Centro Interdipartimentale di Ricerca e per i servizi
nel settore delle Costruzioni e del Territorio - CRICT

Aree di salvaguardia campo pozzi SAT:

Restituzione su mappa CTR delle zone di protezione del campo pozzi SAT di Arcola (SP)

Aprile 2025

Responsabile
Prof. Francesco RONCHETTI

Collaboratori
Dott. Vincenzo CRITELLI
Dott. Marco SABATTINI
Dott. Alessio MAININI

REPORT ELABORAZIONE MAPPA

(versione 1.0)

Sommario

1. PREMESSA 4

2. MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE 5

2.1. Inquadramento geografico area di interesse 5

2.2. inquadramento geologico dell'area di interesse 6

2.3. Metodi utilizzati per elaborare il modello idrogeologico 10

2.4. Sezioni geologiche 16

2.5. Modello idrogeologico concettuale 24

2.6. Monitoraggio livello idrometrico fiumi 28

2.7. Pozzi acquedottistici presenti nella area del modello 30

2.8. Monitoraggio piezometrico 33

2.9. Valori di permeabilità da prove di pompaggio realizzate nella bassa Val Magra 47

2.10. Stato attuale intrusione marina 50

3. BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI BACINO 55

3.1. Sintesi 55

3.2. Dati meteo 56

3.3. Uso del suolo, altimetria e corsi d'acqua principali 57

3.4. Calcolo dell'evapotraspirazione potenziale 59

3.5. Determinazione delle piogge efficaci 60

3.6. Determinazione delle portate alle aste fluviali selezionate 60

3.7. Prelievi acquedottistici e Canale Lunense 62

Pozzi acquedottistici 62

Pozzi privati 63

Canale Lunense 64

3.8. Cambiamenti climatici **65**

3.9. Bilancio idrogeologico analitico attuale e futuro **66**

4. MODELLAZIONE NUMERICA **69**

4.1. Metodologia e codici di calcolo **69**

4.2. Strategia di modellazione **69**

4.3. Modellazione del flusso **70**

Discretizzazione spaziale e temporale 70

Condizioni al contorno e iniziali 71

Condizioni interne 73

Parametrizzazione iniziale 73

Dettagli di implementazione 75

4.4. Calibrazione del modello **76**

5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE **80**

5.1. Aree di salvaguardia delle captazioni acquedottistiche **82**

6. CONCLUSIONI **85**

BIBLIOGRAFIA **86**

1. PREMESSA

Come da richiesta della Società Acquedotti Tirreni S.p.A. al centro CRICT (Università degli studi di Modena e Reggio E.) è stata elaborata la mappa delle Aree di Salvaguardia del Campo pozzi di Arcola (SAT) in accordo con le Norme della Regione Liguria.

La mappa delle Aree di Salvaguardia è stata realizzata seguendo i seguenti step di attività:

- Elaborazione modello idrogeologico concettuale;
- Elaborazione di un bilancio idrogeologico analitico dell'area;
- Elaborazione modello numerico 3d del flusso idrico sotterraneo.

2. MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE

2.1. Inquadramento geografico area di interesse

L'area di studio ricade in provincia di La Spezia (Liguria) ed attraversa i comuni di Bolano, Vezzano Ligure, S. Stefano di Magra, Arcola, Sarzana, Ameglia, Castelnuovo Magra, Ortonovo (Figura 1).

L'area di studio coincide con la bassa Val Magra, caratterizzata dal passaggio di due corsi d'acqua: il Vara e il Magra, che confluiscono all'altezza di S. Stefano di Magra.

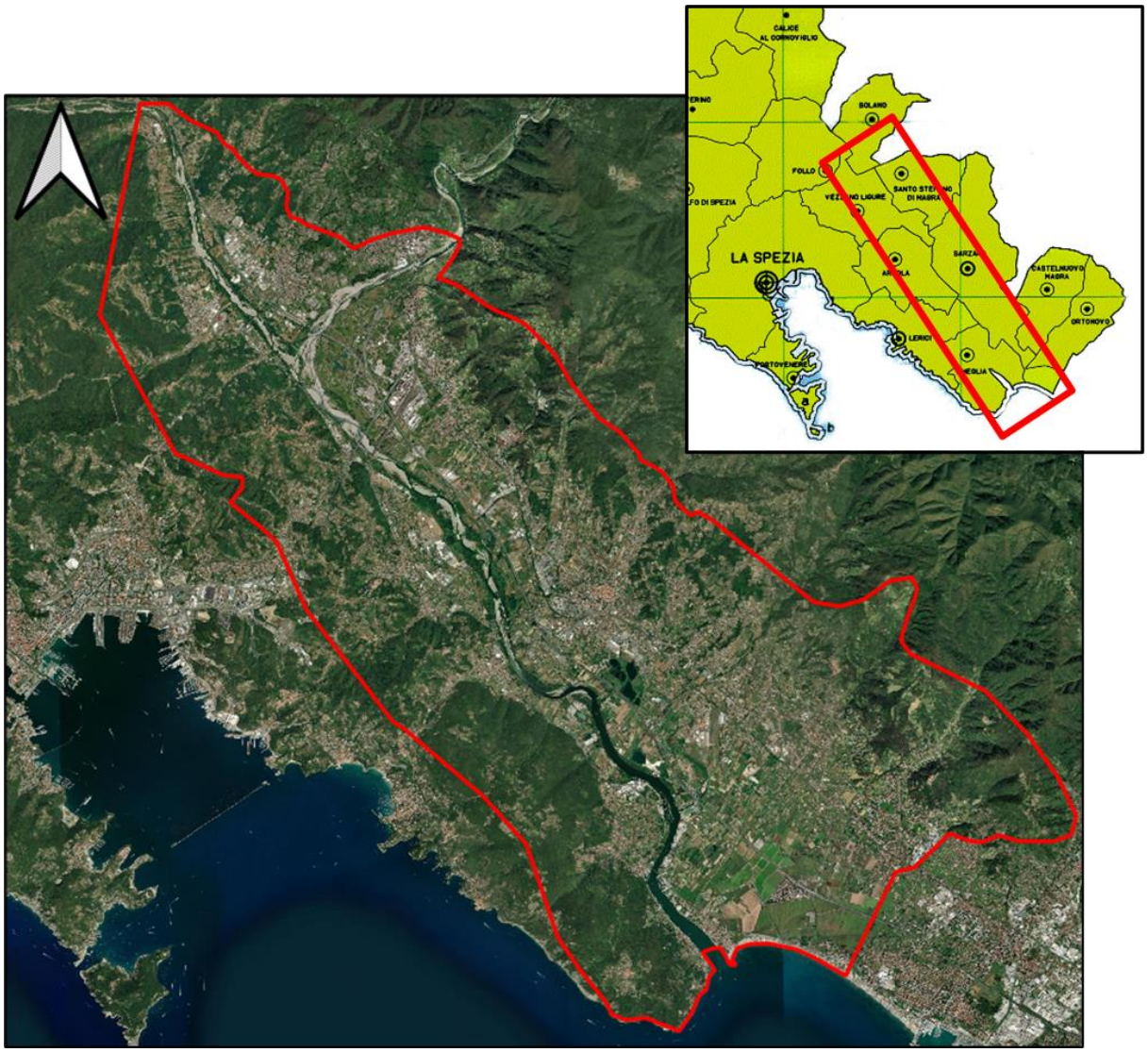


Figura 1 Inquadramento geografico dell'area di studio (in rosso) con riferimento rispetto ai comuni interessati (riquadro in alto a dx).

2.2. inquadramento geologico dell'area di interesse

La zona in esame ricade nei fogli 248 "La Spezia" e 249 "Massa Carrara" della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 ISPRA (Abbate et Al., 2005; Conti et Al., 2011). L'area di studio, geograficamente nella porzione più orientale della Liguria, è parte dell'Appennino Settentrionale, catena orogenica caratterizzata dall'impilamento a falde di diverse successioni appartenenti a domini sedimentatisi su litosfera oceanica (Dominio Ligure, con la sua copertura Epiligure), su litosfera continentale-transizionale assottigliata (Dominio Subligure) e a spessore normale (Dominio Toscano e Umbro-marchigiano). Di seguito, le Unità tettoniche presenti nell'area (informazioni bibliografiche da Abbate et Al., 2005, Pandeli, 2008; Conti et Al., 2019).

Dal basso verso l'alto:

1. UNITA' DI MASSA (UNITÀ METAMORFICA)

Rappresentata nell'area dalla Successione metamorfica di Punta Bianca. E' composta da dagli scisti di S. Terenzo (*Carnico*), dal Gruppo del Verrucano (*Ladinico – Carnico*), dal ciclo sedimentario medio-Triassico (*Asinico – Ladinico*) e dal basamento Ercinico (*Paleozoico*). Affiorante nella zona di Bocca di Magra, è litologicamente caratterizzato da filladi, quarziti, meta-conglomerati, filladi, metà-siltiti, meta-brecce e marmi.

2. FALDA TOSCANA

Brecce di Maralunga (*Miocene medio - superiore*)

Breccia di clasti calcarei e dolomitici, a spigoli vivi, con cemento calcitico. Associati ai Calcari Cavernosi sono presenti livelli, talora potenti, di brecce poligeniche (Brecce di Lerici), costituite da frammenti di rocce metamorfiche. Sono il risultato del sovrascorrimento della falda toscana sopra l'unità di Massa, avvenuta durante il Miocene.

Formazione di La Spezia, LSP (*Norico – Retico superiore*)

Calcari e calcari dolomitici alternati a sottili strati di marne grigie o nerastre. Ambiente deposizionale riducente, di bassa profondità e bassissima energia, di tipo lagunare. Spessore generalmente dell'ordine del centinaio di metri, tranne in alcune località dove è minore, come nella zona di La Spezia.

Calcare Massiccio (*Retico - Hettangiano*)

Calcare bianco, non stratificato, molto cristallino, può diventare grigio fino a grigio scuro, passando con livelli fini marnosi ai sovrastanti Calcari ad Angulati. La parte basale è

dolomitizzata; sono presenti fossili costituiti da resti di alghe, gasteropodi, lamellibranchi, brachiopodi, crinoidi e foraminiferi. Ambiente deposizionale di piattaforma carbonatica, anche di alta energia, come indicato dalla presenza di livelli oolitici.

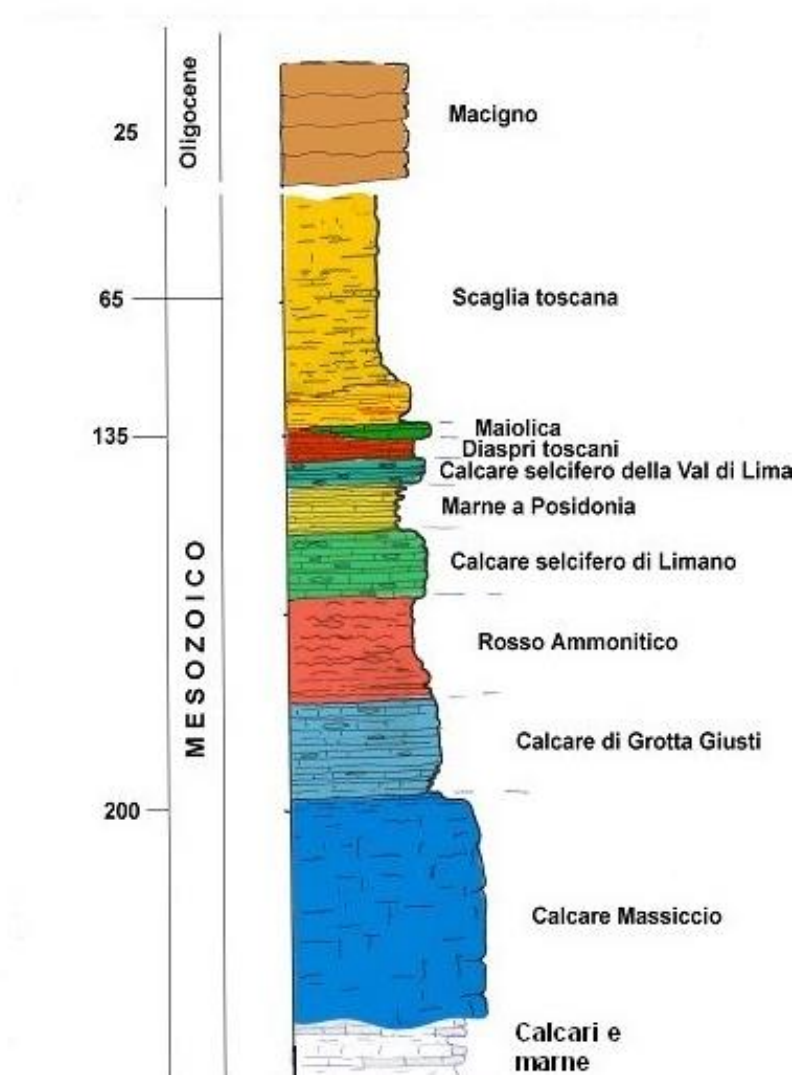


Figura 2 Colonna stratigrafica schematizzata e semplifcata della successione della Falda toscana. Da Pandeli (2008).

Calcare Selcifero - Rosso Ammonitico (*Liass Medio – Superiore)*

Calcari grigi e grigio-avorio a grana fine con liste e noduli di selce (quarzo microcristallino) legati ad un contesto di mare aperto (pelagico) e relativamente profondo. Localmente si presenta nodulare e di colore rosato.

Marne a Posidonia *(Dogger)*

marne e calcari marnosi verdastri-biancastri e rosso fegato.

Diaspri (*Bajociano - Titonico*)

Depositi silicei a radiolari, solitamente in strati di piccolo spessore, a frattura prismatica, in piani ortogonali alla stratificazione, di colore variabile da rosso vinato a verde fino a grigio. Talvolta sono presenti intercalazioni marnose od argillitiche.

Maiolica (*Titonico - Valanginiano*)

Formazione costituita da calcari a grana fine bianchi e grigi e da calcareniti gradate con localizzate liste e noduli di selce, la cui deposizione è avvenuta in modo graduale dalla sottostante formazione dei Diaspri attraverso una serie di marne scure rossastre, con intercalazioni calcaree verdi o grigie.

Scaglia Toscana (*Cretaceo Inferiore – Oligocene inferiore*)

Formazione sintetizzabile nella coesistenza di due facies principali: una argillosa-marnosa e l'altra calcarenitica e calciruditica. La Scaglia, rappresentata nell'area di studio dalla "Scaglia Rossa", presenta una lacuna stratigrafica nella parte basale, per cui poggia con contatto tettonico sulle formazioni precedenti. Al tetto è presente il passaggio al Flysch terrigeno del Macigno, anche se spesso le due Formazioni risultano discordanti, nel qual caso il passaggio è suggerito da intercalazioni arenacee nella Scaglia o, alternativamente, da calcareniti o argilliti nei primi strati del Macigno.

Macigno (*Oligocene superiore*)

Arenaria torbiditica quarzoso-feldspatica con una potenza non inferiore ai 1500 m nella zona di La Spezia e ai 2500 m sul crinale appenninico. Stratificazione netta, con bancate arenacee spesso superiori al metro di spessore, fino a 15 m. I livelli argillosi e siltosi che separano gli strati sono al contrario molto sottili. Mineralogicamente caratterizzata da abbondantissimo quarzo, feldspati, biotite, muscovite, clorite ed accessori, tra i quali granato, zircone e tormalina. La sedimentazione termina con un episodio marnoso, indice di bassa energia deposizionale all'interno del bacino, databile al Miocene Inferiore.

3. UNITA' SUBLIGURI

UNITÀ TETTONICA DI CANETOLO

(Paleogene)

Complesso costituito da Flysch arenaceo (Arenarie di Ponte Bradica), formazione argilloso-calcarea (Argille e calcari di Canetolo), e da torbiditi calcareo marnose (Calcari di gruppo del vescovo).

4. DOMINIO LIGURE ESTERNO

UNITÀ TETTONICA DI OTTONE (*Cretacico Superiore)*

Torbiditi da calcareo marnose (Flysch di Ottone) ad arenaceo – pelitiche (Arenarie di Casanova) ad argilliti-siltiti grigio brune con discontinui livelli di calcilutiti (Complesso di Monte Veri).

UNITÀ TETTONICA DEL MONTE GOTTERO (*Giurassico – Paleocene)*

Arenarie ed argilliti in facies di flysch (Arenarie del M. Gottero) e argilliti grigio brune (Argilliti della Val Lavagna). Localmente, nella porzione inferiore si passa a Diaspri, Gabbri e Serpentiniti.

5. DOMINIO LIGURE INTERNO

UNITÀ TETTONICA DI M. ANTOLA (*Cretacico)*

Torbiditi calcareo – marnose in strati e banchi interposti ad argilliti fogliettate grigio – brune.

Dal Pliocene, la catena appenninica è stata interessata da una tettonica distensiva (attiva ancora oggi) legata all'apertura del Mar Tirreno (Figura 3). Queste deformazioni hanno portato alla creazione di numerosi bacini (Graben) intermontani, sia nella Liguria orientale che in Toscana, riempiti successivamente da sedimenti post-orogenici (Dal Miocene all'attuale). La Val Magra è impostata su uno di questi.

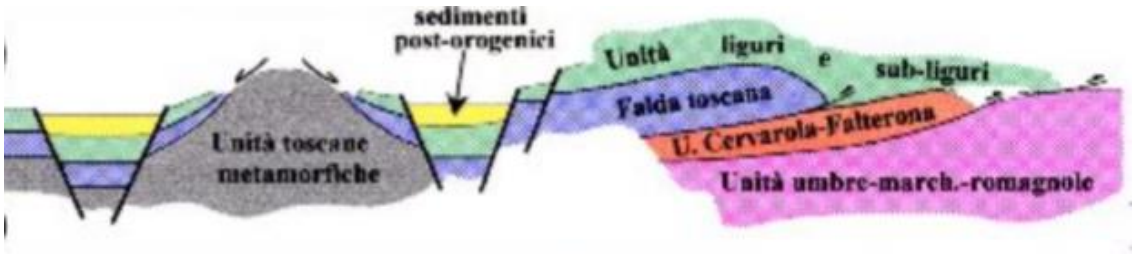


Figura 3 Tettonica distensiva sulla catena appenninica. Da Pandeli (2008).

Nel dettaglio, la Val Magra è impostata su di un Graben asimmetrico (Graben di Sarzana). Un fascio di faglie antitetiche, mascherato dalle alluvioni recenti di fondovalle, borda il lato orientale. Le faglie principali, quelle con maggior rigetto, sono però quelle ad occidente e che determinano una asimmetria della valle del Magra, testimoniata dalla posizione decentrata verso ovest del fiume stesso.

La tettonica distensiva è tuttora attiva, tanto che i sedimenti dei bacini post-orogenici sono dislocati ed alluvionati (in discordanza) da quelli più recenti che, a loro volta, sono stati

interessati da movimenti dovuti al sollevamento generalizzato che si riscontra in tutti i bacini all'interno delle valli del Vara e del Magra.

2.3. Metodi utilizzati per elaborare il modello idrogeologico

Per elaborare il modello geologico ed idrogeologico sono stati scelti sondaggi ed informazioni di carattere stratigrafico, a condizione che raggiungessero profondità rilevanti. In particolare, sono stati utilizzati sondaggi provenienti da:

- Autori vari (2019). POLO INTEGRATO DI TRATTAMENTO E RECUPERO DEI RIFIUTI LOCALITA' SALICETI - COMUNE DIVEZZANO LIGURE (SP): IMPIANTO PER IL TRATTAMENTO E IL RECUPERO DELLA FORSU CON PRODUZIONE DI COMPOST DI QUALITA' E BIOMETANO SOSTENIBILE AVANZATO. Relazioni tecniche varie. Committente ReCos S.p.A. (Citata nel presente lavoro in alcune immagini come "Indagini RECOS REL.1/19").
- Hydrodata_PROGETTO DEFINITIVO/ESECUTIVO- I STRALCIO, Messa in sicurezza idraulica del tratto focivo del fiume Magra dal torrente Isolone fino alla foce in sponda sinistra, e dal torrente Canal Grande fino alla foce in sponda destra. Dott. Giovanni Carra. PROVINCIA DELLASPEZIA AREA7: DIFESA DEL SUOLO.
- Indagine sismica della Val Magra eseguita da Alfa Solutions (2024). Relazione dal titolo "Rapporto relativo a sedici prove sismiche a stazione singola con metodo HVSR eseguite in Provincia di La Spezia".
- Lelli M., Doveri M., Raco B., Scozzari A., Menichini M., Nisi B. (2015). Database Dati Geologici, Idrogeologici e Geochimici dei Corpi Idrici afferenti gli impianti pilota. ACQUASENSE Progetto Industria 2015. Pp. 31
- Merlisenna P., Piaggi G. (1972). Raccolta dei dati necessari all'impostazione del modello matematico della pianura alluvionale della bassa valle del F. Magra e F. Vara. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Scienze M.F.N., Istituto di Geologia.
- Ottonello G., Fincato G.B., Brozzo G., Marini L., Cipolli F., Droghieri E., Prochilo F., Vetuschi Zuccolini M. (2005). ATLANTE DEGLI ACQUIFERI DELLA LIGURIA. Volume IV: L'acquifero alluvionale della bassa valle del Fiume Magra. Università degli Studi di Genova. Pp. 170
- Righetti S. (2019). Rapporto relativo a quindici prove sismiche a stazione singola con metodo HVSR eseguite in Provincia di La Spezia. Committente ReCos S.p.A.

Dicembre 2019. (Citata nel presente lavoro in alcune immagini come “Indagini RECOS REL.2/19”).

- Sondaggi eseguiti da ACAM nel 2000 e nel 2001, Indagine idrogeologica per la difesa dall’intrusione salina nel campo pozzi sul F. Magra. GEOPLAN.
- Sondaggi eseguiti da ARPAL (2000) durante le indagini per la CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE ED AZIONI DI MONITORAGGIO DELLA PIANA DI ARCOLA (SP). Gruppo di Lavoro di cui alla D.G.R. n. 1244 del 8 maggio 1998
- Sondaggi realizzati da RTC (2011). INDAGINE GEOGNOSTICA Infrastrutture Liguria, Stabilimento ex – Metalli e Derivati, Arcola (SP).

L’ubicazione dei sondaggi è mostrata nella “Carta di ubicazione dei sondaggi” (Figura 4).

Per realizzare il modello idrogeologico concettuale è necessario comprende a pieno la geologia della bassa Val Magra. Oltre ai sondaggi, è stata elaborata una Carta Geologica di sintesi dell’area (Figura 5) seguendo ed integrando le informazioni raccolte dal foglio 248 “La Spezia” della carta geologica d’Italia alla scala 1:50.000 ISPRA (Abbate et Al., 2005), dalle indicazioni di Raggi (2016) e dai rilievi eseguiti da ACAM (2001). In particolare, come suggerito da Raggi (2016), occorreva ridefinire il substrato roccioso al di sotto della copertura sedimentaria olocenica in quanto il modello proposto da Abbate et Al. (2005) risulta inverosimile per gli enormi spessori sedimentari chiamati in causa.

A causa del grado di consolidamento elevato che caratterizza i sedimenti fluviali e lacustri del Sintema di Sarzana (ASZ), solo i sedimenti più recenti (Olocenici) possono essere considerati parte dell’acquifero. Le litologie che fanno parte della coltre sedimentaria olocenica sono nella seguente tabella.

Tabella 1 Elenco delle litologie che compongono la copertura sedimentaria recente (Olocene).

Litologia	Idrotipo
Ciottoli, ghiaie e sabbie fluviali	Acquifero
Argille, Limi, Limi argillosi fluviali	Acquitardo/Acquicludo
Argille, Limi, Limi argillosi lacustri	Acquitardo/Acquicludo

Sabbie marine	Acquifero
Ghiaie in matrice sabbiosa-limosa (BVM)	Acquifero

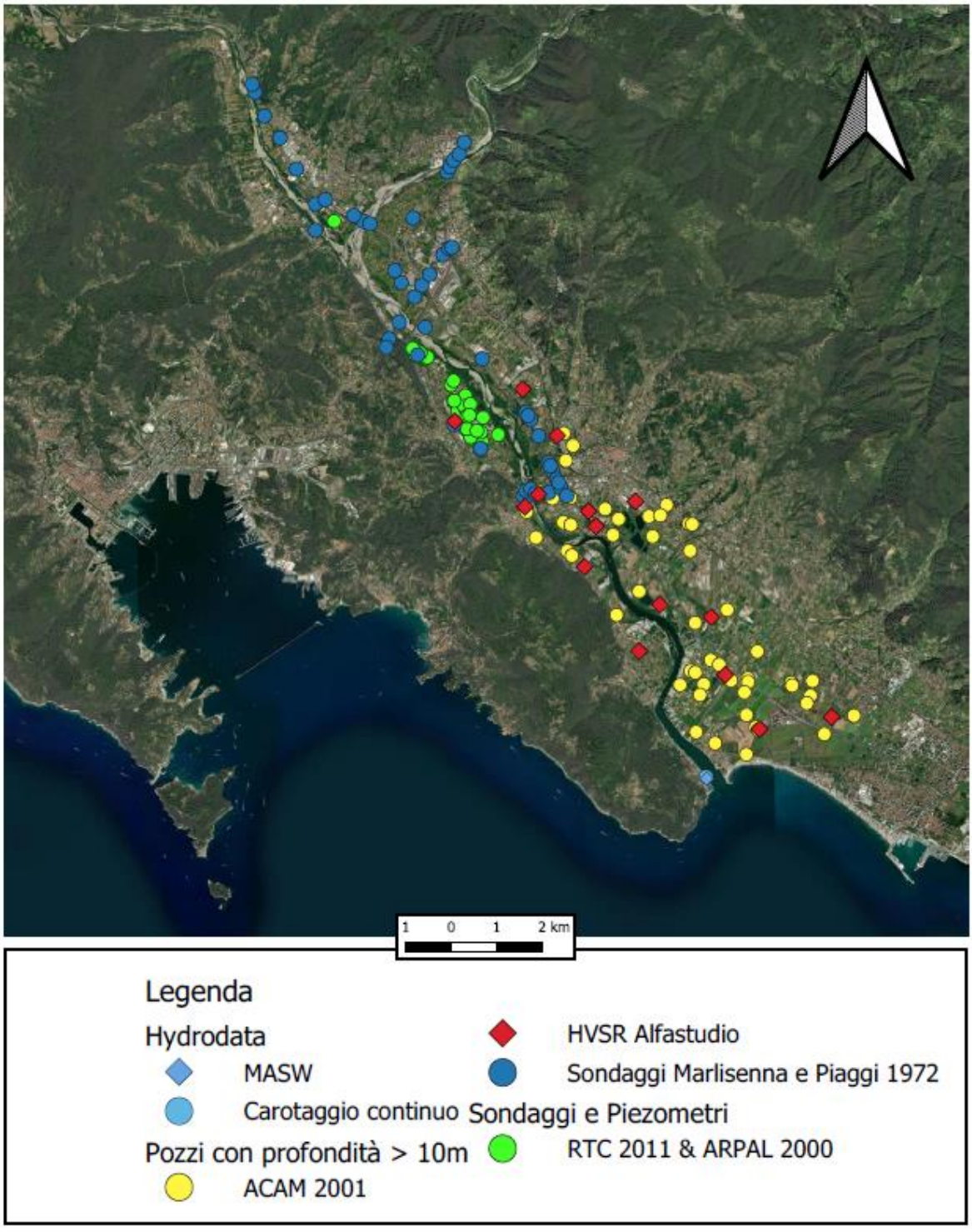


Figura 4 Tavola con ubicazione dei sondaggi utilizzati per l'elaborazione del modello geologico

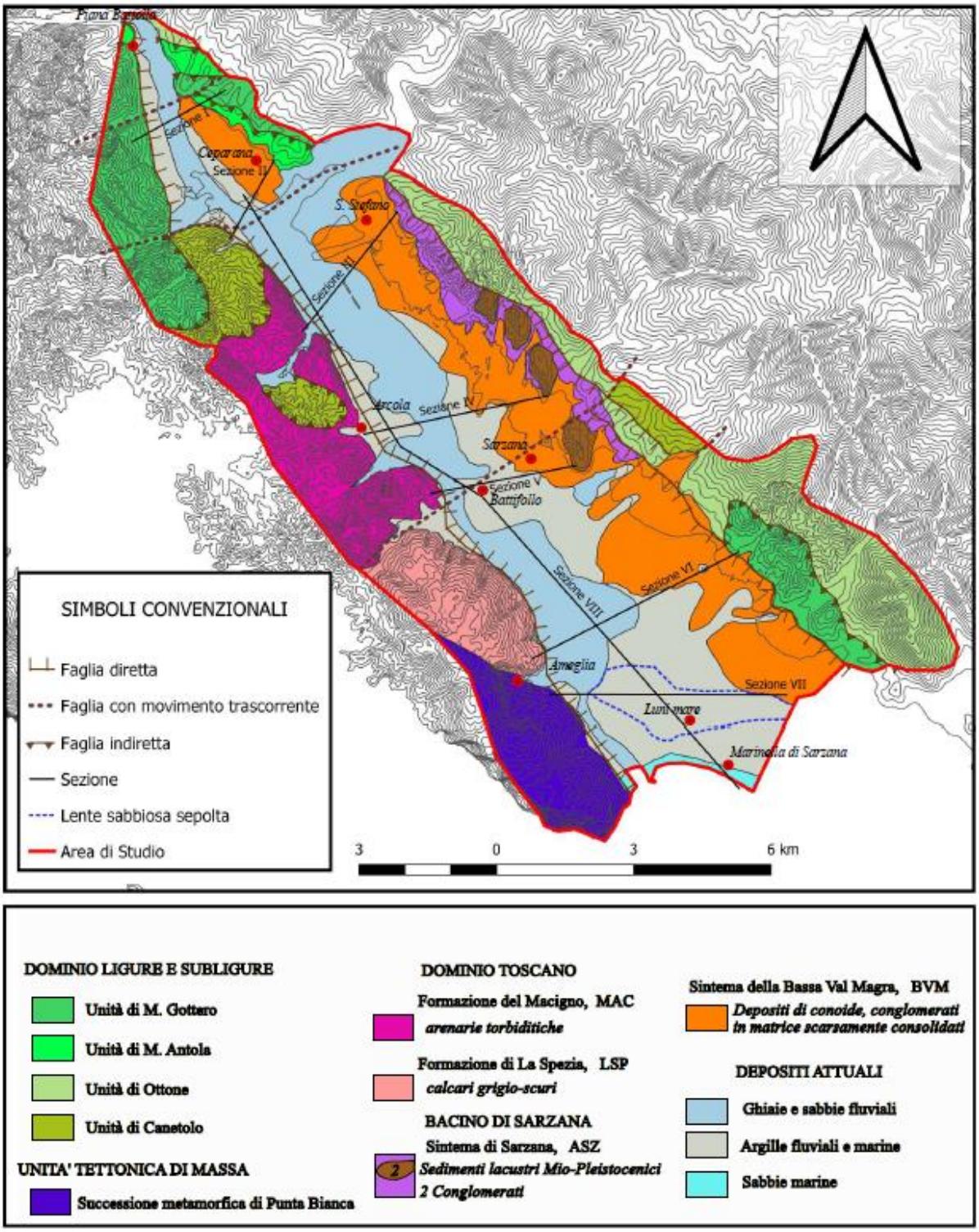


Figura 5 Carta Geologica di sintesi utilizzata per elaborare il Modello Idrogeologico.

Il bedrock è rappresentato sia dal substrato roccioso in senso stretto, che dai sedimenti del Sintema di Sarzana. Per quest'ultimo è necessario fare la seguente assunzione. Nonostante l'elevato grado di consolidazione è indubbio che i sedimenti dell'ASZ siano caratterizzati da un coefficiente idraulico più elevato rispetto alle litologie rocciose. E' però molto probabile che la differenza di permeabilità con le unità idrogeologiche che compongono l'acquifero funga da "contrasto" ed impedisca al flusso di interessare anche i sedimenti dell'ASZ.

L'elaborazione dei dati stratigrafici ha permesso di ricostruire la natura e la geometria del substrato roccioso al di sotto dei sedimenti che compongono l'acquifero della bassa Val Magra. A Nord, in corrispondenza del tratto caratterizzato dal fiume Vara, il bedrock è caratterizzato dalle Unità liguri e sub-liguri affioranti sui rilievi laterali che delimitano la valle ad oriente e ad occidente (Figura 6).

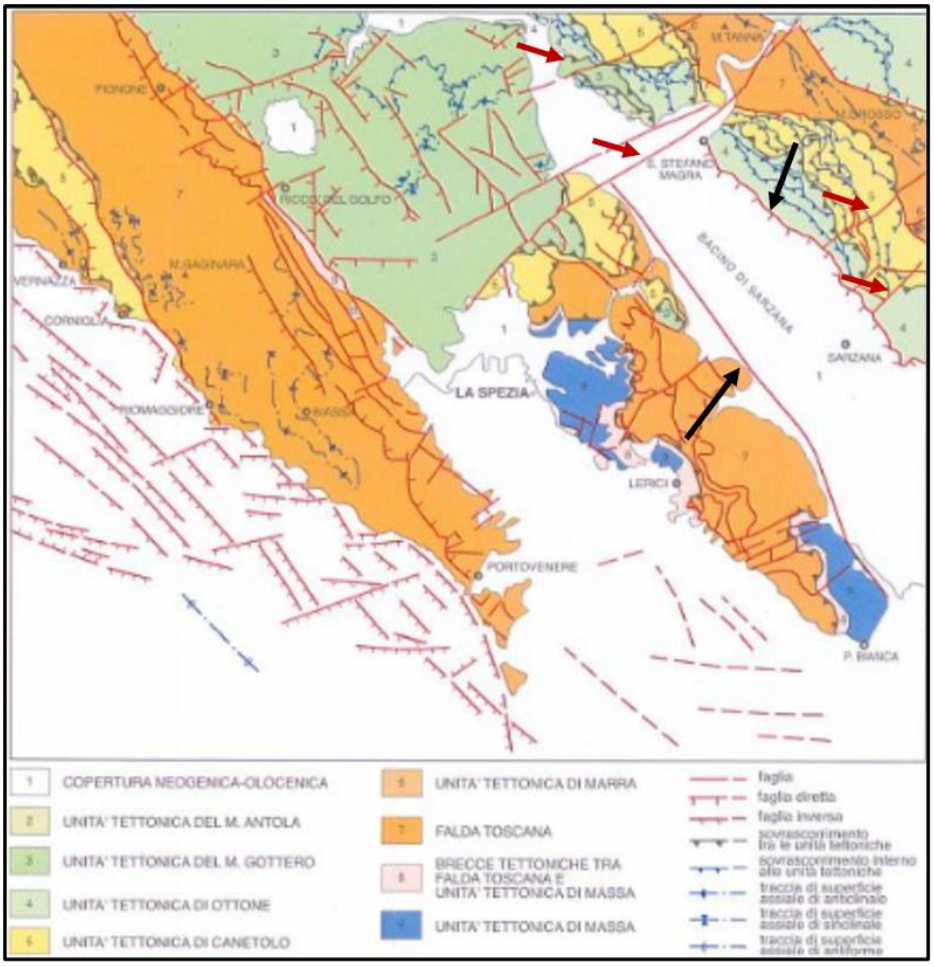


Figura 6 Schema tettonico regionale del foglio "248 La Spezia". Sono indicate in nero le faglie dirette che definiscono il Graben della Val Magra, in rosso le faglie trasversali che svincolano il Graben in più gradini.

In particolare, sulle torbiditi calcareo marnose dell'Unità tettonica di M. Antola (Abbate et Al., 2005) e sulle arenarie torbiditiche dell'Unità tettonica di M. Gottero (Abbate et Al., 2005). Verso Sud, in corrispondenza della confluenza con il fiume Magra, un sistema di fratture trasversali alla direzione appenninica e caratterizzate da movimenti trascorrenti, porta a contatto le unità geologiche del Dominio Ligure con quelle appartenenti al Dominio Toscano (Formazione del Macigno).

Tale contatto tettonico, a scala regionale (Abbate et Al., 2005), è confermato dai carotaggi che raggiungono il substrato e che evidenziano una variazione nella litologia del bedrock. A Sud della confluenza, il substrato roccioso si approfondisce fino a raggiungere quote inferiori ai 50 metri sotto al livello del mare in corrispondenza di Battifollo. In quest'area il bedrock è rappresentato dai sedimenti fluviali (dal Miocene al Pleistocene) racchiusi nel Subsintema di Sarzana (ASZ), che affiorano sulla sponda orientale del Graben su cui è impostata la Val Magra. Fa eccezione la fascia più occidentale, a ridosso della faglia diretta di La Spezia, la quale costituisce il limite occidentale del Graben. Qui, i sondaggi intercettano un gradino di roccia (Formazione del Macigno) continuo, largo circa mezzo chilometro, e che rimane sopraelevato rispetto al substrato roccioso che caratterizza il resto del Graben. Un'ulteriore discontinuità tettonica (con orientazione SW-NE) svincola il Graben a Sud di Battifollo. A Sud di essa, infatti, il substrato roccioso subisce un brusco approfondimento stabilizzandosi, fino all'altezza della linea di costa, alla quota di circa 100 m sotto al livello del mare (profondità individuata grazie alle prove geofisiche di Alfa Solutions, 2024). L'approfondimento, dovuto ad una maggiore subsidenza, si traduce con un notevole ispessimento del Subsintema di Sarzana, che passa da poche decine di metri a circa 70-80 metri di spessore.

2.4. Sezioni geologiche

Sono state realizzate un totale di 7 sezioni trasversali dell'area di studio e 1 sezione longitudinale. Sono di seguito elencate (Tabella 2) e rappresentate in Figura 7. Le sezioni geologiche sono state elaborate con la scala verticale maggiore della scala orizzontale. La scelta di eseguire un ingrandimento tale è dettata dalla volontà di indagare dettagliatamente le unità che compongono lo spessore dell'acquifero. Le tracce di sezione sono riportate nelle mappe precedenti.

Tabella 2 Elenco delle sezioni geologiche.

Numero	Codice	Orientamento
I	PIANA BATTOLLA	SW-NE, Trasversale
II	CEPARANA	SW-NE, Trasversale
III	FORNOLA	SW-NE, Trasversale
IV	ARCOLA	W-E, Trasversale
V	BATTIFOLLO	W-E, Trasversale
VI	Loc. PALLODOLA	SW-NE, Trasversale
VII	LUNI SCAVI	W-E, Trasversale
VIII	CEPARANA – MARINELLA DI SARZANA (a + b)	NW-SW, Longitudinale

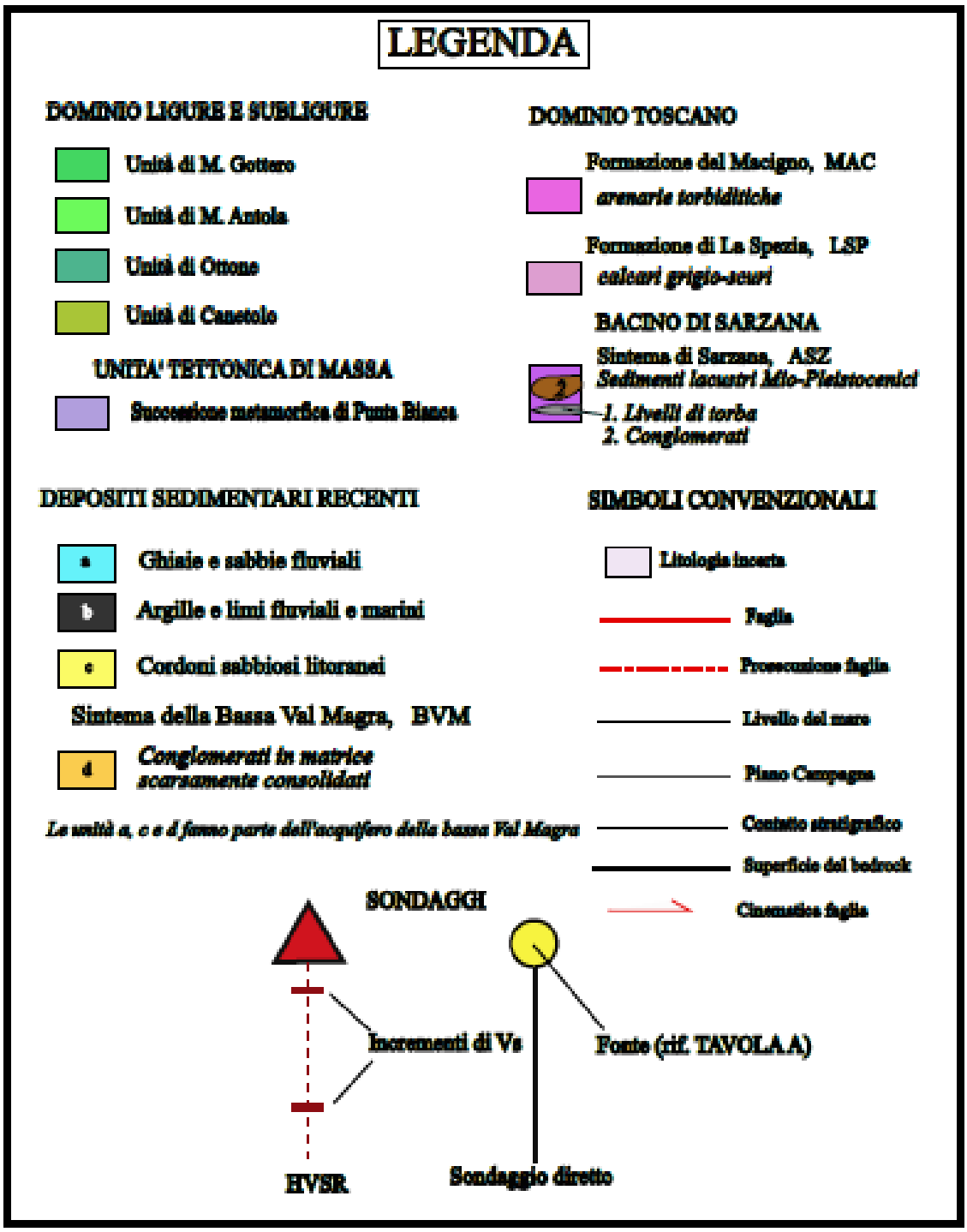


Figura 7 Legenda sezioni geologiche elaborate (vedi figure successive).

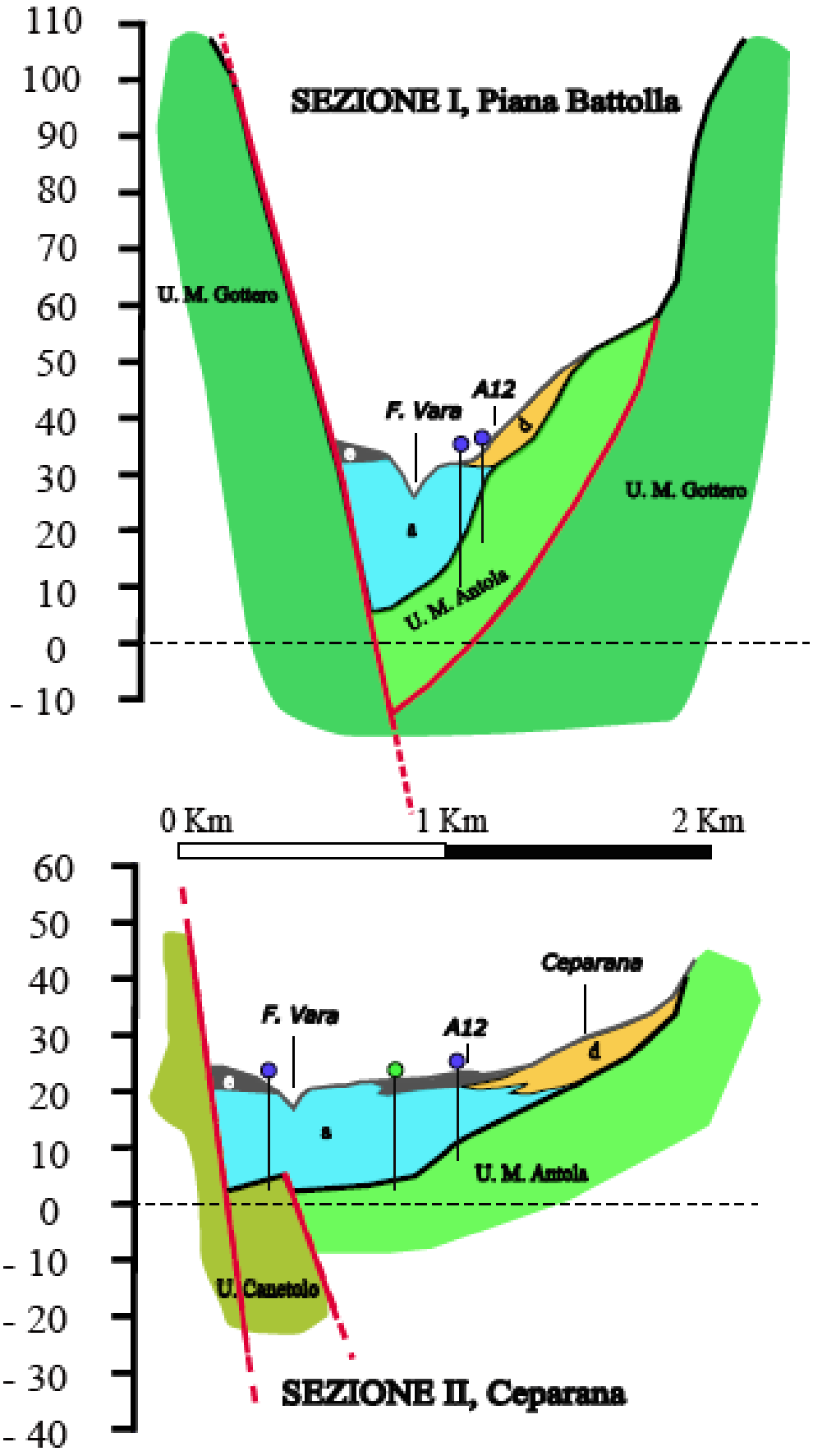
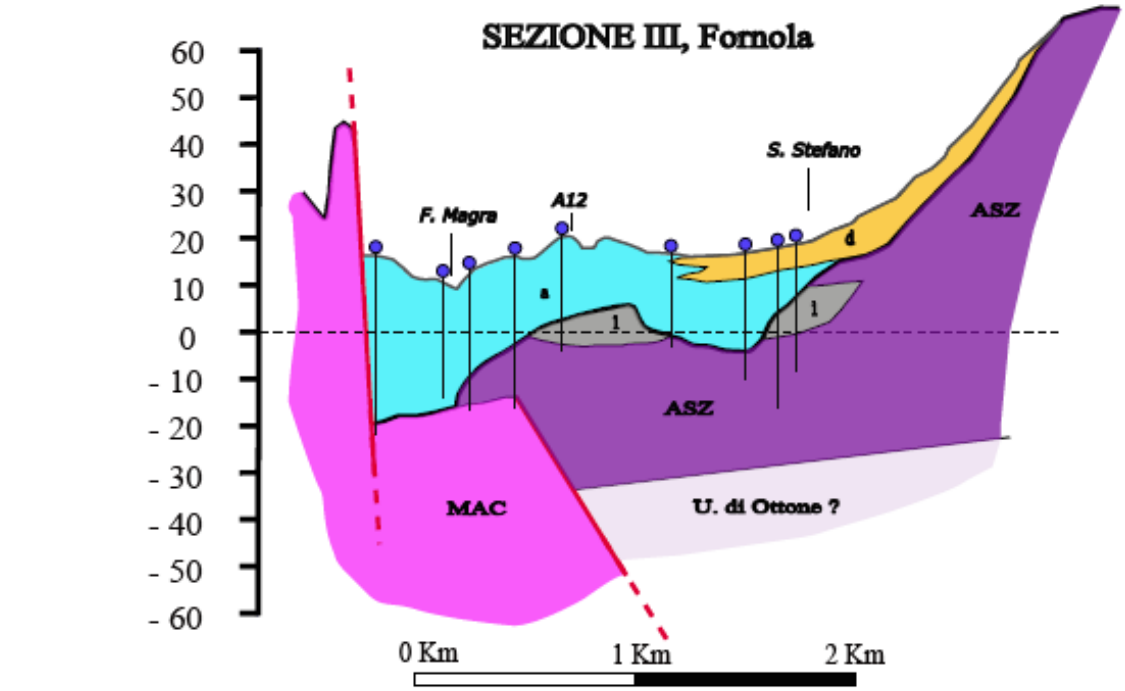


Figura 8 Sezioni Geologiche I e II.



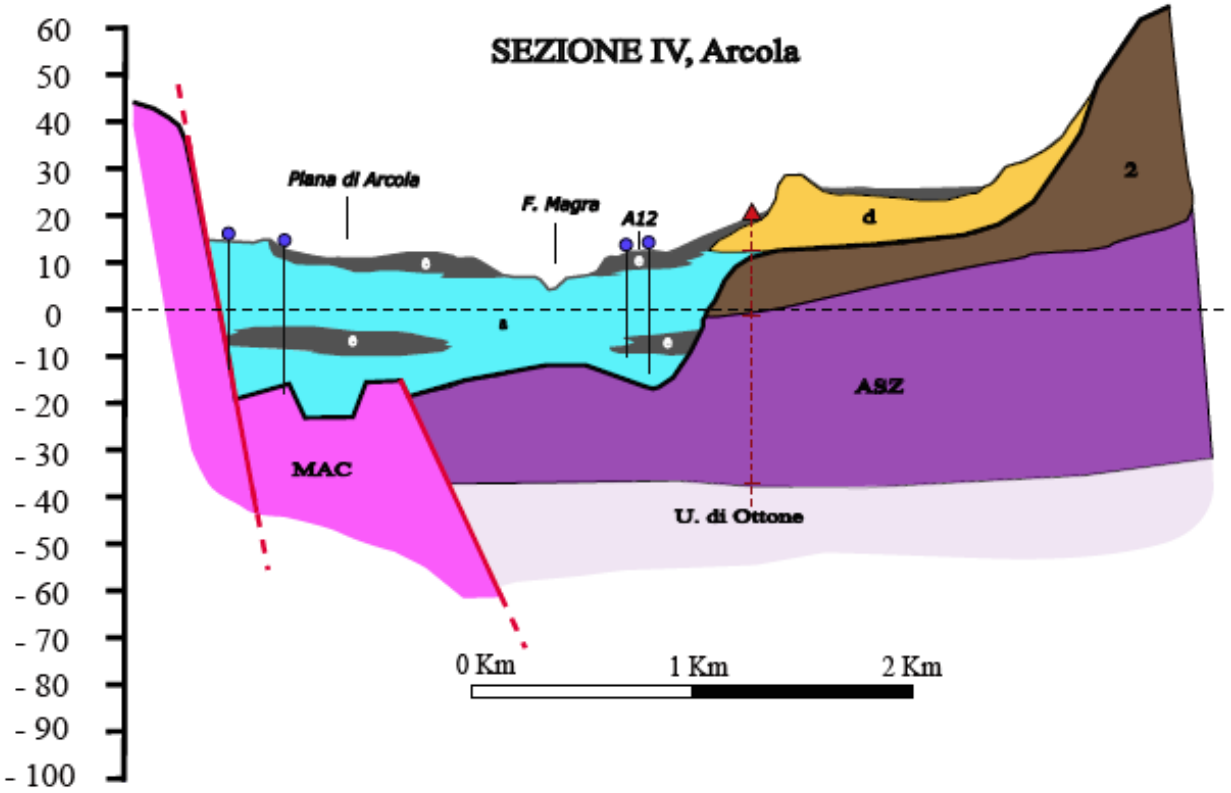


Figura 9 Sezioni Geologiche III e IV.

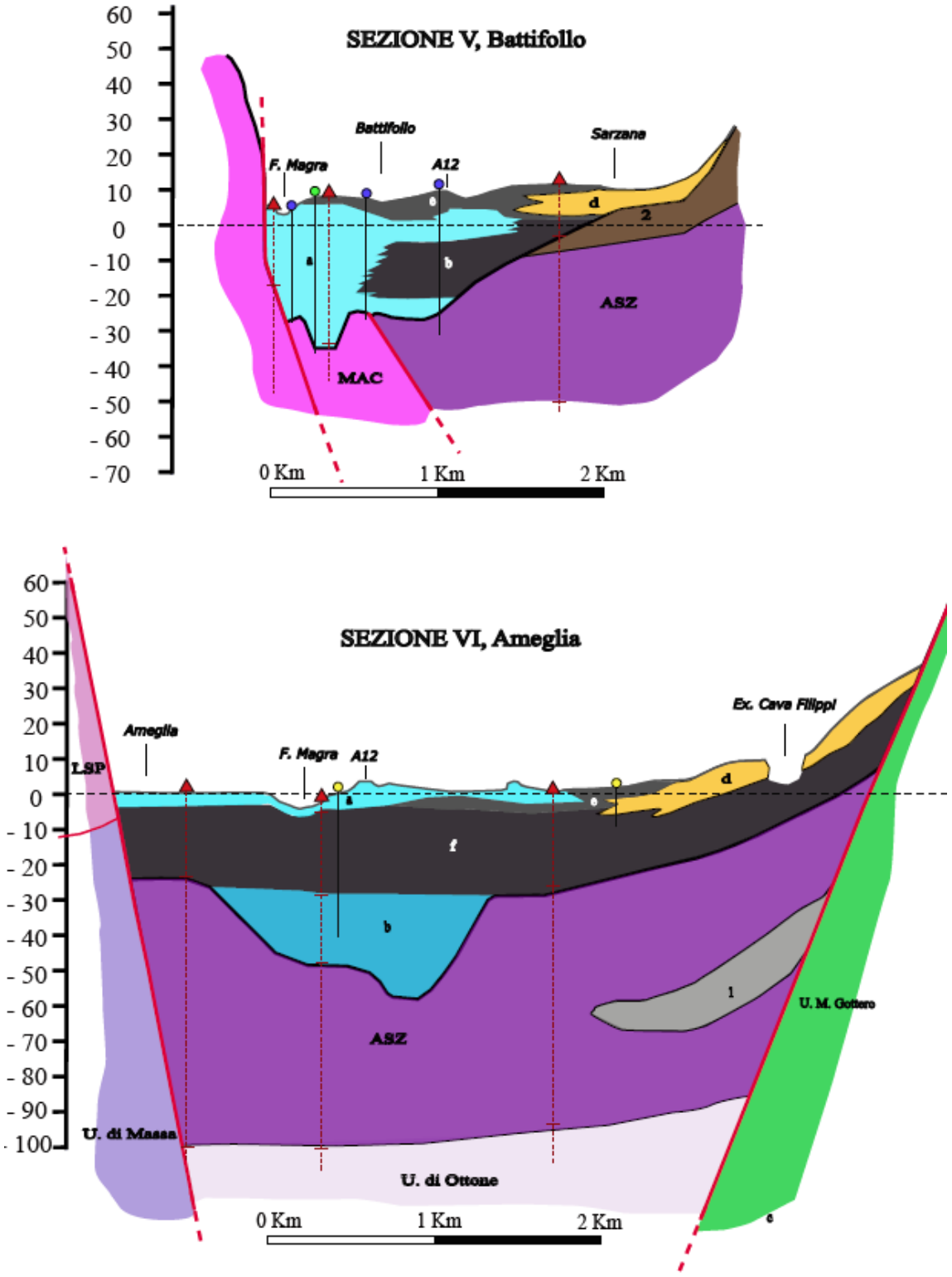


Figura 10 Sezioni Geologiche V e VI.

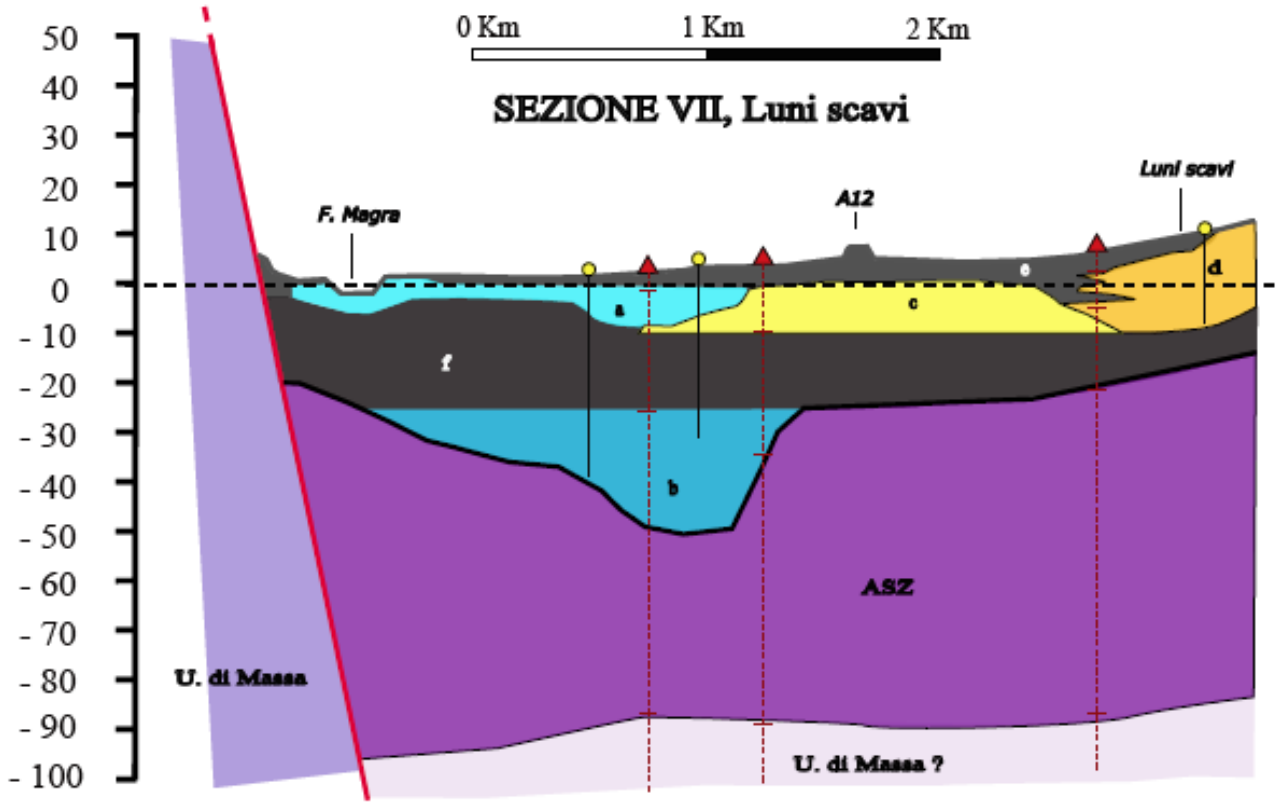


Figura 11 Sezioni Geologiche VII.

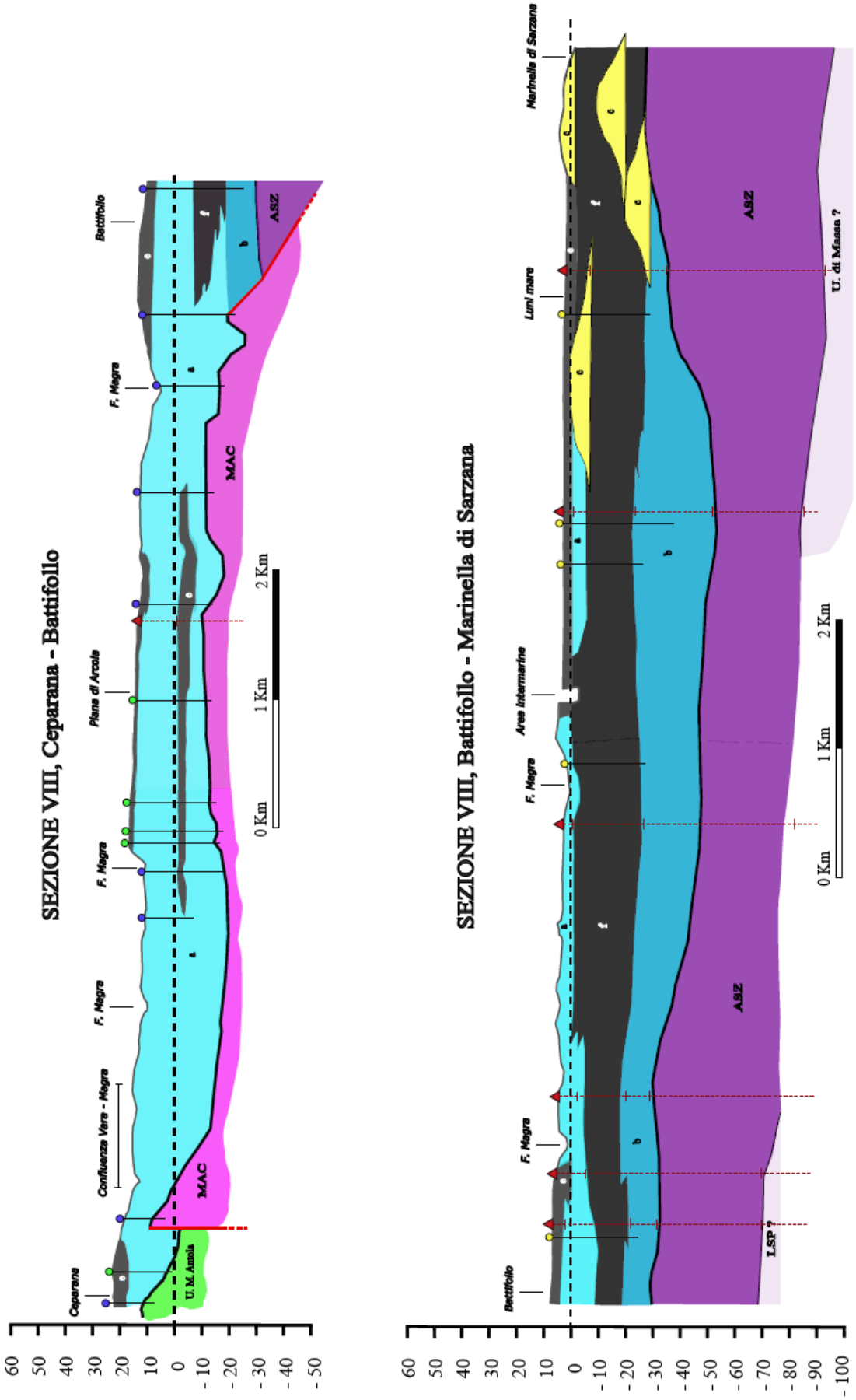


Figura 12 Sezioni Geologiche VIII. La sezione è separata in due blocchi.

Dalle sezioni appare chiara la distinzione in due settori della Bassa val Magra: un primo settore, fino a Battifollo caratterizzato da un acquifero libero e monostrato, e un secondo settore, da Battifollo a Marinella di Sarzana, caratterizzato da un acquifero superficiale (caratterizzato per diversi settori da una copertura argillosa) e da un acquifero profondo. L'assetto idrogeologico testimonia l'evoluzione geologica della bassa Val Magra dal Pleistocene ad oggi. I sedimenti che compongono l'acquifero coprono un intervallo temporale dall'olocene all'attuale. Dal modello idrogeologico realizzato è possibile suddividere la storia evolutiva olocenica della bassa Val Magra in tre step. Durante queste tre fasi, si ha la continua messa in posto da Est dei depositi di conoide, facenti parte del Sintema della Bassa Val Magra (BVM).

1. PLEISTOCENE SUPERIORE – OLOCENE

Testimonia la fase successiva dell'ultimo post-glaciale. L'abbondanza di acqua conferisce ai corsi d'acqua un'alta energia. Questi sono quindi in grado di erodere ed incidere il bedrock sottostante rappresentato dai sedimenti consolidati pleistocenici dell'Subsintema di Sarzana. Si ha la messa in posto di grandi spessori continui di ghiaie e sabbie per tutta la lunghezza della valle.

2. INGRESSIONE MARINA IN EPOCA ROMANA

Durante l'epoca romana la Val magra fu interessata da un'ingressione marina, la quale permise la fondazione della città portuale di Luni (Bini et Al., 2006 con Ref,). Durante questa fase, la linea di costa, rappresentata da un litorale sabbioso, arretrò fino all'altezza di Loc. Luni Mare (Raggi & Sansoni, 1993). L'area a Nord, fino a Battifollo, diventò una zona lagunare, con la conseguente sedimentazione di depositi fini. Il limite settentrionale della laguna è verosimilmente causato da una subsidenza differenziale tra la porzione più a Sud del Graben e la porzione più a Nord (separate dal contatto tettonico che passa per Battifollo). Durante questa fase l'energia del corso d'acqua diminuisce. Si ha la sedimentazione di lenti argillose anche se non continue, in corrispondenza dell'attuale Piana di Arcola. La sedimentazione di depositi grossolani fluviali è limitata esclusivamente a Nord di Battifollo.

3. REGRESSIONE MODERNA

Durante le ultime centinaia di anni i sedimenti portati dal Magra hanno riempito la laguna di età romana e abbassato la linea di costa fino alla posizione attuale. A Nord di Battifollo la sedimentazione continua ad essere prevalentemente rappresentata da depositi grossolani. Questo porta ad una continuità dell'acquifero con spessori di circa 30 m di ghiaie e sabbie.

A Sud di Battifollo la sedimentazione di depositi grossolani avviene in prossimità del letto del fiume. Questi si sedimentano sopra al banco di argilla sedimentatosi durante la fase lagunare. Diverse divagazioni danno luogo all'attuale estensione dell'acquifero superficiale. Questo non è continuo per tutta la larghezza della valle e passa lateralmente a sedimenti fini argillosi.

2.5. Modello idrogeologico concettuale

L'asse principale di drenaggio delle acque sotterranee è rappresentato dal Fiume Magra. Il fiume e la falda sono strettamente connessi tra loro a monte di Romito, come testimoniato negli studi eseguiti da Brozzo (2009) e Ronchetti & Critelli (2020). La superficie libera della falda si trova generalmente a profondità dell'ordine di alcuni metri, crescenti andando dal fiume verso i margini della pianura e decrescenti in direzione del mare, dove la soggiacenza scende fino a meno di 1m (ACAM. 2001). Studi eseguiti da ACAM (2001) segnalano un rilevante abbassamento della superficie libera (valori medi intorno ai 3 m) connesso all'abbassamento dell'alveo del Magra a causa delle estrazioni di materiali inerti al suo interno (Raggi & Raggi, 2020). Tali condizioni favoriscono l'intrusione del cuneo salino nel sottosuolo della bassa pianura, attualmente in fase di monitoraggio (Sabattini et Al., 2024).

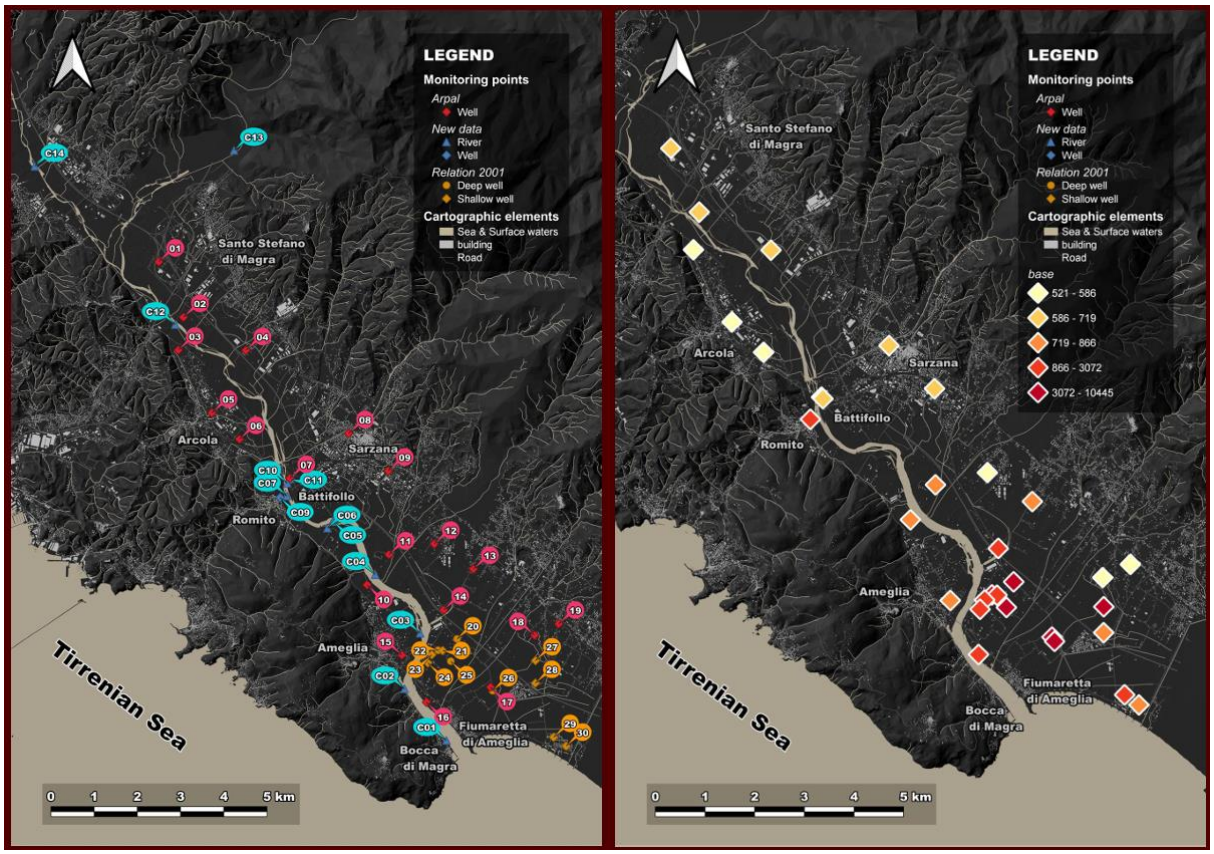


Figura 13 Punti di monitoraggio (sx) e valori relativi alla conducibilità misurati in microsiemens(dx). Da Sabattini et Al. (2024).

L'acquifero risulta composto in gran parte da ciottoli, ghiaie e sabbie fluviali, in secondo luogo dai depositi di conoide che caratterizzano il versante orientale della valle e in minima parte, a ridosso della linea di costa, dai cordoni sabbiosi litorali sepolti. Nel tratto a Nord della confluenza, caratterizzato dal fiume Vara, l'acquifero ha dimensioni modeste e si imposta nell'incisione che il fiume ha scavato direttamente sul substrato sottostante (caratterizzato da litologie del Dominio Ligure). La sua larghezza aumenta notevolmente a Sud della confluenza con il fiume Magra (passando da meno di 1 km a quasi 3 km). Tale estensione è dovuta anche dai sedimenti di conoide (BVM) provenienti da affluenti laterali che ricoprono la porzione orientale della valle raggiungendo spessori fino a 20-25 metri. Le conoidi poggiano ad Est direttamente sul bedrock (ASZ), mentre verso Ovest finiscono per poggiare sui sedimenti fluviali, terminando lateralmente in contatto eteropico con gli stessi. Fino all'altezza di Battifollo l'acquifero coincide con la quasi totalità dei sedimenti fluviali olocenici ad eccezione di due corpi lenticolari argillosi, spessi un paio di metri e localizzati sotto la Piana di Arcola, alla profondità di 20 metri dal p.c. fino a Battifollo l'acquifero è libero (ad eccezione di modeste e locali coperture argillose) e da considerarsi "monostrato". In corrispondenza di Battifollo, una serie di corpi argillosi inizia ad interessare lo spessore dei sedimenti fluviali grossolani. In meno di 1 km (all'altezza della loc. Romito Magra), l'acquifero è diviso da un banco continuo di depositi fini lacustri spesso fino a 25 metri. Questa suddivisione permane fino alla linea di costa. Vi è quindi la suddivisione in un acquifero superficiale e un acquifero profondo confinato. Il primo, con uno spessore di una decina di metri, è caratterizzato sia da ghiaie e sabbie fluviali (che seguono l'andamento attuale del Magra) che passano lateralmente o a sedimenti argillosi o a sedimenti di conoide nelle porzioni più orientali. All'interno dei sedimenti fini lacustri sono presenti (nel tratto più a Sud) estese lenti sabbiose, non affioranti, in contatto con i depositi fluviali, interpretate come cordoni litorali. Anche queste lenti sabbiose sono da considerarsi parte dell'acquifero superficiale. Queste, profonde pochi metri, sono ricoperte da uno spessore di circa 5 metri di depositi fini fluviali. Dai sondaggi utilizzati in questo studio non è stato possibile individuare l'esatta ubicazione del limite tra i cordoni sabbiosi marini e le ghiaie e sabbie fluviali.

Verosimilmente, il contatto è causato dal letto del Magra che ha eroso i cordoni litoranei costieri risalenti all'epoca di Luni. L'acquifero profondo invece, spesso fino a 30 m, è

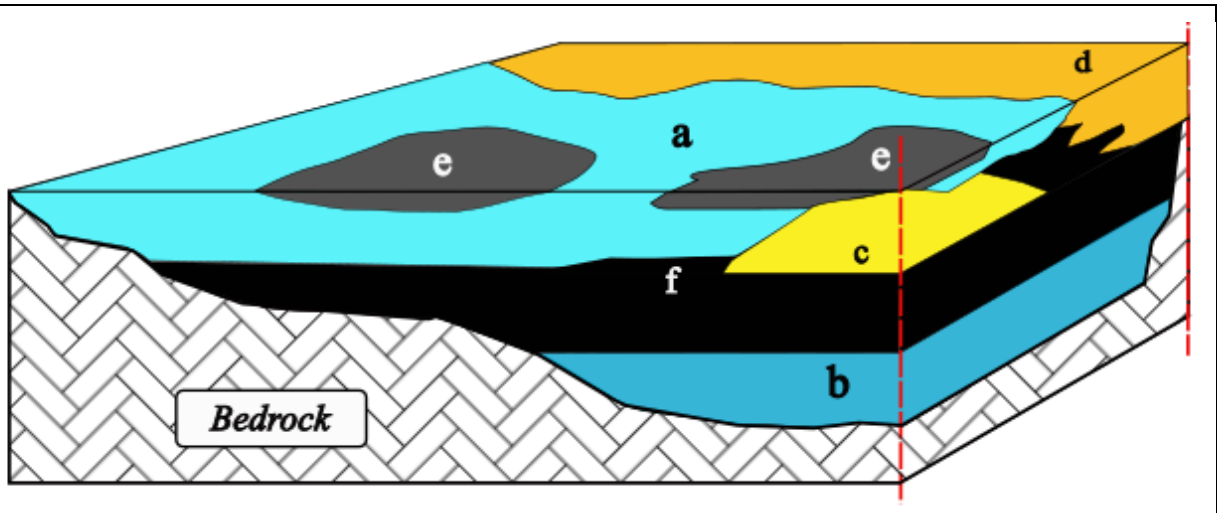
caratterizzato da sedimenti grossolani fluviali e occupa un volume inciso all'interno del bedrock (Subsintema di Sarzana - ASZ). Lateralmente è meno esteso rispetto all'acquifero superficiale. Poco più a Nord dell'attuale linea di costa, Raggi (2016) segnala la possibile presenza di più cordoni litoranei sovrapposti che metterebbero in contatto il mare con l'acquifero profondo, il cui top si troverebbe a circa 25 m dal P.C. La presenza di tali cordoni litorali non può essere confermata (né smentita) da questo studio.

Questo lavoro ha permesso l'elaborazione di un modello concettuale geologico ed idrogeologico in grado di descrivere nel dettaglio la geometria e la natura dei corpi geologici che compongono la bassa Val Magra. Permette inoltre di divedere l'acquifero della bassa Val Magra in due settori, all'altezza di Battifollo. Nel settore a Nord, l'acquifero è da considerarsi come libero e monostrato. In quello a Sud, esso è composto da due acquiferi, uno superficiale ed uno confinato profondo, separati da un banco di argilla spesso circa 25 metri. L'acquifero superficiale, tendenzialmente libero, risulta localmente sepolto da depositi fluviali a grana fine. Il modello idrogeologico qui proposto permette di conciliare i dati relativi all'ingressione dell'acqua salata, monitorati durante il lavoro di ACAM (2001). I campionamenti, con la finalità di misurare la conducibilità (e quindi il contenuto di Sali), mostrano:

- pozzi profondi decine di metri con valori elevatissimi (fino a 9.7 mS/cm) relativamente stabili tra estate – inverno.
- pozzi superficiali con valori eterogenei di conducibilità. In generale, il trend mostra acque con contenuti di Sali maggiori (comunque nell'ordine di grandezza di poche migliaia di microsiemens) in sinistra Magra, presso loc. Intermarine, e contenuti progressivamente minori proseguendo verso Luni Mare – Luni scavi. Tra l'estate e l'inverno, i valori mostrano significative variazioni, con i valori massimi di conducibilità raggiunti durante il periodo estivo.

I dati mostrano due diverse contaminazioni, supportate dal modello idrogeologico. La prima, riferita all'acquifero profondo, il quale appare in contatto diretto con il mare (possibile che il contatto avvenga tramite la serie di cordoni marini segnalati da Raggi (2016). La seconda, superficiale, è spiegabile tramite l'ingressione di acqua marina all'interno del letto del fiume Magra. Questa contamina l'acquifero superficiale e tende a migrare verso Est (quando il potenziale idraulico lo consente) muovendosi all'interno dei cordoni sabbiosi litoranei sepolti (unità "c"). Questo processo risente della stagionalità e dei relativi livelli d'acqua del fiume e

della tavola d'acqua. E' possibile, inoltre, che l'acqua piovana immagazzinata all'interno dei depositi di conoide (BVM, unità "d") contribuisca a mitigare l'effetto della contaminazione salina, quantomeno nelle aree più orientali dell'acquifero.



I sedimenti della copertura sedimentaria olocenica sono stati suddivisi in "unità idrogeologiche". I sedimenti grossolani (ciottoli – sabbie – ghiaie) superficiali (o laddove esiste un solo strato) sono raggruppati all'interno dell'"unità a". Quando questi risultano divisi da corpi spessi e continui a granulometria fine, la porzione inferiore e confinata dell'acquifero prende il nome di "unità b". I cordoni sabbiosi marini, sia affioranti che immersi all'interno dei corpi a granulometria fine, costituiscono l'"unità c", mentre i depositi di conoide (ghiaie in matrice sabbiosa-limosa) fanno parte dell'"unità d". L'acquifero libero superficiale risulta quindi composto da più unità idrogeologiche (a + c + d) talvolta separate da corpi lenticolari più o meno grandi (ma mai continui) di argille, limi e argille limose di origine fluviale (unità e). L'acquifero profondo è confinato da un bancone continuo di depositi a granulometria fine di origine lacustre (unità f). Esso è geometricamente più continuo dell'acquifero superficiale, ed è composto totalmente dall'"unità b".

Figura 14 Schema modello idrogeologico concettuale

2.6. Monitoraggio livello idrometrico fiumi

Di seguito è riportato il dato di monitoraggio le livello idrometrico dei fiumi Magra e Vara recuperati dai siti Regione Liguria e Regione Toscana.

Il livello idrometrico non è stato implementato direttamente nel modello numerico, ma è stato utilizzato per la corretta stima della portata media dei fiumi (utilizzando le scale idrometriche ove disponibili) e per il controllo dei travasi acque sotterranee – acque superficiali. I dati di livello e le scale idrometriche sono stati forniti da ARPAL. Dai dati ARPAL, le portate medie dei fiumi sono: 10 m^3/s per il Vara a Pian Battolla; 20 m^3/s per il Magra a Calamazza; 40-60 m^3/s per il Magra ad Ameglia. Mentre le portate misurate a Pian Battolla e Calamazza sono abbastanza certe, la portata misurata ad Ameglia presenta maggiori incertezze, dovute alla ridotta lunghezza delle serie storica.

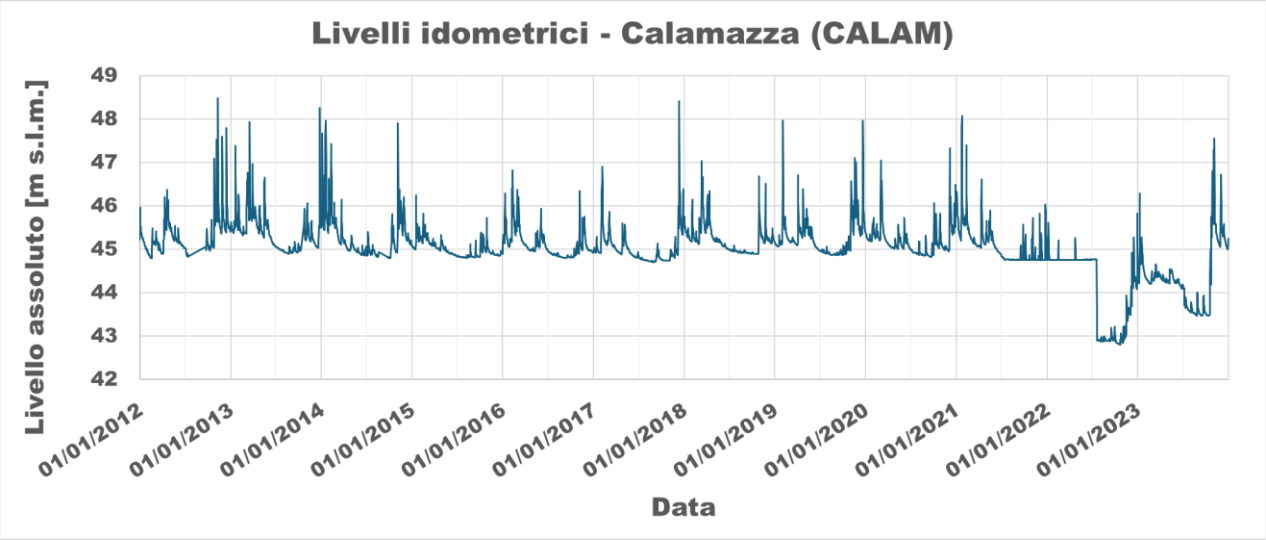


Figura 15 Livello idrometrico Stazione Calamazza - F. Magra

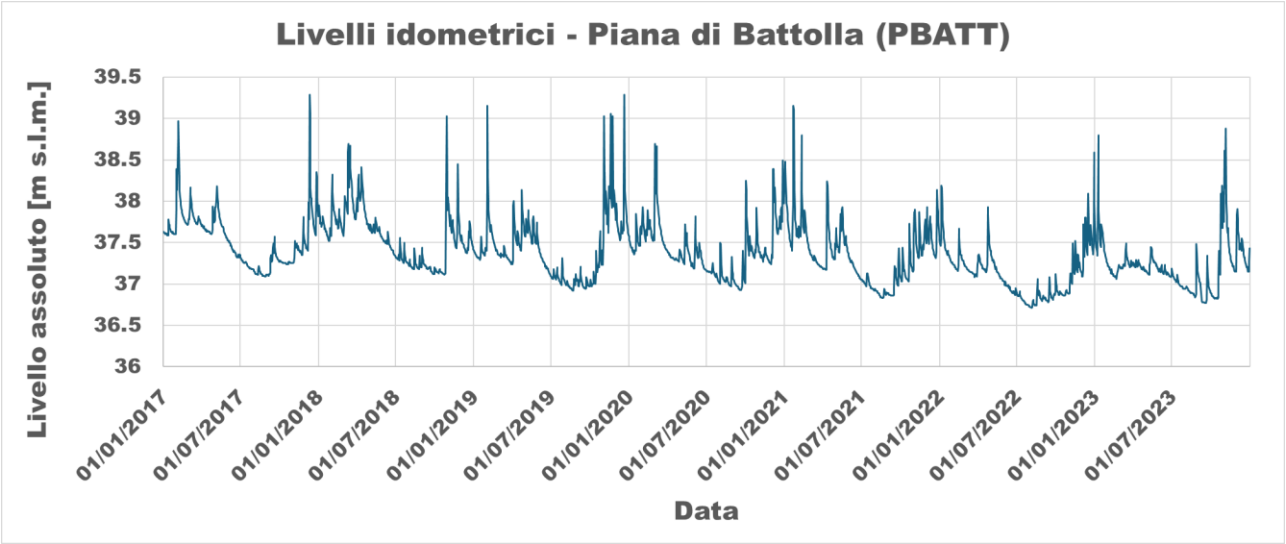


Figura 16 Livello idrometrico Stazione Pian Battolla - F. Vara

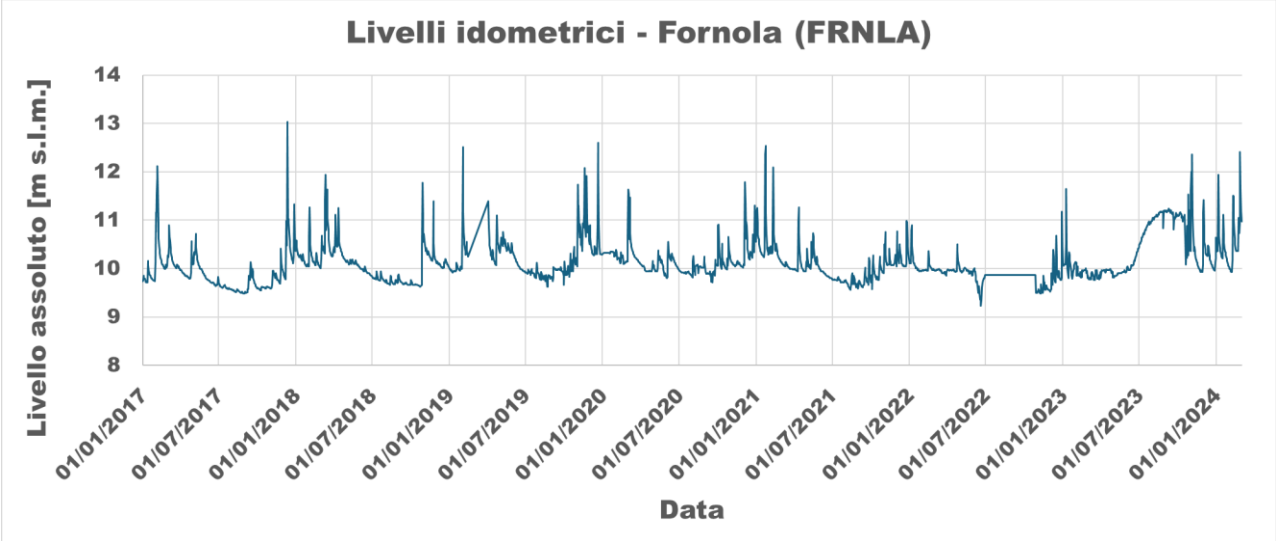


Figura 17 Livello idrometrico Stazione Fornola - F. Magra

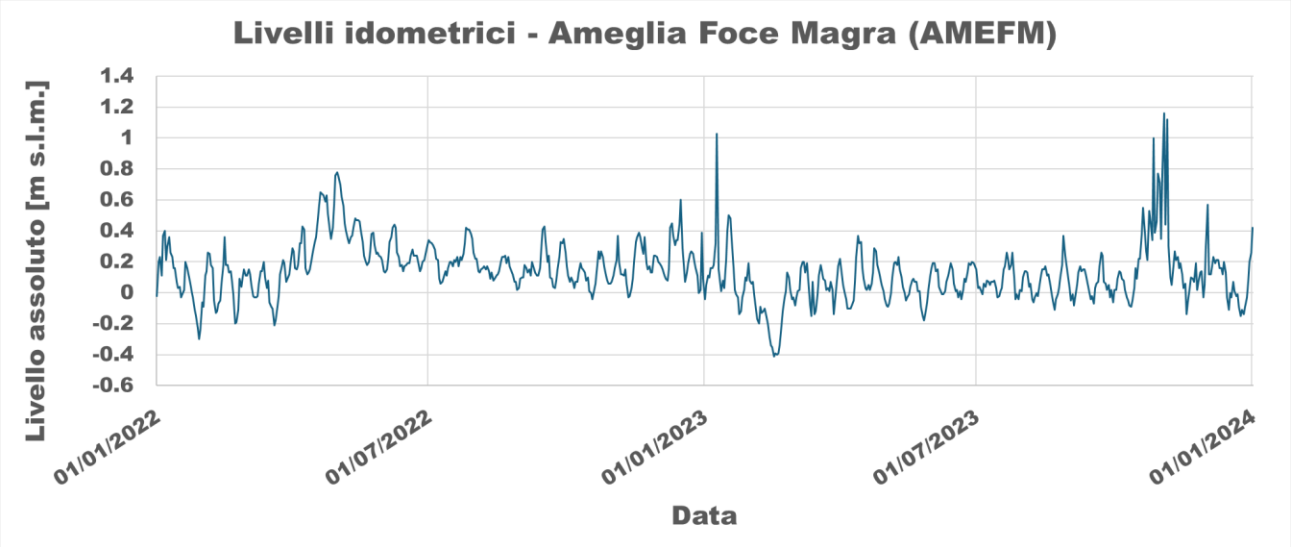


Figura 18 Livello idrometrico Stazione Ameglia - F. Magra

2.7. Pozzi acquedottistici presenti nella area del modello

Nell'area del modello esistono diversi campi pozzi acquedottistici gestiti da ACAM Acque e SAT.

Tabella 3 Campi pozzi acquedottistici presenti nell'area del modello e regolarmente funzionanti.

Comune	Denominazione	Proprietà
Arcola	Via Don Minzoni	ACAM
Arcola	Battifollo	ACAM
Arcola	Ressora Nord	SAT
Arcola	Ressora Sud	SAT
Follo	Bottagna	SAT
Follo	Pian Battolla	SAT
Follo	Molini di sotto	ACAM
S. Stefano	Civico	ACAM

S. Stefano	Rurale	ACAM
Vezzano Ligure	Fornola SX	ACAM
Vezzano Ligure	Fornola DX	ACAM

Tabella 4 Portate estratte dai campi pozzi acquedottistici

Campo_pozzi	Portata m^3/g	Periodo valutato	Gestore
Follo	2268.00	2018-2024	ACAM
Fornola DESTRA	53069.98	2010-2024	ACAM
Fornola SINISTRA	1567.84	2010-2024	ACAM
Battifollo	14608.83	2010-2024	ACAM
Civico	1132.87	2018-2024	ACAM
Rurale	1379.27	2018-2024	ACAM
Arcola Ped.	3084.13	2020-2024	ACAM
Ressora NORD	1532.52	2023-2024	SAT
Ressora SUD	7381.38	2023-2024	SAT
Bottagna	1232.49	2023-2024	SAT
Ospedaletto	2960.09	2024	ACAM
Piana Battolla	1526.52	2023-2024	SAT



Figura 19 Area modello numerico con riportati i campi pozzi acquedottistici ACAM e SAT.

2.8. Monitoraggio piezometrico

Nell'area del modello sono presenti 160 piezometri/pozzi in cui sono state realizzate misure piezometriche in diversi anni da diversi Enti (Tabella 5).

Tabella 5 Tabella riepilogativa dei pozzi/piezometri presenti nell'area e in cui sono realizzate misure piezometriche

CODE	Coor. X	Coor. Y
ACAM	572688.2	4886961.30
AL1	572931.6	4886915.50
AL10	573465.2	4886184.30
AL11	573641.7	4886020.40
AL12	573632.9	4885929.40
AL13	573348.9	4885872.40
AL16	573746.8	4885687.50
AL17	573463	4885612.40
AL18	574156.3	4885455.00
AL19	573892.4	4885428.90
AL2	573032.4	4886871.90
AL20	573353.7	4885206.70
AL21	574383	4885178.80
AL22	574134.8	4885186.90
AL23	573773.5	4885109.70
AL24	573802.1	4885084.50
AL25	573880.6	4884596.80
AL26	574508.4	4884793.20
AL3	573096.9	4886819.50
AL4	572668.5	4886806.90
AL5	572960.4	4886580.30
AL6	573253.1	4886436.10
AL8	573074.8	4886129.40
AL9	573345.4	4886184.00
AR01	573344.5	4885430.40
C1	572120.9	4888777.30
C2	572181.9	4888633.10
C3	572181.9	4888633.10
C4	572235.1	4888660.80
C5	572235.1	4888660.80
CPR	574948.2	4883486.40
CPSS	573529.8	4891017.30
FD1B	572582.5	4886956.30
FD1C	572691.6	4886884.50
FD2B	572572.4	4886998.00
FD2D	572415.4	4887075.30
FD2F	572722	4886816.20
FD3A	572491.2	4887082.00
FD3B	572617.3	4886939.10
FD3F	572789.9	4886897.40
FD4F	572827.3	4886857.90
FD5B	572655.9	4886942.00
FD6B	572654.3	4886984.10
FD6D	572486.2	4887015.10
FD6F	572753.8	4886870.40
FD7A	572566.4	4887034.80
FD7D	572465.3	4887060.20
FS1G	572575.8	4887625.80

FS2G	572612.3	4887598.60
FS4G	572662.5	4887669.50
FS5G	572631.6	4887686.40
FS7G	572663.1	4887622.10
GP1	575657	4885326.10
GP12	575906.4	4883831.00
GP15	574943	4883524.30
GP18	575753.5	4883294.60
GP20	576967	4883364.10
GP21	578511.6	4883265.10
GP22	578587.9	4883247.90
GP23	575150.3	4882956.60
GP27	578065.5	4883033.20
GP30	578055	4882509.30
GP32	578543.3	4882665.20
GP33	576961.6	4882273.40
GP34	577048.9	4882148.60
GP35	578724.5	4882356.80
GP37	578392.9	4881837.40
GP38	576865.1	4881495.90
GP39	577870.2	4881470.20
GP4	575807.6	4884649.70
GP40	578476	4881349.00
GP41	579361.3	4881366.20
GP43	576817.4	4881213.40
GP46	580199.6	4881309.80
GP49	577798.9	4880173.60
GP51	579184.6	4880156.50
GP54	578654.2	4879988.30
GP55	579464	4879937.00
GP56	581143.3	4879968.40
GP57	578391.9	4879897.10
GP59	579816.9	4879862.10
GP6	576718.6	4884101.90
GP61	578323.5	4879714.60
GP69	577573.6	4879301.20
GP7	577399.7	4884055.90
GP71	580767	4879244.20
GP72	578689.9	4879131.50
GP74	582154.1	4879037.40
GP77	579990	4878783.70
GP80	579094.7	4878433.00
GP81	578200.9	4878313.20
P01	569208.5	4891003.70
P02	568878.6	4890921.80
P03	571858.5	4890025.40
P04	570805.1	4889752.50
P05	571676.5	4889933.90
P06	572119.9	4888777.80
P07	572532.4	4888020.30
P09	573055.7	4887396.00
P10	573347.3	4886409.70
P11	573453.2	4885705.60
P12	573549.8	4885741.60
P13	573933	4884924.50
P14	575008.4	4885036.40
P15	574582.8	4884726.90
P16	575230.4	4883565.30
P17	573059.7	4888128.40

P18b	572800.4	4887816.20
P19b	571516.6	4888226.70
P20	580643.3	4880262.00
P21	577623.1	4879874.30
P22	573056.7	4887395.60
P23	573513	4887980.30
P24b	572831.7	4886129.50
P25	572424	4887068.00
P26	572943.1	4887797.80
P28	572821.4	4889698.10
P30	572430.2	4889339.10
P31	573528.8	4891015.50
P32	574965.2	4883560.30
P33	574949.7	4883483.00
P41	569208.4	4891003.70
P42	568878.8	4890922.60
P44	570805.2	4889752.50
P45	575008.8	4885036.60
P46	577299.2	4882210.60
P47	576872.1	4881552.70
P48	580647.1	4880259.40
P99	571723	4889907.00
PDZ	572425.9	4887094.60
PP01	572125.2	4888782.30
PP02	572112.5	4888766.60
PP03	572097.9	4888752.10
PR1	572862.6	4890795.80
RSN1	574006.9	4884800.70
RSS7	574056.2	4884808.40
RSS8	574072.3	4884833.00
RSSp	574065.9	4884966.30
S3	572117.5	4888780.00
SPM00G	573569.5	4889918.90
SPM020	569213.7	4891020.90
SPM021	570172.7	4889799.90
SPM023	573544.5	4891020.90
SPM024	572711.5	4887649.00
SPM025	572594.6	4886893.00
SPM026	573370.5	4885440.10
SPM028	575172.4	4883929.10
SPM042	569929.7	4891805.90
SPM053	569161.7	4890029.90
SPM061	576531.4	4884966.10
SPM106	576962.9	4881464.80
SPM130	582956.1	4880087.20
SPM358	570042.7	4890408.60
SPMBBB	581590.1	4881998.20
SPMFFF	580832.2	4880302.20
SPMJJJ	574007.5	4884831.10
SPMKKK	578513.3	4882411.10
SPMWWW	568929.7	4890537.90
SPMYYY	578335.3	4878755.30
WSD	572713.6	4886955.90

Alcuni di questi piezometri sono monitorati in continuo. I sensori sono gestiti rispettivamente da UniMoRe, ACAM, SAT, ARPAL (Tabella 6).

Il Monitoraggio in continuo evidenzia come i livelli piezometrici dell'acquifero del Magra sono condizionati principalmente da:

- eventi meteorici locali;
- oscillazioni del livello dei fiumi Magra e Vara (per i piezometri in prossimità delle sponde dei fiumi);
- regime dei campi pozzi acquedottistici (per i piezometri in prossimità dei campi pozzi).

Tabella 6 Piezometri monitorati in continuo

Nome piezometro	***Gestore***
C1	UniMoRe/Recos
C5	UniMoRe/Recos
CPR	UniMoRe/ACAM
P06	UniMoRe
P11	UniMoRe
P16	UniMoRe
P33	UniMoRe
SPM020	Arpal
SPM023	Arpal
SPM024	Arpal
SPM028	Arpal
SPM042	Arpal
SPM061	Arpal
SPM358	Arpal
SPMKKK	Arpal

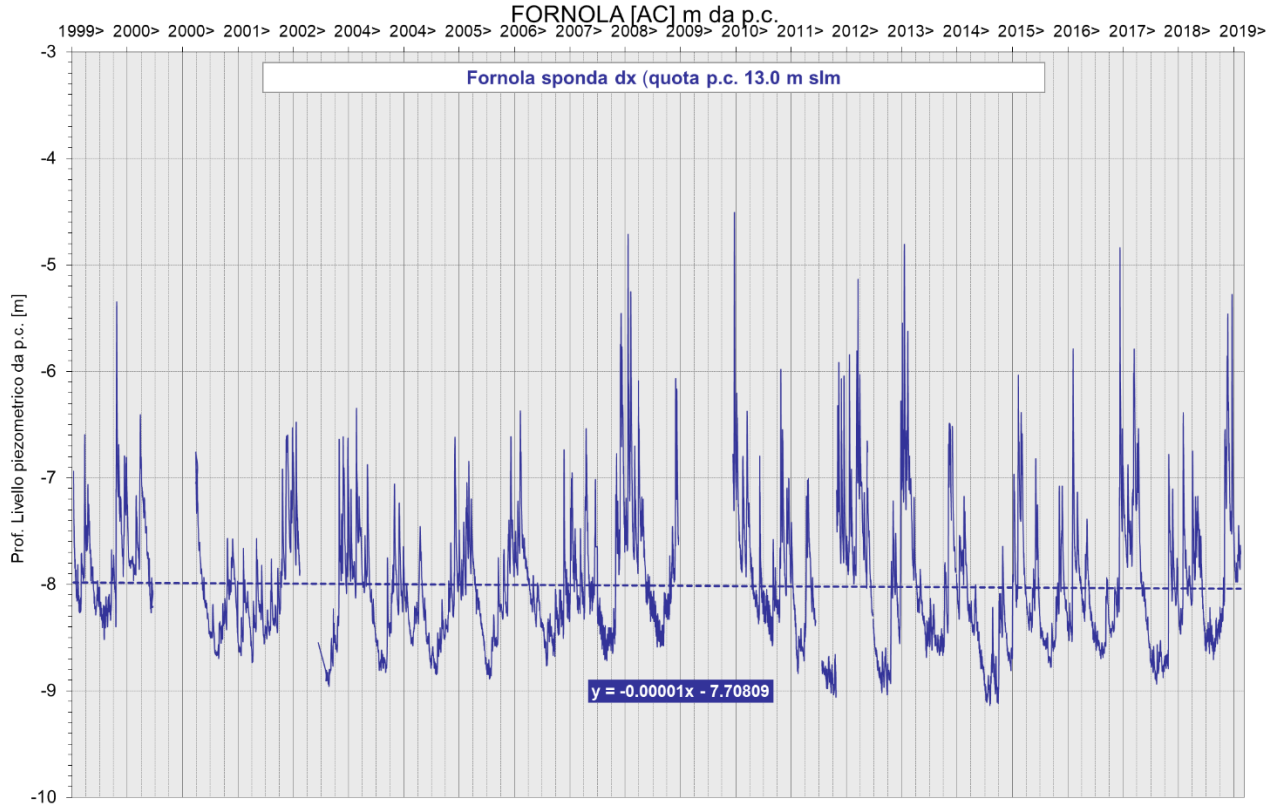


Figura 20 Esempio Risultati monitoraggio piezometrico ACAM (campo pozzi Fornola DX)

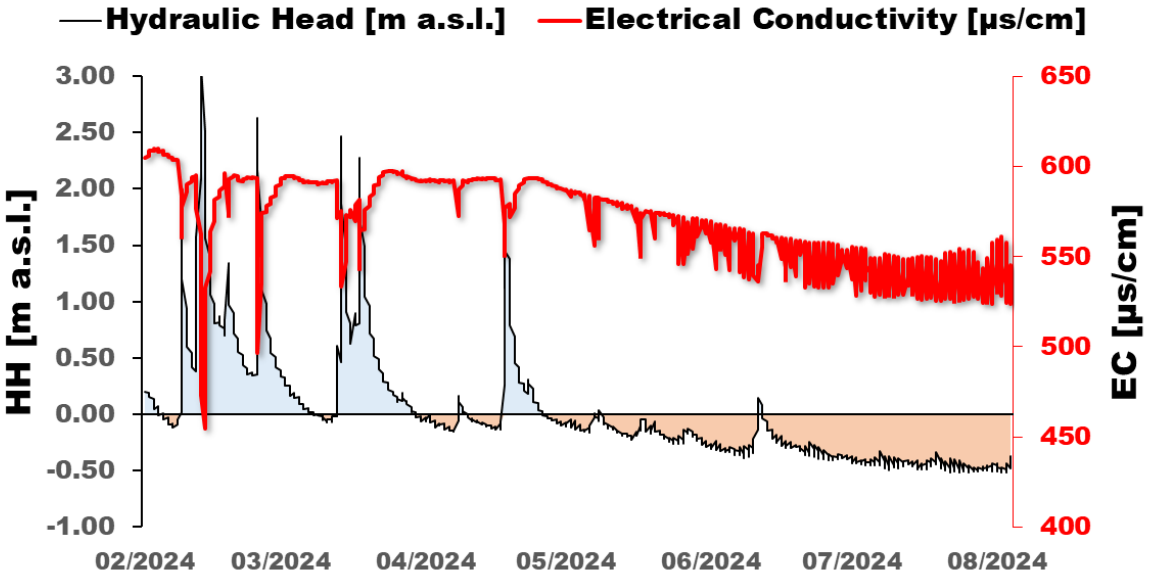


Figura 21 Esempio Risultati monitoraggio piezometrico UniMoRe (a valle campo pozzi Battifollo, sponda SX F. Magra)

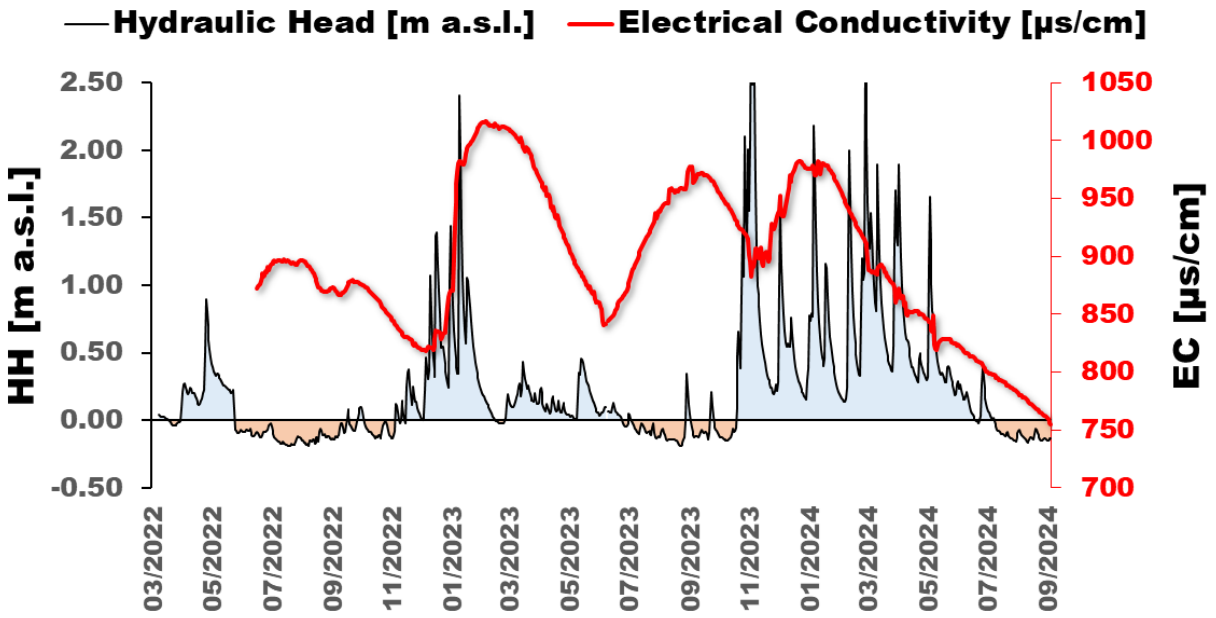


Figura 22 Esempio Risultati monitoraggio piezometrico UniMoRe/ACAM (ex-campo pozzi Romito, sponda SX F. Magra)

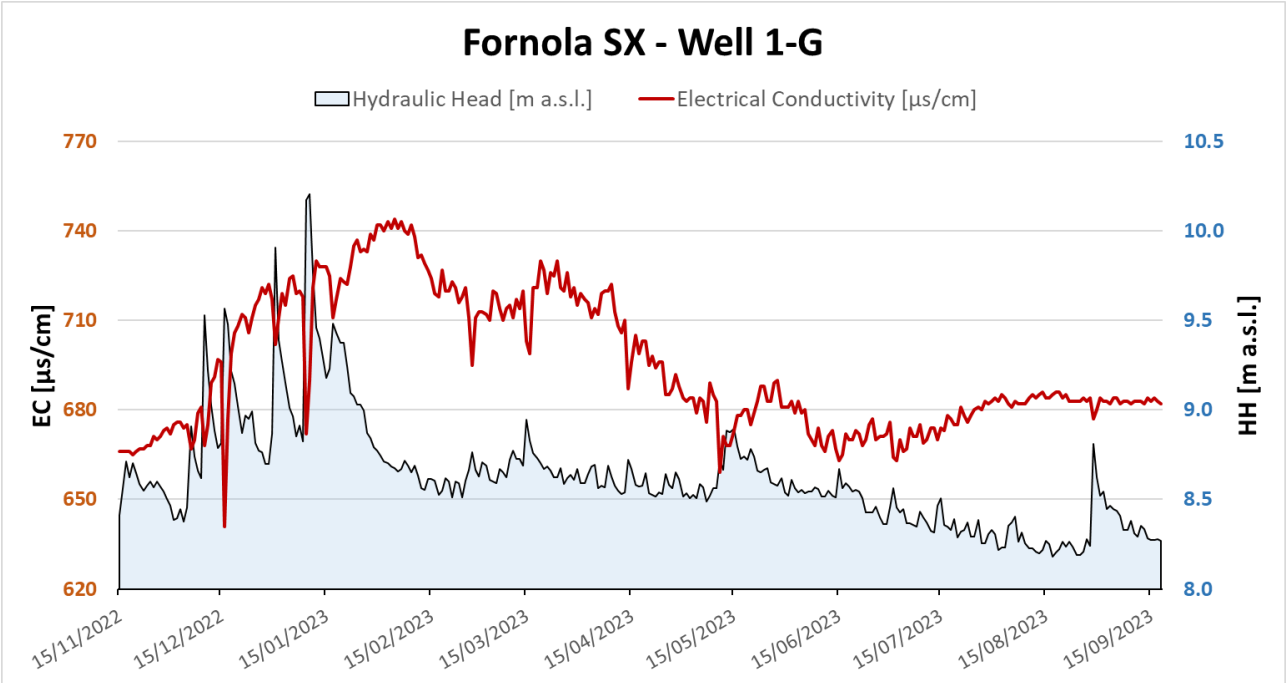


Figura 23 Esempio Risultati monitoraggio piezometrico UniMoRe/ACAM (campo pozzi Fornola, sponda DX F. Magra)

Invece i piezometri in cui vengono realizzate misure periodiche sono riportati in Tabella 7. Alcuni piezometri monitorati in periodico corrispondono ai piezometri monitorati in continuo, in quanto su alcuni piezometri sono state realizzate misure in doppie per avere un controllo sulle misure stesse.

Tabella 7 Piezometri monitorati periodicamente ed inclusi nel modello

Nome piezometro	*Nome piezometro*	
CPSS	**SPM025**	**SPMJJJ**
P01	**SPM026**	**SPMKKK**
P02	**SPM028**	**SPMWWW**
P04	**SPM042**	**SPMYYY**
P05	**SPM053**	**SPM00G**
P07	**SPM061**	**SPM010**
P09	**SPM077**	**SPM020**
P10	**SPM104**	**SPM021**
P12	**SPM106**	**SPM023**
P13	**SPM113**	**SPM024**
P14	**SPM123**	
P15	**SPM126**	
P18	**SPM130**	
P19	**SPMAAA**	
P20	**SPMBBB**	
P21	**SPMFFF**	

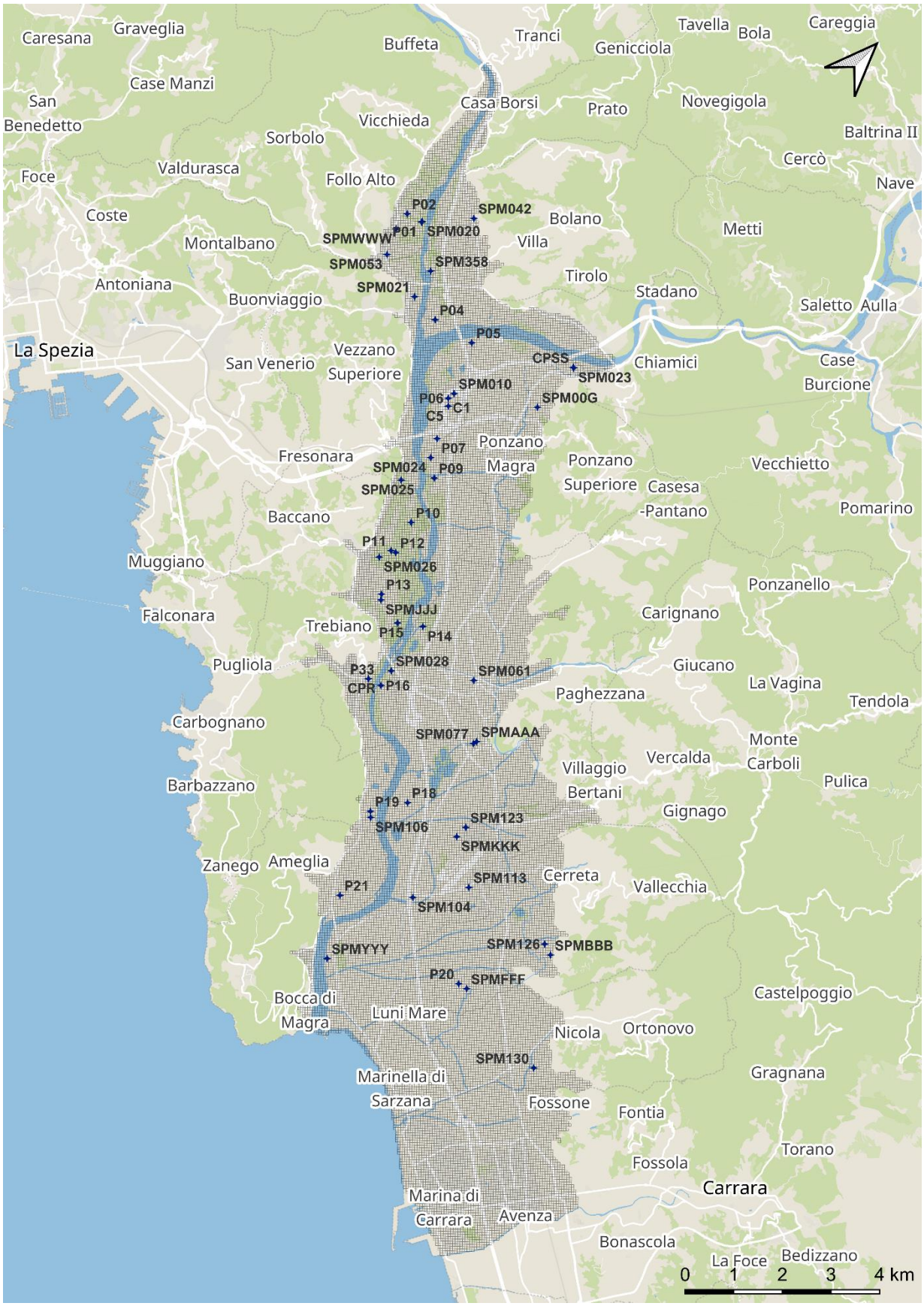


Figura 24 Mappa are del modello con riportati i piezometri (alcuni punti non sono visibili perchè coperti dai punti vicini)

Tabella 8 Indicazione del periodo monitorato dai piezometri monitorati in continuo e periodicamente e valore mediano del Potenziale Idraulico H [m slm].

n	COD Piezometro	INIZIO	FINE	Mediana carico idraulico [m slm]
1	ACAM	15/06/2020	15/06/2022	5.465
2	AL1	02/11/1998	27/11/1998	5.550
3	AL10	01/07/1999	23/08/1999	4.520
4	AL11	01/07/1999	23/08/1999	5.430
5	AL12	23/09/1998	23/08/1999	5.600
6	AL13	23/09/1998	23/08/1999	5.300
7	AL16	23/09/1998	23/08/1999	5.020
8	AL17	23/09/1998	23/08/1999	4.560
9	AL18	23/09/1998	01/07/1999	4.850
10	AL19	23/09/1998	23/08/1999	4.805
11	AL2	23/09/1998	23/09/1998	5.550
12	AL20	23/09/1998	23/08/1999	4.900
13	AL21	23/09/1998	23/08/1999	4.715
14	AL22	23/09/1998	23/08/1999	4.820
15	AL23	01/07/1999	23/08/1999	3.770
16	AL24	23/09/1998	23/08/1999	4.485
17	AL25	23/09/1998	23/08/1999	4.900
18	AL26	23/09/1998	23/08/1999	3.090
19	AL3	23/09/1998	23/08/1999	5.660
20	AL4	23/09/1998	27/07/1999	5.700
21	AL5	23/09/1998	23/08/1999	5.585
22	AL6	23/09/1998	23/08/1999	5.240
23	AL8	23/09/1998	23/08/1999	4.850
24	AL9	23/09/1998	23/08/1999	5.290
25	AR01	15/06/2022	15/06/2022	3.830
26	C1	06/11/2019	05/09/2024	14.360
27	C2	06/11/2019	15/06/2022	13.750
28	C3	06/11/2019	15/06/2022	14.300
29	C4	06/11/2019	12/12/2019	14.360
30	C5	06/11/2019	21/02/2020	13.870
31	CPR	08/03/2022	17/03/2024	0.083
32	CPSS	15/02/2024	15/02/2024	23.666
33	FD1B	18/10/2019	06/11/2019	6.515
34	FD1C	18/10/2019	18/10/2019	5.860
35	FD2B	18/10/2019	07/02/2020	6.010
36	FD2D	18/10/2019	07/02/2020	6.230
37	FD2F	18/10/2019	07/02/2020	5.860
38	FD3A	18/10/2019	06/11/2019	6.845
39	FD3B	18/10/2019	06/11/2019	6.460
40	FD3F	18/10/2019	07/02/2020	6.010
41	FD4F	18/10/2019	07/02/2020	6.570
42	FD5B	18/10/2019	06/11/2019	6.520
43	FD6B	18/10/2019	06/11/2019	6.530
44	FD6D	18/10/2019	06/11/2019	6.670
45	FD6F	18/10/2019	07/02/2020	6.310
46	FD7A	18/10/2019	06/11/2019	6.810
47	FD7D	18/10/2019	06/11/2019	6.885
48	FS1G	18/10/2019	18/09/2023	8.590
49	FS2G	18/10/2019	07/02/2020	10.320
50	FS4G	18/10/2019	07/02/2020	8.830
51	FS5G	12/12/2019	15/06/2022	9.050
52	FS7G	18/10/2019	07/02/2020	8.520
53	GP1	20/12/2000	20/12/2000	6.16
54	GP12	13/12/2000	13/09/2001	3.48

(1 di 3)

n	COD Piezometro	INIZIO	FINE	Mediana carico idraulico [m slm]
55	GP15	15/12/2000	13/09/2001	-0.025
56	GP18	14/12/2000	13/09/2001	0.325
57	GP20	14/12/2000	13/09/2001	4.075
58	GP21	14/12/2000	11/09/2001	11.18
59	GP22	14/12/2000	11/09/2001	11.43
60	GP23	15/12/2000	12/09/2001	0.075
61	GP27	14/12/2000	13/09/2001	2.33
62	GP30	14/12/2000	13/09/2001	2.175
63	GP32	15/12/2000	13/09/2001	4.37
64	GP33	13/12/2000	11/09/2001	0.325
65	GP34	13/12/2000	13/09/2001	0.600
66	GP35	14/12/2000	12/09/2001	5.500
67	GP37	14/12/2000	11/09/2001	3.04
68	GP38	14/12/2000	12/09/2001	0.050
69	GP39	13/12/2000	12/09/2001	1.375
70	GP4	20/12/2000	20/12/2000	4.700
71	GP40	15/12/2000	11/09/2001	0.725
72	GP41	14/12/2000	11/09/2001	1.550
73	GP43	15/12/2000	12/09/2001	3.725
74	GP46	11/09/2001	20/12/2001	3.925
75	GP49	14/12/2000	12/09/2001	0.350
76	GP51	16/02/2001	11/09/2001	0.850
77	GP54	15/12/2000	12/09/2001	0.750
78	GP55	16/02/2001	11/09/2001	1.050
79	GP56	11/09/2001	11/09/2001	0.600
80	GP57	12/09/2001	12/09/2001	-0.450
81	GP59	11/09/2001	11/09/2001	3.900
82	GP6	13/12/2000	12/09/2001	9.39
83	GP61	15/12/2000	12/09/2001	-0.525
84	GP69	14/12/2000	12/09/2001	1.900
85	GP7	13/12/2000	13/09/2001	7.275
86	GP71	21/03/2001	11/09/2001	-0.450
87	GP72	15/12/2000	13/09/2001	0.300
88	GP74	21/03/2001	11/09/2001	0.675
89	GP77	15/12/2000	13/09/2001	0.700
90	GP80	15/12/2000	12/09/2001	0.300
91	GP81	14/12/2000	12/09/2001	0.900
92	P01	19/03/2024	12/04/2024	21.938
93	P02	18/10/2019	12/04/2024	22.53
94	P03	18/10/2019	15/02/2024	17.655
95	P04	18/10/2019	12/04/2024	17.340
96	P05	18/10/2019	12/04/2024	17.540
97	P06	18/10/2019	13/09/2024	12.399
98	P07	22/03/2024	12/04/2024	10.308
99	P09	18/03/2024	18/03/2024	8.609
100	P10	21/03/2024	13/09/2024	5.930
101	P11	15/02/2024	10/03/2025	5.200
102	P12	21/03/2024	10/03/2025	5.435
103	P13	21/03/2024	10/03/2025	4.830
104	P14	18/10/2019	12/09/2024	4.36
105	P15	21/03/2024	06/03/2025	4.020
106	P16	15/02/2024	10/03/2025	-0.030
107	P17	18/10/2019	16/01/2020	11.200

(2 di 3)

n	COD Piezometro	INIZIO	FINE	Mediana carico idraulico [m slm]
108	P18b	18/10/2019	20/02/2020	9.270
109	P19b	18/10/2019	20/02/2020	12.270
110	P20	18/10/2019	12/04/2024	1.57
111	P21	23/03/2024	13/09/2024	0.505
112	P22	18/10/2019	05/09/2024	8.090
113	P23	18/10/2019	06/02/2020	12.24
114	P24b	18/10/2019	06/02/2020	6.260
115	P25	15/06/2022	15/06/2022	6.190
116	P26	18/10/2019	12/09/2024	9.290
117	P28	18/10/2019	06/02/2020	17.080
118	P30	18/10/2019	09/01/2020	15.905
119	P31	18/10/2019	15/02/2024	25.160
120	P32	19/09/2023	19/09/2023	-0.110
121	P33	03/02/2022	17/03/2024	0.080
122	P41	15/06/2022	07/06/2024	21.940
123	P42	23/03/2024	13/09/2024	22.380
124	P44	19/03/2024	12/09/2024	15.400
125	P45	21/03/2024	12/04/2024	4.300
126	P46	22/03/2024	07/06/2024	-0.240
127	P47	21/03/2024	13/09/2024	0.255
128	P48	22/03/2024	13/09/2024	1.89
129	P99	18/10/2019	06/02/2020	17.090
130	PDZ	18/10/2019	06/11/2019	6.240
131	PP01	18/10/2019	18/10/2019	11.450
132	PP02	18/10/2019	18/10/2019	11.470
133	PP03	18/10/2019	22/11/2019	13.130
134	PR1	18/10/2019	06/11/2019	22.51
135	RSN1	06/03/2025	10/03/2025	4.640
136	RSS7	10/03/2025	10/03/2025	4.490
137	RSS8	10/03/2025	10/03/2025	4.580
138	RSSp	06/03/2025	10/03/2025	5.390
139	S3	22/11/2019	12/12/2019	14.440
140	SPM00G	20/02/2007	28/04/2022	9.330
141	SPM020	22/02/2007	08/05/2023	21.430
142	SPM021	25/05/2011	13/11/2017	16.46
143	SPM023	24/04/2007	05/05/2023	24.710
144	SPM024	17/04/2008	08/05/2023	9.350
145	SPM025	22/02/2007	24/10/2018	5.8
146	SPM026	22/02/2007	04/05/2022	6.100
147	SPM028	22/02/2007	08/05/2023	0.620
148	SPM042	20/02/2007	08/05/2023	25.92
149	SPM053	21/08/2007	09/11/2022	23.83
150	SPM061	21/02/2007	08/05/2023	10.800
151	SPM106	30/10/2009	30/10/2009	0.000
152	SPM130	21/02/2007	03/11/2022	4.700
153	SPM358	31/05/2016	08/05/2023	18.25
154	SPMBBB	24/10/2012	08/08/2022	2.195
155	SPMFFF	21/02/2007	03/11/2022	1.900
156	SPMJJJ	11/11/2019	11/11/2019	3.780
157	SPMKKK	23/04/2012	08/05/2023	6.560
158	SPMWWW	21/02/2007	09/11/2022	22.1
159	SPMYYY	27/02/2007	26/10/2022	2.730
160	WSD	18/10/2019	18/10/2019	5.900

(3 di 3)

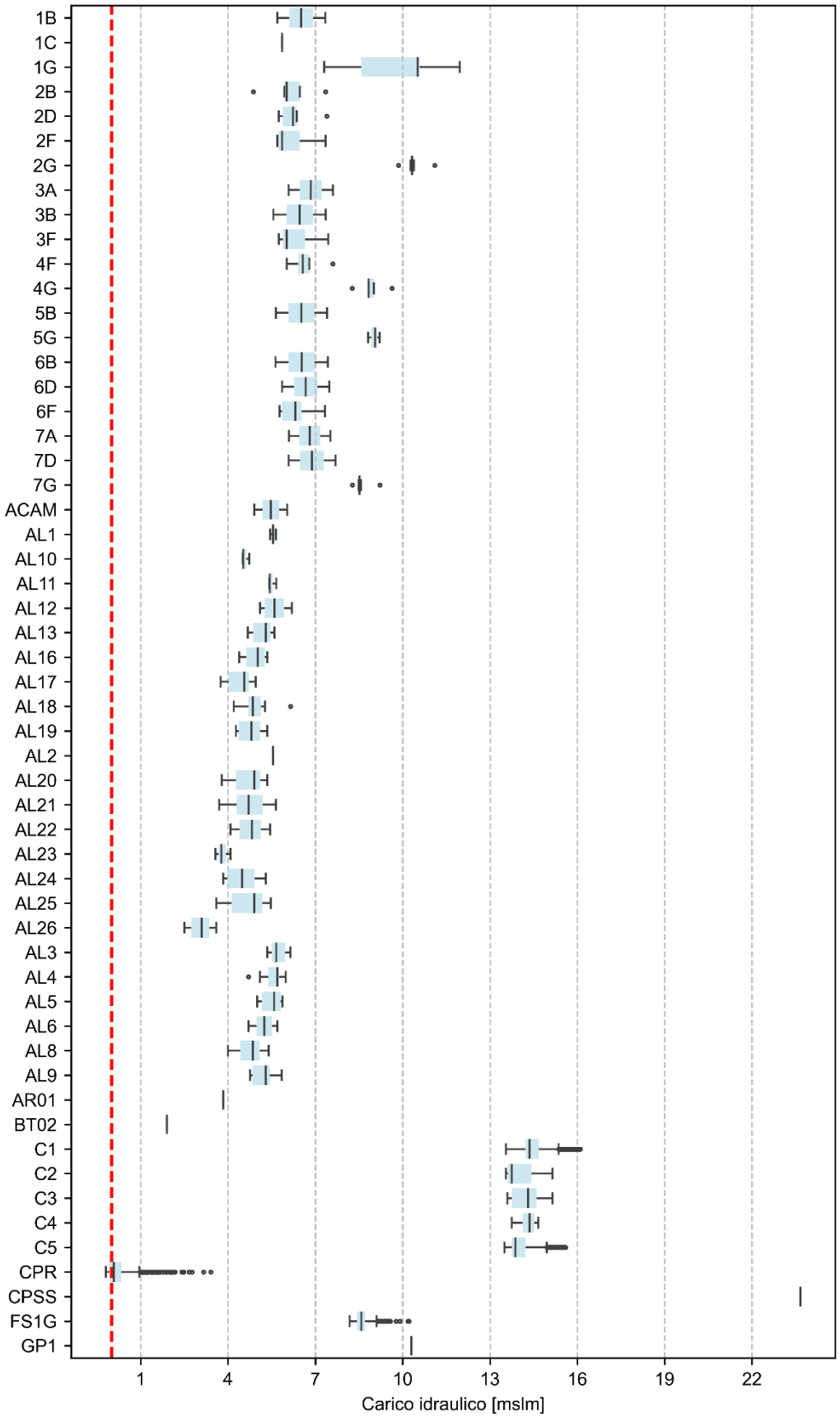


Figura 25 Box-plot variazioni potenziale idraulico H [m slm] nei piezometri monitorati in continuo e in periodico.

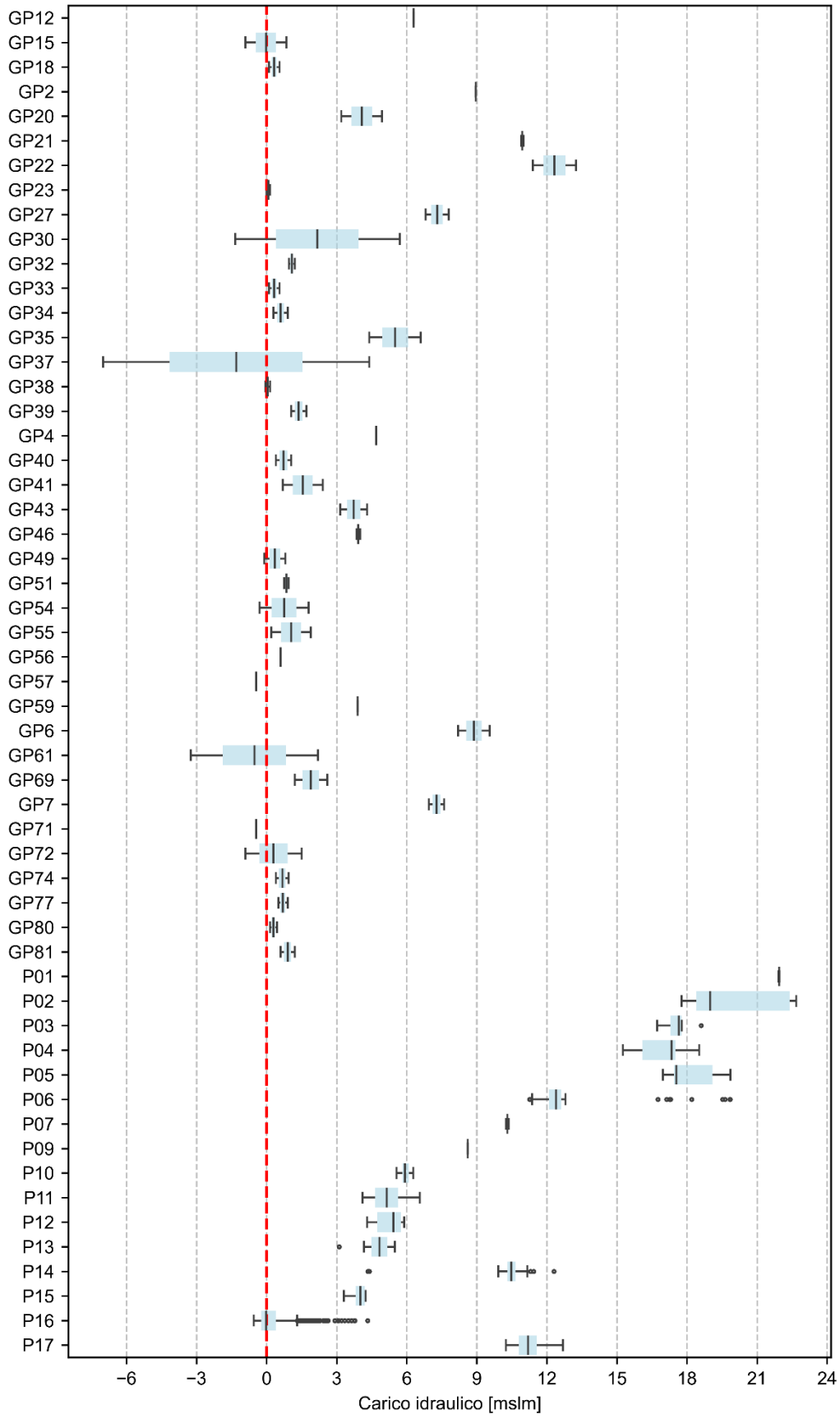


Figura 26 Box-plot variazioni potenziale idraulico H [m slm] nei piezometri monitorati in continuo e in periodico.

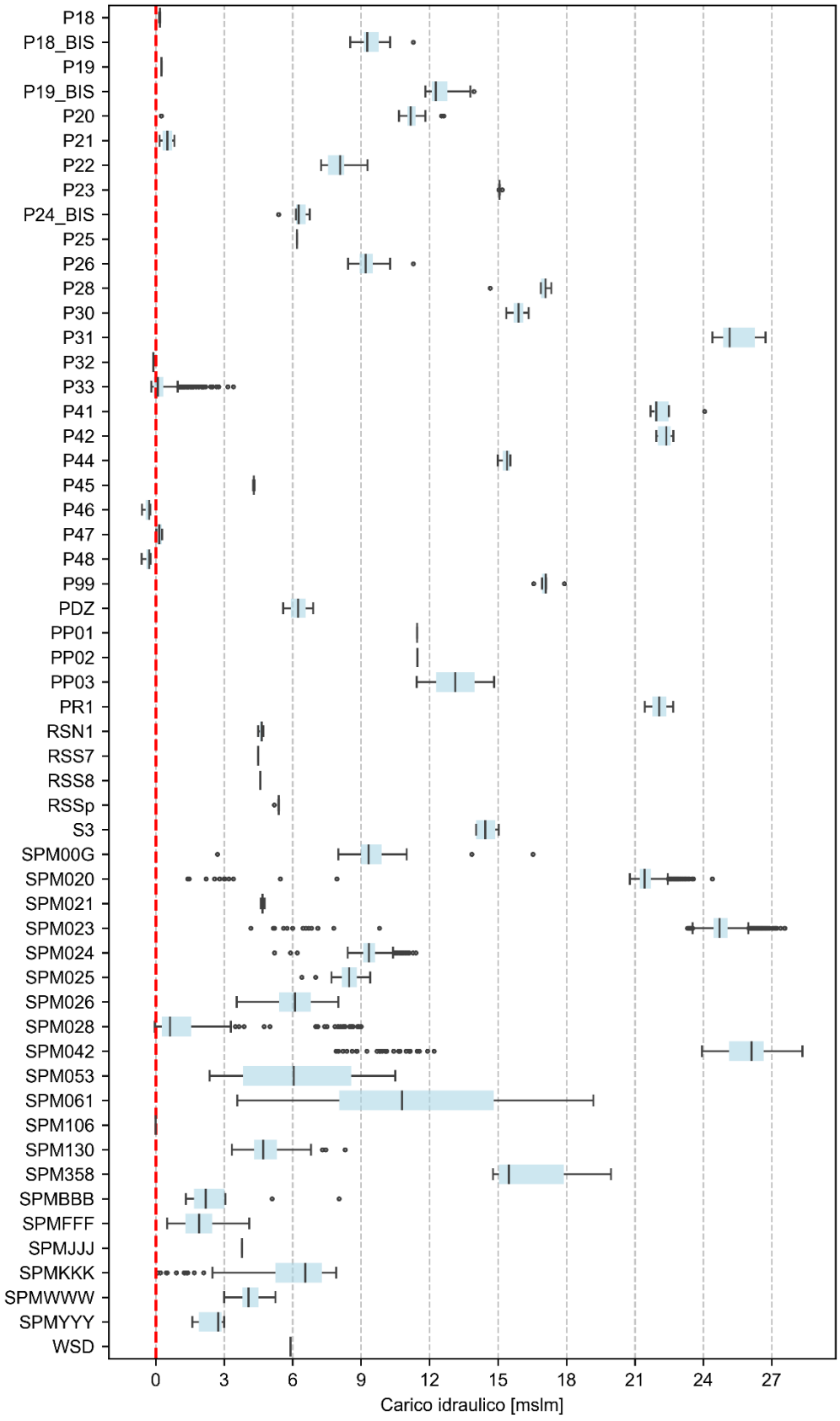


Figura 27 Box-plot variazioni potenziale idraulico H [m slm] nei piezometri monitorati in continuo e in periodico.

2.9. Valori di permeabilità da prove di pompaggio realizzate nella bassa Val Magra

A partire dagli anni 1967 ad oggi, nell'area del modello numerico sono state condotte diverse prove di pompaggio e test di permeabilità. Le prove precedenti al 2019 sono state recuperate da Relazioni Tecniche e Tesi di Laurea di vario tipo e commissionate da vari enti (Merlisenna e Piaggi, 1972; ACAM; etc.). Di seguito viene riportata una tabella con il riepilogo delle prove di pompaggio e con indicata l'ubicazione, la data e il documento da cui è stata recuperata.

Tabella 9 Valori di conducibilità idraulica derivante da prove di pompaggio recenti e storiche

Località	Nome Pozzo da verbale di prova	Data	Fonte	K (m/s)
Fornola	17	28/12/1967	MERILISENNA & PIAGGI (TESI DI LAUREA1972)	3.40E-03
Bottagna	39	14/07/1972	MERILISENNA & PIAGGI (TESI DI LAUREA1972)	1.70E-03
Ressora	14	apr-1972	MERILISENNA & PIAGGI (TESI DI LAUREA1972)	8.70E-04
Romito	3b	lug-1971	MERILISENNA & PIAGGI (TESI DI LAUREA1972)	5.00E-04
Saliceti, ReCos	Vicino S3	Giu-2019	Autori Vari – RECOS (2019b)	1.00E-03
Generico Bassa Val Magra	vari	vari	Atlante Acquiferi Liguria (Ottonello et al., 2005)	5.90E-02 / 1.00E-03
Saliceti, ReCos	Vicino S3	Oct-2019	Autori Vari – RECOS (2019c)	6.46E-03
Fornola	2F	n.d.	ACAM	1.70E-03
Fornola	1F	n.d.	ACAM	3.10E-03
Fornola	1G	n.d.	ACAM	4.90E-04
Fornola	3G	n.d.	ACAM	7.60E-04
Fornola	5G	n.d.	ACAM	3.60E-04
Battifollo	Pozzo1	08/08/1990	PREVIDI & SIMONELLI (1991)	3.1E-03
Romito	Pozzo	2023	UniMoRe	2.30E-04

Tabella 10 Valori di conducibilità idraulica derivante da prove in foro di sondaggio "prove Lefranc"

CODE Sondaggio	TRATTO DA [m]	TRATTO A [m]	K [m/s]	TIPO_PROVA
RCT1	4.50	5.20	5.69E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT1	4.50	5.20	3.73E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT1	9.00	9.80	2.65E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE

RCT1	9.00	9.80	3.01E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT1	15.00	15.80	2.28E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT1	15.00	15.80	2.05E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT1	18.00	18.70	2.69E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT1	22.50	23.10	4.64E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT1	22.50	23.10	4.09E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT1	27.00	27.80	2.97E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT1	27.00	27.80	3.19E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	4.50	5.10	5.51E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	4.50	5.10	6.96E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	12.00	12.80	2.82E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	12.00	12.80	2.05E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	18.00	18.70	4.94E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	18.00	18.70	3.90E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	21.00	21.70	1.25E-06	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	21.00	21.70	2.88E-06	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	22.50	23.10	2.37E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	22.50	23.10	3.21E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT2	27.00	27.70	2.47E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT2	27.00	27.70	3.06E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	6.00	6.70	3.58E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT3	6.00	6.70	3.17E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	12.00	12.80	3.44E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT3	12.00	12.80	3.57E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	16.50	17.10	2.11E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE

RCT3	16.50	17.10	2.00E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	21.00	21.70	7.22E-06	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT3	21.00	21.70	8.57E-06	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	24.00	24.80	2.20E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT3	24.00	24.80	2.73E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT3	28.50	29.20	3.47E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT3	28.50	29.20	3.33E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT4	4.50	5.30	1.36E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT4	4.50	5.30	1.85E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT4	13.50	14.10	3.29E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT4	13.50	14.10	4.21E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT5	4.50	5.30	5.59E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT5	4.50	5.30	5.55E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT5	12.00	12.70	3.88E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT5	12.00	12.70	3.16E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT6	6.00	6.70	5.33E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT6	6.00	6.70	6.22E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
RCT6	13.50	14.10	4.53E-05	LEFRANC CARICO COSTANTE
RCT6	13.50	14.10	3.62E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
MI2	2.50	4.00	5.00E-06	LEFRANC CARICO VARIABILE
MI3	6.66	7.00	2.60E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE
MI4	2.58	3.00	1.66E-04	LEFRANC CARICO VARIABILE
MI5	3.00	3.50	5.05E-06	LEFRANC CARICO VARIABILE
MI6	7.50	8.00	1.50E-05	LEFRANC CARICO VARIABILE

Tabella 11 Cordinate dei sondaggi dove sono state realizzate le "prove Lefranc"

CODE Sondaggio	Coord. EST	Coord. NORD
RCT1	573704.332	4885161.097
RCT2	573925.778	4885133.529
RCT3	573887.729	4885023.261
RCT4	573799.790	4885105.079
RCT5	573869.779	4885095.829
RCT6	573956.117	4885083.670
RCT7	573709.802	4885166.467
MI1	574317.500	4885220.059
MI2	573984.505	4885595.050
MI3	573746.508	4885894.044
MI4	573492.511	4886386.033
MI5	572986.714	4886774.809
MI6	572502.134	4887103.057

2.10. Stato attuale intrusione marina

Durante gli anni 2022 e 2023, è stata osservata una condizione meteorologica di intensa e prolungata siccità. Durante lo stesso periodo, sono stati misurati periodicamente i valori di EC (conducibilità elettrica S/cm) delle acque superficiali in 6 campagne di misurazione che hanno coinvolto diverse stazioni di monitoraggio lungo il fiume Magra (lungo le sponde del fiume). I dati raccolti sono stati riportati su mappe che mostrano immagini temporali dell'intrusione marina lungo l'estuario (Figura 28). L'estensione dell'intrusione marina sono il risultato di diverse condizioni climatiche e stagionalità e riassumono il dinamismo dell'area dell'estuario. Le due situazioni estreme osservate sono mostrate nella Figura 1, a sinistra il modello di EC che rappresenta la minima estensione dell'intrusione marina e a destra il modello di EC che rappresenta il massimo dell'estensione dell'intrusione marina lungo il fiume Magra. La massima estensione dell'intrusione marina raggiunge la "barriera altimetrica naturale/artificiale" (resti del vecchio ponte crollato) situata nel toponimo di Romito, a 8.5 km dalla foce (Figura 29).

Il monitoraggio della EC nelle acque sotterranee è riportato nella Figura 30 e mostra l'estensione attuale dell'intrusione marina.

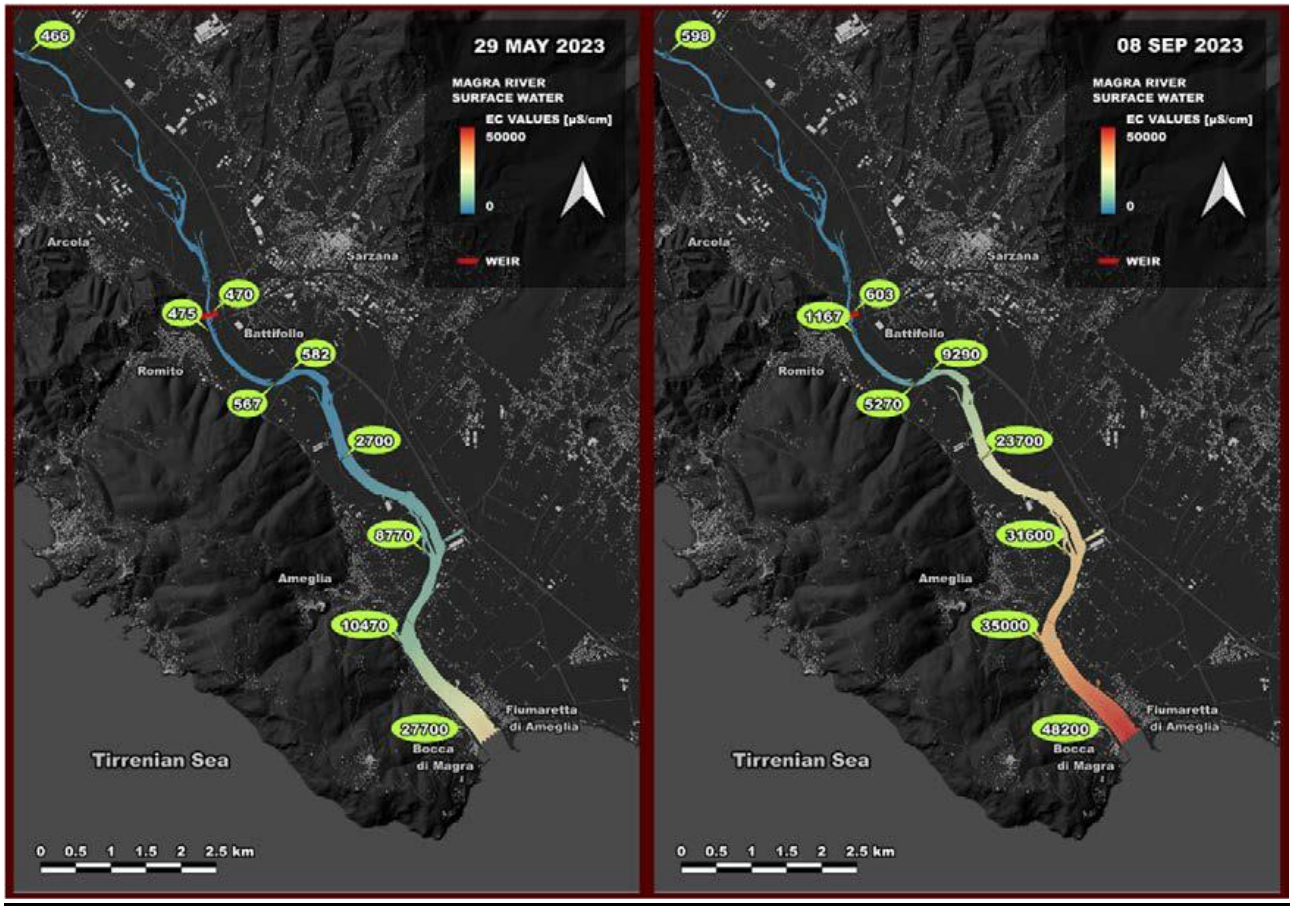


Figura 28 A sinistra: il modello di EC che rappresenta la minima intrusione marina osservato lungo l'estuario del fiume Magra. A destra: il modello di EC che rappresenta la massima intrusione marina osservato lungo l'estuario del fiume Magra.



Figura 29 Immagine "barriera altimetrica naturale/artificiale": immagine A, Ponte in fase di crollo; immagine B, resti ponte crollato.

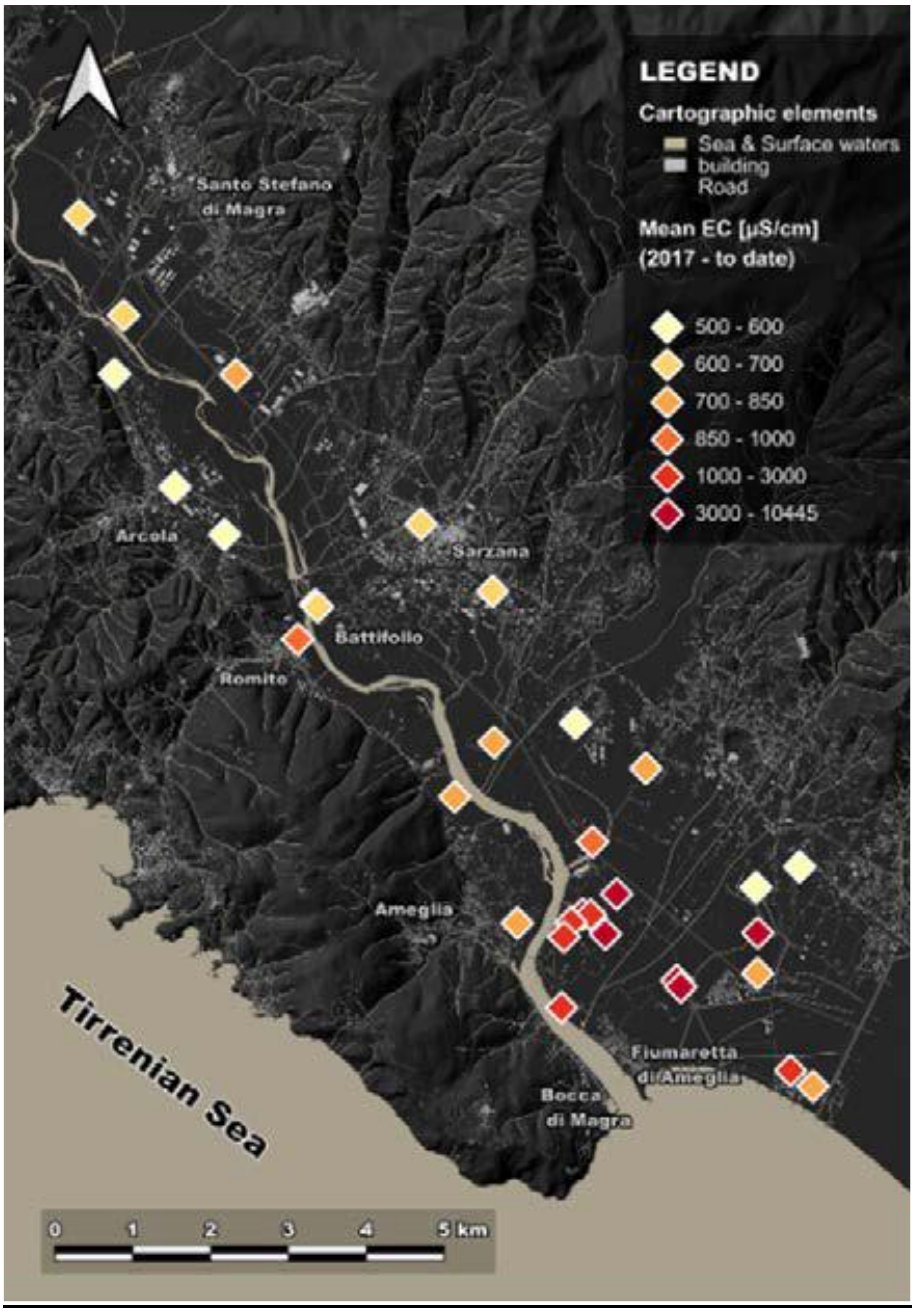


Figura 30 Mappa dei valori di EC delle acque sotterranee misurati nei pozzi (valore di EC: media dal 2017 ad oggi).

Il cambiamento climatico, oltre ad innescare variazioni di precipitazione e temperatura dell'aria, comporta variazioni del livello marino. L'agenzia spaziale NASA prevede per la zona di mare a fronte della Regione Liguria un innalzamento progressivo sino a 0.6 m al 2100. Questo fenomeno di innalzamento comporterà un avanzamento nell'entroterra del fenomeno dell'ingressione marina, sia nelle acque superficiali che sotterranee. In particolare, l'innalzamento del livello del mare agevolerà l'ingressione marina lungo il fiume Magra, superando l'attuale soglia presente in alveo tra Romito e Battifollo (Figura 32).

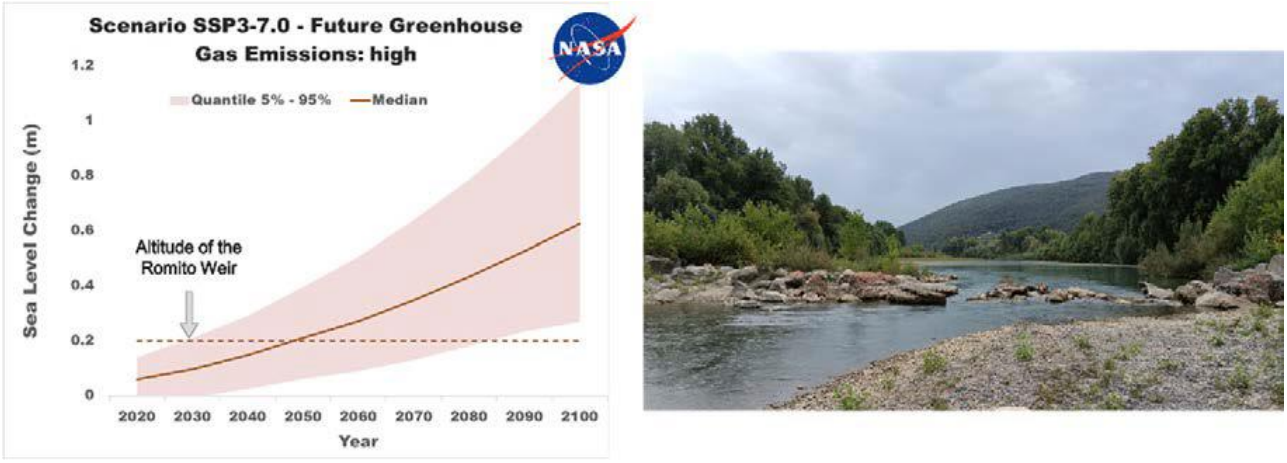


Figura 31 A sinistra, NASA scenario di innalzamento del livello marino nel mare Ligure, con evidenziata l'altezza della soglia altimetrica attualmente presente in fiume di fronte a Romito (linea tratteggiata rossa); A destra foto alveo Magra in corrispondenza di Romito, è visibile la soglia altimetrica dovuta ai resti di crollo del vecchio ponte Romito-Battifollo.

3. BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI BACINO

3.1. Sintesi

La realizzazione di un modello numerico di flusso di acque sotterranee con lo scopo di prevedere gli impatti che i cambiamenti climatici avranno sulle risorse idriche dell'acquifero alluvionale della bassa val Magra, ha dettato alcune necessità in fase di implementazione:

- Necessità di rappresentare in modo adeguato i rapporti tra acque superficiali-acque sotterranee, considerando oltre che i principali corsi d'acqua presenti anche i corsi d'acqua tributari;
- Necessità di stimare il volume di acqua proveniente dai rilievi montuosi che si sviluppano lungo i fianchi nord-orientali e sud-occidentali della valle (overland flow);
- Necessità di determinare una relazione tra le forzanti del sistema acquifero in questione (piogge efficaci, corsi d'acqua e overland flow) alle variabili meteo-climatiche di cui si dispone una previsione di lungo termine. Normalmente, le principali previsioni climatiche riguardano le variabili pioggia totale (P_tot) e temperatura media (T_media).

La metodologia (Figura alla fine) adottata nel presente studio prevede che la fase di modellazione numerica vera e propria sia preceduta dal calcolo del bilancio idrico alla scala del bacino contribuente alla regione investigata; a questo scopo viene dapprima eseguito il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale (EVT_p) secondo la formulazione di Thorntwaite partendo dai dati T_media. Successivamente, i dati di P_tot privati di un'aliquota di intercettazione valutata sulla base del dataset Corine Land Cover (CLC, vedi tabella) ed EVT_p vengono elaborati mediante modello di tipo "T" (o T-Model, vedi Alley 1989) attraverso il quale vengono ottenute le aliquote in termini di altezza di precipitazione che ogni mese contribuiscono alla ricarica verticale diretta (P_eff) e alle portate volumetriche ai corsi d'acqua (P_stream). I valori di P_eff e P_stream di ogni stazione meteo sono state quindi spazializzate su tutta l'area del bacino idrografico del Vara-Magra mediante poligoni di *Voronoi*. L'aliquota P_eff è stata considerata solo nella porzione di territorio che insiste sul dominio di modellazione (§ Implementazione) mentre la P_stream spazializzata sull'area è stata utilizzata come raster di pesi per un algoritmo di *Flow Accumulation* utilizzando come base altimetrica il DEM SRTM a 30 metri di risoluzione (SRTM30). L'algoritmo è stato

utilizzato per (1) la determinazione delle portate volumetriche da assegnare alle principali aste fluviali che andranno a parametrizzare la *boundary* SFR §cap.Implementazione; e per (2) la determinazione dell'*overland flow* sommando i volumi accumulati lungo i margini montani del dominio di modellazione.

Di seguito, le varie fasi verranno descritte con maggiore dettaglio, unitamente ai risultati ottenuti

3.2. Dati meteo

Sono stati scaricati i dataset di pioggia cumulata giornaliera e temperatura media giornaliera delle 40 stazioni meteo all'interno o immediatamente adiacenti al bacino idrografico del Vara-Magra dai portali di competenza delle regioni Liguria (LIG), Toscana (TOS) ed Emilia-Romagna (RER). I database RER, LIG e TOS attraversano rispettivamente un range temporale dal 2006-2024, dal 2019 al 2023 e dal 1993 al 2024, (vedi tabella). L'informazione delle varie stazioni è stata spazializzata su tutta l'area del bacino mediante la costruzione di poligoni di Voronoi.

Tabella 12 Stazioni Meteorologiche utilizzate per calcolo bilancio attuale

Stazione	Regione	da	a	LAT	LON	quota
Berceto	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.51048	9.98301	758.00
CALICE AL C. - MOLUNGHI	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.24894	9.83869	425.00
CARRO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.27525	9.59772	437.00
CASALE DI PIGNONE	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.18992	9.71496	175.00
Casoni di Santa Maria di Taro	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.43751	9.48070	853.00
CASONI DI SUVERO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.30542	9.76581	1070.00
CASTELNUOVO MAGRA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.10379	10.00705	96.00
CEMBRANO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.35237	9.58414	410.00
Cerreto Laghi	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.29873	10.23857	1336.00
CUCCARELLO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.34967	9.69908	835.00
LA FOCE - MTE VISEGGI	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.13254	9.79030	350.00
Lagdei	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.41229	10.00854	1252.00
Lago Ballano	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.36949	10.10208	1339.00
Lago Paduli	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.34580	10.13845	1151.00
LUNI - PROVASCO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.07491	10.00899	5.00
MARINELLA DI SARZANA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.05021	10.01409	2.00
MATTARANA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.24499	9.61474	470.00
MONTE ROCCHETTA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.07129	9.93842	405.00
Montegroppo	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.41878	9.68641	656.00

Ostia Parmense	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.51406	9.84219	354.00
PADIVARMA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.19514	9.77099	75.00
RICCO' DEL GOLFO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.15261	9.76264	143.00
S. MARGHERITA VARA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.27470	9.65964	180.00
SARZANA	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.11227	9.96546	26.00
SCURTABO'	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.40681	9.53384	685.00
SERO' DI ZIGNAGO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.26434	9.73698	580.00
SESTA GODANO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.29848	9.67751	265.00
TAGLIETO	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.40530	9.62050	895.00
Tarsogno	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.44668	9.61803	852.00
TAVARONE	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.31274	9.54859	603.00
TOS02000177	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.13464	10.19736	1070.00
TOS11000029	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.11642	10.10391	960.00
TOS11000030	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.12773	10.00141	300.00
TOS11000098	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.22899	10.06827	203.00
TOS11000099	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.22178	9.89976	420.00
TOS11000100	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.25032	9.96890	156.00
TOS11000101	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.36949	9.89275	340.00
TOS11000104	Toscana	21/01/1993	06/10/2024	44.22666	9.96656	64.00
Valdena	Emilia-Romagna	01/01/2006	20/09/2024	44.44414	9.78421	762.00
VARESE LIGURE	Liguria	01/01/2019	15/11/2023	44.38313	9.58420	345.00

3.3. Uso del suolo, altimetria e corsi d'acqua principali

La mappa di uso del suolo e coperture è basata sul *Corine Land Cover* ed è stata scaricata dal portale web Copernicus. Arealmente il bacino idrografico è ricoperto per il 77.7% da foreste, in larga parte di latifoglie (56.3%), a seguire il 18.4% è ricoperto da aree agricole, mentre il 3.7% da aree urbanizzate. La tabella successiva presenta i coefficienti associati ad ogni singola copertura dell'uso del suolo. Come base altimetrica per il bilancio a scala di bacino è stato adottato lo *Shuttle Radar Topography Mission* con risoluzione a 30 m (SRTM30)

L'individuazione dei corsi d'acqua principali da rappresentare nel modello numerico è stata basata sul dataset Copernicus EU-Hydro River-Net basato a sua volta dall'elaborazione di immagini ad alta risoluzione del parametro NVDI che hanno portato a determinare la presenza di acque superficiali non effimere.

Tabella 13 Coefficienti di infiltrazione/ruscellamento in base ai differenti usi del suolo

LAND COVER	RUNOFF_COEFF	INFCOEFF
1.1.1 Continuous urban fabric	0.90	0.10
1.1.2 Discontinuous urban fabric	0.35	0.65
1.2.1 Industrial or commercial units	0.90	0.10
1.2.2 Road and rail networks and associated land	0.90	0.10
1.2.3 Port areas	0.90	0.10
1.2.4 Airports	0.35	0.65
1.3.1 Mineral extraction sites	0.20	0.80
1.3.2 Dump sites	0.90	0.10
1.4.1 Green urban areas	0.20	0.80
1.4.2 Sport and leisure facilities	0.20	0.80
2.1.1 Non-irrigated arable land	0.10	0.90
2.2.1 Vineyards	0.10	0.90
2.2.3 Olive groves	0.10	0.90
2.3.1 Pastures	0.10	0.90
2.4.1 Annual crops associated with permanent crops	0.10	0.90
2.4.2 Complex cultivation patterns	0.10	0.90
2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	0.10	0.90
2.4.4 Agro-forestry areas	0.10	0.90
3.1.1 Broad-leaved forest	0.15	0.85
3.1.2 Coniferous forest	0.15	0.85
3.1.3 Mixed forest	0.15	0.85
3.2.1 Natural grasslands	0.15	0.85
3.2.3 Sclerophyllous vegetation	0.15	0.85
3.2.4 Transitional woodland-shrub	0.15	0.85
3.3.1 Beaches, dunes, sands	0.15	0.85
3.3.2 Bare rocks	0.15	0.85
3.3.3 Sparsely vegetated areas	0.15	0.85
3.3.4 Burnt areas	0.15	0.85
4.1.1 Inland marshes	0.00	1.00
5.1.1 Water courses	0.00	1.00
5.1.2 Water bodies	0.00	1.00
5.2.2 Estuaries	0.00	1.00
5.2.3 Sea and ocean	0.00	1.00

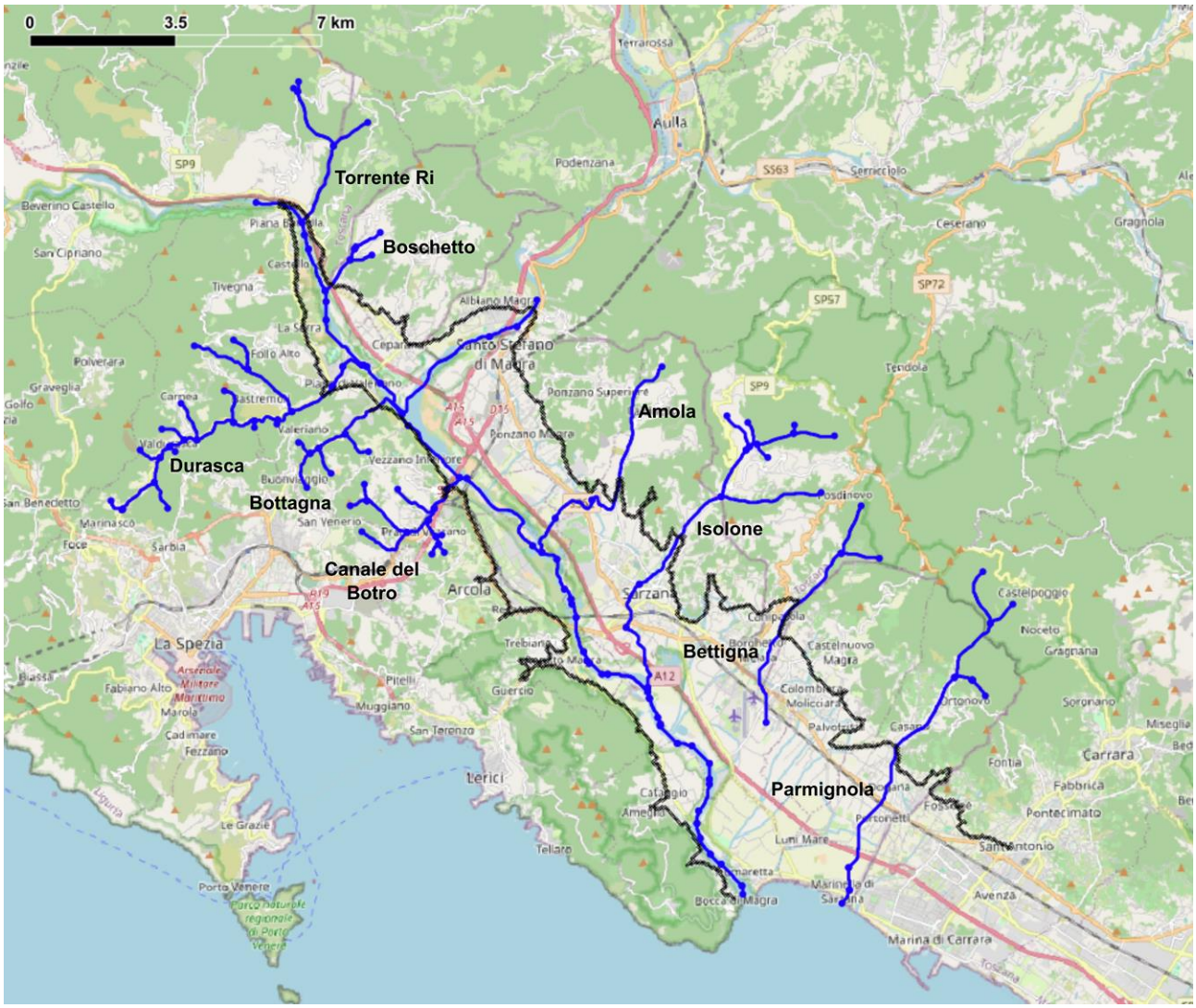


Figura 32 Corsi d'acqua analizzati nel bilancio

3.4. Calcolo dell'evapotraspirazione potenziale

Per evapotraspirazione potenziale viene intesa quell'aliquota di acqua che verrebbe sottratta dal suolo per via dei processi di traspirazione operata dalle piante e di evaporazione diretta, nel caso in cui fosse disponibile tutto il quantitativo di acqua necessario: è da intertenersi, quindi, come un valore massimale teorico.

Il calcolo dell'evapotraspirazione è stato eseguito applicando la formulazione di Thornthwaite (C. W. Thornthwaite, 1948) che consente di ottenere l'evapotraspirazione potenziale mensile (EVT_p) espressa in termini altezza di precipitazione [mm].

3.5. Determinazione delle piogge efficaci

Dal momento che EVT_p è un valore teorico che non tiene conto dell'effettiva disponibilità di acqua in un dato momento, sottrarre questa aliquota dalla P_inf del mese corrispondente può portare a dei valori di pioggia efficace negativi (soprattutto nei mesi estivi). La procedura impiegata per far fronte a questa limitazione è quella di simulare l'aliquota disponibile per l'evapotraspirazione mediante un modello a serbatoio o T-Model, (Alley, 1984; McCabe & Markstrom, 2007; Steenhuis & Molen, 1986; C. Thornthwaite & Mather, 1955).

Nei modelli T-Model il suolo viene concettualizzato come un serbatoio parametrizzato da un valore di soil moisture storage (STC) che rappresenta l'aliquota d'acqua, espressa in termini di altezza di precipitazione, che il suolo è in grado di trattenere e che rende disponibile per l'evapotraspirazione.

Questo parametro può essere stimato in funzione del tipo di terreno superficiale e della profondità dell'apparato radicale (Allen et al., 1998), in questo studio è stata eseguita una rapita calibrazione del parametro (vedi capitolo successivo: **Determinazione delle portate alle aste fluviali selezionate**)

Un'aliquota d'acqua può essere aggiunta o sottratta dal serbatoio, rispettivamente nei casi in cui la cumulata di pioggia del i-esimo mese (P_inf) sia maggiore o minore di EVT_p dello stesso mese. Nel primo caso (P_inf ≥ EVT_p), l'aliquota aggiunta una volta sommata a quella già presente alla fine del mese precedente, non può essere maggiore al valore di STC, superato il quale, l'eccesso viene considerato SURPLUS che viene ulteriormente diviso nei termini *moisture* e P_stream. L'aliquota di P_stream viene calcolata come frazione (parametro *lambda* in Alley 1989) della somma di SURPLUS del mese corrente e del mese precedente.

3.6. Determinazione delle portate alle aste fluviali selezionate

La frazione di pioggia che contribuisce alle portate liquide ai corsi d'acqua determinata precedentemente (P_stream) è stata utilizzata come raster di pesi per un algoritmo di *Flow Accumulation* utilizzando come base altimetrica l'SRTM30, preventivamente pulito di *sinks*. L'algoritmo moltiplica il raster di pesi fornito con l'area delle celle, accumulando i valori così ottenuti (che in questo caso sono dimensionamente dei volumi) partendo dalle aree più elevate e procedendo verso valle seguendo la vergenza del rilievo. L'output ottenuto

rappresenta non solo una delineazione delle vie di drenaggio ma anche un'approssimazione delle portate volumetriche che transitano ad ogni posizione.

Dal confronto delle portate stimate dal metodo fin qui descritto (T-model + flow accumulation) è stato possibile tarare via trial-and-error i due parametri che compaiono in questo approccio, ovvero STC o la capacità di ritenzione idrica del suolo e il parametro λ, entrambi sono omogenei per tutto il bacino idrografico di riferimento e sono stimati rispettivamente in 180 mm e 0.6.

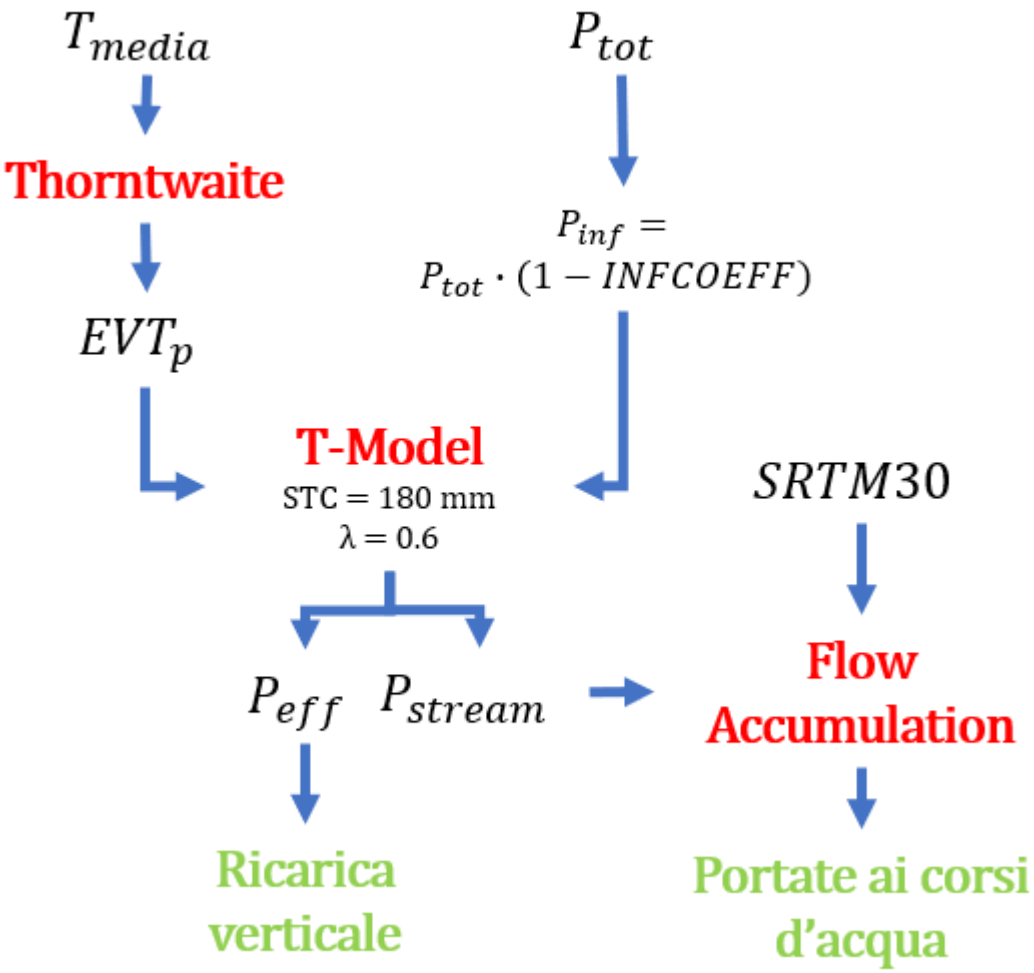


Figura 33 - Workflow alla base del bilancio idrico a scale di bacino. Acronimi citati nel testo.

I risultati del modello appena descritto sono riportati nella tabella seguente. Si può notare come il T-model combinato con il flusso di accumulo riproduca bene le portate del Magra (+0.34 %), sovrastimando quelle del Vara (+23%). Come già accennato in precedenza, nell'ambito del presente studio il modello idrologico a scala di bacino ha il solo scopo di

stimare le portate dei corsi d'acqua tributari e di fornire un elemento per poter declinare le proiezioni future di precipitazione e temperatura in una forma utile all'implementazione del modello numerico. Pertanto, in fase di implementazione del modello numerico verranno utilizzati i valori di portata ottenuti, fatta eccezione per il fiume Vara, la cui discrepanza con le portate misurate, ritenuta non trascurabile, verrà tenuta in debita considerazione nelle simulazioni previsionali.

Tabella 14 – Risultati in termini di portata Q del modello idrologico a scala di bacino per le condizioni attuali (di calibrazione CAL) ottenuto combinando il T-Model con il flusso di accumulo. T-Model parametrizzato con STC = 180mm e lambda=0.6.

Asta fluviale	Q (CAL) [mc_day]	Q (CAL) [mc_s]	
Torrente_Ri	9.49	1.1E-04	
unknown_boschetto	3.10	3.6E-05	
Durasca	18525.91	0.2144	
unknown_bottagna	7143.34	0.0827	
CanaleDelBotro	9099.93	0.1053	
TorrenteAmola	13905.66	0.1609	
TorrenteCalcandola	16390.98	0.1897	
Isolone	6945.36	0.0804	
Bettigna	4298.84	0.0498	
unknown_palvotrisia	844.93	0.0098	-
Parmignola	11183.89	0.1294	
Vara	1688917.25	19.5477	*
Magra	2559646.00	29.6255	**
TOT ASTE FLUVIALI	4336905.18	*50.1957*	
OVERLAND FLOW	12803.10	*0.1482*	
** portata media misurata pari a 29.53 mc/s * portata media misurata pari a 15.83 mc/s			

3.7. Prelievi acquedottistici e Canale Lunense

Pozzi acquedottistici

Dati di portata e posizione forniti dai rispettivi contatti delle società ACAM Acque S.p.A e Società Acquedotti Tirreni (SAT). Le portate medie di riferimento considerate in questo studio sono riportate in tabella.

Tabella 15 Portate estratte dai Campi pozzi della Val Magra (dati aggiornati 2024)

Gestore	Campo pozzi	Q [m^3/giorno]	Q [m^3/s]
ACAM	Follo	2268.00	0.0263
ACAM	Fornola DESTRA	53069.98	0.6142
ACAM	Fornola SINISTRA	1567.84	0.0181
ACAM	Battifollo	14608.83	0.1691
ACAM	Civico	1132.87	0.0131
ACAM	Rurale	1379.27	0.0160

ACAM	Arcola Ped.	3084.13	0.0357
ACAM	Ospedaletto	2960.09	0.0343
SAT	Ressora NORD	1532.52	0.0177
SAT	Ressora SUD	7381.38	0.0854
SAT	Bottagna	1232.49	0.0143
SAT	Piana Battolla	1526.52	0.0177
TOT		91743.92	1.06

Pozzi privati

Fonte	ID	Descrizione
Censimento 2025	DB1	Censimento pozzi privati eseguito contestualmente al presente studio
Piccole derivazioni	DB2	Si tratta della localizzazione puntuale delle opere di presa e di restituzione delle derivazioni idriche in esercizio, in istruttoria, non in esercizio, tratta dal database regionale tematico; ad ogni punto sono associate informazioni anagrafiche e tecniche. L'aggiornamento dei livelli è dinamico ed è effettuato dagli uffici territoriali Difesa del Suolo della Regione. **Pagina dedicata nel portale cartografico Regione Liguria**

A questi si aggiungono i tre pozzi barriera idraulica a valle dello stabilimento petrolchimico nella Piana di Arcola in destra idrografica che complessivamente prelevano una portata media di 7776 m3/giorno (30 l/s ognuno)

Pre-processing

I due database sono stati integrati procedendo con il workflow di seguito riportato:

1. Esclusione da DB2 di tutti gli elementi etichettati come non in esercizio
2. Esclusione da DB1 e DB2 di tutti gli elementi a ridosso delle grandi derivazioni a prescindere dai loro attributi
3. Esclusione da DB2 di tutti elementi posti entro una distanza di 50 m da un qualsiasi elemento in DB1
4. Gli elementi rimasti in DB2 sono stati confrontati di volta in volta con gli elementi in DB1 più vicini per eliminare le ridondanze più evidenti secondo la seguente logica:

a. Se gli elementi tra loro adiacenti presentano un analogo attributo nel rispettivo campo dedicato alla tipologia d'uso, si è preferito dare priorità al database più recente (DB1), eliminando l'elemento da DB2.

b. Nel caso contrario (tipologia d'uso chiaramente diversa) sono stati mantenuti tutti gli elementi coinvolti nel confronto

5. Infine, i due dataset puliti sono stati uniti tra loro e andranno ad aggiungersi ai punti di prelievo corrispondenti alle derivazioni acquedottistiche.

Semplificazione/aggregazione codifica della tipologia d'uso

Infine, le classi di appartenenza sono state armonizzate e semplificate nella forma espressa in tabella

Precedente codifica (numero elementi)	Codifica adottata (numero elementi)
**POTABILE (5)	UMANO (6)
UMANO (1)	
IRRIGUO - IGIENICO E ASSIMILATI (1)	IRRIGUO (1672)
IRRIGUO (47)	
DOMESTICO (1624)	
INDUSTRIALE - IGIENICO E ASSIMILATI (1)	INDUSTRIALE (34)
INDUSTRIALE (33)	
IGIENICO E ASSIMILATI (40)	ALTRO (41)
IGIENICO E IRRIGUO (1)	
**non adiacenti a nessun campo pozzi acquedottistico conosciuto	

Stima dei prelievi privati

Non disponendo di esaustive informazioni sui prelievi privati, le portate medie delle varie classi di appartenenza sono state attribuite seguendo lo schema riportato in tabella:

Codifica adottata	Determinazione della portata
UMANO	1 l/s * (3600 s * 1) * 120 giorni = 1.2 m3/ giorno (0.014 l/s)
IRRIGUO	1.5 l/s * (3600 s * 4) * 120 giorni = 7 m3/ giorno (0.081 l/s)
INDUSTRIALE	200 m3/ giorno (2.315 l/s)
ALTRO	Come IRRIGUO

Canale Lunense

Nell'ambito della rete fluviale, è stato ritenuto opportuno tenere in considerazione anche della presenza del canale Lunense. I dati di derivazione sono stati forniti dal Consorzio di Bonifica e Irrigazione attraverso l'Autorità di Bacino dell'Appennino Settentrionale. I dati forniti coprono il range temporale dal 2013 al 2022 e la portata totale è distinta nelle due destinazioni d'uso (agricolo e 'altro'). Il canale attraversa tutta la valle lungo il margine nord-orientale terminando il suo tracciato immettendosi nel torrente Parmignola. Nel presente studio sono state considerate solo la media delle portate destinate al solo uso agricolo, in quanto quelle destinate ad "altro uso" vengono in gran parte utilizzate per alimentare turbine idroelettriche e successivamente reimmesse in nel fiume Magra.

Il Canale Lunense, preleva acqua direttamente dal Magra in prossimità di Stadano di Aulla, a valle della stazione idrometrica di Magra a Calamazza e al di fuori dell'area attiva del modello, di conseguenza le portate risultate dal bilancio idrico a scala di bacino (e riferite alla stazione Magra a Calamazza) devono essere ridotte della quantità pari alla differenza tra le portate derivate e le portate in ingresso al suo recapito ultimo (torrente Parmignola). Questa differenza è stimata in circa 622 l/s e la sua implementazione è discussa più in dettaglio nel capitolo dell'implementazione del modello numerico (vedi *Dettagli di implementazione*).

Tabella 16 - Record di volumi derivati dal Canale Lunense dal 2013 al 2021 (Fonte Autorità di bacino).

Periodo da	Periodo a	Uso agricolo [mc/s]	Altro Uso [mc/s]
2013-12-31	2014-12-31	1.018	2.002
2014-12-31	2015-12-31	0.960	1.980
2016-01-01	2016-12-31	1.228	1.765
2016-12-31	2017-12-31	0.805	1.390
2017-12-31	2018-12-31	1.003	1.337
2018-12-31	2019-12-31	1.037	1.373
2020-01-01	2020-12-31	0.934	1.468
2020-12-31	2021-12-31	1.052	1.636
2021-12-31	2022-12-31	0.863	1.533

3.8. Cambiamenti climatici

Allo scopo di implementare simulazioni previsionali volte a quantificare lo stato delle risorse idriche contestualmente ai cambiamenti climatici in atto, si è fatto affidamento sulle previsioni relative allo scenario SSP 8.5 per l'anno 2100, che rappresenta lo scenario di gran lunga peggiore di quelli previsti. Gli effetti sulle cumulate di pioggia e temperature per l'area di studio sono riportate in tabella:

Tabella 17 – Scenario cambiamento climatico.

Scenario	T [°C]	P [mm]
SSP5 8.5 (al 2100)	27.0%	-17.0%
SSP5 8.5 (al 2060)	13.0%	-11.0%

Il modello di bilancio idrico definito in precedenza è stato quindi parametrizzato sulla base definita da questo scenario, e i risultati confrontati con le condizioni attuali e riportati nella tabella successiva.

Tabella 18 - Sintesi dei risultati del bilancio idrologico analitico a scala di bacino per le condizioni di calibrazione (CAL) e per le condizioni proprie dello scenario climatico futuro (SSP8.5 al 2100) e i rispettivi valori di differenza relativa percentuale.

Asta fluviale	Q (CAL) [m^3/giorno]		Q (SSP5 8.5 2100) [m^3/giorno]		Variazione [%]	
Torrente_Ri	9.49		6.63		-30.16%	
unknown_boschetto	3.10		2.11		-31.92%	
Durasca	18525.91		13088.88		-29.35%	
unknown_bottagna	7143.34		5002.61		-29.97%	
CanaleDelBotro	9099.93		6193.35		-31.94%	
TorrenteAmola	13905.66		8592.65		-38.21%	
TorrenteCalcandola	16390.98		8361.88		-48.98%	
Isolone	6945.36		3727.63		-46.33%	
Bettigna	4298.84		2732.00		-36.45%	
unknown_palvotrisia	844.93		549.28		-34.99%	
Parmignola	11183.89		6721.36		-39.90%	
Vara	1688917.25	*	1210283.00	**	-28.34%	***
Magra	2559646.00		1755748.63		-31.41%	
TOT ASTE FLUVIALI	***4336905.18***		***3021003.38***		***-30.34%***	
OVERLAND FLOW	***12803.10***		***8695.21***		***-32.09%***	
RCH DIRETTA	***137562.63***		***89381.18***		***-35.03%***	

* portata misurata = 1367712 mc/day
** portata simulata e corretta = 931917.91 mc/day
*** differenza corretta = -31.86%

La combinazione di aumento di temperatura, con conseguente aumento di evapotraspirazione, e riduzione delle aliquote di pioggia hanno evidentemente un effetto significativo:

- sulle portate volumetriche medie ai corsi d'acqua, che vedono una riduzione complessiva di oltre il 30%;
- sulla ricarica verticale che insiste sulla piana alluvionale, che vede una riduzione di oltre un terzo del volume attuale.

3.9. Bilancio idrogeologico analitico attuale e futuro

Sulla base delle informazioni fino a qui riportate è possibile stimare le voci principali che concorrono al bilancio idrogeologico della piana alluvionale della bassa Val Magra, considerando 1) ricarica dell'acquifero e 2) prelievi acquedottistici e privati. In questa fase non è possibile stimare la ricarica dell'acquifero derivante dagli scambi con le acque superficiali, ma è possibile dire che dal loro ingresso nella piana (Vara a Piana Battolla e Magra a Calamazza) alla stazione idrometrica più prossima allo sbocco in mare (Magra ad

Ameglia) il bilancio relativamente all'acquifero è positivo in quanto le portate medie ad Ameglia (~43 – 50 m^3/s) sono confrontabili con il totale dei corsi d'acqua considerati. Si deve comunque sottolineare come i dati di portata in possesso non siano sufficienti a quantificare gli scambi tra acque superficiali e sotterranee, che sono con ogni probabilità più articolati, come suggerito dalla superficie piezometrica interpolata, che mostra un'alimentazione dell'acquifero in prossimità dell'entrata in valle delle due aste fluviali principali, a differenza del tratto a valle della confluenza. Il bilancio sottolinea inoltre il peso relativo delle diverse componenti che ne concorrono alla definizione, in particolare quello della rete fluviale che supera di un ordine di grandezza la somma delle altre componenti.

Tabella 19 - Bilancio idrogeologico analitico per le condizioni di calibrazione (condizione attuale, dati aggiornati al 2024). Portate in uscita dai corsi d'acqua calcolate considerando le portate alla stazione di Ameglia e pari a 45 m^3/s.

Componente bilancio	INGRESSO [m^3/giorno]	USCITA [m^3/giorno]
Overland flow	12803.10	
Ricarica diretta (efficace, infiltrata)	137562.63	
Corsi d'acqua	4015709.43	-3888000.00
Concessioni Lunense (2021-2022)	53771.57	
Pozzi acquedottistici		-99519.92
Pozzi privati		-18798.20
Totale	4219846.73	-4006318.12
∑		**213528.61**
Area modello	7830.75	ha
Ricarica efficace infiltrata	1.757E-03	mm/giorno
	641.19	mm/anno
Dispersioni Lunense	6.867E-04	mm/giorno
	250.64	mm/anno
Overland flow	1.635E-04	mm/giorno
	59.68	mm/anno

Tabella 20 - Bilancio idrogeologico analitico per le condizioni di cambiamento climatico (SSP5 8.5 2100). Portate in uscita dei corsi d'acqua calcolate considerando le portate di Ameglia pari a 45 m^3/s, diminuendo le portate di riferimento per la variazione media delle portate (-30.34%). Le concessioni del canale Lunense sono state determinate diminuendo le portate derivate dal canale della stessa percentuale cui il Magra risulta essere affetto a seguito dei cambiamenti climatici (-31.41%). Portate prelevate dai pozzi sono state mantenute costanti).

Componente bilancio	INGRESSO [m^3/giorno]	USCITA [m^3/giorno]
Overland flow	8695.21	
Ricarica diretta (efficace, infiltrata)	89381.18	
Corsi d'acqua	2742644.92	-2708380.80

Concessioni Lunense (2021-2022)	36881.92	
Pozzi acquedottistici		-99519.92
Pozzi privati		-18798.20
Totale	2877603.23	-2826698.92
∑		**50904.32**
Area modello	7830.75	ha
Ricarica efficace infiltrata	1.141E-03	mm/giorno
	416.19	mm/anno
Dispersioni Lunense	4.710E-04	mm/giorno
	171.91	mm/anno
Overland flow	1.110E-04	mm/giorno
	40.53	mm/anno

4. MODELLAZIONE NUMERICA

4.1. Metodologia e codici di calcolo

La modellazione del flusso è stata implementata attraverso il codice MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), un modello la cui soluzione è basata sull'approssimazione alle differenze finite dell'equazione allo stato transitorio del moto tridimensionale in un mezzo poroso saturo per un fluido a densità costante che obbedisce alla legge del flusso di *Darcy*.

Affinché la soluzione del flusso riproduca i carichi idraulici misurati nell'area indagata, è necessario ottimizzare i parametri del modello di flusso: l'ottimizzazione (o calibrazione) del modello è stata effettuata attraverso PEST (Doherty J. , Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models, 2015), una suite di software per la tradizionale stima dei parametri automatizzata o le inversioni ad elevata parametrizzazione con regolarizzazioni.

Il modello di flusso ottimizzato diventa quindi la base per la simulazione del trasporto advettivo (*particle tracking*) impiegato per la delimitazione delle aree di rispetto, mediante il software MODPATH7 (Pollock, 2016).

4.2. Strategia di modellazione

La prima fase della modellazione è volta alla costruzione del modello di flusso e la sua ottimizzazione sui dati di carico idraulico misurati in sito. La calibrazione è stata dapprima effettuata sulla base del modello allo stato stazionario con l'obiettivo di ricavare la distribuzione di permeabilità ottimizzata. Questa prima calibrazione è basata sui dati di monitoraggio in continuo e manuale condotto nell'area tra il 2019 e il 2024, integrati con dati storici risalenti al 1998-1999.

La fase successiva riguarda il confronto tra i risultati del modello calibrato secondo le condizioni di calibrazione (CAL) e i risultati del modello a seguito dell'applicazione delle forzanti alterate dallo scenario climatico SSP5 8.5 per l'anno 2100.

Infine, l'ultima sezione è dedicata alla delimitazione delle aree di rispetto. Per quanto concerne il trasporto advettivo, oltre alla soluzione del campo di moto del flusso, si richiede la definizione dei parametri di porosità efficace da attribuire alle celle del modello. Tale parametro è stato posto pari a 0.25.

4.3. Modellazione del flusso

Discretizzazione spaziale e temporale

Sul piano orizzontale il dominio di modellazione ha dimensione 6300 m sull'asse x e 24550 m sull'asse y. La griglia è stata ruotata di 42 gradi rispetto al Nord (senso anti-orario) per orientarla con la supposta direzione di flusso, quest'ultima ipotizzata essere influenzata dall'azione del fiume Magra. L'intero dominio di modellazione è stato discretizzato in celle quadrate di lato pari a 50 m. Sul piano verticale il volume dell'acquifero definito nei precedenti paragrafi è stato discretizzato in 5 layer necessari per delineare sia il corpo limoso-argilloso presente nella porzione meridionale del modello, sia la base dell'acquifero alluvionale. Solo le celle ricadenti nel fondo valle sono state lasciate attive (Figura 34, Figura 35).

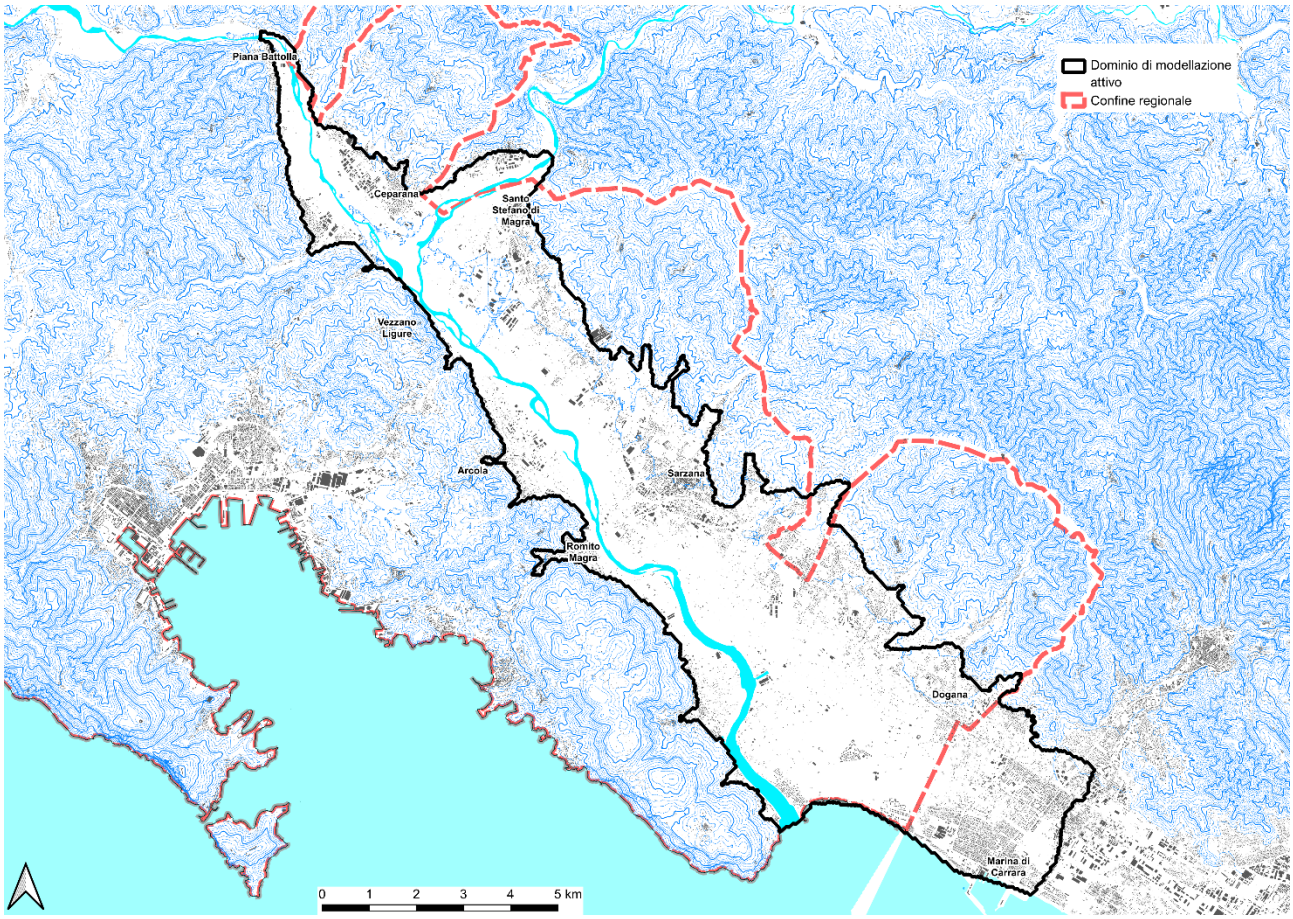


Figura 34 Estensione del dominio di modellazione attivo.

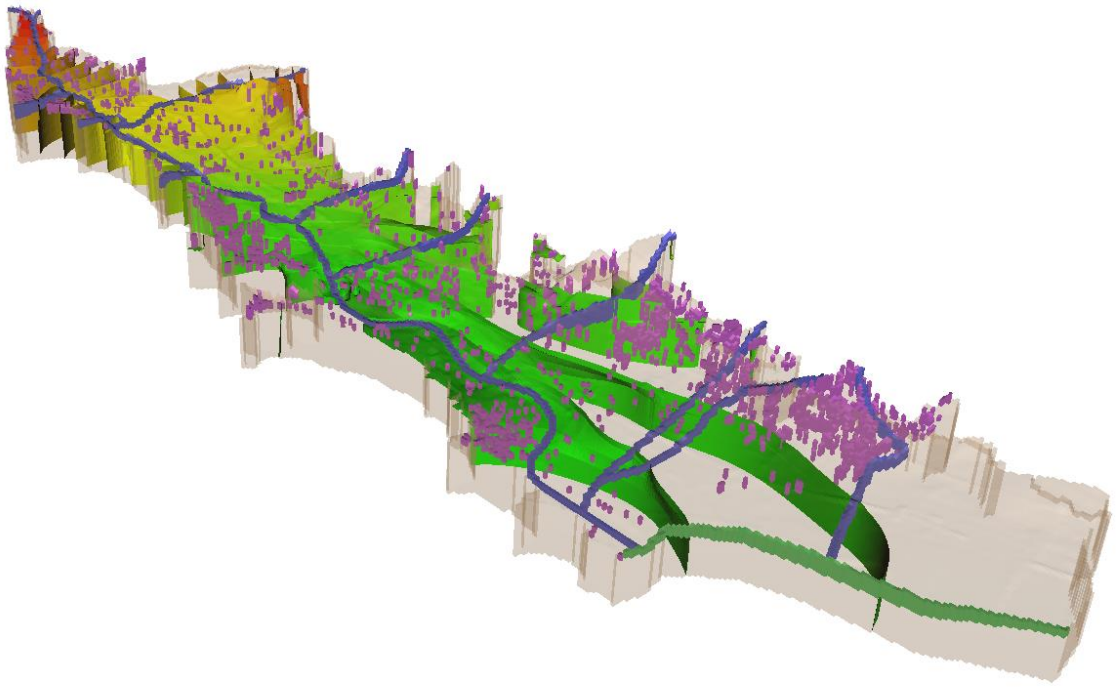


Figura 35 Discretizzazione spaziale. Esagerazione verticale x10.

Condizioni al contorno e iniziali

Nel presente lavoro di modellazione sono state utilizzate quattro condizioni al contorno (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

1- Condizione per la **ricarica verticale** (di secondo tipo, *Neumann*): attraverso il pacchetto RECHARGE (RCH) di MODFLOW. Allo stato stazionario è stata posta alla media delle altezze cumulate giornaliere misurate nel periodo di riferimento 01.10.2019-29.01.2020 presso la stazione pluviometrica di Fornola (rete Regione Liguria), mentre allo stato transitorio ogni *stress period* è sollecitato da una ricarica verticale esattamente pari alla cumulata giornaliera nella medesima stazione.

2- Condizione per **l'interazione fiume-falda** (di terzo tipo, *Cauchy*): implementata attraverso il pacchetto STREAM-FLOW ROUTING (SFR), con il quale si rappresenta l'interazione tra le acque sotterranee e le acque superficiali della rete di corsi d'acqua principali e i loro canali tributari. Questo pacchetto necessita della definizione di tratti (*reaches*) parametrizzati con la geometria dell'alveo nel punto iniziale e finale oltre che della definizione del parametro di conduttanza e spessore dell'alveo. Inoltre, permette di attribuire le portate in ingresso ai nodi posti più a monte. La boundary

durante ogni simulazione propagando le portate verso tutti reach a valle utilizzando il modello cinematico, e calcolando le portate disperse/drenate con l'acquifero. Per ogni cella SFR è possibile estrarre il valore di portata liquida transitata e confrontarla con i dati osservati.

3- Condizione **carico imposto** (di primo tipo, *Dirichlet*): implementata attraverso il pacchetto CHD, è stata posta lungo il margine meridionale del modello. Per essa è necessario definire unicamente il carico associato, in questo caso pari al livello medio del mare.

Sui restanti limiti del modello è stato applicato un limite di *no-flow*.

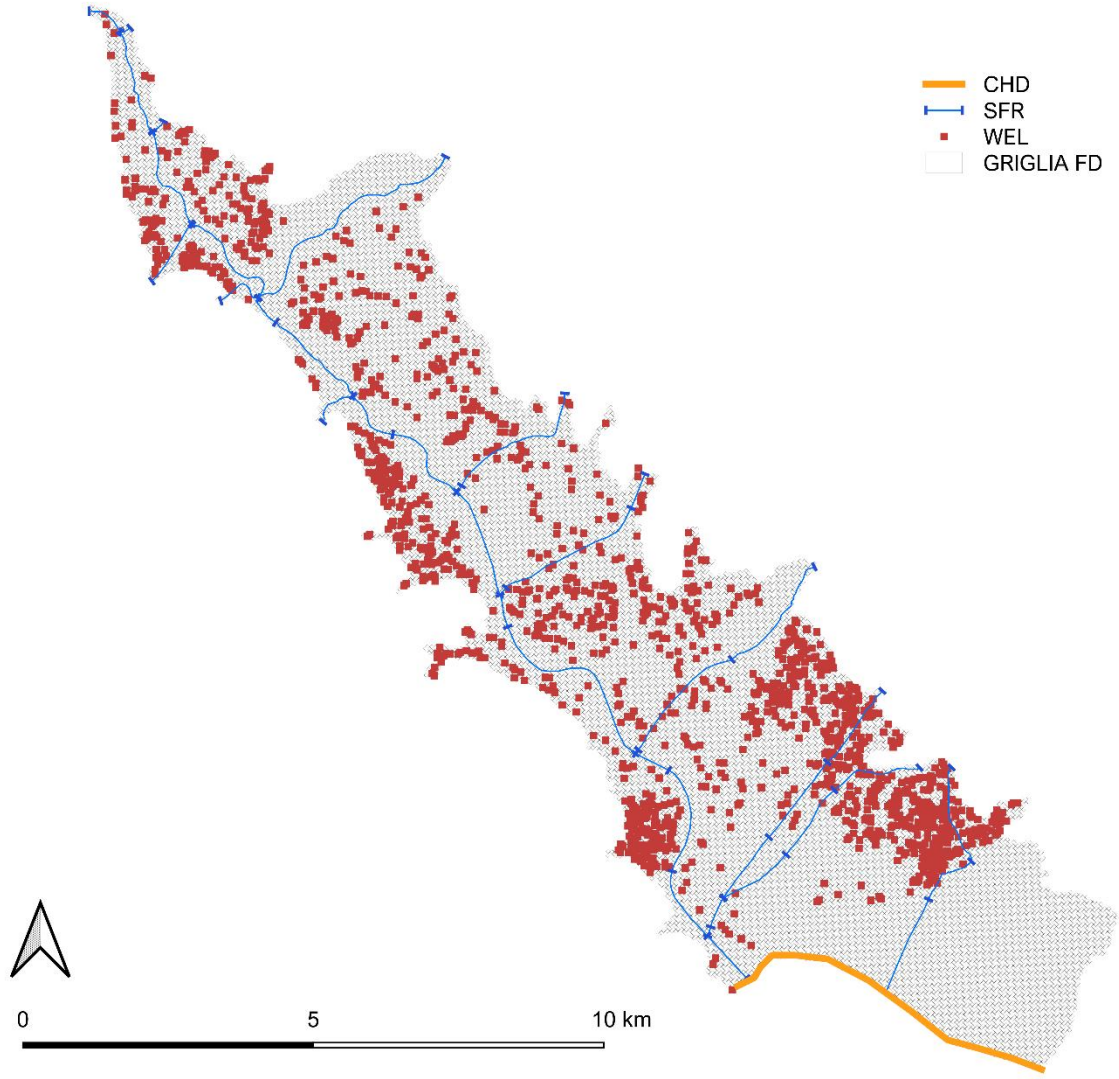


Figura 36 Implementazione del modello. Estensione dominio di modellazione e condizioni al contorno applicate

Condizioni interne

Le uniche condizioni interne applicate al modello sono i pozzi acquedottistici e privati, implementati attraverso il pacchetto WEL. L'intero dataset di pozzi acquedottistici e privati è stato preventivamente pre-processato affinché i punti di prelievo ricadenti nella medesima cella, fossero rappresentati in MODFLOW attraverso un unico punto WEL con la portata pari alla somma di tutti i pozzi presenti. Ciò è risultato in 1611 punti di prelievo distribuiti in tutto il dominio di modellazione.

Parametrizzazione iniziale

La fase che precede la modellazione inversa è dedicata all'attribuzione dei parametri idraulici iniziali alle unità idrogeologiche simulate e alle condizioni al contorno (SFR) applicate. I parametri di calibrazione oggetto di interesse in questo lavoro sono rappresentati dalla componente orizzontale del tensore della conducibilità idraulica (HK) dei 5 *layer* e dalle conduttanze associate alle condizioni di terzo tipo (C_{SFR}). Per quanto concerne le altre due componenti del tensore HK, queste sono state messe in relazione alla conducibilità idraulica orizzontale attraverso l'uso dei fattori di anisotropia, trasversale e verticale, entrambe poste pari a $K_v = 0.1*K_h$ (come da convenzione usuale) per ottenere un tensore di permeabilità non omogeneo. Inoltre, la parametrizzazione della conducibilità idraulica del primo layer e la sua successiva ottimizzazione è stata implementata attraverso l'uso dei *pilot points* (Doherty J. , 2003). Questa tecnica prevede di definire la posizione di un relativo piccolo numero di punti nel dominio di modellazione, cui attribuire un valore del parametro. L'attribuzione della conducibilità idraulica a tutte le altre celle del modello viene quindi affidata ad una interpolazione *kriging*, operazione che richiede necessariamente la definizione di una struttura geostatistica di riferimento. In particolare, si è adottato un variogramma esponenziale e isotropo con un range (2100 m) tale da poter garantire una continuità spaziale tra *pilot points* adiacenti ed evitare l'insorgenza di artefatti dell'interpolazione. In letteratura scientifica esistono alcune linee guida riguardo il posizionamento dei *pilot points* (Doherty, Fienen, & and Hunt, 2010), in questo lavoro si è fatto uso di 281 *pilot points*, optando per una loro distribuzione irregolare sul dominio di modellazione (Figura 37) così da poterne aumentare liberamente la densità laddove vi fosse un maggior numero di pozzi-piezometri monitorati. Per quanto riguarda la calibrazione dei *layer* più profondi, essi sono stati suddivisi in zone a permeabilità omogenea sulla base del modello di sottosuolo precedentemente definito nel capitolo dedicato (Figura 38).

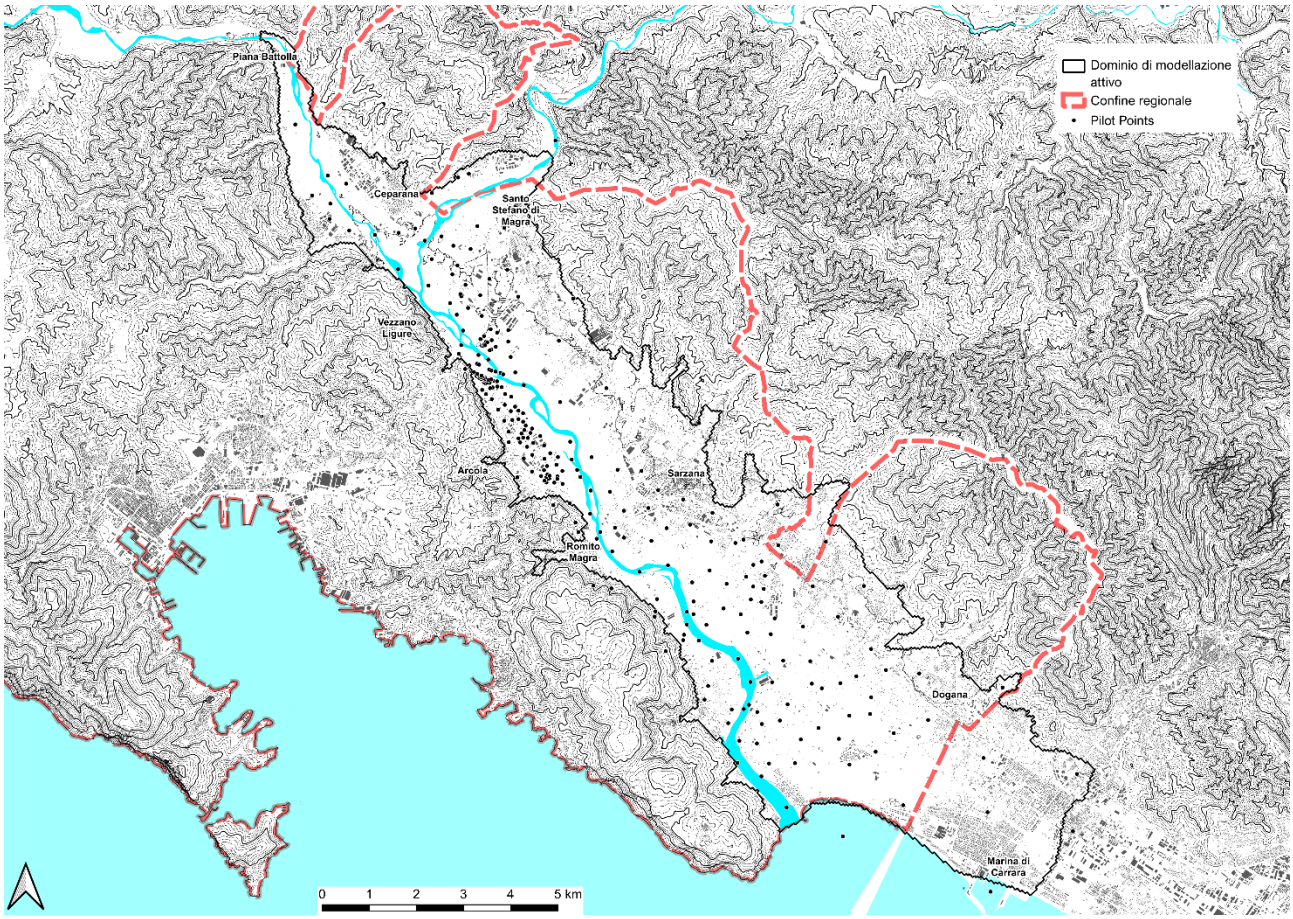


Figura 37 Distribuzione dei pilot points

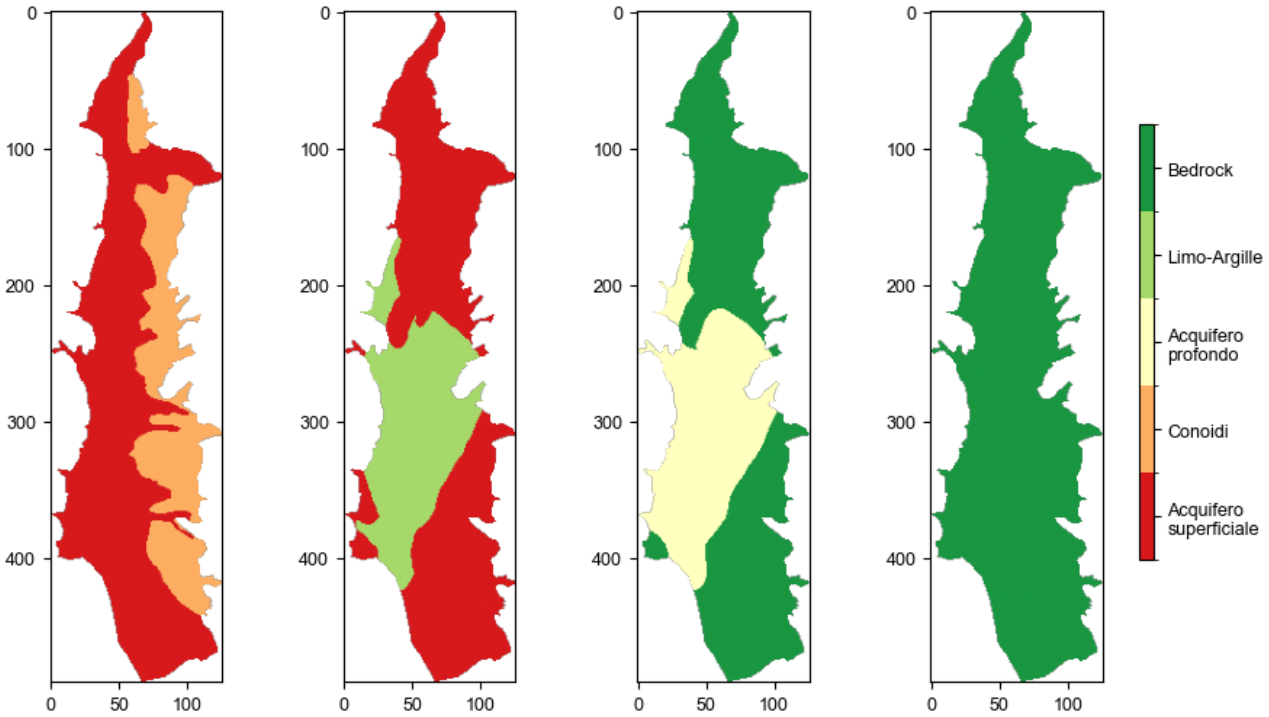


Figura 38 - Parametrizzazione per zone a permeabilità omogenea per i layer successivi al primo. Da sinistra verso destra: layer 2, layer 3, layer 4, layer 5.

Dettagli di implementazione

Inoltre, sono stati seguiti i seguenti accorgimenti

1. La portata volumetrica in ingresso al fiume Vara è stata assunta pari alla media delle portate effettivamente misurate presso la stazione di Piana Battolla, poiché il modello di bilancio idrico tendeva a sovrastimare tali valori (come illustrato nei capitoli precedenti, vedi *Determinazione delle portate alle aste fluviali selezionate*).
1. I volumi in ingresso dai rilievi montuosi (overland flow) sono stati considerati come ricarica verticale, distribuita unicamente sulle celle di bordo del modello, e sommati alla ricarica verticale diretta sulla piana alluvionale.
2. La portata stimata del fiume Magra (vedi *Determinazione delle portate alle aste fluviali selezionate*) è stata corretta sottraendo la differenza tra le portate derivate dal Canale Lunense (vedi *Canale Lunense*) e le portate medie in ingresso al Parmignola.
3. Tale differenza, in conseguenza di quanto descritto al punto 3, è stata trattata come ricarica verticale: il suo valore, distribuito sull'intera area modellata, è stato aggiunto sia alla ricarica verticale diretta sulla piana sia a quella derivante dall'overland flow.

In definitiva, l'effetto del Canale Lunense nel modello è stato rappresentato come un incremento delle dispersioni del Magra.

4. Sempre in conseguenza del punto 3, la portata in ingresso del Parmignola è stata aumentata di un valore pari alla portata media del Canale Lunense nel tratto immediatamente a monte della confluenza, pari a circa 330 l/s.
5. Il livello del mare considerato pari a 0.085 m s.l.m.

4.4. Calibrazione del modello

I valori iniziali di conducibilità idraulica orizzontale e di conduttanza del pacchetto SFR sono stati soggetti ad un processo di calibrazione, attraverso il quale si pone il modello di flusso nei termini di un *problema inverso* e nel quale si usano le variabili dipendenti dell'equazione costitutiva per ricavarne i parametri (parametri di calibrazione). Obiettivo di questo processo è quindi di determinare il set di parametri, stress e/o condizioni al contorno che possano minimizzare le differenze tra i valori acquisiti sperimentalmente in sito (*target* di calibrazione) con gli equivalenti valori calcolati dal modello numerico. In questo lavoro, i target di calibrazione adottati sono rappresentati dalle misure del carico idraulico, che possono essere interpretati come *l'output* reale dell'equazione di flusso.

Per quantificare il grado di approssimazione della calibrazione (*hard knowledge*), i valori di carico idraulico misurati nei target di calibrazione e gli equivalenti valori di carico idraulico simulati vengono sottoposti ad elaborazioni statistiche che si basano sul *residuo* (R) del i-esimo target:

$$R_i = (h_m - h_s)_i \qquad 4\text{–}1$$

dove h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e simulato in un target di calibrazione. Il parametro statistico che generalmente viene usato per quantificare la bontà di una calibrazione è lo *scarto quadratico medio normalizzato* ($nRMS$), espresso in percentuale e definito come lo scarto quadratico medio (RMS) rapportato al *range* dei valori misurati:

$$RMS = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i^2\right]^{0.5} \qquad 4\text{–}2$$

$$nRMS = \frac{RMS}{h_{m\,max} - h_{m\,min}} \qquad 4\text{–}3$$

Tradizionalmente si considerano calibrati i modelli in cui $nRMS$ scende sotto al 10% (Anderson M.P., 2015).

Tuttavia, una buona approssimazione delle misure sperimentali non implica necessariamente che la soluzione sia comunque accettabile, in quanto, per poterla ritenere tale, è necessario altresì che i parametri stimati siano consistenti con la realtà fisica del sistema acquifero che si intende simulare. Per cui, i risultati ottenuti attraverso la calibrazione devono essere sistematicamente valutati sulla base della loro ragionevolezza idrogeologica; tale valutazione si basa su tutte le informazioni che si hanno a disposizione derivanti dalla conoscenza geologica e idrologica del sito in oggetto (*soft knowledge*).

Il metodo tradizionalmente adottato per eseguire la calibrazione viene definito *trial-and-error* e la sua esecuzione, finalizzata a fornire una soluzione indiretta al modello inverso, prevede di modificare i parametri di input e di rifare il lancio del modello, tante volte fin quando non si raggiunge il grado di approssimazione desiderato.

Nell'ambito di questo lavoro, invece, si è deciso di adottare il metodo della calibrazione automatica attraverso l'uso di PEST.

PEST è un software di ottimizzazione dei parametri, *model-indipendent*, che incorpora un algoritmo *Gauss-Marquardt-Levemberg* (*GML*) di regressione non lineare ai minimi quadrati. PEST, così come altri pacchetti di calibrazione, è finalizzato alla minimizzazione della *funzione obiettivo* (Φ; intesa come ricerca del punto di minimo della sua superficie multidimensionale), calcolata come la somma del quadrato dei residui pesati. Nel caso di un'unica tipologia di target di calibrazione (come nel caso in oggetto) la funzione obiettivo delle misure sperimentali è espressa con la seguente formulazione:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} [w_{hi}(h_m - h_s)_i]^2 \qquad 4\text{–}4$$

dove w_{hi} è il peso della i-esima misura (osservazione) di carico idraulico mentre h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e il carico idraulico simulato. L'equazione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** può essere ulteriormente espansa per i ncorporare qualsiasi altro tipo di target di calibrazione (flusso, differenze di carico ecc.).

Per la ricerca del valore minimo della funzione obiettivo, il metodo incorporato da PEST (il *GML* accennato sopra) necessita della determinazione della pendenza della superficie della funzione obiettivo. Tale gradiente è calcolato attraverso la determinazione delle *sensitività* che esprimono l'impatto che una piccola variazione del valore di un parametro comporta sulla soluzione calcolata dal modello (carico simulato). La comparazione si basa sui valori di carico che vengono simulati dato il set di parametri iniziale, mentre la variazione del carico simulato è ottenuta modificando i valori iniziali dei parametri e sottraendo il valore iniziale del target dal nuovo valore ottenuto con i parametri perturbati. Questa operazione è portata a termine perturbando singolarmente ogni parametro di calibrazione ed eseguendo di volta in volta un nuovo lancio del modello con lo scopo di quantificare le variazioni nella soluzione. Il set dei coefficienti di sensitività (che andranno a costituire la matrice Jacobiana) incorpora le informazioni relative alla pendenza della funzione obbiettivo, sulla base della quale si definiscono le variazioni (*upgrade*) a cui sottoporre ogni parametro di calibrazione, che portano verso il minimo globale della funzione obbiettivo. Dopo aver aggiornato i parametri di calibrazione viene calcolato il nuovo valore della funzione obbiettivo per poi rieseguire iterativamente l'intero processo appena descritto fino a che uno dei criteri di convergenza non viene infine soddisfatto. A tale riguardo PEST è vincolato da diversi criteri di convergenza, alcuni relativi all'andamento della funzione obbiettivo, altri relativi invece all'entità della variazione dei parametri di calibrazione durante le diverse iterazioni.

PEST permette inoltre di eseguire l'inversione di modelli ad elevata parametrizzazione (Doherty & Hunt, Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration, 2010), caratterizzati dall'avere più parametri di calibrazione di quelli che si potrebbero univocamente stimare dato un determinato set di target di calibrazione (modello inverso *mal posto*). In questi casi l'unicità della soluzione numerica è raggiunta attraverso l'uso delle funzioni di regolarizzazione, che aggiungono nuovi vincoli ai parametri di calibrazione. Le regolarizzazioni di *Tikhonov* implementate in PEST costituiscono un modo per incorporare nell'equazione della funzione obbiettivo (**Errore. L 'origine riferimento non è stata trovata.**) informazioni generiche (a priori) riguardanti il sistema che si vuole simulare. Questo approccio aggiunge una nuova componente alla

funzione obiettivo descritta in precedenza che esprime la deviazione dei parametri di calibrazione dalle condizioni specificate dall'utente. Un altro tipo di regolarizzazione, invece, prevede l'individuazione dei parametri di calibrazione rispetto ai quali la soluzione risulta essere poco sensibile, rimuovendoli dalla matrice Jacobiana e velocizzando il processo di calibrazione (*SVD* o *Singular Value Decomposition*). L'uso di entrambe le regolarizzazioni conferisce al modello inverso stabilità numerica e allo stesso tempo permette di ottenere un set di parametri ottimizzati che minimizzano la varianza dell'errore. Nel caso in oggetto si è condotta un'inversione ad elevata parametrizzazione con l'uso sia delle regolarizzazioni di *Tikhonov* (*preferred value*) che della SVD.

5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

Come già accennato, l'ottimizzazione allo stato stazionario ha portato alla determinazione della distribuzione di conducibilità idraulica che meglio approssima i dati di monitoraggio acquisiti. Si è raggiunto un $nRMS$ sul carico pari al 6.534%. Di seguito vengono riportate la distribuzione di carico idraulico (Figura 39), di conducibilità idraulica del primo *layer* (Figura 40), l'analisi dei residui (Figura 41) e il bilancio di massa (Figura 42). Nonostante l'impiego di numerosi *pilot points* per accomodare il più facilmente possibile le eventuali eterogeneità nel primo *layer* del modello, la distribuzione di carico idraulico è risultata essenzialmente omogenea con valori di permeabilità che oscillano tra i 300 e i 312 m/giorno (~3.5E-04 m/s). Le permeabilità calibrate nei layer inferiori.

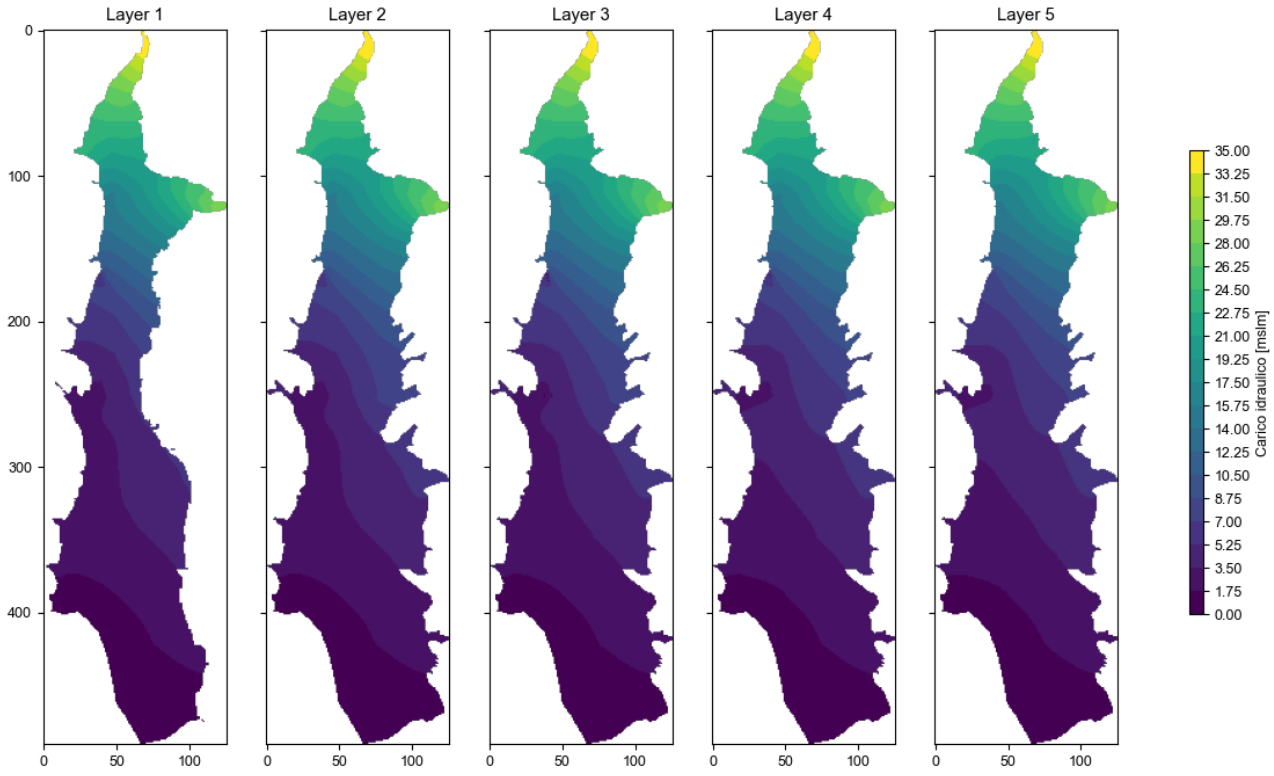


Figura 39 Distribuzione di carico idraulico per il modello calibrato nello scenario di calibrazione.

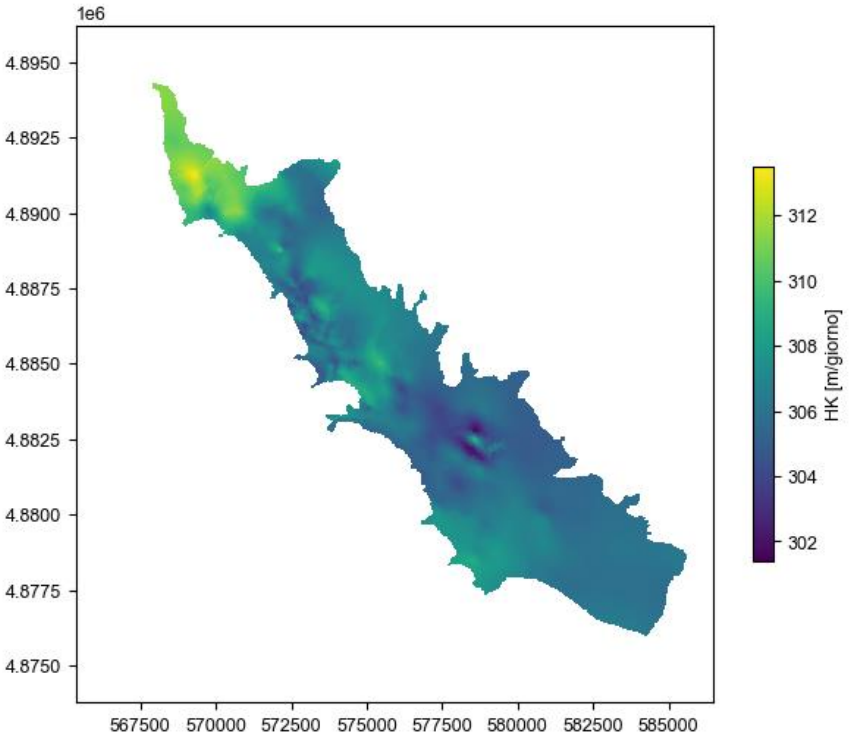


Figura 40 Distribuzione di conducibilità idraulica calibrata

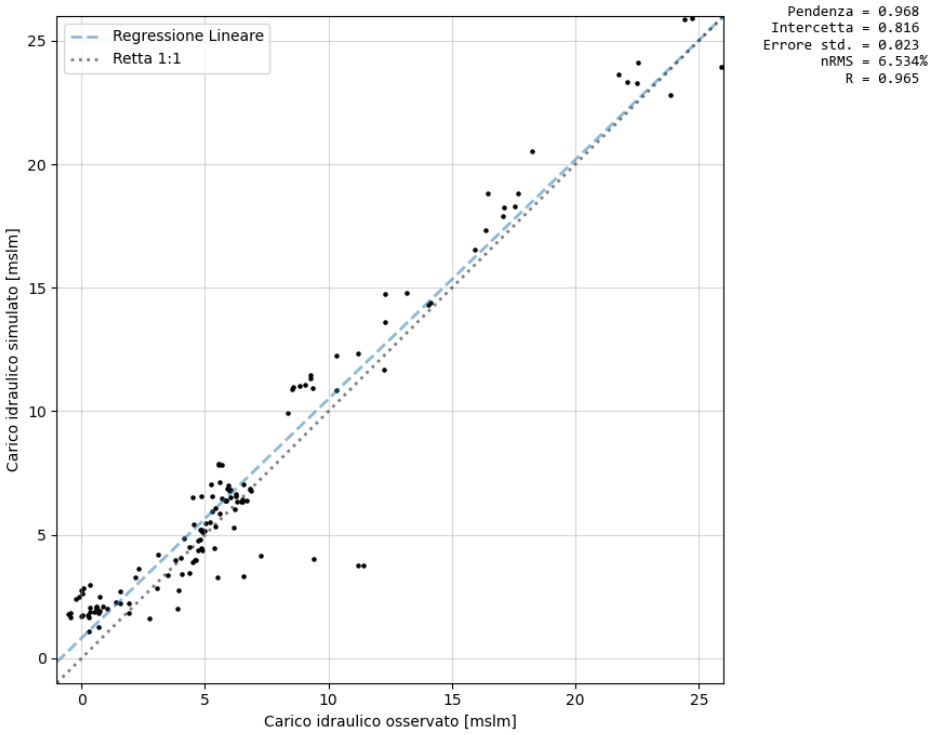


Figura 41 Scatterplot tra i carichi osservati e gli equivalenti simulati, allo stato stazionario.

```
 HEAD WILL BE SAVED ON UNIT   37 AT END OF TIME STEP    1, STRESS PERIOD    1
1
  VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP    1, STRESS PERIOD   1
  ------------------------------------------------------------------------------

     CUMULATIVE VOLUMES      L**3       RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
     ------------------                 ------------------------

           IN:                                IN:
           ---                                ---
             STORAGE =           0.0000             STORAGE =           0.0000
      CONSTANT HEAD =           0.0000      CONSTANT HEAD =           0.0000
               WELLS =           0.0000               WELLS =           0.0000
            RECHARGE =      203845.6406            RECHARGE =      203845.6406
     STREAM LEAKAGE =      230960.5625     STREAM LEAKAGE =      230960.5625

           TOTAL IN =      434806.1875           TOTAL IN =      434806.1875

          OUT:                               OUT:
          ----                               ----
             STORAGE =           0.0000             STORAGE =           0.0000
      CONSTANT HEAD =       85615.0938      CONSTANT HEAD =       85615.0938
               WELLS =      114013.1250               WELLS =      114013.1250
            RECHARGE =           0.0000            RECHARGE =           0.0000
     STREAM LEAKAGE =      235178.0000     STREAM LEAKAGE =      235178.0000

           TOTAL OUT =      434806.2188           TOTAL OUT =      434806.2188

            IN - OUT =     -3.1250E-02            IN - OUT =     -3.1250E-02

 PERCENT DISCREPANCY =           -0.00  PERCENT DISCREPANCY =           -0.00
```

Figura 42 Output di MODFLOW-2005 relativo al bilancio di massa per il modello calibrato allo stato stazionario (condizione attuale, dati aggiornati al 2024). Valori espressi in m^3/giorno.

5.1. Aree di salvaguardia delle captazioni acquedottistiche

Il modello ha permesso di elaborare le aree di salvaguardia delle captazioni acquedottistiche con il criterio cronologico. In particolare sono state elaborate le zone di rispetto per il campo pozzi di Arcola di proprietà SAT S.p.A.

Le aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano sono disciplinate dall'art. 94 del D.Lgs. 152/2006. Tale disciplina si propone di mantenere e migliorare le caratteristiche qualitative delle acque erogate a terzi mediante impianto di acquedotto che riveste carattere di pubblico interesse e nonché per tutelare lo stato delle risorse. Le aree di salvaguardia sono distinte in zone di tutela assoluta, zone di rispetto (ristrette e/o allargate) e zone di protezione, e i criteri per delinearle si riferiscono alla metodologia per l'individuazione delle aree di salvaguardia previste dall'art.21 della norma di PTA, in ottemperanza a quanto previsto dall'art.94 del 152/2006 e secondo la metodologia

prevista dall’Accordo del 12 dicembre 2002, stipulato tra lo Stato, le Regioni e le Province autonome.

Come previsto dalla normativa vigente sono state elaborate, dall'inviluppo delle linee di flusso, le isocrone relative ai tempi di percorrenza: 30 giorni, 60 giorni, 180 giorni e 365 giorni.

Per la zona di rispetto, di norma, è utilizzato il criterio di tipo cronologico, supportato da una protezione dinamica, attraverso il quale viene suddivisa in:

- “zona di rispetto ristretta” delimitata dall’isocrona 60 giorni (corrispondente al tempo minimo utile di intervento)
- “zona di rispetto allargata” delimitata dall’isocrona 180 o 365, giorni. La scelta del tempo di sicurezza da utilizzare per il dimensionamento della zona di rispetto allargata dipende dalla vulnerabilità verticale del primo acquifero captato e dalla presenza di limiti idrogeologici, può essere considerato di soli 180 giorni nel caso di acquiferi con vulnerabilità bassa o molto bassa, mentre deve essere considerato di 365 giorni quando la vulnerabilità risulta essere più elevata.

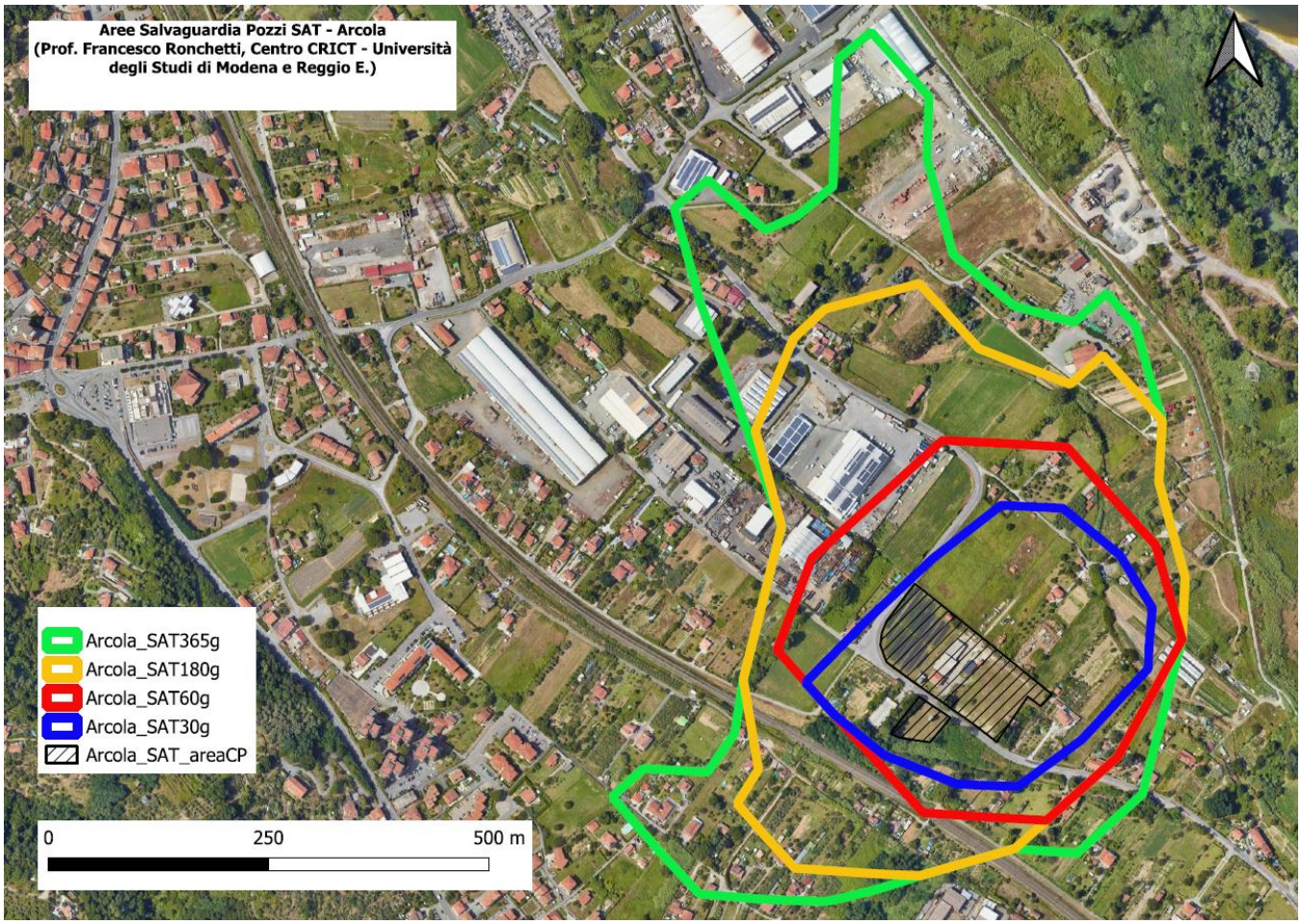


Figura 43 Campo pozzi Follo (in alto), S.Stefano (in basso), Aree di Salvaguardia 30-60-180-365 giorni.

6. CONCLUSIONI

La presente relazione propone ed evidenzia i seguenti e principali risultati:

- L'ottimizzazione del modello numerico allo stato stazionario ha portato alla determinazione della distribuzione di conducibilità idraulica che meglio approssima i dati di monitoraggio acquisiti. Si è raggiunto un $nRMS$ sul carico pari al 6.534%, risultato che secondo gli standard di modellazione può essere considerato molto soddisfacente.
- Sono state elaborate utilizzando il modello numerico 3d le aree di salvaguardia, in accordo con le Linee Guida Regione Liguria, con isocrone 30, 60, 180 e 365 giorni, relativamente ai campo pozzi Arcola - SAT.
- Negli anni 2022 e 2023 è stato condotto un monitoraggio idrochimico che ha prodotto un aggiornamento sullo stato del fenomeno di intrusione marina, sia lungo l'asta fluviale del F. Magra che negli acquiferi della bassa Val Magra. Attualmente l'intrusione marina arriva all'altezza di Romito per le acque superficiali e sotterranee. Il cambiamento climatico, oltre ad innescare variazioni di precipitazione e temperatura dell'aria, comporterà anche variazioni del livello marino. L'agenzia spaziale NASA prevede per la zona di mare a fronte della Regione Liguria un innalzamento progressivo sino a 0.6 m al 2100. Questo fenomeno di innalzamento comporterà un avanzamento nell'entroterra del fenomeno dell'ingressione marina sia per via sotterranea che superficiale. Per innalzamenti di quest'ordine di grandezza, il fenomeno dell'intrusione marina nel Magra supererà il salto altimetrico presente nell'alveo tra Romito e Battifollo (resti vecchio ponte) e risalirà verso monte.
- Il Bilancio idrologico analitico elaborato al 2024 mostra entrate nel sistema acquifero maggiori rispetto alle uscite. L'acqua estratta dai pozzi acquedottistici (ACAM, SAT) e privati è minore rispetto alla ricarica diretta o da overflow. Il Bilancio idrologico del modello numerico elaborato al 2024 mostra una estrazione di acqua da pozzi (ACAM, SAT e privati) di 114013 m^3/giorno (di cui 99519 m^3/giorno ACAM-SAT) a fronte di una ricarica di 203845 m^3/giorno.

BIBLIOGRAFIA

Abbate E., Fanucci F., Benvenuti M., Bruni P., Cipriani N., Falorni P., Fazzuoli M., Morelli D., Pandeli E., Papini M. (2005). Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 248, La Spezia. Serv. Geol. d'Italia. Roma.

ACAM (2001). Indagine idrogeologica per la difesa dall'intrusione salina nel campo pozzi sul F. Magra. GEOPLAN.

Ambrosio M., Fagioli M.T., Curcio C., Dagani L. (2015a). Modello concettuale idrogeologico (flusso) degli impianti pilota. ACQUASENSE Progetto Industria 2015.

Ambrosio M., Fagioli M.T., Curcio C., Dagani L. (2015b). Modello Numerico a Differenze Finite Complessivo (Flusso e Trasporto Soluti) per la Simulazione dell'Intero Tratto del Ciclo Idrico. ACQUASENSE Progetto Industria 2015.

Ambrosio M., Fagioli M.T., Curcio C., Dagani L. (2015c). Simulazioni Calibrate di Eventi Eccezionali con Mappe Previsionali di Andamento Temporale degli Effetti. ACQUASENSE Progetto Industria 2015.

Ambrosio M., Fagioli M.T., Curcio C., Dagani L. (2015d). Modelli di Rilevazioni delle Anomalie. ACQUASENSE Progetto Industria 2015.

ANDERSON M.P., WOESSNER W.W., HUNT R.J. (2015) Applied groundwater modeling—Simulation of flow and advective transport. Second Edition. Elsevier, Academic Press, 564 p.

ARPAL (2000) CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE ED AZIONI DI MONITORAGGIO DELLA PIANA DI ARCOLA (SP). Relazione definitiva di progetto Gruppo di Lavoro di cui alla D.G.R. n. 1244 del 8 maggio 1998

ASTM (1995) E 1739-95: standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum contaminated sites. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

Autori vari (2019). POLO INTEGRATO DI TRATTAMENTO E RECUPERO DEI RIFIUTI LOCALITA' SALICETI - COMUNE DIVEZZANO LIGURE (SP): IMPIANTO PER IL TRATTAMENTO E IL RECUPERO DELLA FORSU CON PRODUZIONE DI COMPOST DI QUALITA' E BIOMETANO SOSTENIBILE AVANZATO. Relazioni tecniche varie. Committente ReCos S.p.A. (Citata nel presente lavoro in alcune immagini come "Indagini RECOS REL.1/19").

Bedekar, V., Morway, E., Langevin, C., & Tonkin, M. (2016). MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53, 69.

Bencini A, Duchi V, Martini M (1977) Geochemistry of thermal springs of Tuscany. Chem Geol 19:229–252

Beretta G.P., & Stevenazzi S. (2018). Specific yield of aquifer evaluation by means of a new experimental algorithm and its applications. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater, 7(1).

Bini M., Chelli A., Pappalardo M., (2006) GEOMORFOLOGIA DEL TERRITORIO DELL'ANTICALUNI (LASPEZIA) PER LA RICOSTRUZIONE DEL PAESAGGIO COSTIERO IN ETÀ ROMANA. Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A, 111 (2006) pagg. 57-66, figg. 5.

Brozzo G., Marini L. (2009). Atlante degli acquiferi della Liguria - Volume IV: L'acquifero alluvionale della bassa valle del Fiume Magra, Pacini Editore, Pisa, 85 pp.

Brozzo, G., Accornero, M., Marini, L. (2011). The alluvial aquifer of the Lower Magra Basin (La Spezia, Italy): conceptual hydrogeochemical–hydrogeological model, behavior of solutes, and groundwater dynamics. Carbonates and Evaporites, 26(3), 235.

Conti P., Carmignani L., Massa G., Meccheri M., Patacca E., Scandone P., Pieruccioni D., (2011). Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 249, Massa Carrara. Serv. Geol. D'Italia. Roma.

CONTI P., CORNAMUSINI G., CARMIGNANI L., (2019), Carta geologica delle regioni Emilia-Romagna, Marche, Toscana e Umbria. Note illustrative. Archivio cartografico della regione Emilia-Romagna – Bologna.

Doherty, J. (2003). Ground water model calibration using pilot points and regularization. Ground Water, 170-177 (vol. 41 n. 2).

Doherty, J. (2015). Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing.

Doherty, J., & Hunt, R. (2010). Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration. U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report.

Doherty, J., Fienen, M., & and Hunt, R. (2010). Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-Point Theory, guidelines, and research directions. U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 5168, 36.

Doveri M., Scozzari A., Menichini M., Lelli M., Raco B. (2015). Simulazioni Calibrate dell'Andamento Quali-Quantitativo Naturale della Risorsa. ACQUASENSE Progetto Industria 2015.

Eckis R.P. (1934) South Coastal Basin Investigation, Geology, and Ground Water Storage Capacity of Valley Fill. California Division of Water Resources Bulletin, Sacramento, 45 pp.

Freeze A. and Cherry J. (1979) Groundwater. http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-toc

Fried, J. J. (1975). Groundwater pollution. Elsevier.

Gelhar, L. W., Welty, C., & Rehfeldt, K. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water resources research, 28(7), 1955-1974.

Harbaugh, A. (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. In Modeling techniques. Reston, Virginia.

Merlisenna P., Piaggi G. (1972). Raccolta dei dati necessari all'impostazione del modello matematico della pianura alluvionale della bassa valle del F. Magra e F. Vara. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Scienze M.F.N., Istituto di Geologia.

Ottonello G., Fincato G.B., Brozzo G., Marini L., Cipolli F., Droghieri E., Prochilo F., Vetuschi Zuccolini M. (2005). ATLANTE DEGLI ACQUIFERI DELLA LIGURIA. Volume IV: L'acquifero alluvionale della bassa valle del Fiume Magra. Università degli Studi di Genova. Pp. 170

Pandeli E. (2008) _ La pianura di Firenze-Prato-Pistoia nel quadro dell'evoluzione geologica dell'Appennino settentrionale. Un piano per la Piana. Idee e progetti per un parco. Atti del convegno. Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze Via G.La Pira, 4 – 50121 Firenze.

Pollock, D. (2016). User guide for MODPATH Version 7—A particle-tracking model for MODFLOW. U.S. Geological Survey Open-File Report 1086, 35.

Raggi D. & Raggi G. (2020). Gli acquiferi e le risorse idriche del territorio spezzino. Alcune proposte per la loro razionale utilizzazione e tutela. Memorie dell'accademia di scienze G. Capellini, La Spezia, 2020. P. 47

Raggi G., Sansoni G., 1993. Variazioni storiche e tendenza evoluti va della linea di riva lunense. Memorie della Accademia Luni gianese di Scienze «G. Capellini» 62-63: 3-43.

Righetti S. (2019). Rapporto relativo a quindici prove sismiche a stazione singola con metodo HVSR eseguite in Provincia di La Spezia. Committente ReCos S.p.A. Dicembre 2019. (Citata nel presente lavoro in alcune immagini come "Indagini RECOS REL.2/19").

Ronchetti F., & Critelli V., (2020). POLO INTEGRATO DI TRATTAMENTO E RECUPERO DEI RIFIUTI LOCALITA' SALICETI - COMUNE DI VEZZANO LIGURE (SP) – MODELLAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE. Modello numerico di flusso di trasporto delle acque sotterranee della bassa Val Magra tra il Polo Integrato di Trattamento e Recupero dei Rifiuti in Localita' Saliceti (ReCos S.p.A.) e i campi pozzi di Fornola. Relazione tecnica. Aprile 2020.

RTC (2011) Infrastrutture Liguria, Stabilimento ex – Metalli e Derivati, Arcola (SP). Relazione tecnica. INDAGINE GEOGNOSTICA

Sabattini M., Ronchetti F., Arosio D., Mainini A., Brozzo G., Panzani A., (2024) (2024) - Monitoring of the spatial and temporal evolution of marine intrusion in the estuary area of the river Magra and estimation of its effects on the groundwater. Copernicus GmbH, EGU24-1345. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13451

Sepulveda, N., & Doherty, J. (2015). Uncertainty analysis of a groundwater flow model in east-central Florida. Ground Water, 464-474 (vol. 53 n. 3).

Sepulveda, N., & Doherty, J. (2015). Uncertainty analysis of a groundwater flow model in east-central Florida. Ground Water, 464-474 (vol. 53 n. 3).

Simunek J., Van Genuchten M. T., & Sejna M. (2006). The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, 1.

Tonkin, M., & Doherty, J. (2009). Calibration-constrained Monte Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques. Water Resources Research, (vol. 45, W00B10).

Warneke S. (2011). Microbial Processes and Nitrate removal in Denitrification Beds (Doctoral dissertation, University of Waikato).