



Partner del Progetto:



Gestione sostenibile delle acque nella bassa Val di Cornia attraverso la riduzione della domanda idrica, la ricarica della falda e la riqualificazione fluviale

(LIFE14 ENV/IT/001290)



Revisione e aggiornamento del modello numerico per la gestione della risorsa idrica in Val di Cornia

Azione	A2
Versione	4.0
Data	31/12/2021
Autori	Rudy Rossetto(SSSA), Sara Veroli (SSSA), Giovanna De Filippis (SSSA), Laura Ercoli (SSSA), Calogero Ravenna(ASA)
Stato	Versione definitiva

Cofinanziatori del Progetto:



Indice

Riassunto	5
Abstract	7
1. Introduzione	9
1.1 Documentazione utilizzata	10
2. Caratterizzazione della Val di Cornia	11
2.1 Inquadramento geografico	11
2.2 Inquadramento morfologico e geologico	11
2.3 Inquadramento idrologico ed idrogeologico	13
2.4 Bilancio idrogeologico della piana del Cornia.....	18
2.5 Sintesi sulle precedenti attività di modellistica	20
3. Modello concettuale idrogeologico	22
3.1 Definizione dell'area di studio	22
3.2 Condizioni idrologiche	22
4. Implementazione del modello numerico di flusso	27
4.1 Dominio attivo e discretizzazione spaziale	28
4.1.1 Definizione della griglia di calcolo	28
4.1.2 Discretizzazione verticale	29
4.2 Discretizzazione temporale	35
4.3 Parametri idrodinamici	35
4.4 Condizioni al contorno.....	38
4.4.1 Infiltrazione dai rilievi montuosi e collinari e contributo idrotermale	38
4.4.2 Termini di scambio attraverso le linee di costa	39
4.4.3 Fiume Cornia.....	39
4.5 Termini di ricarica ed estrazione	40
4.5.1 Infiltrazione efficace	40
4.6.2 Prelievi	43
4.6 Condizioni iniziali	44
4.7 Solutore numerico	44
4.8 Simulazione dell'intrusione salina	47
5. Calibrazione del modello	48
6. Presentazione e discussione dei risultati	50
6.1 Carico idraulico simulato	50
6.2 Analisi del bilancio idrico	50
7. CONCLUSIONI	53
BIBLIOGRAFIA	54

Riassunto

Il presente report illustra le varie fasi di implementazione del modello numerico del flusso del sistema idrogeologico della pianura del Fiume Cornia per mezzo del codice MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) e dell'interfaccia FREEWAT (Rossetto et al., 2015), e della simulazione dell'intrusione salina (con codice SEAWAT; Langevin et al., 2007) con l'obiettivo di ottenere uno strumento per supportare la pianificazione e gestione della risorsa idrica.

Il modello implementato è costituito da due strati eterogenei e con spessore variabile, a rappresentare i sedimenti limosi superficiali e l'acquifero in sabbie e ghiaie. Il campo di moto è stato simulato in condizioni transitorie dal 1 Aprile 2016 al 15 Dicembre 2021. Per l'implementazione delle proprietà idrodinamiche dei due strati e delle condizioni al contorno e dei termini di ricarica ed estrazione si è fatto riferimento a quanto riportato in Regione Toscana (2003). I parametri risultati maggiormente sensibili sono poi stati calibrati mediante un approccio *trial-and-error* utilizzando le osservazioni sul carico idraulico dell'acquifero e quelle sul deflusso del Fiume Cornia, acquisite nel corso di campagne di monitoraggio.

Il principale termine di ricarica dell'acquifero è rappresentato dagli afflussi dai rilievi montuosi e collinari e dalla risalita di acque termali dalla falda profonda, mentre la ricarica complessiva dal Fiume Cornia risulta ridimensionata rispetto a quanto presentato in precedenti lavori (si veda ad es. Regione Toscana, 2003). Per quanto riguarda invece i prelievi per scopi irrigui, idropotabili ed industriali, questi variano in dipendenza delle condizioni meteo-climatiche tra 22 e 31 Mm³.

Infine, il modello simula un ingresso fino a circa 5 Mm³/anno di acqua marina attraverso le coste, valore ben al di sopra di quanto stimato in Regione Toscana (2003). Ciò è imputabile al fatto che i prelievi in atto per scopi irrigui ed idropotabili inducono ampi coni di depressione su gran parte dell'area di studio, ben sotto lo zero del livello del medio mare. Dalle simulazioni effettuate si deduce che per il completo riequilibrio dell'acquifero della Val di Cornia, nella presente condizione, è necessario ridurre i prelievi, o ricercare nuove fonti (o una soluzione comprensiva delle due opzioni) per un volume variabile tra circa 2,5 e 9 Mm³/anno in dipendenza delle diverse condizioni meteo-climatiche.

Il modello implementato in questo studio costituisce un importante ed innovativo strumento per la gestione della risorsa idrica nella Val di Cornia. Applicazioni pratiche possono riguardare, ad esempio, la simulazione della disponibilità della risorsa in base all'andamento atteso delle precipitazioni oppure all'effetto di un incremento dei prelievi. Il modello presentato è inoltre utilizzabile per la simulazione del fenomeno dell'intrusione salina.

Abstract

This report presents the various steps of the implementation of the numerical model of the flow of the hydrogeological system of the Cornia River plain by means of the MODFLOW-2005 code (Harbaugh, 2005) and the FREEWAT interface (Rossetto et al., 2015), and of the saline intrusion simulation (with SEAWAT code; Langevin et al., 2007) with the aim of obtaining a tool to support water resource planning and management.

The implemented model consists of two heterogeneous layers with variable thickness, representing the superficial silty sediments and the aquifer in sands and gravels. The flow field was simulated under transient conditions from 1 April 2016 to 15 December 2021. For the implementation of the hydrodynamic properties of the two layers and of the boundary conditions, reference was made to Regione Toscana (2003). The most sensitive parameters were then calibrated using a trial-and-error approach using hydraulic head observations and those on the exchanges between the Cornia River and the aquifer, gathered during LIFE REWAT monitoring campaigns.

The main term of recharge of the aquifer is represented by the inflows from the mountainous and hilly reliefs and the thermal waters from the deep aquifer, while the simulated overall recharge from the Cornia River is reduced compared to what was presented in previous works (see for example Regione Toscana, 2003). On the other hand, as regards withdrawals for irrigation, drinking water and industrial purposes, these vary depending on the weather-climatic conditions between 22 and 31 Mm³.

Finally, the model simulates an inflow of up to about 5 Mm³ / year of seawater, a value well above that estimated in Regione Toscana (2003). From the simulations carried out it can be inferred that for the complete rebalancing of the Val di Cornia aquifer, in the present condition, it is necessary to reduce the withdrawals, or to search for new sources (or a solution including the two options) for a volume between about 2.5 and 9 Mm³ / year depending on the different weather-climatic conditions.

The model implemented in this study constitutes an important and innovative tool for the management of water resources in the Val di Cornia. Practical applications may concern, for example, the simulation of the availability of the resource based on the expected rainfall trend or the effect of an increase in withdrawals. The model presented can also be used for the simulation of the saline intrusion phenomenon.

1. Introduzione

Il presente report documenta le attività svolte per l'azione A2 "Revisione e aggiornamento del modello numerico per la gestione della risorsa idrica in Val di Cornia".

Sebbene negli anni '90 siano stati prodotti modelli per la gestione della risorsa idrica sotterranea da diversi enti, questi modelli presentano le seguenti criticità:

- non sono mai stati condivisi;
- sono stati implementati con codici e software che datano agli anni '90/inizio 2000 per cui presentano anche arretratezza nella formulazione dei processi investigati e quindi nelle capacità di produrre risultati;
- non sono mai stati aggiornati, perdendo così di fatto la loro potenziale funzione previsionale.

Obiettivo di questa azione è quindi quello di:

- 1) revisionare i precedenti modelli prendendo da essi quanto di tecnicamente valido;
- 2) implementare un modello numerico per la gestione della risorsa idrica in Val di Cornia con lo stato dell'arte delle applicazioni disponibili;
- 3) rendere questa applicazione condivisa tra i vari partner del progetto ed i vari attori coinvolti nella gestione della risorsa.

Per l'implementazione di questo modello, nella presente Azione, è utilizzata la piattaforma FREEWAT (Rossetto et al., 2018), sviluppata nell'ambito del programma HORIZON 2020 dall'omonimo progetto (www.freewat.eu). Tale piattaforma, che integra i codici di simulazione della famiglia MODFLOW (sviluppati dalla USGS) è open source e di pubblico dominio, andando così ad eliminare la necessità di costose licenze software e favorendone la diffusione nei settori tecnici dei vari enti.

Il modello implementato ha l'obiettivo di rispondere alla domanda di simulare la disponibilità di acqua sul territorio e nel tempo, andando inoltre ad affrontare temi quali, ad esempio, l'intrusione salina e la qualità delle acque. L'implementazione del modello è svolta durante il primo anno di progetto, rivista e continuamente condotta da SSSA. Un accordo dedicato definirà quale dei partner territoriali sarà, alla fine del progetto, il responsabile del mantenimento dello strumento implementato.

L'Azione si rende necessaria per garantire uno strumento, che unitamente al Sistema Informativo Territoriale, permetta l'analisi delle varie componenti che interessano il ciclo delle acque (inteso nella sua accezione naturale) e le pressioni antropiche sul ciclo stesso. A titolo di esempio, il modello implementato è qui utilizzato per valutare l'efficacia degli interventi di riqualificazione fluviale e di ricarica della falde.

L'efficacia del modello implementato è essenzialmente funzione della disponibilità e qualità dei dati (idrologici, sui consumi irrigui e idropotabili, idrogeologici, etc.). Per risolvere questa potenziale problematica, i partner ASA e RT hanno garantito la massima disponibilità nel mettere a disposizione di SSSA i dati a loro disposizione e a favorire la ricerca di ulteriori dati tra gli attori locali.

Gli obiettivi specifici del presente studio sono i seguenti:

- delineare lo stato dell'arte delle conoscenze relative all'idrogeologia ed idrologia del bacino del Fiume Cornia;
- costruire e validare un modello numerico che permetta di ottenere una descrizione quantitativa del deflusso della falda basata sull'utilizzo dei dati acquisiti ed in via di acquisizione;
- individuare i principali limiti riscontrati nella fase di costruzione del modello in termini di carenza di dati e informazioni necessari per affinare l'affidabilità dei risultati ottenuti e quindi proporre ulteriori

ricerche da svolgere per l'eventuale approfondimento delle conoscenze sullo stato quali-quantitativo della risorsa;

- utilizzare lo strumento implementato per la simulazione degli effetti degli interventi oggetto delle Azioni B di progetto.

1.1 Documentazione utilizzata

Per l'implementazione del presente studio sono state utilizzate informazioni provenienti da banche dati e report tecnici. Si riportano di seguito le fonti a cui si è fatto riferimento:

- la Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995) è stata utilizzata per estrarre informazioni relative alla geologia dell'area, all'andamento delle isopieze e delle linee di flusso, e alla localizzazione dell'asse di drenaggio;
- la relazione di Regione Toscana (2003), prodotta in seguito ad uno studio di caratterizzazione idrogeologica della Val di Cornia eseguito da Getas – Petrogeo S.r.l., è stata consultata per comprendere il funzionamento del sistema idrogeologico in termini di bilancio idrico e la distribuzione di conducibilità idraulica dell'acquifero;
- si è fatto riferimento ai report tecnici di CNR – IGG e Consorzio LaMMA (2009a, 2009b) per la caratterizzazione geologica sulla base del continuum geologico regionale e per la definizione del dominio attivo del modello, in base all'estensione dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi (CISS) 32CT020 (Corpo Idrico della Pianura del Fiume Cornia) e 32CT021 (Corpo Idrico del Terrazzo di San Vincenzo);
- la geometria del sistema acquifero in esame è stata definita elaborando i seguenti livelli informativi:
 - i raster del lidar e del DTM (Digital Terrain Model) reperiti dal portale GEOscopio di Regione Toscana per la quota del piano campagna;
 - lo spessore dei terreni vegetali e di riporto che costituiscono la copertura superficiale del sistema acquifero è stato derivato dalle elaborazioni effettuate da Regione Toscana, CNR - IGG e Consorzio LaMMA (2008);
 - la quota del letto del modello è stata elaborata dal Centro di GeoTecnologie (CGT) dell'Università degli Studi di Siena, sulla base di informazioni reperite dalla banca dati INCAS.tro della provincia di Livorno e dalla Banca Dati Indagini Geotematiche del Consorzio Lamma;
- la rete di monitoraggio in continuo del Servizio Idrologico Regionale (SIR) di Regione Toscana è stata consultata in merito ai dati meteo-climatici e freaticometrici;
- le informazioni ricavate dalla rete SIR relative al livello di falda sono state integrate con i dati derivanti dalle campagne di monitoraggio eseguite nell'ambito del progetto LIFE REWAT, durante le quali è stato anche monitorato il livello del fiume Cornia;
- il reticolo idrografico, aggiornato con DCRT n.9/2015 di Regione Toscana;
- la stima delle portate irrigue si basa sulla distribuzione di uso del suolo, elaborato per l'anno 2017 e reperito dalla banca dati ARTEA di Regione Toscana, e sulla localizzazione dei pozzi censiti per scopi irrigui e riportati nella banca dati INCAS.tro della Provincia di Livorno;
- le informazioni relative all'ubicazione dei pozzi e alla stima delle portate per scopi idropotabili sono state invece fornite da ASA S.p.A. o reperite dalla Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI; Regione Toscana e Consorzio LaMMA, 2012).

I dati sopra elencati sono stati processati in ambiente GIS per l'implementazione nel modello numerico.

2. Caratterizzazione della Val di Cornia

Il presente Capitolo è dedicato all'inquadramento geografico e alla caratterizzazione territoriale, morfologica, geologica, idrologica ed idrogeologica della Val di Cornia. L'obiettivo è quello di fornire un quadro d'insieme utile alla comprensione del modello concettuale idrologico/idrogeologico, a sua volta utilizzato per la costruzione del modello numerico del flusso delle acque sotterranee.

2.1 Inquadramento geografico

Dal punto di vista geografico, la piana del Cornia coincide in buona parte con la Pianura di Piombino (Fig. 2.1) e costituisce un serbatoio naturale di acqua dolce, localizzato nei Corpi Idrici Sotterranei Significativi (CISS) 32CT020 - "Corpo Idrico della Pianura del Fiume Cornia" e 32CT021 - "Corpo Idrico del Terrazzo di San Vincenzo" (CNR - IGG e Consorzio LaMMA, 2009b). Tale area si estende dal Terrazzo di San Vincenzo fino alla città di Follonica, ed è limitato ad occidente dai rilievi di Piombino e dal mare, mentre ad est confina con i rilievi compresi fra Campiglia Marittima, Suvereto e Riotorto (Fig. 2.1). Gli estremi orientali coincidono con le diramazioni dei bacini del Fiume Cornia e dei suoi affluenti.

Il sistema in analisi è da decenni caratterizzato da una condizione di forte disequilibrio quantitativo del bilancio idrogeologico, causato da un uso intensivo della risorsa idrica prevalentemente operato dai comparti industriale e civile fino all'inizio del secondo decennio di questo secolo, e successivamente dai settori irriguo ed idropotabile. Si tenga conto che una porzione consistente di risorsa viene convogliata all'Isola d'Elba – attraverso una condotta sottomarina - coprendo una percentuale considerevole del fabbisogno idrico dei comuni elbani (3.0-3.8 Mm³/anno su un totale di 6.0-6.7 Mm³/anno). Lo sfruttamento dell'acquifero ha indotto una serie di variazioni piezometriche, con un progressivo abbassamento della falda ed un conseguente arretramento dello zero idrometrico verso l'interno. L'abbassamento più consistente, nell'ordine di 12 m, si è avuto nell'area più interna della bassa Pianura del Cornia. Un calcolo volumetrico del deficit idrico totale accumulatosi nel trentennio dagli anni '70 al 2001 porta ad una stima di circa 8 Mm³/anno di cui gran parte, circa il 50%, si è accumulata negli anni 1990-2001 (Regione Toscana, 2003). Tale alterazione ha comportato importanti conseguenze per la tutela delle risorse idriche a causa dell'ingressione salina dai corpi idrici marino-costieri, con alterazione degli ecosistemi terrestri connessi (in particolare le aree umide retro-costiere, tra cui il SIC/ZPS IT5160010 "Padule Orti Bottagone" e l'area umida protetta "della Sterpaia"). Il fenomeno è proseguito negli anni '90, con la completa salinizzazione di interi comparti idrogeologici, ed attualmente è caratterizzato da una pericolosa tendenza di avanzamento delle curve di bassa salinità verso i campi pozzi idropotabili. Tale condizione presenta delle ulteriori esternalità negative che inaspriscono il problema, quali fenomeni di subsidenza con conseguenti danni registrati al patrimonio immobiliare ed infrastrutturale.

2.2 Inquadramento morfologico e geologico

La pianura costiera della Val di Cornia è delimitata a Nord dai monti di Campiglia Marittima, a Nord-Est dalle colline di Suvereto, ad Est dai rilievi di Riotorto e Vignale, mentre ad Ovest è delimitata dal promontorio di Piombino e a Sud dalla costa sabbiosa del Golfo di Follonica.

La piana è caratterizzata dalla presenza di Unità Neogeniche Toscane impostate su un sistema tettonico complesso, nelle vicinanze della regione boracifera di Larderello e delle Colline Metallifere. La configurazione originaria dell'edificio a falde è rappresentabile attraverso la sovrapposizione di più unità tettoniche tra le quali le Unità Liguri, Sub-liguri, Unità della Falda Toscana, Basamento Cristallino Toscano e basamento metamorfico. L'evoluzione sedimentaria neogenica-quadernaria è stata poi in gran parte condizionata dai movimenti verticali della crosta, indotti dalla tettonica distensiva post-collisionale, mentre mancano ricerche sugli effetti specifici della ciclicità eustatica, spesso mascherati da quelli indotti dall'attività tettonica.

Nel settore corrispondente alla Pianura del Cornia affiorano principalmente sedimenti alluvionali, palustri, lagunari e cordoni dunali riferibili all'Olocene (Fig. 2.2). I depositi pleistocenici sono rappresentati principalmente dalle Sabbie di Donoratico che affiorano lungo il margine meridionale dei rilievi di Riotorto. I termini stratigrafici più recenti del substrato dei depositi olocenico-pleistocenici, in assenza del Pliocene non segnalato in affioramento nell'area studiata, sono costituiti dalle formazioni mioceniche, affioranti nell'area a Nord del Fosso Riotorto. Il substrato pre-neogenico è costituito da termini appartenenti ad unità tettoniche coinvolte nelle fasi di strutturazione della catena appenninica dell'Oligocene Superiore. Nell'area oggetto di studio queste unità appartengono prevalentemente al Dominio Ligure lungo il margine orientale dell'acquifero, mentre lungo il limite nord-occidentale affiorano principalmente unità appartenenti al Dominio Toscano. Il substrato di pertinenza ligure sembra essere rappresentato fondamentalmente dalla formazione delle Argille a Palombini, costituita da argilliti con intercalati strati di calcilutiti silicee, e da termini appartenenti all'Unità Monte Morello, rappresentati prevalentemente da argilliti contenenti livelli di brecce e *debris flow* (Formazione di Sillano). Il substrato di pertinenza del Dominio Toscano è invece costituito in gran parte dalla formazione torbiditico-arenacea del Macigno, affiorante in corrispondenza del promontorio di Piombino, mentre verso Nord, nel settore di Campiglia Marittima, assume importanza la successione carbonatica mesozoica. Le strutture principali all'interno dell'area esaminata sono legate alla tettonica neogenica che origina un'alternanza di alti e bassi strutturali. In corrispondenza degli alti affiorano le unità del substrato pre-neogenico, deformate e metamorfosate dalle fasi collisionali, mentre nelle depressioni si depositano in discordanza i sedimenti neogenico-quadernari.

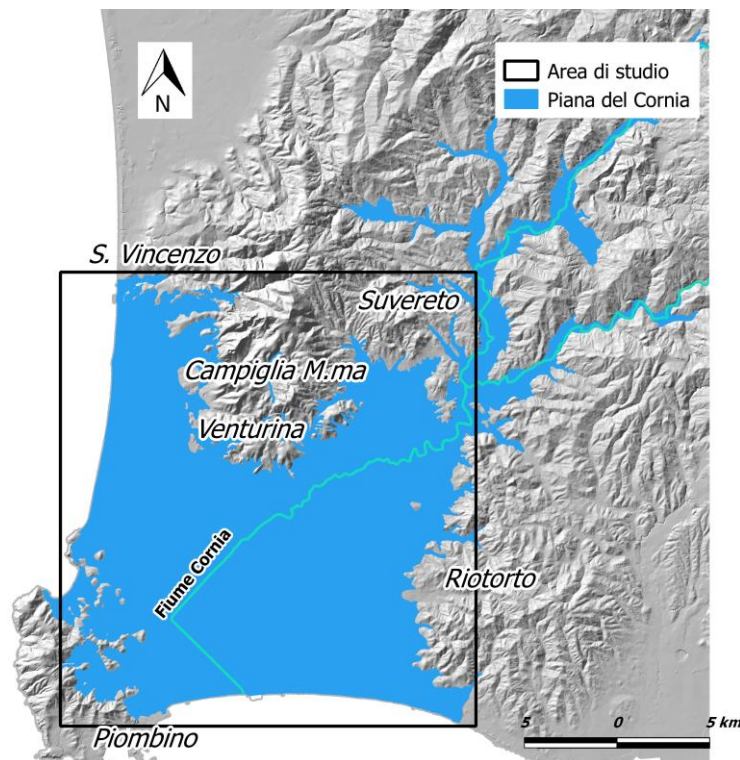


Figura 2.1. Inquadramento geografico della piana del Cornia e perimetrazione dell'area di studio.

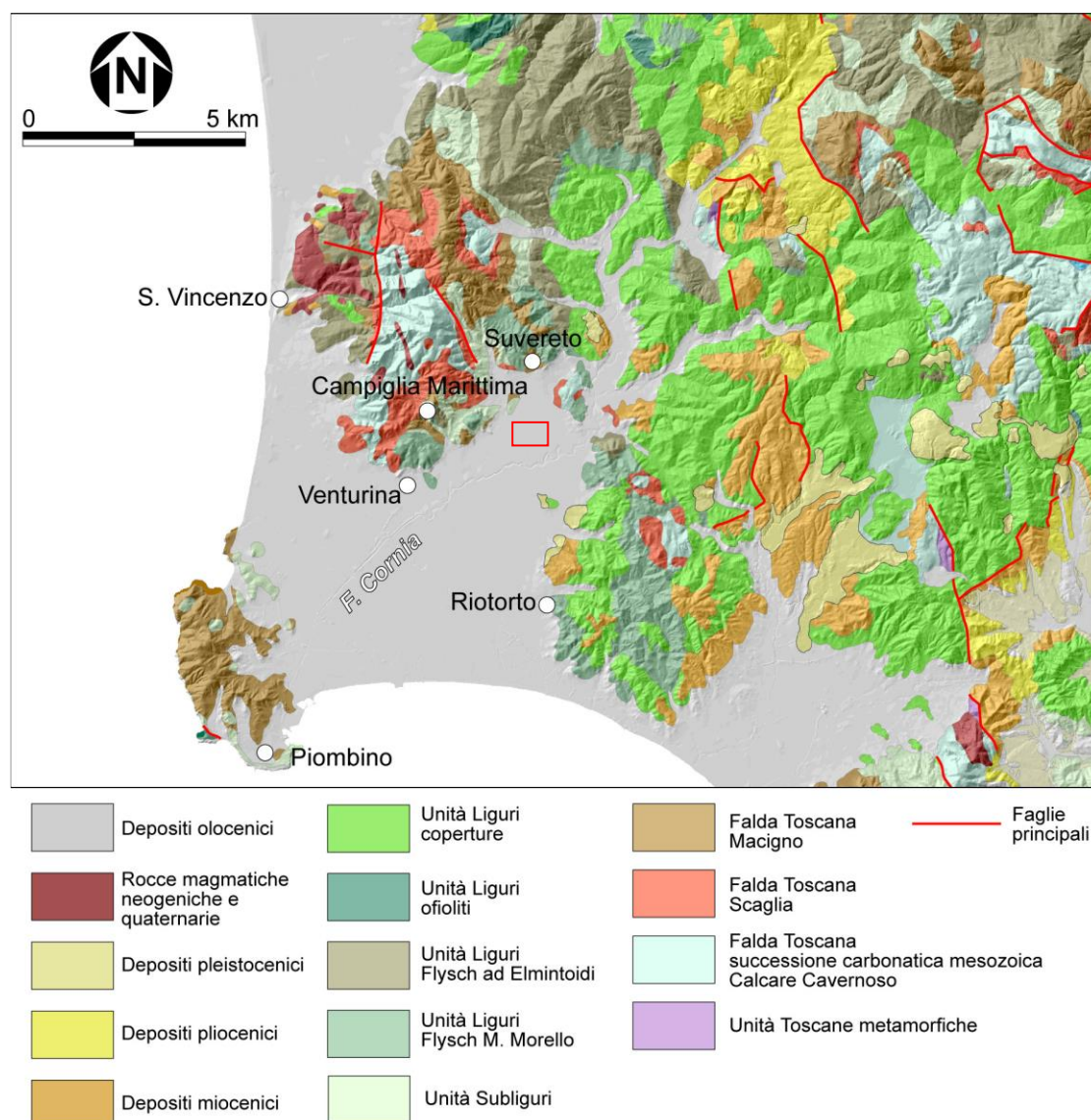


Figura 2.2. Schema geologico semplificato dell'area oggetto di studio (da CNR – IGG e Consorzio LAMMA, 2009a).

2.3 Inquadramento idrologico ed idrogeologico

Il Fiume Cornia costituisce l'elemento idrologico principale dell'area di studio. Il reticolo idrografico della zona presenta una distribuzione delle direzioni di deflusso omogenea nelle zone di Pianura e pressoché parallele al Fiume Cornia, con orientazione prevalente NE-SW. Il coefficiente di deflusso stimato per il Fiume Cornia è pari a 0.3 (con un valore di 800 mm/anno in entrata e 240 mm/anno in uscita). Il Fiume inoltre, con un volume medio di deflusso di circa 130 Mm³/anno, influenza in modo marcato i livelli di falda che presentano i minimi valori all'inizio del periodo autunnale.

Dal punto di vista meteo-climatico, la media delle precipitazioni annue varia tra 1000 mm/anno nelle aree collinari fino a 700 mm/anno lungo la fascia costiera. La media annuale delle temperature (basata sulle stazioni di Suvereto e Massa Marittima) è di 14.7 °C, con una variazione media di circa 17 °C tra gennaio e agosto (Bianchini et al., 2005). È stato infine calcolato un tasso di evapotraspirazione di circa 64% (Ghezzi et al., 1993).

Nel bacino del Fiume Cornia è possibile definire uno schema idrogeologico caratterizzato dalla presenza di due acquiferi di primario interesse (Bacino Toscana Costa, 2008; Fig. 2.3):

- l'acquifero delle formazioni carbonatico-evaporitiche mesozoiche, permeabile per fratturazione;
- l'acquifero multistrato delle formazioni quaternarie della piana, contenuto nei livelli permeabili delle sabbie pleistoceniche e delle alluvioni oloceniche, permeabili per porosità intergranulare.

Il primo di essi è costituito dalle formazioni carbonatiche mesozoiche e, alla base, dalle evaporiti triassiche. L'acquifero è limitato al letto da formazioni metamorfiche paleozoiche e al tetto può essere confinato dalle argilliti della Scaglia, dal Macigno, dalle Unità Liguri e Austroalpine, dalle argille neo-autoctone. Le zone di affioramento in corrispondenza di horst, rappresentano aree di assorbimento di acque meteoriche, e localmente, in prossimità di faglie dirette, punti di emergenza sorgiva spesso di acque termali. I principali affioramenti dell'acquifero carbonatico/evaporitico sono localizzati a Venturina – Campiglia – Sassetta. L'acquifero è sede di un'importante circolazione di fluidi termali che si manifestano sotto forma di sorgenti e che contribuiscono all'alimentazione dei sistemi acquiferi della piana.

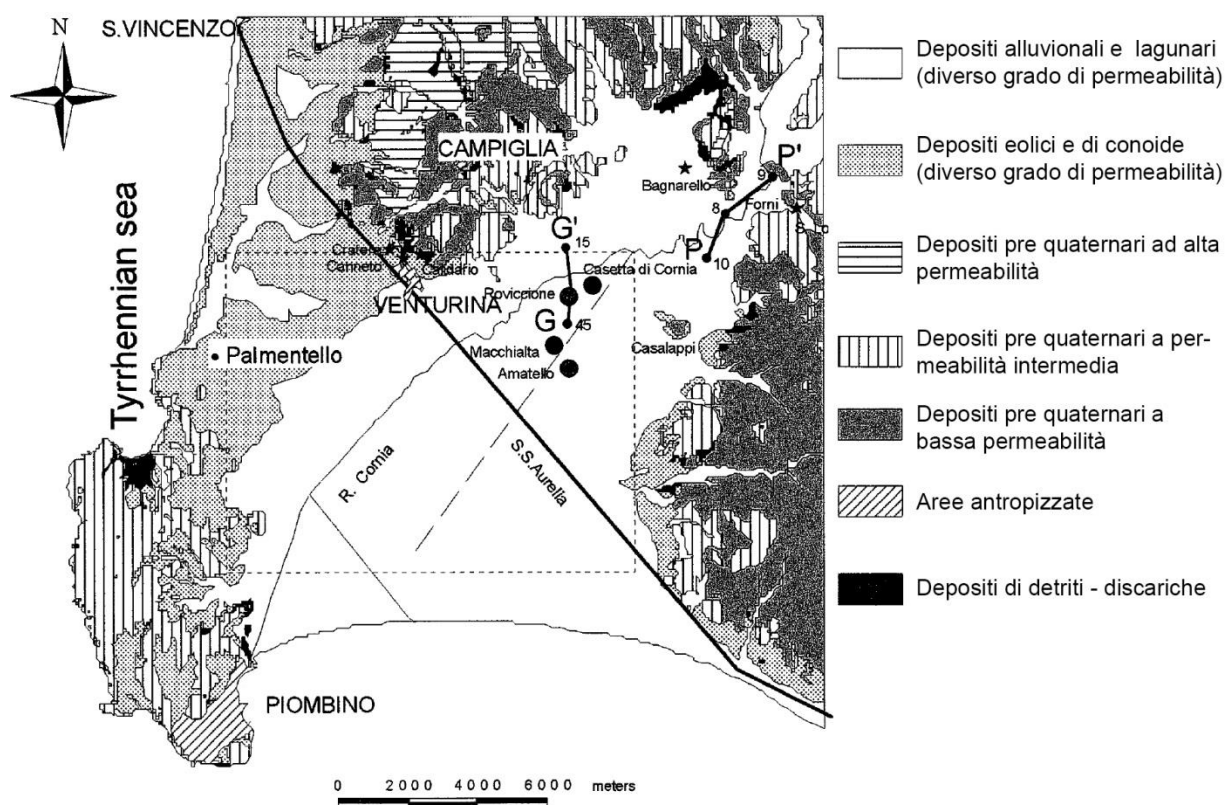


Figura 2.3. Mappa della piana del Cornia con descrizione qualitativa delle permeabilità dei principali corpi idrici (da Barazzuoli et al., 1998).

Ai fini dell'approvvigionamento idrico per scopi idropotabili, irrigui e industriali, l'acquifero di principale interesse pratico è contenuto nei depositi permeabili del Quaternario, costituiti da livelli di ghiaie alluvionali oloceniche, legati alla deposizione del Fiume Cornia, e dai livelli di sabbie/arenarie e ghiaie pleistoceniche della zona di San Vincenzo – Piombino (Fig. 2.3). Entrambe le unità idrostratigrafiche giacciono su di un substrato profondo, che si differenzia da zona a zona. Lo schema è il seguente (Regione Toscana, 2003):

- un acquifero superficiale freatico-semiconfinato, spesso sospeso, di modesto spessore e discontinuo nella bassa Pianura;
- un sistema acquifero confinato multistrato, costituito da più livelli ghiaiosi acquiferi sovrapposti.

Nello studio per la caratterizzazione dei CISS (CNR - IGG e Consorzio LaMMA, 2009b), il sistema acquifero è definito multistrato, in ragione di un'alternanza di livelli permeabili, costituiti essenzialmente da ghiaie e sabbie, e livelli impermeabili o di bassa permeabilità rappresentati dai depositi limoso-argillosi e argille, presenti in maniera discontinua (Fig. 2.4). Nello stesso lavoro vengono distinti cinque orizzonti acquiferi, con

differenti estensioni e continuità, costituiti principalmente da sabbie e ghiaie in differenti proporzioni (in accordo con la ricostruzione geometrica del sistema acquifero della piana del Cornia proposta da Ghezzi et al., 1993). In particolare, sulla base di studi litostratigrafici e analisi geofisiche, il sistema acquifero confinato profondo viene descritto dagli autori come costituito da quattro livelli di ghiaia separati da livelli di argilla; questa alternanza è meglio documentata nelle porzioni centrali del bacino, dove gli spessori dei livelli argillosi sembrano aumentare.

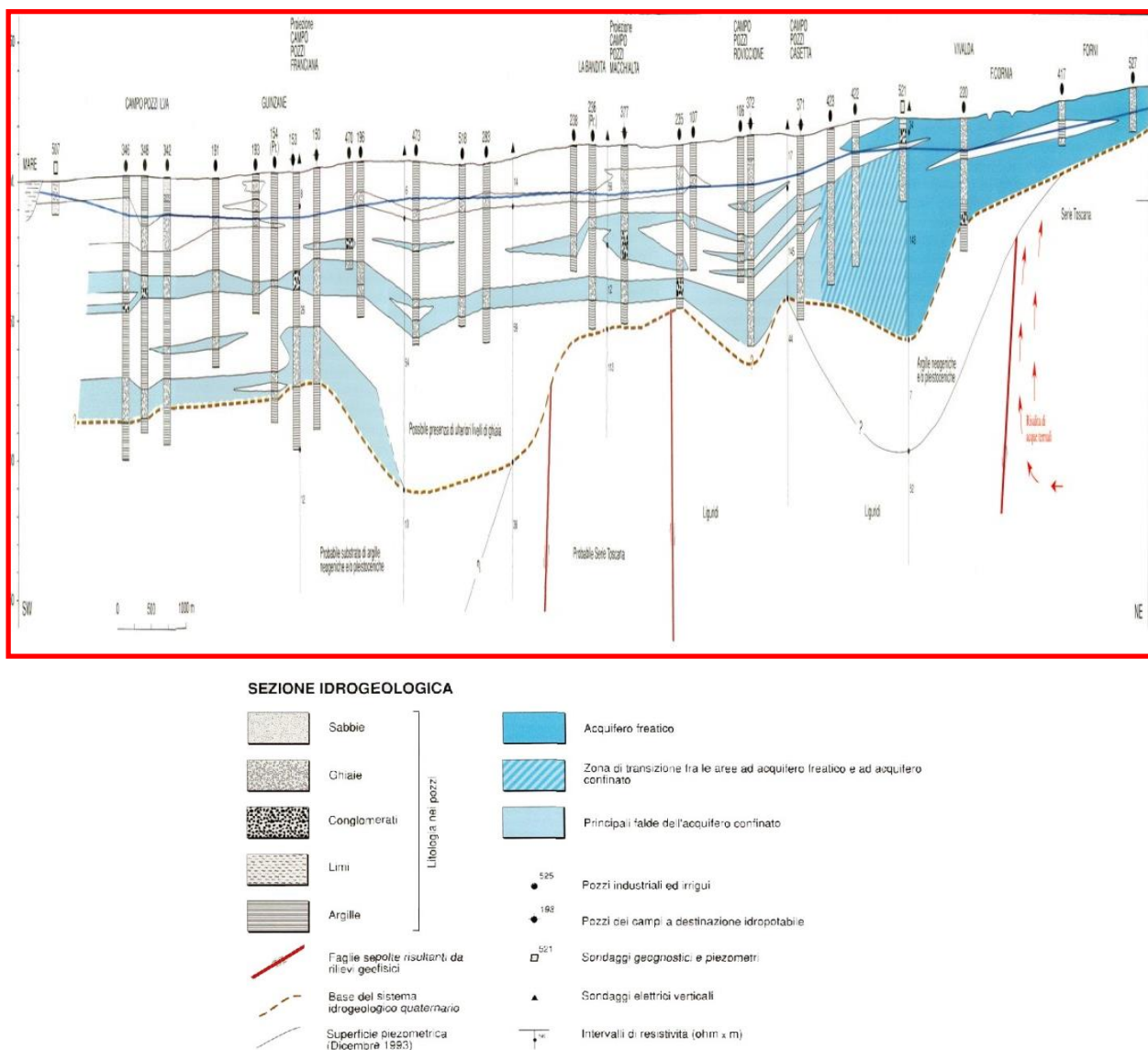


Figura 2.4. Sezione idrostratigrafica della Pianura di Piombino - Pianura del Fiume Cornia e Terrazzo di San Vincenzo (Ghezzi et al., 1995).

L'acquifero 1, il più profondo, ha granulometria ghiaiosa e si sviluppa prevalentemente in corrispondenza dei margini Sud-Ovest e Nord-Est della piana del Cornia. I livelli permeabili 2 e 3, anche questi caratterizzati dalla prevalenza di ghiaie, rappresentano gli acquiferi più estesi e continui, sviluppandosi per quasi tutto l'areale del bacino. Anche l'acquifero 4 è caratterizzato da una marcata continuità, occupando però la sola metà occidentale della piana. Infine il livello acquifero 5, il più superficiale, è limitato a due aree costiere localizzate a Nord, tra San Vincenzo e Origliano, e ad Est di Piombino. Questi ultimi due orizzonti acquiferi risultano costituiti in prevalenza da sabbie. Da un punto di vista degli spessori, con gli oltre 14 m di spessore medio, l'orizzonte acquifero profondo (1), risulta essere il più potente. L'attribuzione di valori dei parametri

idrodinamici a ciascun livello individuato risulta difficile dal momento che le prove di conducibilità hanno interessato più orizzonti produttivi.

Le relazioni tra le acque superficiali del Fiume Cornia e le acque sotterranee sono state oggetto di indagine negli ultimi 20 anni, per l'importanza del Fiume Cornia nella ricarica dell'acquifero. Le informazioni presenti nel presente Capitolo sono derivate da campagne di misura del deflusso del Fiume Cornia nel periodo 2002/2003 (Consorzio di Bonifica Val di Cornia, 2004). Si evidenzia in particolare, subito a valle di Forni, un'area di primaria importanza ai fini dell'alimentazione dell'intero sistema acquifero di Pianura, in cui:

- lo spessore dell'acquifero freatico è massimo;
- l'acquifero freatico può essere localmente a diretto contatto con il subalveo del Fiume Cornia, la cui velocità di deflusso è rallentata dalla presenza di due ampi meandri;
- si manifesta in alveo la presenza di anomalie termiche a indicazione di risalita di fluidi caldi.

Dai risultati delle prove di portata eseguite da ASA nei propri pozzi idropotabili e sulla base dei risultati di prove Lefranc e di emungimento riportate in Barazzuoli et al. (1998), al sistema acquifero viene attribuito un coefficiente di permeabilità (K) dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4} m/s. In Regione Toscana (2003) è presentata la distribuzione delle conducibilità idrauliche medie dello spessore saturo dell'acquifero. In particolare, sono stati individuati valori di conducibilità compresi tra $5 \cdot 10^{-5}$ e $2 \cdot 10^{-3}$ m/s, rappresentati in 5 classi di colore. I sedimenti presenti ai limiti della piana, a ridosso dei rilievi montuosi e collinari di Monte Calvi (a Nord), Suvereto (a Nord-Est), Riotorto e Vignale (ad Est) e del promontorio di Piombino (a Sud-Ovest), sono stati classificati con permeabilità medio-bassa, con valori di conducibilità compresi tra $5 \cdot 10^{-5}$ e $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Dall'altro lato, i sedimenti che caratterizzano le aree centrali e costiere della piana sono stati classificati con permeabilità medio-alta, con valori compresi tra $5 \cdot 10^{-4}$ e $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. I valori più elevati sono stati riscontrati lungo alcuni tratti del profilo del Fiume Cornia, in corrispondenza dei quali si verifica ricarica di subalveo.

Il sistema acquifero è attualmente monitorato per mezzo di una rete di piezometri gestiti dal Servizio Idrologico Regionale della Regione Toscana (Fig. 2.5). Dal punto di vista degli andamenti piezometrici, è significativo riportare l'andamento del livello del piezometro Montioncello (Fig. 2.6). Tale livello è passato da un minimo di rilevante importanza nel periodo agosto-settembre 2012 (circa -25 m dal piano campagna nell'anno idrologico 2011/2012, particolarmente secco) ad un continuo recupero negli anni successivi, fino a circa -5 m dal piano campagna nel Maggio 2015. Negli ultimi due anni il trend è nuovamente in diminuzione, fino a quote di circa 20 m al di sotto del piano campagna nel Novembre 2017. Un andamento simile è osservabile in gran parte dei punti di monitoraggio in continuo della Regione Toscana. Tale andamento dimostra una rilevante resilienza del sistema acquifero agli estremi meteo-climatici.

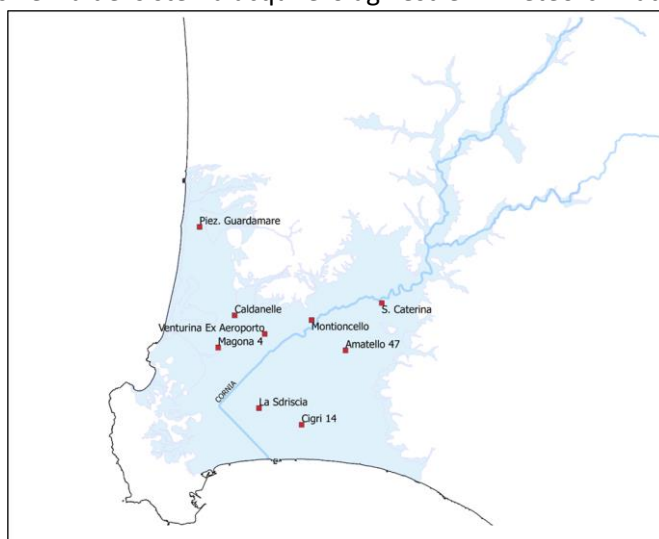


Figura 2.5. Rete di monitoraggio del Servizio Idrologico e Geologico della Regione Toscana.

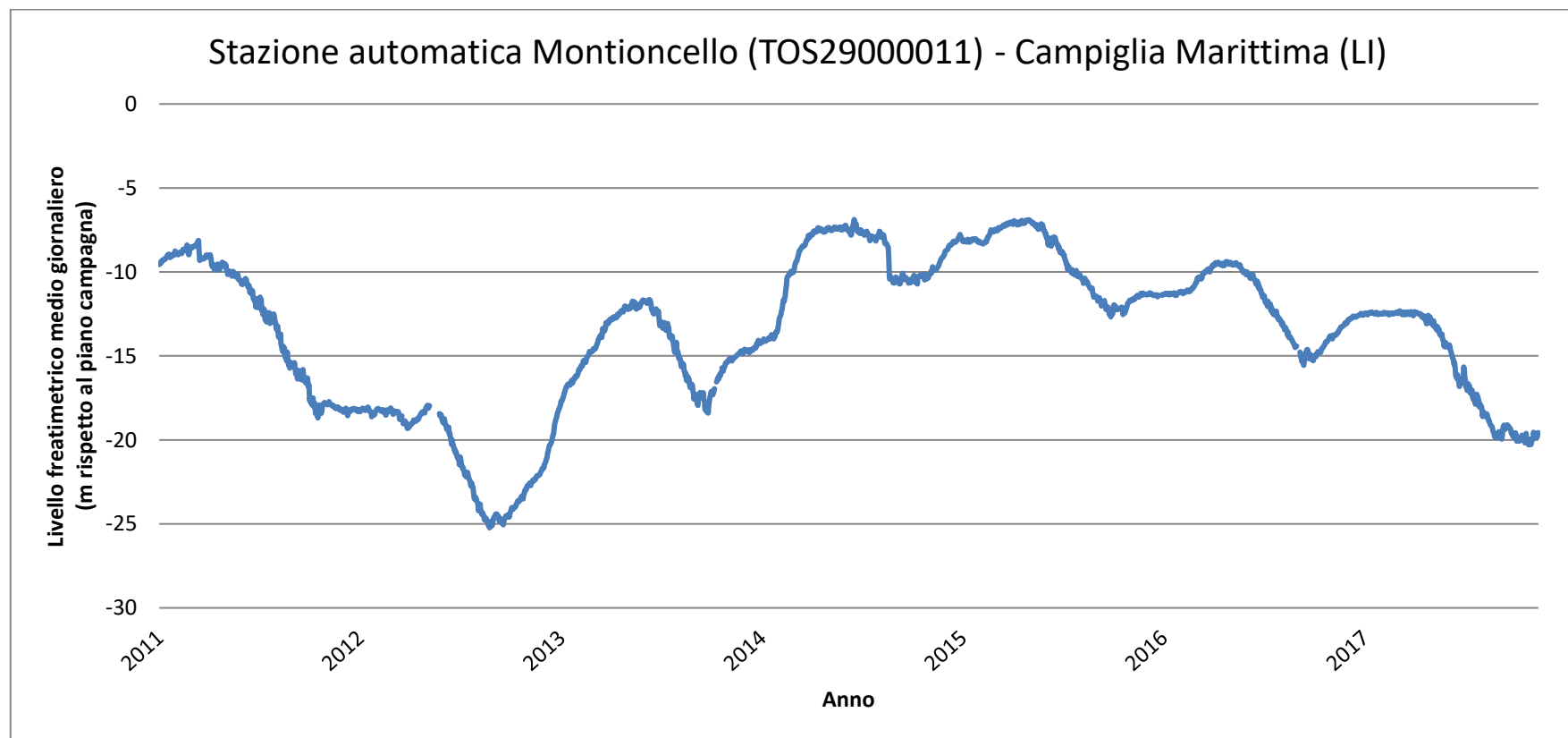


Figura 2.6. Andamento del livello piezometrico al piezometro Montioncello nel periodo 2011 -31 Agosto 2017.

2.4 Bilancio idrogeologico della piana del Cornia

Il calcolo del bilancio idrico dei CISS in questione è presentato ampiamente in Regione Toscana (2003). In tale rapporto si discutono i bilanci prodotti precedentemente e si presenta un'ipotesi di bilancio medio "interpretativa" dell'unità idrogeologica alluvionale della Pianura del Cornia e dell'acquifero freatico del Terrazzo di San Vincenzo. Sintesi di tale bilancio è riportata in Tab. 2.1 e in Fig. 2.7.

In base a quanto riportato in Tab. 2.1 e in Fig. 2.7, è stato valutato un afflusso medio di 36 Mm³/anno per il sistema acquifero della Pianura del Cornia (esclusa l'area di San Vincenzo), in virtù della stima dei seguenti apporti di ricarica:

- portata in ingresso di 0.5 Mm³/anno dall'area di Forni;
- portata in ingresso di 12 Mm³/anno ceduti dal Fiume Cornia nell'area tra Forni e Roviccione;
- portata in ingresso di 3.5 Mm³/anno dall'area collinare di Suvereto;
- portata in ingresso di 2 Mm³/anno dall'area collinare di Casalappi alla falda freatica tra Forni e Casetta;
- portata in ingresso di 2 Mm³/anno da infiltrazione di acqua meteorica sulle superfici permeabili della falda freatica tra Forni e Casetta;
- portata in ingresso di 3-6 Mm³/anno dai calcari di Campiglia Marittima, inclusi i contributi idrotermali e la Fossa Calda;
- portata in ingresso di 2 Mm³/anno dalla falda del Terrazzo di San Vincenzo;
- portata in ingresso di 2 Mm³/anno dall'area collinare di Montegemoli;
- portata in ingresso di 3 Mm³/anno dall'area collinare di Riotorto;
- portata in ingresso di 3-6 Mm³/anno da infiltrazione di acqua meteorica e re-infiltrazione dell'acqua d'irrigazione sulle superfici scarsamente permeabili della Pianura.

Sono state inoltre stimate tra il 1996 e il 2002 delle portate medie emunte di almeno 23.1 Mm³/anno per scopi idropotabili e industriali.

Sulla base di considerazioni sui prelievi dall'acquifero e il contenuto in cloruri delle acque emunte, gli autori sono giunti inoltre ad ipotizzare come probabile che la media dei prelievi del decennio 1992-2002 (nell'ordine di 39-40 Mm³/anno) sia stata superiore del totale della ricarica in acqua dolce di circa 3.5 Mm³/anno. Sulla base di queste analisi, gli autori ritengono inoltre che circa 3 Mm³/anno derivino da fenomeni di richiamo di acqua di mare collegati agli emungimenti.

Per quanto riguarda, invece, la falda freatica del Terrazzo di San Vincenzo, il bilancio è stato stimato in base ai seguenti termini:

- portata in ingresso complessiva di 1 Mm³/anno dai rilievi collinari al margine del Terrazzo pleistocenico;
- portata in ingresso di 4.8 Mm³/anno da infiltrazione di acqua meteorica sulle superfici permeabili del Terrazzo pleistocenico;
- portata in ingresso di 0.6 Mm³/anno da infiltrazione di acqua meteorica sulle superfici a bassa permeabilità del Terrazzo pleistocenico;
- emungimenti per scopi idropotabili, per una portata media complessiva di 0.7 Mm³/anno tra il 1998 ed il 2002;
- emungimenti per usi domestici, irrigui e turistici, per una portata complessiva di 1.5 Mm³/anno;
- deflusso verso il mare di 2.2 Mm³/anno;
- deflusso verso la falda di Pianura di 2 Mm³/anno.

Composizione del bilancio della falda freatica di San	ENTRATE				USCITE								
	Da infiltrazione di acqua meteorica sulle superfici permeabili		Contributo dai rilievi collinari	TOTALE	Prelievi ad uso idropotabile (1936-2002)	Prelievi ad uso domestico/irriguo/turistico	Defluenza verso mare (avvert)	Defluenza verso la falda di pianura (rud)	TOTALE				
	ghiaie e sabbie (l - 25%) Mmc	sabbie limare (l - 10%) Mmc								stima (Mmc)	(Mmc)	(Mmc)	(Mmc)
	4.8	0.6	1.0	6.4	0.7	1.5	2.2	2.0	6.4				
Composizione media delle fonti di ricarica dell'Acquifero multistrato della pianura del Cornia	In ingresso in subalveo da Forni (Mmc)	Ceduti dal Cornia alla falda freatica fra Forni e Roviccione (Mmc)	Dall'area collinare di Suvereto inclusi contributi idrotermali alla falda freatica fra Forni e Casetta (Mmc)		Dall'area collinare di Casaloppi alla falda freatica fra Forni e Casetta (Mmc)	Da infiltrazione di acqua meteorica sulle superfici permeabili della falda freatica fra Forni e Casetta (Mmc)	Dai calcari di Campiglia inclusi contributi idrotermali e Fossa Calda (Mmc)	Dalla falda di San Vincenzo (Mmc)	Dall'area collinare di Montegemoli (Mmc)	Dall'area collinare di Rivotorto - bacino Corniaccio (Mmc)	Da infiltrazione di acqua meteorica e reinfiltrazione dell'acqua d'irrigazione sulle superfici scarsamente permeabili della pianura (Mmc)	TOTALE (Mmc)	
	0.5	12.0	3.5		2.0	2.0	3.0 - 6.0	2.0	2.0	3.0	3.0 - 6.0	36.0	
Origine dei dati	Legge di Darcy alla sezione di Forni	Misure di deflusso sul Cornia eseguite nel 1993-94 e nel 2002-2003	Stima in base agli incrementi di deflusso sul Cornia, misure eseguite nel 1993-94 e nel 2002-2003		Stima di largo massima	Area= 11 km ² ; P = 720 mm; I = 25%	Bilancio Raggi 1964	Bilancio San Vincenzo	Stima di largo massima	Bilancio Raggi 1964	Area= 150 km ² ; P = 660 mm; I = 2.5% - 5% + reinfiltrazione del 2.5% - 5% del prelievo irriguo.		
Composizione media dei prelievi dall'Acquifero multistrato della pianura del Cornia	Anno	1932	1936	1937	1938	1939	2000	2001	2002	Media 1936-2002			
	Idropotabili (Mmc)	8.7	10.2	11.6	11.3	11.5	12.1	11.6	12.4	11.6			
	Industriali (Mmc)	13.3	non pervenuto	12.4	12.4	12.1	11.6	10.5	9.9	11.5			
	Altri (domestico/irriguo/turistico)	Non noto. Campo di variazione in base alle diverse stime: solo prelievo irriguo = 10.1 (Megale, 2002) - 19.6 (Lotti, 1988); totale altri prelievi = è variato fra 12.5 e 18 Mmc secondo le stime Getas-Petrogeo fra il 1936 ed il 2002. Si tratta comunque di una cifra molto variabile da un anno all'altro in funzione della distribuzione e della quantità delle piogge.											
	TOTALE	> 22	non noto	> 24	> 24.3	> 23.6	> 23.7	> 23.1	> 22.3	> 23.1			

Tabella 2.1. Ipotesi di bilancio per l'unità idrogeologica alluvionale della Pianura del Cornia e per l'acquifero freatico del Terrazzo di San Vincenzo (da Regione Toscana, 2003)

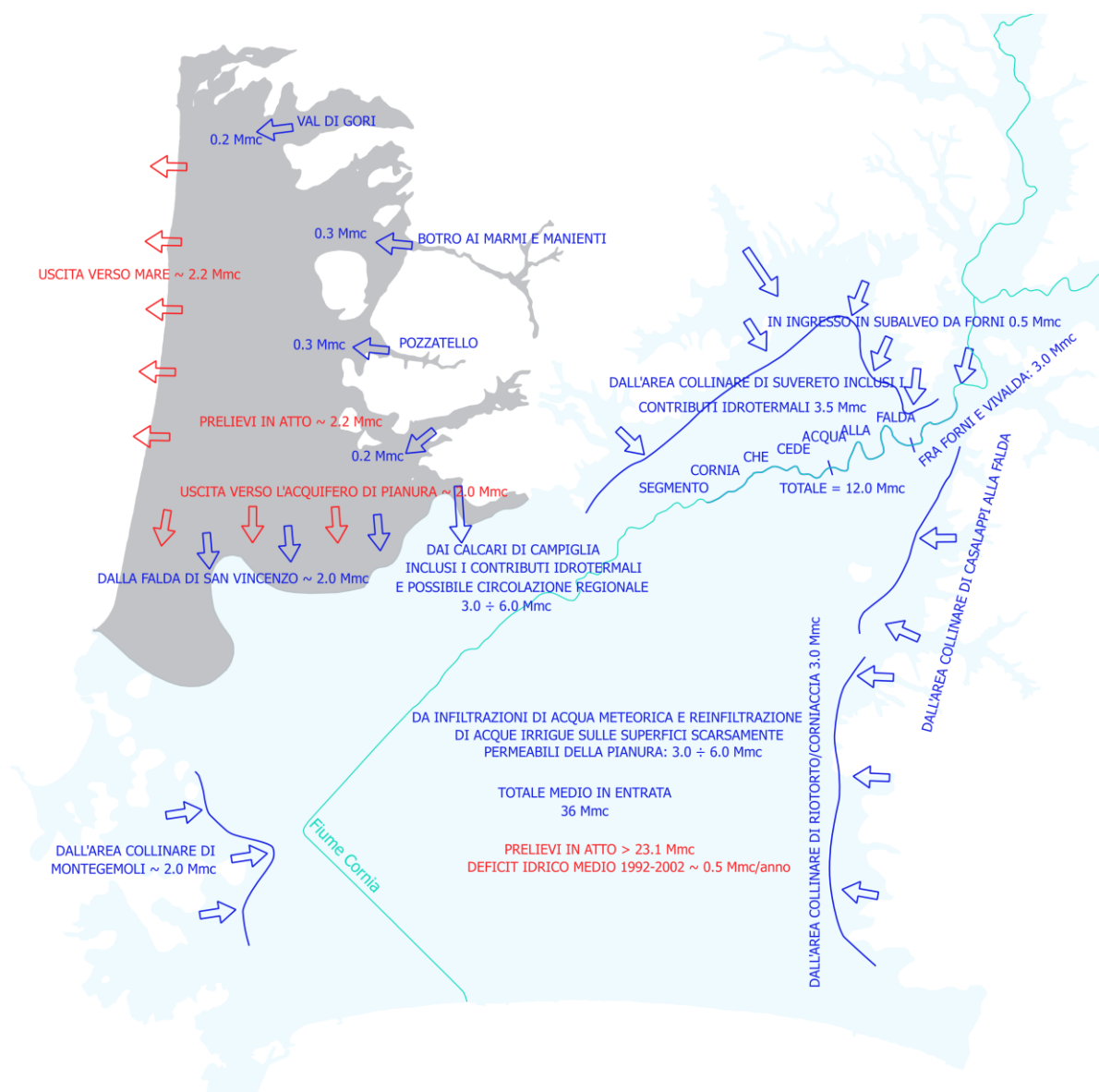


Figura 2.7. Rappresentazione dei termini bilancio per l'unità idrogeologica alluvionale della Pianura del Cornia e per l'acquifero freatico del Terrazzo di San Vincenzo (da Regione Toscana, 2003).

2.5 Sintesi sulle precedenti attività di modellistica

Ai fini del presente studio è stata svolta una ricerca sui modelli numerici precedentemente sviluppati in Val di Cornia. A tal proposito, gli scriventi sono a conoscenza dell'esistenza di un modello numerico sviluppato con il codice MODFLOW limitatamente all'area del Sito di Interesse Nazionale di Piombino, che tuttavia non è stato possibile al momento reperire. Al momento, l'unico modello reperito è un modello matematico integrato basato su un codice proprietario sviluppato da Getas – Petrogeo S.r.l. nel 1993, che ha previsto la simulazione del deflusso della falda, della concentrazione di cloruri marini e della subsidenza del suolo.

Nel 2003, la stessa Getas – Petrogeo S.r.l. ha svolto ulteriori attività riguardanti una caratterizzazione preliminare e aggiornata dell'area, basata sulle conoscenze idrogeologiche acquisite da varie fonti e su indagini di dettaglio per l'acquisizione dei parametri mancanti (nello specifico, parametri idraulici e spessore saturo dell'acquifero), ed una valutazione del suddetto modello.

Per il modello sviluppato, di tipo monostrato bidimensionale nel piano orizzontale, il campo di moto è stato simulato in condizioni stazionarie mediante un approccio alle differenze finite. L'obiettivo di tale modello era quello di simulare diversi scenari piezometrici corrispondenti alle variazioni dei prelievi dalla falda e di ricarica meteorica.

L'area di studio è stata discretizzata nel piano orizzontale mediante celle quadrate di lato 600 m e il sistema acquifero è stato suddiviso in due sotto-sistemi, corrispondenti all'acquifero confinato della Pianura del Cornia e a quello freatico del Terrazzo di San Vincenzo.

Al modello di flusso è stato poi accoppiato un modello di trasporto, al fine di prevedere l'evoluzione del fenomeno di ingressione di acqua salata per ogni scenario piezometrico simulato dal modello idrogeologico. A tale scopo è stato utilizzato il codice di simulazione SUTRA, che utilizza un metodo ibrido agli elementi finiti e alle differenze finite integrate per simulare il trasporto di soluti indotto dal flusso advettivo della falda, dalla diffusione molecolare e dalla dispersione idrodinamica. Un modello di subsidenza ha permesso infine di calcolare i cedimenti del suolo conseguenti a variazioni dell'assetto piezometrico. Il modello, anche questo di tipo monodimensionale, è stato basato sulla relazione di Terzaghi.

Nella relazione tecnica finale viene più volte sottolineato che sia il modello di flusso che quello di trasporto, opportunamente tarati per verificarne l'attendibilità, hanno avuto una validità a scala generale e di previsione di massima. Ciò significa che tali modelli hanno assolto la funzione di strumenti gestionali, concepiti e realizzati al tempo per fornire rapidamente e con semplicità un'idea a scala generale degli assetti conseguenti a diverse ipotesi di gestione della risorsa. Le simulazioni effettuate hanno permesso infatti di simulare le tendenze evolutive della piezometria e dei cloruri marini a regime, ferme restando le condizioni climatiche e la distribuzione dei prelievi di una configurazione prestabilita. Lo scopo di tali simulazioni era dunque quello di permettere i confronti con le simulazioni di regimi di prelievo pregressi e di eventuali regimi di prelievo o regimi pluviometrici futuri.

Alla luce di ciò, i principali limiti individuati, già dagli stessi autori nel 2003, riguardano l'obsolescenza del modello esistente, che risale al 1993, quindi concepito per funzionare sulle piattaforme hardware di quell'epoca, e l'impossibilità di utilizzarne i risultati se non per la definizione di uno stato "medio" del sistema e di una stima grossolana dei bilanci.

Si sottolineava quindi la necessità di mettere a punto un modello più aggiornato e di maggior dettaglio (cioè basato su banche dati aggiornate ed informatizzate e su eventuali campagne integrative di dettaglio), tridimensionale e in condizioni transitorie, che permettesse di ricostruire adeguatamente la fluttuazione stagionale delle condizioni della falda, anche in relazione agli obiettivi specifici dell'analisi.

3. Modello concettuale idrogeologico

Il presente Capitolo è dedicato alla descrizione del modello concettuale del sistema acquifero in esame, sulla base del quale è poi avvenuta l'implementazione del modello numerico del flusso delle acque sotterranee. L'obiettivo è quello di fornire una schematizzazione del suddetto sistema idrogeologico definendo in termini di importanza gli afflussi e deflussi delle acque di falda e degli scambi con i corpi idrici superficiali.

L'elaborazione del modello concettuale presentato di seguito comprende sia la schematizzazione della geometria e idrostratigrafia del sottosuolo, sia degli afflussi e dei deflussi che si ritiene vadano poi a determinare l'andamento atteso del campo di moto delle acque sotterranee.

Tale elaborazione è stata effettuata sulla base dei dati e delle informazioni reperite dalla documentazione presentata al paragrafo 1.1. Il modello concettuale di seguito descritto è adeguato all'implementazione di un modello numerico per la simulazione in transitorio dell'idrodinamica del sistema tra Aprile 2016 e Dicembre 2021. La calibrazione del suddetto modello è supportata dai dati freaticometrici della rete SIR di Regione Toscana e dalle campagne di monitoraggio del livello di falda eseguite nell'ambito del progetto LIFE REWAT e dettagliate di seguito. Inoltre sono state utilizzate per la calibrazione le conoscenze acquisite sugli scambi acque superficiali e sotterranee, anche grazie ai monitoraggi correntometrici ed osservazioni idrologiche eseguite in alveo.

3.1 Definizione dell'area di studio

L'area oggetto di studio (Fig. 3.1) si estende per circa 164 km² su una vasta area della Val di Cornia, corrispondente all'affioramento dei depositi olocenici e tardo-pleistocenici della piana del Cornia e del Terrazzo di San Vincenzo. Per quanto riguarda la definizione della geometria del sistema, i cinque orizzonti acquiferi descritti nel paragrafo 2.2 sono stati modellizzati come un unico sistema acquifero in sabbie e ghiaie, in accordo con l'interpretazione riportata in Regione Toscana (2003), delimitato al tetto da una copertura superficiale corrispondente ai terreni vegetali e di riporto, e al letto da un substrato argilloso ritenuto impermeabile e quindi non rappresentato nel modello numerico. Tale definizione deriva dall'impossibilità di attribuire a singoli acquiferi, ancorché non continui sull'intera pianura, parametri idrodinamici derivanti da prove dirette. Ciò in quanto le poche prove disponibili riguardano pozzi fenestrati su più livelli – per cui i parametri sono riferibili all'insieme dei tratti fenestrati.

3.2 Condizioni idrologiche

Di seguito sono illustrate le condizioni idrologiche del bacino, facendo riferimento a quanto riportato nella Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino riferita al Dicembre 1993 (Ghezzi et al., 1995) ed alle informazioni acquisite direttamente nel corso del progetto LIFE REWAT.

In Fig. 3.2 si riporta la geologia dei depositi quaternari nei quali insiste l'acquifero, con riferimento alle classi definite dal Continuum geologico Regionale (CNR – IGG e Consorzio LaMMA, 2009b), e l'andamento delle curve isopiezometriche riportate nella suddetta carta, opportunamente digitalizzata per gli scopi di questa analisi. Si sottolinea dunque che la descrizione del campo di moto delle acque sotterranee riportata di seguito fa riferimento allo stato del sistema al 1995. I limiti idrologici individuati corrispondono a:

- l'area termale dei Forni, a Nord-Est;
- il promontorio di Piombino a Sud-Ovest;
- la zona montuosa di Monte Calvi a Nord;
- gli apparati montuosi di Riotorto e Vignale ad Est.

Dall'andamento delle isopieze rappresentate in Fig. 3.2 si deduce che le principali direzioni del deflusso della falda si sviluppano approssimativamente lungo gli assi Nord-Sud ed Est-Ovest ai margini del dominio di studio, andando poi a convergere verso un rilevante basso piezometrico al centro della Pianura. Si può notare

che le linee di flusso assumono un andamento principalmente mono-direzionale, da Est verso Ovest, nella zona del Terrazzo di San Vincenzo.

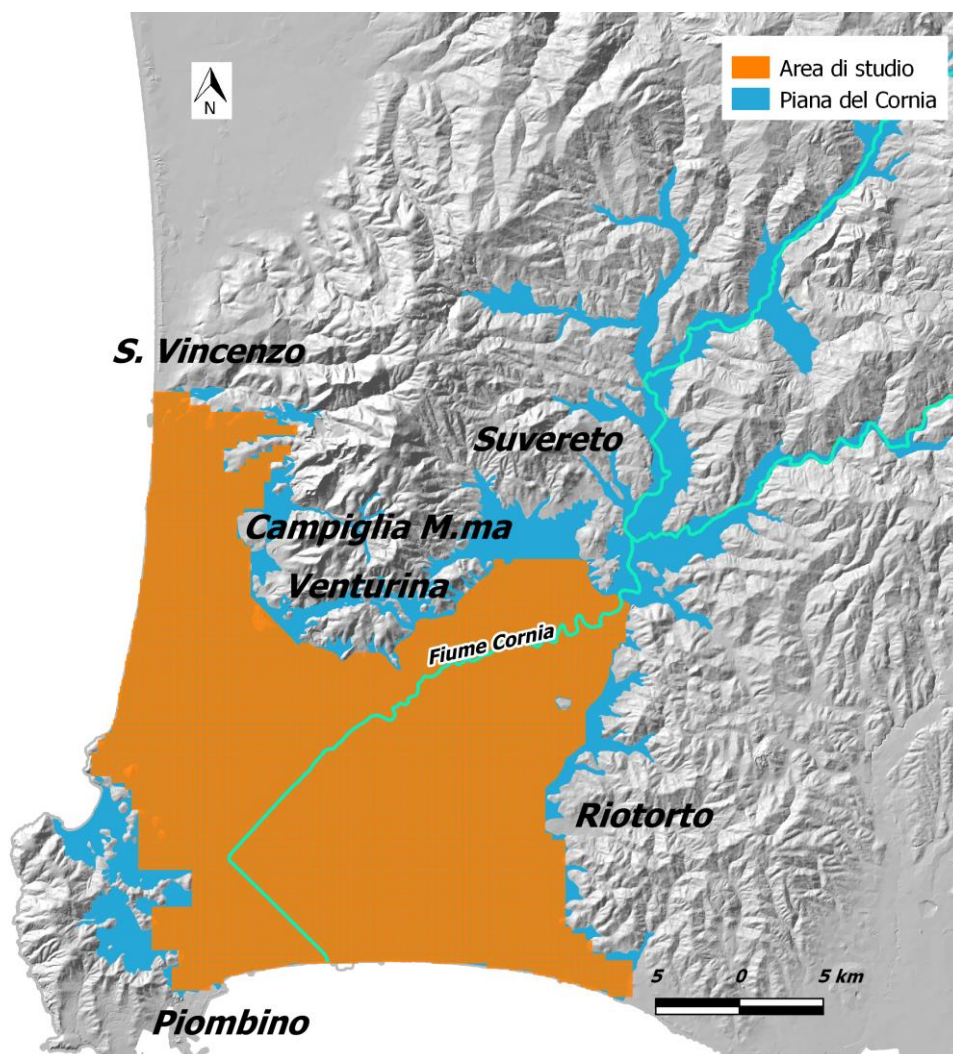


Figura 3.1. Estensione dell'area di studio.

È da rilevare la presenza di un asse di drenaggio principale che si sviluppa in direzione NO-SE.

Per contro, la parte alta della Pianura del Cornia è interessata da afflussi dalla zona montuosa di Monte Calvi e dall'area dei Forni, che si sviluppano principalmente in due direzioni, NE-SO e Nord-Sud. La parte meridionale dell'acquifero è invece alimentata da flussi che si originano dai rilievi montuosi di Riotorto e Vignale, con orientamento Est-Ovest, e dai depositi affioranti del promontorio di Piombino, con orientamento SO-NE.

L'acquifero è inoltre in connessione idraulica con il Fiume Cornia, che ne determina un'importante ricarica modificando localmente l'andamento delle isopieze per buona parte del suo profilo. L'eccessivo emungimento che ha interessato la falda negli ultimi decenni ha comportato un abbassamento della stessa di circa 10 m nella zona centro-meridionale dell'area di studio. Si nota in particolare un cono di depressione piuttosto esteso nei pressi della costa centro-meridionale, che provoca un afflusso di acque di intrusione marina e fa sì che la concentrazione dei cloruri nelle acque di falda assuma valori fino a 5000 mg/l.

Il fenomeno dell'intrusione salina interessa anche alcune zone lungo la costa tirrenica occidentale, rappresentando così la principale criticità per la qualità risorsa idrica sotterranea ospitata nel bacino della Val di Cornia.

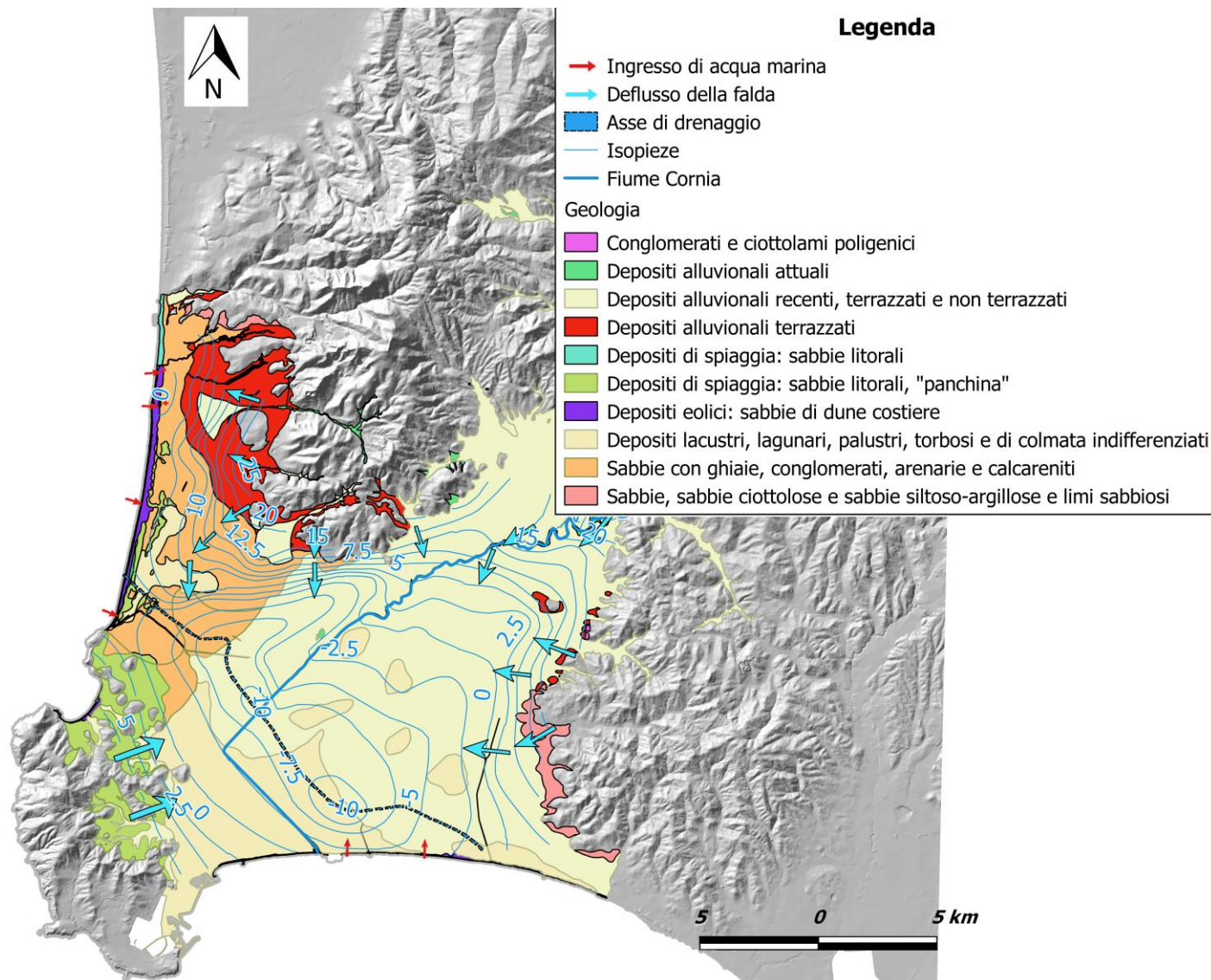


Figura 3.2. Caratterizzazione geologica sulla base del Continuum geologico Regionale (CNR – IGG e Consorzio LaMMA, 2009b; modificato) e piezometria derivante della Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995).

Una volta caratterizzato il dominio di studio, per la definizione del modello concettuale è necessario individuare i termini di afflusso e deflusso rispetto al sistema idrogeologico, che verranno poi simulati come condizioni al contorno e/o termini di ricarica/estrazione in fase di modellazione numerica. In Fig. 3.3 è rappresentato il dominio di studio attivo del modello (in grigio il dominio non oggetto della simulazione - inattivo) e i rispettivi termini in ingresso e in uscita, in base a quanto riportato nella Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995) ed in base alle indagini svolte nell'ambito del progetto LIFE REWAT.

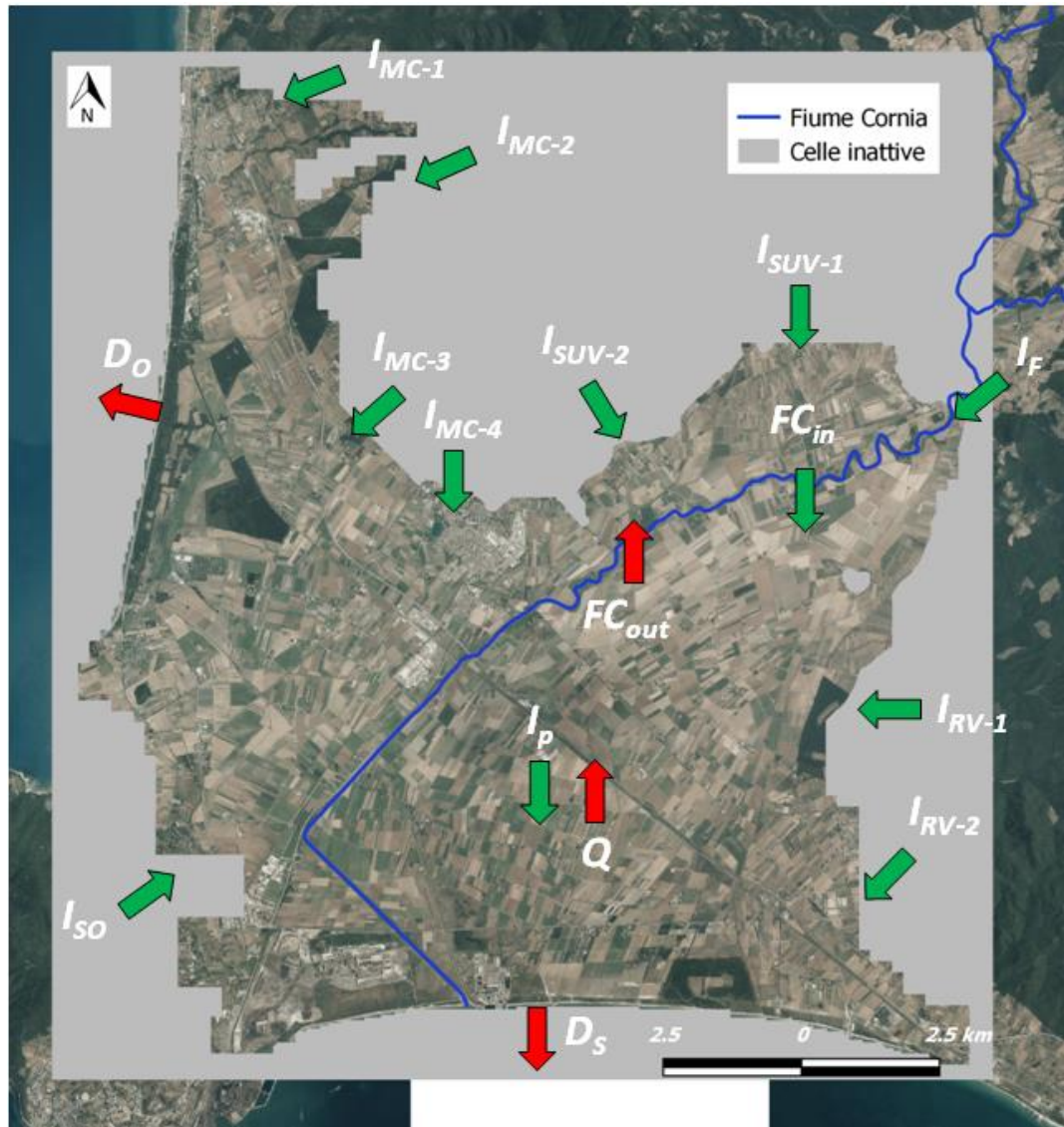


Figura 3.3. Modello concettuale idrogeologico e dominio attivo della Val di Cornia. In blu i termini in ingresso, in rosso quelli in uscita.

I termini di ricarica dell'acquifero sono:

- infiltrazione efficace da precipitazioni meteoriche (I_p);
- ricarica di subalveo da parte del Fiume Cornia (FC_{in});
- infiltrazione dalla zona montuosa di Monte Calvi a Nord (I_{MC});
- infiltrazione dalle colline di Suvereto a Nord-NE (I_{SUV});
- infiltrazione dall'area di Forni a Nord-Est e da afflussi di origine termale (I_F);
- infiltrazione dalla zona montuosa di Riotorto e Vignale ad Est (I_{RV});
- infiltrazione dal promontorio di Piombino a Sud-Ovest (I_{SO}).

I termini in uscita dal sistema idrogeologico sono invece definiti da:

- deflusso attraverso la costa meridionale (Golfo di Follonica; D_S);
- deflusso attraverso la costa occidentale (Terrazzo di San Vincenzo; D_O);
- drenaggio delle acque di falda da parte del Fiume Cornia (FC_{out});
- prelievi antropici di tipo idropotabile, irriguo e industriale (Q).

Si noti che i termini I_{MC} , I_{SUV} ed I_{RV} sono stati scomposti per distinguere zone caratterizzate da diversi gradienti idraulici.

Con i termini così definiti l'equazione di bilancio sarà quindi espressa da:

$$(I_p + FC_{in} + I_{MC} + I_{SUV} + I_F + I_{RV} + I_{SO}) - (D_S + D_O + FC_{out} + Q) = \Delta S,$$

dove ΔS rappresenta la variazione dell'immagazzinamento nell'acquifero, che determina l'evoluzione temporale del carico idraulico.

4. Implementazione del modello numerico di flusso

In questo Capitolo viene descritta la procedura di implementazione del modello numerico per la definizione del sistema acquifero in esame in condizioni transitorie. A tale scopo è stato utilizzato il codice di calcolo MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), il quale è basato su un approccio alle differenze finite per approssimare la soluzione dell'equazione alle differenze parziali che governa il flusso delle acque sotterranee nelle tre dimensioni dello spazio. Tale codice permette di rappresentare il sistema idrogeologico attraverso una griglia di celle e in una sequenza di strati e calcola, attraverso un processo iterativo, il carico idraulico ai nodi centrati su ogni cella della griglia. Il processo di iterazione termina e la soluzione è raggiunta se e quando la differenza tra il carico idraulico calcolato tra due iterazioni successive in ogni cella è minore di un valore definito dall'utente all'inizio della simulazione.

L'equazione del flusso in condizioni transitorie, ovvero per il carico idraulico che varia nel tempo, in un mezzo saturo e anisotropo, con le componenti dei principali assi di anisotropia disposte lungo gli assi di riferimento cartesiani, è espressa come segue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + f \quad (1)$$

dove:

K_x , K_y e K_z sono i valori della conducibilità idraulica lungo gli assi x , y e z rispettivamente (assunti paralleli ai principali assi della conducibilità idraulica) [L/T];

h è il carico idraulico [L];

t è il tempo [T];

S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico [1/L];

f è il flusso volumetrico per unità di volume che rappresenta i termini di sorgente/estrazione, con la convezione che $f < 0$ per flussi in uscita dal sistema [1/T].

Nel caso in cui si voglia simulare il flusso in condizioni stazionarie, ovvero per il carico idraulico non variabile nel tempo, il termine contenente la derivata temporale a secondo membro è nullo.

L'equazione (1) è formulata applicando l'equazione di conservazione della massa ad un volume rappresentativo dell'acquifero e, unitamente alle condizioni al contorno e alle condizioni iniziali, costituisce il modello numerico del flusso delle acque sotterranee in un determinato dominio spaziale e in un certo intervallo temporale.

Poiché le equazioni alle differenze parziali che descrivono il sistema idrogeologico sono di complessa soluzione per mezzo di metodi analitici, si utilizzano metodi numerici.

Il processo di implementazione di un modello numerico prevede le seguenti fasi:

- definizione del dominio attivo e della griglia di calcolo;
- definizione della geometria del sistema idrogeologico investigato;
- implementazione dei parametri idrodinamici;
- implementazione delle condizioni al contorno e definizione delle condizioni iniziali;
- implementazione dei termini di ricarica/estrazione;
- calibrazione e verifica del modello.

Questo modello è implementato per mezzo della piattaforma FREEWAT (Rossetto et al., 2018), che permette di agevolare le varie fasi di implementazione del modello stesso, traendo beneficio dall'integrazione di alcuni

tra i più noti codici di simulazione idrogeologica in ambiente GIS. In particolare, per il processo di simulazione del flusso delle acque sotterranee è integrato in FREEWAT il codice MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005).

Il vantaggio dell'utilizzo della piattaforma FREEWAT consiste nella possibilità di eseguire i vari step di implementazione del modello in un unico ambiente di simulazione, sfruttando le potenzialità degli strumenti offerti dal GIS libero QGIS nelle fasi di pre-processing (preparazione dei dati in ingresso) e post-processing (visualizzazione dei risultati). La descrizione della fase di pre-processing, frutto di un'appropriata elaborazione di tabelle e file in formato raster o vettoriale, esula dagli obiettivi di questo report e pertanto non verrà descritta nel seguito.

Le portate dei pozzi idropotabili sono state assegnate in base alle informazioni fornite da ASA S.p.A., integrate laddove necessario con quelle riportate nella Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI; Regione Toscana e Consorzio LaMMA, 2012). Nel precedente modello, invece, sono stati esclusivamente adottati i valori riportati nella BDSRI.

Nel presente modello sono state inoltre simulate le estrazioni irrigue, che invece erano state trascurate per semplicità nella precedente elaborazione.

Si sottolinea infine che il presente modello transitorio è stato calibrato sulla base delle misure di livello della falda eseguite nel corso di campagne di monitoraggio nell'ambito del progetto LIFE REWAT. La calibrazione era stata eseguita, invece, sul precedente modello sulle proprietà idrodinamiche del fiume Cornia, basandosi esclusivamente sulla corrispondenza tra il bilancio idrico simulato e quello riportato in Regione Toscana (2003).

4.1 Dominio attivo e discretizzazione spaziale

4.1.1 Definizione della griglia di calcolo

Sulla base del modello concettuale presentato, è stato definito il dominio attivo del modello, ovvero i limiti dell'area all'interno della quale è stato poi simulato il campo di moto delle acque sotterranee. Il dominio attivo corrisponde all'area arancione mostrata in Fig. 4.1 e comprende gran parte della Pianura del Cornia. e La parte relativa al Terrazzo di San Vincenzo è stata implementata, ma non simulata per ridurre i tempi computazionali. L'implementazione è invece resa disponibile qualora si voglia estendere il modello anche a tale area. L'area del modello è stata definita utilizzando come riferimento la foto aerea e lo shapefile poligonale con l'estensione dei CISS fornito da CNR – IGG e Consorzio LaMMA (2009b), evitando di rappresentare aree la cui inclusione non avrebbe apportato informazioni utili a migliorare l'affidabilità della soluzione e che, viceversa, potrebbero causare instabilità nel processo iterativo di simulazione.

Le celle esterne al dominio attivo, corrispondenti ai rilievi montuosi e collinari di cui si è parlato in precedenza, sono state inattivate (celle *no-flow*). Lungo i limiti del dominio attivo sono state assegnate opportune condizioni al contorno, illustrate di seguito.

Sulla base delle considerazioni esposte, in questa fase di modellazione è stato definito un dominio rettangolare (Fig. 4.1) di estensione 17.0 km x 18.6 km, suddiviso in 186 righe e 170 colonne con celle quadrate di lato 100 m. Entro quest'area rettangolare, il dominio attivo si estende per circa 149 km² per un totale di 14884 celle per model layer.

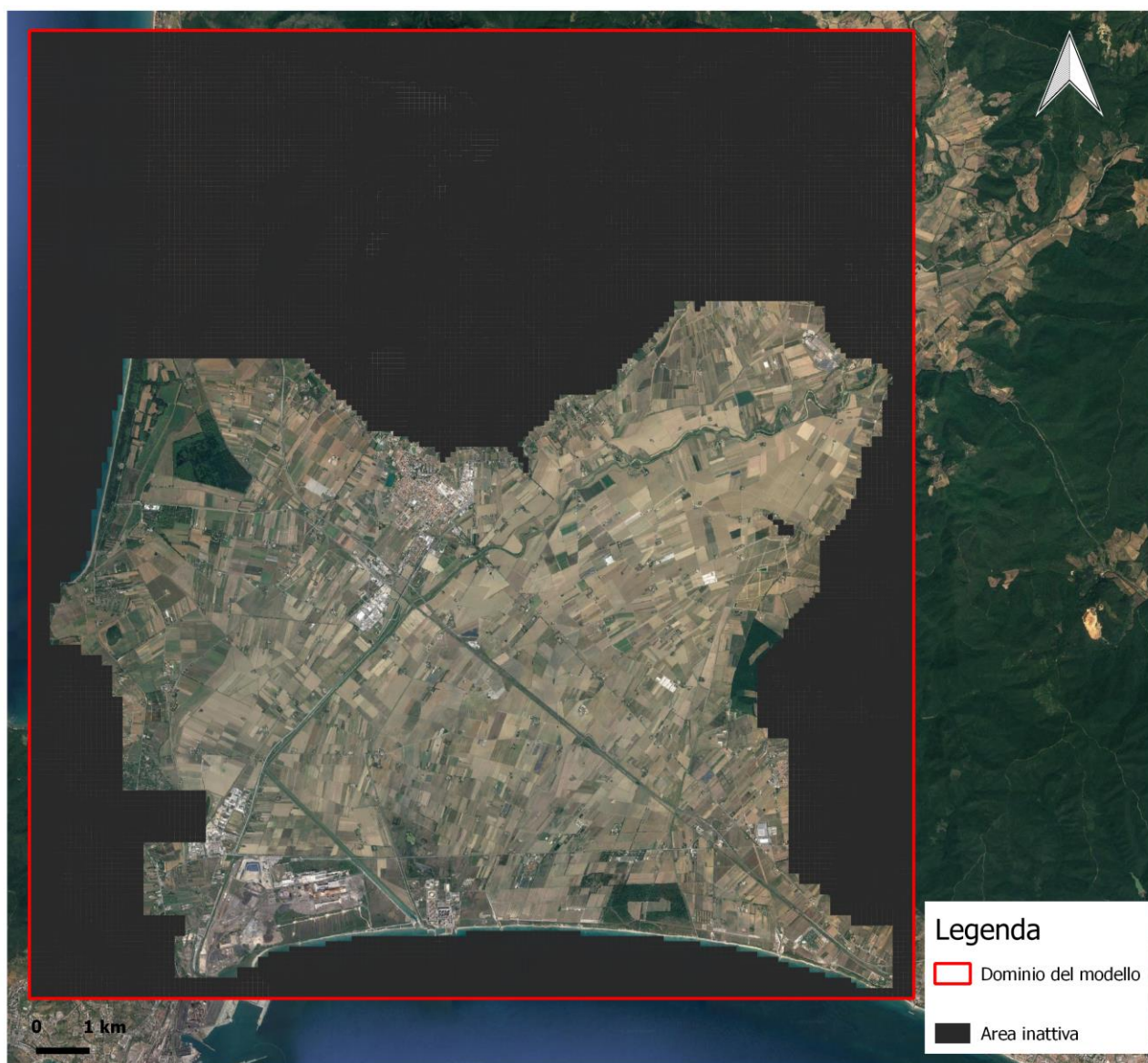


Figura 4.1. Dominio attivo simulato.

4.1.2 Discretizzazione verticale

Sul piano verticale, il sistema acquifero simulato si estende tra la superficie del piano campagna e il letto dell'acquifero in sabbie e ghiaie, quest'ultimo delimitato alla base da un substrato argilloso non rappresentato nel modello. Sono state rappresentate due unità idrostratigrafiche:

- una copertura superficiale, dello spessore medio di circa 8 m, costituita da sedimenti fini, terreni vegetali e di riporto;
- l'unità sottostante, con uno spessore medio di circa 42 m, a rappresentare i cinque orizzonti acquiferi in sabbie e ghiaie.

Ai fini dell'implementazione del modello numerico, sono stati definiti due strati a rappresentare le suddette unità idrostratigrafiche. Entrambi gli strati sono stati definiti come *confined* (ciò significa che nessuna cella può "seccarsi"), per evitare che alcune celle attive venissero escluse dalla simulazione e potessero potenzialmente prevenire la convergenza del processo iterativo.

Per quanto riguarda la geometria di queste due unità, sono state consultate le seguenti fonti:

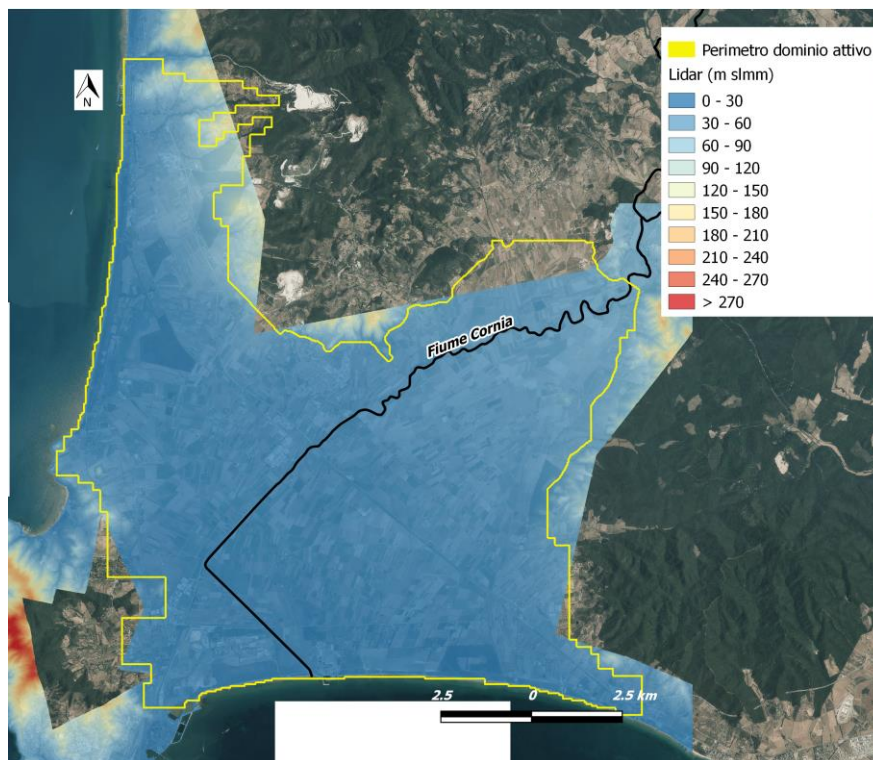
- per la superficie del piano campagna sono stati utilizzati congiuntamente i raster di dettaglio del lidar (Fig. 4.2 (a); fonte: portale GEOscopio di Regione Toscana; risoluzione orizzontale di 2 m) e del DTM (Fig. 4.2 (b); fonte: portale GEOscopio di Regione Toscana; risoluzione orizzontale di 10 m);
- per lo spessore della copertura superficiale è stato utilizzato il file raster prodotto dalle elaborazioni di Regione Toscana, CNR - IGG e Consorzio LaMMA (2008) (Fig. 4.3 (a); risoluzione orizzontale di 10 m);
- per il letto dell'acquifero è stato utilizzato il file raster prodotto dal Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena a seguito di studi ed elaborazioni effettuati nell'ambito del progetto LIFE REWAT (Fig. 4.4 (a); risoluzione orizzontale di 50 m).

Per definire le superfici di tetto e letto dei due strati, i suddetti raster sono stati opportunamente ricampionati a 25 m, cioè al dettaglio spaziale della griglia di calcolo. Per eseguire il ricampionamento, è integrato in FREEWAT uno strumento che, nel caso in cui il raster originale presenti una discretizzazione più fitta rispetto alla dimensione delle celle della griglia, permette di associare ai nodi della griglia grossolana il valor medio dei pixel del raster originale che ricadono in una stessa cella. Viceversa, se i pixel del raster originale hanno dimensioni maggiori rispetto a quelle delle celle della griglia, il valore assegnato ad ogni pixel verrà copiato in tutte le celle i cui nodi ricadono entro i bordi di quel pixel.

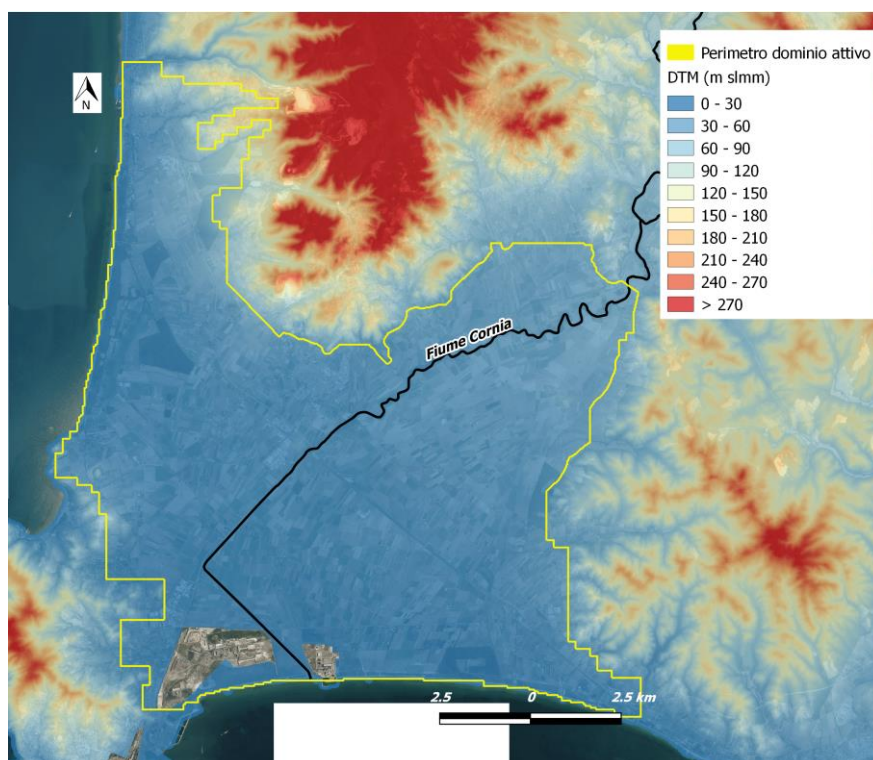
Vengono dettagliate nel seguito le elaborazioni eseguite in fase di implementazione del modello numerico sui file raster elencati sopra.

Per definire l'elevazione del tetto del modello in ogni cella della griglia di calcolo, è stato innanzitutto utilizzato il lidar, per il quale sono stati scaricati ed uniti i quadranti che ricadono entro il perimetro del dominio attivo. Il lidar è stato poi opportunamente ricampionato e adattato al dettaglio spaziale della griglia di calcolo. Poiché il raster originale presenta delle aree non ricostruite (Fig. 4.2 (a)), la superficie del piano campagna è stata ricostruita in queste aree utilizzando il raster del DTM (Fig. 4.2 (b)), anch'esso ricampionato in base alla discretizzazione assegnata alla griglia di calcolo. La superficie così ottenuta per il tetto del modello è stata poi rivista lungo il corso del Fiume Cornia, in modo da evitare intersezioni con il livello fluviale, ottenuto quest'ultimo come intersezione lineare delle misure di livello effettuate in alcuni punti del profilo fluviale. In particolare, la superficie del piano campagna nelle celle intersecate dal fiume è stata posta a 2 cm al di sotto del minimo livello rilevato nei punti di misura.

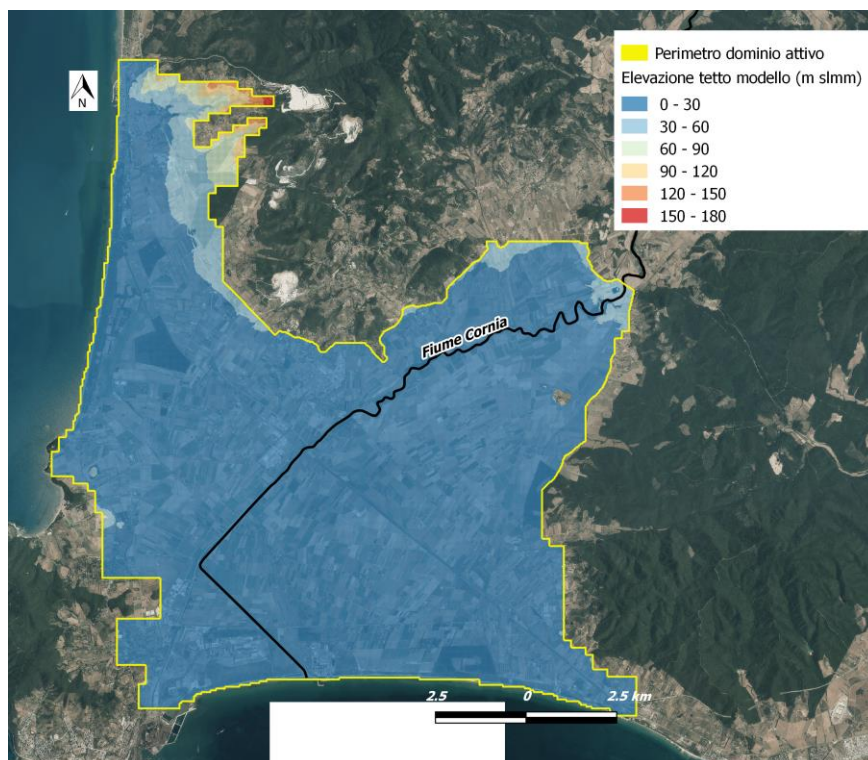
L'elevazione del tetto del modello è rappresentata in Fig. 4.2 (c). Da questa mappa si può osservare che l'elevazione del terreno si attesta su quote variabili tra 0 m e 30 m sul livello medio del mare (slmm) nelle aree pianeggianti della valle, per poi assumere quote decisamente più marcate (fino ai 180 m slmm) in corrispondenza delle dorsali settentrionali e del promontorio di Piombino.



(a)



(b)



(c)

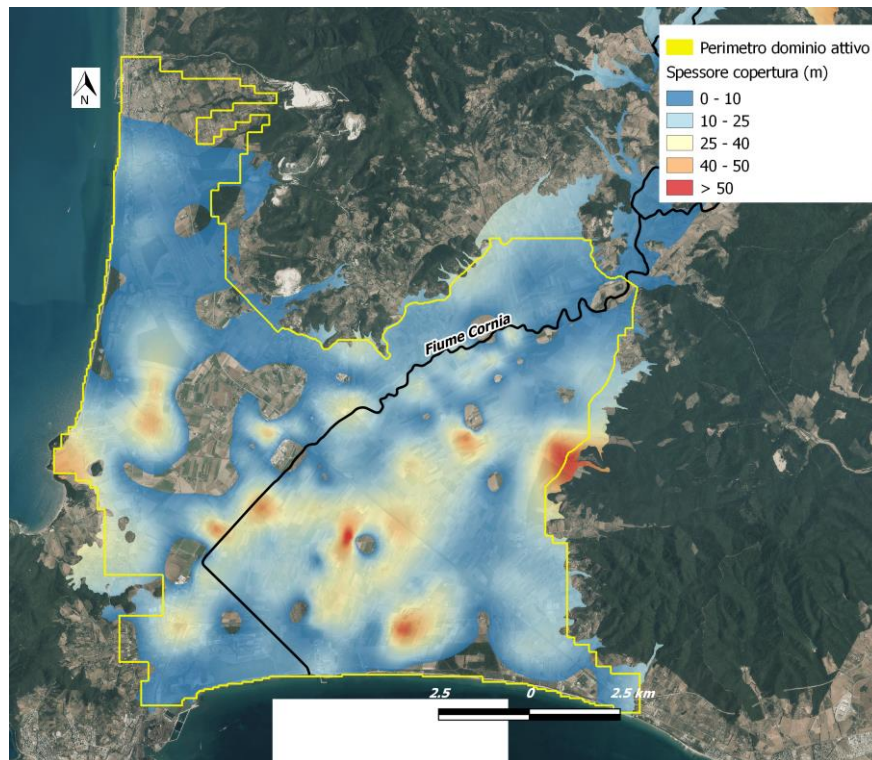
Figura 4.2. (a) Lidar (file raster con un dettaglio spaziale di 2 m) e (b) Modello digitale del terreno (DTM; file raster con un dettaglio spaziale di 10 m). Entrambe le superfici sono state reperite consultando il Portale GeoScopio di Regione Toscana. (c) Elevazione del tetto del modello sulla griglia di calcolo (dettaglio spaziale di 25 m).

Per quanto riguarda lo spessore della copertura superficiale, il file raster elaborato da Regione Toscana, CNR - IGG e Consorzio LaMMA (2008) (Fig. 4.3 (a)) è stato ricampionato e adattato al dettaglio spaziale della griglia di calcolo. Lo spessore così assegnato ad ogni cella è stato successivamente rivisto al fine di: (i) assegnare uno spessore minimo di 1 m per evitare problemi di instabilità durante il processo risolutivo; (ii) smussare alcune irregolarità legate ad ampie differenze di spessore in celle adiacenti, risultato del processo di ricampionamento del raster originale.

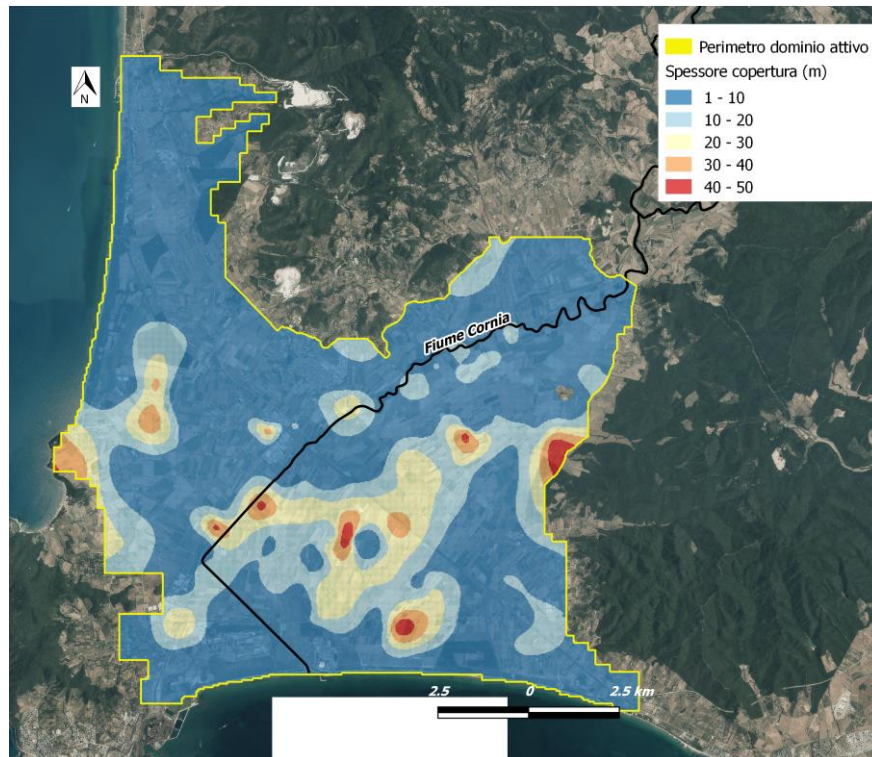
Lo spessore della copertura superficiale ottenuto in seguito a queste elaborazioni è rappresentato in Fig. 4.3 (b). Da questa mappa si può osservare che lo spessore della copertura è maggiore (fino a circa 50 m) nel centro della piana, mentre si riduce generalmente a pochi metri verso i bordi del dominio attivo.

Il letto dell'acquifero, coincidente con il tetto del substrato argilloso, è stato ricostruito integrando diversi livelli informativi. Sono state innanzitutto analizzate 533 stratigrafie ricavate dalla banca dati del progetto INCAS.tro della provincia di Livorno e dalla Banca Dati Indagini Geotematiche del Consorzio Lamma. Da tale analisi è emerso che solo 20 di queste stratigrafie, concentrate principalmente a valle dei rilievi settentrionali, raggiungono il substrato argilloso e quindi sono effettivamente utilizzabili. Queste informazioni sono state poi integrate con i punti di affioramento del suddetto substrato, questi ultimi estrapolati dalla Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Ghezzi et al., 1995), anch'essi localizzati esclusivamente lungo tutto il bordo del dominio attivo. Data la mancanza di informazioni nella porzione centrale della pianura, sono state eseguite misure di rumore sismico in zone strategiche dell'area di studio, e in particolare a poca distanza dall'attuale corso del fiume, sull'ipotesi che la posizione di quest'ultimo sia riconducibile ad una zona di massimo spessore dei depositi alluvionali. Sono stati infine utilizzati 4 ulteriori punti nella porzione meridionale dell'area di studio, che si riferiscono alle indagini dirette più profonde che, in mancanza di altri dati, sono state considerate come limite minimo del tetto del substrato. È stata poi effettuata

un'interpolazione dei punti sopra citati, utilizzando l'algoritmo Topo To Raster di QGIS, per ottenere un raster di dettaglio con risoluzione orizzontale di 50 m.



(a)



(b)

Figura 4.3. Spessore della copertura superficiale. (a) File raster ricostruito da Regione Toscana, CNR - IGG e Consorzio LaMMA (2008), con un dettaglio spaziale di 10 m (le aree non ricostruite si riferiscono all'assenza di copertura). (b) Spessore ricostruito sulla griglia di calcolo (dettaglio spaziale di 25 m).

Si riporta in Fig. 4.4 la profondità del letto dell'acquifero, rispetto al livello medio del mare. La mappa mostra che il letto dell'acquifero si spinge fino ad oltre 100 m sotto il livello medio del mare su una vasta area della piana. Il substrato affiora diffusamente nelle zone dei rilievi (valori di profondità negativi in Fig. 4.4). Per quanto detto in precedenza, è bene far notare che la superficie ricostruita non rappresenta necessariamente l'effettivo substrato dell'acquifero, per via della mancanza di stratigrafie sufficientemente profonde nei settori centrali del bacino. In virtù di queste osservazioni, il raster fornito rappresenta più realisticamente la superficie che delimita inferiormente l'acquifero esplorato.

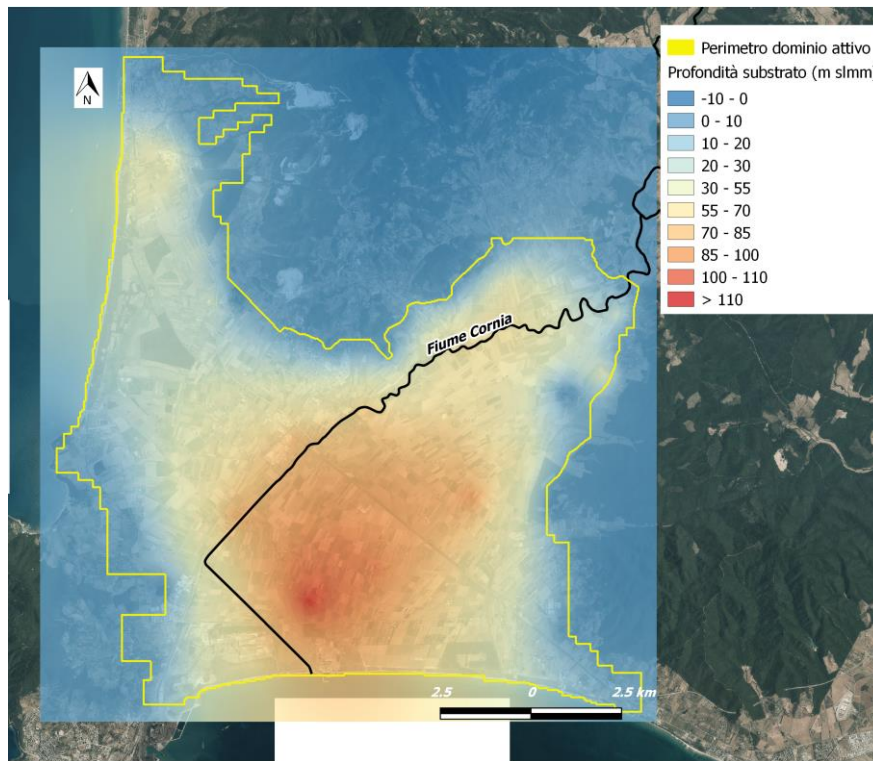


Figura 4.4. Profondità del letto dell'acquifero rispetto al livello medio del mare (dettaglio spaziale di 50 m).

In seguito al calcolo dello spessore dell'acquifero, la superficie rappresentata in Fig. 4.4 è stata riadattata, al fine di: (i) assegnare uno spessore minimo di 2 m per evitare problemi di instabilità durante il processo risolutivo; (ii) smussare alcune irregolarità legate ad ampie differenze di spessore in celle adiacenti, risultato del processo di ricampionamento del raster di Fig. 4.4. Si osserva (Fig. 4.5) uno spessore dell'acquifero variabile tra 35 e 180 m circa su una vasta area della piana e spessori generalmente più esigui (dell'ordine del metro) nelle aree dei rilievi.

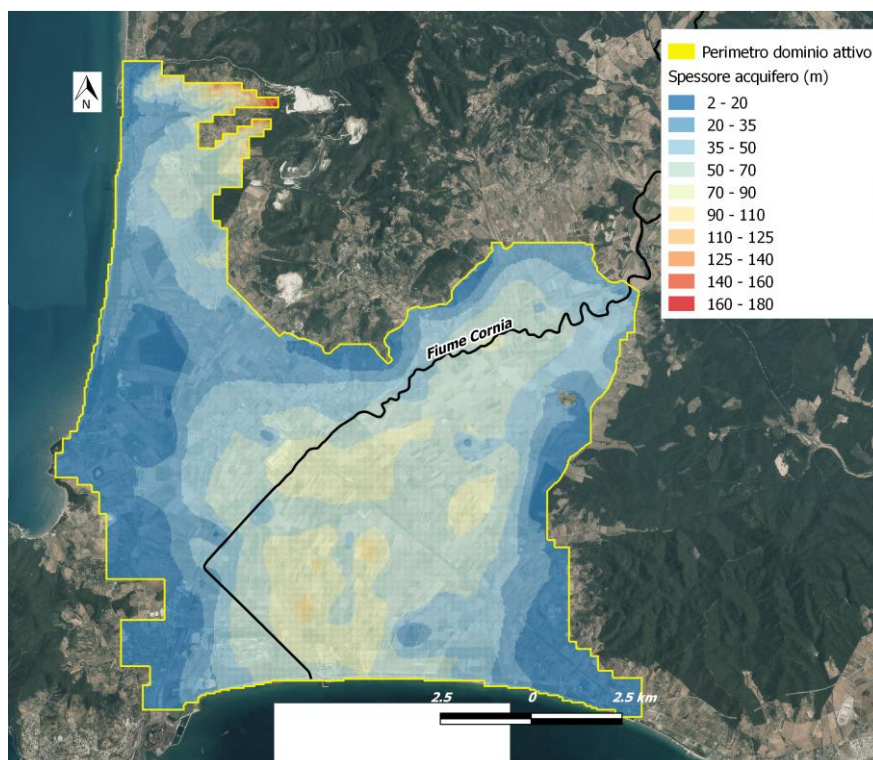


Figura 4.5. Spessore dell'acquifero ricostruito sulla griglia di calcolo (dettaglio spaziale di 25 m).

4.2 Discretizzazione temporale

Il modello numerico simula l'andamento del campo di moto delle acque sotterranee tra il 1° Aprile 2016 e il 15 Dicembre 2021. Sono stati definiti 41 stress period, di cui il primo, tra il 1° Aprile e il 31 Maggio 2016, in stato stazionario e i successivi, della durata media di 30 giorni, in stato transitorio (Tab. 4.1).

Si noti che la durata dei primi 3 stress period è stata scelta in base all'andamento del livello di falda registrato dal freatimetro Montioncello (fonte: Sistema Idrologico Regionale di Regione Toscana), che indica una situazione di stazionarietà del livello tra Aprile e Maggio 2016 e un trend di abbassamento/innalzamento nelle successive stagioni estiva/autunnale. Queste ultime due situazioni sono state rappresentate su due stress period transitori, Giugno-Agosto e Settembre-Novembre 2016. La lunghezza dei successivi stress period è stata invece determinata in base alla frequenza delle campagne di monitoraggio del livello di falda eseguite nell'ambito del progetto LIFE REWAT. Si noti, in particolare, che ognuno di questi stress period termina nel giorno in cui è stata eseguita una campagna di monitoraggio.

4.3 Parametri idrodinamici

Per la simulazione del campo di moto delle acque sotterranee nelle tre dimensioni, è necessario assegnare ai due strati definiti nel modello il parametro conducibilità idraulica lungo le tre direzioni cartesiane (K_x , K_y , K_z). Si è assunto che i due strati presentino esclusivamente anisotropia verticale. Pertanto è stato imposto per K_y un valore uguale a quello di K_x e per K_z un valore pari ad 1/10 di K_x .

La Fig. 4.6 (a) riporta la distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale (K_x) adottata inizialmente per la copertura superficiale. In assenza di informazioni al riguardo, si è assunto che i sedimenti della copertura presentino una conducibilità idraulica piuttosto omogenea, pari a 0.116 m/giorno, su tutta la piana. Sono state inoltre riconosciute due zone a conducibilità più elevata, in corrispondenza dell'affioramento di sedimenti ghiaiosi nell'area di Forni, dove è stato assegnato per K_x un valore pari a 86.4 m/giorno, e in corrispondenza di un paleo-alveo del fiume Cornia, dove è stato utilizzato un valore di 8.64 m/giorno. La

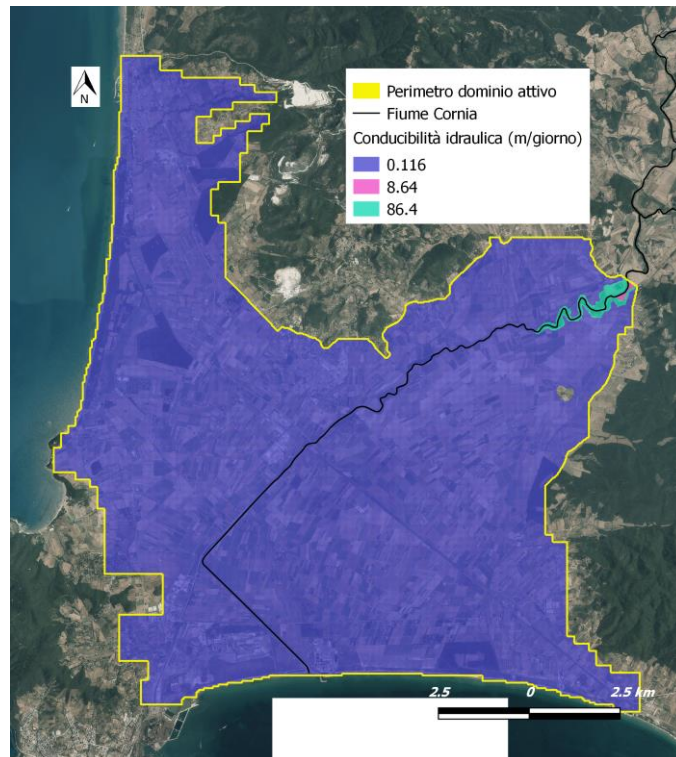
distribuzione mostrata in Fig. 4.6 (a) non è stata soggetta a calibrazione, in quanto il modello risulta poco sensibile al parametro conducibilità idraulica della copertura superficiale (Cap. 5).

SP	Da	A	Durata (giorni)	TS
1	01/04/2016	31/05/2016	61	1
2	01/06/2016	31/08/2016	92	4
3	01/09/2016	30/11/2016	91	3
4	01/12/2016	20/12/2016	20	4
5	21/12/2016	25/01/2017	36	3
6	26/01/2017	08/02/2017	14	2
7	09/02/2017	21/02/2017	13	2
8	22/02/2017	14/03/2017	21	3
9	15/03/2017	11/04/2017	28	4
10	12/04/2017	11/05/2017	30	3
11	12/05/2017	22/05/2017	11	2
12	23/05/2017	19/06/2017	28	4
13	20/06/2017	24/07/2017	35	4
14	25/07/2017	22/08/2017	29	4
15	23/08/2017	29/08/2017	7	2
16	30/08/2017	13/09/2017	15	3
17	14/09/2017	19/09/2017	6	2
18	20/09/2017	27/10/2017	38	4
19	28/10/2017	07/11/2017	11	2
20	08/11/2017	17/11/2017	10	2
21	18/11/2017	27/11/2017	10	2
22	28/11/2017	29/12/2017	32	7
23	30/12/2017	05/01/2018	7	5
24	06/01/2018	08/02/2018	34	5
25	09/02/2018	07/06/2018	118	4
26	08/06/2018	28/08/2018	81	3
27	29/08/2018	31/10/2018	63	2
28	01/11/2018	21/11/2018	20	1
29	22/11/2018	27/03/2019	125	4
30	28/03/2019	21/05/2019	54	2
31	22/05/2019	31/07/2019	70	2
32	01/08/2019	22/11/2019	113	4
33	23/11/2019	31/03/2020	129	4
34	01/04/2020	11/06/2020	71	2
35	12/06/2020	23/07/2020	41	1
36	24/07/2020	15/09/2020	53	2
37	16/09/2020	03/12/2020	78	2
38	04/12/2020	22/04/2021	139	4
39	23/04/2021	31/05/2021	38	6
40	01/06/2021	14/10/2021	135	
41	15/10/2021	15/12/2021	61	2

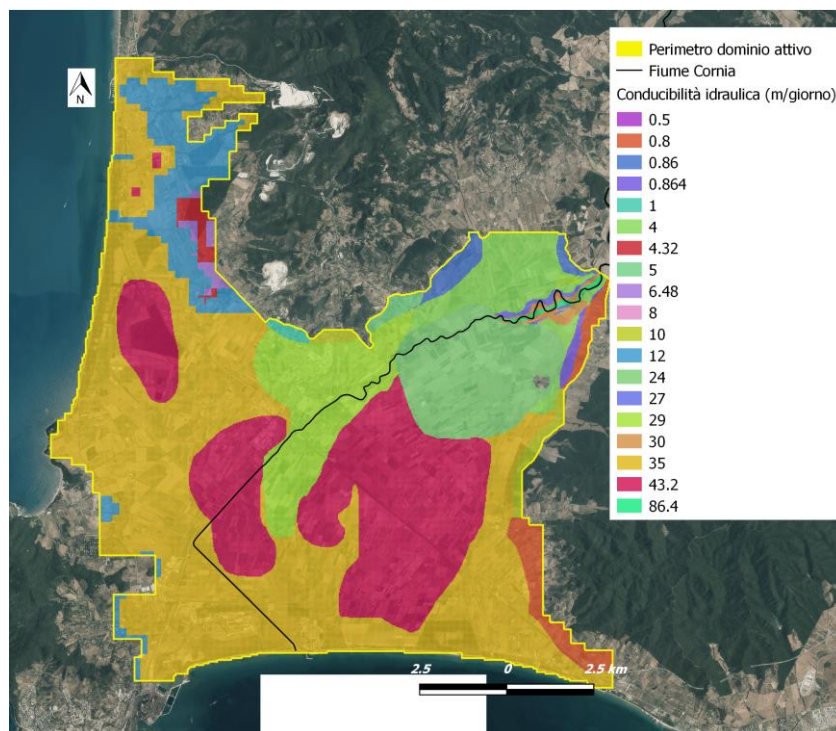
Tabella 4.1. Discretizzazione temporale adottata.

Per determinare le zone a diversa conducibilità idraulica dell'acquifero si è fatto riferimento a quanto riportato nella Tavola 3/A in Regione Toscana (2003), dove sono state individuate 6 classi di conducibilità in base ai risultati di prove di portata e prove in foro effettuate su 54 punti (Regione Toscana, 2003). La

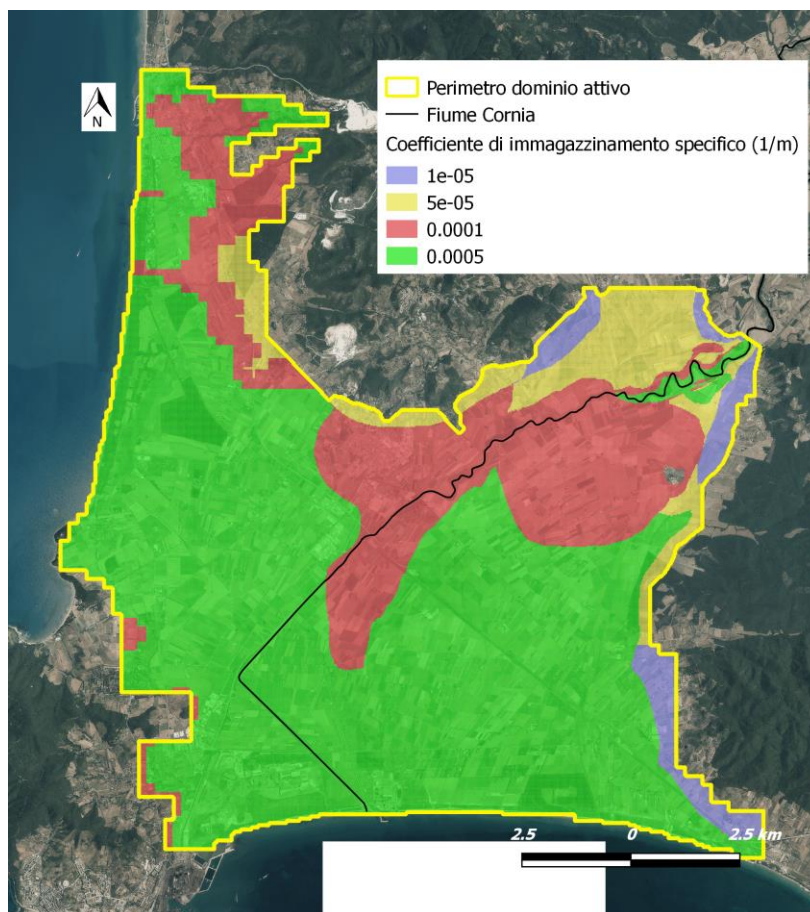
distribuzione riportata in Regione Toscana (2003) è stata poi oggetto di calibrazione (Cap. 5). Si riporta in Fig. 4.6 (b) la distribuzione di K_x (m/giorno) utilizzata per lo strato del modello rappresentante l'acquifero. Si osserva una distribuzione di valori che variano su 4 ordini di grandezza, da meno di 1 m/giorno lungo i bordi del dominio attivo, a più di 10 m/giorno su gran parte della piana, ed in particolare, in corrispondenza dell'affioramento di sedimenti ghiaiosi nell'area di Forni, dove la conducibilità inizialmente assegnata è pari a 86.4 m/giorno.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.6. Conducibilità idraulica orizzontale (K_x) (a) della copertura superficiale e (b) dell'acquifero in sabbie e ghiaie. (c) Coefficiente di immagazzinamento specifico dell'acquifero in sabbie e ghiaie.

Per quanto riguarda il coefficiente di immagazzinamento specifico (copertura superficiale), è stato adottato un valore pari a 0.001 m^{-1} su tutta l'area. Tale parametro è risultato insensibile e dunque non è stato stimato in fase di calibrazione. Per quanto riguarda l'acquifero, i valori di conducibilità idraulica mostrati in Fig. 4.6 (b) sono stati raggruppati per ordini di grandezza e sono state così definite diverse zone di immagazzinamento specifico (Fig. 4.6 (c)).

4.4 Condizioni al contorno

La definizione dei limiti idrodinamici consiste nell'assegnare una particolare assunzione matematica che specifica appropriate condizioni idrauliche a ciascuno di essi, seguendo quanto specificato e raffigurato in Fig. 3.3. Di carattere generale è il limite a flusso nullo imposto ai bordi del dominio attivo e alla base del modello: si assume pertanto che tra l'acquifero esplorato e l'unità idrogeologica sottostante non vi siano scambi verticali. Viene presentata di seguito l'attribuzione delle condizioni al contorno nel modello implementato.

4.4.1 Infiltrazione dai rilievi montuosi e collinari e contributo idrotermale

I termini di afflusso dai rilievi montuosi e collinari sono stati simulati attribuendo una condizione di flusso imposto ad ogni cella lungo i rispettivi limiti del dominio attivo (termini I_{MC} , I_{SUV} , I_F , I_{RV} ed I_{SO} in Fig. 3.3). Tale condizione è stata simulata da batterie di pozzi di ricarica mediante il pacchetto Well (WEL) di MODFLOW. Per ciascun pozzo di ricarica è stato imposto un valore di portata [L^3/T], in base a quanto stimato in Regione

Toscana (2003; si faccia riferimento alla Tab. 2.1 e alla Fig. 2.7). Tali valori sono poi stati oggetto di calibrazione (Cap. 5).

In Fig. 4.7 vengono riportati i segmenti utilizzati ed i termini di afflusso inizialmente utilizzati in fase di modellazione, in termini di variabilità spaziale e temporale. Si noti che le portate di ricarica nell'area di Venturina tengono anche conto del contributo idrotermale dalla falda profonda. Si è tenuto conto anche del contributo idrotermale nell'area di Forni, stimando mediante calibrazione delle portate medie in ingresso al sistema di circa 10000 m³/giorno complessivi nell'area indicata dal rettangolo giallo in Fig. 4.7. Anche questo contributo è stato rappresentato in fase di modellazione mediante dei pozzi di ricarica. L'estensione dell'area interessata da questa risalita di acque termali è stata stimata anch'essa analizzando la bontà dei risultati del modello rispetto al carico idraulico misurato in quella zona.

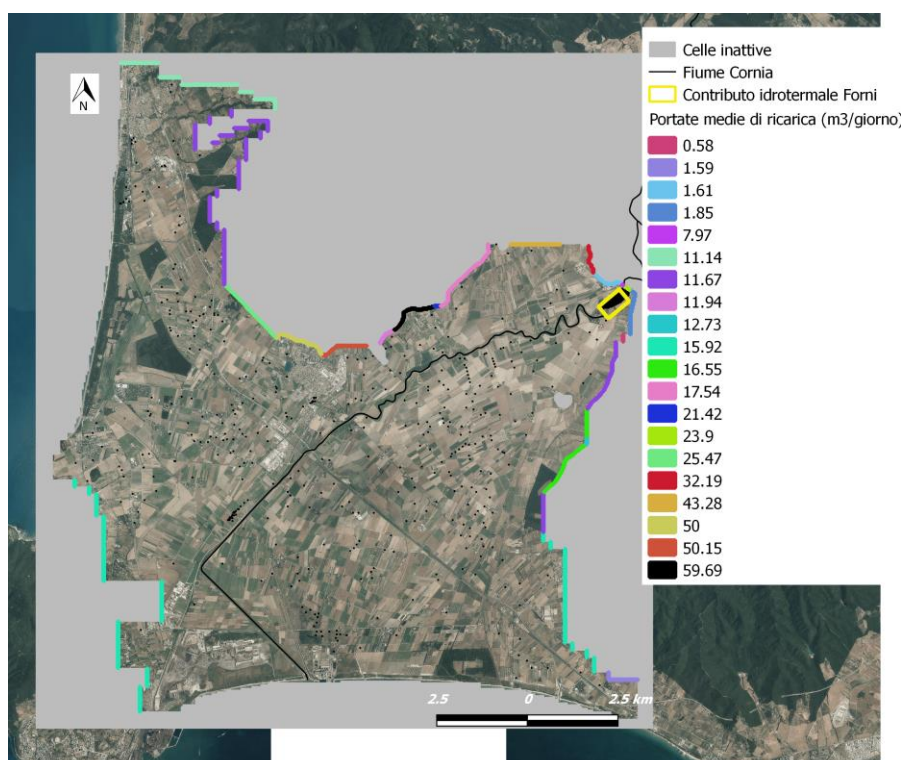


Figura 4.7. Pozzi di ricarica lungo i bordi del dominio attivo e stima delle relative portate. (b) Andamento temporale della portata stimata.

4.4.2 Termini di scambio attraverso le linee di costa

Gli scambi tra l'acquifero e le acque di mare attraverso la costa meridionale del Golfo di Follonica e quella occidentale di San Vincenzo sono stati simulati con una condizione del III tipo (flusso dipendente dal carico) per mezzo del pacchetto General Head Boundary (GHB) di MODFLOW. Tale pacchetto viene di solito applicato quando il sistema acquifero è in contatto idraulico con un corpo idrico superficiale. Nel caso in cui il corpo idrico superficiale sia il mare, come nel caso in esame, si suppone che il contatto idraulico si verifichi nei pressi della costa e si impone per le celle di costa un valore del carico idraulico pari a 0 m slmm. Questa è la condizione che è stata imposta lungo le celle di costa del dominio investigato (termini D_0 e D_5 in Fig. 3.3).

4.4.3 Fiume Cornia

La rappresentazione modellistica del Fiume Cornia permette di determinare gli scambi tra le acque sotterranee e il principale corso d'acqua nel dominio di studio (ricarica della falda, **FCin**, oppure drenaggio, **FCout**; Fig. 3.3). Tale corso d'acqua è stato simulato in questa fase attraverso una condizione di III tipo utilizzando il pacchetto River (RIV) di MODFLOW, che permette di determinare la portata di scambio tra il fiume e l'acquifero in base alla differenza tra il livello del pelo libero del corso d'acqua ed il carico idraulico

nell'acquifero nelle celle ad esso adiacenti attraverso un letto semipermeabile (uno spessore del letto fluviale). Nelle celle in cui il fiume presenterà un livello più elevato del carico idraulico nell'acquifero, verrà simulata ricarica di subalveo; viceversa, si verificherà un drenaggio delle acque di falda. Per l'implementazione del pacchetto RIV e per ogni cella dell'acquifero in contatto con il fiume sono necessari i seguenti dati:

- quota assoluta del livello del corso d'acqua;
- quota assoluta della base del letto fluviale;
- spessore del letto fluviale;
- conducibilità idraulica verticale del letto fluviale;
- lunghezza e larghezza del tratto di fiume intersecato dalla cella.

In FREEWAT, il livello del fiume e le proprietà dei sedimenti del letto del fiume devono essere assegnati dall'utente nella prima cella a monte e nell'ultima a valle del tratto di fiume in questione, mentre nelle celle rimanenti questi valori vengono determinati attraverso un'interpolazione lineare.

Il corso d'acqua è stato suddiviso in una serie di segmenti di larghezza 10 m (Fig. 4.8). Tale suddivisione è stata effettuata tenendo conto innanzitutto (i) della posizione dei punti di misura del livello fluviale (PA11, PA1, PA3, PA4, PA6) e (ii) della posizione dell'idrometro Vecchia SS Aurelia gestito dal Servizio Idrologico Regionale di Regione Toscana. Il livello fluviale è stato misurato nei punti PA11, PA1, PA3, PA4, PA6 nel corso di 7 campagne di monitoraggio tra il 14 Marzo e il 19 Settembre 2017, mentre per gli stress period rimanenti è stata fatta una stima individuando una correlazione tra le suddette misure e il livello misurato dall'idrometro Ponte per Montioni (fonte: Servizio Idrologico Regionale di regione Toscana). Per quanto riguarda l'idrometro Vecchia SS Aurelia, è stata invece calcolata una media dei valori misurati sulla durata di ogni stress period. Per infittire la discretizzazione del corso fluviale, sono state effettuate allo stesso modo delle stime di livello nel punto Ponte per Cafaggio, mentre nell'ultimo tratto del profilo (quando questo non è secco) si è assunto che il livello fluviale si attesti al livello del medio mare.

Si è assunto inoltre che lo spessore del letto fluviale sia pari ad 1 m e che la base del letto fluviale sia 1 m al di sotto del tetto del modello per tutti e sette i tratti individuati. Come già accennato nel paragrafo 4.1.2, la superficie del piano campagna nelle celle intersecate dal fiume è stata posta a 2 cm al di sotto del minimo livello rilevato nei punti rappresentati in Fig. 4.8. È stato poi effettuato un controllo sull'elevazione del bottom del letto fluviale rispetto al letto della copertura superficiale: nelle celle in cui il letto fluviale è completamente contenuto nello strato più superficiale, il fiume è in contatto con i sedimenti della copertura; se, invece, il bottom del letto fluviale è al di sotto del letto della copertura, è garantita la connessione idraulica con il secondo strato del modello. In quest'ultimo caso, le celle corrispondenti nello strato superficiale sono state inattivate.

Infine, i valori di conducibilità idraulica dei sedimenti del letto fluviale sono stati oggetto di calibrazione. E' stato inizialmente utilizzato un valore pari a 86.4 m/giorno per il primo segmento a monte del profilo, un valore di 43.2 m/giorno per il secondo segmento e di 0.432 m/giorno per i restanti segmenti fino alla linea di costa. Si noti che nei tratti completamente secchi è stata imposta una conducibilità idraulica nulla, in modo che non si verifichi alcuno scambio idrico tra il fiume e l'acquifero.

4.5 Termini di ricarica ed estrazione

4.5.1 Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace (ovvero il tasso di precipitazione che raggiunge la tavola d'acqua) è stata implementata per mezzo del pacchetto Recharge (RCH) di MODFLOW. Si tratta di una condizione del II tipo o flusso imposto, che viene espressa come un flusso di ricarica [L/T] e rappresenta una frazione della pioggia lorda. Tale flusso

di ricarica viene poi moltiplicato internamente al codice per l'area della cella alla quale questa condizione viene applicata, per ottenere una portata volumetrica [L^3/T].

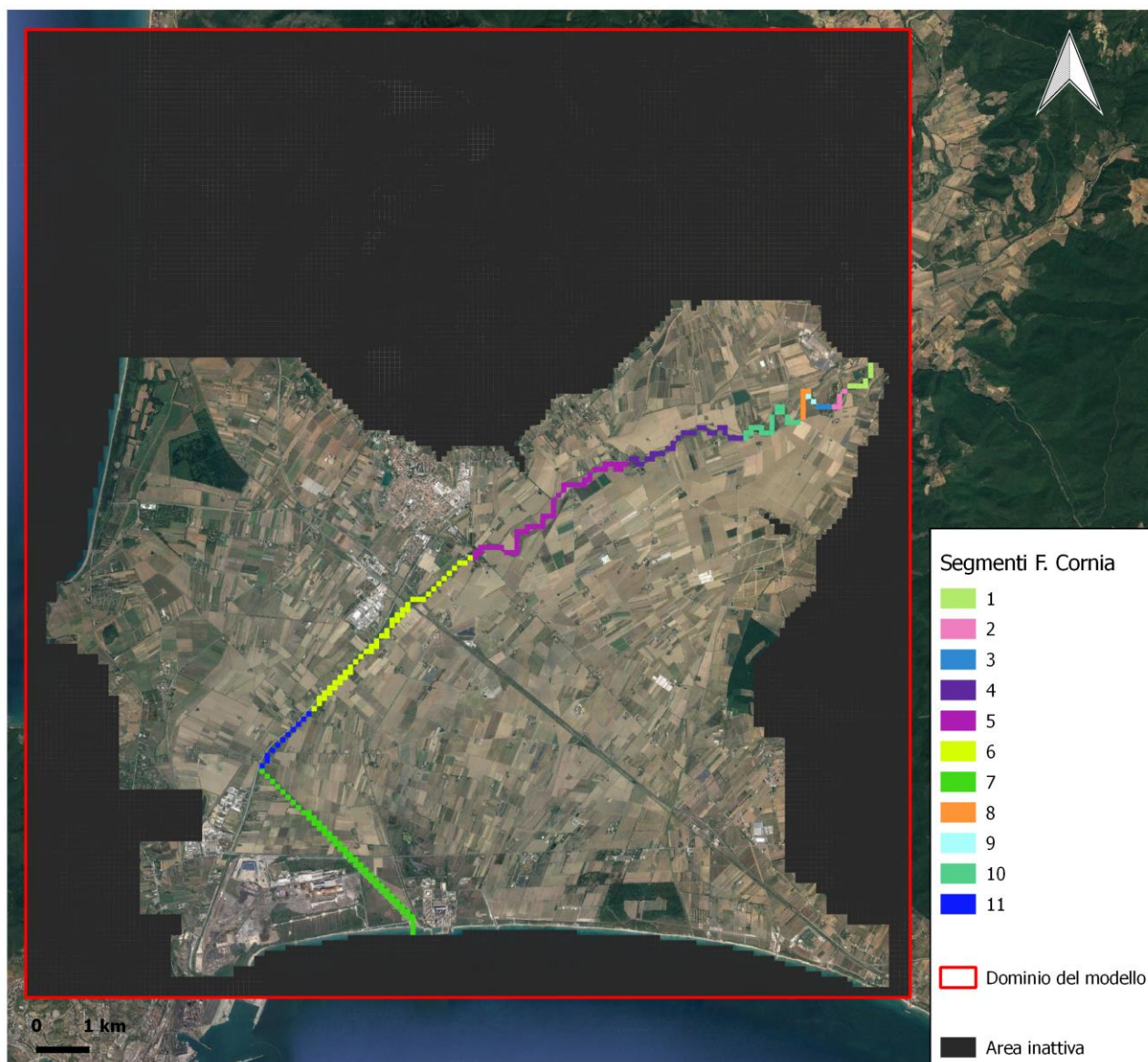
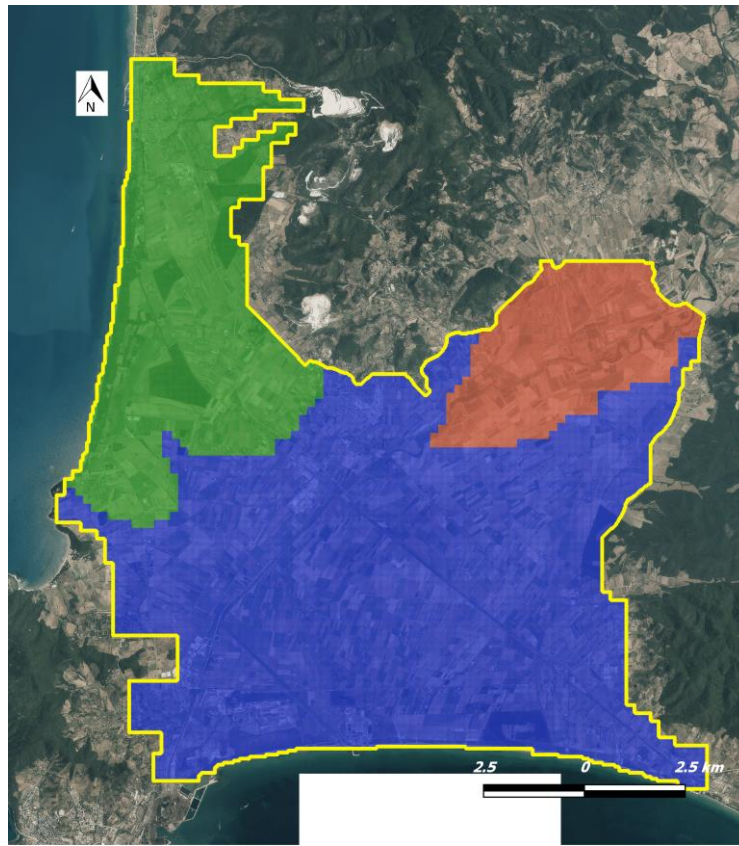


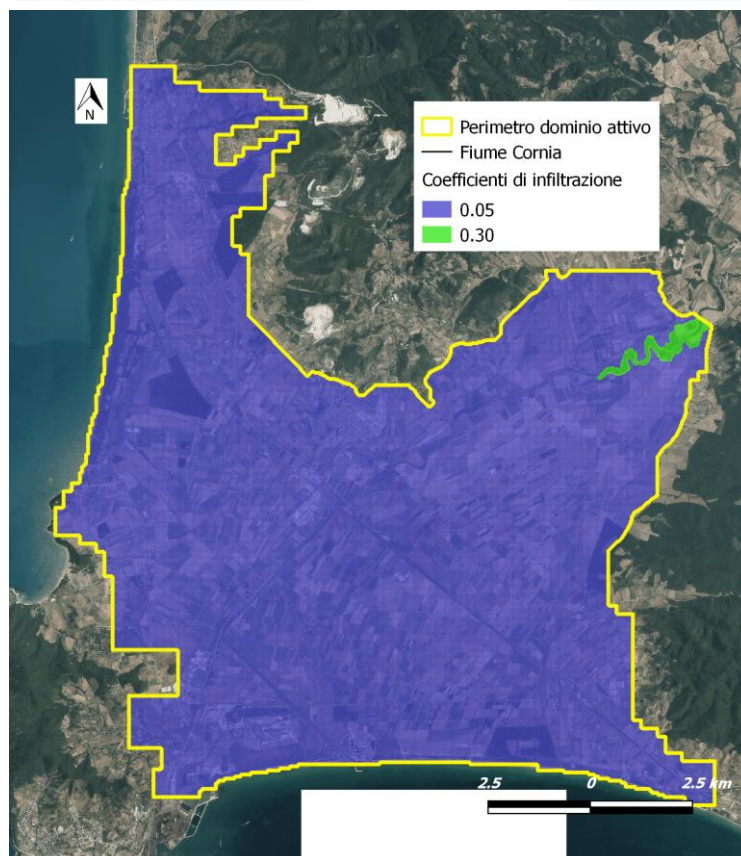
Figura 4.8. Suddivisione del profilo del Fiume Cornia in segmenti.

Sono state distinte tre zone a diversa piovosità (Fig. 4.9 (a)) per tener conto della suddivisione riportata in Regione Toscana (2003). Si tenga conto del fatto che in Regione Toscana (2003) non sono riportati i limiti di queste tre zone e che solo per l'area di Pianura sono riportati i valori di precipitazione media e l'estensione delle aree alle quali tali valori si riferiscono. I valori di piovosità media per le tre zone definite sono stati pertanto dedotti dalle misure effettuate dai seguenti pluviometri appartenenti alla rete del Sistema Idrologico Regionale di Regione Toscana: S. Vincenzo, Suvereto, Venturina e Vecchia SS Aurelia. In particolare, i valori di piovosità assegnati alle celle nella zona rossa sono stati ricavati mediando i valori misurati dalla stazione pluviometrica di Suvereto su ogni stress period. Allo stesso modo, i valori di piovosità assegnati alle celle nella zona verde sono stati ricavati mediando i valori misurati dalla stazione pluviometrica di S. Vincenzo su ogni stress period. I valori di piovosità assegnati alle celle nella zona blu sono stati invece ricavati come media dei valori misurati dalle stazioni pluviometriche di Venturina e Vecchia SS Aurelia. La distribuzione relativa alla piovosità media così ottenuta è stata poi moltiplicata per dei coefficienti di infiltrazione Fig. 4.8 (b). Si è assunto che il tasso di infiltrazione della pioggia lorda sia del 5% sulla maggior parte della piana, dove

affiorano sedimenti limosi, e del 30% in corrispondenza dell'affioramento di sedimenti ghiaiosi nell'area di Forni. Il flusso di ricarica stimato è stato successivamente sottoposto a calibrazione.



(a)



(b)

Fig. 4.9. (a) Definizione delle tre zone di piovosità. (b) Definizione dei coefficienti di infiltrazione per ottenere la ricarica efficace.

4.6.2 Prelievi

I prelievi antropici sono stati simulati con una condizione a flusso imposto mediante il pacchetto Well (WEL) di MODFLOW. L'implementazione di questo pacchetto richiede che siano note le coordinate dei pozzi e le portate di estrazione. Sono stati simulati i prelievi antropici per scopi irrigui, idropotabili ed industriali. La localizzazione dei punti di prelievo suddivisi per tipologia di utilizzo nell'area di studio è mostrata in Fig. 4.11.

Prelievi irrigui

Per la stima delle portate estratte per scopi irrigui si è fatto riferimento alle fonti elencate di seguito:

- lo shapefile poligonale di uso del suolo nell'area di studio, elaborato per l'anno 2017 e reperito dalla banca dati ARTEA di Regione Toscana;
- lo shapefile puntuale di pozzi censiti per scopi irrigui nell'area di studio, reperito dalla banca dati INCAS.tro della Provincia di Livorno.

Per stimare le portate estratte per scopi irrigui, sono stati innanzitutto prodotti tre livelli informativi relativi alla distribuzione sull'area di studio delle colture maggiormente idroesigenti. Sono state individuate a tal proposito colture orticole, serre e vivai. I tre livelli informativi prodotti sono riferiti a: (i) la distribuzione di colture orticole nel periodo invernale, (ii) la distribuzione di colture orticole nel periodo estivo, (iii) la distribuzione di serre e vivai come specie idroesigenti attive tutto l'anno. Lo shapefile poligonale di uso del suolo è stato pertanto suddiviso in tre file vettoriali per rappresentare le categorie sopracitate.

Per ognuno di questi file vettoriali è stato eseguito un raggruppamento delle parcelle in base alla distribuzione dei pozzi di estrazione reperiti dalla banca dati INCAS.tro. Ad ognuno dei gruppi di parcelle individuati è stato assegnato un pozzo, per il quale è stata stimata la portata totale estratta per soddisfare il fabbisogno idrico delle colture presenti su ogni parcella di quel determinato gruppo. Si riporta in Fig. 4.10 la distribuzione dei pozzi individuati per l'irrigazione dei campi coltivati a ortive e di serre e vivai. Si riporta inoltre in Tabella 4.2 il fabbisogno idrico stimato per le colture individuate nei rispettivi periodi di irrigazione e informazioni circa la distribuzione spaziale di queste colture. In base a quanto riportato in Tab. 4.2, si stima in qualche Mm^3 di acqua l'irrigazione delle specie orticole invernali, 7 Mm^3 per l'irrigazione delle specie orticole estive e poco meno di 1 Mm^3 per soddisfare il fabbisogno di serre e vivai.

Le portate di estrazione stimate per scopi irrigui sono state oggetto di calibrazione.

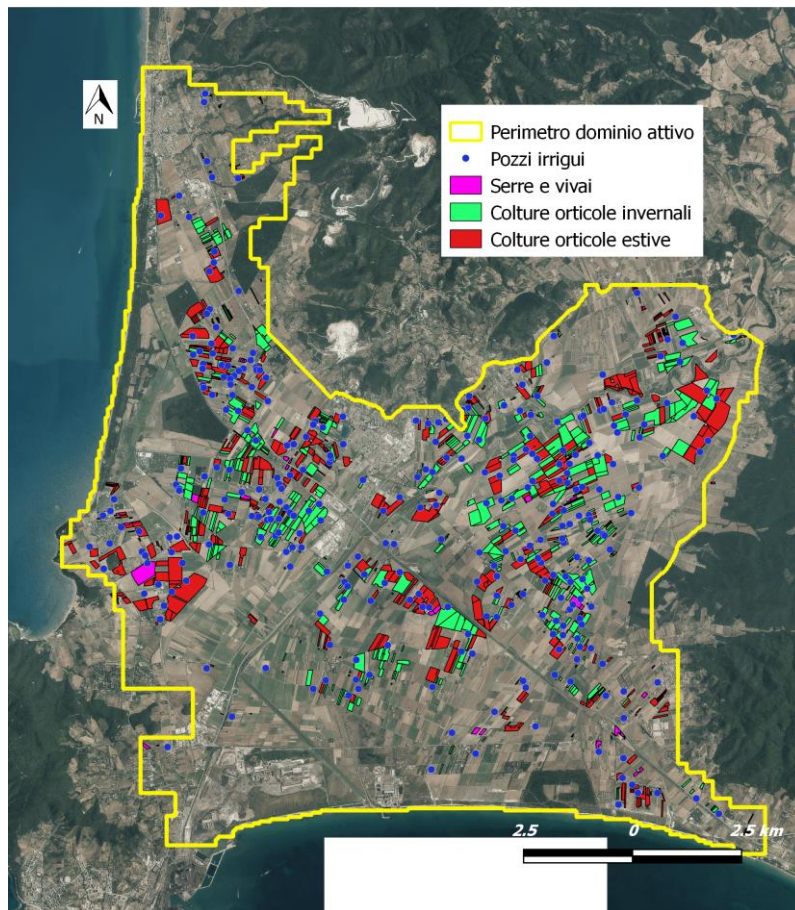


Figura 4.10. Distribuzione dei pozzi utilizzati per l'irrigazione delle varie parcelle.

Prelievi idropotabili

I dati utilizzati per definire questo termine di estrazione sono stati forniti da ASA S.p.A. o reperiti dalla Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI; Regione Toscana e Consorzio LaMMA, 2012). In quest'ultimo report tecnico si fa riferimento a valori di portata totale per ogni campo pozzi. Tali valori, ove non disponibili informazioni dirette da parte di ASA S.p.A., sono stati equamente distribuiti tra tutti i pozzi appartenenti allo stesso campo pozzi. Inoltre, considerati il dettaglio spaziale della griglia di calcolo e la concettualizzazione del pacchetto WEL, le portate dei pozzi localizzati entro una stessa cella sono state sommate.

4.6 Condizioni iniziali

Nel modello implementato, non sono state impostate condizioni iniziali legate all'andamento della superficie piezometrica, in quanto il primo stress period è stato eseguito in stato stazionario. È stato invece assegnato a tutte le celle del dominio attivo un valore iniziale fittizio pari alla quota del tetto del modello.

4.7 Solutore numerico

Come solutore numerico è stato utilizzato il pacchetto PCG2 (*Preconditioned Coniugate Gradient*) di MODFLOW, con numero massimo di *outer iterations* pari a 1000 e di *inner iterations* pari a 1000. È stato inoltre adottato un criterio di convergenza per la variazione del carico idraulico pari a 0.001 m. Allo stesso modo, il criterio di convergenza adottato per il bilancio idrico residuo è pari a 0.001 m³/giorno.

Specie invernali	Area totale occupata (ha)	% area sul totale	Area cumulata (%)	Periodo culturale	Fabbisogno irriguo (m³/ha)	
					periodo irrigazione marzo-agosto	periodo irrigazione settembre-ottobre
CARCIOFO	447.425	42.30	42.30	Agosto-Ottobre	4000	2000
SPINACIO	302.573	28.61	70.91	Aprile-Ottobre	4000	1000
CAVOLO	125.028	11.82	82.73	Agosto-Ottobre	1000	1000
ORTIVE A PIENO CAMPO	58.059	5.49	88.21	Aprile-Agosto	6000	-
ASPARAGO	40.130	3.79	92.01	Dicembre-Aprile	1000	-
PORRO	25.151	2.38	94.39	Dicembre-Aprile	2000	-
BIETOLA	15.907	1.50	95.89	Agosto-Ottobre	1000	1000
ZUCCA	9.731	0.92	96.81	Agosto-Ottobre	2000	1000
FINOCCHIO	6.937	0.66	97.47	Agosto-Ottobre	1000	1000
CARDI	6.675	0.63	98.10	Dicembre-Aprile	1000	-
CAVOLFIORRE	6.212	0.59	98.68	Agosto-Ottobre	1000	1000
INDIVIA o SCAROLA	4.646	0.44	99.12	Dicembre-Aprile	2000	-
BRASSICA CARINATA	4.553	0.43	99.55	Agosto-Ottobre	500	1000
BROCCOLETTO DI RAPA	2.669	0.25	99.81	Agosto-Ottobre	500	1000
CAVOLO RAPA	0.937	0.09	99.89	Agosto-Ottobre	1000	1000
CAVOLO BROCCOLO	0.720	0.07	99.96	Agosto-Ottobre	1000	1000
LATTUGA LATTUGHINO	0.269	0.03	99.99	Dicembre-Aprile	2000	-
PISELLO	0.124	0.01	100.00	Dicembre-Aprile	1000	-

Specie estive	Area totale occupata (ha)	% area sul totale	Area cumulata (%)	Periodo culturale	Fabbisogno irriguo (m³/ha)	
					periodo irrigazione marzo-agosto	periodo irrigazione settembre-ottobre
MELONE	305.053	25.81	25.81	Aprile-Agosto	6000	-
ORTIVE A PIENO CAMPO	299.836	25.37	51.18	Aprile-Agosto	6000	-
POMODORO	263.890	22.33	73.50	Aprile-Agosto	6000	-
PATATA	132.974	11.25	84.75	Aprile-Agosto	6000	-
COCOMERO	94.995	8.04	92.79	Aprile-Agosto	6000	-
ZUCCHINO	33.871	2.87	95.66	Aprile-Agosto	6000	-
POMODORINO	16.825	1.42	97.08	Aprile-Agosto	8000	-
ORTI FAMILIARI	9.603	0.81	97.89	Aprile-Agosto	3000	-
PEPERONE	6.564	0.56	98.45	Aprile-Agosto	6000	-
CIPOLLA	5.477	0.46	98.91	Aprile-Agosto	5000	-
FRAGOLA	4.749	0.40	99.31	Aprile-Agosto	5000	-
MELANZANA	3.783	0.32	99.63	Aprile-Agosto	6000	-
CETRIOLO	1.554	0.13	99.76	Aprile-Agosto	6000	-
FAGIOLINO	1.139	0.10	99.86	Aprile-Agosto	3000	-
CAROTA	0.922	0.08	99.94	Aprile-Agosto	5000	-
SEDANO	0.645	0.05	99.99	Aprile-Agosto	3000	-
OKRA o OCRA o GOMBO	0.084	0.01	100.00	Aprile-Agosto	3000	-

Specie annuali	Area totale occupata (ha)	% area sul totale	Area cumulata (%)	Periodo colturale	Fabbisogno irriguo (m³/ha)
VIVAI - SPECIE ORNAMENTALI	32.965	60.65	60.65	Tutto l'anno	12000
SERRE	13.568	24.96	85.61	Tutto l'anno	18000
VIVAI - ALTRI	6.773	12.46	98.07	Tutto l'anno	12000
VIVAI ORTICOLI	1.048	1.93	100.00	Tutto l'anno	12000

Tabella 4.2. Elenco delle colture maggiormente idroesigenti. Sono indicati il fabbisogno irriguo nei rispettivi periodi di irrigazione e la distribuzione spaziale delle stesse.

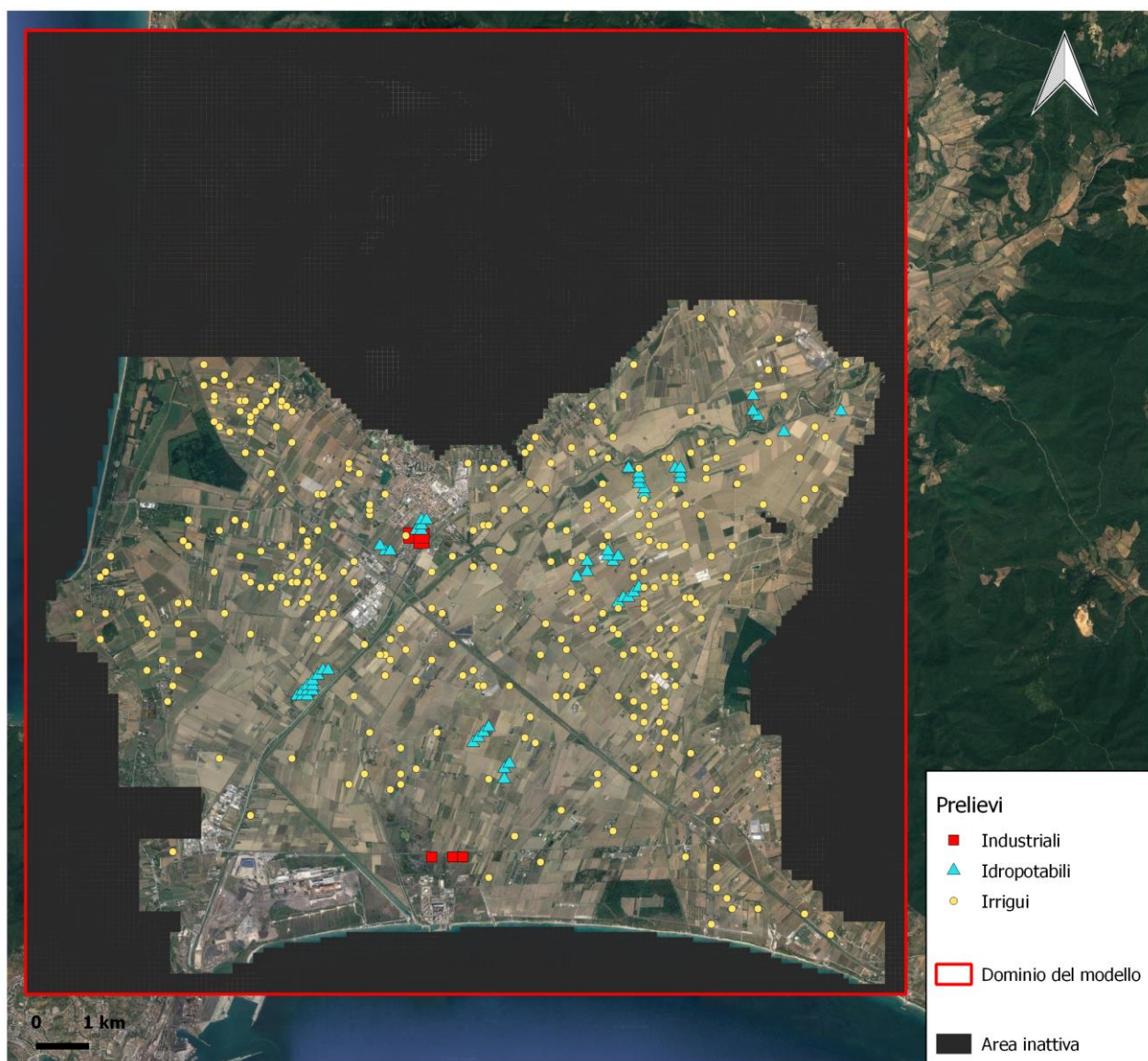


Fig. 4.11. Localizzazione dei pozzi in emungimento suddivisi per tipologia di utilizzo.

Campo pozzi	Portata media (m³/giorno)	Fonte
Franciana	1460	ASA S.p.A.
Ex Aeroporto	74	ASA S.p.A.
Coltie	8279	ASA S.p.A.
Macchialta	4912	ASA S.p.A.
Amatello	7744	ASA S.p.A.
Roviccione	5349	ASA S.p.A.
Casetta di Cornia	6924	ASA S.p.A.
La Gera	27	ASA S.p.A.
Vivalda	46	ASA S.p.A.

Tab. 4.4. Elenco dei campi pozzi per scopi idropotabili e relativi valori medi di portata.

4.8 Simulazione dell'intrusione salina

Per la simulazione del processo dell'intrusione salina è stato utilizzato il codice SEAWAT (Langevin et al., 2007). Per l'applicazione di tale codice si sono considerate per le condizioni iniziali i valori di concentrazione di cloruri acquisiti grazie al monitoraggio effettuato nel mese di Giugno 2018. Al dominio sono stati associati valori dei parametri idrodispersivi derivanti da letteratura per sedimenti simili poiché non sono disponibili valori derivanti da prove sperimentali nell'area di studio.

5. Calibrazione del modello

La calibrazione del modello numerico implementato ha riguardato i seguenti parametri:

- conducibilità idraulica dell'acquifero nelle tre direzioni Cartesiane;
- coefficiente di immagazzinamento specifico dell'acquifero;
- portate in ingresso dai rilievi e afflussi legati al contributo idrotermale dall'area di Forni;
- portate di estrazione per scopi irrigui;
- conducibilità idraulica dei sedimenti del letto fluviale;
- ricarica efficace meteorica.

La calibrazione è stata effettuata utilizzando un approccio trial-and-error e valutando l'accordo tra il carico idraulico simulato per l'acquifero e il livello piezometrico misurato nel corso delle campagne di monitoraggio eseguite tra Aprile 2016 e Aprile 2021. La rete dei punti di monitoraggio del livello di falda utilizzata nella fase di calibrazione è costituita da 44 punti ed è mostrata in Fig. 5.1. Si noti che la suddetta rete include anche i piezometri della rete SIR della Regione Toscana: Venturina, Montioncello, La Sdriscia, Cigri 14 e Amatello 47.



Figura. 5.1. Rete di monitoraggio del livello di falda, inclusi i piezometri della rete SIR.

In Figura 5.2 si riporta lo scatter plot valori osservati/vs. valori simulati con il totale dei punti di osservazione utilizzati nella fase di calibrazione. IN totale sono state utilizzate 656 osservazioni. Il valore medio dei residui del modello calibrato è pari a 1,07 m, mentre il valore assoluto della media dei residui è pari a 2,30 m. Durante la fase di calibrazione del modello, si è tenuto a riferimento l'andamento del bilancio idrico ed in particolare si è conto delle osservazioni sul deflusso del fiume Cornia eseguite durante le varie campagne di monitoraggio

in punti selezionati, e sugli scambi tra questo e l'acquifero. Ovviamente, data la scarsità di dati, in particolare relativamente ai parametri idrodinamici, non permette di calibrare alcuni punti. Per questi punti saranno necessarie indagini aggiuntive che forniscano ulteriori informazioni da includere come dati di input nel modello numerico.

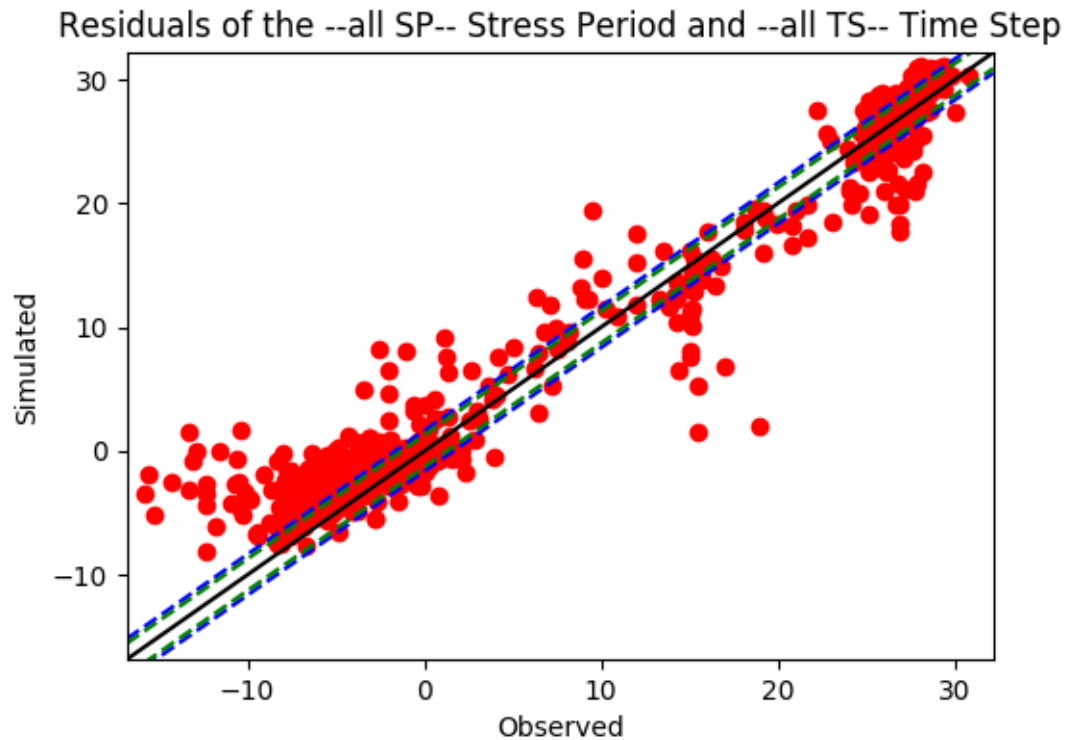


Figura 5.2. Scatter plot dei valori simulati vs osservati del carico idraulico dell'acquifero per tutti gli stress period simulati.

6. Presentazione e discussione dei risultati

In questo Capitolo vengono presentati e commentati i risultati dello scenario di simulazione implementato, con particolare riferimento al carico idraulico simulato nell'area di studio ed al bilancio idrico del sistema investigato. Alla luce di tali risultati, verranno infine discusse le principali difficoltà incontrate in fase di implementazione del modello.

6.1 Carico idraulico simulato

La mappa in Figura 6.1 riporta le curve di livello del carico idraulico simulato per l'acquifero al 27 Ottobre 2017, come esempio dell'andamento del carico idraulico alla fine di un periodo estivo siccitoso.



Fig. 6.1. Carico idraulico simulato per l'acquifero al 27 Ottobre 2017.

Dalle isopieze riportate in Fig. 6.1 si deduce che il deflusso della falda nella parte nord-orientale del bacino è principalmente orientato dall'area di Forni verso il centro della piana in direzione NO-SE, in accordo con il modello concettuale. Il carico idraulico simulato varia da circa 30 m slmm nell'area di Forni, dove il fiume ricarica ampiamente l'acquifero, a circa 4 m sotto il livello medio del mare a partire da Casetta di Cornia. Gli emungimenti in atto nella pianura causano poi la presenza di un esteso cratere piezometrico, fonte di richiamo di acqua di mare e quindi intrusione salina, sia dal lato del Golfo di Follonica sia dal lato di San Vincenzo.

6.2 Analisi del bilancio idrico

Il periodo simulato ha permesso la redazione di bilanci idrogeologici per cinque periodi. Nella Tabella 6.1 sono presentati tali periodi.

Periodo simulato	Stress periods
1 Aprile 2016 – 11 Aprile 2017	1 - 9
12 Aprile 2017 – 07 Giugno 2018	10 - 25
8 Giugno 2018 – 21 Maggio 2019	26 - 30
22 Maggio 2019 – 11 Giugno 2020	31 - 34
12 Giugno 2020 – 22 Aprile 2021	35 - 38

Tabella 6.1. Periodi per cui è stato simulato il bilancio idrico della Val di Cornia.

In Tabella 6.2 si riportano invece i bilanci simulati per il sistema acquifero. I termini in gioco sono:

- flusso attraverso le coste;
- flusso in ingresso dai rilievi montuosi e collinari attraverso i bordi del dominio attivo e contributi idrotermali;
- scambio tra l'acquifero e il Fiume Cornia;
- infiltrazione efficace meteorica;
- prelievi da falda.

In base a quanto riportato in Tab. 6.,2 si osserva che il principale termine di ricarica dell'acquifero è rappresentato dagli afflussi dai rilievi montuosi e collinari e dalla risalita di acque termali dalla falda profonda. Questo valore è in discreto accordo con quanto riportato in Regione Toscana (2003; si faccia riferimento alla Tab. 2.1 ed alla Fig. 2.7), in cui era stato stimato un afflusso complessivo tra 15 Mm³/anno e 18 Mm³/anno attraverso i bordi del dominio attivo. La ricarica legata al Fiume Cornia presenta valori sottostimati rispetto a quanto riportato in Regione Toscana (2003; si faccia riferimento alla Tab. 2.1 ed alla Fig. 2.7), in cui era stata stimata una ricarica complessiva di 12 Mm³/anno principalmente dal primo tratto a monte del Fiume Cornia. Tra le uscite, il principale termine è legato invece ai prelievi per scopi idropotabili, irrigui ed industriali.

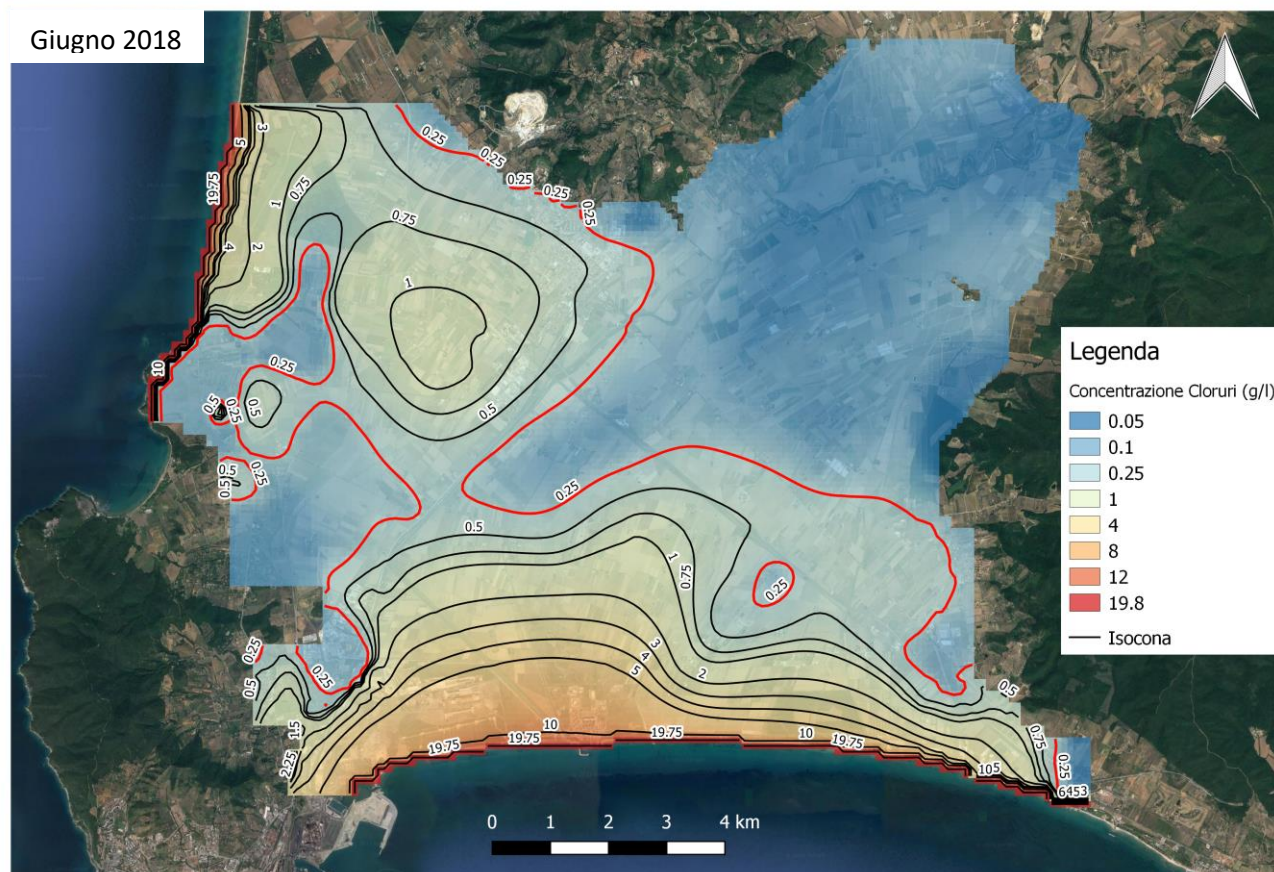
Entrate	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21
Variazione immagazzinamento	6,2	9	3,4	5,2	3,6
Ricarica di subalveo	7,4	6,4	8,7	9,4	8
Intrusione acqua di mare	1,3	5,6	3,5	3,6	2,4
Afflusso dai rilievi montuosi e collinari, incluso contributo idrotermale	14	13,4	11,7	14,3	11,8
Ricarica meteorica	3,9	4,5	3,7	4,5	4,5
Totale entrate	32,8	38,9	31	37	30,3
Uscite	16/17	17/18	18/19	19/20	20/21
Variazione immagazzinamento	4,2	5,7	4,7	5,5	5,3
Drenaggio acque di falda	1,6	1,1	2,9	3,6	3,4
Deflusso attraverso la linea di costa	2,4	0,9	0,8	1,1	1,1
Prelievi da falda	24,4	31,2	23	27,5	21,7
Totale uscite	32,6	38,9	31,4	37,7	31,5

Tabella 6.2. Bilancio idrico simulato per i periodi riportati in Tab. 6.1 (valori in Mm³ per periodo).

Oltre al consumo dell'immagazzinamento, monitorato negli anni 2016/17 e 2017/18, il modello permette di simulare l'ingresso di acqua di mare – e la sua riduzione nel periodo 2019- 2021, come effettivamente monitorato. Infine, il modello permette di simulare l'aumento di immagazzinamento tra il 2019 ed il 2021

con un aumento variabile tra 0,3 e 1,7 Mm³. In generale, il bilancio mostra chiaramente come ad un aumento dei prelievi corrisponda un aumento del consumo dell'immagazzinamento e un aumento dei flussi di acqua di mare in ingresso nell'acquifero.

La Figura 6.2 presenta infine l'andamento simulato della distribuzione dei cloruri a Giugno 2018.



Confrontando tale rappresentazione con l'interpolazione dei dati monitorati in tale periodo si può osservare la qualità della simulazione.

Figura 6.2. Mappa della distribuzione simulata della salinizzazione dell'acquifero della pianura del Fiume Cornia (Giugno 2018 – SP 25).

7. CONCLUSIONI

Il presente report illustra le varie fasi di implementazione del modello numerico del flusso del sistema idrogeologico della pianura del Fiume Cornia per mezzo del codice MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) e dell'interfaccia FREEWAT (Rossetto et al., 2015), e della simulazione dell'intrusione salina (con codice SEAWAT; Langevin et al., 2007) con l'obiettivo di ottenere una descrizione quantitativa del deflusso della falda e di proporre ulteriori indagini da svolgere per l'eventuale approfondimento delle conoscenze sullo stato della risorsa e trovare ulteriori soluzioni per arginare il disequilibrio del bilancio.

Il modello implementato è costituito da due strati eterogenei e con spessore variabile, a rappresentare i sedimenti limosi superficiali e l'acquifero in sabbie e ghiaie. Il campo di moto è stato simulato in condizioni transitorie dal 1 Aprile 2016 al 15 Dicembre 2021. Per l'implementazione delle proprietà idrodinamiche dei due strati e delle condizioni al contorno e dei termini di ricarica ed estrazione si è fatto riferimento a quanto riportato in Regione Toscana (2003). I parametri risultati maggiormente sensibili sono poi stati calibrati mediante un approccio *trial-and-error* utilizzando le osservazioni sul carico idraulico dell'acquifero e quelle sul deflusso del Fiume Cornia, acquisite nel corso di campagne di monitoraggio.

Il principale termine di ricarica dell'acquifero è rappresentato dagli afflussi dai rilievi montuosi e collinari e dalla risalita di acque termali dalla falda profonda, mentre la ricarica complessiva dal Fiume Cornia risulta ridimensionata rispetto a quanto presentato in precedenti lavori (si veda ad es. Regione Toscana (2003).

Per quanto riguarda invece i prelievi per scopi irrigui, idropotabili ed industriali, questi variano in dipendenza delle condizioni meteo-climatiche tra 22 e 31 Mm³.

Infine, il modello simula un ingresso fino a circa 5 Mm³/anno attraverso le coste, valore ben al di sopra di quanto stimato in Regione Toscana (2003). Ciò è imputabile al fatto che i prelievi in atto per scopi irrigui ed idropotabili inducono ampi coni di depressione su gran parte dell'area di studio, ben sotto lo zero del livello del medio mare. Dalle simulazioni effettuate si deduce che per il completo riequilibrio dell'acquifero della Val di Cornia, nella presente condizione, è necessario ridurre i prelievi, o ricercare nuove fonti (o una soluzione comprensiva delle due opzioni) per un volume variabile tra circa 2,5 e 9 Mm³/anno in dipendenza delle diverse condizioni meteo-climatiche.

Il modello implementato in questo studio costituisce un importante ed innovativo strumento per la gestione della risorsa idrica nella Val di Cornia. Applicazioni pratiche possono riguardare, ad esempio, la simulazione della disponibilità della risorsa in base all'andamento atteso delle precipitazioni oppure all'effetto di un incremento dei prelievi. Il modello presentato è inoltre utilizzabile per la simulazione del fenomeno dell'intrusione salina.

BIBLIOGRAFIA

Bacino Toscana Costa (2008). Corpi idrici a criticità e relativi limiti d'uso in riferimento all'obiettivo di equilibrio del bilancio idrico – Sezione 3 (Minimo deflusso vitale – Ipotesi di approccio da un punto di vista quantitativo per il bacino del Fiume Cornia).

Barazzuoli P, Bouzelboudjen M, Cucini S, Kiraly L, Menicori P, Salleolini M (1998). Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy): database design for groundwater management. *Environmental Geology*, 39:123-143.

Bianchini G, Pennisi M, Cioni R, Muti A, Cerbai N, Kloppmann W (2005). Hydrochemistry of the high-boron groundwaters of the Cornia aquifer (Tuscany, Italy). *Geothermics*, 34:297-319.

CNR – IGG e Consorzio LaMMA (2009a). Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS).

CNR – IGG e Consorzio LaMMA (2009b). Integrazione alla “Caratterizzazione geologica, idrogeologica e idrogeochimica dei Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana (CISS)” - 32CT020 “Corpo Idrico della Pianura del Cornia”; 32CT021 “Corpo Idrico del Terrazzo di San Vincenzo”.

Consorzio di Bonifica Val di Cornia (2004). Misure di deflusso sul Fiume Cornia – Rapporto finale. Getas – Petrogeo S.r.l.

Ghezzi G, Ghezzi R e Muti A (1993). Hydrogeological study of Piombino Plain (Cornia R. Plain and terrace S. Vincenzo- Palmentello) (in Italian). *Quad. Stor. Nat. di Livorno, Suppl. n. 2*, pagg. 213-215.

Ghezzi G, Ghezzi M e Muti A (1995). Carta Idrogeologica della Pianura di Piombino (Pianura del Fiume Cornia e Terrazzo di S. Vincenzo - Palmentello). *Quad. Mus. Stor. Nat. Livorno, Vol. 13, Suppl. n. 2*.

Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, W., 2007, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. Book 6, Chapter A22, 39 p.

Regione Toscana - Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali, Area Tutela delle Acque Interne e Costiere (2003). Studio conoscitivo del contesto idrogeologico della Val di Cornia di supporto alla pianificazione in materia di risorsa idrica e di tutela delle acque – relazione finale.

Harbaugh AW (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 6-A16, 253 p.

Hill MC e Tiedeman CR (2007). Effective groundwater model calibration with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. Wiley & Sons, New York, 455 p.

Regione Toscana, CNR - IGG e Consorzio LaMMA (2008). Corpi Idrici Sotterranei Significativi della Regione Toscana DGRT 225/2003.

Regione Toscana e Consorzio LaMMA (2012). Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI) - Documento tecnico di sintesi.

Rossetto R, De Filippis G, Borsi I, Foglia L, Cannata M, Criollo R, Vázquez-Suñé E (2018) Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management, *Environmental Modelling & Software* 107:210-230.