti gli acquiferi della conoide del Panaro, i termini di ricarica e di immagazzinamento mostrano la consueta ciclicità stagionale caratterizzata dall'alternanza dei periodi a prevalente ricarica (primo ed ultimo trimestre di ogni anno) con quelli a prevalente consumo della risorsa idrica (trimestri centrali); questo è evidente sia per gli acquiferi liberi e confinati singolarmente sia nel loro insieme.

## 2.5 ATTIVITÀ 5: SVILUPPO DI SCENARI ESEMPLIFICATIVI

### 2.5.1 Esempio 1: analisi della circolazione idrica sotterranea in funzione dell'ipotesi di azzeramento dei prelievi Aimag ed Hera di Cognento

Al fine di una maggior comprensione della dinamica di circolazione dell'acqua sotterranea della conoide alluvionale del Fiume Secchia ed in particolare per evidenziare l'incidenza su questa dei prelievi attualmente insistenti nei campi pozzi di Cognento (Aimag ed Hera) è stato impostato un particolare scenario di simulazione col modello numerico.

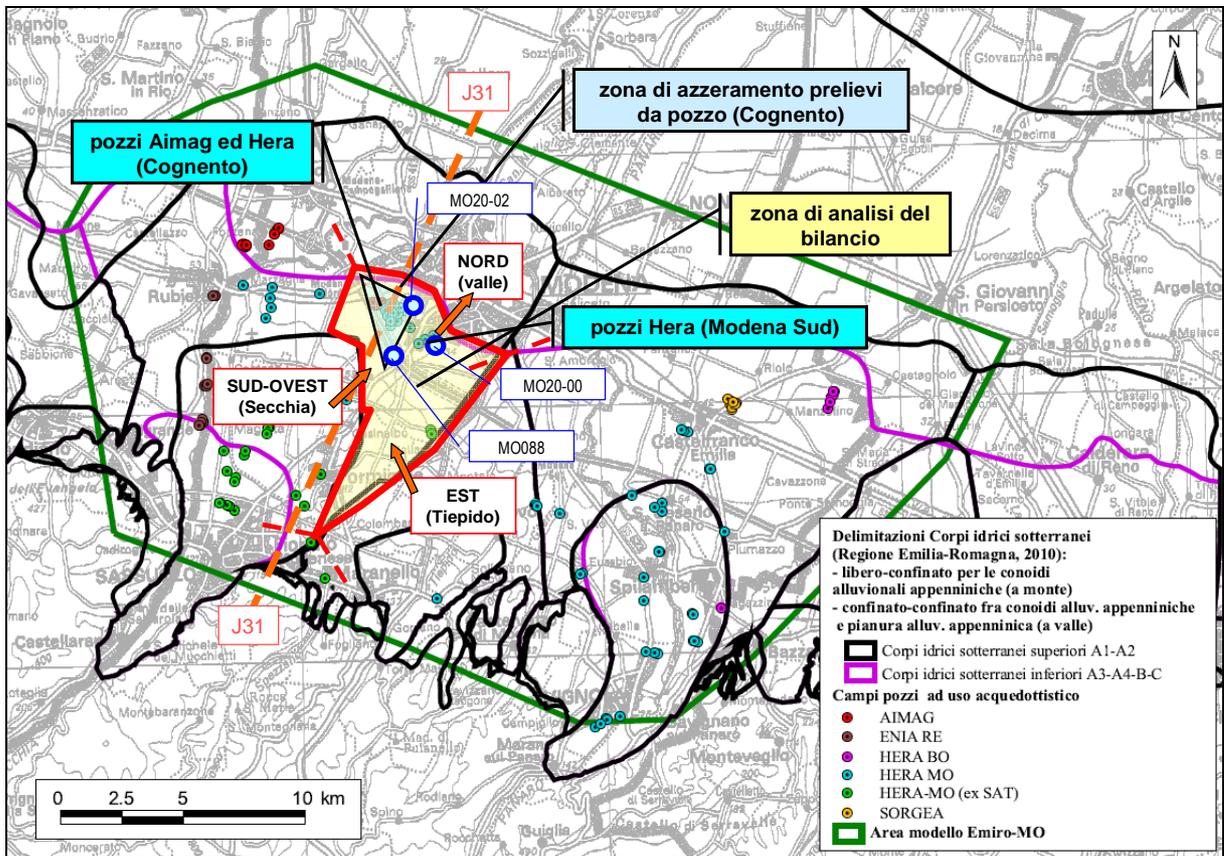
Per l'intero periodo attualmente coperto dal modello (2003-2006) è stato operato un ipotetico azzeramento dei prelievi acquedottistici di Cognento. Sono state quindi analizzate le risposte del modello in questa nuova situazione e poste a confronto con la simulazione precedente, "reale", nella quale tali prelievi risultano effettivamente attivi.

Nella Figura 2.90 vengono riportati tutti gli elementi di contesto per la costruzione della simulazione di scenario e per le conseguenti valutazioni. In particolare la figura riporta:

- ubicazione planimetrica dei campi pozzi di Cognento e di Modena Sud;
- zona di completo azzeramento dei prelievi nella simulazione di scenario;
- perimetrazione della zona utilizzata per la successiva applicazione dell'analisi del bilancio (water budget) col modello;

- direzioni prevalenti dei flussi di scambio analizzati come voci del bilancio;
- pozzi di controllo e sezione (J31) per la misurazione della propagazione degli effetti del minor prelievo imposto al modello nella simulazione di scenario.

Figura 2.90: elementi di contesto per l'impostazione della simulazione di scenario.



I prelievi acquedottistici di Cognento sono riportati in Figura 2.91 in relazione ai quindici stress periods del modello. Mediamente ammontano a circa  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  (oltre 18 milioni di metri cubi annui). Nella Figura 2.92 ne viene analizzata invece la distribuzione in profondità sulla base della attribuzione ai diversi layer del modello.

Figura 2.91: prelievi di acque sotterranee delle centrali di Hera ed Aimag a Cognento.

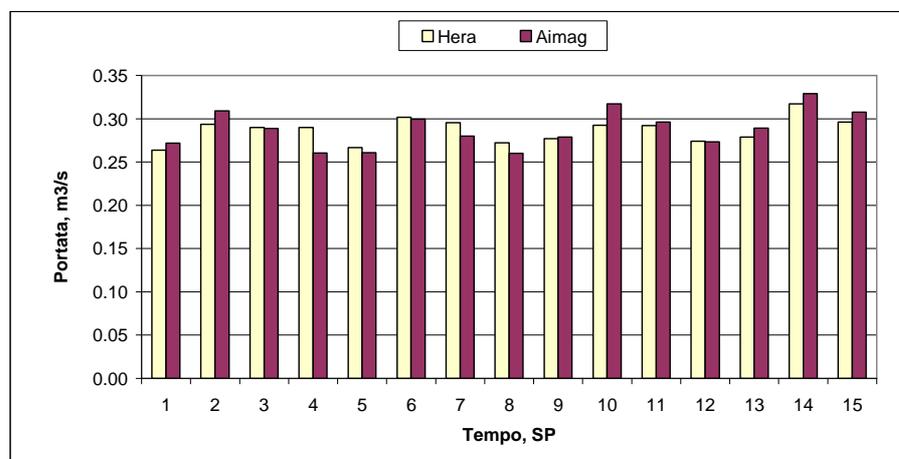
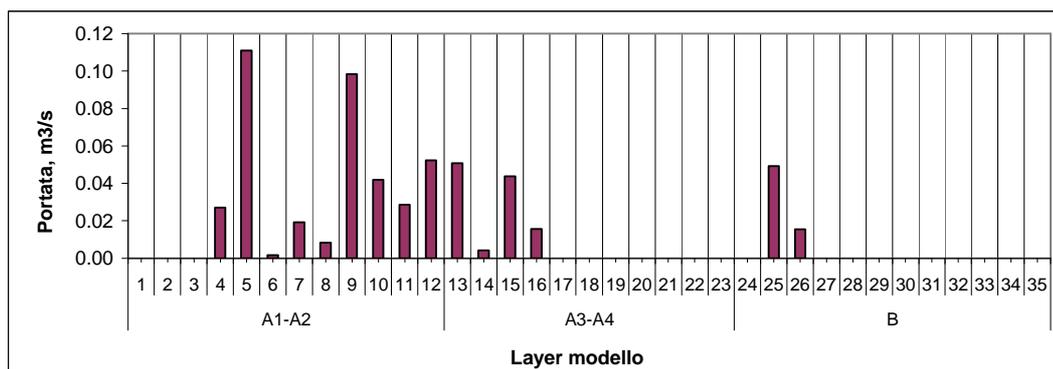
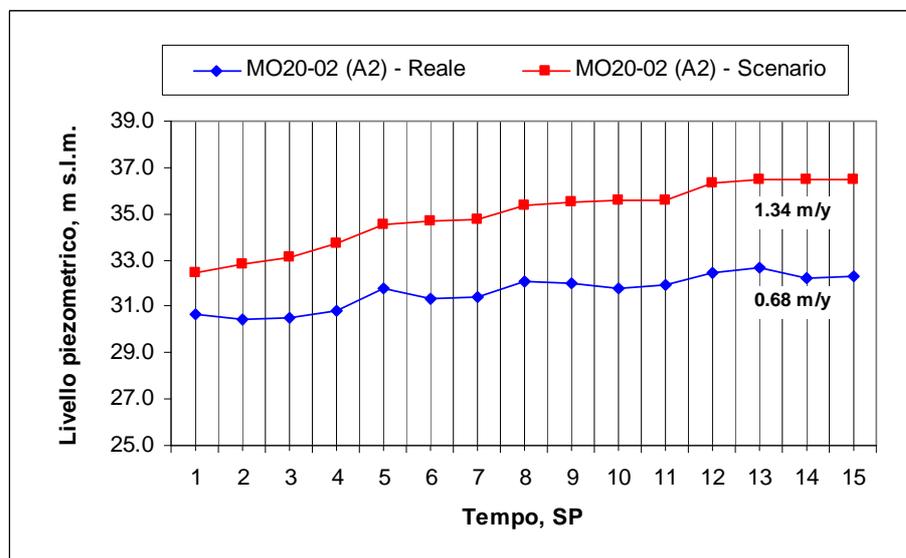


Figura 2.92: prelievi di acque sotterranee delle centrali di Hera ed Aimag a Cognento in funzione della profondità. Dato medio SP1-SP12.



L'azzeramento totale dei prelievi nella zona di Cognento, a parità di tutte le altre condizioni che regolano entrambe le simulazioni, provoca ovviamente un innalzamento del livello piezometrico, massimo in prossimità di detta zona, andando poi nel tempo sempre più ad interessare le zone circostanti. Nella Figura 2.93 viene mostrato l'andamento del carico idraulico nella simulazione di scenario in confronto all'andamento della situazione reale per il pozzo MO20-02, appartenente alla Rete Regionale di Monitoraggio e situato all'interno del campo pozzi di Hera (Pozzo A1). Si nota come l'azzeramento dei prelievi provochi un innalzamento iniziale di circa due metri del livello piezometrico del pozzo e nel tempo un incremento del trend pari a 0.66 m/anno nei tre anni di simulazione considerati. Nella situazione di scenario risulta evidente anche una perdita consistente dell'andamento stagionale del livello del pozzo, dovuto principalmente alla presenza dei prelievi, ora assenti.

Figura 2.93: variazione piezometrica ottenuta dall'azzeramento dei prelievi sul pozzo MO20-02, corrispondente al pozzo A1 del campo pozzi di Hera.

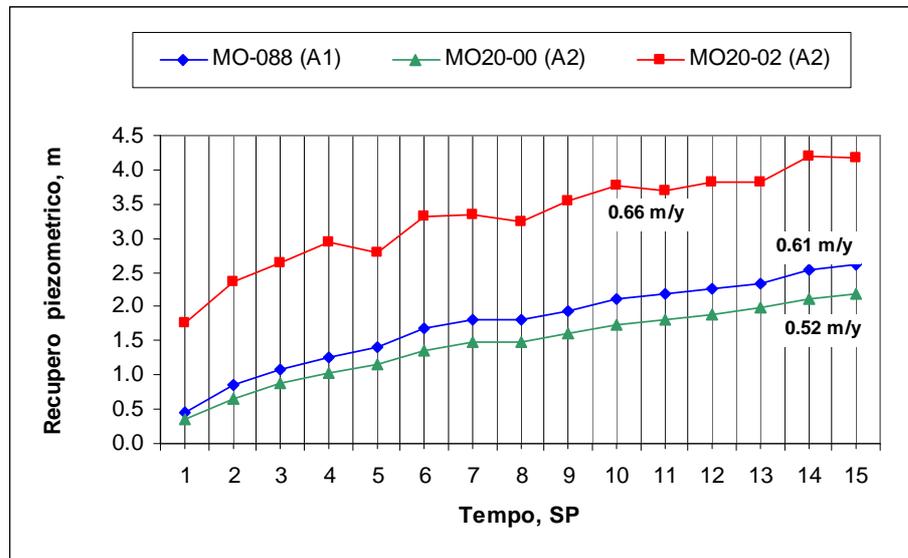


Il recupero piezometrico sul pozzo MO20-02, ottenuto come differenza tra il carico idraulico della simulazione di scenario e quella reale è riportato nella successiva Figura 2.94 e posto in confronto a quello di altri due pozzi, il MO20-00 (coincidente col pozzo B2 di Modena Sud), sempre della Rete Regionale ed il pozzo MO-088 della Rete Provinciale. Risulta evidente una differenza di comportamento nella risposta dei diversi pozzi che deriva principalmente:

- dalla distanza di questi dalla zona di azzeramento dei prelievi;
- dalla loro profondità in relazione alla variazione indotta dall'azzeramento dei prelievi anch'essi variabili nella terza dimensione (Figura 2.92);

- dalla posizione dei pozzi in rapporto alla dinamica di circolazione dell'acqua all'interno della conoide.

Figura 2.94: andamenti temporali dei recuperi piezometrici (differenza tra il carico idraulico della simulazione di scenario e quello della simulazione "reale") ottenuti su alcuni punti di controllo.



La Figura 2.95 riporta invece la distribuzione spaziale dei recuperi dei livelli piezometrici sia in senso orizzontale (layer 12) sia in senso verticale (sezione J31). Le figure mostrano un taglio del modello nei piani di massima variazione osservata del carico idraulico. L'evoluzione temporale dei recuperi piezometrici è riferita a tre successivi istanti temporali collocati rispettivamente al termine del quarto, ottavo e dodicesimo stress period del modello.

L'analisi delle variazioni piezometriche indotte dalla simulata mancanza dei prelievi di Cognento, può essere completata dall'analisi del bilancio idrogeologico che, per la conoide del Secchia nel suo insieme è riportato per la situazione "reale" nelle precedenti figure (Figura 2.77 e Figura 2.78). L'analisi è stata qui ulteriormente dettagliata applicando lo strumento del water budget alla zona indicata nella Figura 2.90 ed appositamente studiata per valutare le variazioni dei flussi di acqua in arrivo sulla zona dei prelievi rispettivamente da Est (lato Tiepido) e da Ovest Sud-Ovest (lato Secchia).

Figura 2.95: distribuzione nello spazio dei recuperi piezometrici per tre istanti di tempo (SP4, SP8 e SP12): distribuzione in sezione monte-valle (J31) ed in pianta (k12).

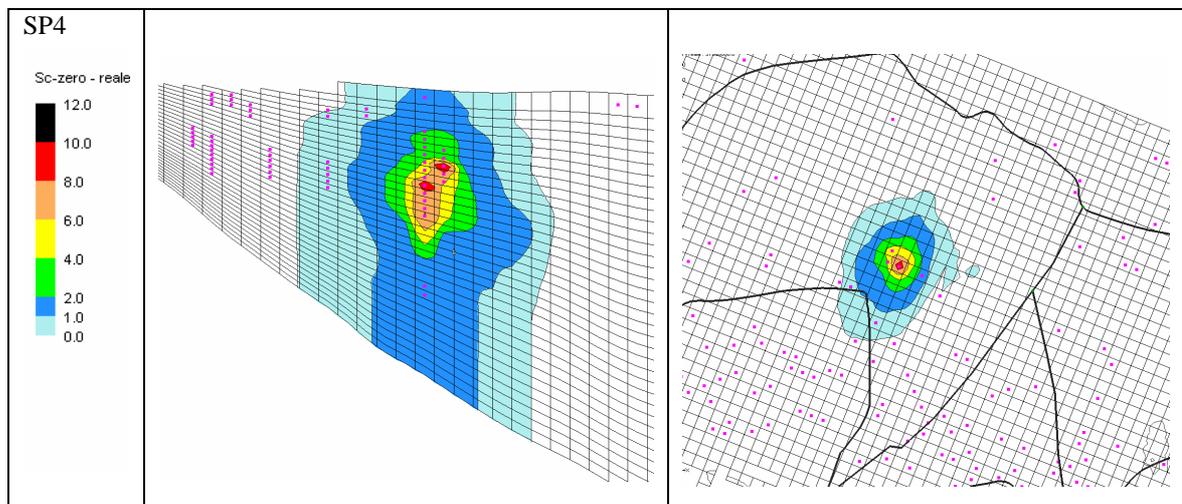
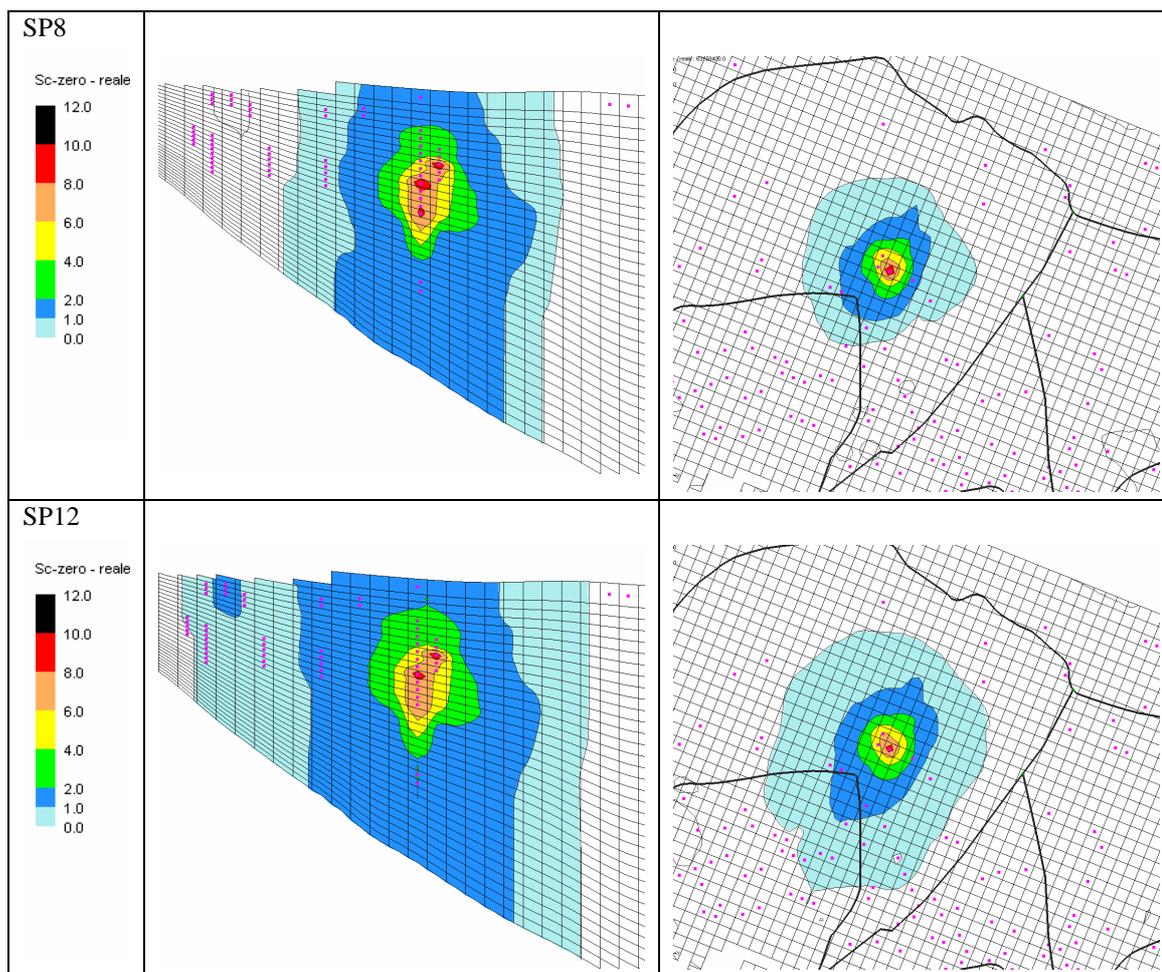


Figura 2.95: distribuzione nello spazio dei recuperi piezometrici per tre istanti di tempo (SP4, SP8 e SP12): distribuzione in sezione monte-valle (J31) ed in pianta (k12). Segue.



Nel dettaglio locale i flussi idrici descritti dall'analisi del bilancio sono riportati per la situazione "reale" in Figura 2.96 e possono essere posti a confronto con quelli ottenuti nella simulazione di scenario (azzeramento dei prelievi) rappresentati nella successiva Figura 2.97. Tali valori sono numericamente riportati anche nella Tabella 2.9 dove ne viene calcolata la differenza ed attribuito il senso fisico ai valori così ottenuti.

L'analisi evidenzia che (confronto tra la Figura 2.96 e la Figura 2.97):

- il minor prelievo di acque sotterranee nella simulazione di scenario di azzeramento dei prelievi di Cognento è mediamente pari a  $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$  (dato medio SP1-SP12);
- questo minor prelievo di acqua determina una variazione dei flussi di circolazione sotterranea corrispondenti ad un minor richiamo di acqua verso Cognento e ad un maggior deflusso verso valle, oltre la zona dei prelievi; tali variazioni sono più consistenti nelle immediate vicinanze dei campi pozzi rispetto alle zone a queste adiacenti;
- il minor richiamo verso Cognento interessa maggiormente i flussi di acqua provenienti da Ovest (da  $0.30$  a  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ed in misura minore riesce ad incidere, nei tre anni di simulazione, su quelli provenienti dalla conoide del Tiepido ad EST (da  $0.70$  a  $0.66 \text{ m}^3/\text{s}$ );
- il maggior deflusso di acqua sotterranea verso Nord è più consistente nella zona più vicina ai pozzi dove si evidenzia una inversione di tendenza (da  $0.06$  in ingresso a  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$  in uscita); nella zona adiacente e posta ad Est della precedente il deflusso aumenta da  $0.13$  a  $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- relativamente alla zona di bilancio analizzata, l'azzeramento dei prelievi provoca una variazione degli immagazzinamenti pari a  $-0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  che corrisponde ad una maggiore risorsa che rimane immagazzinata all'interno del sistema in corrispondenza degli innalzamenti piezometrici precedentemente descritti. Tale risorsa recuperata corrisponde al 25% del volume

di acqua sotterranea non prelevato in tale zona nella situazione di scenario, rispetto alla situazione reale.

L'analisi condotta permette quindi di misurare l'incidenza delle variazioni dei flussi in ingresso ed in uscita dalla zona di bilancio in funzione della variazione dei prelievi che li ha generati (azzeramento imposto nella simulazione di scenario).

Figura 2.96: analisi della circolazioni idrica sotterranea di dettaglio nella conoide del Fiume Secchia. Situazione reale.

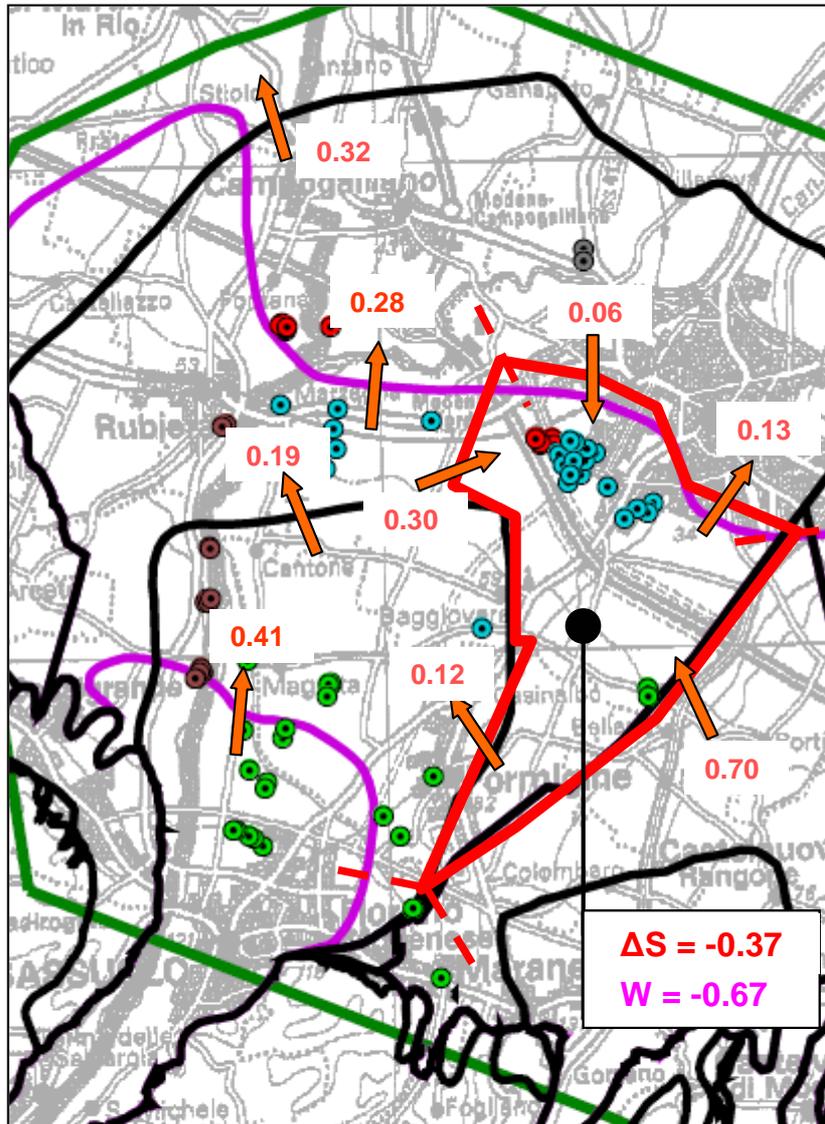
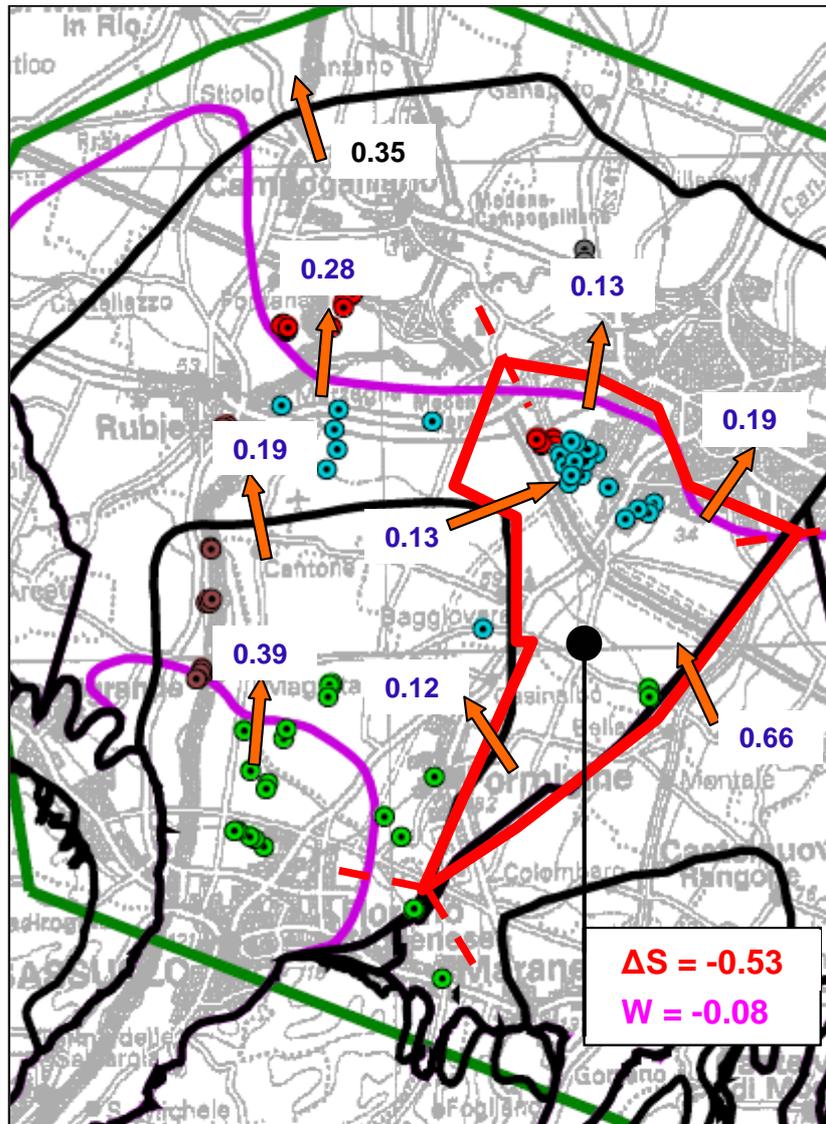


Tabella 2.9: analisi del bilancio. Effetti medi del minor prelievo a Cognento sulle diverse voci del bilancio idrogeologico (immagazzinamenti e scambi laterali e verso valle) nei tre anni di simulazione del modello.

	Scenario (m <sup>3</sup> /s)	Reale (m <sup>3</sup> /s)	Delta (m <sup>3</sup> /s)	Significato
Prelievi	-0.08	-0.67	0.59	minor prelievo
Immagazzinamento	-0.53	-0.37	-0.16	maggior immagazzinamento
Lato EST (Tiepido)	0.66	0.70	-0.04	minor ingresso
Lato OVEST/ SUD OVEST (Secchia)	0.01	0.17	-0.16	minor ingresso
Lato NORD (valle)	-0.32	-0.07	-0.25	maggior uscita

Figura 2.97: analisi della circolazioni idrica sotterranea nella conoide del Fiume Secchia in relazione al prelievo di acque sotterranee di Cognento. Situazione di scenario (azzeramento dei prelievi nei tre anni di simulazione del modello).



### 2.5.2 Esempio 2: analisi della circolazione idrica sotterranea in funzione del ripristino ai valori storici dei prelievi Hera di Modena Sud

Il secondo esempio riguarda l'ipotesi di ripristino della piena funzionalità del campo pozzi Hera di Modena Sud e la valutazione della modifica così indotta alla circolazione idrica sotterranea con particolare riferimento ai flussi di acqua in arrivo sui pozzi di Cognento.

Anche in questa occasione si può fare riferimento alla Figura 2.90 per gli elementi di contesto necessari all'impostazione e comprensione della simulazione di scenario.

Il campo pozzi di Modena Sud è attualmente costituito da 5 pozzi per una portata in concessione complessiva pari a 241 litri/secondo (Figura 2.98) cui corrispondono circa 7.5 milioni di metri cubi di acqua di possibile prelievo su base annua. Su tali volumi si è sempre assestato il prelievo del campo pozzi fino alla seconda metà degli anni '80 per poi gradualmente diminuire nel decennio successivo (Figura 2.99) fino ad i valori di prelievo tuttora attivi e pari a circa 1.5 Mm<sup>3</sup>/anno (Tabella 2.7). Lo sviluppo dei filtri dei 5 pozzi permette di associare la quasi totalità del prelievo ai layer 6-9 del modello numerico, attribuibili al Complesso Acquifero A2 (Figura 2.100). Una piccola parte del prelievo è associata più in profondità in corrispondenza dei filtri più profondi del pozzo B1 (a circa 120 m dal piano campagna).

Figura 2.98: Ubicazione e portate in concessione per i singoli pozzi del campo pozzi Hera di Modena Sud.

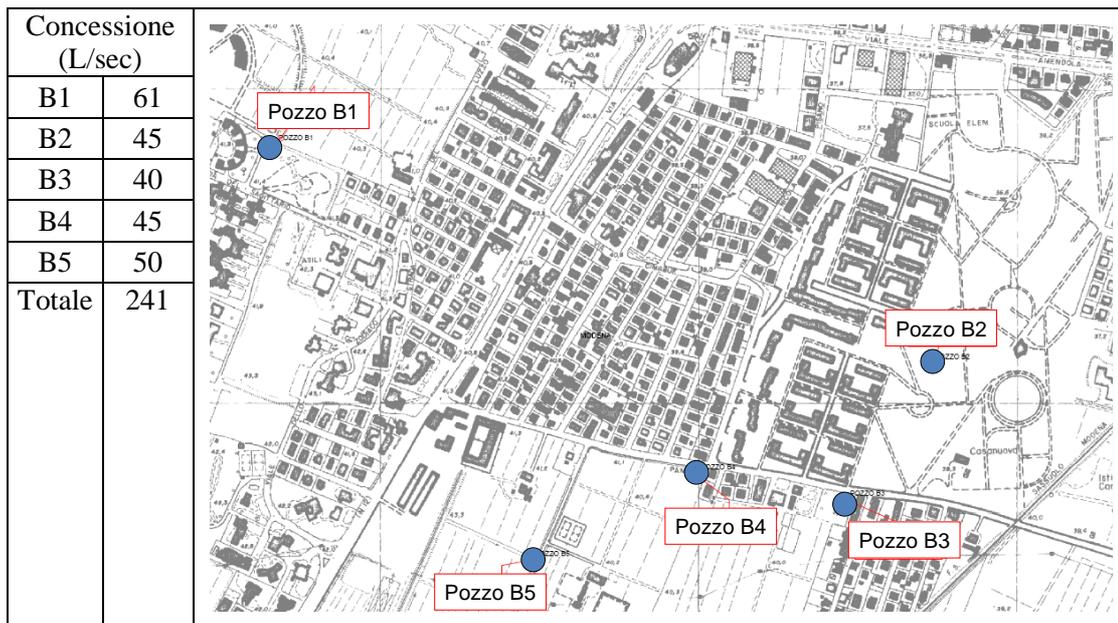


Figura 2.99: Analisi dei dati storici sui prelievi di acque sotterranee del campo pozzi Hera di Modena Sud. Dato annuale in milioni di m<sup>3</sup>.

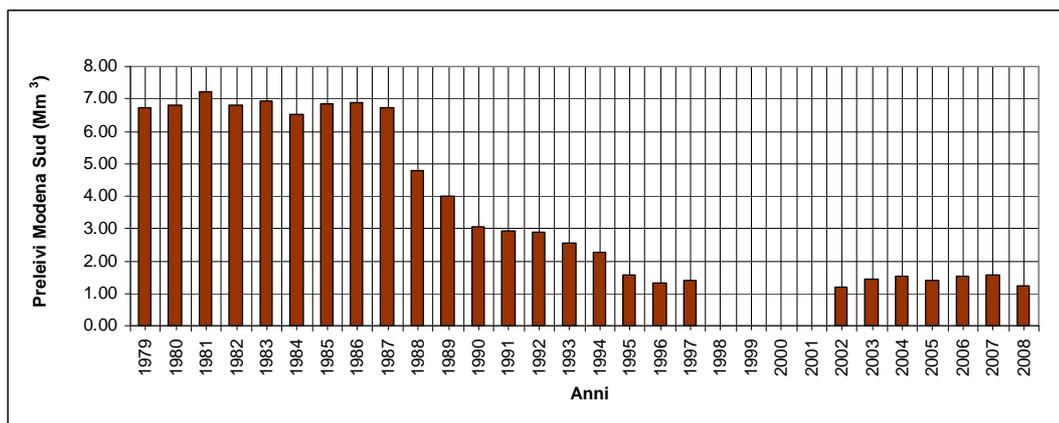
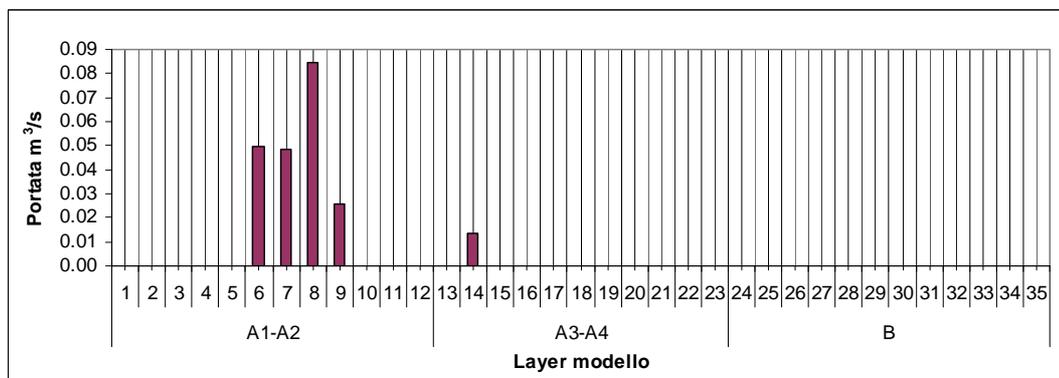
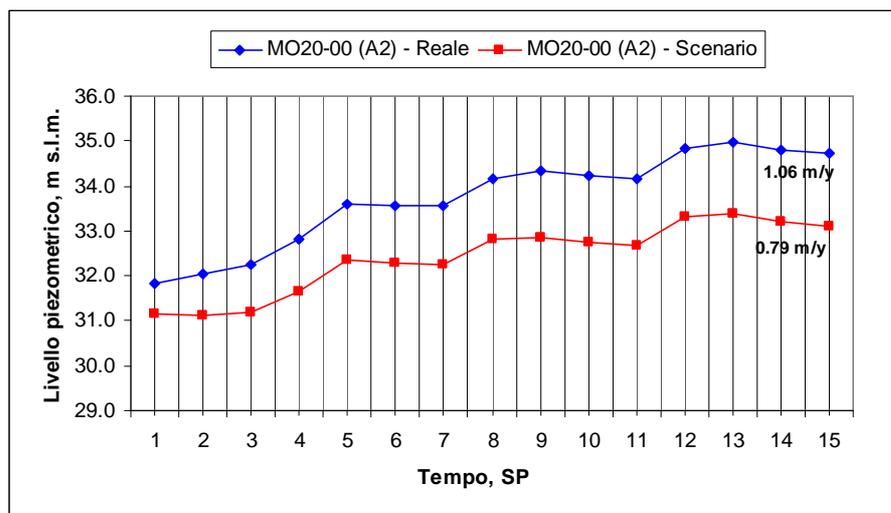


Figura 2.100: prelievi di acque sotterranee della centrale di Hera a Modena Sud in funzione della profondità. Dato medio SP1-SP12.



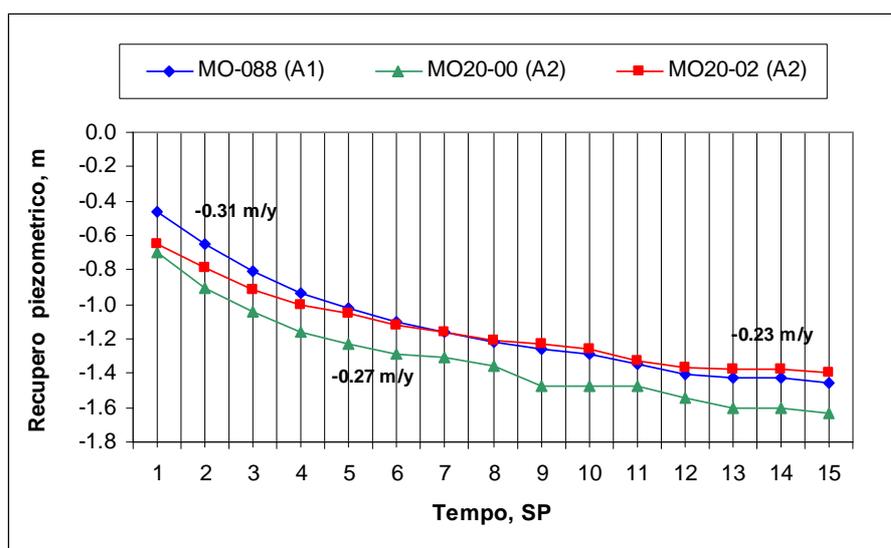
A differenza della situazione “reale”, in questo caso la simulazione di scenario concretizza un maggior prelievo di acque sotterranee all’interno del campo pozzi Hera di Modena Sud, supposto costante nel tempo nei tre anni di simulazione disponibili del modello e pari a 0.18 m<sup>3</sup>/s (5.7 milioni di metri cubi).

Figura 2.101: variazione piezometrica, ottenuta dall'incremento dei prelievi, sul pozzo MO20-00, corrispondente al pozzo B2 del campo pozzi di Hera.



Questo provoca ovviamente un abbassamento del livello piezometrico, massimo in prossimità del campo pozzi, andando poi nel tempo sempre più ad interessare le zone circostanti. Nella Figura 2.101 viene mostrato l'andamento del carico idraulico nella simulazione di scenario in confronto all'andamento della situazione reale per il pozzo MO20-00, appartenente alla Rete Regionale di Monitoraggio e situato proprio all'interno del campo pozzi Modena Sud (Pozzo B2). Si nota come il maggior prelievo provochi un abbassamento iniziale di 0.7 metri del livello piezometrico del pozzo e nel tempo un abbassamento del trend, che rimane pur sempre positivo, di 0.27 m/anno. nei tre anni di simulazione considerati. Il recupero piezometrico sul pozzo MO20-00, ottenuto come differenza tra il carico idraulico della simulazione di scenario e quella reale è riportato nella successiva Figura 2.102 e posto in confronto a quello di altri due pozzi, il MO20-02 (coincidente col pozzo A1 di Cognento), sempre della Rete Regionale ed il pozzo MO-088 della Rete Provinciale.

Figura 2.102: andamenti temporali dei recuperi piezometrici (differenza tra il carico idraulico della simulazione di scenario e quello della simulazione "reale") ottenuti su alcuni punti di controllo.



L'analisi delle variazioni piezometriche indotte dal simulato aumento dei prelievi di Modena Sud, può essere completata dall'analisi del bilancio idrogeologico che è stata qui ulteriormente dettagliata applicando lo strumento del water budget alla zona indicata nella Figura 2.90. Nel dettaglio locale i flussi idrici descritti dall'analisi del bilancio nella simulazione di scenario sono riportati in Figura 2.103 e possono essere posti a confronto con la situazione "reale" precedentemente rappresentata in

Figura 2.96. Tali valori sono numericamente riportati anche nella Tabella 2.10 dove ne viene calcolata la differenza ed attribuito il senso fisico ai valori così ottenuti.

Figura 2.103: analisi della circolazioni idrica sotterranea nella conoide del Fiume Secchia in relazione all'aumento del prelievo di acque sotterranee a Modena Sud. Situazione di scenario (ripristino dei prelievi anni '80).

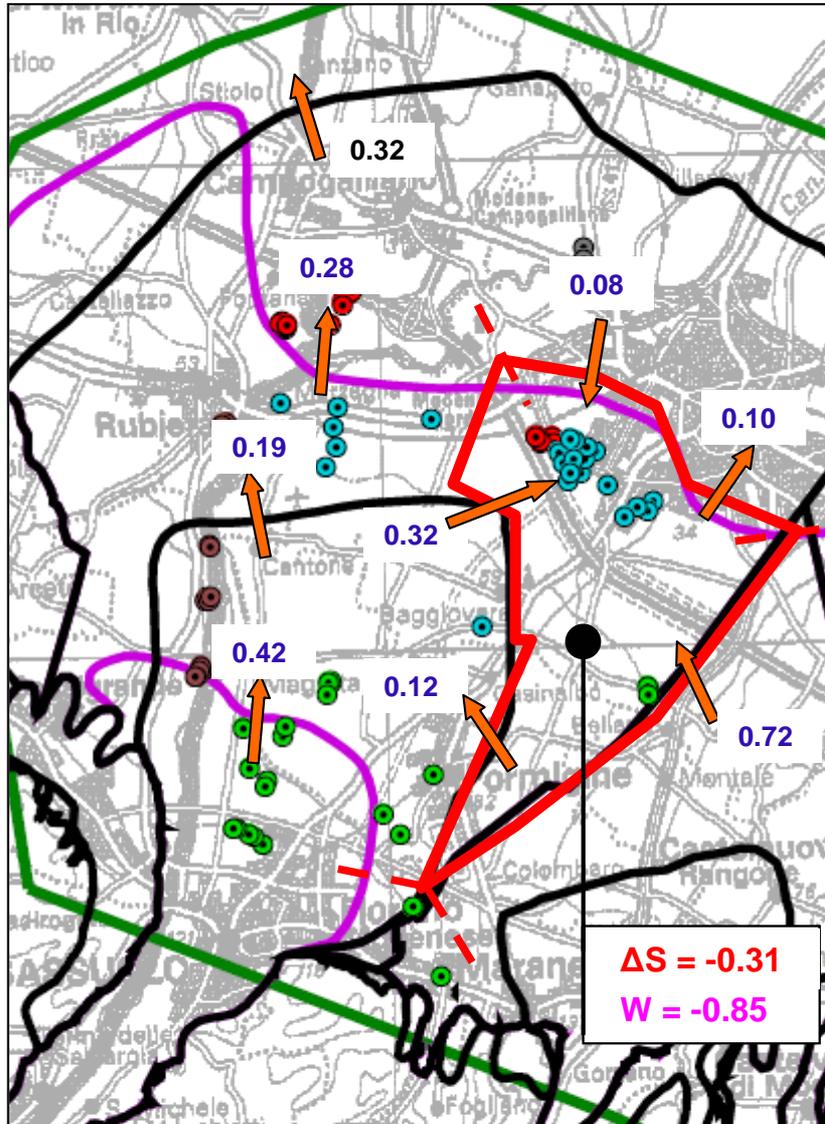


Tabella 2.10: analisi del bilancio. Effetti medi del maggior prelievo a Modena Sud sulle diverse voci del bilancio idrogeologico (immagazzinamenti e scambi laterali e verso valle) nei tre anni di simulazione del modello.

	Scenario (m <sup>3</sup> /s)	Reale (m <sup>3</sup> /s)	Delta (m <sup>3</sup> /s)	Significato
Prelievi	-0.85	-0.67	-0.18	maggior prelievo
Immagazzinamento	-0.31	-0.37	0.07	minor immagazzinamento
Lato EST (Tiepido)	0.72	0.70	0.02	maggior ingresso
Lato OVEST/ SUD OVEST (Secchia)	0.20	0.17	0.02	maggior ingresso
Lato NORD (valle)	-0.01	-0.07	0.06	minor uscita

L'analisi evidenzia che (confronto tra la Figura 2.96 e la Figura 2.103):

- il maggior prelievo di acque sotterranee nella simulazione di scenario è mediamente pari a  $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$  (dato medio SP1-SP12); questa variazione risulta essere decisamente inferiore a quella imposta nel caso precedente ( $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e di conseguenza le variazioni dei flussi che ne derivano risultano meno apprezzabili;
- questo maggior prelievo di acqua determina una variazione dei flussi di circolazione sotterranea corrispondenti ad un maggior richiamo di acqua verso i campi pozzi di Modena Sud e quindi anche di Cognento (da  $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ), e ad un minor deflusso verso valle, oltre la zona dei prelievi ( $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ );
- del maggior richiamo di acqua risente anche il lato EST della zona di bilancio, al confine con la conoide del Tiepido, il cui scambio idrico viene incrementato nei tre anni di simulazione disponibili da  $0.70$  a  $0.72 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- il volume di risorsa non bilanciato dalle variazioni di flusso indotte ed appena descritte rimane a carico degli immagazzinamenti per una portata pari a  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  che corrisponde ad un minor immagazzinamento di acqua all'interno della zona di bilancio analizzata. Tale risorsa corrisponde al 39% del volume di acqua sotterranea prelevato in più in tale zona nella situazione di scenario, rispetto alla situazione reale.

## 2.6 ATTIVITÀ 6: VERIFICA DELLE POSSIBILITÀ DI AGGIORNAMENTO E VERIFICA DEL MODELLO

Come già anticipato in premessa la finalità principale della implementazione del modello di flusso è quella di creare uno strumento di carattere operativo che possa supportare la pianificazione e la gestione della risorsa idrica sotterranea, e quindi essere un supporto decisionale per il corretto utilizzo della risorsa idrica sotterranea. Ciò implica che la fase di realizzazione del modello, precedentemente descritta nei paragrafi 2.3 e 2.4, sia necessariamente seguita da una fase di aggiornamento dello stesso per poter così via via seguire il comportamento del sistema nel tempo. Il modello così aggiornato può essere poi utilizzato per diversi scopi o finalità rispetto alle quali nel precedente paragrafo 2.5 sono stati riportati due casi esemplificativi.

Figura 2.104: fasi di sviluppo e gestione di un modello matematico



Seguendo lo schema proposto in Figura 2.104 occorre quindi passare dalla fase, qui realizzata, dello *sviluppo del modello*, alla fase della *gestione del modello*, sottoponendo in tal modo il modello ad un ciclo di aggiornamenti e di verifiche periodiche tali da rendere lo strumento *operativo* e ripetutamente

utilizzabile. Con la *gestione del modello* si intende, in sintesi, la realizzazione di tutte le operazioni necessarie a mantenerne attivi l'aggiornamento e le funzionalità. Risulta in tal senso di fondamentale importanza il governo del flusso dati che alimenta il modello, sia per quel che riguarda i dati delle reti di monitoraggio che ne permettono il controllo, sia per i termini in ingresso (prelievi di acque sotterranee, stima delle alimentazioni da fiume e da pioggia) che ne regolano il funzionamento quali principali termini di sollecitazione [20].

In questo modo lo stato quantitativo della risorsa idrica sotterranea può essere mantenuto sotto controllo durante la sua evoluzione nel tempo e, tanto più frequente sarà l'aggiornamento, tanto più le simulazioni della risorsa idrica sotterranea saranno corrette e di conseguenza utili per le finalità di gestione e pianificazione. L'esperienza ha mostrato che un buon livello di taratura e di aggiornamento consente di estendere le simulazioni anche a previsioni.

Proprio nell'ottica della futura gestione del modello vengono ora presi in considerazione uno per uno gli aspetti che ne regolano le possibilità per un continuo aggiornamento e che ne possono in qualche modo condizionare i successivi possibili suoi utilizzi.

### 2.6.1 Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati di prelievo di acque sotterranee

Relativamente ai prelievi per i diversi usi risulta disponibile ad oggi una banca dati con le portate estratte associate al dominio 3D di calcolo del modello numerico. L'orizzonte temporale è quello coperto attualmente dal modello (2003-2006). La banca dati disponibile per il modello Emiro-MO è mantenuta in collegamento con la banca dati del modello regionale Emiro-II secondo lo schema precedentemente descritto al paragrafo 2.2.

I prelievi civili sono ben conosciuti per posizione ed entità sulla base del lavoro illustrato al precedente paragrafo 2.3.8.1. In un'ottica di aggiornamento periodico del modello occorre però verificarne l'attuale disponibilità in termini di scansione temporale (l'aggregazione mensile risulta essere la più idonea) ed i tempi coi quali tali dati si possono rendere disponibili anno per anno.

Tabella 2.11: prelievi acquedottistici 2002-2006 (milioni di m<sup>3</sup>), sintesi per Gestore.

Gestore	N° pozzi	Prelievo %	Prelievo (Mm3/anno)					
			media 2002-2006	2002	2003	2004	2005	2006
<b>AIMAG</b>	30.0	25%	21.32	21.47	20.92	21.44	21.60	21.18
<b>HERA Modena</b>	61.0	41%	35.02	34.56	34.85	35.21	35.40	35.07
<b>HERA-Modena (Ex SAT)</b>	25.0	14%	12.41	12.16	13.21	12.57	11.63	12.51
<b>SORGEA</b>	11.0	8%	7.20	7.00	7.15	7.30	7.45	7.11
<b>ENIA RE</b>	15.0	9%	7.69	7.85	7.67	7.87	7.55	7.51
<b>HERA BO</b>	7.0	3%	2.85	2.59	2.55	2.58	3.14	3.39
<b>TOTALE</b>	149.0	100%	86.50	85.64	86.35	86.96	86.76	86.77

A tal fine è stata effettuata una prima ricognizione presso i singoli gestori dalla quale sono emerse le seguenti informazioni per la valutazione delle quali è opportuno tener conto dei rispettivi volumi prelevati sintetizzato in Tabella 2.11:

1. i pozzi gestiti da **Aimag** provvedono al 25% dell'intero fabbisogno idropotabile. Sono dotati di contatori e di un sistema di telecontrollo per la misura delle portate estratte. I dati necessari per l'aggiornamento del modello sono quindi disponibili;
2. i pozzi gestiti da **Hera Modena** provvedono al 54% del volume medio annuo di acqua sotterranea prelevata. Tutti i pozzi dispongono dei contatori ed esiste un sistema di telecontrollo su alcune realtà come Modena, Vignola e area ex SAT, mentre su altri il rilievo è manuale. Benché tecnicamente possibile il Gestore ha segnalato come oneroso la fornitura del dato di prelievo mensile sui singoli pozzi mantenendo preferenzialmente la possibilità di fornire il solo dato annuale;

3. **Sorgea** dispone di contatori che sono installati su ciascun pozzo ma solo 2 hanno il telecontrollo. È nelle intenzioni del Gestore estendere il telecontrollo a tutti i pozzi. Il Gestore si è anche reso disponibile a fornire in futuro la lettura manuale del dato mensile di emungimento necessario all'aggiornamento del modello;
4. il campo pozzi di Manzolino gestito da **Hera Bologna** è composto da 6 pozzi, di cui solamente 2 dotati di misuratore di portata magnetico interfacciato nel sistema di telecontrollo aziendale; l'emungimento complessivo del centro viene registrato da un misuratore di portata magnetico (anch'esso interfacciato nel sistema di telecontrollo aziendale) installato sulla condotta in uscita impianto; come per i 2 pozzi di cui sopra, nel database di telecontrollo viene storicizzato il dato di portata media mezz'oraria.

I prelievi relativi agli altri usi (industriale ed irriguo principalmente) fanno invece riferimento a stime sia per quel che riguarda i volumi, sia per le relative attribuzioni spaziali. I dati al momento inseriti nel modello numerico Emiro-MO fanno riferimento al periodo 2003-2006 che si sovrappone al periodo di ultimo aggiornamento del modello regionale Emiro-II dal quale i dati sono stati inizialmente derivati.

Le stime possono essere aggiornate/migliorate nel momento in cui si rendono disponibili aggiornamenti dei dati di base sui quali vengono elaborate, mentre la distribuzione spaziale può essere affinata attraverso l'aggiornamento del catasto pozzi regionale. Tutto ciò è già stato avviato nell'ambito delle attività di aggiornamento del quadro conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque che vedrà nei prossimi mesi l'aggiornamento dei bilanci idrici e l'aggiornamento del modello regionale Emiro-II. Contestualmente sarà possibile effettuare l'aggiornamento del modello Emiro-MO.

### **2.6.2 Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati delle ricariche del sistema in funzione delle condizioni meteo-climatiche.**

Nel precedente paragrafo 2.3.9 è stata illustrata la metodologia di valutazione del contributo meteorico alla ricarica delle acque sotterranee. I dati utilizzati derivano dal bilancio idrico del suolo condotto con CRITERIA di ARPA-SIMC. L'utilizzo di questo tipo di informazione costituisce un ottimo riferimento tecnico per la stima della infiltrazione efficace cosa che è stata verificata anche attraverso il suo impiego in altre implementazioni già realizzate di modelli di flusso delle acque sotterranee (Conoide del Fiume Reno e Conoide del Fiume Marecchia).

Ulteriore vantaggio consiste nella periodicità e sistematicità con la quale ARPA-SIMC realizza e tiene aggiornato il modello di bilancio idrico del suolo rispetto alle rilevazioni dei dati di precipitazione cosa che rende la disponibilità di tale dato più che idonea ad essere utilizzato come ingresso al modello di flusso delle acque sotterranee che a sua volta può essere aggiornato con periodicità sicuramente inferiore.

### **2.6.3 Possibilità di aggiornamento del modello relativamente ai dati piezometrici di controllo**

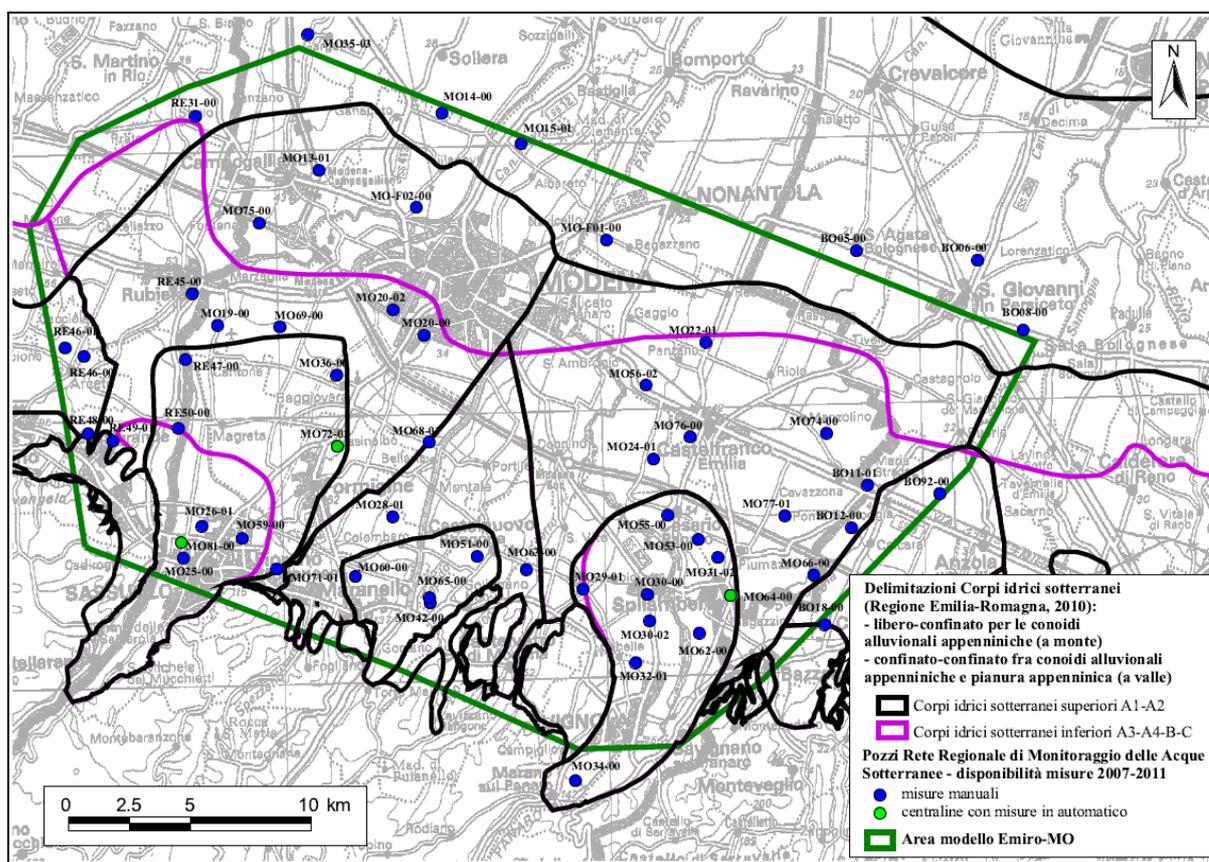
Nel precedente paragrafo 2.3.2 è stata effettuata l'analisi della disponibilità dei dati piezometrici prioritariamente mirata alla fase di implementazione e verifica del modello numerico. La Tabella 2.2 ha però anche evidenziato, anticipatamente rispetto alle reali necessità di quella fase del lavoro, il numero di pozzi disponibili per la successiva fase di aggiornamento del modello relativamente al periodo 2007-2011. Tutti e 56 i pozzi disponibili appartengono alla Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee essendosi la rete Provinciale via via ridotta negli anni antecedenti al 2007 fino alla completa sovrapposizione con la rete regionale. La distribuzione spaziale di questi pozzi è riportata nella Figura 2.105. Tutti i pozzi sono perfettamente conosciuti per ubicazione e posizionamento filtri. Questo ha permesso l'attribuzione dei singoli pozzi ai singoli corpi idrici sotterranei così come definiti nel precedente paragrafo 2.3.1. La frequenza del rilievo piezometrico manuale è semestrale.

La rete regionale di monitoraggio è stata negli ultimi anni integrata con 40 centraline in continuo per la misura del livello piezometrico. Di queste tre ricadono all'interno dell'area di studio, due all'interno della conoide del Secchia ed una all'interno della Conoide del Panaro. I dati sono disponibili a partire dall'anno 2009.

Tabella 2.12: attribuzione dei pozzi disponibili per la fase di aggiornamento del modello numerico (2007-2011) ai singoli corpi idrici sotterranei presenti all'interno dell'area di studio.

	Acquifero			Totale
	libero	confinato superiore	confinato inferiore	
Conoide Crostolo-Tresinaro		3		3
Conoide Secchia	5	6	5	16
Conoide Tiepido	2	3	2	7
Conoide Panaro	10	8		18
Conoide Samoggia		1	1	2
Freatico di pianura	2			2
Pianura Alluvionale Appenninica		4		4
Pianura Alluvionale			3	3
Pianura Alluvionale Padana		1		1
<b>Totale complessivo</b>	<b>19</b>	<b>26</b>	<b>11</b>	<b>56</b>

Figura 2.105 Distribuzione spaziale dei pozzi con misure disponibili relativamente al periodo di aggiornamento del modello (2007-2011). Pozzi appartenenti alla Rete Regionale di Monitoraggio.



## 2.6.4 Prime proposte operative

Seguendo lo schema di Figura 2.104, la fase di *gestione del modello* può essere realizzata da ARPA Emilia-Romagna secondo le modalità di seguito descritte.

### 2.6.4.1 Aggiornamento e verifica del modello

Sulla base delle indicazioni emerse al precedente paragrafo 2.6, le principali categorie di dati cui fare riferimento per l'aggiornamento del modello sono le seguenti:

1. dati piezometrici dei pozzi appartenenti alla rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee gestita da ARPA;
2. dati di ricarica meteorica, che derivano da una attività consolidata svolta in collaborazione con ARPA- SIMC, Area Agrometeorologia, riguardante le elaborazioni di bilancio idrico del suolo (CRITERIA);
3. dati di prelievo di acque sotterranee per i diversi usi (acquedottistico, irriguo ed industriale).

Relativamente ai dati di cui ai punti 1 e 2 non si ravvisano particolari criticità nella disponibilità di questi nei tempi ipotizzati per l'aggiornamento del modello.

Relativamente ai dati di cui al punto 3, per rendere effettivamente operativa la fase di aggiornamento del modello, occorre preventivamente definire accordi coi i diversi Gestori (Hera Modena, Hera Bologna, Aimag, Sorgea, Iren) in modo tale da stabilire con questi la necessaria raccolta dati (nel caso ad esempio della presenza di contatori manuali e non in telecontrollo) e l'adeguato flusso dati, coerente con le necessità di aggiornamento del modello stesso. Tali accordi devono poter necessariamente assumere un carattere continuativo in modo da poter poi procedere nel tempo con i successivi aggiornamenti. Una proposta in tal senso potrebbe essere quella di poter ricevere entro la fine del mese di febbraio dell'anno in corso i dati relativi alle 12 mensilità (da gennaio a dicembre) dell'anno precedente.

**Sulla base della disponibilità dei dati risulterà possibile già nel corso del 2013 effettuare l'aggiornamento del modello di flusso delle acque sotterranee a tutto il periodo 2007-2012. Poi a regime l'aggiornamento potrebbe essere ripetuto ogni anno.**

Tutto ciò permetterà inoltre di allungare sempre più l'arco temporale di copertura del modello numerico aumentandone così notevolmente la capacità applicative e le potenzialità.

### 2.6.4.2 Utilizzo del modello

L'utilizzo del modello prevede la sua applicazione in casi specifici ed in risposta a particolari problematiche. In generale possono essere realizzati i seguenti passaggi:

1. individuazione della specifica problematica rispetto alla quale l'utilizzo del modello può supportare il processo decisionale e/o l'obiettivo di pianificazione/gestione. Si vedano ad esempio i due casi descritti al precedente paragrafo 2.5, ma si possono citare anche altri esempi di utilizzo del modello in casi di crisi idrica, ripetersi di periodi siccitosi, valutazione dell'impatto di maggiori prelievi sullo stato della risorsa idrica sotterranea, ecc;
2. individuazione delle modalità di applicazione/utilizzo del modello (numero di anni di simulazione del modello necessari, adeguatezza del passo temporale del modello, significatività della risposta ottenibile dal modello), ed impostazione degli eventuali scenari di simulazione da realizzare (numero e tipologia di scenari alternativi);
3. analisi dei risultati ottenuti dal modello (bilancio e carichi idraulici, nello spazio e nel tempo) e formulazione del parere/rapporto.

### 3. BIBLIOGRAFIA

- [1] Russo A. (2005). *Studio idrogeologico dell'alta-media pianura modenese Settore Fiume Secchia*. Tesi di laurea Università degli Studi di Milano - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali - Corso di laurea in Scienze Geologiche - Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio".
- [2] AMCM Azienda Municipalizzata Comune di Modena (1996). *Protezione statica e dinamica nelle aree interessate dalle captazioni di acque sotterranee dell'A.M.C.M. di Modena mediante l'applicazione di un modello numerico*.
- [3] Aquaveo. *The New Groundwater Modeling System*. <http://www.aquaveo.com/gms>.
- [4] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2002). *Progetto operativo "Monitoraggio Acque"*. *Indagine di idrologia isotopica*. Rapporto tecnico, 51 pp.
- [5] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003a) *Le acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna: modello concettuale*. In: Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna, alle Province ed alle Autorità di Bacino per la elaborazione del Piano Regionale Di Tutela delle Acque e Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (Art. 44 del D. Lgs. 152/99 e Art. 115 L.R. 3/99) - Quadro conoscitivo Attività B. Rapporto tecnico, Bologna.
- [6] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003b) *Creazione di una banca dati informatizzata per la parametrizzazione idrodinamica degli acquiferi*. In: Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna, alle Province ed alle Autorità di Bacino per la elaborazione del Piano Regionale Di Tutela delle Acque e Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (Art. 44 del D. Lgs. 152/99 e Art. 115 L.R. 3/99) - Quadro conoscitivo Attività C. Rapporto tecnico, Bologna.
- [7] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003c). *Modello matematico di simulazione delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Emiro3D)*, Elaborato di supporto Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna. Rapporto tecnico, Bologna.
- [8] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2003d). *Bilanci idrici: aggiornamento dello stato attuale, scenari evolutivi e di azioni e misure di razionalizzazione, risparmio e riutilizzo*. Elaborato di supporto alla Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna.
- [9] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2005). *Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia-Romagna. Report 2003*.
- [10] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2007). *Elaborazione ed analisi dati raccolti sulle acque superficiali e sotterranee a livello locale per lo sviluppo dei piani di tutela delle acque. Attività B. Modello di flusso e di trasporto dei nitrati nelle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [11] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2008). *Analisi preliminare degli effetti dei prelievi di acque sotterranee sulla evoluzione recente del fenomeno della subsidenza in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [12] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009a). *Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi*. Rapporto tecnico.

- [13] ARPA Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2009b). *Sito nazionale Sassuolo-Scandiano. Progetto di fattibilità per la bonifica dell'acquifero superficiale dell'area del Distretto ceramico di Modena e Reggio Emilia. Relazione preliminare.*
- [14] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2010a). *Individuazione dei fattori correttivi costituenti la componente morfologia-ambientale del DMV e definizione dei tratti di loro applicazione, come da Art. 55 delle norme del Piano di Tutela delle Acque regionale. Elaborato: relazione valutazione del drenaggio verso le falde.* Rapporto tecnico, 64 pp.
- [15] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2010b). *La Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee. Relazione annuale dati 2008 e Relazione triennale 2006-2008.* Rapporto tecnico, Bologna, 59pp.
- [16] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2011a). *Elaborazione dati acquisiti dalla rete automatica di monitoraggio della piezometria con restituzione e visualizzazione in continuo dei dati sul portale web.* Rapporto tecnico, 27 pp.
- [17] Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna (2011b). *Supporto tecnico alla Regione Emilia-Romagna per la realizzazione di approfondimenti conoscitivi relativi agli acquiferi freatici di pianura.* Rapporto tecnico, 107 pp. con allegato.
- [18] ATO 4 MO Agenzia d'Ambito per i Servizi Pubblici di Modena (2008). *Piano di conservazione della risorsa idrica dell'Ambito Territoriale n°4 di Modena.*
- [19] Bissoli R., Chahoud A., Martinelli G. (2000). *Progetto "Monitoraggio Acque": il programma Sina.* ARPA Rivista N.5 Settembre – Ottobre 2000.
- [20] Chahoud A., Gelati L., Palumbo A., Patrizi G., Pellegrino I., Zaccanti G. (2013). *Modellistica delle acque sotterranee: gestione dei modelli ed esempi applicativi in Emilia-Romagna (Italia).* Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater , Vol. 2 n. 1, anno 2013, in stampa.
- [21] Domenico P.A. (1972). *Concepts and Models in Groundwater Hydrology.* McGraw-Hill, New York.
- [22] EG Engineering Geology, ATO 4 MO Agenzia d'Ambito per i Servizi Pubblici di Modena (2007). *Piano d'Ambito del Servizio Idrico Integrato. Risorse idriche sotterranee della pianura modenese. Fase I- Revisione e omogeneizzazione degli studi idrogeologici. Relazione tecnica.*
- [23] Annovi E. (2009). *Lo studio geochimico, biologico e isotopico delle acque delle province di modena e reggio emilia, con particolare riferimento alle acque del distretto ceramico.* Tesi specialistica. Università degli Studi di Modena e Reggio-Emilia - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali - Corso di Laurea specialistica in Scienze per l'Ambiente e il Territorio.
- [24] Giusti R. (2011). *Rete di flusso e caratteristiche fisico-chimiche della falda freatica della conoide del torrente Tiepido* Tesi di Laurea Università di Modena e Reggio-Emilia - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali - Corso di Laurea triennale in Scienze Geologiche.
- [25] Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. & McDonald M.G. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water model – User Guide to Modularization concepts and the Ground-water Flow Process.* U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.
- [26] Marchetti Dori S. (2005). *Caratterizzazione dei depositi clastici presenti nel sottosuolo della pianura modenese, con particolare riferimento al territorio del comune di Modena.* Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra - XVIII Ciclo. Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia Dipartimento di Scienze della Terra.
- [27] Gangemi M.R. (2005). *Studio idrogeologico dell'alta-media pianura modenese Settore Fiume Panaro.* Tesi di laurea Università degli Studi di Milano - Facoltà di Scienze Matematiche,

- [28] Mc Donald M.G. e Harbaugh A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite difference ground water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, chapter A1.
- [29] Pagotto A. (1995). *Valutazione per la gestione ottimale delle risorse idriche sotterranee mediante implementazione di un modello matematico degli acquiferi*. Eseguito per SAT Sassuolo.
- [30] Pagotto A., Casoli B. (1995). *Studio di dettaglio per la valutazione del grado di protezione del campo acquifero di via Loda in Comune di Castelfranco Emilia (Modena)*. Eseguito per il Comune di Castelfranco Emilia.
- [31] Pellegrini M. (1985). *Studio idrogeologico Campo Acquifero Via Carletto di Manzolino. Gestito da Seabo*.
- [32] Pellegrini M., Pagotto A. (1992). *Studio Idrogeologico del territorio comunale e del nuovo campo acquifero (Comune di Castelfranco Emilia)*. Eseguito per il Comune di Castelfranco Emilia.
- [33] Praticelli W. (2009). *Validazione di un modello di bilancio idrico per colture "idroesigenti"..* ARPA Rivista N. 3 maggio-giugno 2009.
- [34] Regione Emilia-Romagna (2010a). *Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 2 "Tipizzazione/caratterizzazione e individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio"*.
- [35] Regione Emilia-Romagna (2010b). *Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 3 "Programma di monitoraggio del Distretto Idrografico Padano"*.
- [36] Regione Emilia-Romagna (2010c). *Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n°350 del 8/2/2010 – Allegato 4 "Programma di monitoraggio del Distretto Idrografico Appennino Settentrionale"*.
- [37] Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio, Selca, Firenze.
- [38] Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Progetto CARG - *Carta Geologica d'Italia, scala 1:50.000. Foglio 201*: Modena. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/geologia/progetto-carg-carta-geologica-ditalia-scala-1-50.000>
- [39] Tomei F. , Antolini G. , Bittelli M., Marletto V., Pasquali A., Van Soetendael M. (2007) . *Validazione del modello di bilancio idrico criteria*. AIAM 2007 - 10° Convegno nazionale di Agrometeorologia.
- [40] U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation (1998). *Earth Manual - Part 1 - Third Edition*. United States Government Printing Office (Denver), 348 pp.
- [41] Zinoni F., Marletto V., Botarelli L., Alessandrini C., Spisni (2004). *Siccità e desertificazione: uno studio nella valle del fiume Lamone*. ARPA Rivista N. 5 settembre-ottobre 2004.