



ARPAT

Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

**Accordo di Programma per
l'attuazione degli interventi urgenti per
la bonifica della falda acquifera a seguito
inquinamento da organoalogenati
Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI)**

Modello di Flusso e Trasporto

Regione Toscana



Accordo di Programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera a seguito inquinamento da organoalogenati Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI)

Modello di Flusso e Trasporto

Accordo di Programma per l'attuazione degli interventi urgenti per la bonifica della falda acquifera a seguito inquinamento da organoalogenati Comuni di Montescudaio (PI) e Cecina (LI)

Modello di Flusso e Trasporto

Autori

Stefano Menichetti, Stefano Tessitore

ARPAT – Direzione tecnica

Elena Baldini, Dario Del Seppia

ARPAT – Dipartimento di Livorno

Fabrizio Franceschini

ARPAT – Dipartimento di Pisa

Collaboratori

Gli operatori dei Dipartimenti di Pisa e Livorno e dell'Area Vasta Costa che hanno assicurato i sopralluoghi, i prelievi, le misure in campo, le analisi di laboratorio e il supporto conoscitivo.

Il Dott. Riccardo Armellini che ha svolto presso ARPAT – Direzione tecnica lo stage “Elaborazioni in ambiente GIS a supporto di un Modello numerico di Flusso e Trasporto per il sito contaminato da Organo Alogenati di Poggio Gagliardo (Montescudaio, PI)”.

La Dott.ssa Natacha Gori che ha elaborato presso ARPAT – Dipartimento di Livorno la tesi triennale del Corso di Laurea in Scienze Ambientali dal titolo “Bonifica e controllo della contaminazione da organoclorurati nella falda di Cecina: ricostruzione geometrica dell'acquifero”.

Novembre 2013

INTRODUZIONE.....	5
1 MODELLO CONCETTUALE	11
1.1 Ricostruzione idrostratigrafica.....	11
1.2 Definizione dei parametri idrogeologici T K S.....	16
1.3 Condizioni piezometriche.....	23
1.4 Prelievo dai pozzi	25
1.5 Infiltrazione efficace	26
1.6 Rapporti Fiume Cecina – Falda	30
1.7 Distribuzione degli organo alogenati.....	35
2 MODELLO DI FLUSSO	41
2.1 Premessa	41
2.2 Modello stazionario naturale Rev 0	43
2.3 Modello stazionario Rev 1 (Rev 0 + prelievi)	47
2.4 Modello stazionario Rev 2 (Rev 1 + limite colline a flusso costante).....	49
2.5 Modello stazionario Rev 3 (Rev 1 + limite Cecina tipo “River”).....	52
2.6 Modello stazionario - simulazione scenari.....	57
2.7 Modello stazionario multistrato Rev 4.....	60
2.8 Modello transitorio monostrato Rev 3	62
3 MODELLO DI TRASPORTO.....	65
3.1 Modello trasporto 2005 – 2010	69
3.2 Modello trasporto anno idrologico 2012-2013.....	74
3.3 Modello trasporto previsionale anno idrologico 2013-2014.....	78
4 CONCLUSIONI.....	82
BIBLIOGRAFIA	84

INTRODUZIONE

La relazione descrive gli approfondimenti idrogeologici, condotti da ARPAT nella pianura costiera del F. Cecina, per lo sviluppo di un modello di flusso idrico sotterraneo e di trasporto in falda di composti organoalogenati.

Il lavoro fa seguito al rilevamento da parte dell'Agenzia nel marzo 2004 di composti organoalogenati (prevalentemente tricloroetilene - TCE e tetracloroetilene - PCE) in due pozzi situati nel Comune di Cecina, collegati all'acquedotto locale, e alla conseguente attività d'indagine, che tuttora prosegue, per la comprensione dell'origine, dell'entità, dell'estensione del fenomeno e per le sue possibili soluzioni. Nel seguito si riassumono brevemente i principali risultati di quest'attività, rimandando per maggiori dettagli a relazioni tecniche specifiche (Fianchisti et alii, 2005, 2010.)

La zona sorgente della contaminazione, in seguito ad accertamenti svolti in collaborazione con l'ASL, è stata riconosciuta in un'area industriale - artigianale situata ad est del Comune di Cecina, sul territorio ricadente nella provincia di Pisa (area di Poggio Gagliardo, Comune di Montescudaio, Figg. 1 e 2) dove in passato erano operanti una lavanderia industriale e una conceria, in seguito dismesse. In questo sito sono state eseguite la caratterizzazione ambientale, la progettazione della bonifica e la gestione della MISE (Messa In Sicurezza di Emergenza). Infine è stato definito un piano di monitoraggio per il pennacchio di contaminazione in uscita dall'area sorgente non trattenuto dalla MISE.

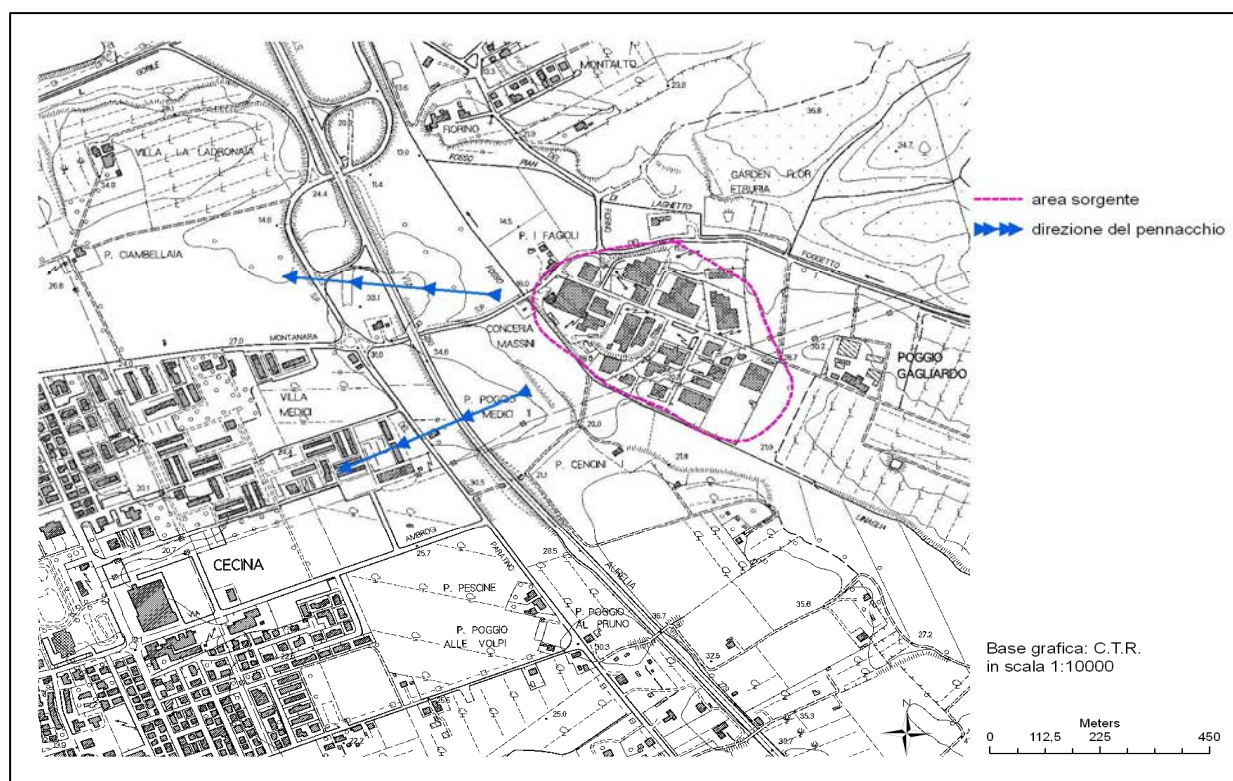


Figura 1- L'area sorgente dell'inquinamento: la zona industriale di Poggio Gagliardo

La MISE è stata effettuata inizialmente con due pozzi reperiti in loco (pozzi GIANNELLI e LA RAPIDA) trasformati in pozzi barriera, con annessi impianti di filtrazione a carboni attivi (Pump & Treat). Per controllare e limitare il movimento del plume inquinato, che si stava spostando in direzione sudovest verso l'abitato di Cecina, anche un terzo pozzo, il LADRONAIA, dello stesso acquedotto di Cecina, con annesso impianto pump & treat, è stato mantenuto in pompaggio. La limitata disponibilità della risorsa idrica ha consentito solo una rimodulazione delle portate dei pozzi di Cecina e l'installazione nell'area interessata dal pennacchio di altri impianti a carboni attivi per il raggiungimento dei requisiti di potabilità.

Nel primo periodo di funzionamento degli impianti di trattamento (da maggio 2004 a gennaio 2005) sono stati estratti dalla falda circa 715 Kg di PCE e TCE. La contaminazione è sembrata diminuire progressivamente fino al 2009, anno che ha coinciso con un'elevata piovosità ed un brusco spostamento verso l'abitato di Cecina del pennacchio inquinante, non contenuto dall'attuale sistema di MISE.

La Regione Toscana, che nel frattempo aveva completato predisposizione e iter di approvazione del progetto di bonifica, ha dunque deciso di procedere nella realizzazione di un primo stralcio rappresentato dalla messa in esercizio di due nuovi pozzi barriera realizzati allo scopo, il CD4 e il CD5.

Con l'attivazione dei pozzi, avvenuta nell'estate 2012 con portate stabilite dal progetto, la stessa Regione Toscana ha chiesto ad ARPAT, nell'ambito dell'accordo di programma di provvedere alla realizzazione di un modello idrogeologico, oggetto della presente relazione, in grado di calibrare con massima efficienza gli emungimenti dai pozzi presenti nell'area e supportare il programma di monitoraggio svolto con cadenza mensile.

L'area d'interesse (Fig. 2) comprende dunque una porzione di territorio a cavallo dei comuni di Cecina (LI) e di Montescudaio (PI).

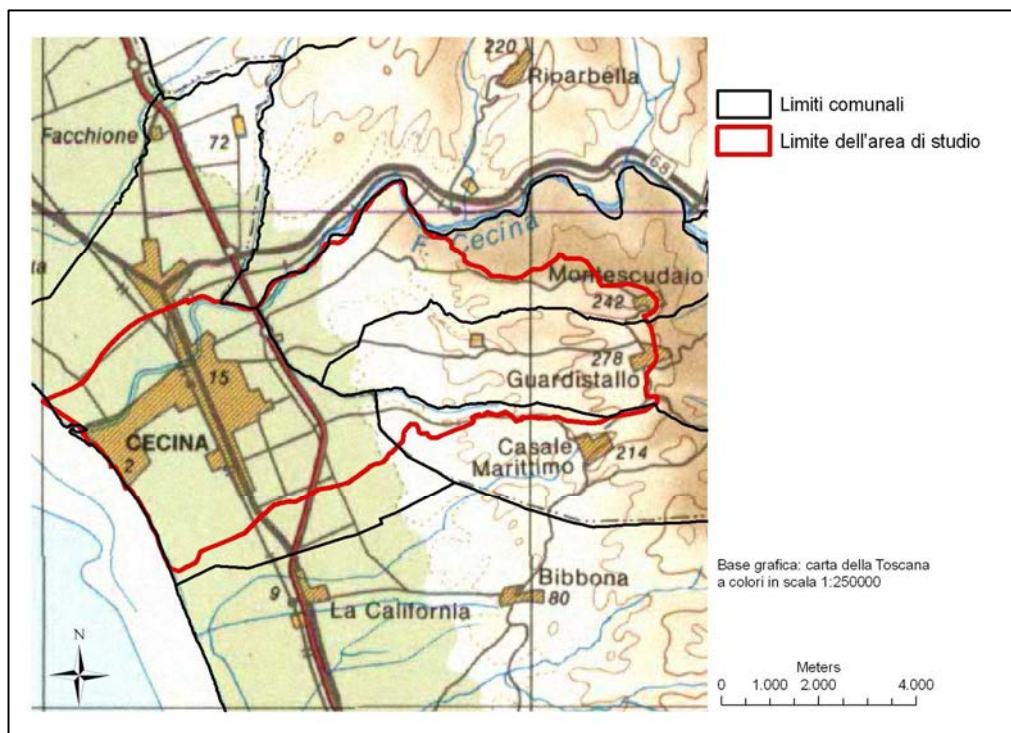


Figura 2 - I confini dell'area di studio

Dal punto di vista geomorfologico gli elementi prevalenti sono la pianura costiera con la fascia di dune e i terrazzamenti che si raccordano con la pianura a valle, sul lato Nord-Ovest dell'area in studio, ed i rilievi collinari a monte, sul lato Sud – Est dell'area.

Dal punto di vista geologico (Fig.3) questa zona costiera è caratterizzata da depositi quaternari (prevalentemente Pleistocene) incoerenti di origine fluviale, eolica e marino-transizionale. Questi depositi eterometrici, di diversa origine e natura, sono caratterizzati principalmente, fino a 40 m di spessore, da sabbie, ghiaie, arenarie, conglomerati e interstrati sabbioso limosi. L'alternanza di questi depositi costituisce nel suo complesso una struttura acquifera unica, anche se con diverse tipologie di falda idrica, secondo le aree prese in considerazione (vedi paragrafo successivo). Il

substrato di questa copertura clastico - terrigena è dato dalla presenza di uno spesso e caratteristico orizzonte argilloso ad *Arctica Islandica* del Pleistocene inferiore.

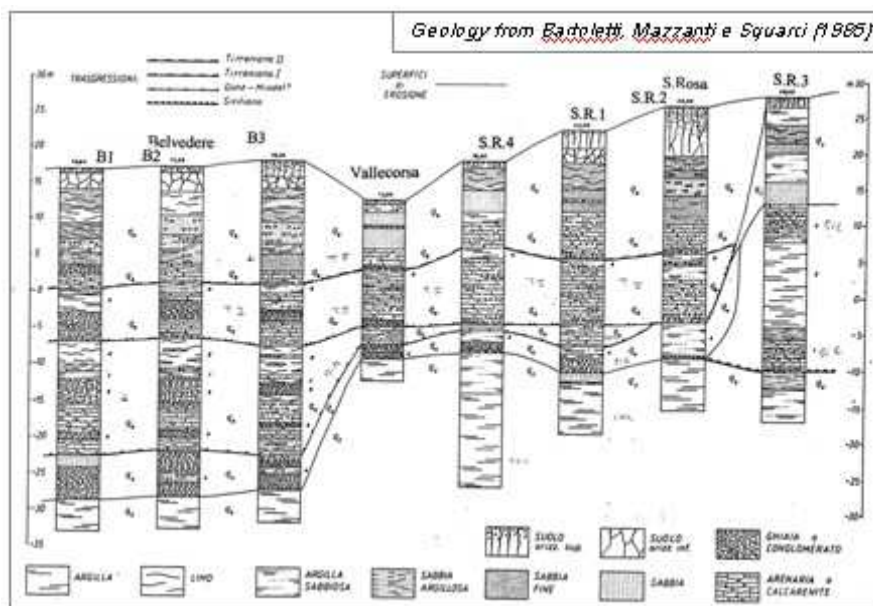


Fig. 3 – Sezione geologica rappresentativa

Durante la caratterizzazione iniziale e gli studi per il progetto di bonifica sono state prodotte dalla Regione Toscana alcune sezioni interpretative a scala locale, concentrate sulla zona industriale di Poggio Gagliardo, integrando le stratigrafie presenti con i dati di contaminazione rilevati. E' stata individuata la presenza, almeno locale, di due acquiferi, uno superficiale ed uno profondo, separati da uno strato di argilla spesso dai 5 ai 10 metri.

È stata confermata la presenza di una faglia in direzione NO-SE all'altezza del Fosso Linaglia, che rialza la zona dell'abitato di Cecina rispetto all'area industriale e che potrebbe avere qualche influenza sulla propagazione degli inquinanti sia come incremento di conducibilità idraulica che come interruzione della continuità dello strato argilloso acquicludo di separazione.

Per il raggiungimento degli obiettivi prestabiliti nel presente lavoro, è stato deciso di adottare una metodologia di studio articolata in due fasi principali. La prima fase è finalizzata alla definizione del modello concettuale del sistema acquifero, cioè alla realizzazione dello schema idrogeologico - idrodinamico, con particolare attenzione ai meccanismi di ricarica - scarica delle falde e all'individuazione di eventuali rapporti fiume – falda, cui è seguita l'implementazione di un primo modello numerico di flusso stazionario, utilizzando il codice di calcolo MODFLOW con interfaccia grafica ESI - GroundwaterVistas.

La seconda fase ha riguardato invece lo sviluppo del modello di flusso transitorio e di trasporto mediante gli stessi software di modellistica e la simulazione di vari scenari per la taratura degli emungimenti dai pozzi (preesistenti e/o nuovi) della rete di bonifica.

Di seguito si riporta il dettaglio delle attività principali previste e sviluppate, con indicato il paragrafo nel quale sono descritte nella presente relazione:

<u>Fase di progetto</u>		Paragrafo della relazione descrittivo delle attività progettuali	Attività previste e svolte	
<u>FASE I</u>	MODELLO CONCETTUALE E MODELLO NUMERICO DI FLUSSO STAZIONARIO: acquisizione e validazione dati esistenti, implementazione e calibrazione in GWVistas 5	Ricostruzione idrostratigrafica	stratigrafie e completamento dei pozzi oggetto del monitoraggio => inserimento in Dbgeo	
		Definizione dei parametri idrogeologici Te K	prove di portata (a gradini e di lunga durata) effettuate sui pozzi => determinazione parametri trasmissività e storatività T, S, ne	
		Condizioni piezometriche	livelli piezometrici in condizioni statiche – ricostruzione per interpolazione di piezometriche episodiche (3 morbide, 3 magre) e calcolo di 4 stagionali medie	
		Prelievo dai pozzi	volumi di acqua emunta da ciascun pozzo e modalità di prelievo => ricostruzione termine di bilancio per medie stagionali	
		Infiltrazione efficace	dati meteorologici => elaborazione di mappe della ricarica media stagionale (P – ETR – runoff)	
		Rapporti Fiume Cecina - Falda	dati idrometrici => elaborazione di idrogrammi della portate e delle altezze idrometriche	
		Distribuzione degli organoalogenati	concentrazioni organoalogenati => ricostruzione degli spostamenti del pennacchio per interpolazione delle campagne dal 2003 al 2011	
		Modello di flusso	Modello Stazionario	inserimento proprietà fisiche Layer (Top, Bottom, K)
				inserimento condizioni al contorno (Recharge, Stream, Well)
				Run modello con calibrazione sui 15 target (livelli piezometrici medi)

Fase di progetto		Paragrafo della relazione descrittivo delle attività progettuali	Attività previste e svolte	
FASE II	MODELLO NUMERICO DI FLUSSO E TRASPORTO IN TRANSITORIO: implementazione e calibrazione in GWVistas 5		Modello Transitorio medio stagionale	inserimento proprietà fisiche (Ss, Sy, ne)
				inserimento condizioni al contorno stagionali medie (Recharge, Stream, Well)
				Run modello con calibrazione sui 15 target (livelli piezometrici stagionali medi)
			Modello Transitorio triennio 2009, 2010, 2011	inserimento condizioni al contorno triennio 2009-2011 (Recharge, Stream, Well)
				Run modello con calibrazione sui 15 target (idrogrammi piezometrici triennio)
			Modello Trasporto	inserimento proprietà fisiche (Dispersione, Diffusività, Degradazione)
				Run modello con calibrazione triennio 2009-2011 sui 15 target (diagrammi concentrazione tempo)
			Simulazioni per variazioni degli emungimenti dei pozzi dell'acquedotto, regime della ricarica, nuovi pozzi	inserimento condizioni al contorno previsionali
				Run modello

- 2- acquifero indifferenziato (delimitato da TOP layer 1 e BOTTOM layer 3 nelle zone in cui è assente l'interstrato)
- 2c- acquifero superiore (delimitato da TOP layer 1 e BOTTOM layer 1)
- 2b- interstrato (delimitato da BOTTOM layer 1 e BOTTOM layer 2)
- 2a- acquifero inferiore (delimitato da BOTTOM layer 2 e BOTTOM layer 3)
- substrato (al disotto del BOTTOM layer 3)

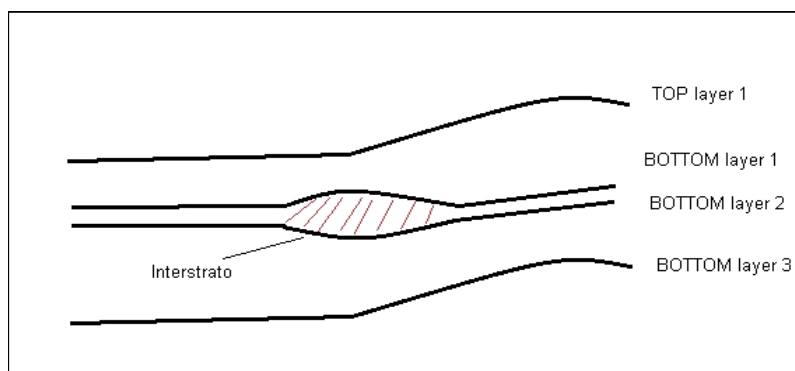


Figura 4 - Schema delle superfici sotterranee

Questo lavoro di classificazione è stato eseguito in collaborazione con il Dipartimento di Livorno dell'Agenzia.

Il raggruppamento in classi degli strati intercettati dai sondaggi ricadenti nell'area di studio, ha consentito di selezionare di volta in volta solo le quote degli strati d'interesse in quella determinata fase del lavoro. In esempio, per la ricostruzione del letto dell'acquifero sono stati selezionati, tramite il *Query builder* di ArcView, tutti i sondaggi che avevano registrato la presenza dell'unità idrogeologica 1. Da questi, raggruppandoli per codice identificativo, sono state estratte le quote minime dal piano campagna del tetto di ogni strato selezionato. Veniva così creato un layer puntuale contenente solo i punti di nostro interesse, con associate le quote necessarie per la ricostruzione della superficie. Seguendo la stessa procedura, con le dovute modifiche in fase di query, sono stati estratti anche i punti relativi al tetto dell'acquifero.

Gli shapefile così ottenuti sono stati poi importati in ArcMap per l'elaborazione con il modulo geostatistico *Geostatistical Analyst*. Infatti è stato necessario passare da dati puntuali a informazioni continue, che coprissero tutta l'area di studio, attraverso un'interpolazione delle quote con il metodo del Kriging.

Questo procedimento geostatistico ha permesso di ottenere nell'area in esame l'interpolazione in superfici continue dei valori scelti, consentendo la verifica della bontà del dato in varie modalità:

- Controllo geostatistico della effettiva continuità spaziale della variabile da interpolare (semivariogramma)
- Cross-validation
- Errore medio (Mean Error)
- Radice quadrata della media dei quadrati degli errori (Root Mean Square)

Inizialmente questa operazione è stata fatta per definire il letto e il tetto dell'acquifero (figg. 5 e 6).

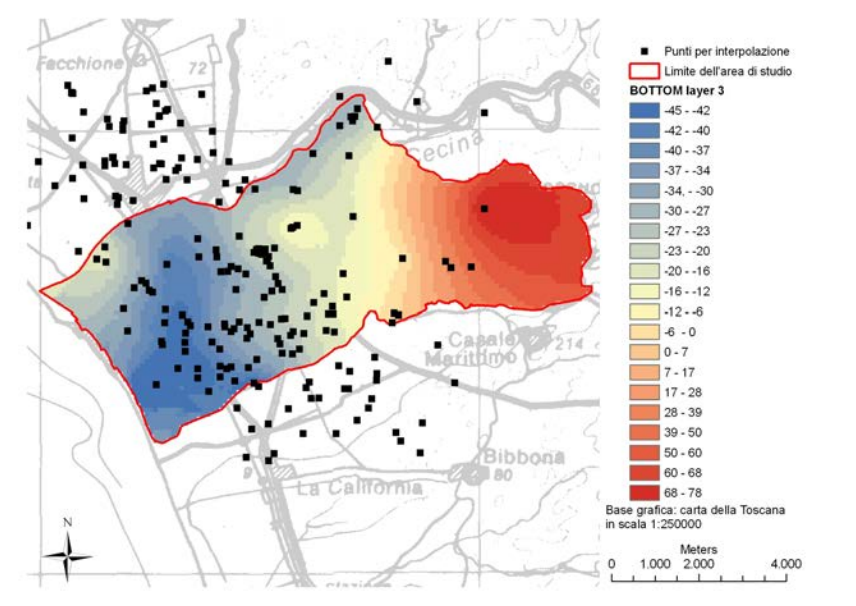


Fig 5 – Interpolazione superficie di letto (BOTTOM)

Sulla superficie superiore è stata fatta un'ulteriore verifica con il modulo *Raster Calculator* sottraendo i valori di quota del tetto da quelli del DEM (*Digital Elevation Model*) per evidenziare i punti in cui il primo eccedesse il secondo. In queste zone l'acquifero è stato ritenuto freatico e quindi la sua quota di tetto era da considerarsi coincidente con quella del piano campagna. Per questo, sempre con il *Raster Calculator*, in particolare grazie alla funzione CON, sono stati sostituiti i valori di quota del tetto, quando questi erano più elevati di quelli del terreno, con quelli del DEM.

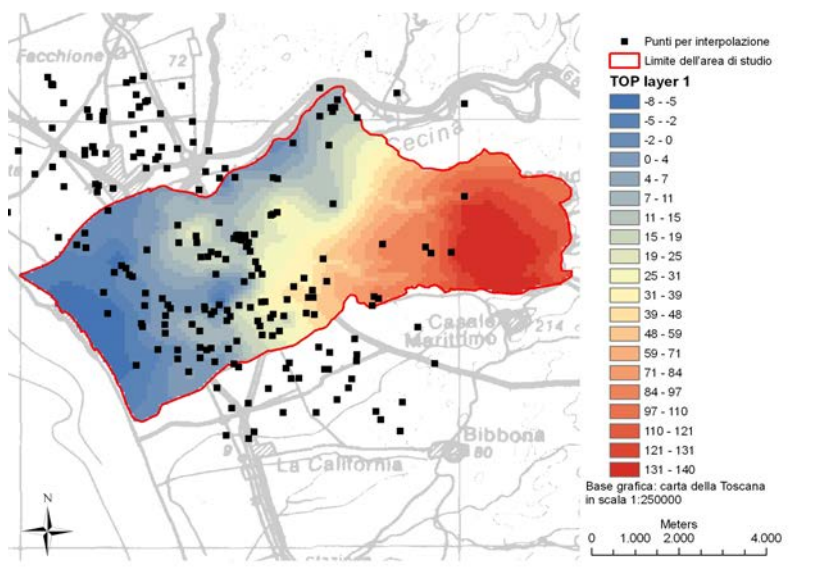


Fig 6 – Interpolazione superficie di tetto (TOP)

Dalle stratigrafie contenute all'interno del DBGEO e da indagini svolte in precedenza era stata rilevata la presenza, nella parte nord-ovest dell'area, di un interstrato argilloso, poco permeabile, che separa localmente l'acquifero superiore da quello inferiore.

Analoghe condizioni di locale separazione tra un acquifero superiore ed uno inferiore sono date da uno spesso strato argilloso, in passato sede di attività estrattiva per laterizi, affiorante nei numerosi cavi in destra idrografica del Cecina (Benvenuti e al., 2008). I due orizzonti, anche se di età geologica diversa, sembrano ritrovarsi, secondo le stratigrafie disponibili, affiancati senza importanti soluzioni di continuità.

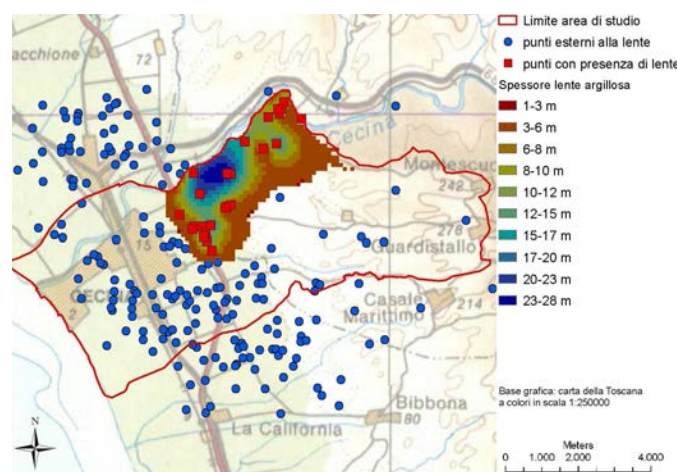


Figura 7 – Spessore interstrato argilloso

Quindi, sempre dal database geologico, sono stati estratti i sondaggi che presentavano questo “orizzonte” di interstrato per acquisirne le quote del tetto e della base per poi procedere con l'interpolazione. L'inserimento nel modello numerico della geometria (letto e tetto) di questo strato

argilloso ha presentato non pochi problemi che hanno comportato il ricorso a procedimenti ed artifici di calcolo concettualmente laboriosi.

Lo strato è infatti limitato solo ad una porzione dell'area di studio, mentre il programma di modellazione Ground Water Vistas 5 necessita l'inserimento di due superfici sovrapposte coprenti tutta l'area. Nella fig. 7 è rappresentata la distribuzione areale di questo strato impermeabile in termini di spessore.

Il deposito argilloso ha una forma lentiforme con uno spessore massimo di 28 metri nella zona prossima alla sponda sinistra del Fiume Cecina; da qui lo spessore diminuisce gradualmente allontanandosi dal fiume nelle varie direzioni.

Le numerose nuove stratigrafie acquisite e le successive rielaborazione delle superfici fondamentali del sistema acquifero multistrato hanno permesso di dettagliare maggiormente le conoscenze idrostratigrafiche del sottosuolo nella stessa zona di Poggio Gagliardo (Fig. 8) dove lo spessore della lente raggiunge un valore medio di circa 7 m.

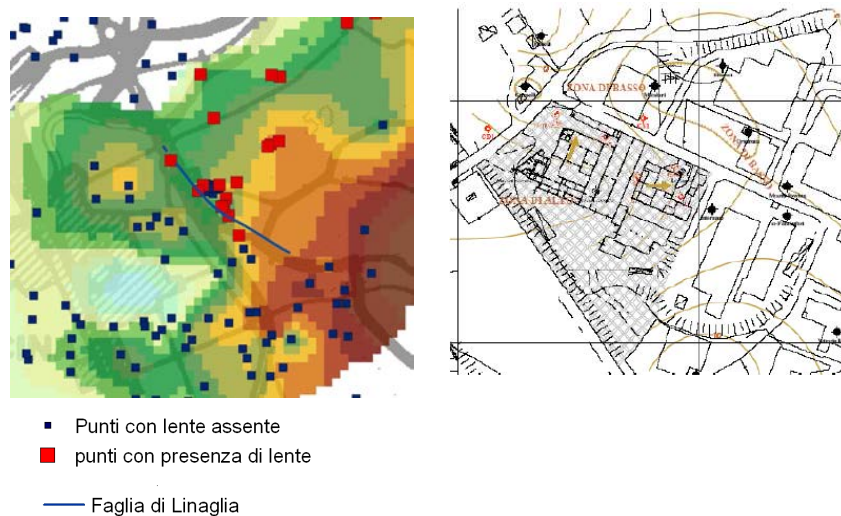


Fig. 8 – Letto dell'acquicludo nel sottosuolo di Poggio Gagliardo

1.2 Definizione dei parametri idrogeologici T K S

Tramissività

Sulla base dei dati forniti da ASA Livorno e relativi ad alcune prove di pompaggio, eseguite dalla Provincia di Pisa nella zona di nostro interesse, è stato possibile ricavare alcuni valori di tramissività del sistema acquifero.

In particolare ASA ha messo a disposizione dei report in cui è registrata la variazione del livello piezometrico della falda durante il funzionamento di un pozzo a una determinata portata. I dati sono riferiti a sei pozzi, la cui disposizione, nella parte nord-est dell'area, è riportata in Fig. 9.

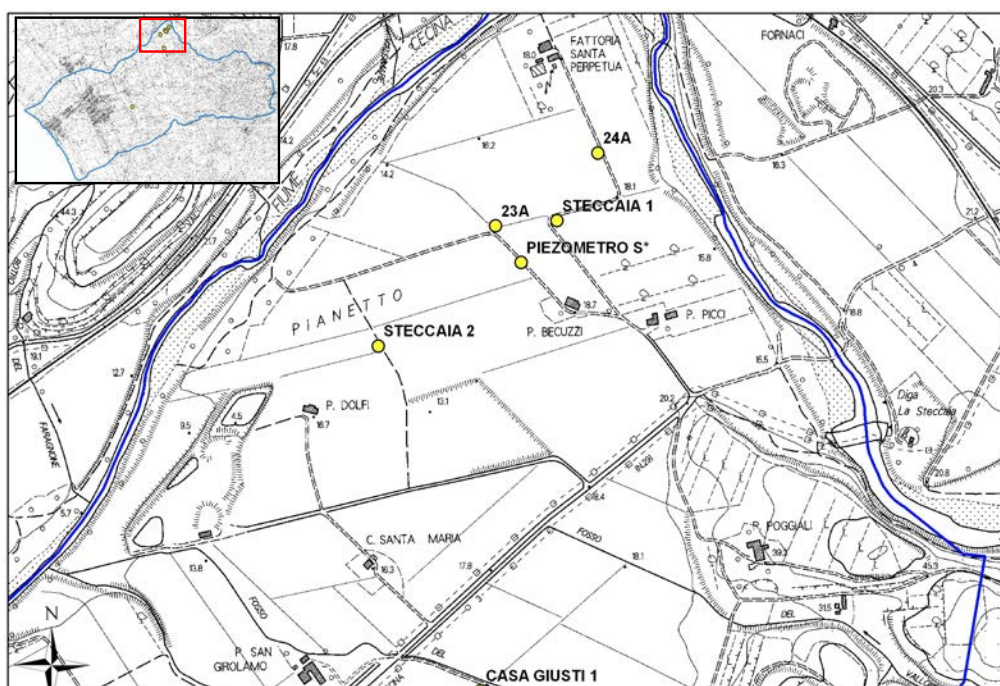


Figura 9 - La disposizione dei pozzi per le prove di emungimento

E' stato costruito quindi un grafico (Fig. 10) che mostra le registrazioni delle sonde col passare del tempo in cui i pozzi erano attivi, cioè dal 8/9/2011 al 3/10/2011.

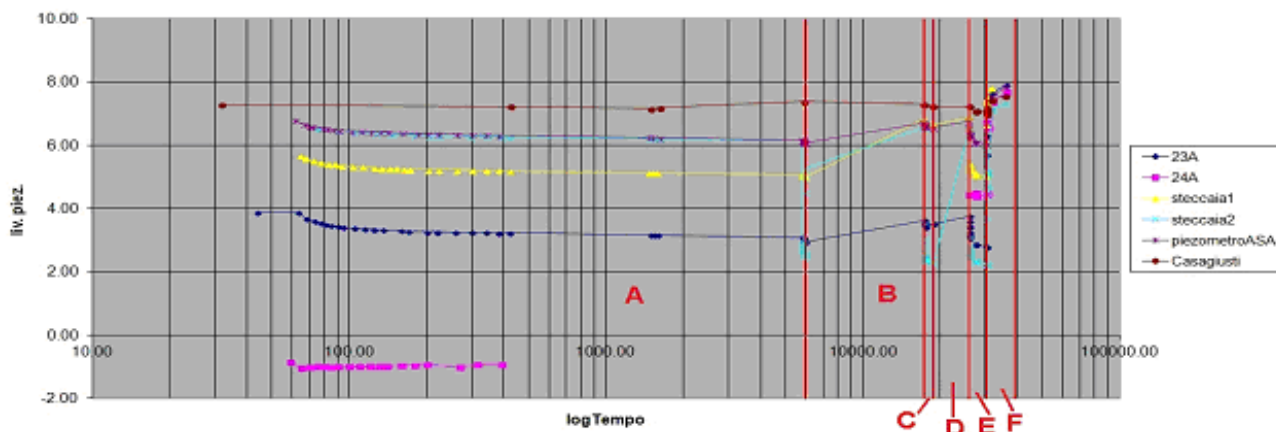


Figura 10 – Diagramma generale prove di pompaggio

Grazie alle informazioni che accompagnavano i dati è stato possibile suddividere le prove in sei periodi. Di questi sono stati ritenuti rilevanti i seguenti:

- A: dall'accensione dei pozzi fino a una prima interruzione per un guasto tecnico;
- E: da quando tutti i pozzi sono messi nuovamente in funzione fino alla fine dei pompaggi;
- F: dallo spegnimento fino al raggiungimento del livello “statico” della falda in assenza di pompaggi.

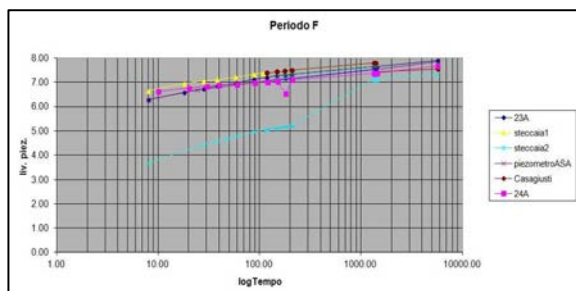
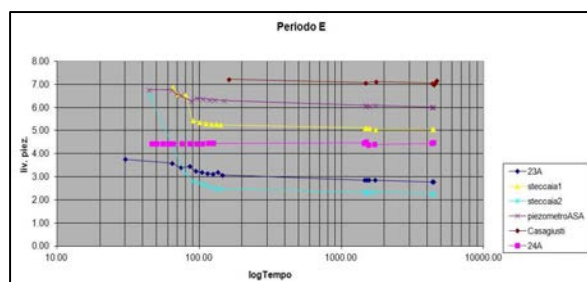
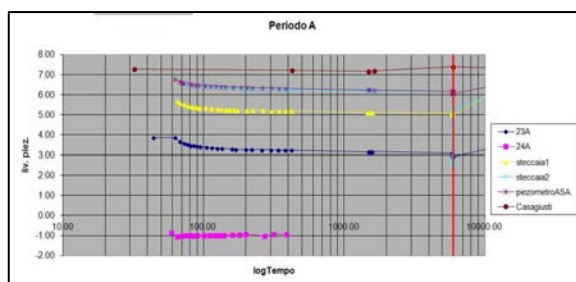


Figura 11 - I tre periodi A, E ed F nel dettaglio

Sia nella prima sia nella seconda fase, si nota un iniziale abbassamento della falda, dovuto al pompaggio da parte dei pozzi, seguito da una stabilizzazione prolungata del livello della stessa. In

questo tratto della curva è stata fatta passare una linea di tendenza, per poterne ricavare il coefficiente angolare, che sarebbe servito per il calcolo di **C**, cioè l'abbassamento in metri della curva all'interno di un modulo logaritmico, dato dal coefficiente angolare della retta moltiplicato per il logaritmo naturale di 10. Questo valore è stato poi inserito nella formula per il calcolo della trasmissività (Castany G., 1985):

$$T = 0.183 * Q / c$$

dove T è la trasmissività in metri quadri al secondo e Q è la portata dei pozzi in metri cubi al secondo. Il valore della portata è stato calcolato come somma delle portate dei vari pozzi attivi i cui effetti, dopo un certo intervallo, si sovrapponevano.

Non sono stati tenuti in considerazione i pozzi Casagiusti e 24A, il primo perché troppo lontano dagli altri e il secondo perché, essendo molto vicino al fiume Cecina, ne risentiva fortemente dell'influenza.

Di seguito, in tabella 1, sono riportati i risultati delle prove appena descritte.

PERIODO A						
Pozzo	Portata (mc/sec)	coeff. retta	c (m)	T (mq/sec)	Pozzo	T media nei 3 periodi
23A	0.067	0.0784	0.180523	0.068	23A	0.061
piezometroASA	0.067	0.0675	0.155424	0.079	piezometroASA	0.065
steccaia2	0.067	0.0564	0.129866	0.094	steccaia2	0.073
steccaia1	0.067	0.0534	0.122958	0.100	steccaia1	0.085

PERIODO E				
Pozzo	Portata (mc/sec)	coeff. retta	c (m)	T (mq/sec)
23A	0.083	0.0841	0.193647	0.078
piezometroASA	0.083	0.0789	0.181674	0.084
steccaia2	0.083	0.0669	0.154043	0.099
steccaia1	0.083	0.0574	0.132168	0.115

PERIODO F				
Pozzo	Portata (mc/sec)	coeff. retta	c (m)	T (mq/sec)
steccaia2	0.083	0.2653	0.610876	0.025
piezometroASA	0.083	0.1948	0.448544	0.034
23A	0.083	0.1738	0.400189	0.038
steccaia1	0.083	0.1635	0.376473	0.040

Tabella 1 - Risultati delle prove nei tre periodi e il valore della T media

I valori di trasmissività così determinati, in diversi periodi e punti di osservazione sono stati molto concordi indicando un campo di variazione tra 2,5E-2 e 1,1E-1 mq/s con valore medio di 6E-2 mq/s.

In seguito sono stati forniti i dati già elaborati derivanti da altre prove riguardo al pozzo Casagiusti, in cui era rilevato un valore di trasmissività di 1,1E-3 mq/sec. Inoltre ARPAT era già in possesso di questi dati per una serie di pozzi nella zona di Poggio Gagliardo, in particolare i pozzi CD1 e CD2 con una T rispettivamente di 1,2E-2 mq/sec e 7,8E-3 mq/sec; ASEM 8 (ASA Ladronaia) e il

pozzo Fattoria di Ladronaia con una trasmissività di $1,0E-2$ mq/sec, e il pozzo Paratino Asa con un valore di $3E-3$ mq/sec (Fig. 12).

Conducibilità

Una volta noti i valori di trasmissività **T** si è provveduto al calcolo della conducibilità idraulica **K** sulla base dei valori di spessore **b** acquifero ($K=T/b$).

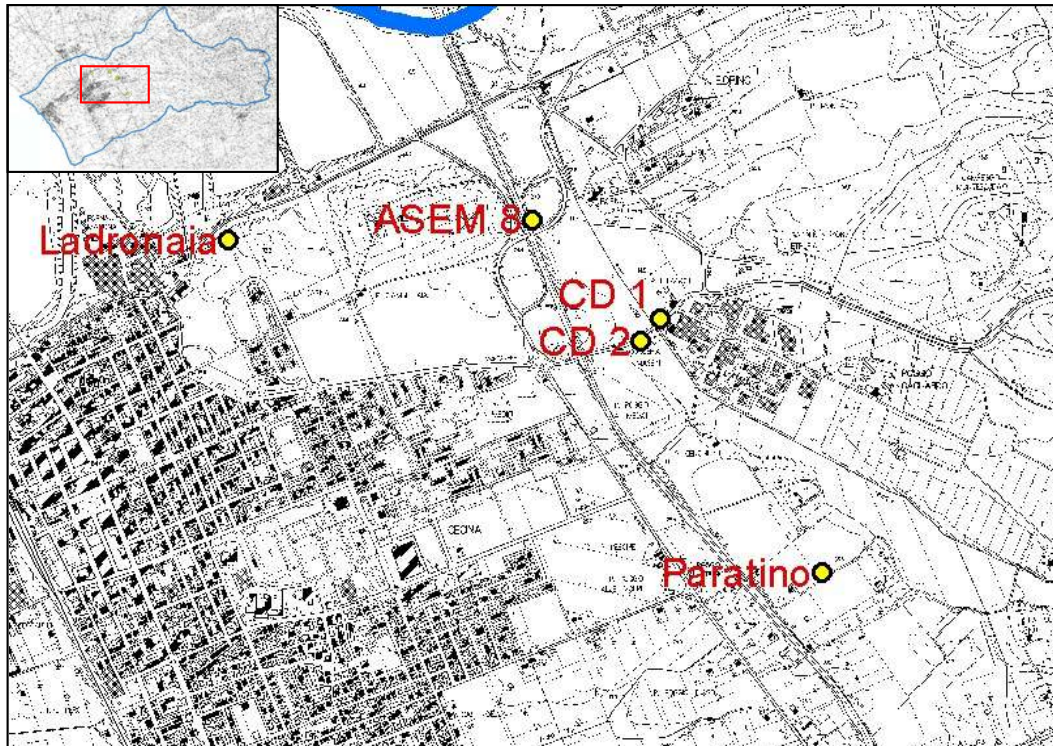


Figura 12 - La disposizione dei nuovi pozzi

Si è fatto ricorso nuovamente al DBGEO da cui è stato possibile estrarre per i sondaggi ricadenti all'interno dell'area di studio, questo valore di spessore. Tra questi vi erano gli stessi pozzi per i quali era stato calcolato il valore della trasmissività.

E' stato così possibile determinare le conducibilità idrauliche tenendo presente, come illustrato in figura 13, che l'area di studio, dal punto di vista delle caratteristiche intrinseche di permeabilità dei terreni, è suddividibile in almeno tre zone identificabili sulla base della carta geologica:

- le sabbie-argille ad Artica del Pleistocene Inferiore ad est, in corrispondenza dei rilievi collinari (Dominici e al., 2011);
- i terrazzi alluvionali del Pleistocene Medio nella parte pianeggiante centrale;

- le alluvioni recenti del Pleistocene Superiore nella parte più prossima al Fiume Cecina e al mare.

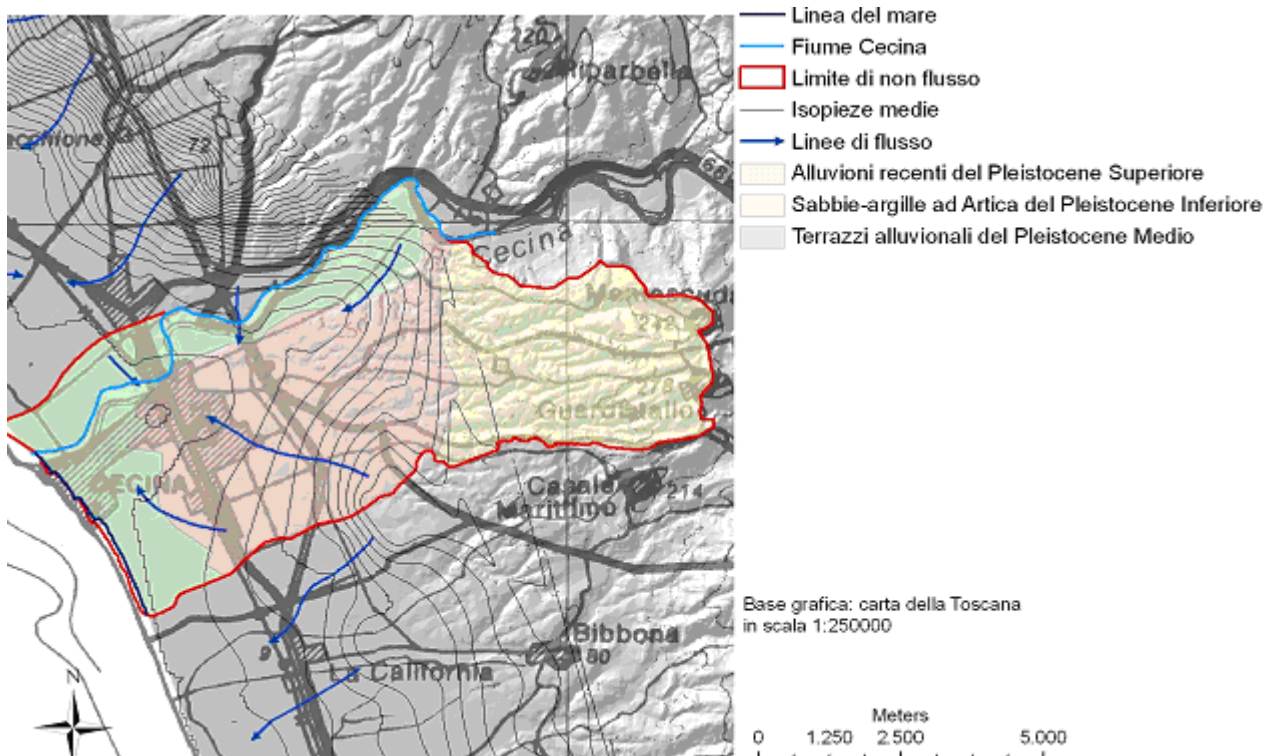


Figura 13 – Zonizzazione geologica

Per la prima zona, non essendo disponibili prove di pompaggio e avendo in realtà poche informazioni a riguardo, è stato stabilito un valore di conducibilità pari a quello più basso rilevato in compatibilità con la litologia indicata, cioè $1 \cdot 10^{-5}$ m/sec (0.864 m/giorno), che è stato poi attribuito alle celle di un *Constant Raster* coprente questa sub area.

Per le altre due invece è stato calcolato un valore medio reale della conducibilità idraulica per i sondaggi ricadenti nella rispettiva zona e di cui erano disponibili le prove di pompaggio. Questo valore di K per le due diverse unità geologiche è stato quindi moltiplicato per la percentuale di acquifero in tutti gli altri punti, ottenendo un valore di K media che moltiplicato per l'intero spessore dell'acquifero multistrato può condurre ad una buona stima delle T, anche in punti dove tale dato risultava indisponibile.

A questo punto, separatamente per le due sottozone, i dati sono stati interpolati creando due superfici distinte che in seguito, con l'aggiunta di quella creata in precedenza, sono andate a formare un unico grid.

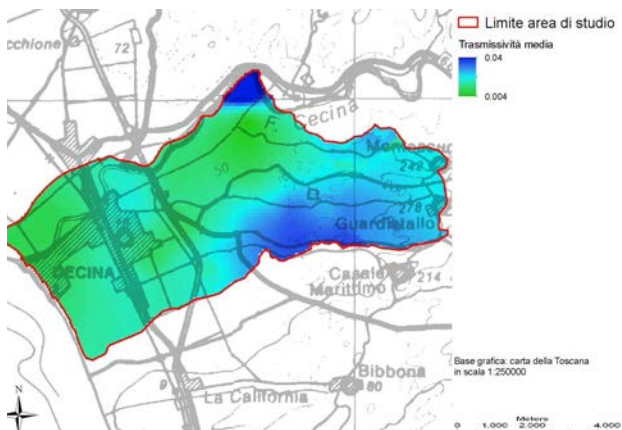


Figura 14 -Trasmissività media

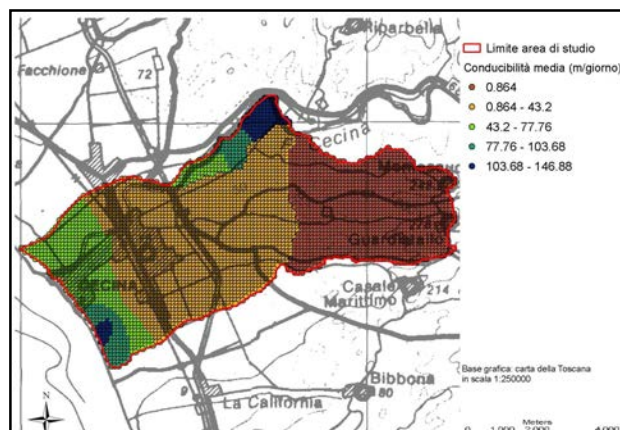


Figura 15 - Conducibilità media

In conclusione sulla base delle prove di portata in vari orizzonti acquiferi, sono state individuate tre classi:

- ghiaie sciolte del Cecina - $K = 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} = 100 - 1000 \text{ m/g}$
- calcareniti e conglomerati dei terrazzi pleistocenici $K = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3} = 10 - 100 \text{ m/g}$
- sabbie e calcareniti del pleistocene inferiore - $K = 1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} = 0,1 - 1 \text{ m/g}$

Nella tabella seguente si riassumono i dati utilizzati ed i valori ricavati per i parametri idrodinamici T e K.

NOME	PROFONDITA' M	SPESSORE STRATO F	TRASMISSIVITA' MO/S	K STRATO F	PROP. BF SU B	K_MEDIA
PIEZOMETRO CONTROLLO STECCAIA	40,00	34,80	0,06550	0,00188	0,92356	0,00188
POZZO STECCAIA 1	53,00	42,50	0,08500	0,00200	1,00000	0,00200
POZZO STECCAIA 2	60,00	41,00	0,07260	0,00177	1,00000	0,00200
SONDAGGIO 6369 MONTECUDAJO	48,00	31,00	0,06140	0,00198	0,80635	0,00161
ASEM 8 (806)	52,00	16,80	0,01020	0,00061	0,45520	0,00027
POZZO CD1	42,00	16,20	0,01758	0,00109	0,51469	0,00031
POZZO CD2	42,00	12,50	0,00776	0,00062	0,44831	0,00027
POZZO 11978 LADRONAIA	40,00	19,00	0,01020	0,00054	0,36572	0,00022
SONDAGGIO CASA GIUSTI 1	50,00	17,00	0,00111	0,00007	0,46980	0,00061
POZZO PARATINO	87,00	39,00	0,00300	0,00008	0,61625	0,00094

Tabella 2 – Parametri idrodinamici misurati

Porosità efficace

Per la stima della porosità efficace, sempre basandosi sull'interpretazione delle prove di portata condotte dalla Provincia di Pisa, sono stati presi in considerazione due diverse situazioni di interferenze ben evidenziabili dai grafici:

- abbassamento in steccaia 1 con 23A in pompaggio
- abbassamento in 24A con steccaia 1 in pompaggio

Anche in questo caso la prova di pompaggio può essere interpretata utilizzando il principio della sovrapposizione degli effetti, osservando, in particolare, che la formula di Jacob per la determinazione del parametro di storatività risulta di fatto indipendente dalla portata della prova.

$$S = 2,25 T t^0 / r^2$$

S = immagazzinamento;

T = trasmissività;

t^0 = tempo corrispondente a $\Delta s = 0$

r = distanza pozzo piezometro

Le stime di porosità efficace si attestano su di un valore plausibile del 10%.

	Distanza m	Tempo minuti	Trasmissività Mq/s	Porosità efficace
23A => steccaia 1	121	160	6,79E-2	1E-1
Steccaia 1 => 24A	155	263	9,97E-2	1,47E-1

1.3 Condizioni piezometriche

Inizialmente sono state prese a riferimento le elaborazioni del Consorzio CNR-LAMMA che ha prodotto delle piezometrie risalenti al 2002, riferite sia al periodo di magra (settembre) che a quello di morbida (maggio), vedi Figg. 14 a-b. Queste sono state utilizzate sia come supporto per la definizione e creazione del modello concettuale preliminare, sia come confronto per i primi risultati del modello.



Figura 14 Isopieze CNR-LAMMA del 2002: a-la situazione di magra; b- la situazione di morbida

Dall'analisi di questi dati è stato possibile individuare le principali linee di flusso in entrata e definire l'andamento generale della falda nell'area.

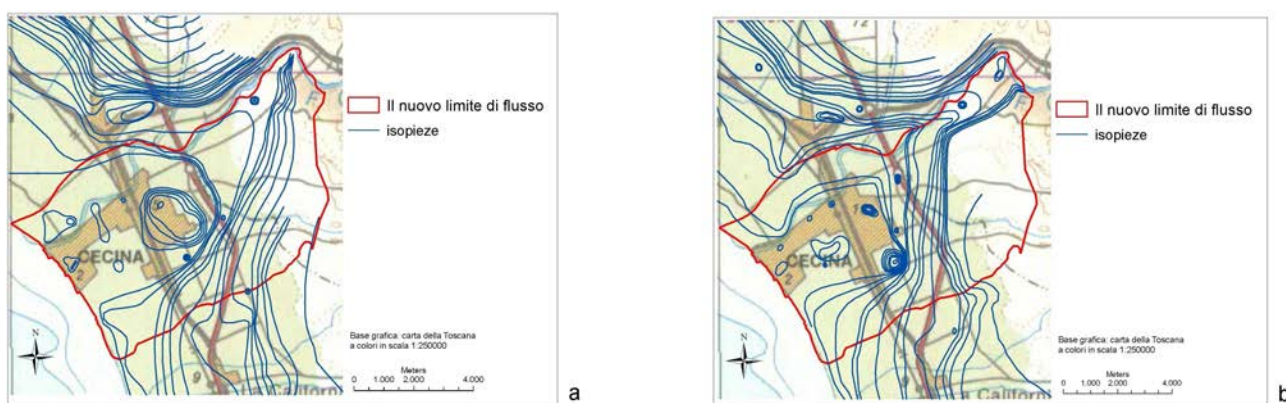


Figura 15 Isopieze del 2009: a-la situazione di magra; b- la situazione di morbida

La morfologia piezometrica è caratterizzata essenzialmente da un'estesa area centrale di drenaggio per i flussi che si originano dai rilievi circostanti, dove si hanno le quote piezometriche e gradienti maggiori. Particolare convergenza si ha verso l'abitato di Cecina. Le variazioni stagionali non modificano eccessivamente l'andamento della piezometrica, si evidenzia comunque uno spostamento verso nord-ovest dell'area con quota piezometrica pari o al di sotto dello zero di

riferimento. Successivamente queste analisi sono state integrate da altre, più dettagliate e aggiornate, effettuate su elaborazioni di Regione Toscana e ARPAT del 2006 e 2009 (Figg. 15 a-b), che comunque confermano sostanzialmente gli andamenti piezometrici delineati nella carte CNR – LAMMA.

1.4 Prelievo dai pozzi

Una quantificazione delle uscite dal sistema acquifero in termini di prelievo dai pozzi è stata eseguita preliminarmente sulla base dei dati forniti da ASA al Comitato Tecnico e derivanti da un modello di flusso elaborato internamente dall'azienda. In particolare è stato estratto dal modello il layer di tutti i prelievi idrici della zona in esame, senza distinzione d'uso (potabile, industriale e irriguo).

In una seconda fase modellistica è stato necessario suddividere questi prelievi in diffusi e concentrati (principalmente industriali) in base alle portate: i primi caratterizzati dai valori più bassi, i secondi da valori maggiori di circa 100 mc/giorno.

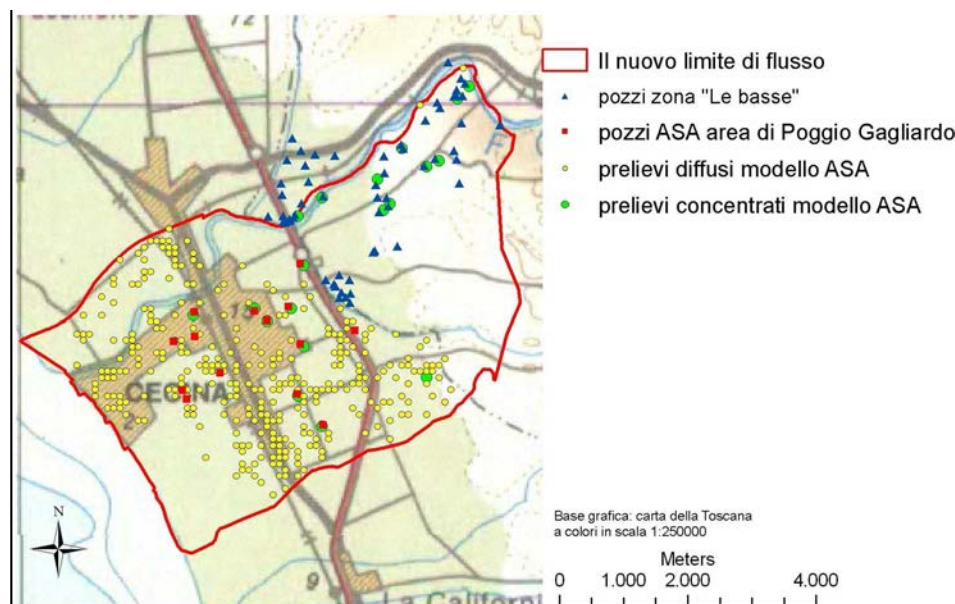


Figura 16 – Ubicazione dei pozzi

Inoltre sono stati raccolti altri dati localizzati nella zona di Poggio Gagliardo, sempre forniti da ASA, e una scheda di prelievi industriali forniti dalla Solvay Chimica Italia s.p.a alla Provincia di Pisa, concessionaria dello sfruttamento delle acque, situati nella parte nord-est dell'area, nella cosiddetta zona de "Le Basse". Nella Fig. 16 è indicata la distribuzione dei pozzi distinti tra prelievi concentrati (pozzi industriali e ad uso potabile) e prelievi diffusi (pozzi ad uso irriguo e domestico). I pozzi ASA presso Poggio Gagliardo e quelli nella zona "Le basse" rientrano tra il prelievo concentrato. Il prelievo concentrato è stimato in ca. 7650 mc/giorno, quello diffuso in ca. 150 mc/giorno.

1.5 Infiltrazione efficace

Il parametro infiltrazione efficace rappresenta la ricarica dell'acquifero attraverso l'infiltrazione degli afflussi meteorici nell'area in studio.

In termini di bilancio idrico del sistema acquifero, la quantità di ricarica si può ricavare sulla base delle precipitazioni medie, diminuite di un valore pari al coefficiente di deflusso, meno l'evaporazione:

$$\text{RICARICA} = \text{PIOGGIA} * (1 - \text{COEFF. DEFLUSSO}) - \text{EVAPORAZIONE}$$

Il coefficiente di deflusso è stato calcolato seguendo il metodo del Kennessey (Barazzuoli P. et al, 1987), che verrà descritto in dettaglio più avanti, mentre per l'evaporazione è stata utilizzata la formula di Turc, modificata da Santoro per le aree mediterranee (Brugioni, 2008):

$$E = P / \sqrt{0,9 + (P^2 / L^2)}$$

dove P sono le piogge medie, $L = 300 + 25T + 0,05T^3$, e T sono le temperature medie.

Sono stati recuperati pertanto presso la banca dati del Servizio Idrologico Regionale (<http://www.sir.toscana.it/>) i dati pluviometrici mensili della zona, per un periodo che va dal 2005 al 2010. I valori sono stati organizzati per stazione di rilevamento e, per ognuna di queste, è stato calcolato un dato medio per l'intero arco temporale.

Questi dati medi sono stati a loro volta interpolati con il metodo dell'Inverse Distance Weighting per ottenere una superficie continua della distribuzione delle piogge. La stessa procedura è stata seguita per ottenere il dato sulla temperatura media, necessario anche questo per il calcolo dell'evaporazione. Nelle figg. 17 e 18 sono mostrate le due superfici ottenute.

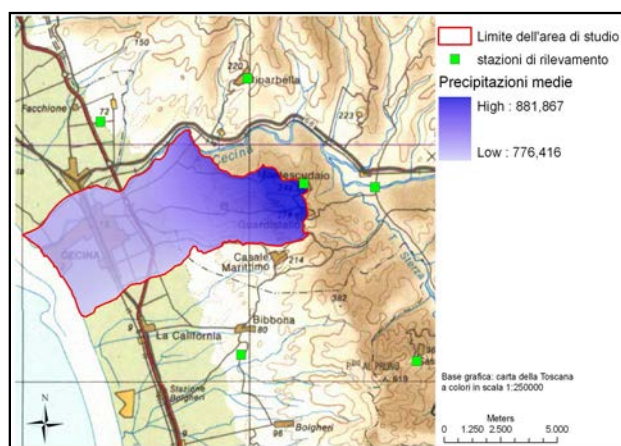


Figura 17- Distribuzione media delle temperature nel periodo 2005-2010

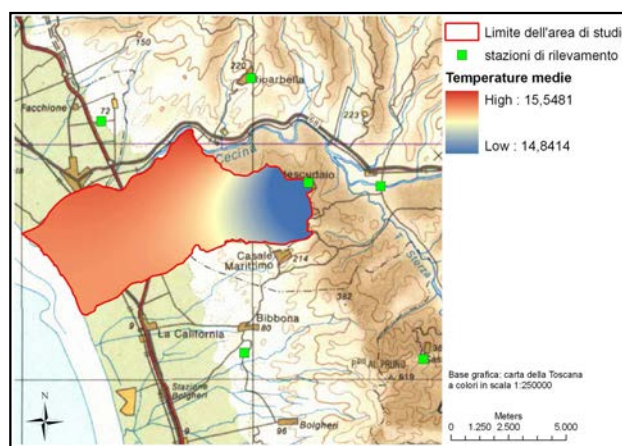


Figura 18 - Distribuzione media delle temperature nel periodo 2005-2010



Figura 19- Maschera per la costruzione delle espressioni nel Raster Calculator

Tramite *Raster Calculator* di ArcGIS è stato calcolato il grigliato del fattore L e del valore di evaporazione E, impostando l'equazione descritta in precedenza nella finestra di lavoro del modulo (Fig. 19).

Le stesse funzionalità del GIS sono state sfruttate per calcolare il coefficiente di deflusso secondo il metodo del Kennessey come dei tre fattori geomorfologici: la pendenza, la copertura del suolo e la permeabilità.

Classe di permeabilità	Coefficiente		Classe di acclività	Coefficiente		Classe di copertura del suolo	Coefficiente
molto scarsa	0,21		>35%	0,22		roccia nuda o urbanizzato	0,2
scarsa	0,2		10%-35%	0,12		prati e pascoli	0,17
mediocre	0,12		3,5%-10%	0,01		terra coltivata	0,07
buona	0,06		<3,5%	0		bosco	0,03
elevata	0,03						

Tabella 2 Schema utilizzato per la riclassificazione dei fattori del coefficiente di deflusso

Il fattore pendenza è stato elaborato partendo dal DEM e costruendo, con il comando *SLOPE* del sistema GIS, un grigliato dell'acclività espressa in valori percentuali. Il raster ottenuto è stato poi riclassificato in quattro categorie (tab. 2), a ognuna delle quali è stato attribuito il valore indicato da Barazzuoli P. et al, (1987).

Per la copertura del suolo si è partiti da una carta, in formato shapefile, della Regione Toscana in scala 1:10000. Questa è stata prima trasformata in formato raster e poi riclassificata secondo lo schema sopra descritto.

Infine è stato elaborato il fattore permeabilità, partendo dalla carta geologica del LAMMA convertita in raster e riclassificata.

Ottenuti quindi i grid dei tre fattori, questi sono stati sommati tra loro per derivare il coefficiente di deflusso (Fig. 20).

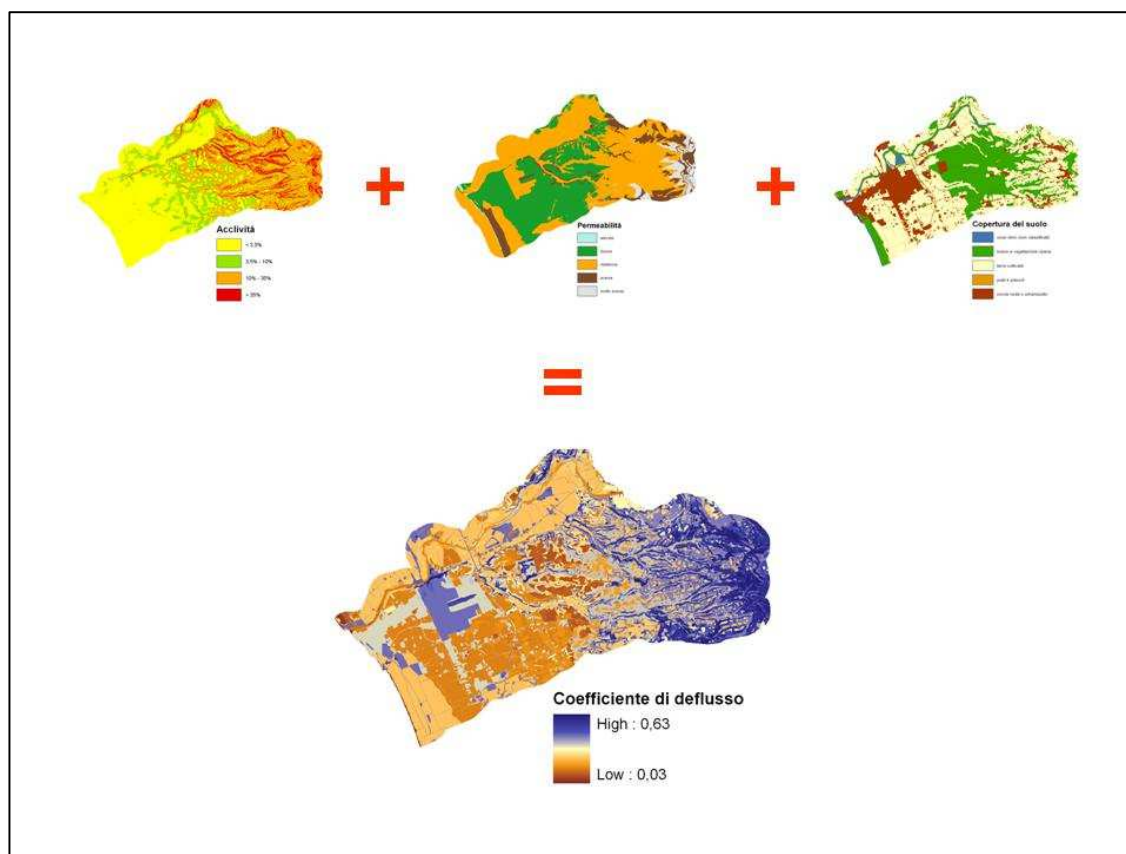


Figura 20 Rappresentazione del calcolo del coefficiente di deflusso

Infine è stato calcolato il valore di ricarica con la formula descritta in precedenza.

Per validare i dati così elaborati sono stati richiesti alla Regione Toscana i valori di infiltrazione media mensile per il bacino del Cecina, presenti parzialmente nella nostra area di studio, derivati da un modello matematico di deflusso superficiale denominato MOBIDIC. E' stato così ricavato il coefficiente di deflusso calibrato dal modello della Regione e da questo poi, sottraendo i fattori ottenuti dal Kennessey di copertura del suolo e di pendenza, ritenuti meno influenti, il fattore “calibrato” di permeabilità.

Poiché il modello MOBIDIC non comprende tutta l'area in studio limitandosi al solo bacino idrografico del Cecina, si è reso necessario simulare una sua estensione a tutta l'area di nostro interesse. Per fare ciò è stato impiegato il comando *Zonal Statistics as Table* di Arcgis, che permette

di raccogliere informazioni statistiche dei valori contenuti nelle celle di un grigliato, raggruppandoli in base alle zone definite da un layer poligonale. Nel nostro caso è stato utilizzato per calcolare la media del coefficiente di deflusso validato con il modello della Regione sulla base delle unità geologiche definite dalla carta geologica citata in precedenza.

Unità geologiche	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
PLEa	1295000	0.0793	0.3370	0.2577	0.2555	0.0668	3308.5500
FAAb	1298900	0.1514	0.3088	0.1575	0.2744	0.0367	3564.2800
FAA	43300	0.1716	0.3038	0.1321	0.2763	0.0482	119.6510
FAAe	148800	0.1827	0.3077	0.1250	0.2699	0.0414	401.5720
PLEb	5718600	0.0796	0.3321	0.2525	0.2485	0.0604	14210.5000
bnb	10965800	0.0793	0.3799	0.3007	0.2780	0.0674	30480.6000
b	542900	0.1225	0.3773	0.2548	0.2731	0.0547	1482.5400
VILa	731200	0.1542	0.3413	0.1871	0.2831	0.0645	2069.7600
bna	5193400	0.1553	0.3799	0.2246	0.2816	0.0487	14623.0000
VILh	96200	0.1466	0.3264	0.1798	0.3090	0.0456	297.2130
VILb	141000	0.1739	0.3410	0.1671	0.3051	0.0441	430.1220

Sulla base di questa relazione tra permeabilità “calibrata” ed unità geologiche è stato quindi possibile ricalcolare, in ultimo, una ricarica calibrata sul modello idrologico idraulico risultata, per l’intera area, pari a 6311 mc/g .

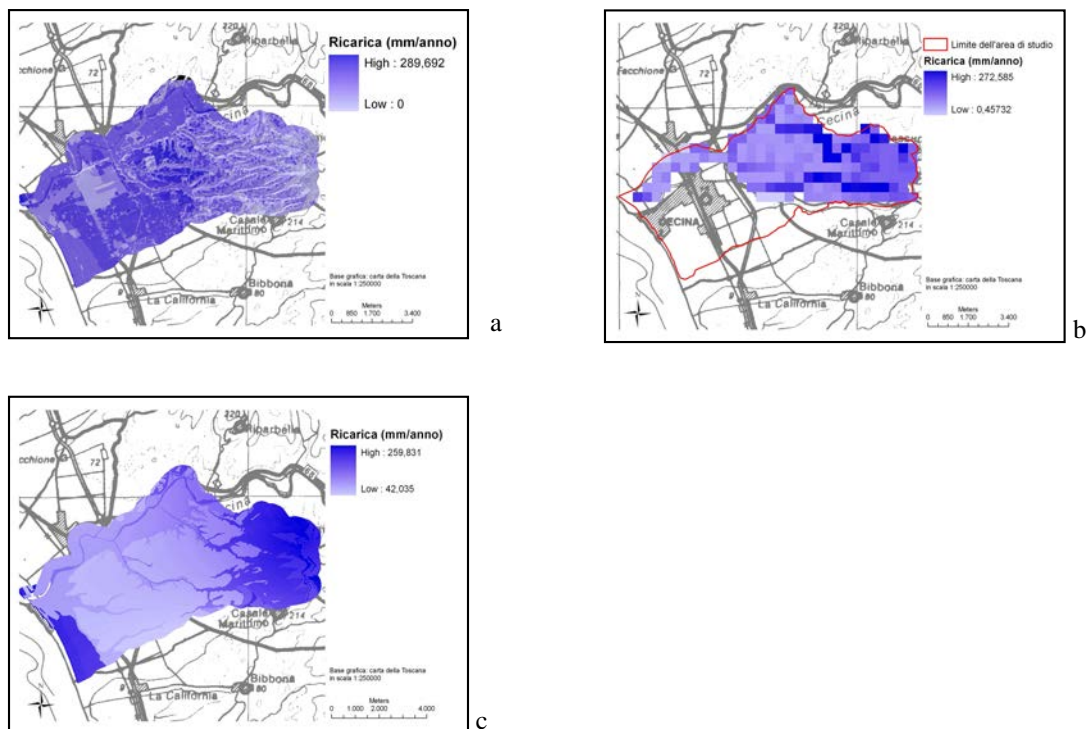
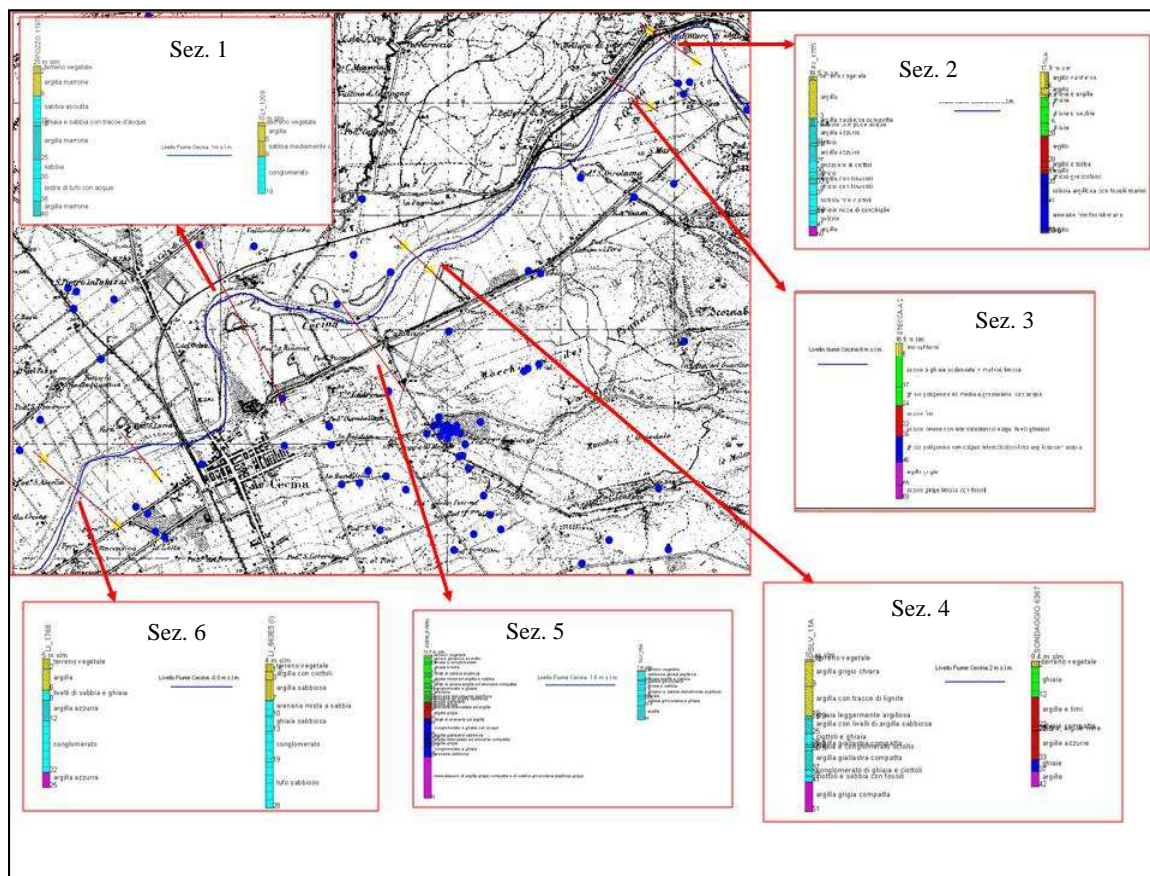


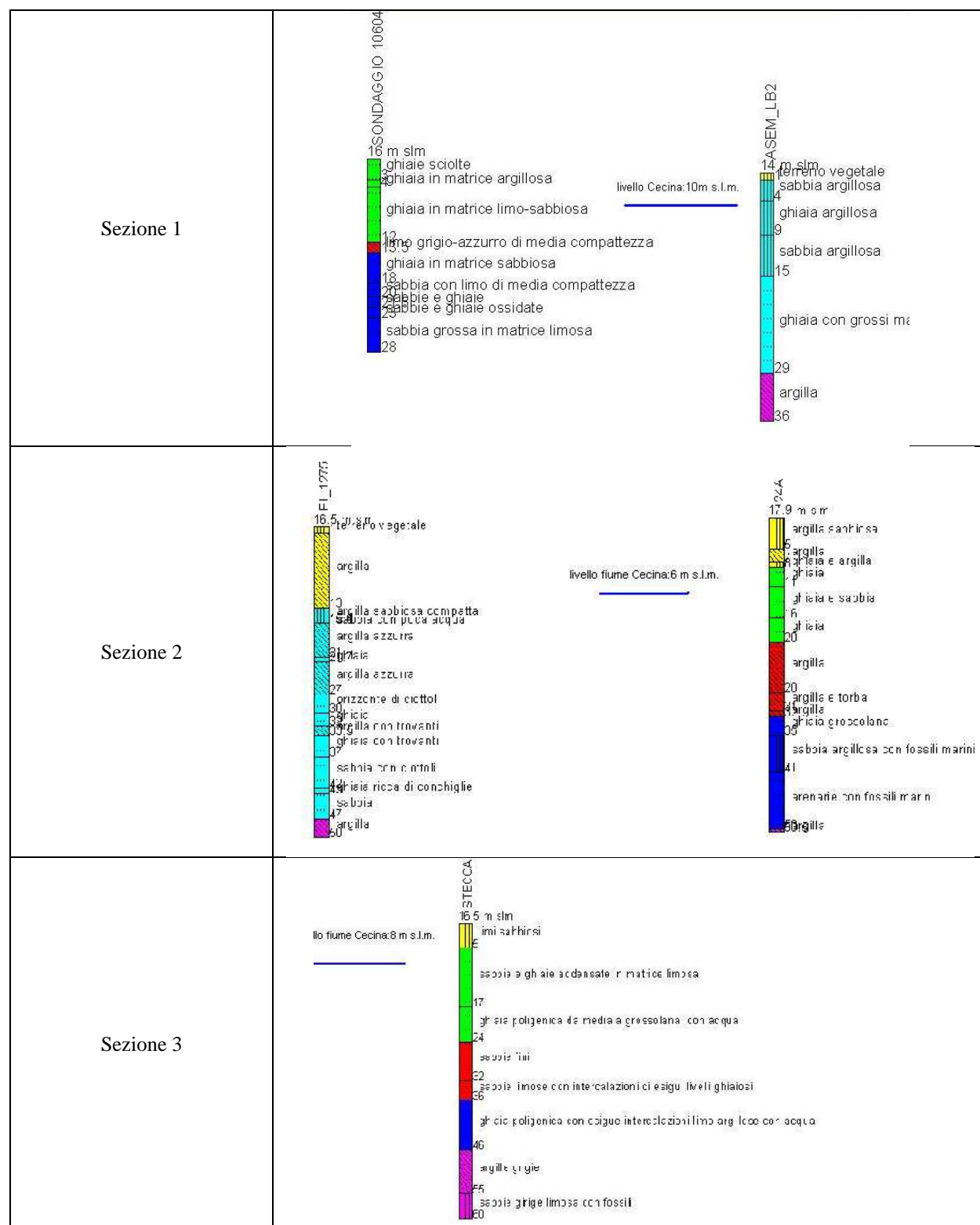
Figura 21 La ricarica: a - calcolata secondo il metodo del Kennessy; b - i dati del modello

1.6 Rapporti Fiume Cecina – Falda

Un altro fattore di possibile afflusso/deflusso idrico del sistema acquifero è dato dai suoi collegamenti idraulici con il Fiume Cecina. Per capire in che modo e, soprattutto, dove questi avvenissero, sono state fatte all'interno del DBGEO delle sezioni trasversali al corso d'acqua. Fig. 22) indicando sulle stesse le quote dell'alveo del Cecina ricavate da DEM. Come descritto in precedenza, la struttura acquifera benché costituita da un complesso sistema multistrato è considerata sede di un'unica falda idrica, per gli interessi del presente studio, nel settore nord-ovest dell'area in studio, è tuttavia presente uno strato argilloso che la suddivide localmente in due falde acquifere sovrapposte.

La comunicazione idraulica fiume falda è presente in tutta l'area del modello, ma in taluni casi, come nel tratto finale verso la foce, è limitata dalla presenza di spessi orizzonti di copertura (indicata in giallo). Altre situazioni particolari sono quelle del tratto a nord ovest di Cecina, dove il sistema è ritenuto multi falda a causa della presenza dell'interstrato argilloso (di colore rosso) descritto precedentemente. Il corso d'acqua è qui separato dalla falda idrica inferiore (di colore blu nelle stratigrafie).





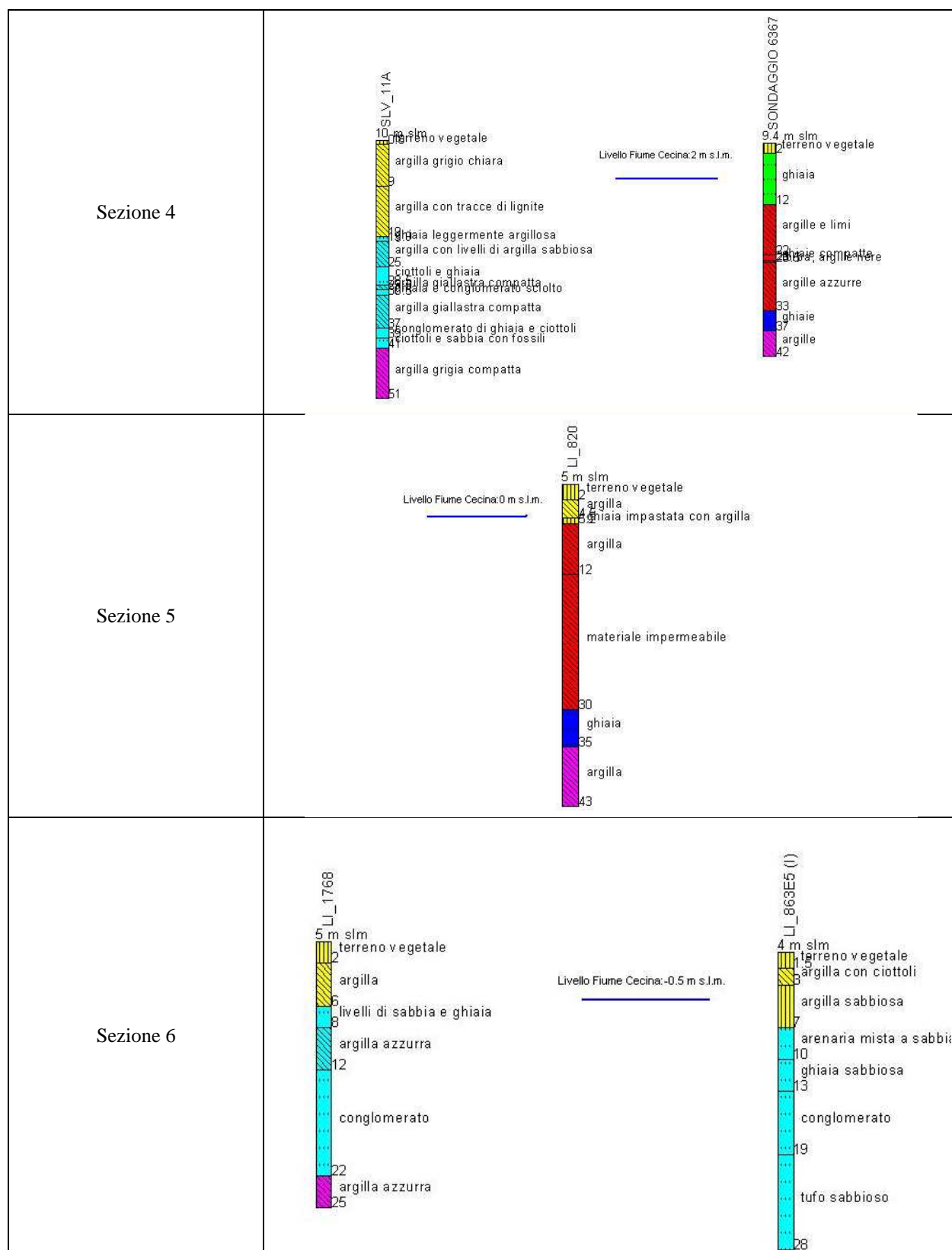


Figura 22 Le sezioni analizzate per definire i rapporti fiume-falda

In un'area abbastanza ristretta a valle della Steccaia sembra invece esistere piena comunicazione tra fiume e sistema acquifero, favorita anche dalle elevate permeabilità di granulometrie più grossolane.

Il tratto immediatamente a monte della Steccaia, invece, si è arrivati a considerarlo non collegato idraulicamente con la falda superficiale. Come si vede nella figura seguente (Fig. 23) il Subsistema 2b del “Torrente Botra” ex “Sabbie ed Argille ad Arctica”, formazione di facies deltizia e lagunare, sebbene non impermeabile, esercita infatti un forte contrasto di permeabilità con i depositi alluvionali più grossolani; a questo si aggiunge la sedimentazione di materiale fine avvenuta negli anni nel Fiume Cecina. La soglia della Steccaia è stata indicata come limite di non flusso.

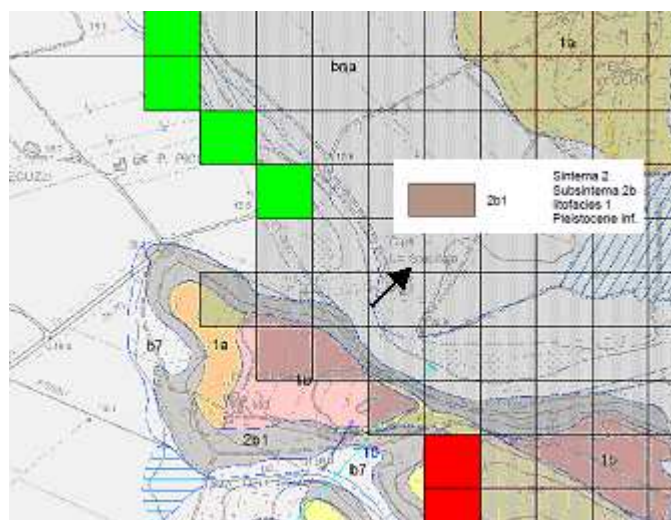


Figura 23 Condizioni geologiche in Loc. Steccaia

I dati idrometrici necessari per la successiva implementazione del modello matematico sono stati ricostruiti dai valori registrati in continuo dal Servizio Idrologico presso la stessa stazione idrometrica della Steccaia. Per quanto vi siano varie lacune nella continuità del dato, tuttavia in termini di medie mensili sul periodo 2009 – 2012, si osserva alla Steccaia un andamento simile a quello di Monterufoli, quest’ultimo derivato da un maggior numero di dati (Figg. 24 e 25)

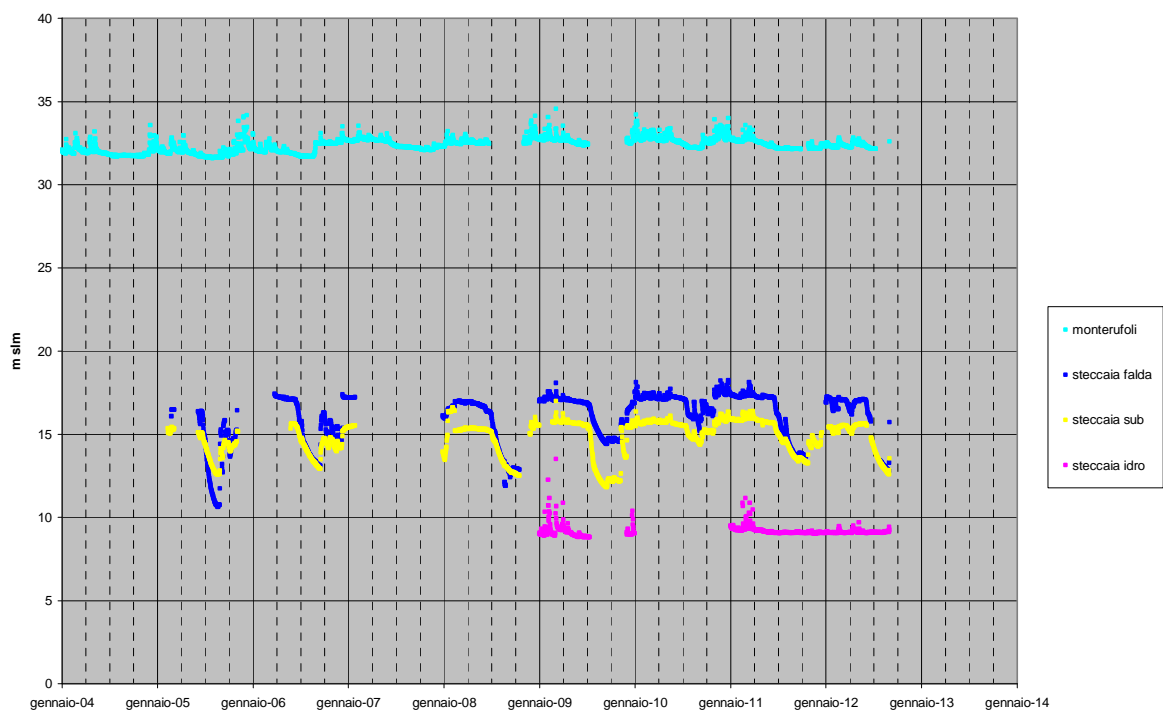


Figura 24 Andamento dei valori registrati alle stazioni di Steccaia e di Monterufoli

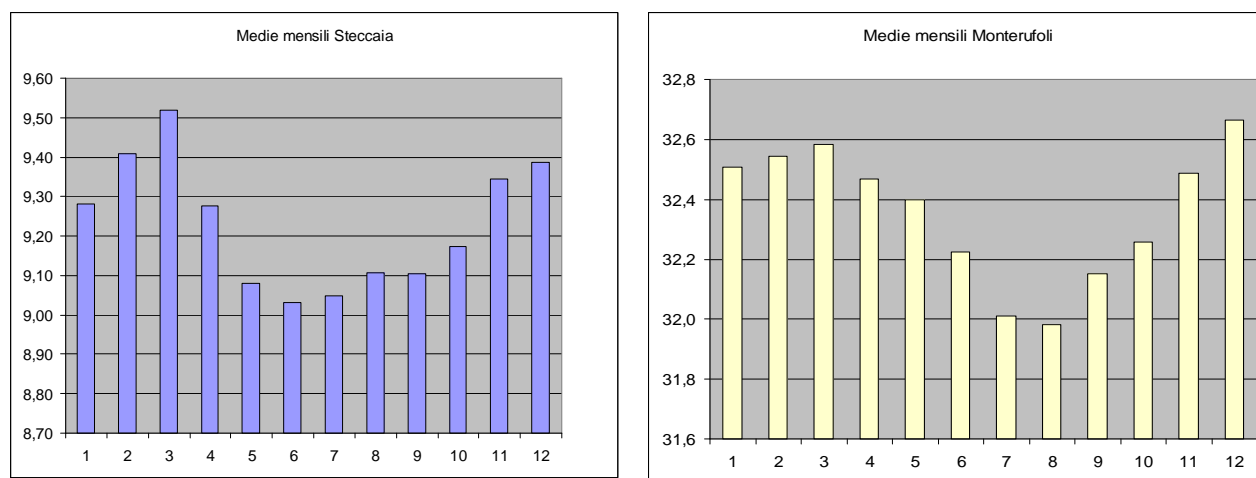


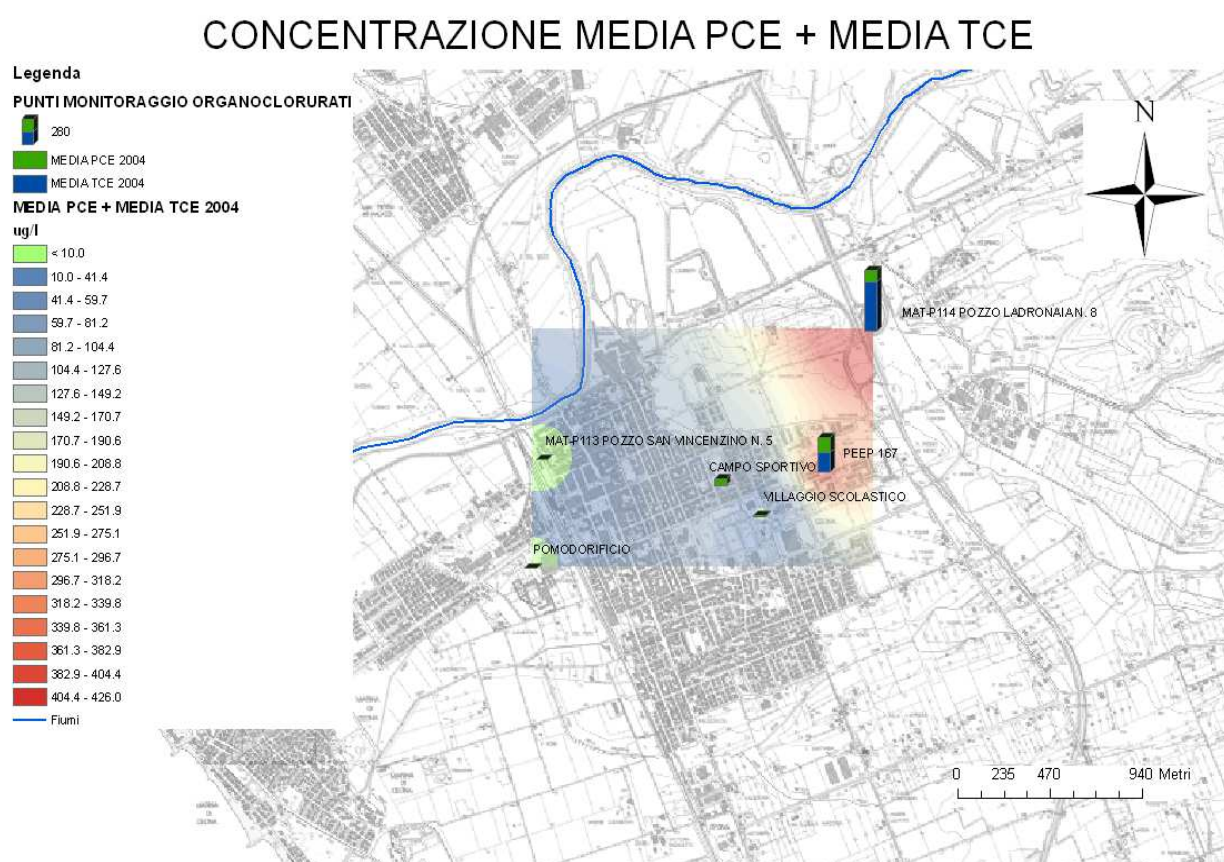
Figura 25 Andamento dei valori medi mensili registrati alle stazioni di Steccaia e di Monterufoli (2009 -2012)

Per le lacune dell'idrometro della Steccaia è stato così possibile riferirsi alle più complete registrazioni di Monterufoli

1.7 Distribuzione degli organo alogenati

Al fine di poter validare in fase di modellazione le mappe calcolate per la diffusione degli organoalogenati in falda, si è provveduto a ricostruire (vedi figure seguenti), la distribuzione delle concentrazioni degli organoalogenati per il periodo 2004 - 2011 a partire dai dati di monitoraggio ARPAT.

Gli elevati livelli di contaminazione verificati a inizio 2004 hanno portato alla necessità di un intervento di messa in sicurezza per ridurre la mobilitazione dei contaminanti verso i pozzi dell'acquedotto di Cecina. I prelievi idrici ad uso potabile dei pozzi nella zona di Cecina comportano infatti un inevitabile richiamo del plume inquinato. È stata quindi attuata una messa in sicurezza con l'installazione di due impianti di pompaggio e trattamento (pump & treat), in corrispondenza dei pozzi La Rapida e Giannelli. Nei primi due anni sono stati estratti ca. 860 kg di solventi (TCE+PCE) in 183,000 mc. Il pozzo LADRONAIA, a NW, dotato di filtro a carboni attivi ha avuto funzione aggiuntiva di schermo, almeno fino al 2009.



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



MEDIA PCE 2005

MEDIA TCE 2005

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2005

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

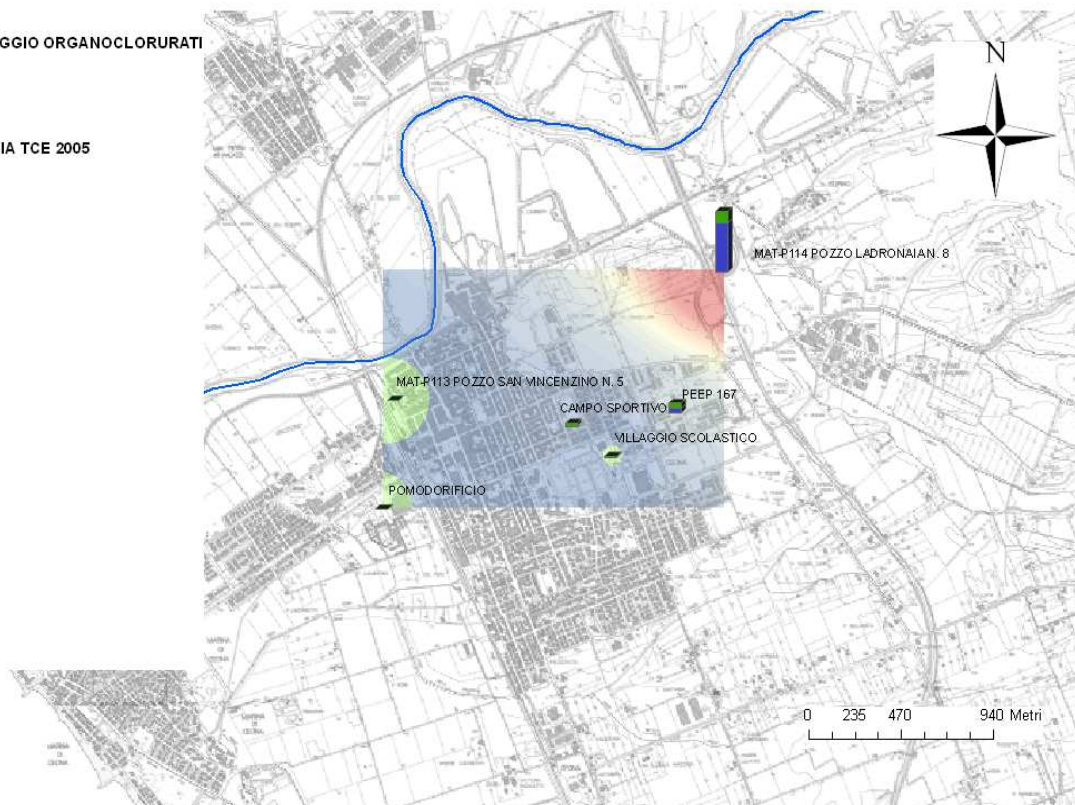
339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



MEDIA PCE 2006

MEDIA TCE 2006

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2006

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



180

MEDIA PCE 2007

MEDIA TCE 2007

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2007

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

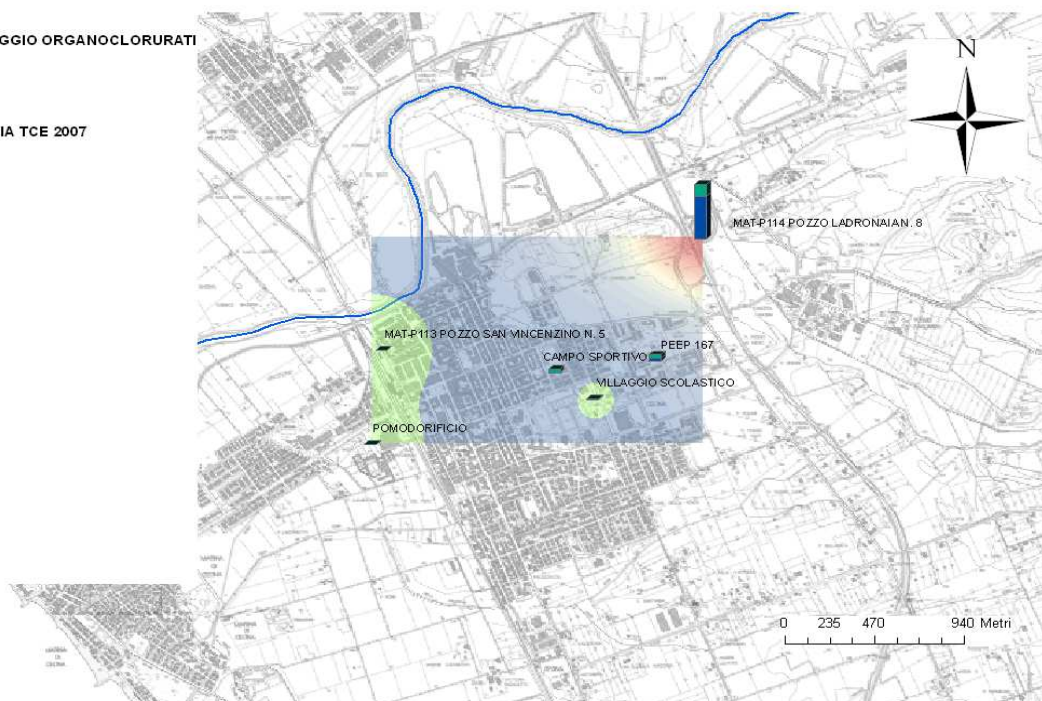
339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



190

MEDIA PCE 2008

MEDIA TCE 2008

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2008

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

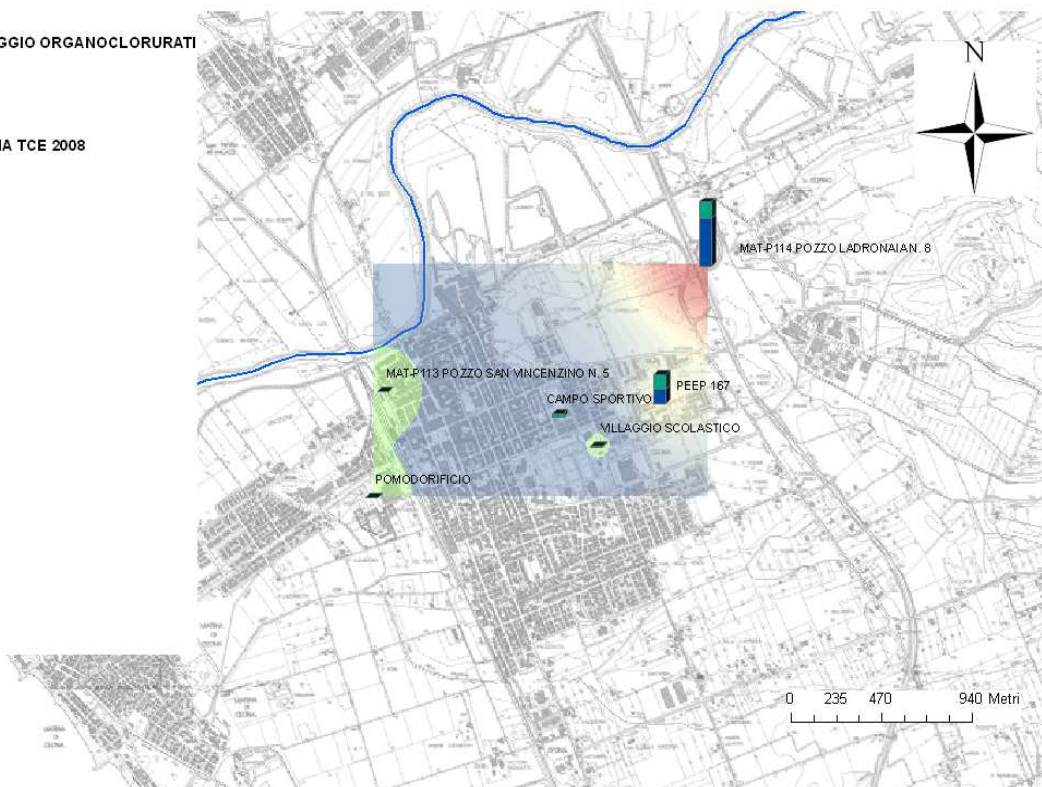
339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



MEDIA PCE 2009

MEDIA TCE 2009

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2009

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

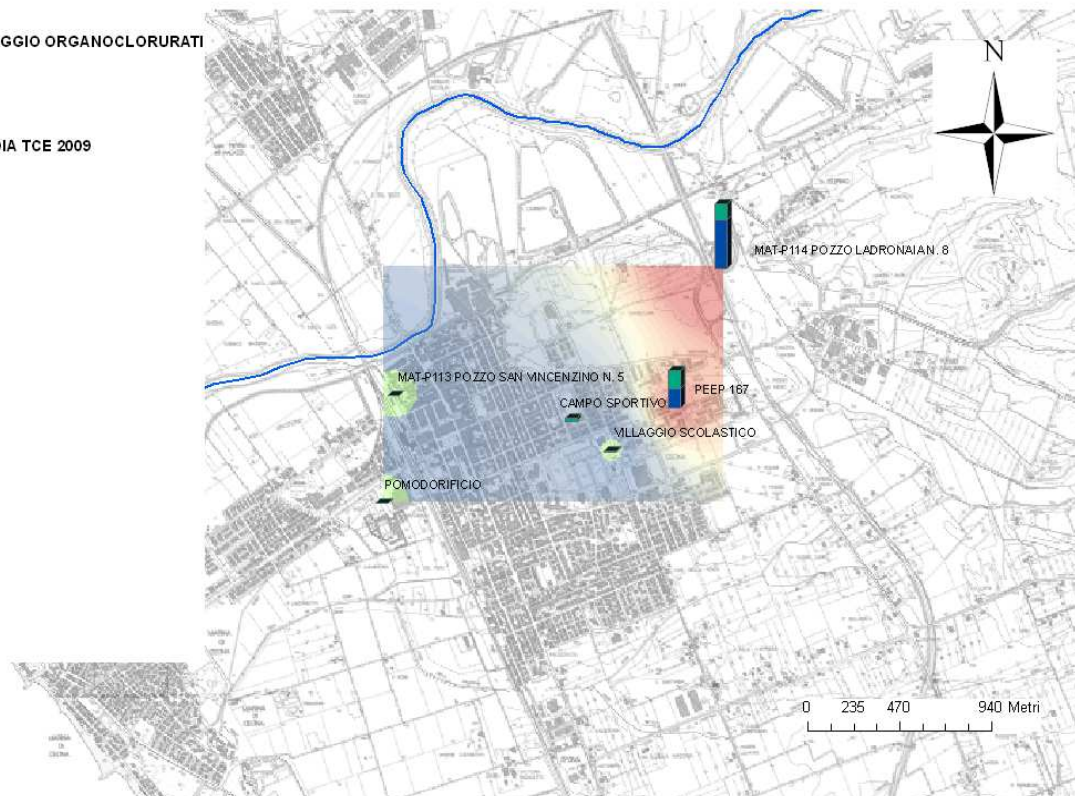
339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE

Legenda

PUNTI MONITORAGGIO ORGANOCLORURATI



MEDIA PCE 2010

MEDIA TCE 2010

MEDIA PCE + MEDIA TCE 2010

ug/l

< 10.0

10.0 - 41.4

41.4 - 59.7

59.7 - 81.2

81.2 - 104.4

104.4 - 127.6

127.6 - 149.2

149.2 - 170.7

170.7 - 190.6

190.6 - 208.8

208.8 - 228.7

228.7 - 251.9

251.9 - 275.1

275.1 - 296.7

296.7 - 318.2

318.2 - 339.8

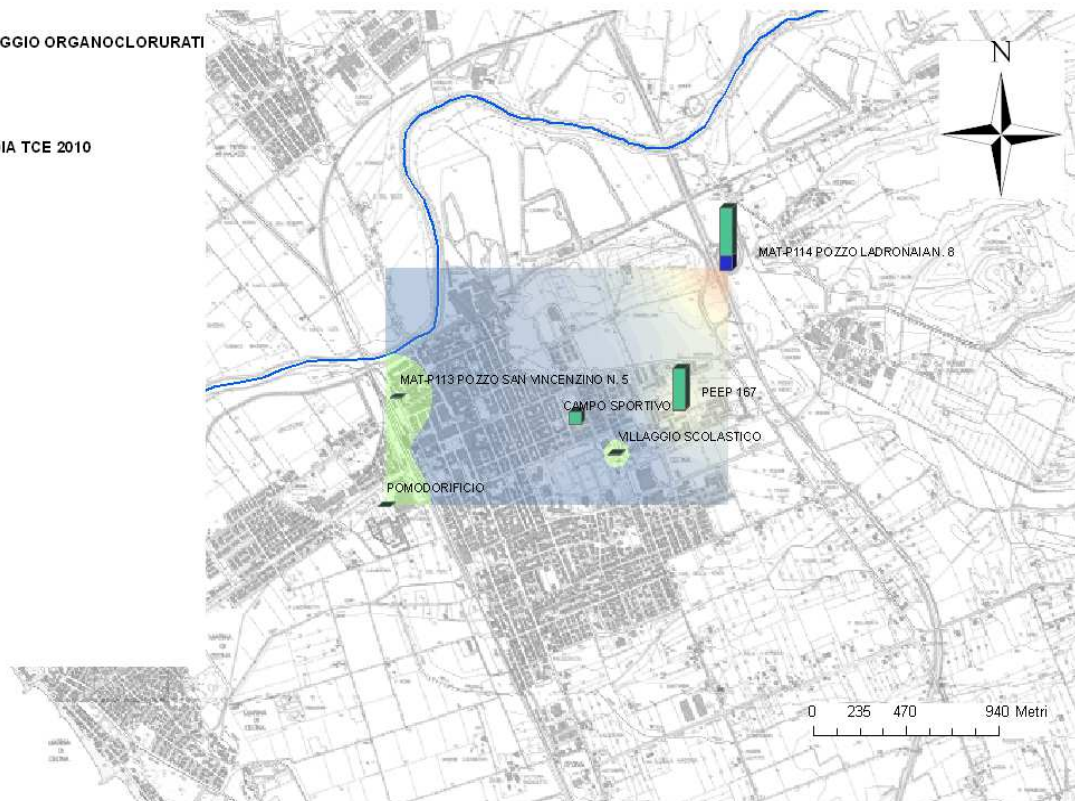
339.8 - 361.3

361.3 - 382.9

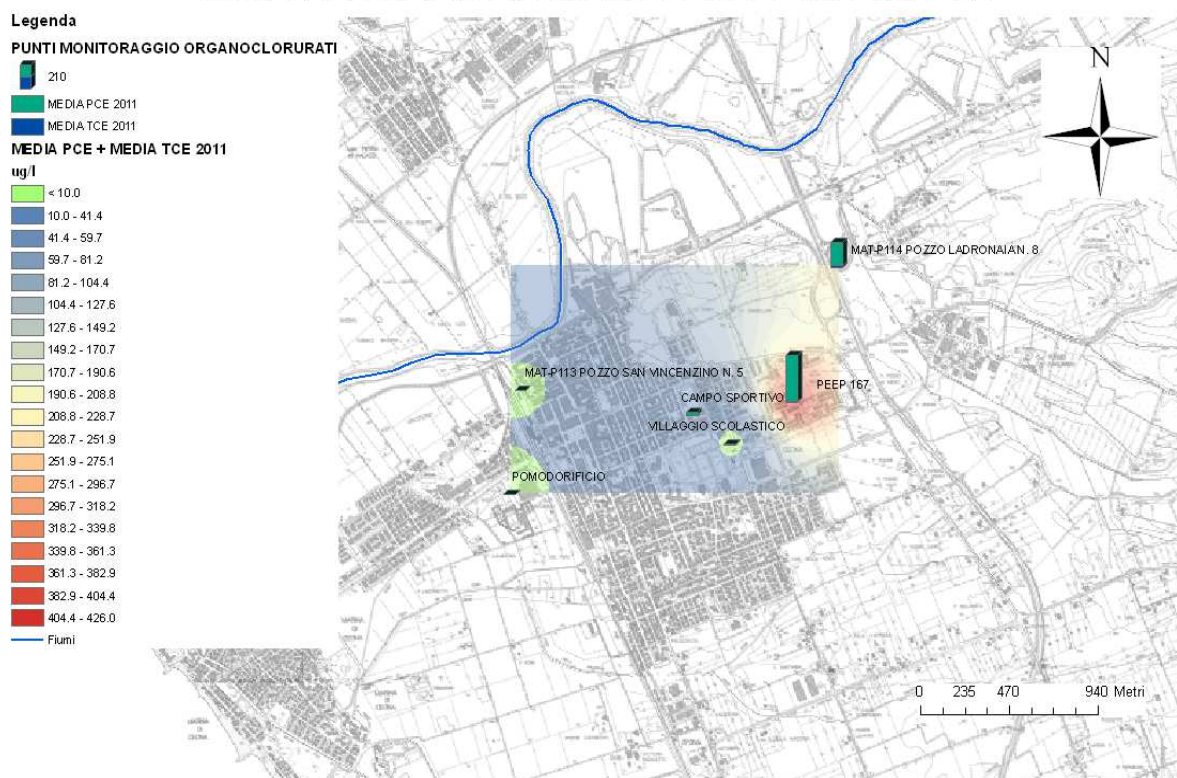
382.9 - 404.4

404.4 - 426.0

Fiumi



CONCENTRAZIONE MEDIA PCE + MEDIA TCE



Un quadro di sintesi dell'evoluzione spazio temporale della contaminazione è offerto dal grafico seguente (Fig. 26) che riporta in scala temporale semilogaritmica le concentrazioni osservate nei sei pozzi ASA, oggetto di monitoraggio, in raffronto alle piogge mensili e i livelli freaticometrici rappresentativi della vicina stazione di monitoraggio in continuo 5A.

Il periodo 2004-2012 presenta un andamento caratteristico, con due anni idrologici di eccezionale magra dal 2006 al 2008, cui succedono ben tre annualità idrologiche, viceversa, molto umide, dal 2008 al 2011.

I riflessi sullo stato di qualità dell'acquifero di Cecina sono evidenti, un'inversione di tendenza nel 2008 è, infatti, specialmente evidente nei pozzi PEEP e SAN VINCENZINO.

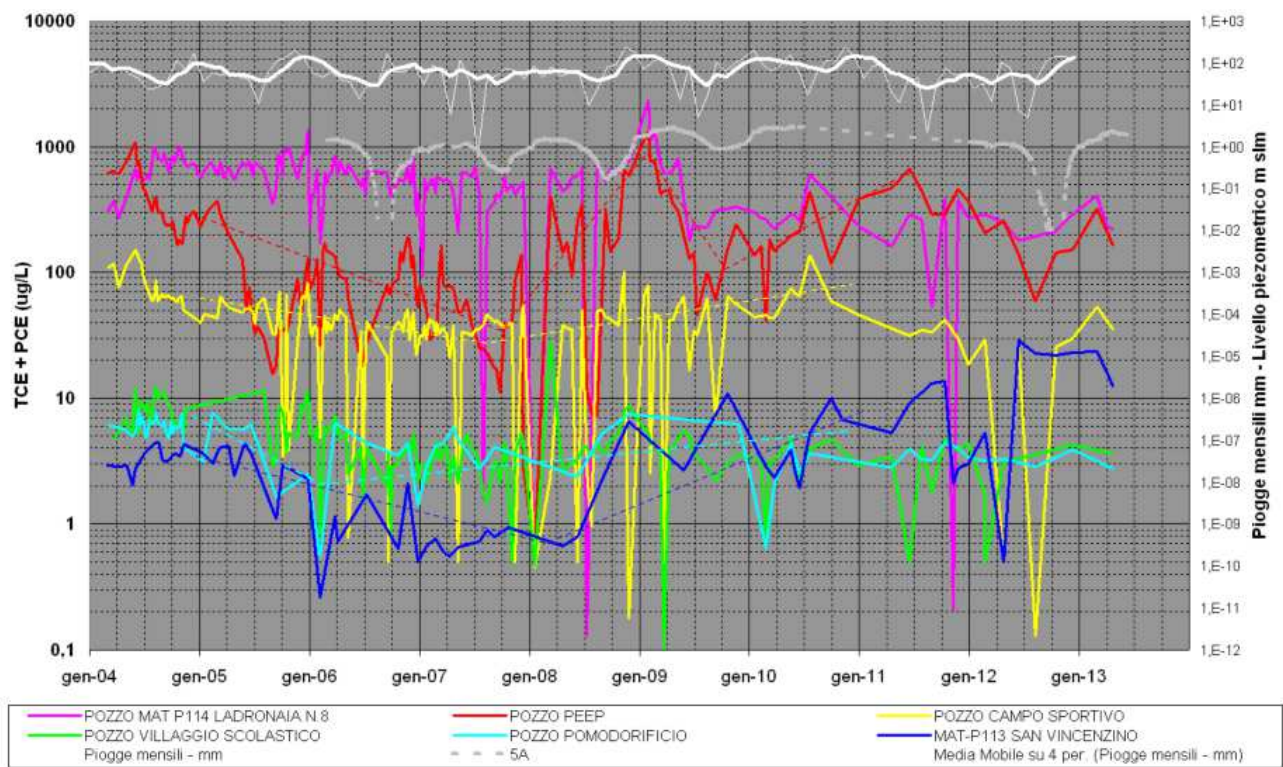


Fig. 26 – Andamento delle concentrazioni nei POZZI ASA monitorati e raffronto pluviometrico e freaticometrico

2 MODELLO DI FLUSSO

2.1 Premessa

Dopo la caratterizzazione idrogeologica del sistema acquifero, il lavoro ha riguardato lo sviluppo del modello di flusso del sistema e la successiva modellazione del fenomeno di contaminazione della falda idrica da organoalogeni, entrambi con discretizzazione e risoluzione numerica alle Differenze Finite (Finite Difference Method - FDM) mediante l'impiego del software GroundWaterVistas 5, che sfrutta il codice di calcolo MODFLOW (Harbaugh & McDonald, 1996) per la soluzione di equazioni di flusso idrico sotterraneo.

Il metodo FDM discretizza lo spazio e il tempo in intervalli, suddividendo il dominio modellizzato in una maglia di celle a pianta rettangolare e definendo le proprietà fisiche al centro delle celle o ai nodi.

Il modello di flusso è stato eseguito in più fasi, descritte nel seguito, utilizzando un modello concettuale del sistema acquifero progressivamente più complesso:

- Rev0 => stato stazionario naturale
- Rev1 => Rev0 + prelievi
- Rev2 => Rev1 + limite colline a flusso costante
- Rev3 => Rev1 + limite Cecina tipo "River"
- Rev4 => Rev3 + suddivisione in 4 layer

Sono stati quindi simulati una serie di scenari riferiti alle condizioni pregresse e attuali al momento della esecuzione del presente lavoro:

- Rev3.0 => nessuna MISE
- Rev3.0.tmr (telescopic mesh refining) maggiore dettaglio celle da 100 m a 20 m
- Rev3.1 => giannelli + rapida ($Q_{giannelli} = Q_{rapida}$)
- Rev3.1.tmr
- Rev3.2 => giannelli + rapida + CD4 + CD5 ($Q_{rapida} > Q_{giannelli} = Q_{CD4} = Q_{CD5}$)
- Rev3.2.tmr

e una serie di scenari finalizzati alla ottimizzazione della MISE nel sito inquinato di Poggio Gagliardo:

- Rev3.3.tmr => rapida + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{rapida} > Q_{CD4} > Q_{giannelli} = Q_{CD5}$)

- Rev3.4.tmr = > rapida + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{rapida} > Q_{CD1} = Q_{CD2} = Q_{CD3}$)
- Rev3.5.tmr = > rapida in reimmissione + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{CD1} > Q_{CD2} = Q_{CD3}$)

I dati necessari per le implementazioni del modello sono distinti da GroundWater Vistas in:

- *boundary conditions (BCs)*: sono condizioni imposte che la soluzione dell'equazione differenziale deve rispettare;
- *properties (Props)*: sono le proprietà vere e proprie dell'acquifero modellizzato;
- *analytic elements (AE)*: elementi utilizzati per la calibrazione e validazione del modello che possono essere anche variamente modulati per eseguire simulazioni di scenari differenti.

2.2 Modello stazionario naturale Rev 0

Il primo modello costruito è stato quello monostrato in stato stazionario naturale Rev0, cioè sono stati inseriti valori medi dei vari parametri richiesti, considerandoli costanti nel tempo, e non sono stati presi in considerazione né i prelievi né l'interstrato argilloso.

L'area ha una superficie complessiva di ca. 46 Km². Il reticolo di discretizzazione impiegato per la costruzione del modello è costituito da 4567 elementi finiti o celle a forma quadrata con lato di 100 m ciascuno). La superficie media delle celle è ca. 0.01 Km².

Nel grigliato è stato importato lo shapefile descrivente il confine dell'area di studio: al momento del caricamento è stato indicato che all'esterno di quest'area le celle fossero definite come celle di non-flusso (*no-flow-cells*, prima BCs) e quindi escluse dal calcolo.

Le altre BCs sono state inserite come *Constant Heads*, cioè come apporti idrici costanti e infiniti, espressi in termini di quota sul livello del mare, che non sarebbero variati nel corso delle simulazioni. In particolare è stata impostata la linea del mare e il Fiume Cecina solo nelle zone di contatto con l'acquifero inferiore o indifferenziato (Fig. 27)

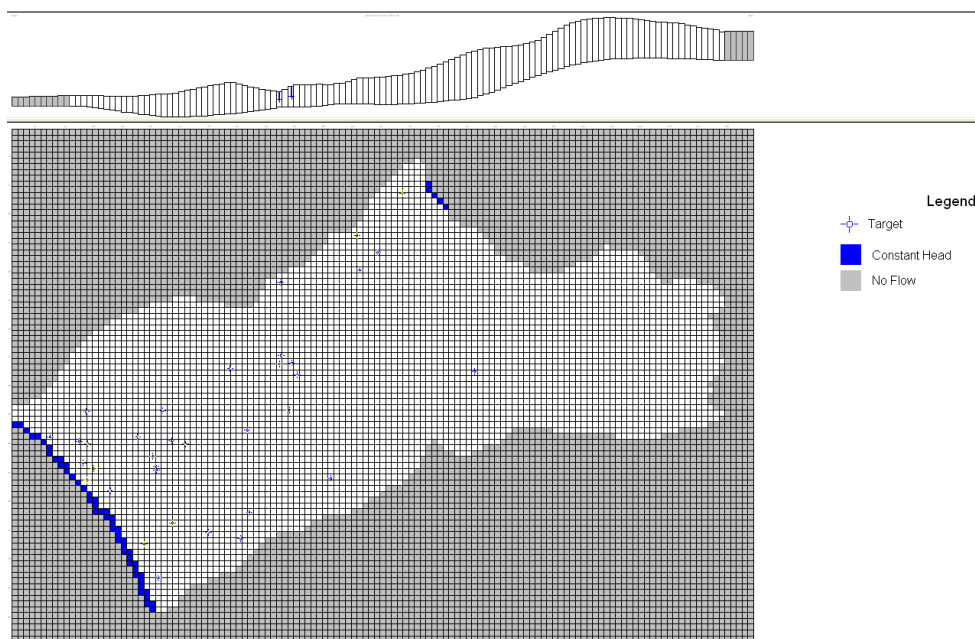


Figura 27 Discretizzazione e definizione delle condizioni al contorno.

In successione sono state introdotte quindi le seguenti informazioni:

- Proprietà geometriche tetto e letto (Figg. 28 e 29) andando così a definire i confini, sia planimetrici che altimetrici, del modello.
- Infiltrazione efficace e conducibilità (Figg 30 e 31), i cui valori erano stati prima convertiti in metri/giorno, come richiesto dal software.

- Impostazione di condizioni stazionarie e acquifero non confinato con livelli piezometrici anche inferiori alla quota di tetto.

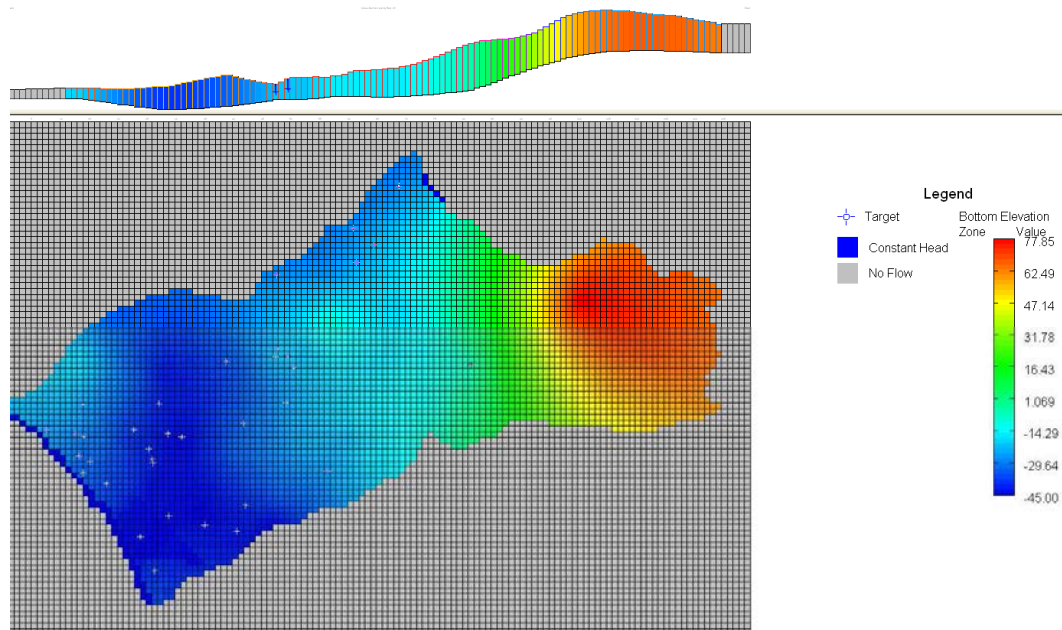


Figura 28 Letto del monostrato acquifero

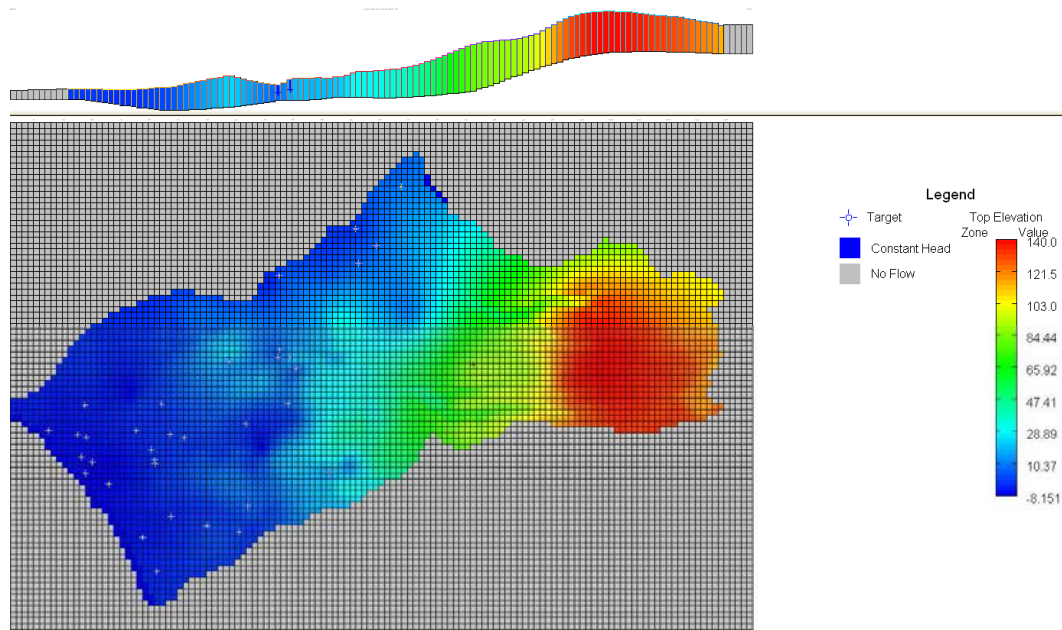


Figura 29 Tetto del monostrato acquifero

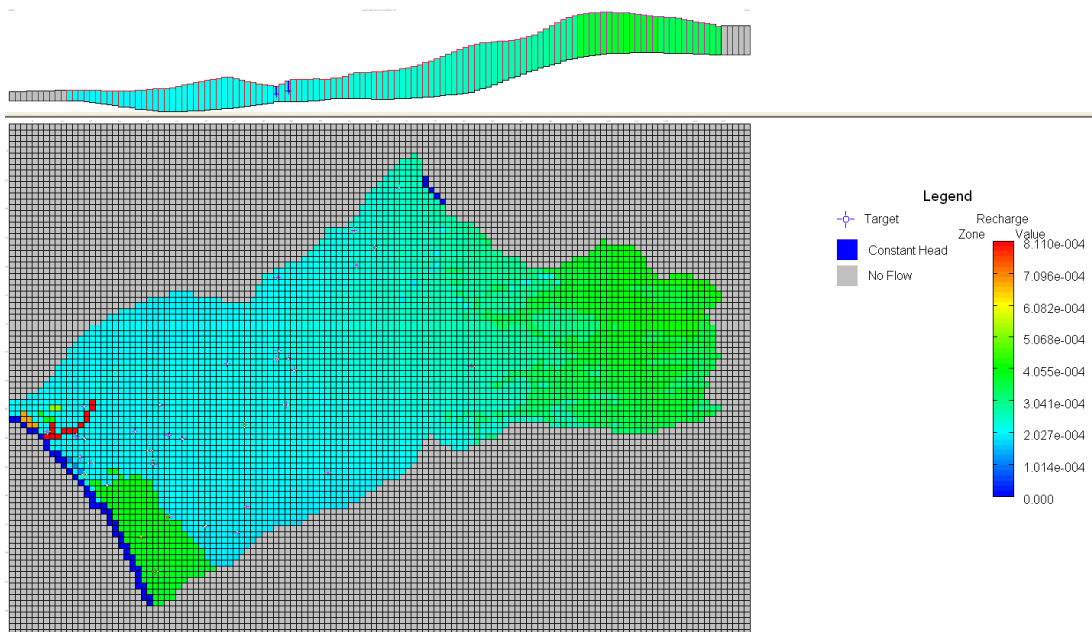


Figura 30 Infiltrazione efficace

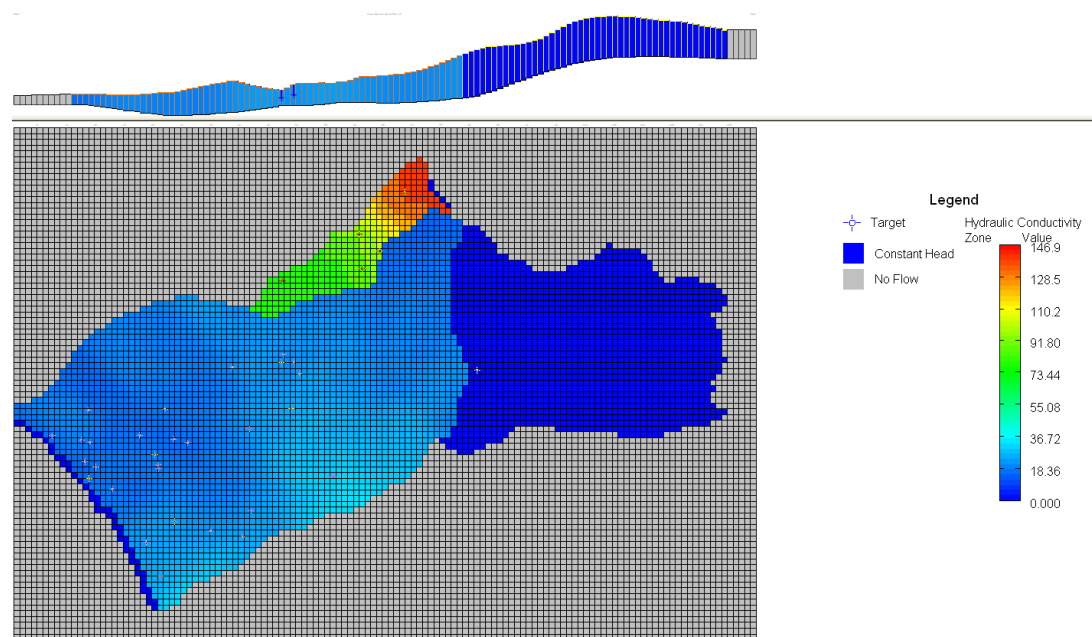


Figura 31 Conducibilità idraulica

E' stata quindi lanciata la creazione dei pacchetti necessari al calcolo e, dopo le iterazioni necessarie, sono stati visualizzati i risultati ottenuti sia come bilancio idrico totale del modello (confronto tra quantità in entrata e in uscita), sia graficamente come curve isopieze (Fig. 32), cioè come linee congiungenti punti della falda alla stessa quota.

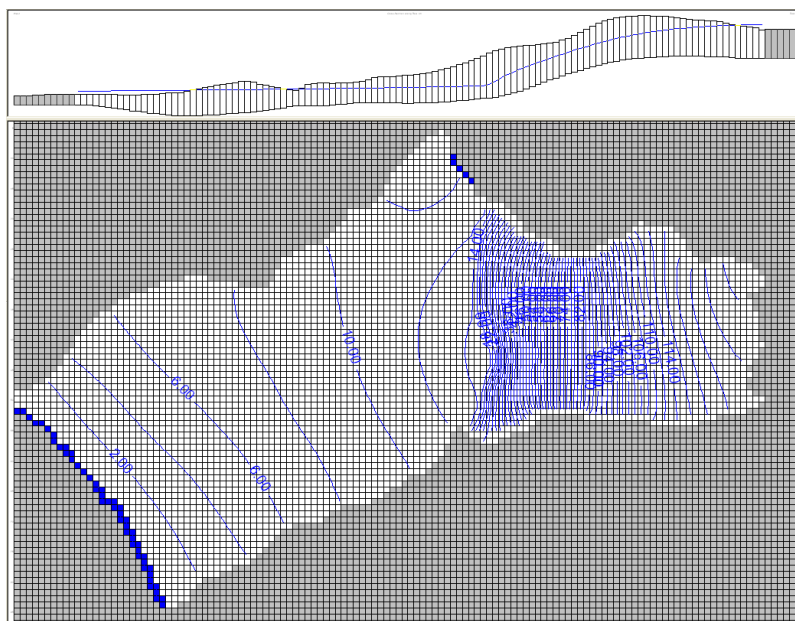


Figura 32 Isopieze simulate

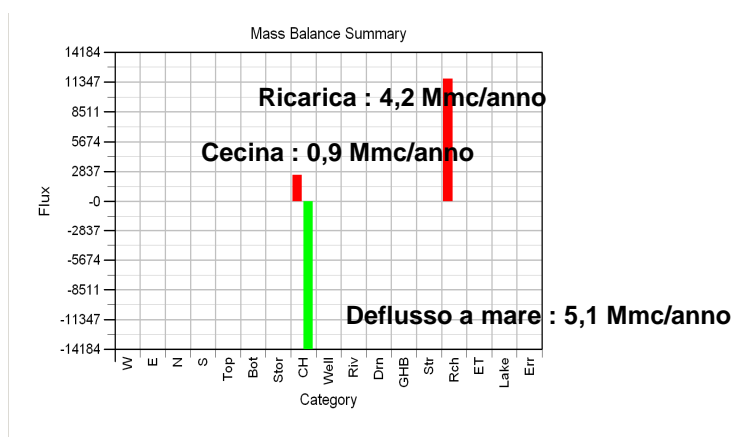


Figura 33 Bilancio idrico

Questa prima simulazione non può essere confrontata con dati reali poiché non prende in considerazione le “interferenze” antropiche come i prelievi dai pozzi, ma è di fondamentale importanza per verificare la validità del modello concettuale costruito in precedenza. I valori realistici della piezometria uniti ad un basso errore di bilancio (Fig. 33), esprimono solidità e buona convergenza della soluzione di flusso prodotta dal modello.

2.3 Modello stazionario Rev 1 (Rev 0 + prelievi)

Nella fase successiva di revisione del modello sono stati inseriti anche i prelievi idrici medi annui dai pozzi in mc/giorno (fig. 34).

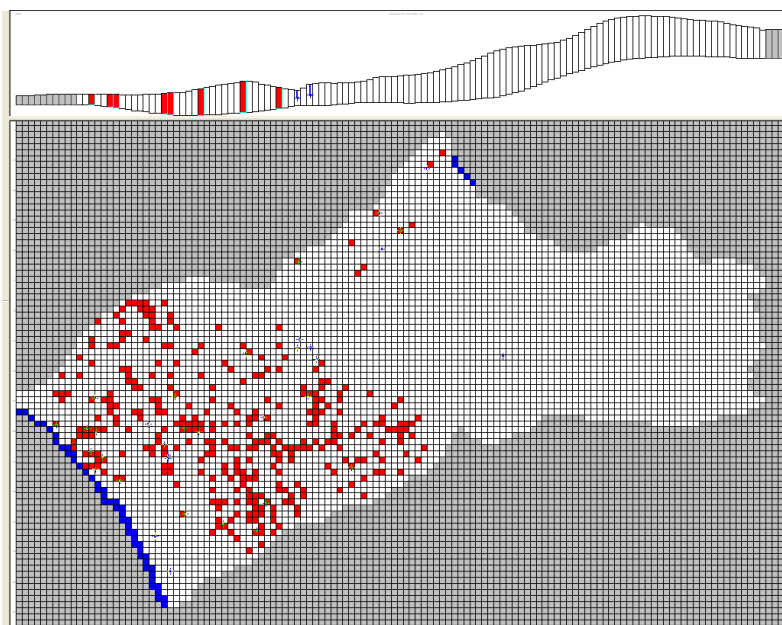


Figura 34 Ubicazione dei pozzi

E' stata quindi lanciata nuovamente la creazione dei pacchetti necessari al calcolo e, dopo le iterazioni necessarie, sono stati visualizzati i risultati ottenuti sia come bilancio idrico totale del modello (confronto tra quantità in entrata e in uscita), sia graficamente come curve isopieze, cioè come linee congiungenti punti della falda alla stessa quota (Figg. 35 e 36).

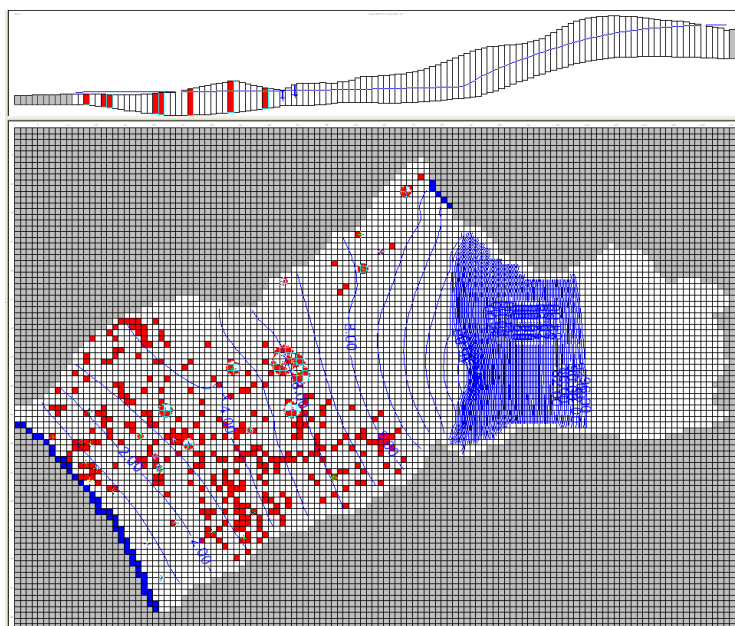


Figura 35 Isopieze simulate

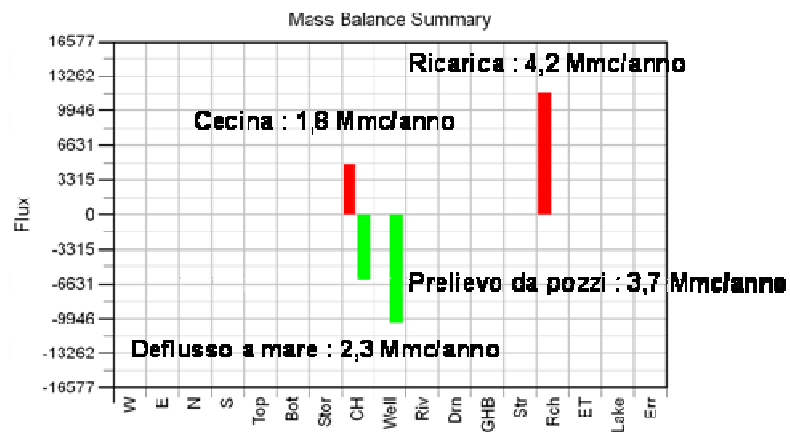


Figura 36 Bilancio idrico

Il valori della piezometria simulata, confrontabili in generale con quelli di riferimento misurati, e il basso errore di bilancio esprimono una buona convergenza della soluzione di flusso prodotta dal modello.

2.4 Modello stazionario Rev 2 (Rev 1 + limite colline a flusso costante)

Già dalle prime prove del modello in stato naturale, cioè con la sola presenza della ricarica e in assenza dei prelievi, si è notata la bontà di questa zonizzazione anche se la discontinuità, sia a livello altimetrico sia geologico e idrologico, data dalle sabbie-argille ad Artica ha creato problemi. Infatti, non sempre è stato possibile far risalire la piezometria in questa zona, a causa della brusca variazione di pendenza all'interfaccia tra le due formazioni e dell'elevato gradiente di conducibilità. Per ovviare a questo problema è stata attuata una prima semplificazione del modello che non ha implicato però una perdita eccessiva di informazioni. In pratica è stata calcolata la ricarica in arrivo dalla sottozona delle sabbie-argille, facendo semplicemente una somma dei valori delle celle del raster della ricarica appartenenti a quest'area. Questo valore, in metri cubi, è stato poi trasformato in un carico lineare applicato in corrispondenza del confine tra i terrazzi alluvionali e l'Artica e questa sottozona è stata quindi eliminata dal modello, considerandola come area di non flusso (Fig. 37 e 38).

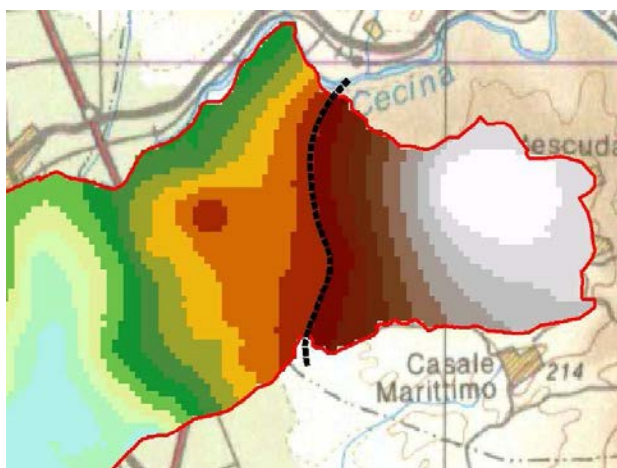


Figura 37 L'andamento della base dell'acquifero con evidenziata la discontinuità della zona delle sabbie-argille ad Artica



Figura 38 Il nuovo limite dell'area di studio

Il carico lineare è stato inserito nel modello inizialmente come AE lineare a flusso costante (Fig. 39).

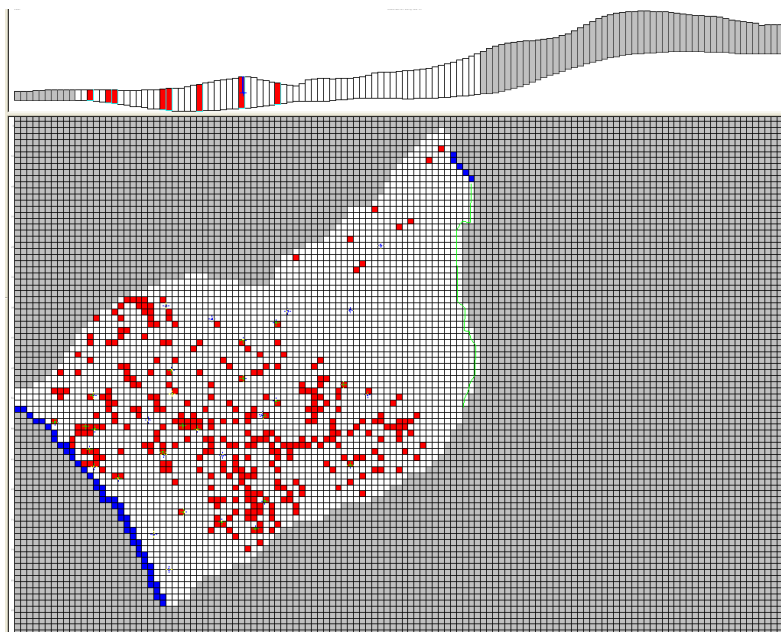


Figura 39 Condizioni al contorno del modello Rev 2 (Limite colline a flusso costante in colore verde)

Nelle figure seguenti (Fig. 40 e 41) sono riportati le condizioni piezometriche simulate e il bilancio idrico e valgono sostanzialmente le stesse considerazioni fatte per il modello Rev 1.

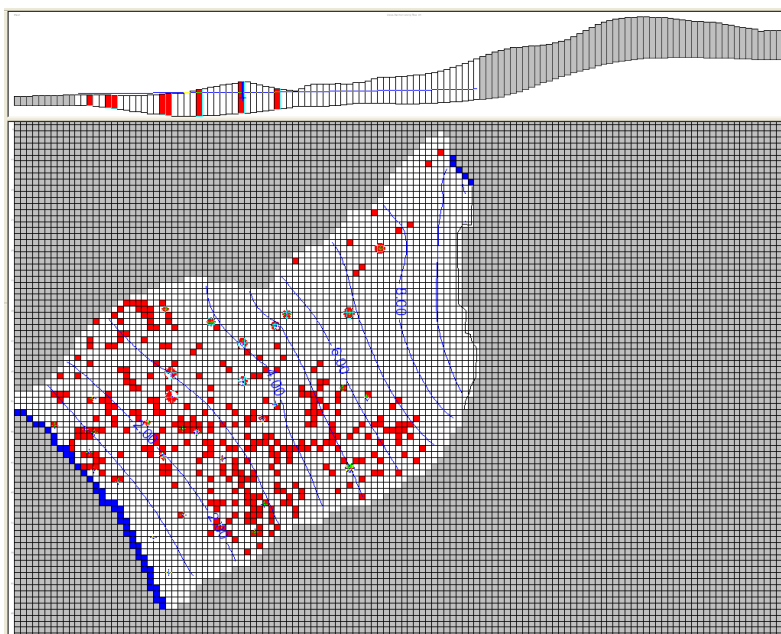


Figura 40 Isopieze simulate

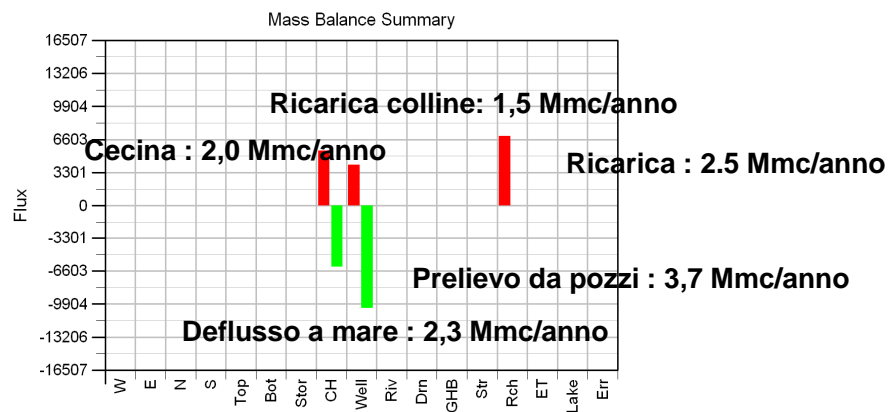


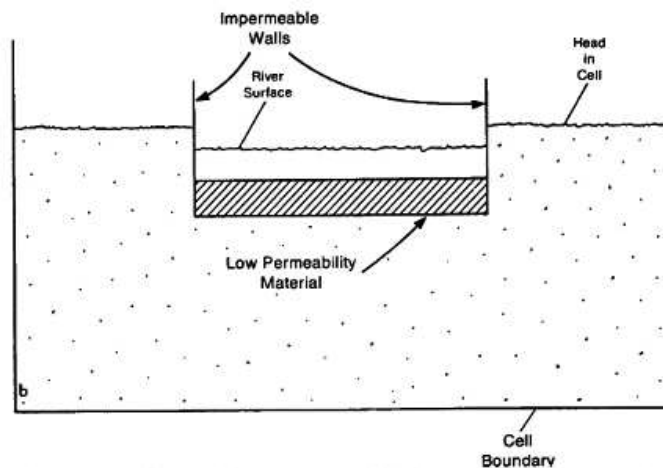
Figura 41 Bilancio idrico

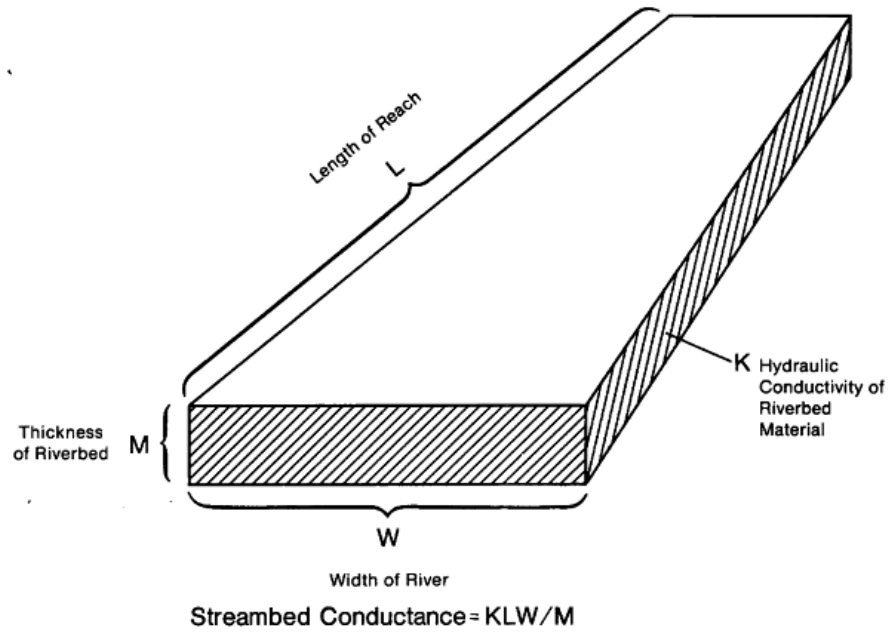
2.5 Modello stazionario Rev 3 (Rev 1 + limite Cecina tipo “River”)

Con la revisione Rev3 sono state apportate alcune modifiche di affinamento modellistico alle impostazioni iniziali:

- Il Fiume Cecina, inizialmente inserito come Constant Head nel tratto comprendente la soglia della Steccaia, è stato inserito (colore verde in Fig. 42) utilizzando la *BC River* che permette di simulare in modo più realistico gli scambi idrici del fiume con la falda. Con la *BC River* si possono infatti simulare le caratteristiche del fiume in termini di dimensioni, spessore e conducibilità idraulica dei depositi di letto del fiume. Inoltre sulla base delle considerazioni svolte nel paragrafo 2.6, il breve tratto di fiume a monte della Steccaia è stato considerato di non flusso. Il parametro della conduttanza che regola gli scambi tra il letto del fiume e l’acquifero deriva dalla stessa equazione di Darcy;

$$Q = KiA = K * L * W * i = K * L * W * \Delta h / M = C * \Delta h$$





- Il limite di costa è stato inserito come General Head Boundary (flusso a carico dipendente) invece che Constant Head, condizione meno forte che pone a maggiore distanza dalla costa (100 m) il carico di 0 m slm.
- Il limite collinare è stato inserito come Constant Flux invece che come AE lineare.

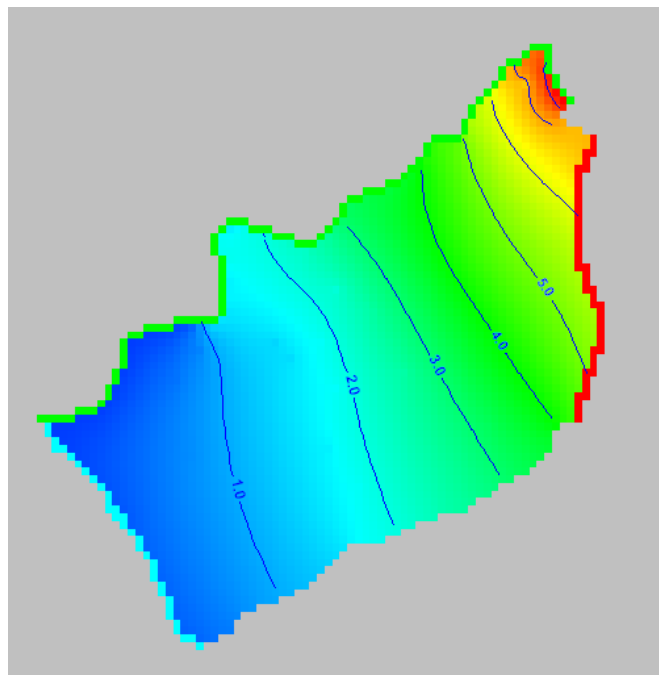


Figura 42 Isopieze simulate

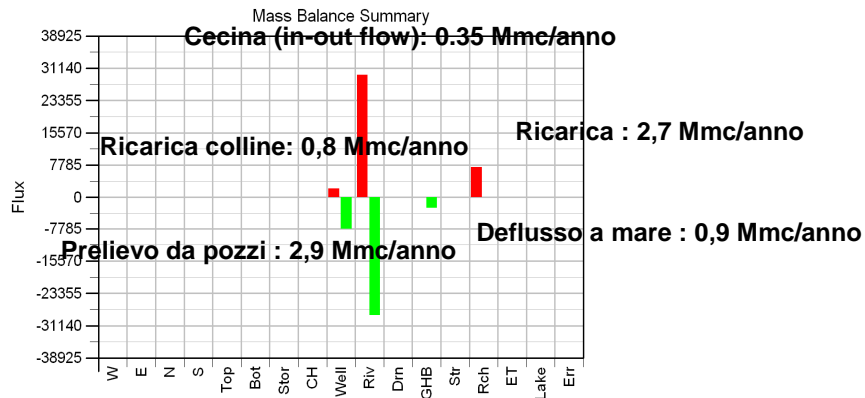


Figura 43 Bilancio idrico

La calibrazione del modello è stata eseguita:

- in termini di bilancio (Fig. 43) che ha fornito una minima percentuale di errore;
- in termini di scostamento tra i valori simulati e quelli osservati in corrispondenza di pozzi target. Come si può vedere in Fig. 44 le differenze sono contenute anche in termini statistici.

Residual Mean	= -0.42
Residual Standard Dev.	= 0.81
Absolute Residual Mean	= 0.72
Residual Sum of Squares	= 2.00e+001
RMS Error	= 0.91
Minimum Residual	= -2.03
Maximum Residual	= 1.21
Range of Observations	= 7.82

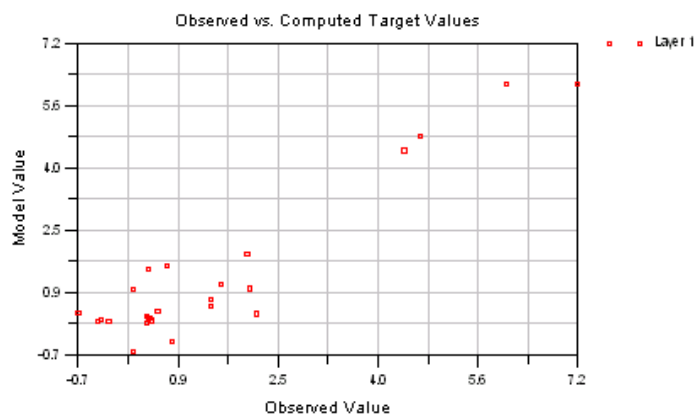


Fig. 44 Confronto tra dati simulati e osservati nei target

Nel TMR (Telescopic Mesh Refinement) effettuato sulla zona contaminata senza la presenza della MISE è stato quindi possibile effettuare un bilancio idrico circoscritto, ottenendo un valore di ca. 300 mc/g -3,5 l/s (Fig. 45). Tale informazione è stata utile per le elaborazioni di seguito descritte, che si riferiscono a simulazioni con presenza della MISE allo scopo di ottimizzarla in termini di ubicazione dei pozzi e di prelievo idrico.

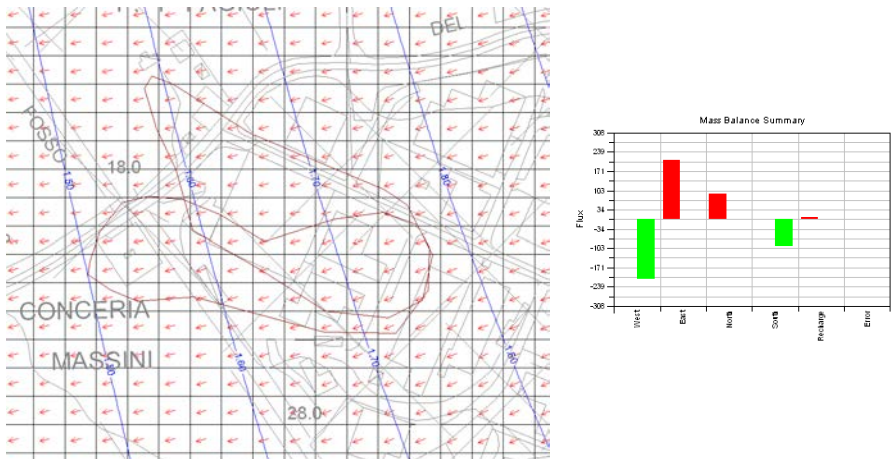


Fig. 45 Rev3.0.TMR area contaminata e suo bilancio idrico

La prima revisione Rev3.1 ha simulato la presenza della iniziale MISE di Pump&Treat con i pozzi Giannelli e Rapida in funzione come pozzi barriera con annessi gli impianti di filtrazione a carboni attivi. Nella Fig. 46 il dettaglio nella zona contaminata fornisce una migliore visione delle condizioni piezometriche con evidente direzione di flusso principale verso Sud – Ovest.

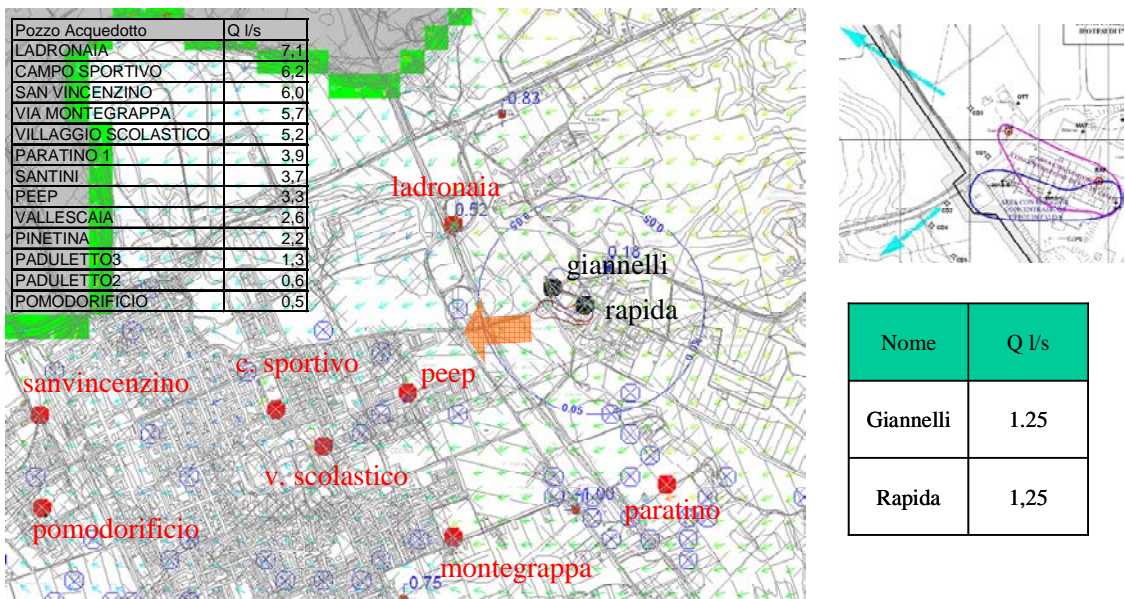
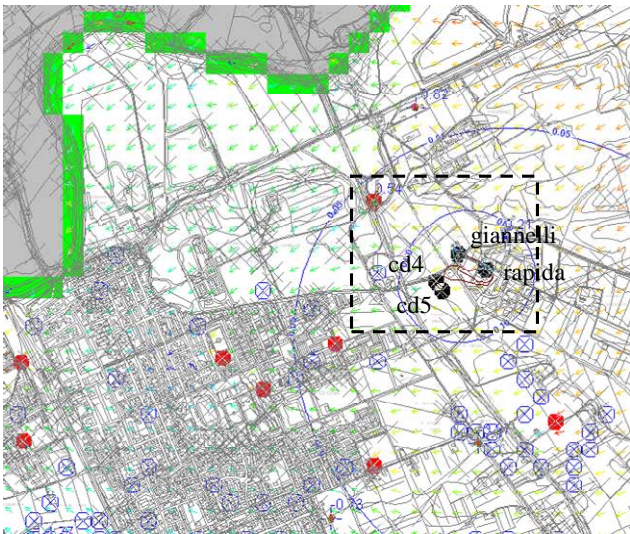


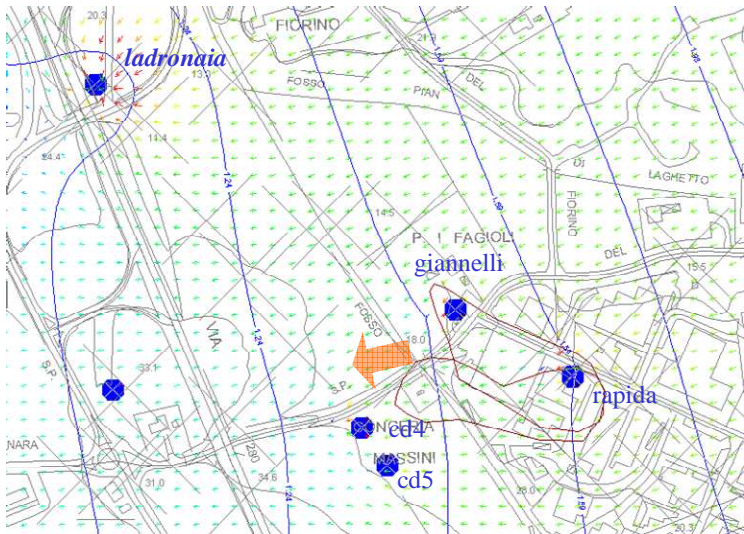
Fig. 46 Rev3.1 con zoom sull'area contaminata,

La seconda revisione Rev3.2 ha simulato la presenza della MISE con i pozzi Giannelli e Rapida a cui sono stati aggiunti altri due pozzi barriera (CD4 e CD5) per limitare lo spostamento del pennacchio verso Sud-Ovest, cioè verso l’abitato di Cecina nella direzione di flusso di falda principale (Fig. 47). Nella Fig. 48 è rappresentato invece il TMR sulla zona contaminata che, mostrando una migliore visione delle condizioni piezometriche, evidenzia come una parte del flusso idrico (freccia di colore arancio) non venga comunque intercettata dai pozzi barriera CD4 e CD5 e si diriga verso Cecina (zona PEEP, Campo sportivo).



Nome	Q l/s
Rapida	1,25
Giannelli	1
CD4	1
CD5	1

Fig. 47 Rev3.2 con zoom sull’area contaminata



Nome	Q l/s
Rapida	1,25
Giannelli	1
CD4	1
CD5	1

Fig. 48 Rev3.2 TMR dell’area contaminata

2.6 Modello stazionario - simulazione scenari

Questa fase del lavoro ha impiegato il modello matematico a scopo predittivo, cioè per riprodurre scenari futuri conseguenti, in questo caso, a modificazioni artificiali simulate sul sistema acquifero studiato. Il modello di riferimento è stato il Rev3 con le modifiche migliorative prima descritte.

Sono stati considerati 3 scenari finalizzati alla ottimizzazione della MISE per confinare il pennacchio inquinato; questo infatti, seguendo il flusso idrico, la cui direzione è evidenziata dalla freccia di colore arancio di Fig. 46, si dirige verso Cecina, sfuggendo in parte alla barriera idraulica CD4 – CD5:

- Rev3.3.tmr => rapida + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{rapida} > Q_{CD4} > Q_{giannelli} = Q_{CD5}$)
- Rev3.4.tmr => rapida + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{rapida} > Q_{CD1} = Q_{CD2} = Q_{CD3}$)
- Rev3.5.tmr => rapida in reimmissione + CD1 + CD2 + CD3 ($Q_{CD1} > Q_{CD2} = Q_{CD3}$)

Gli scenari hanno previsto una rimodulazione degli emungimenti dai pozzi barriera e la presenza di altri tre pozzi di prelievo CD1, CD2 e CD3 (Figg 49, 50 e 51).

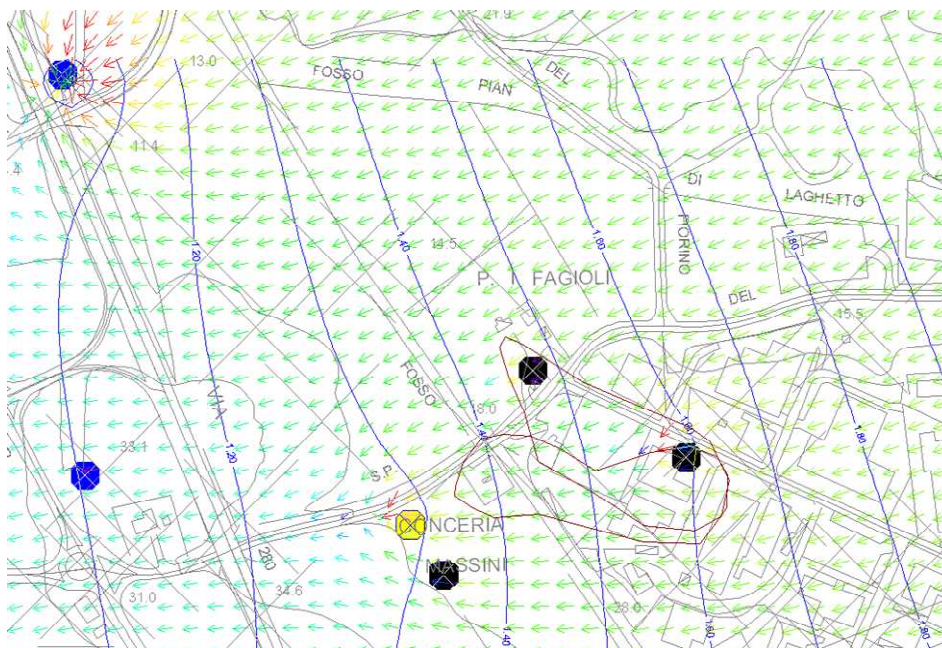


Fig. 49 Rev3.3.tmr

Nome	Q l/s
Rapida	1,25
Giannelli	0,5
CD4	2
CD5	0,5

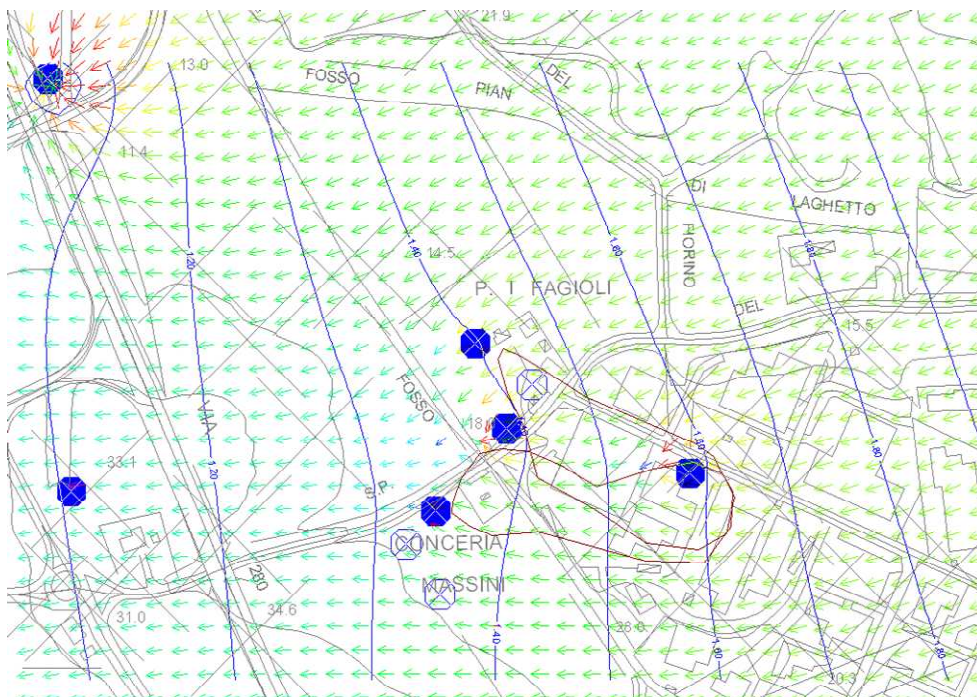


Fig. 50 Rev3.4.tmr

Nome	Q l/s
Rapida	1,25
CD1	2
CD2	0,5
CD3	0,5

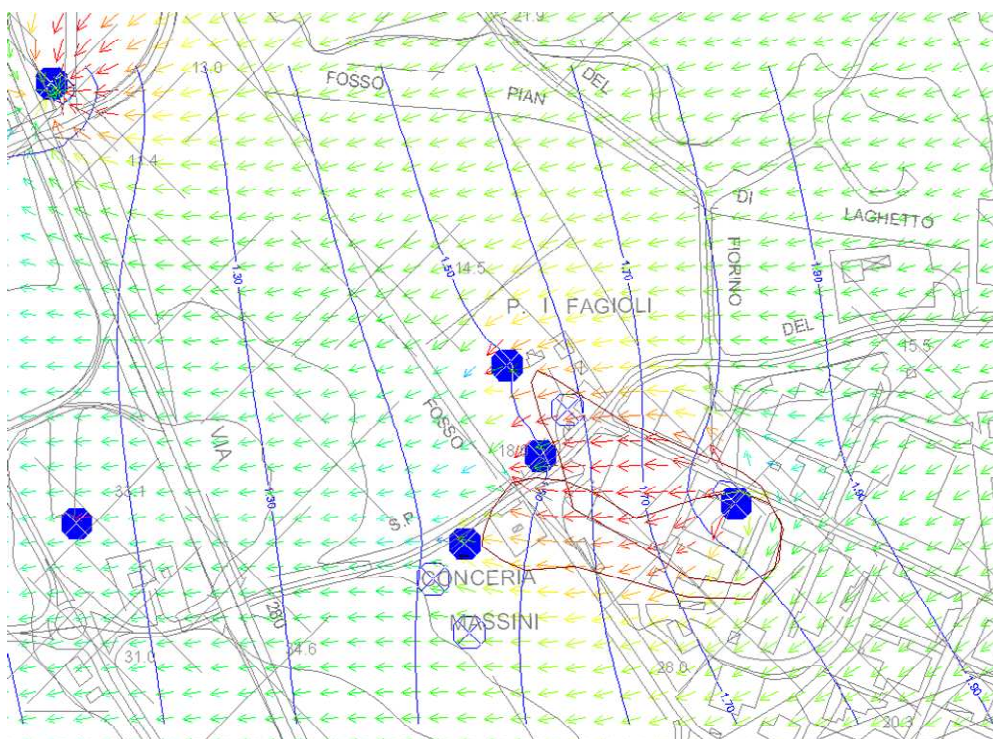


Fig. 51 Rev3.5.tmr

Nome	Q l/s
Rapida	[4,5]
CD1	2,25
CD2	1
CD3	1

Il primo scenario propone una rimodulazione delle portate dei quattro pozzi barriera cercando di confinare il plume con l'aumento della portata di emungimento del CD4 (da 1 a 2 l/s) e la diminuzione delle portate del pozzo Giannelli e del CD5 (da 1 a 0,5). Il pozzo Rapida mantiene la portata di 1,25 l/s.

Il secondo scenario considera la presenza di tre nuovi pozzi CD1 ($Q = 2 \text{ l/s}$), CD2 ($Q = 0,5 \text{ l/s}$) e CD3 ($Q = 0,5 \text{ l/s}$). È mantenuto in funzione il pozzo Rapida, mentre CD4, CD5 e Ladronaia sono spenti.

Il terzo scenario infine è analogo al secondo come funzionalità dei pozzi, ma con prelievo idrico più che raddoppiato (da 4,25 a 4,75 l/s). Nella Fig. 49 è mostrata in tabella la distribuzione in termini di portata.

Le tre alternative proposte e simulate sono tutte sostanzialmente valide in quanto riescono a confinare il pennacchio inquinato che sfugge alla MISE iniziale (CD4, CD5; Rapida e Giannelli). Tuttavia l'efficienza dello sbarramento è crescente passando dallo scenario 1 al 3.

Al momento della stesura della presente relazione è stato già reso operativo lo scenario 2, proposto a marzo 2013 in corso di lavoro, ed avviati i lavori per la realizzazione dello scenario 3, con l'attivazione dei tre nuovi pozzi barriera CD1 CD2 e CD3.

2.7 Modello stazionario multistrato Rev 4

Circa la discretizzazione verticale necessaria per la successiva modellazione di trasporto - sulla base della ricostruzione tridimensionale della struttura idrogeologica in studio, è stato deciso di suddividere il dominio del modello in 4 strati: due strati acquiferi (2° e 4° strato) e due acquitardi (1° strato di copertura e 3° strato di lente argillosa). In aggiunta alla ricostruzione della struttura descritta nel paragrafo 2.1 è stata simulata una copertura che realmente è presente su tutta l'area di studio eccetto nella zona prossima alla costa. La conducibilità di questo strato acquitardo è stata stimata e simulata costante con un valore di 3×10^{-4} m/s. La sua presenza comporta, da un punto di vista idrogeologico, un ritardo per il sistema acquifero nella ricarica in termini di infiltrazione efficace. Nel modello la copertura, quando è interessata dal livello di falda, influisce sui valori di trasmissività e soprattutto modula gli scambi idrici fiume-falda.

Dal punto di vista idrogeologico, la sovrapposizione del secondo al quarto strato simula le condizioni di acquifero freatico (orizzonte sabbioso ghiaioso e limoso) in tutto il dominio modellizzato, eccetto che nella parte in cui è presente in profondità il terzo strato argilloso. In quest'ultimo caso si ha una differenziazione in un acquifero superficiale freatico ed un acquifero in pressione nel quarto strato ghiaioso.

Le condizioni al contorno, cioè i limiti associati al reticolo di discretizzazione, sono state selezionate sulla base del modello concettuale prima ricostruito e qui brevemente richiamate:

1. Fiume Cecina NO - BC River
2. Limite di costa SO - GHB (flusso a carico dipendente)
3. Limite collinare NE - Constant Head (flusso a carico costante)
4. Prelievi

Il limite di costa è stato imposto a tutti gli strati, mentre solo al primo strato è stato assegnato il BC river Cecina, mentre al quarto strato sono stati imposti tutti e tre i limiti. I lati dell'area cui non sono state inserite le tre condizioni al contorno, sono zone a flusso nullo; in particolare si evidenziano il lato SE con isopieze mediamente ad esso ortogonali e la zona della Steccaia. I prelievi sono stati imposti prevalentemente al quarto strato, con l'eccezione di alcuni pozzi che emungono dall'acquifero superficiale nella zona in cui è presente la lente argillosa.

La distribuzione della conducibilità idraulica K degli strati è stata ottenuta, a partire dai valori di trasmissività, calibrati nel modello monostrato, considerando gli spessori H dei singoli strati.

La calibrazione del modello è avvenuta, come nei casi precedenti, in termini di bilancio e osservando lo scostamento tra i valori simulati e quelli osservati in corrispondenza di pozzi target. Come si può vedere in Fig. 52 le differenze sono contenute anche in termini statistici. Nella stessa figura è riportata per confronto la piezometria elaborata con il modello Rev3; si rileva una sostanziale uguaglianza con quella elaborata con il modello Rev 4.

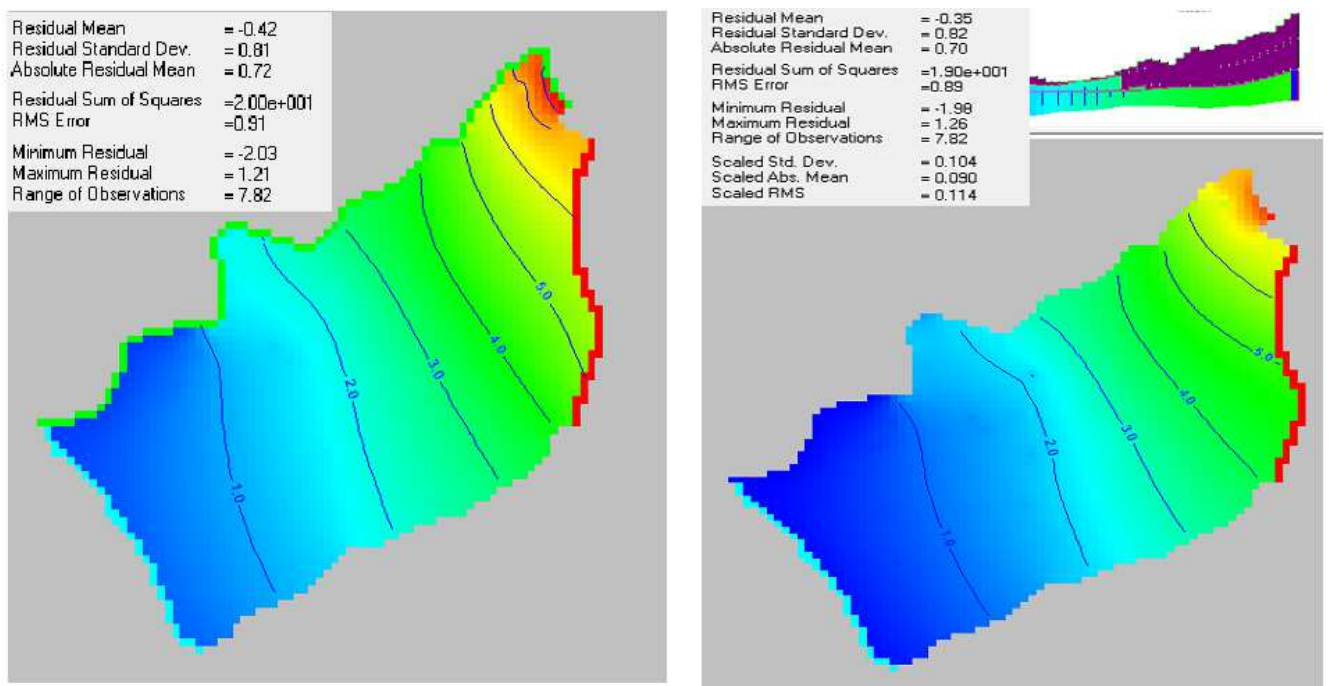


Fig. 52 Confronto tra la piezometria simulata in rev3 (immagine di sinistra) e quella simulata nel Rev 4, con relativa elaborazione statistica.

2.8 Modello transitorio monostrato Rev 3

La versione multistrato Rev3 è stata modellizzata anche in regime transitorio. Per una migliore calibrazione finale si è operato in due fasi consequenziali:

1. Simulazione di regime transitorio stagionale medio con condizioni piezometriche iniziali fatte coincidere con quelle ottenute, per ciascuno degli strati simulati, dalla calibrazione del modello in regime stazionario. L'intervallo temporale simulato è di tre anni (Fig. 53).
2. Simulazione di regime transitorio 2005 – 2010 con condizioni piezometriche iniziali fatte coincidere con quelle ottenute, per ciascuno degli strati simulati, dalla calibrazione del modello in regime transitorio stagionale medio. L'intervallo temporale è di sei anni (2005 – 2010).

Si è reso necessario modificare i dati (ricarica dell'acquifero attraverso l'infiltrazione delle acque di pioggia e prelievi dai pozzi), in funzione della loro variazione temporale. Tali sollecitazioni applicate al sistema acquifero sono state considerate:

- costanti in un intervallo temporale stagionale (3 mesi) in regime medio stagionale;
- variabili nel tempo come nelle reali condizioni in regime transitorio 2005 -2010.

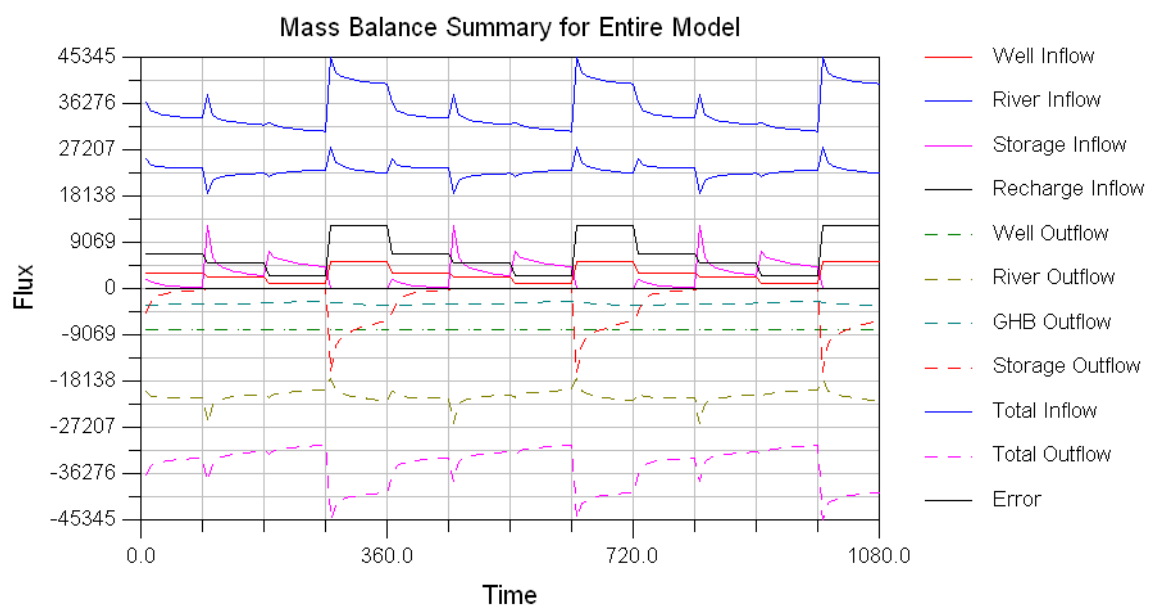


Fig. 53 Bilancio idrico in regime transitorio stagionale medio

Il TMR della zona di Poggio Gagliardo (Fig. 54) e l'analisi dei target impostati ha evidenziato come il modello in regime transitorio stagionale, al di là della sua buona generale calibrazione, comporti delle sottostime nelle misure episodiche tra 2012 e 2013.

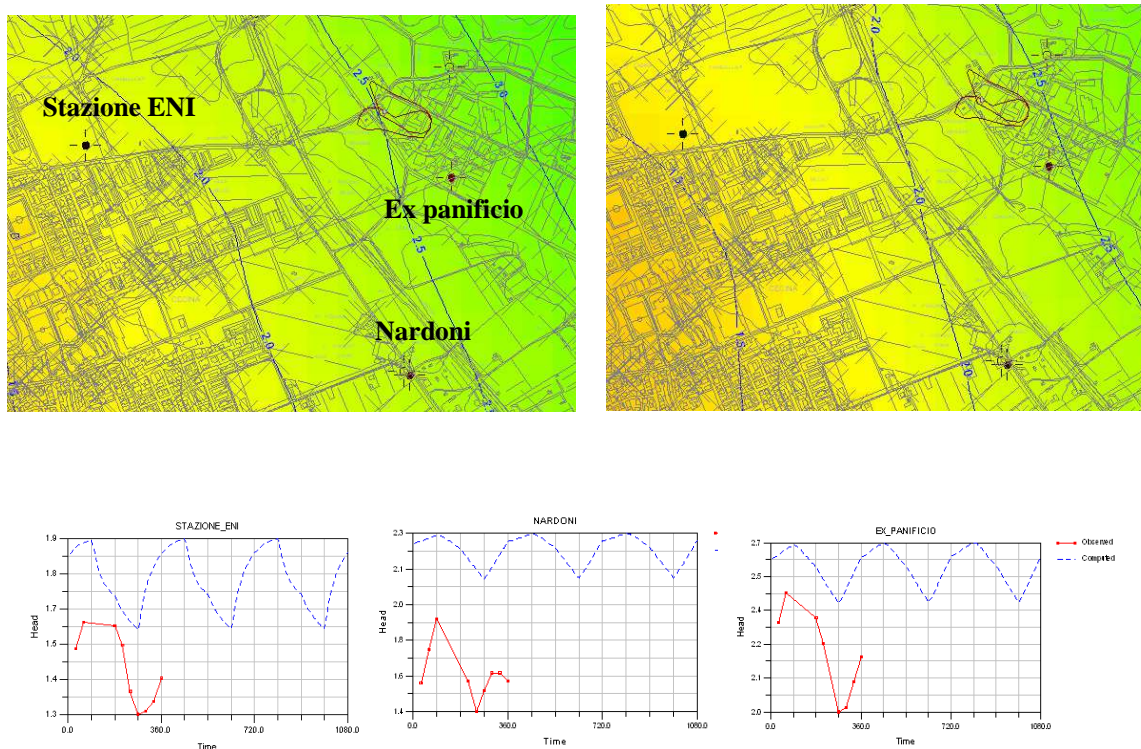


Fig. 54 TMRin regime transitorio stagionale medio. Confronto tra dati calcolati e osservati

In regime transitorio 2005 – 2010 si è, infine, potuto calibrare il modello in un lasso temporale significativo anche in termini di variabilità climatica (Fig. 55), riproducendo la brusca inversione di tendenza alla fine del 2008, per la successiva validazione nel periodo 2012 -2013.

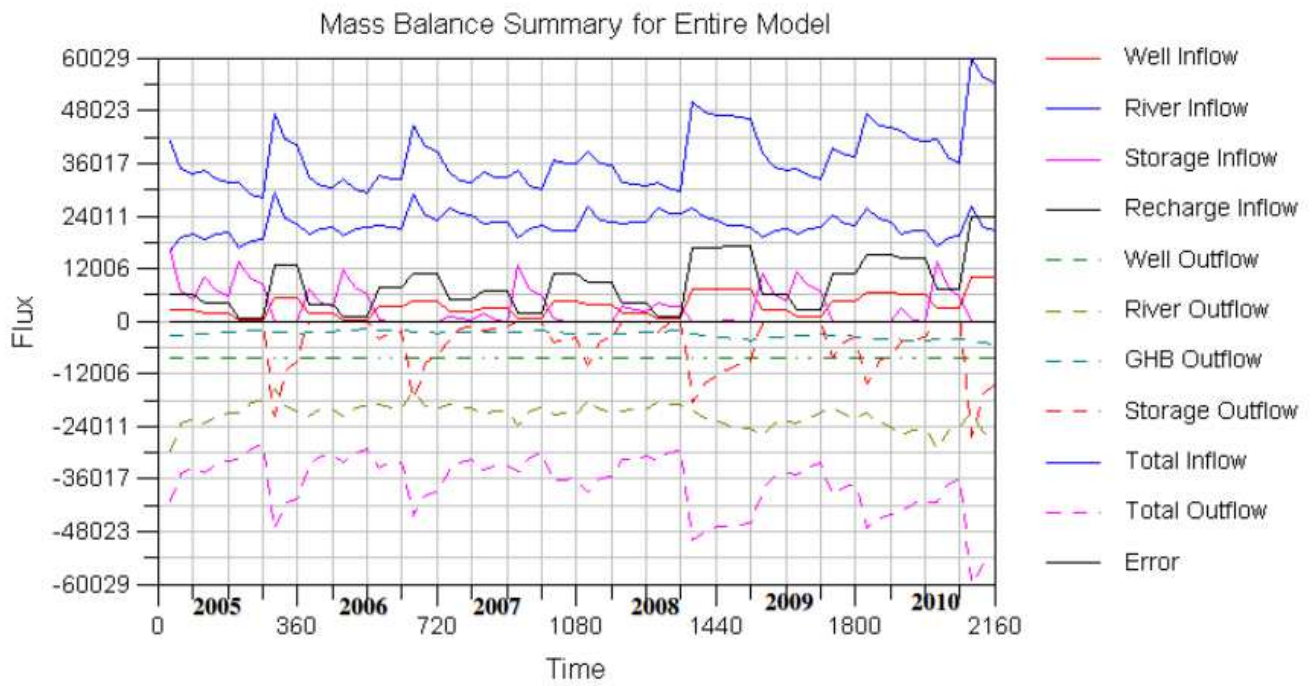


Fig. 55 Bilancio idrico in regime transitorio 2005 - 2010

3 MODELLO DI TRASPORTO

Il modello di trasporto è basato sul codice di calcolo MT3D in origine sviluppato da Zheng (1990) che simula i processi di advezione e dispersione dei contaminanti nelle acque sotterranee.

L'equazione che regola il processo di trasporto in soluzione e dunque la variazione della concentrazione di un soluto nel tempo è regolata da quattro componenti che sono:

- la dispersione del contaminante dovuta ai percorsi non lineari dei filetti liquidi e regolata da uno specifico coefficiente, o meglio tensore di dispersione, D_{ij} variabile secondo le diverse direzioni L^2T^{-1}
- l'advezione, cioè il trasporto solidale del soluto con la velocità (v_i) del flusso idrico
- la presenza di sorgenti e/o pozzi che rilasciano o sottraggono al sistema quantità di soluto date dal prodotto di una portata q_s per una concentrazione C_s^k
- l'esistenza di reazioni chimico – fisiche R di trasformazione, decadimento o semplicemente di assorbimento sulla matrice solida

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \overbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right)}^{\text{dispersione}} - \overbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k)}^{\text{advezione}} + \overbrace{q_s C_s^k}^{\text{sorgenti/pozzi}} + \overbrace{\sum R_n}^{\text{reazioni}}$$

Sviluppando l'ultimo termine ed assumendo il concetto di equilibrio locale per i processi di assorbimento su matrice solida, ritenuti più rapidi dei processi di trasporto, si giunge ad una diversa formulazione che vede l'aggiunta di:

- reazioni nella fase disciolta C^k regolate da un tempo di decadimento $\lambda_1 T^{-1}$
- reazioni nella fase adesa alla matrice solida, \bar{C}^k regolate da $\lambda_2 T^{-1}$
- apporti dovuti alle variazioni di immagazzinamento in transitorio espresse ancora con le dimensioni di una portata unitaria $T^{-1} q'$
- un fattore R , adimensionale, noto come fattore di ritardo.

$$R\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

Il fattore R che è direttamente dipendente dai processi di adsorbimento ha valore 1 per un soluto del tutto inerte con coefficiente di ripartizione acqua/matrice pari a 0 che si muove alla stessa velocità apparente del flusso idrico. Viceversa, sostanze che si separano dal flusso idrico, hanno coefficienti di ritardo > 1. PCE e TCE hanno, in esempio fattori R di 1, 5 ed 1,1 rispettivamente.

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d$$

La simulazione del trasporto dei contaminanti nel modello di flusso (m/g) di Poggio Gagliardo, espressa in concentrazione mg/mc ($\mu\text{g/L}$) della sommatoria di PCE+TCE, ha dunque richiesto la stima dei seguenti parametri richiesti dal software Groundwater Vistas:

- Dispersività longitudinale α_L trasversale α_T e verticale α_V [m]
- K_d [mc/mg] bulk density [mg/mc]
- emivita [g]

Per quanto riguarda la dispersività Gelhar et al. (1992) hanno evidenziato con una vasta raccolta critica di casi di studio come il parametro sia dipendente dalla stessa scala del test.

Nel nostro caso, assumendo come scala del modello la distanza tra area sorgente e il più distante pozzo impattato dell'acquifero di Cecina (San Vincenzino) di 3 km ca. si stima una dispersività longitudinale di 100 m (Fig. 56). La dispersività trasversale è di norma valutata come $\alpha_T = \alpha_L / 3$, quindi 30 m. La dispersività verticale per analogia agli usuali rapporti tra conducibilità si è assunta pari a $\alpha_V = \alpha_L / 10$ (10 m).

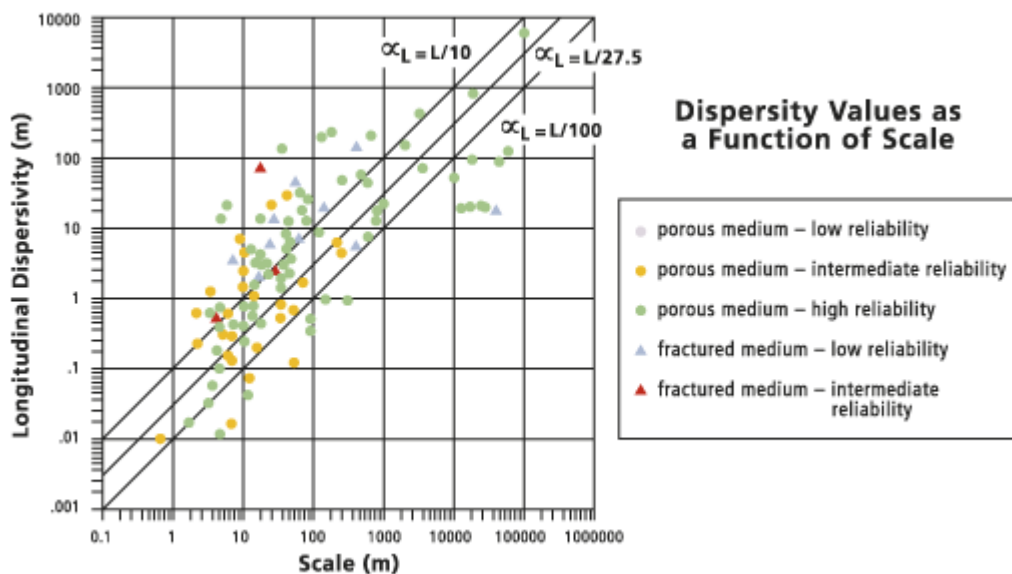


Fig. 56 Dispersività longitudinale in mezzi porosi o fratturati

Per i fattori che intervengono nel processo di adsorbimento, si è fatto riferimento alla “Subsurface Contamination Reference Guide” (EPA, 1990) da cui risultano coefficienti di adsorbimento variabili tra 0,06610 e 0,01260 l/kg e “Retardation factor”, nelle situazioni in esempio, variabili tra 1,3 ed 1,1 per PCE e TCE (Figg. 57 e 58).

Source
Note: Subsurface Remediation Guidance Table 3, EPA/540/2-90/011b

Data
revision
date
February 1990

Chemical (PCE) tetrachloroethene (perchloroethene)

Default Parameters	
Solids Density (r_s)	2.65 Default
K_{oc} value	661 L/kg

Results	
Bulk Density (r_b)	1.99 g/cm ³
k_d	0.06610 L/kg
Retardation Factor (R)	1.5

Fig. 57 PCE Coefficiente di assorbimento e fattore di ritardo

Source
Note: Subsurface Remediation Guidance Table 3, EPA/540/2-90/011b

Data
revision
date
February 1990

Chemical (TCE) trichloroethene

Default Parameters	
Solids Density (r_s)	2.65 Default
K_{oc} value	126 L/kg

Results	
Bulk Density (r_b)	1.99 g/cm ³
k_d	0.01260 L/kg
Retardation Factor (R)	1.1

Fig. 58 TCE Coefficiente di assorbimento e fattore di ritardo

Nel nostro caso, utilizzando il dato di porosità efficace, prima determinato si ottiene un fattore di ritardo superiore.

peso di volume	mc/mg	7,87E-11
coefficiente di ripartizione	mg/mc	1,80E+09
porosità efficace		0,1

R	2,4166
---	--------

Per quanto riguarda infine il fattore di emivita (Fig. 59), Newell et alii (2002) indicano per TCE come per DCE e VC un valore di emivita di circa 230 gg ($\lambda = 0,003$).

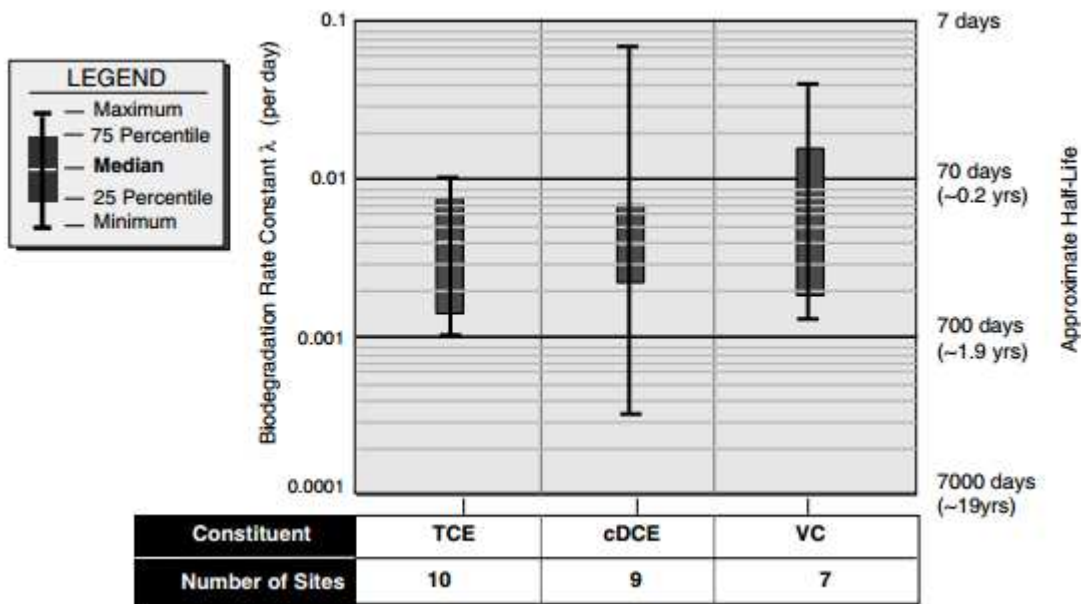


Fig. 59 Fattore di emivita per TCE, PCE e VC

3.1 Modello trasporto 2005 – 2010

Sul modello transitorio prima illustrato sono stati dunque impostati i parametri del trasporto e realizzata una simulazione a partire dalle concentrazioni iniziali della fine 2004.

Il modello di trasporto, tenuto conto delle approssimazioni del caso, riproduce tre elementi caratteristici:

- la riduzione dal 2006 delle concentrazioni al Ladronaia in direzione NO con limitate riprese nel primo trimestre 2009 e quarto trimestre 2010 (Fig. 60);

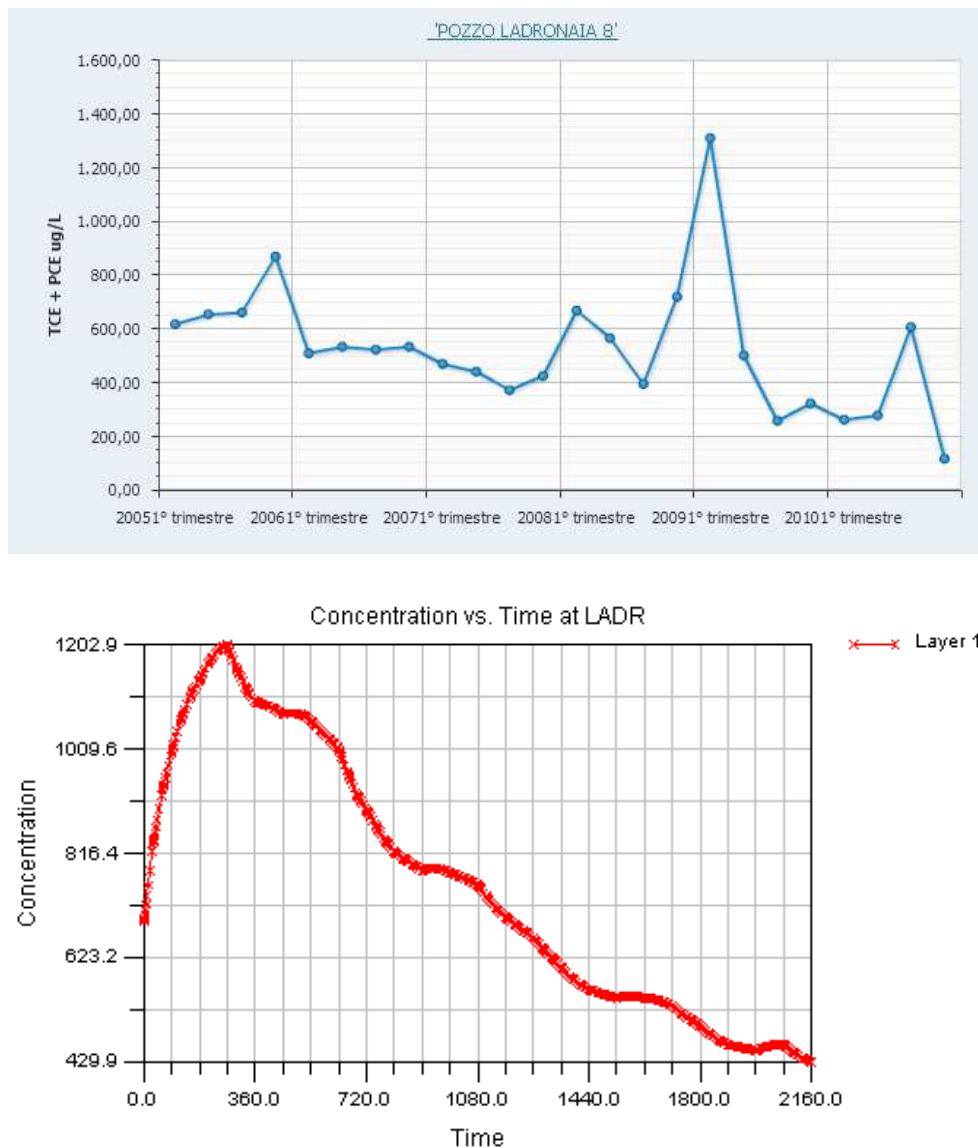


Fig. 60 Confronto osservato calcolato al Pozzo LADRONAIA

- l'incremento delle concentrazioni in direzione SO sul pozzo PEEP, che dopo un periodo di stazionarietà negli anni 2006 e 2007 appare particolarmente intenso agli inizi del 2009 (Fig. 61);

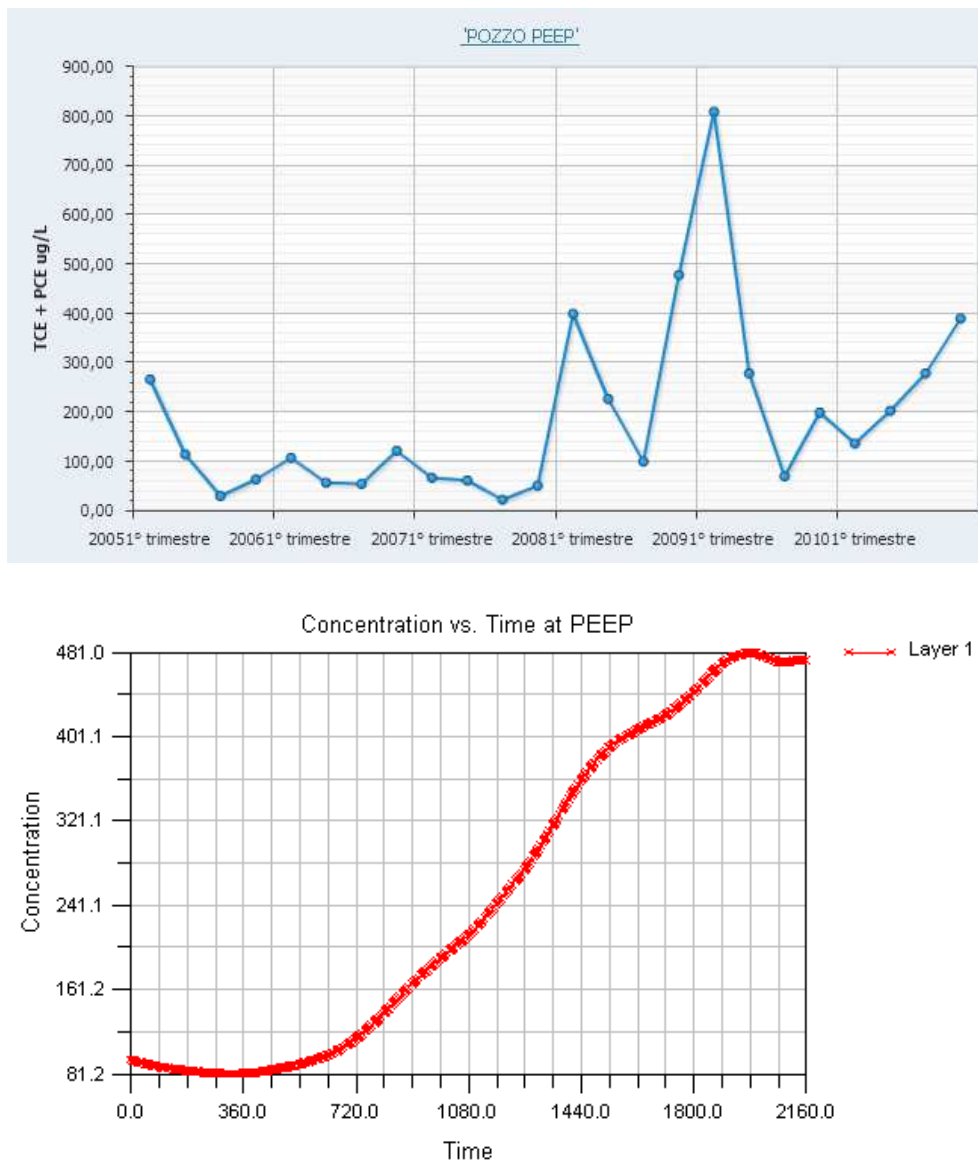


Fig. 61 Confronto osservato calcolato al Pozzo PEEP

- l'incremento generale delle concentrazioni nel pozzo più distante San Vincenzino ora in direzione O (Fig. 62).

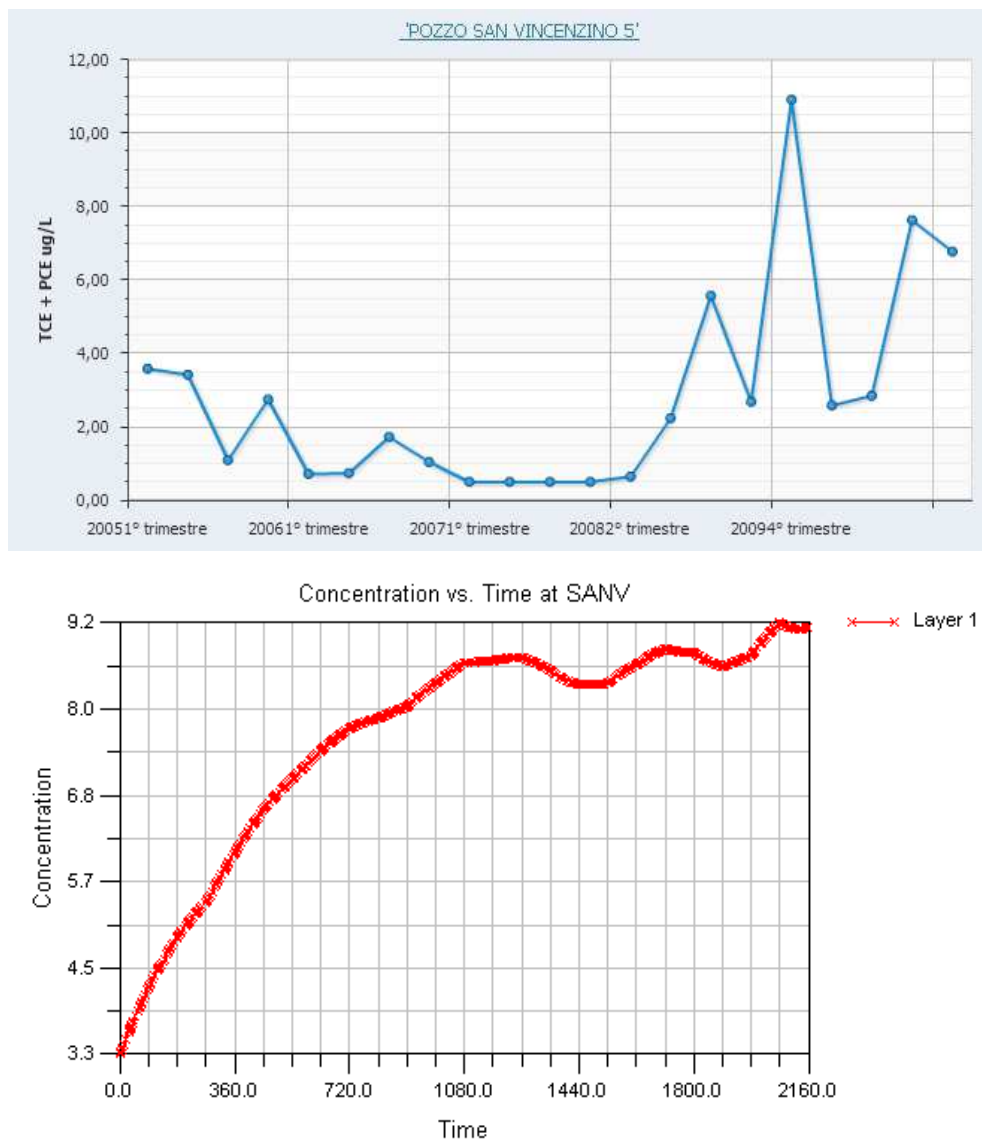


Fig. 62 Confronto osservato calcolato al Pozzo SANV

In quest'ultimo caso le differenze tra modello e osservato sono sensibili ma l'incremento regolare ricostruito dal modello e non presente nella realtà potrebbe avere una spiegazione in una ricostruzione errata, sulla base dei dati disponibili, della distribuzione delle concentrazioni iniziali.

Come indicato nella Fig. 63 la distribuzione delle concentrazioni degli organoalogenati, risulta a tratti molto discontinua, con variazioni molto brusche. L'incremento continuo ricostruito dal modello trae origine dal massimo centrato sul pozzo Campo Sportivo, che potrebbe avere forse un'estensione molto più limitata.

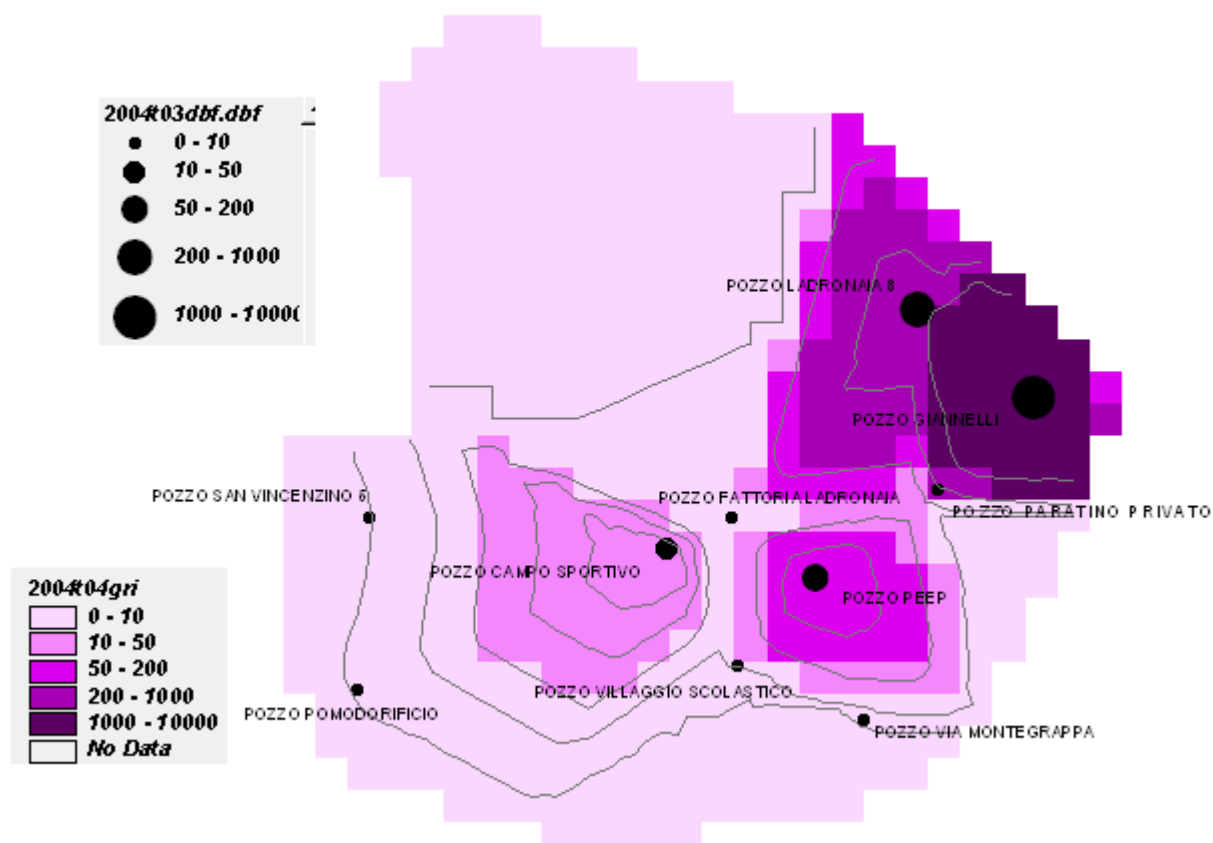
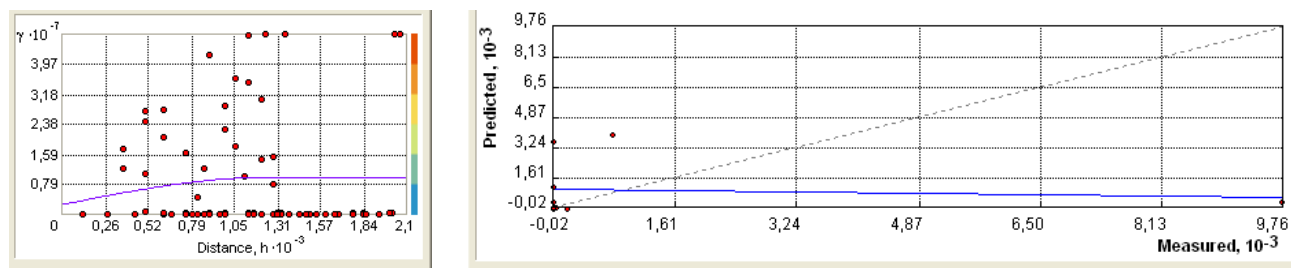


Fig. 63 – Distribuzione delle concentrazioni di TCE+PCE per le condizioni iniziali del modello 2005-2010

La scarsa continuità dei dati dei pozzi sotto monitoraggio dell'acquifero di Cecina è ben evidenziata dal variogramma seguente molto disperso e successiva mancata validazione dei dati interpolati.



Nelle mappe seguenti è riportata, in sequenza, l'evoluzione della rete di flusso e delle concentrazioni associate nel periodo considerato. Da rilevare le diverse configurazioni piezometriche degli anni di magra fino al 2008, con direzioni di deflusso N-S e NNW-SSE, al confronto dei successivi anni di morbida 2009 e 2010 con direzione NW-SE (Fig. 64).

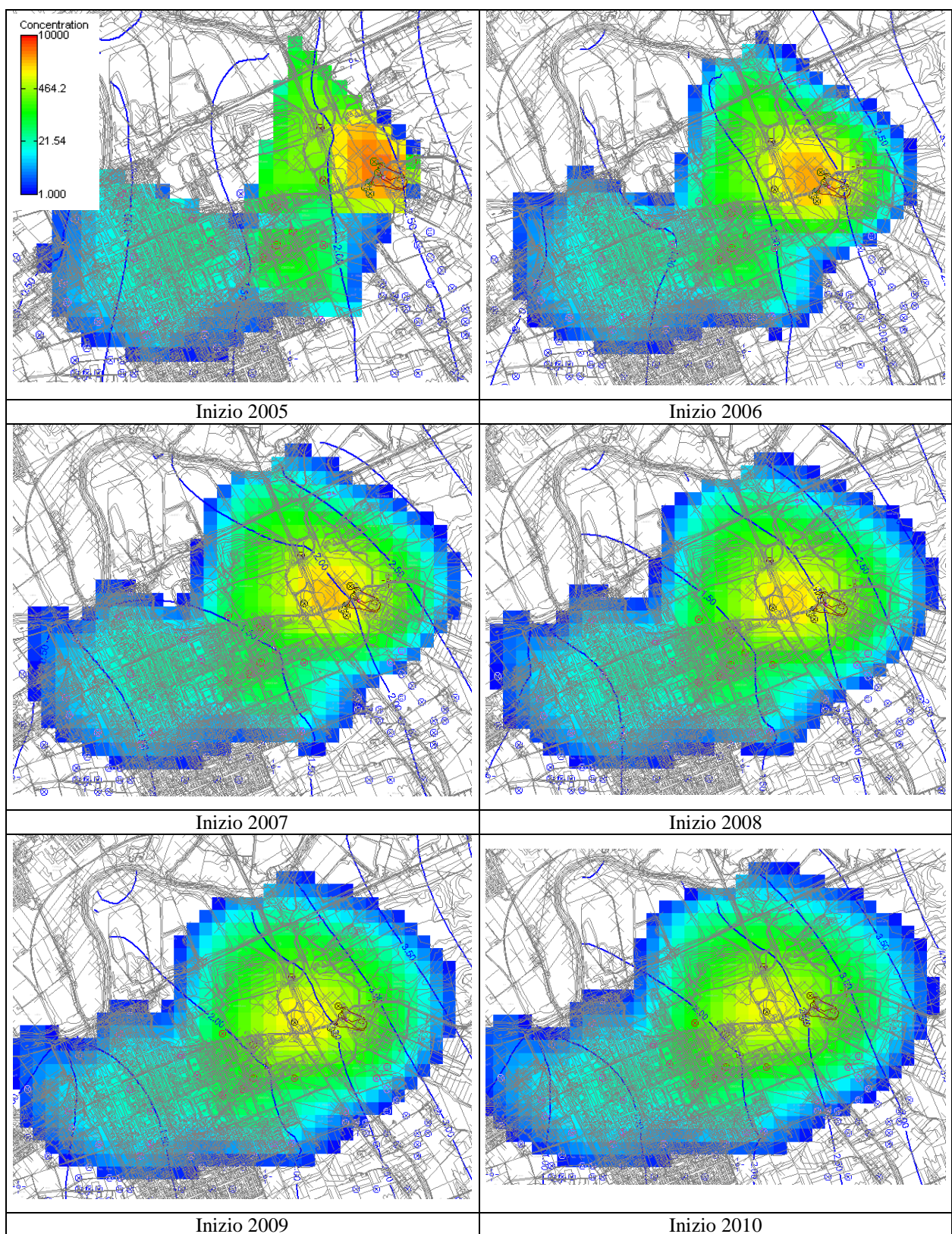


Fig. 64 Evoluzione della rete di flusso e delle concentrazioni

3.2 Modello trasporto anno idrologico 2012-2013

Per la simulazione dell'anno idrologico appena trascorso è stato implementato il modello in Rev3 di tipo monostrato. Le concentrazioni di partenza sono quelle del terzo trimestre estivo 2012 (Fig. 65).

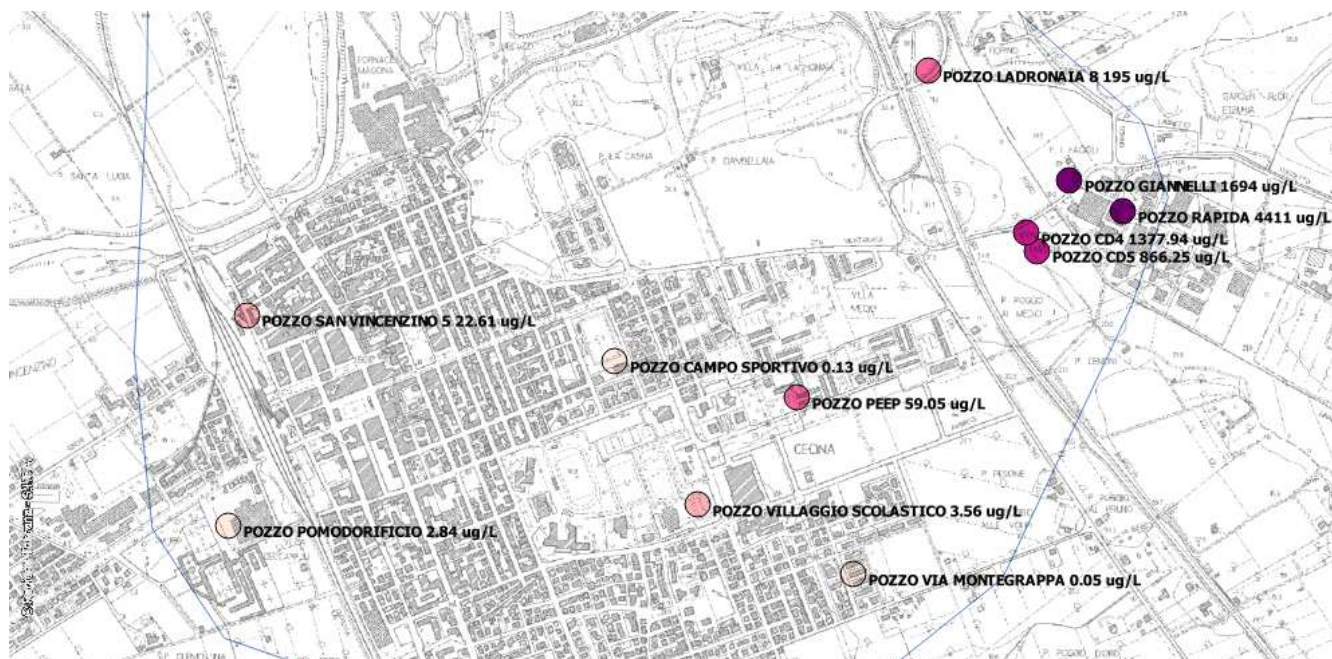


Fig. 65 – Concentrazioni di TCE+PCE nel terzo trimestre estivo 2012

L'andamento delle forzanti, piogge e portate del Cecina, caratterizzano un anno idrologico con ridotti afflussi primaverili (Fig. 66).

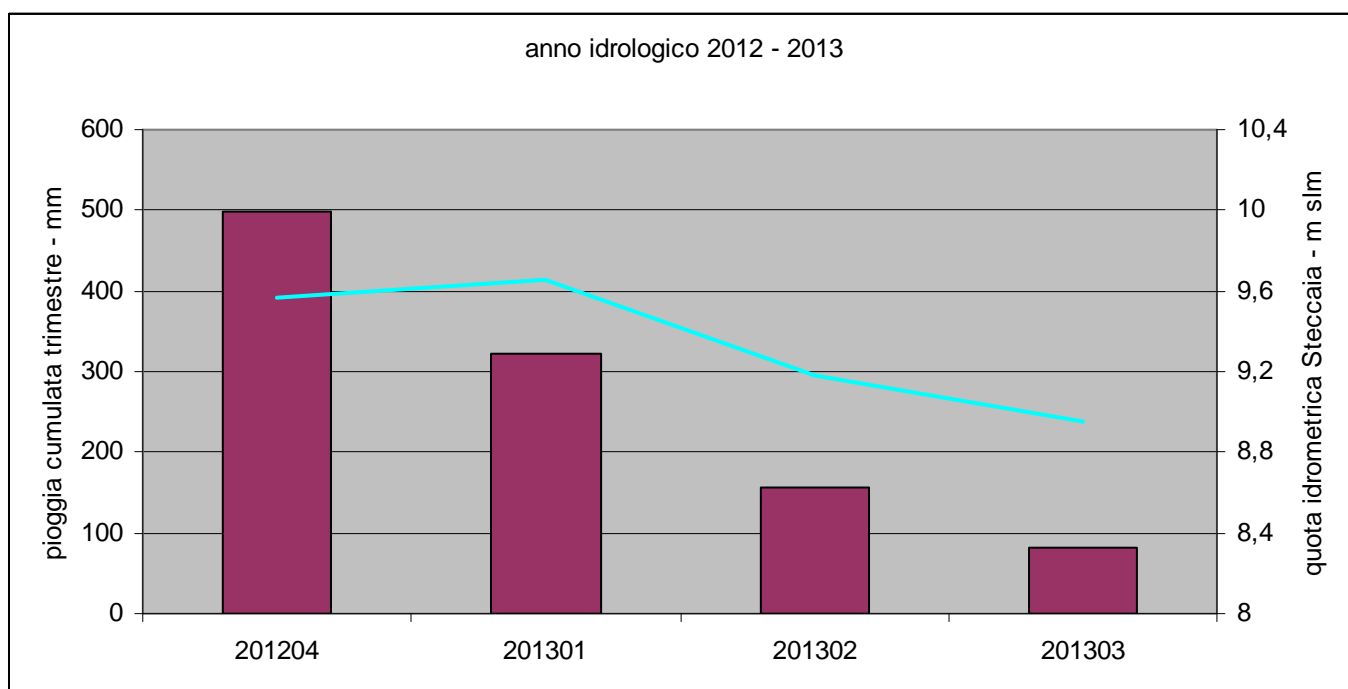


Fig. 66 – Andamento delle “forzanti” idrologiche nell’anno idrologico 2012-2013

I trend delle concentrazioni in TCE+PCE nei tre pozzi Ladronaia, PEEP e San Vincenzino appaiono simili tra loro (Fig. 67), i ridotti afflussi primaverili sembrano riflettersi anche qui in una brusca attenuazione delle concentrazioni, interpretabile, in ipotesi, con un arresto del flusso idrico e di trasporto dei contaminanti. Di conseguenza, potrebbero così estendersi le aree di richiamo dei pozzi verso zone non contaminate.

I risultati del modello in termini di concentrazioni (Fig. 68) sono in ogni modo difforni dai trend osservati pur rilevando alcune similarità e particolarità quali:

- il pozzo SAN VINCENZINO che nei dati osservati mostra la maggiore riduzione primaverile, denuncia nello stesso periodo i maggiori effetti di riduzione dei carichi idraulici e decremento delle concentrazioni;
- il pozzo LADRONAIA, ha un andamento delle concentrazioni che segna, anche qui in corrispondenza del trimestre primaverile, un possibile effetto di arresto del flusso idrico dominante; il maggiore richiamo del LADRONAIA nelle condizioni di relativa magra già notato in precedenza potrebbe essere il responsabile dell’incremento nel modello;



Fig. 67 – trend osservati nell'anno idrologico 2012/2013

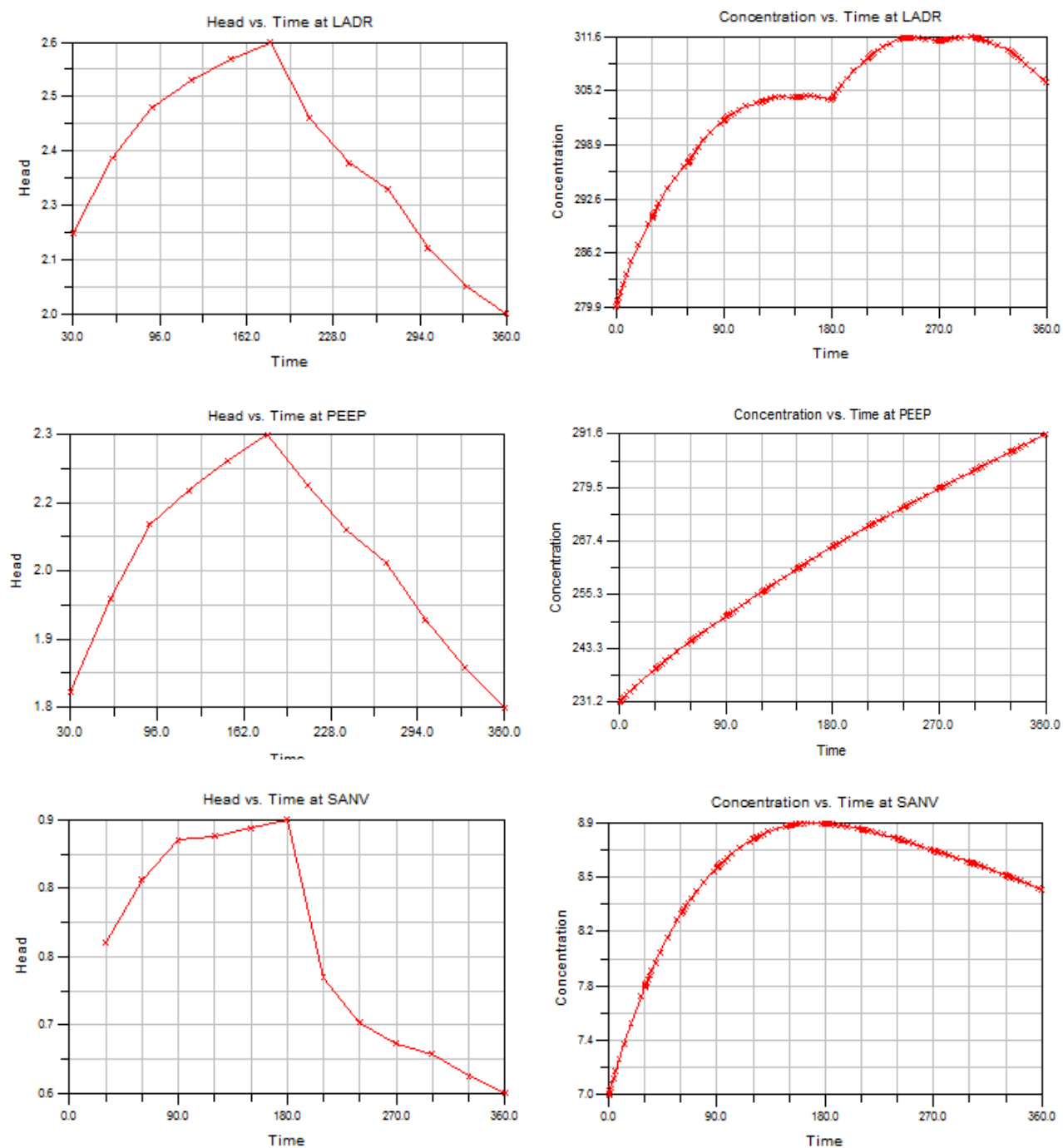


Fig. 68 – Idrogrammi e concentrazioni riprodotte dal modello nei pozzi LADRONAIA, PEEP e SAN VINCENZINO

3.3 Modello trasporto previsionale anno idrologico 2013-2014

Il modello di trasporto previsionale è stato implementato nella versione Rev3_4 dello scenario di mitigazione della MISE, adesso attiva (vv. paragrafo 4.6), con $CD1 \gg CD2 = CD3$. Le concentrazioni iniziali sono quelle del terzo trimestre 2013, mentre gli scenari previsionali sono riferiti ad anni idrologici tipo, come il 2008/2009, quale scenario di massima morbida, e il 2005/2006 di minima magra (Fig. 69).

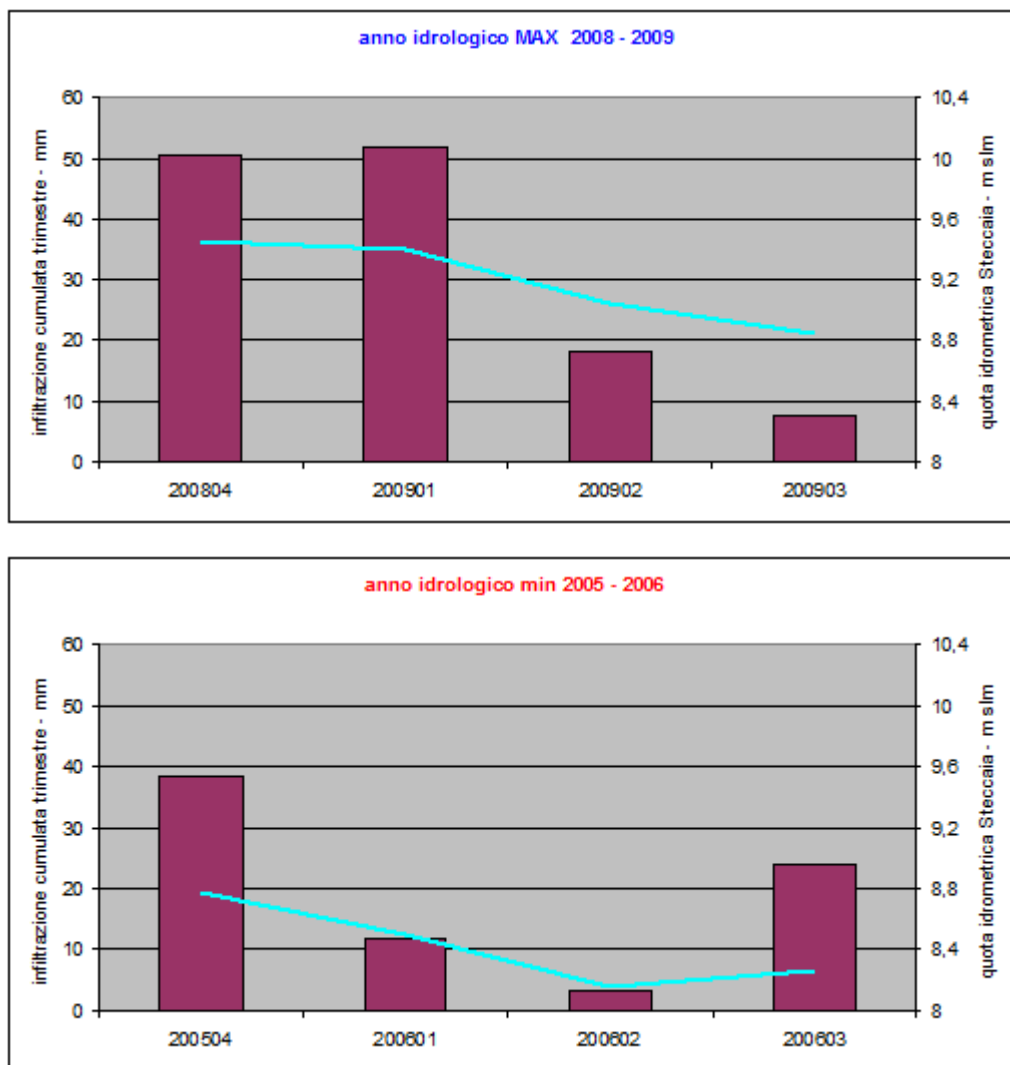


Fig 69 – andamenti forzanti idrologiche per gli anni tipo

L'anno idrologico di massima è caratterizzato da abbondanti precipitazioni nel periodo autunno invernale mentre in quello di minima, si nota un recupero finale delle precipitazioni estive.

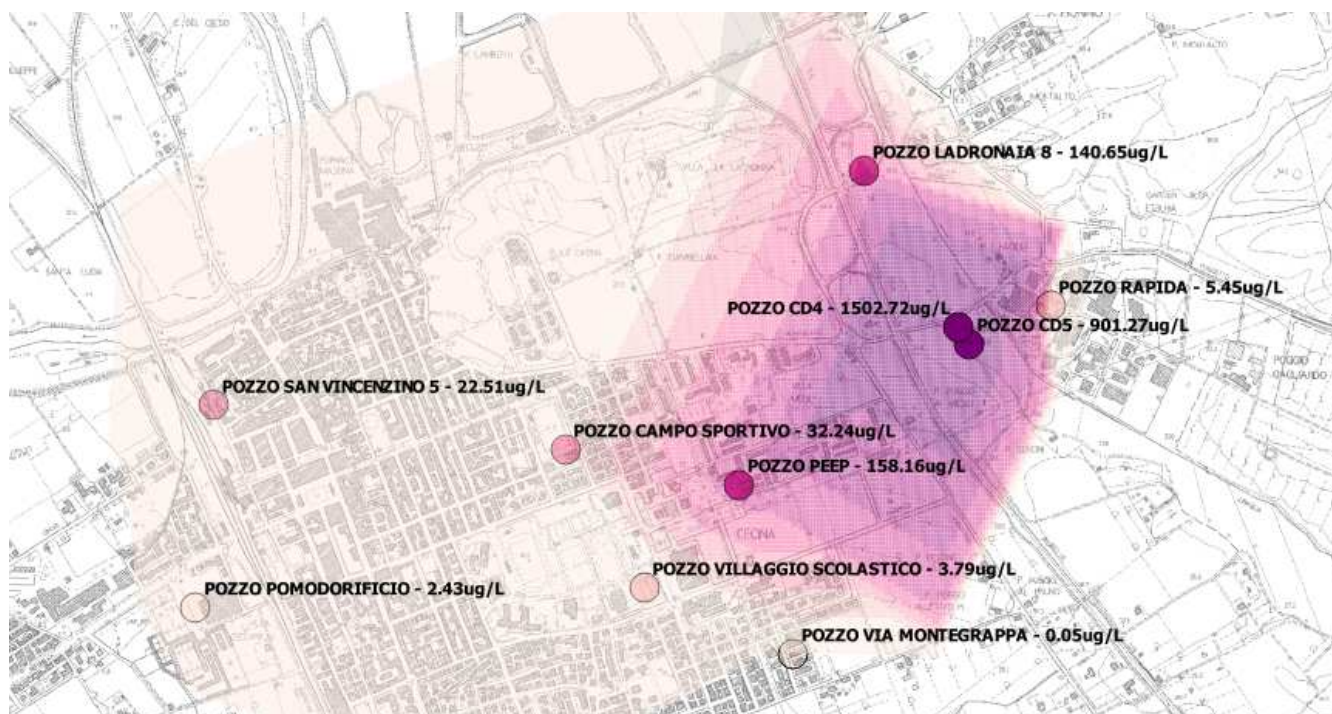


Fig. 70 – Concentrazioni di TCE+PCE nel terzo trimestre estivo 2013

Il pozzo RAPIDA, adesso ricondizionato e filtrante la sola seconda falda, ha significativamente ridotto le concentrazioni di organoalogenati. Le direzioni di propagazione della contaminazione sono ancora dall'area sorgente verso SW e il pozzo PEEP, e da qui verso ENE e i pozzi CAMPO SPORTIVO e in ultimo SAN VINCENZINO (Fig. 70).

Nelle figure seguenti 71, 72 e 73 sono riportati gli esiti delle due simulazioni previsionali, di minima e di massima.

Nel confronto delle due mappe dove sono riportate linee piezometriche, vettori di velocità e concentrazioni in scala di colori, si apprezzano soprattutto le differenti condizioni di carico idraulico e direzioni di flusso. Una maggiore ampiezza del nucleo del pennacchio è osservata nelle vicinanze dell'area sorgente.

Il confronto dei diagrammi di concentrazione conferma un maggiore incremento nello scenario di massima del trasporto di contaminati verso il pozzo PEEP, nella direzione del flusso principale e prossimo all'area sorgente. Per il più distante SAN VINCENZINO le concentrazioni hanno variazioni minori con tendenza alla diminuzione.

Un caratteristico incremento nella direzione laterale al flusso, verso il pozzo LADRONAIA, è osservato nello scenario di minima.

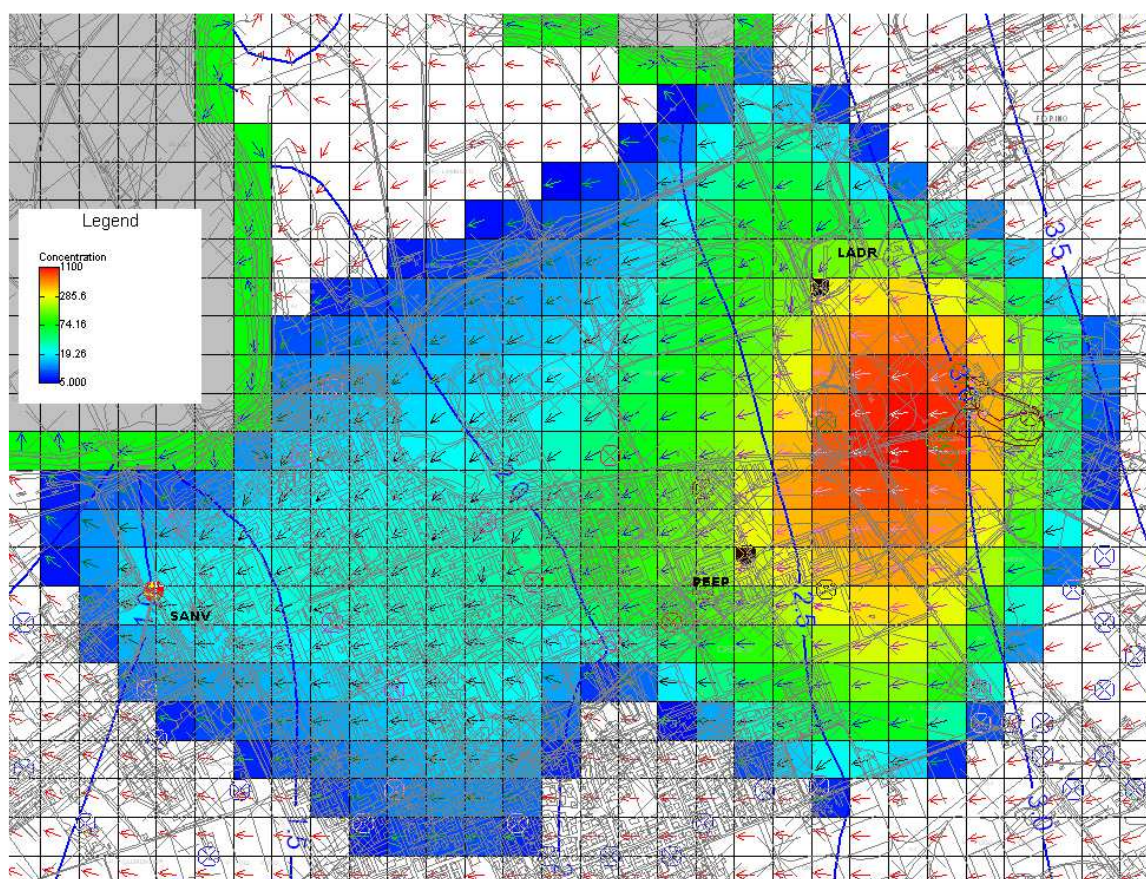


Fig.71 – Piezometria e isocone al 31/03/2014 nella previsione di max (2008/2009)

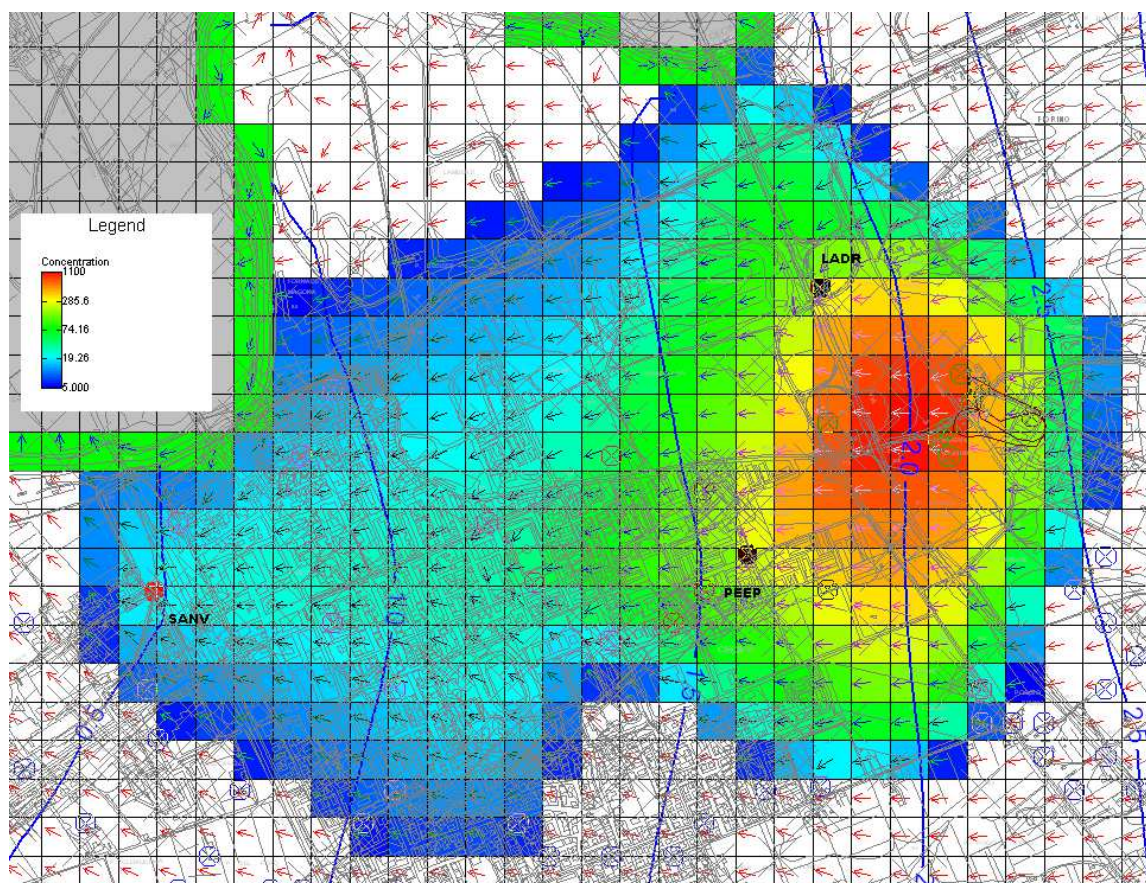


Fig. 72 – Piezometria e isocone al 31/03/2014 nella previsione di min (2005/2006)

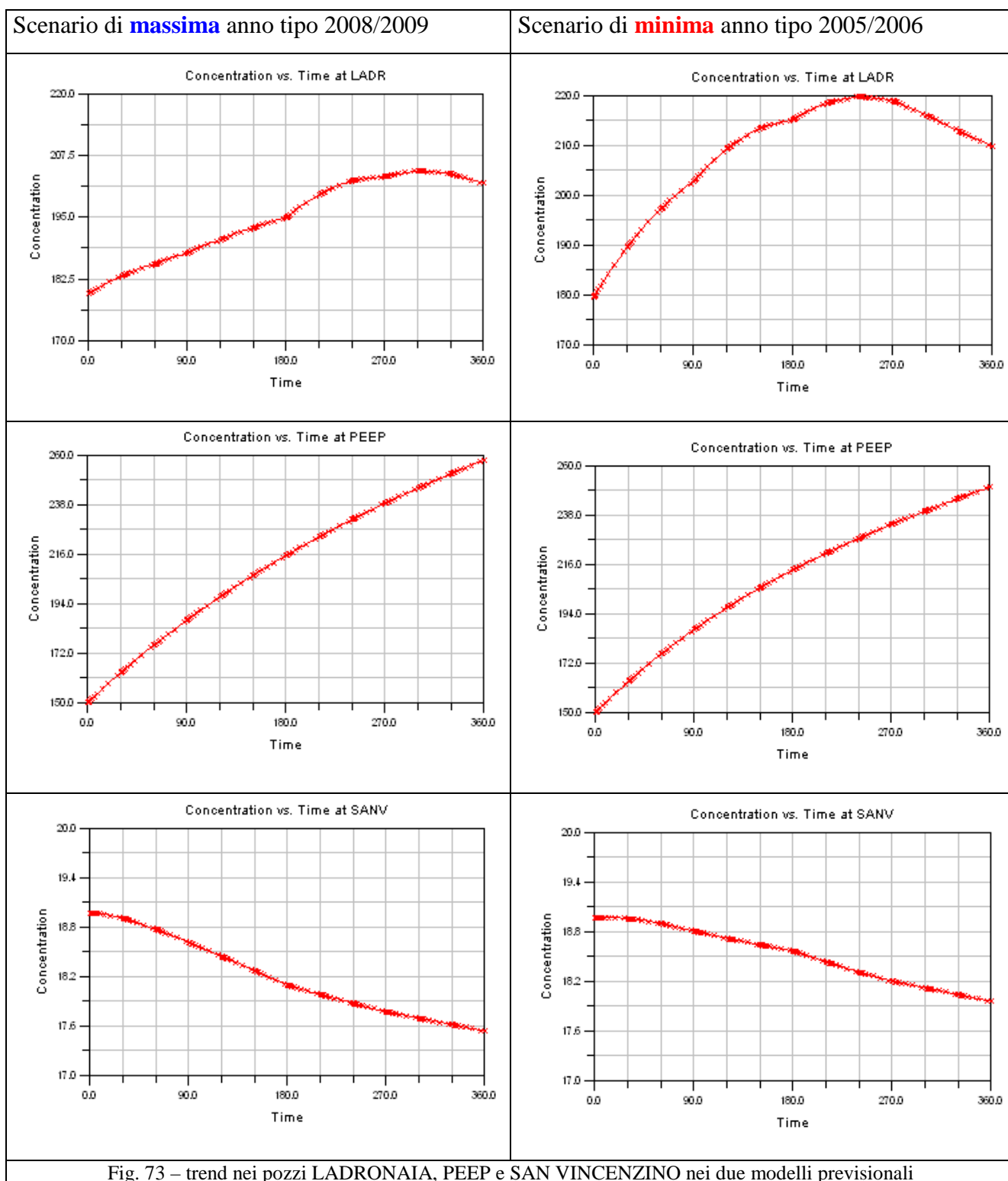


Fig. 73 – trend nei pozzi LADRONAIA, PEEP e SAN VINCENZINO nei due modelli previsionali

4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro, svolto nell'ambito di un accordo di programma con la Regione, ha costituito un approfondimento delle conoscenze idrogeologiche del sistema acquifero costiero del Cecina, con lo scopo principale di calibrare gli emungimenti dai pozzi della MISE, presenti nell'area contaminata da organoalogenati di Poggio Gagliardo, e secondario di supportare il monitoraggio del copro idrico impattato.

È stato deciso di adottare una metodologia di studio articolata in due fasi principali.

La prima fase è stata finalizzata alla definizione del modello concettuale del sistema acquifero, cioè alla realizzazione dello schema idrogeologico - idrodinamico, con particolare attenzione ai meccanismi di ricarica - discarica delle falde e all'individuazione di eventuali rapporti fiume – falda, cui è seguita l'implementazione di un primo modello numerico di flusso stazionario utilizzando il codice di calcolo MODFLOW con interfaccia grafica ESI - GroundwaterVistas.

La seconda fase ha riguardato invece lo sviluppo del modello di flusso transitorio e di trasporto mediante gli stessi software di modellistica e la simulazione di vari scenari per la taratura degli emungimenti dai pozzi (preesistenti e/o nuovi) della rete di bonifica.

I risultati più indicativi ottenuti nella fase di definizione del modello concettuale, sono i seguenti:

- ricostruzione delle caratteristiche geometriche del sistema acquifero attraverso sezioni idrostratigrafiche e carte strutturali delle superfici limite dei vari elementi dell'acquifero multistrato. L'elaborazione è stata supportata da un archivio informatico di dati stratigrafici (DBGEO);
- definizione dei parametri idrodinamici (T, K, S) sulla base degli spessori acquiferi ricavati dall'archivio DBGEO e dei dati forniti da ASA Livorno e relativi ad alcune prove di pompaggio, effettuate dalla Provincia di Pisa, nella zona di interesse;
- analisi delle condizioni piezometriche e della distribuzione degli organoalogenati in falda;
- raffronto tra le stime di bilancio idrico utilizzando il metodo Kennessy e i dati derivati da un modello matematico di deflusso superficiale denominato MOBIDIC;
- valutazione dei rapporti Fiume Cecina – Falda, con l'identificazione dei tratti idraulicamente connessi.

La successiva fase di realizzazione del modello matematico di flusso e di trasporto per la simulazione del comportamento del sistema acquifero in condizioni di regime permanente e transitorio, ha consentito di mettere a punto uno strumento versatile per il controllo e la gestione delle risorse idriche sotterranee. In particolare sono stati conseguiti i seguenti principali risultati di rilevante importanza applicativa:

- implementazione della geometria multistrato del sistema acquifero e simulazione della condizione multifalda locali;
- riproduzione di bilanci idrici con quantificazione delle uscite/entrate dai limiti dell'area modellizzata, acquisendo nuove informazioni in particolare sul Fiume Cecina e sull'area collinare dove affiorano le "Sabbie ed Argille ad Arctica";
- ricostruzione dell'evoluzione temporale della piezometria e del trasporto in regime transitorio stagionale e transitorio nel periodo 2005-2010, con ottimo accordo tra dati misurati e simulati nei target prescelti;
- riproduzione di tre scenari finalizzati alla ottimizzazione della MISE per confinare il pennacchio inquinato.

Il modello realizzato ha mostrato un buon grado di affidabilità in termini di capacità di riproduzione delle condizioni reali, tuttavia, un suo miglioramento delle capacità di simulazione potrà ottenersi con l'approfondimento nell'immediato futuro di alcuni temi di studio, quali:

- completo interfacciamento con il modello idrologico idraulico MOBIDIC del SIR, prevedendo, possibilmente, una estensione areale del modello ed un incremento del dettaglio passando dalle attuali celle di 400 m a celle di 100 m;
- aggiornamento del quadro conoscitivo sulle differenze, in termini di carichi idraulici e concentrazioni di contaminante, tra le due falde e conseguente sviluppo e ulteriore calibrazione del modello multistrato (Rev4);
- prosecuzione delle attività validate e previsionali del modello, come avviate negli ultimi paragrafi del presente documento.

BIBLIOGRAFIA

ARPAT (2008) : *Monitoraggio 2002 – 2006 Corpi Idrici Sotterranei della Toscana.*

<http://www.arp.at.toscana.it/documentazione/catalogo-pubblicazioni-arp.at/monitoraggio-acque-superficiali-sotterranee-marine-fino-al-2006>

Barazzuoli Piero et alii. (1987) : *Studi geologico-applicativi finalizzati alla gestione del territorio del comune di Buonconvento.* Università degli Studi di Siena e Comune di Buonconvento, Buonconvento, pp 28-32;

Benvenuti M., Bonini M., Moratti G., Ricci M., Tanini C. (2008) : *Tectonic and climatic controls on historical landscape modifications.: The avulsion of the lower Cecina River (Tuscany, central Italy).* Geomorphology 100 (2008) 269–284.

Brugioni M. et al. (2008) - *Determinazione dell'infiltrazione efficace alla scala di bacino finalizzata alla individuazione delle aree a diversa disponibilità di risorse idriche sotterranee.* Autorità di bacino del fiume Arno, Firenze.

Dominici S., Bartalini M., Benvenuti M., Balestra B.(2011) : *Large kings with small crowns: a Mediterranean Pleistocene whale barnacle.* Bollettino della Società Paleontologica Italiana, 50 (2), 2011, 95-101.

EPA (1990) : *Subsurface Contamination Reference Guide.* United States Office of Emergency and EPA/540/2-90/011- October 1990

Gelhar L., Welty C. & Rehfeldt K.R. (1992) : *A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers.* Water Resources Research vo. 28 no. 7 pages 1955-1974.

Harbaugh, A. W., and McDonald, M. D. (1996). “User’s documents for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water Flow model,” U.S Geological Survey Open File Report 96-485.

Newell C.J., Rifai H.S., Wilson J.T., Connor J.A., Aziz J.A., Suarez M.P. (2002) : *Calculation and Use of First-Order Rate Constants for Monitored Natural Attenuation Studies.* EPA EPA/540/S-02/500. November 2002

Provincia di Pisa (2011) : *Richiesta di concessione di derivazione acque pubbliche sotterranee ad uso idropotabile dai pozzi denominati Steccaia 1 e Steccia 2 in Comune di Montescudaio – Esecuzione prove di pompaggio sull'area (settembre ottobre 2011) valutazione dei risultati.*
Provincia di Pisa Servizio Difesa del Suolo U.O. Georisorse

Zheng (1990) : *MT3D, A modular three-dimensional transport model fo simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems.* Report to The U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada OK.