

Asse stradale di collegamento tra gli svincoli di Prato Est e Prato Ovest – "Declassata di Prato"
Raddoppio di Viale Leonardo da Vinci nel tratto compreso tra Via Marx e Via Nenni mediante la realizzazione di un sottopasso

PROGETTO DEFINITIVO

COD. FI463

PROGETTAZIONE: RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO PROGETTISTI		MANDATARIA: 	MANDANTI:  POLITECNICA BUILDING FOR HUMANS	MATILDI+PARTNERS
IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: Ing. Andrea Renso – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2413		IL PROGETTISTA: GRUPPO DI PROGETTAZIONE: COORDINAMENTO PROGETTAZIONE, PROGETTAZIONE STRADALE, GEOTECNICA ED OPERE IN SOTTERRANEO: Ing. Marcello Mancone – POLITECNICA ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5723		
IL GEOLOGO: Geol. Pietro Accolti Gil – POLITECNICA Ordine Geologi Regione Toscana n° 728		STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE: Arch. Paola Gabrielli – POLITECNICA ordine Architetti Provincia di Bologna n. 2921		
IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE: Ing. Marcello Mancone – POLITECNICA ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5723		CANTIERIZZAZIONE E FASI ESECUTIVE: Ing. Alessio Gori – POLITECNICA ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5969		
VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO: Ing. Raffaele Franco Carso		IDROLOGIA ED IDRAULICA: Ing. Alessandro Cecchelli – POLITECNICA ordine ingegneri Provincia di Grosseto n.760		
PROTOCOLLO:	DATA:	COLLABORATORI DI PROGETTO: Ing. Massimo Palermo – POLITECNICA Arch. Valentina Iaia – POLITECNICA Geom. Franco Mariotti – POLITECNICA Geom. Angela Pantiferi – POLITECNICA		

02 – GEOLOGIA, GEOTECNICA E SISMICA

02.3 – Geologia geomorfologia e idrogeologia

Relazione modellazione numerica interazione falda-struttura ed allegati

CODICE PROGETTO PROGETTO LIV. PROG. N. PROG. D P F I 1 0 D 1 9 0 1		NOME FILE 02.09_P00_ID00_IDR_RE07_B		Progr. ELAB. 02.09	REV. B	SCALA: -
CODICE ELAB. P 0 0 I D 0 0 I D R R E 0 7						
D						
C						
B	REVISIONE A SEGUITO DI ISTRUTTORIA ANAS	03/2020	POLITECNICA	V.IAIA	M.MANCONE	A.RENSO
A	EMISSIONE	12/2019	POLITECNICA	P.ACCOLTI	M.MANCONE	A.RENSO
REV.	DESCRIZIONE	DATA	SOCIETA'	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

SOMMARIO

1	Premessa	1
2	Inquadramento geologico	1
3	Inquadramento idrogeologico	4
4	Metodologia di analisi	8
5	Dati utilizzati.....	10
6	Modello concettuale	13
7	Modello di flusso	16
8	Simulazione e verifica del modello.....	20
9	Risultati del modello.....	23
10	Allegati grafici – Mappe della soggiacenza simulata per i vari scenari di progetto.....	30

1 Premessa

Il presente documento ha lo scopo di presentare il modello numerico di flusso dell'acquifero pratese in corrispondenza dell'area interessata dal raddoppio di Viale Leonardo da Vinci nel tratto compreso tra Via Marx e Via Nenni mediante la realizzazione di una galleria in asse con l'attuale tracciato.

La realizzazione di un modello numerico nasce dall'esigenza di valutare in modo quanto più appropriato possibile l'influenza dell'opera sotterranea sulla dinamica della falda presente nel sottosuolo. Il lavoro eseguito è indirizzato a prevedere l'influenza del progetto attraverso la simulazione di più scenari in cui inserire l'elemento di disturbo rappresentato dall'opera sotterranea.

2 Inquadramento geologico

L'area indagata si inserisce nella parte centrale della pianura di Firenze-Prato-Pistoia che rappresenta l'evoluzione di un bacino lacustre, la cui formazione risale al Pliocene Inferiore, nel quale si sono accumulati fino a 600 metri di sedimenti.

L'aspetto geomorfologico del bacino sedimentario del Medio Valdarno deriva dalla sua passata storia evolutiva. L'unità paleogeografica ha una forma allungata con l'asse maggiore orientato NW-SE ed è costituita da uno spessore variabile di depositi fluvio-lacustri non litificati, sedimentatisi entro una fossa tettonica, la cui formazione è connessa con le fasi distensive post-parossistiche dell'orogenesi appenninica (Pliocene).

Il bacino lacustre presenta la sua profondità massima nella zona tra Campi Bisenzio e Calenzano (500-550 m); minori profondità si sono riscontrate tra Prato e Pistoia (400-450 m); le profondità minime sono invece presenti nella zona di Firenze (50 m nel centro cittadino).

L'emissario di questo antico lago era probabilmente ubicato alla stretta della Gonfolina: i principali immissari erano costituiti da un paleo-Ema nella conca di Firenze, dall'Ombrone all'estremo opposto del bacino e dal Bisenzio nella sua parte centrale.

Il progressivo abbassamento del fondo del lago veniva compensato dal forte trasporto solido dei corsi d'acqua, in considerazione del fatto che l'area appenninica di provenienza era in forte sollevamento e quindi in accentuata erosione. Il fondo del bacino risultò di forma asimmetrica, incernierato in corrispondenza del margine meridionale, con maggiore profondità verso il margine settentrionale a causa dell'azione della faglia normale che lo delimitava verso NE.

Ulteriori faglie, trasversali rispetto al suo asse maggiore (localizzate lungo l'asse Castello-Scandicci) interessarono il substrato pre-lacustre, causando il sollevamento (di circa 150-200 m) della conca di Firenze rispetto al resto del bacino.

In questa pianura così prosciugata si instaurò un reticolo idrografico il cui corso principale sfociava nel lago residuo in corrispondenza delle Cascine, formando una pseudo-conoide (argille con inclusioni ghiaiose derivanti dallo smantellamento dei precedenti sedimenti lacustri) che si estendeva verso Osmannoro e Campi Bisenzio. Ciò causò un raccorciamento dell'area occupata dal lago, che veniva così ad essere delimitato a Sud-Est dall'allineamento Castello-Scandicci.

Nel restante bacino di Prato-Pistoia, invece, continuò senza soluzione di continuità la deposizione lacustre fino al totale colmamento.

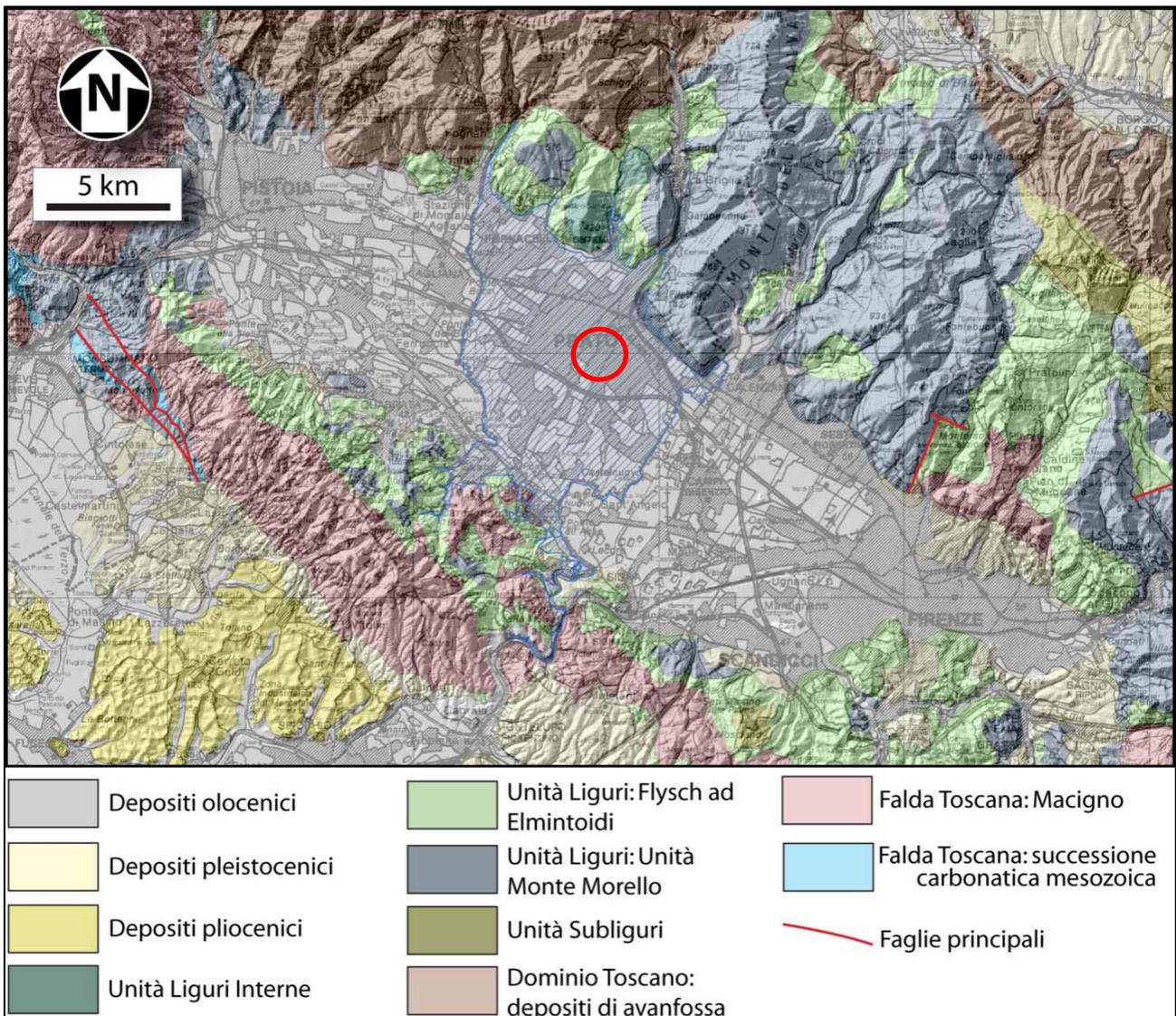


Figura 1 - Schema geologico semplificato dell'area oggetto di studio (da Cerrina Feroni et al., 2010)

Nella successiva fase alluvionale si instaurò un reticolo idrografico facente capo all'Arno che, con numerosi cicli di erosione e deposizione (che seguirono il ritmo delle glaciazioni quaternarie), rimaneggiò l'originaria superficie depositandovi una spessa coltre di sedimenti sciolti.

Questi ultimi, provenienti in prevalenza dalle sponde appenniniche settentrionali, erano in genere a granulometria grossolana in prossimità dei corsi d'acqua o entro gli alvei, ed a granulometria decisamente più fine nelle zone più distali.

L'ultima fase evolutiva del bacino vide l'instaurarsi di estese zone palustri, specialmente ai margini della pianura neoformata ed in prossimità dei corsi d'acqua principali, alcune delle quali perdurarono fino in epoca storica. In tali ambienti di bassa energia si depositarono sedimenti fini con intercalazioni torbose.

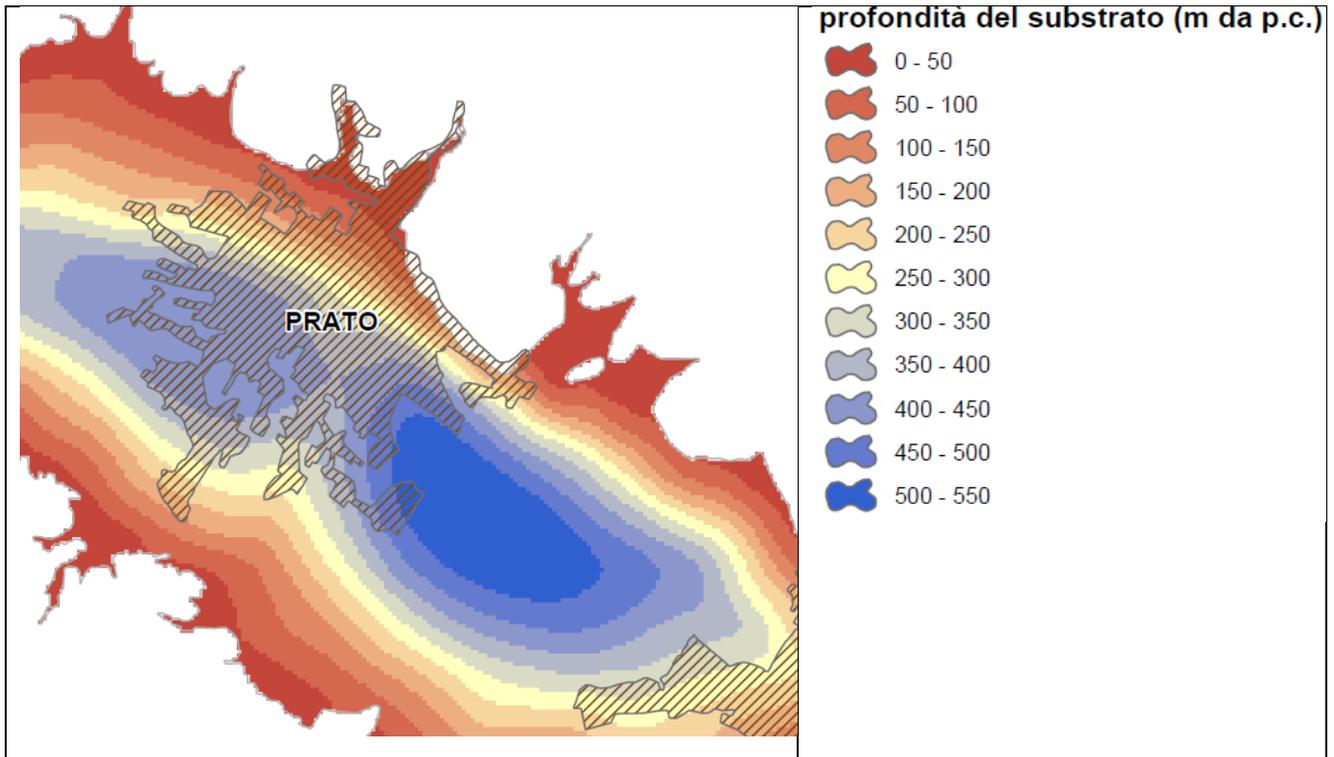


Figura 2 – estratto dalla Carta del substrato del bacino fluvio lacustre (Piano di Bacino del fiume Arno Stralcio: "Bilancio idrico")

Più in dettaglio, nell'area pratese, i depositi fluvio-lacustri che hanno riempito il bacino possono essere divisi in tre unità (dal basso verso l'alto):

- depositi lacustri
- depositi di delta conoide del Bisenzio
- depositi recenti di esondazione

I depositi lacustri sono costituiti da argille limose, talvolta leggermente sabbiose, con livelli di lignite e torba; alle argille si intercalano strati di ghiaie, generalmente in matrice limosa, il cui spessore diminuisce procedendo dai margini verso il centro della pianura.

Tutto ciò è da mettere in relazione con il fatto che l'area di Prato corrispondeva già in questa fase a quella di un delta conoide. Il progressivo abbassamento del bacino veniva compensato dal notevole trasporto solido dei corsi d'acqua, fra i quali il Bisenzio rivestiva un ruolo preminente, dato che, in conseguenza dell'area appenninica di provenienza in forte sollevamento e quindi in accentuata erosione, si determinava un'evoluzione sedimentaria tendente ad un aumento dell'apporto macroclastico: nell'area di Prato le ghiaie diventavano prevalenti via via che il conoide avanzava nella pianura, fin quasi al margine opposto. Terminata nell'Olocene questa fase sedimentaria, il Bisenzio ha cominciato a incidere la sua conoide.

La successione sedimentaria termina con la deposizione di materiali limoso-argillosi più o meno sabbiosi corrispondenti agli episodi alluvionali recenti.

Alla base dell'intera unità deposizionale è presente il substrato roccioso che nella zona di Prato è rappresentato dalle Arenarie del Monte Cervarola, dalle formazioni del complesso Ofiolitico e dalla Formazione di Monte Morello.

3 Inquadramento idrogeologico

La caratterizzazione idrogeologica e stratigrafica dell'area è stata oggetto di molti studi e indagini a partire dal lavoro di Landini, Pranzini e Venurucci (1990) *"La falda idrica della conoide di Prato"*, proseguito con la *"Modellazione numerica dell'acquifero della piana di Prato"* (riferita agli anni 2007-2014) sviluppata da Autorità di Bacino del Fiume Arno, Provincia di Prato ed Ingegnerie Toscane S.r.l., fino ad arrivare *"Studio conoscitivo dell'acquifero di Prato, indagini idrogeologiche e geochimico-isotopiche 2015-2016"* a cura di West Systems srl, PIN scrl e IGG-CNR.

Il sottosuolo della pianura pratese è sede di un acquifero fra i più importanti del bacino dell'Arno: le ghiaie ed i ciottolami del conoide del Bisenzio raggiungono uno spessore massimo tra i 50 e i 60 metri e forniscono ai pozzi portate piuttosto elevate. Anche al di sotto del corpo acquifero principale, fino alla profondità di oltre 300 m, sono presenti livelli di ghiaie con falde in pressione.

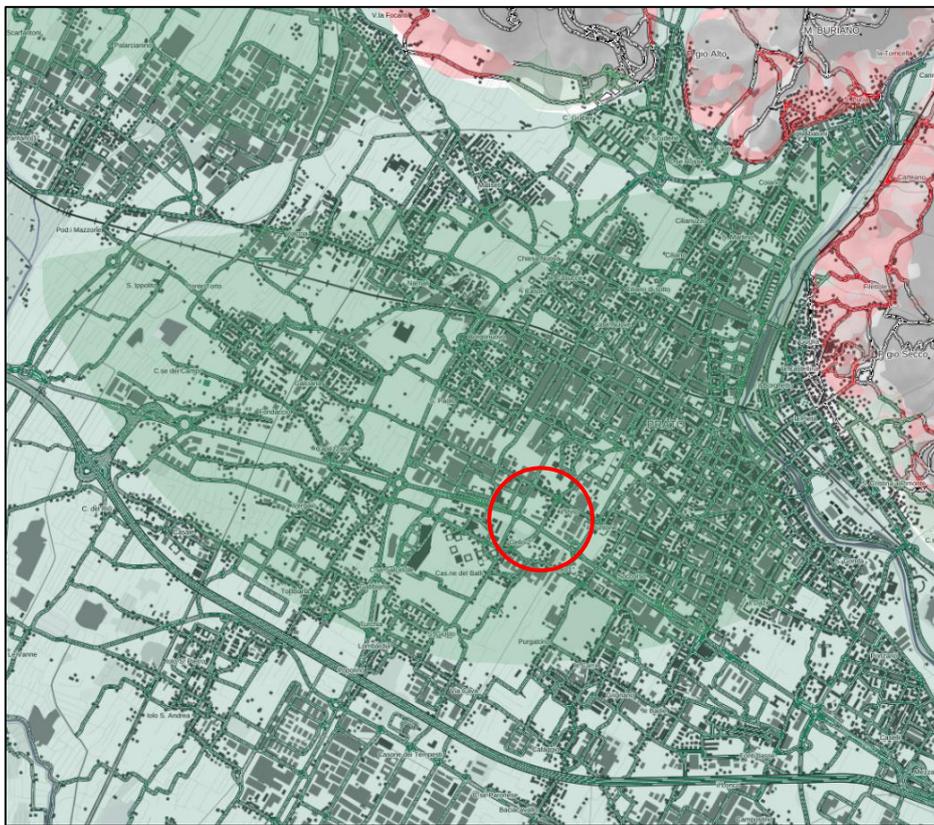


Figura 3 – estensione del conoide, acquifero principale.

Nel sottosuolo dell'area di Prato è possibile riconoscere un sistema acquifero composto da una serie di livelli permeabili (ghiaie con matrice sabbiosa e/o limosa) intercalati da strati acquicludei o acquitardi (limi e argille), che comportano la presenza di più falde.

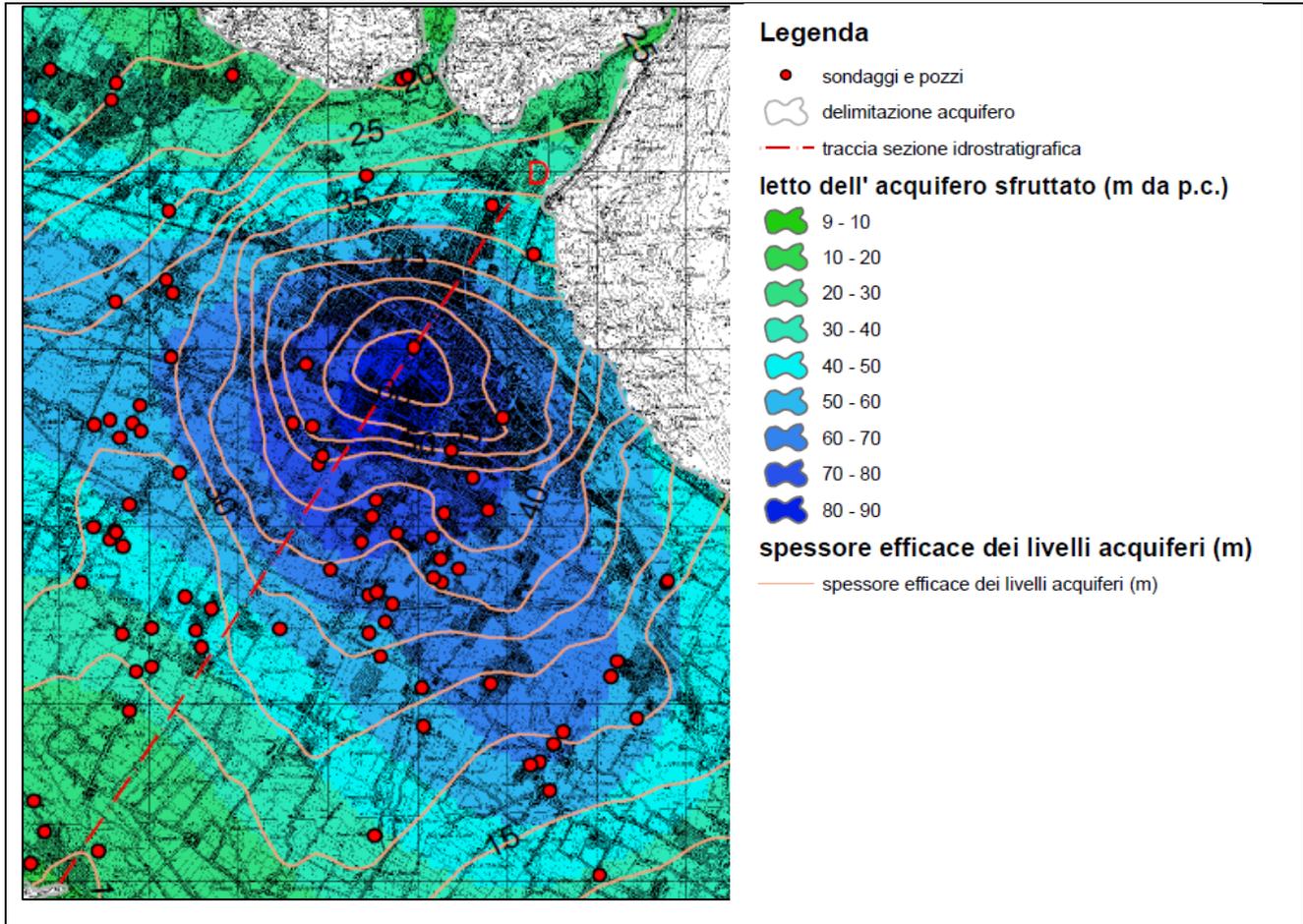


Figura 4 – carta del letto dell'acquifero (Piano di Bacino del fiume Arno Stralcio: "Bilancio idrico")

La prima falda, libera, è contenuta nel corpo principale della conoide, e risulta costituita da ghiaie e ciottolami che a partire da profondità di 2 – 10 m dal piano di campagna arrivano fino a profondità di 60 m, profondità che diminuisce procedendo verso i margini del conoide.

Da un punto di vista idrodinamico, il sistema nella parte alta della piana (parte apicale del conoide) è di fatto da ritenersi freatico e pressoché monofalda (vista la continuità dei principali orizzonti acquiferi sopra menzionati e la prevalenza delle granulometrie grossolane). I livelli limoso-argillosi all'interno di questa falda principale aumentano verso le aree marginali, comunque non raggiungono mai per estensione e spessore una continuità tale da impedire la circolazione idrica fra i livelli più permeabili di ghiaie.

Al di sotto del corpo acquifero principale sono presenti, soprattutto nella zona apicale e centrale, altri livelli permeabili inter-comunicanti ed ospitanti falde; in esse si evidenziano scambi idrici anche con la falda libera sovrastante.

Riguardo ai limiti dell'acquifero, possiamo notare che il solo limite naturale è a N-NE dove lo spessore dell'acquifero si azzera contro le rocce prelacustri: tali formazioni sono quasi tutte a bassa permeabilità (Ofioliti e Flysch argilloso – calcareo) ad eccezione della F.ne di Monte Morello mediante la quale avvengono scambi idrici fra i rilievi della Calvana e le ghiaie del conoide. Nelle altre direzioni le ghiaie del conoide si uniscono con quelle deposte dai corsi d' acqua contigui al Bisenzio: il T. Agna a ovest, il T. Ombrone a sud, l'Arno a sud ovest ed il T. Marina a est.

Riassumendo, il bacino che ospita l'acquifero è stato soggetto alla sedimentazione di depositi fluvio lacustri suddivisibili in tre unità (dall'alto verso il basso):

- sedimenti di copertura;
- depositi del conoide del Bisenzio (corpo acquifero principale);
- depositi lacustri.

Gli ultimi rappresentano l'unità più profonda e sono costituiti da argille limose e sabbie e lenti di ghiaie che rappresentano acquiferi di modesta entità perlopiù isolati; il conoide è invece costituito in prevalenza da materiale più grossolano come sabbie ghiaie e ciottoli immersi in matrice sabbioso limosa e rappresenta il corpo acquifero principale. I depositi recenti di copertura (Olocene) derivano dalla progressiva incisione del conoide e dalla successiva deposizione di materiale limoso argilloso a seguito degli episodi alluvionali recenti.

Vari lavori in passato (Landini et al., 1990; Gargini et al., 1995; Landini, 2005; Doveri, 2006; Gargini et al., 2011; West Systems srl, PIN srl e IGG-CNR, 2016) hanno provveduto alla realizzazione di mappe piezometriche relative alla falda pratese. L'insieme di queste elaborazioni permette di verificare il comportamento della falda in termini di abbassamenti o innalzamenti avvenuti nel tempo.

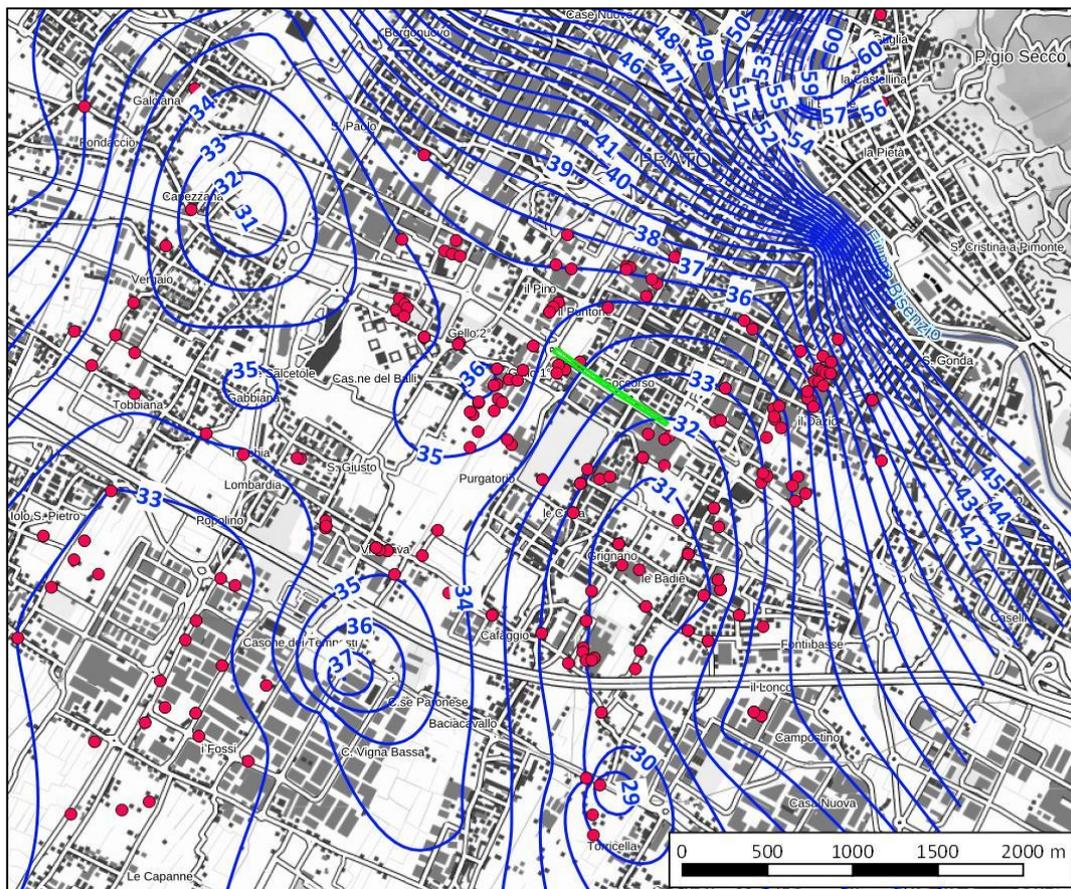


Figura 5 – piezometria relativa a giugno 2015 (studio conoscitivo dell'acquifero di Prato indagini idrogeologiche e geochemico-isotopiche 2015 - 2016). In verde l'opera di progetto, in rosso i pozzi presenti all'interno dell'area interessata dalla modellazione.

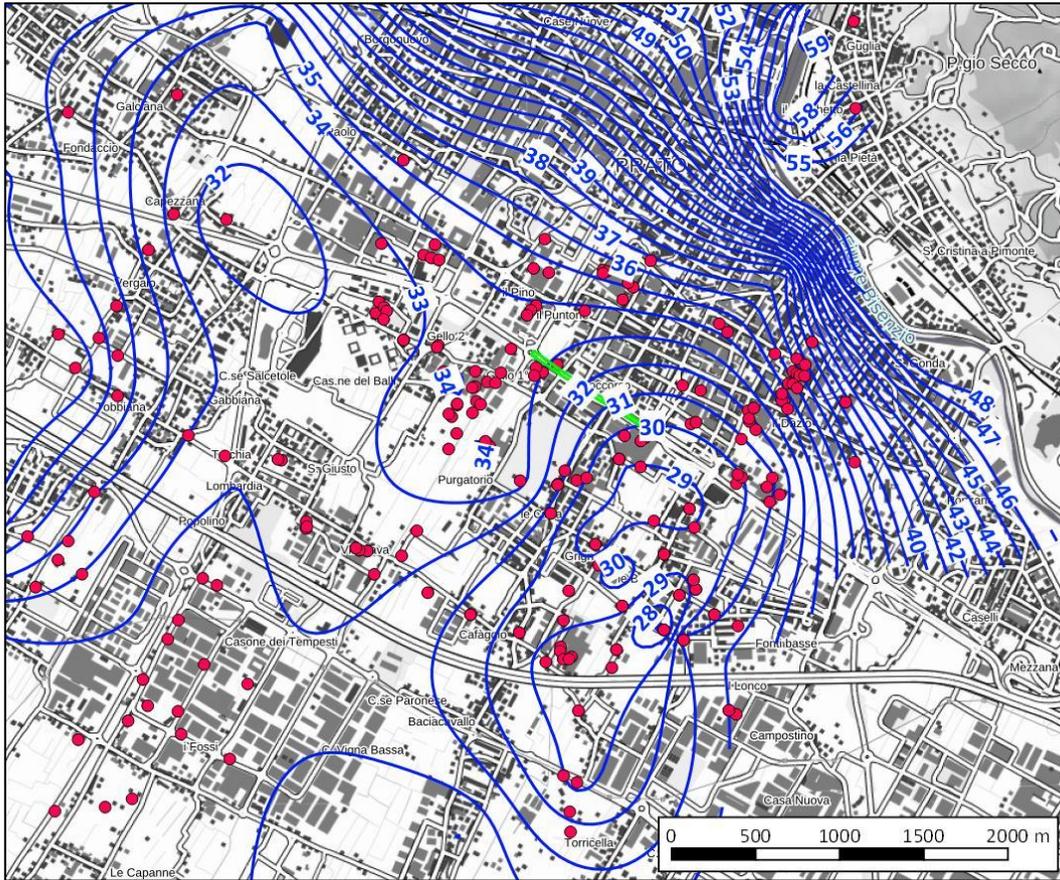


Figura 6 - piezometria relativa a settembre 2015 (studio conoscitivo dell'acquifero di Prato indagini idrogeologiche e geochimico-isotopiche 2015 - 2016)

In generale, bisogna sottolineare che le variazioni cronologiche del livello di falda dipendono sia dalla diversa ricarica che dal diverso sfruttamento. Inoltre i pozzi misurati nelle varie campagne generalmente non sono gli stessi e di conseguenza il confronto deve essere fatto nell'insieme e non puntualmente.

La morfologia della falda principale evidenzia però in linea generale l'importanza delle alimentazioni da parte del Fiume Bisenzio e delle zone collinari/montane settentrionali (con particolare riferimento alla Calvana) che recapitano maggiormente (e non esclusivamente) nel settore orientale della piana ed in quello nord della parte occidentale. Nella zona sud-occidentale possono viceversa avere maggior peso, sia l'infiltrazione locale (quella cioè che si verifica direttamente nei depositi della piana), sia l'alimentazione dalle colline meridionali.

Nella parte centrale della piana, tutte le piezometrie disponibili riportano inoltre depressioni legate agli emungimenti (principalmente di natura industriale e idropotabile), che a partire dal 2010 risultano meno accentuate e relativamente spostate verso Sud.

In merito ai valori assoluti, a partire dagli anni '60 è iniziato un progressivo impoverimento della falda, tanto che si è formato un profondo ed ampio cono di depressione della superficie piezometrica, con una chiara situazione di sovrasfruttamento della falda che ha raggiunto il suo apice alla fine degli anni '80. Fino all'anno 2000 le depressioni piezometriche sono caratterizzate da quote molto basse, dell'ordine dei 10-15 m s.l.m.. Già nel 2006 si assiste invece ad una risalita generale dei livelli, che nelle aree più depresse vanno ad attestarsi intorno ai 20-25 m s.l.m..

Nel 2010, tale risalita risulta ancora più accentuata ed i valori più bassi registrati non risultano inferiori ai 30 m s.l.m.

Questo processo di risalita dei livelli piezometrici tra il 2000 ed il 2010 è associato alla crisi del settore tessile, che conseguentemente ha determinato una forte riduzione degli emungimenti ad uso industriale. Tale aspetto e l' "abbandono" di alcuni pozzi idropotabili (legato ad una scarsa qualità delle acque) della zona più a ridosso della città, nonché la compensazione di questi con maggiori emungimenti a scopo idropotabile nella parte a sud, sono probabilmente responsabili della relativa migrazione dei minimi piezometrici verso la porzione più meridionale della piana.

4 Metodologia di analisi

Il modello è stato realizzato utilizzando il codice numerico MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988, Harbaugh et alii, 2000) integrato nel software FREEWAT concepito come un plugin per il GIS open source QGIS.

MODFLOW è un modello di acque sotterranee tridimensionale alle differenze finite del Servizio Geologico statunitense, USGS, considerato uno standard internazionale per la simulazione e la previsione delle condizioni delle acque sotterranee. La struttura modulare di MODFLOW ha permesso negli anni una potente integrazione di funzionalità per simulare sistemi accoppiati acque sotterranee/superficiali, trasporti soluto e densità variabile, compattazione dei terreni, stima dei parametri e gestione delle acque sotterranee.

QGIS è un Sistema di Informazione Geografica Open Source rilasciato sotto la GNU General Public License. QGIS è un progetto ufficiale della Open Source Geospatial Foundation(OSGeo), è in grado di funzionare su Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e supporta numerosi formati vettoriali, raster, database e funzionalità. QGIS offre un numero in continua crescita di funzionalità derivanti dal programma principale e dai plugin. Attraverso il software è possibile visualizzare, gestire, modificare, analizzare dati e comporre mappe stampabili.

FREEWAT è un progetto HORIZON 2020, finanziato dalla Commissione Europea; rappresenta un ambiente di modellazione integrata GIS open source e di dominio pubblico per la simulazione della quantità e della qualità delle acque sotterranee con un modulo integrato di gestione della risorsa. FREEWAT è un plugin per QGIS progettato come un insieme modulare di strumenti per:

- l'analisi, l'interpretazione e la visualizzazione di dati idrogeologici e idrochimici e di qualità, anche incentrati su un'analisi avanzata delle serie temporali, integrata nel modulo akvaGIS;
- la simulazione di modelli relativi al ciclo idrologico e alla gestione delle risorse idriche: modelli di flusso, modelli di trasporto, modelli di crescita delle colture, modelli di gestione e ottimizzazione (anche legati alla gestione dell'irrigazione e alle problematiche rurali);
- eseguire la calibrazione del modello, l'analisi di sensibilità e quantificazioni di incertezza.

In FREEWAT, lo spazio fisico viene discretizzato per mezzo di una griglia di calcolo a maglie rettangolari. Per quel che riguarda la stratigrafia, essa è rappresentabile mediante una successione verticale di strati aventi caratteristiche diverse; le caratteristiche stratigrafiche possono variare anche in senso planimetrico entro un medesimo strato.

Le modellazioni possono essere eseguite considerando un intervallo di tempo di riferimento, denominato “stress period”, entro il quale si possono avere (in caso di modellazioni in regime transitorio) ricariche o richieste/consumi di risorsa variabili nel tempo secondo una ulteriore suddivisione dell’intervallo in passi temporali.

La modellazione, a partire da condizioni al contorno iniziali e finali imposte, tiene conto degli utilizzi, emungimenti e quant’altro possa comportare il consumo di risorsa idrica in una certa zona, i flussi sotterranei che si instaurano a seconda dei gradienti di potenziale e delle caratteristiche di permeabilità, le ricariche alla falda (in primis dovute alle precipitazioni) e le possibili perdite ad esempio dovute all’evapotraspirazione, restituendo in ogni cella cui è stato suddiviso lo spazio di calcolo il valore dell’altezza della falda. Le quote della falda possono essere confrontate con i valori noti in alcuni punti, detti target, la cui rispondenza permette di validare il modello.

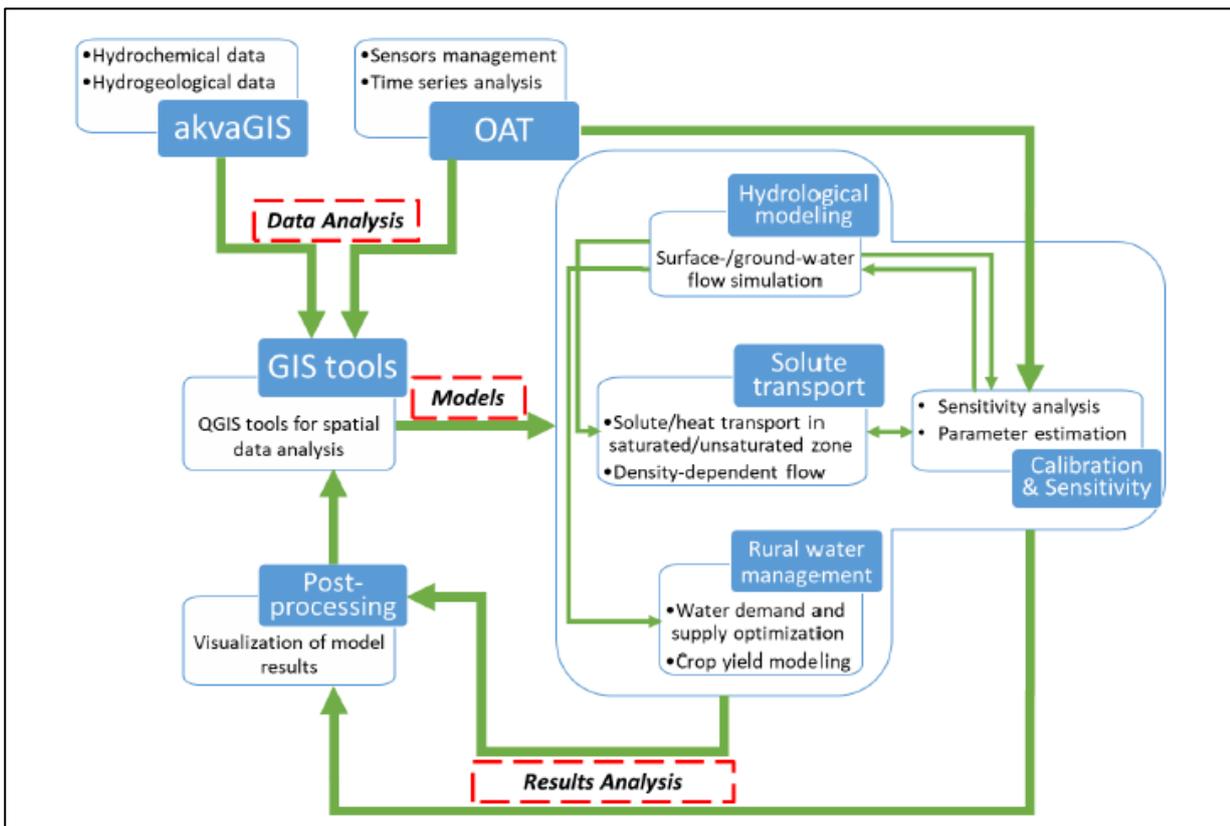


Figura 7 – schema di funzionamento di freewat

MODFLOW prevede un’ampia serie di “pacchetti” che consentono la simulazione di svariati processi. La versione corrente di FREEWAT include la maggior parte di questi pacchetti utili per i principali processi idrologici e idrogeologici. Di seguito una lista dei pacchetti modflow:

- Pacchetti di base:
 - Basic (BAS)
 - Discretization (DIS)
 - Layer Property Flow (LPF)
- processi idrogeologici:
 - specified-head boundaries
 - Time-Variant Specified Head (CHD)

- specified-flux boundaries
 - Recharge (RCH)
 - Well (WEL)
- head-dependent flux
 - Unsaturated Zone Flow (UZF)
 - River (RIV)
 - Lake (LAK)
 - Drain (DRN)
 - General-Head Boundary (GHB)
 - Evapotranspiration (EVT)
 - Multi-Node Well (MNW)
 - Stream Flow Routing (SFR2)

5 Dati utilizzati

La prima fase di reperimento dati ha permesso di collezionare sia informazioni di tipo stratigrafico (analizzando i numerosi sondaggi perforati nel 2012 e nel 2018 nell'ambito della progettazione preliminare) sia di tipo idrogeologico mediante la misura dei livelli all'interno dei piezometri disponibili.

Si è poi proceduto all'acquisizione dei seguenti dati pregressi:

- prelievi aggiornati relativi ai pozzi gestiti da Publiacqua (per il 2016 ed il 2017);
- letture dei piezometri della rete Publiacqua ricadenti nell'area di interesse (anni 2015-2018);
- piezometrie disponibili (le più recenti sono quelle ricostruite per il 2015 dal CNR);
- dati pluviometrici aggiornati (utilizzati per il calcolo della ricarica).

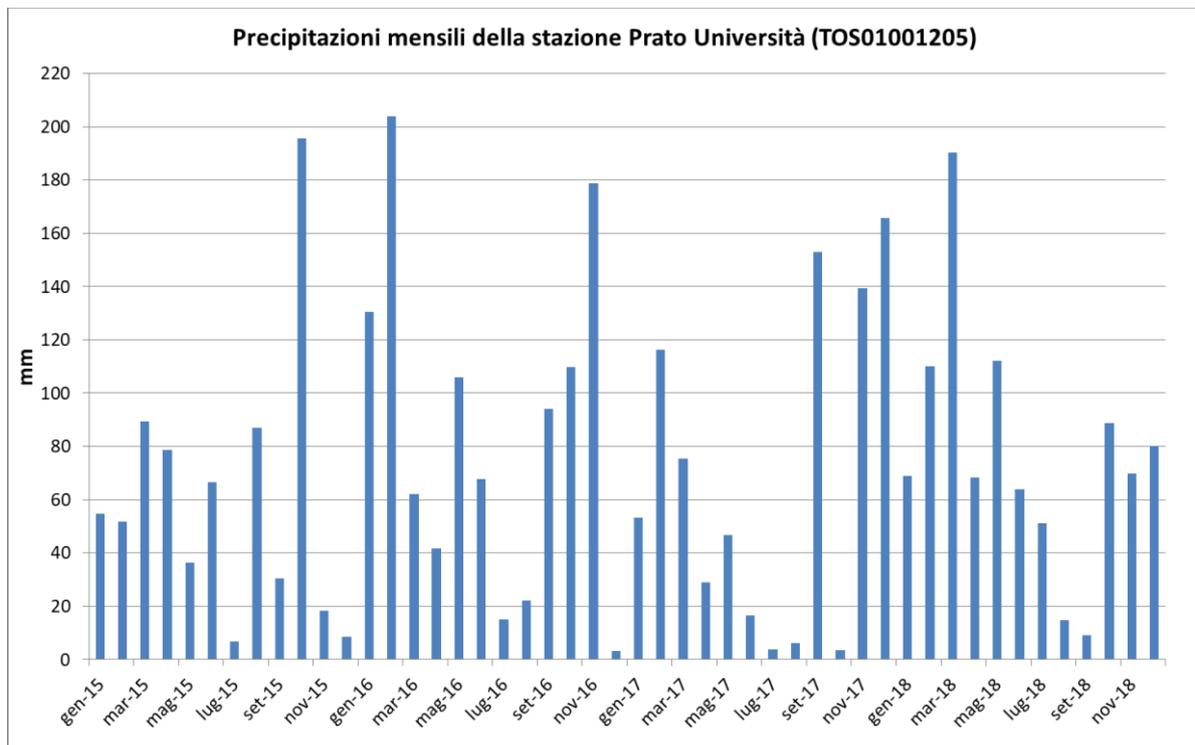


Figura 8 – valori mensili di precipitazione negli anni 2015-2018.

Nome	volume prelevato [mc/anno] 2016	volume prelevato [mc/anno] 2017	Nome	volume prelevato [mc/anno] 2016	volume prelevato [mc/anno] 2017
CPO_Capezzana Lavatoi	34,995	673,635	CPO_S. Lucia Anelli 3	79,233	39,209
CPO_Vergaio 1	727,098	539,421	CPO_S. Lucia Anelli 4	79,233	39,209
CPO_v. Traversa Vicinale - Iobbiana	593,679	485,564	CPO_S. Lucia Anelli 5	79,233	39,209
CPO_v. Ciliegia	593,662	269,293	CPO_S. Lucia - box 2	79,233	39,209
CPO_Tobbiana - Cimiteto	750,445	606,955	CPO_Polendone 1-artesiano	2,406	2,400
CPO_v. Casale 2 - Iobbiana	34,995	336,818	CPO_Polendone 2-artesiano	2,406	2,400
CPO_v. Casale 1 - Iobbiana	34,995	350,495	CPO_Polendone 3-artesiano	2,406	2,400
CPO_v. Cava 2	34,995	161,570	CPO_Polendone 4-artesiano	2,406	2,400
CPO_v. Cava 3	34,995	431,708	CPO_Gafissi	0	0
CPO_v. Guazzalotri	400,237	323,140	CPO_v. Cava 1	0	0
CPO_v. per Iolo - Iobbiana	233,472	215,426	CPO_v. Fondaccio	0	0
CPO_Iolo - Campo Sportivo II	591,691	539,421	CPO_Galceri 2	49,274	28,331
CPO_Iolo - Campo Sportivo I	899,977	1,213,056	CPO_Galceri 3	31,022	31,866
CPO_Iolo Cantiere	373,555	539,421	CPO_Iolo - Sant' Andrea	740,384	808,704
CPO_Tavola Colombaie	282,350	214,880	CPO_v. Lastruccia	237,071	253,319
CPO_Tavola Tangenziale	548,048	410,208	CPO_Molino Filettole	75,183	84,618
CPO_Macrolozzo 1	150,089	110,207	CPO_Paperino-scuole	0	0
CPO_Macrolozzo 3	140,083	107,713	CPO_Pizzidimonte Chiesa	0	0
CPO_Macrolozzo 4	300,178	188,926	CPO_Pizzidimonte 3	0	0
CPO_Macrolozzo 5	106,730	135,069	CPO_S. Maria Colonica - Lavatoi	0	0
CPO_Macrolozzo 7	166,766	53,942	CPO_Tavola Campo Sportivo 1	376,362	253,422
CPO_Macrolozzo 8	60,036	53,942	CPO_Tavola Campo Sportivo 2	313,130	251,359
CPO_Macrolozzo 9	200,119	161,570	CPO_Vergaio Scuole	0	0
CPO_Macrolozzo 11	133,412	107,713	CPO_FIORENTINA 1	264,405	289,701
CPO_Macrolozzo 12	0	0	CPO_Galciana Scuole	0	0
CPO_Macrolozzo 13	216,795	107,713	CPO_Gescal	0	0
CPO_Macrolozzo 14	475,929	377,851	CPO_Ippodromo 2	0	0
CPO_Macrolozzo 15	400,237	135,069	CPO_Malfante 2	0	0
CPO_Baciacavallo 1	740,334	685,116	CPO_Malfante 3	0	0
CPO_Baciacavallo 2	412,472	498,626	CPO_Malfante 4	0	0
CPO_Badie 1	264,405	261,561	CPO_Iolo - Campo Sportivo III	316,855	364,173
CPO_Badie 2	349,015	0	CPO_Capezzana Fattoria box 1	0	0
CPO_Badie 3	503,929	469,485	CPO_Capezzana Fattoria box 2	0	0
CPO_Badie 4	803,791	723,047	CPO_Capezzana Fattoria	0	0
CPO_Cafaggio Chiesa	317,286	227,086	CPO_v. Gora di Grignano	0	0
CPO_Cafaggio Lavatoi	296,134	244,701	CPO_Galceri 4	76,707	31,866
CPO_Cafaggio - via Lunga 2	35,700	373,772	CPO_Polendone 5-artesiano	2,406	2,400
CPO_Florentina 2	317,286	248,918	CPO_S. LUCIA - ANELLI 6	79,233	39,209
CPO_Grignano Lavatoi	634,572	498,626	CPO_Baciacavallo 3	423,048	498,626
CPO_Ie Carra	317,286	373,772	CPO_Baciacavallo 4	264,405	249,918
CPO_Tempesti	332,930	373,772	Totale	17,353,692	17,191,142

Figura 9 – prelievi acquedottistici in m³ nell'area esaminata nel modello per gli anni 2016-2017

Di seguito si riportano le misurazioni disponibili in corrispondenza dei piezometri ricadenti nell'area del modello. Per la loro ubicazione si faccia riferimento alla Figura 18.

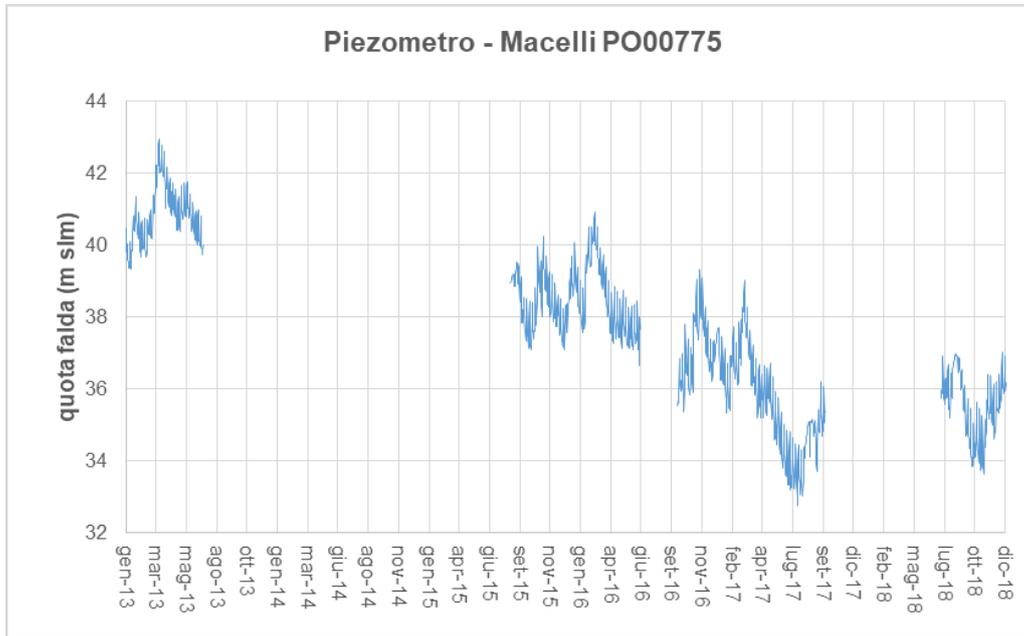


Figura 10 – livelli della falda piezometro Macelli.

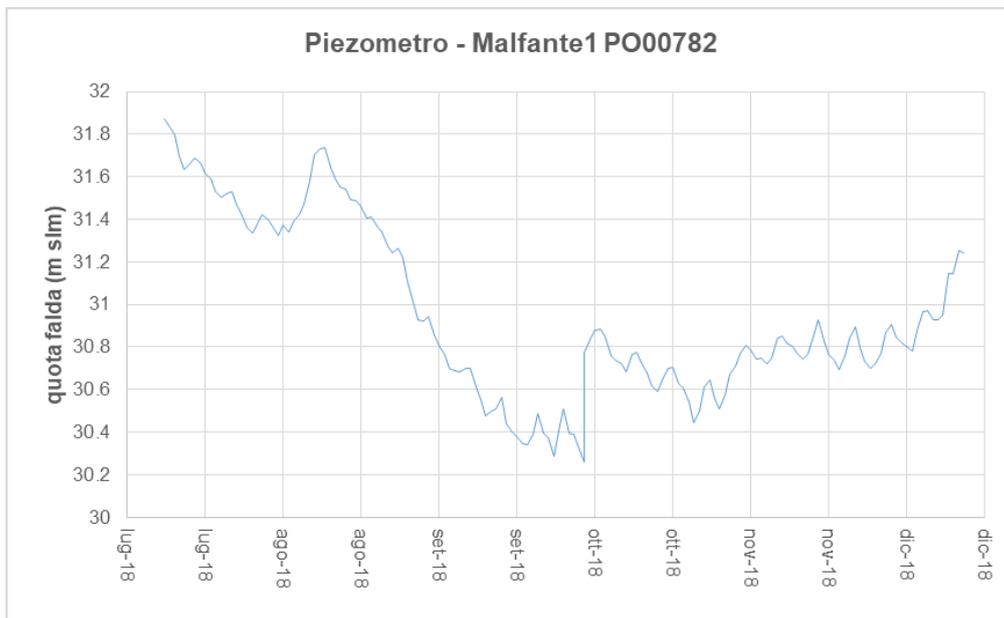


Figura 11 – livelli della falda piezometro Malfante 1.

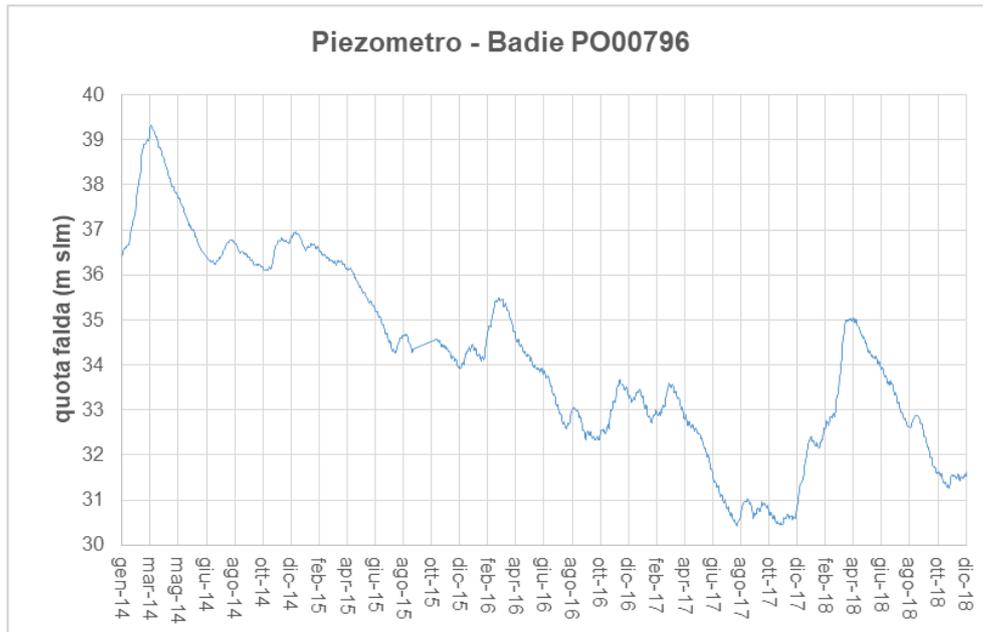


Figura 12 – livelli della falda piezometro Badie.

L'Autorità di Bacino ha poi fornito i dati di base provenienti dal modello di flusso dell'acquifero pratese realizzato per gli 2007-2014, consentendo in questo modo di avere alcuni dati di partenza già validati. Questi dati sono la geometria degli orizzonti (modificati sulla base delle stratigrafie a disposizione), i valori di permeabilità, i valori di ricarica derivante da infiltrazione superficiale e da perdite di rete, i valori di emungimento dei pozzi presenti e le condizioni al contorno per l'intero lasso di tempo (sempre riferiti al periodo 2007-2014). Relativamente all'estensione del modello per il periodo 2015-2018, i valori di ricarica e quelli dei prelievi sono stati aggiornati nel modo più opportuno (vedi 7 Modello di flusso).

6 Modello concettuale

Il modello concettuale dell'acquifero compreso all'interno dell'area studiata è rappresentato da un sistema multistrato con limite inferiore costituito dal substrato lapideo. Il dominio è stato suddiviso verticalmente in tre strati che dall'alto verso il basso sono:

- Copertura (depositi recenti di esondazione);
- Acquifero principale (conoide del F. Bisenzio);
- Falde lenticolari profonde.

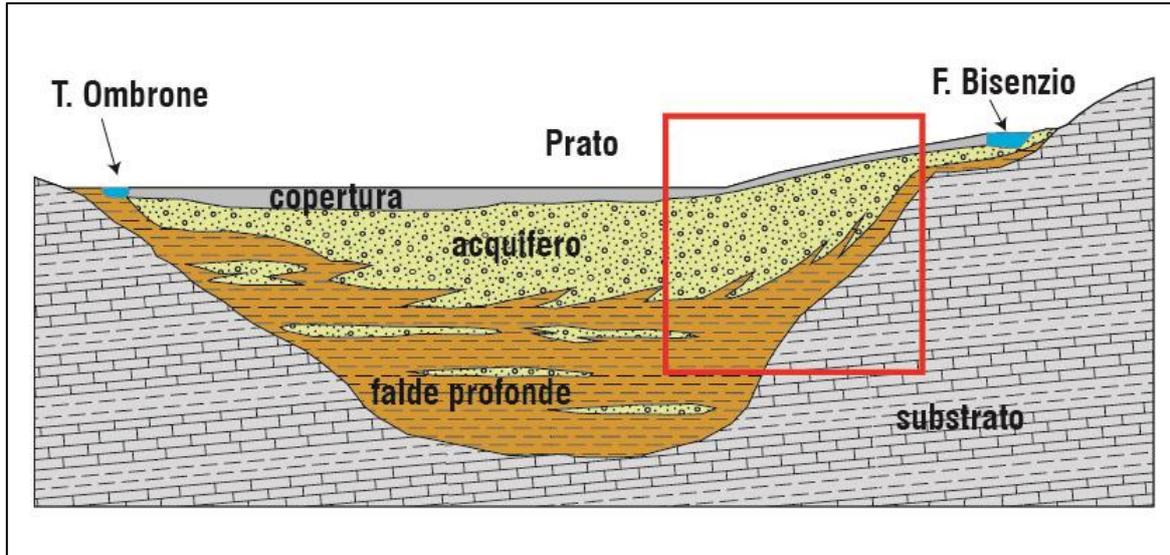


Figura 13 – schema del modello concettuale adottato (in rosso il settore compreso dal modello). Ridisegnato da Consumi et al. 2016)

L'area esaminata è costituita da una griglia di celle di dimensioni variabili che vanno da 100 x 100 m ai bordi fino a 12.5 x 12.5 m in corrispondenza dell'opera, per un totale di 4700 celle. L'area ha una dimensione totale di 3.2 x 2.5 km.

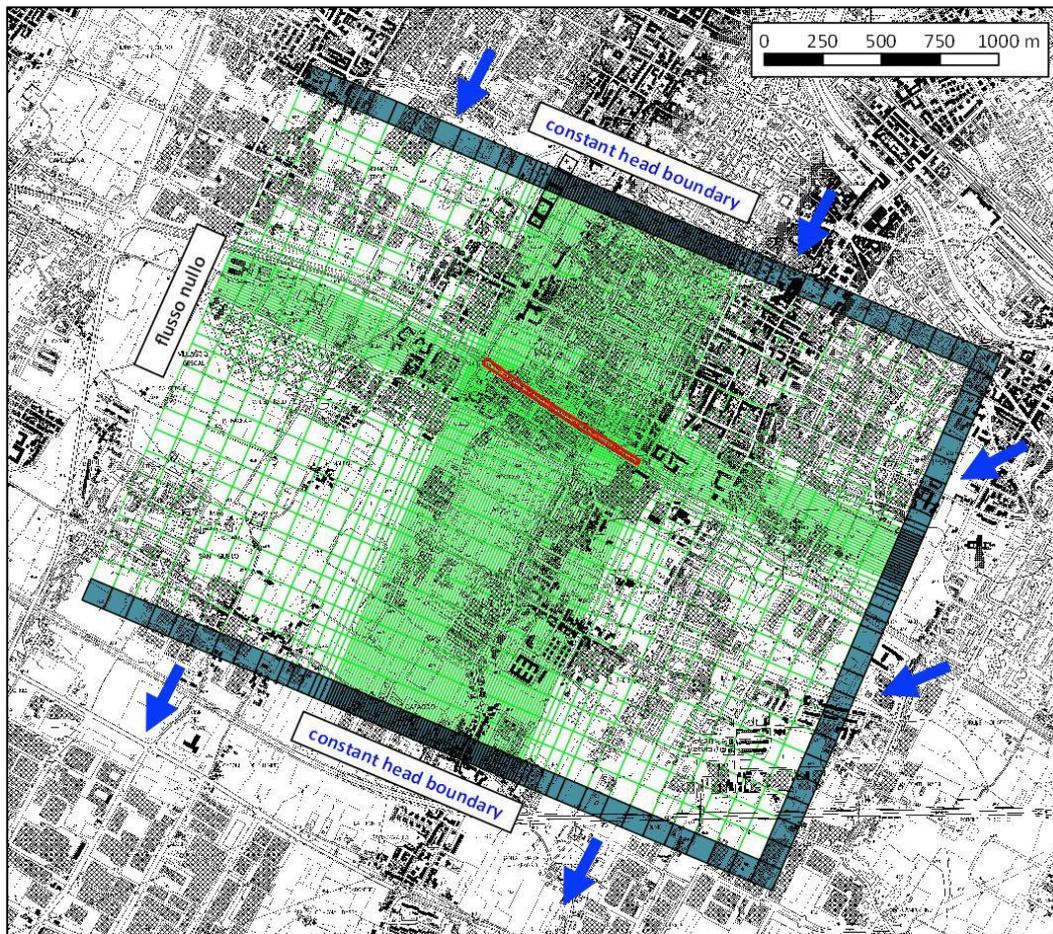


Figura 14 – griglia e condizioni al contorno del modello

Gli spessori e la geometria del contatto tra i diversi strati sono stati ricavati dal modello dell’Autorità di Bacino per le zone più lontane dall’opera, mentre nell’intorno dell’area di progetto sono state utilizzate le stratigrafie desunte dai vari sondaggi eseguiti (che peraltro non hanno apportato modifiche significative). Oltre ai tre strati, sono stati creati due layers fittizi allo scopo di simulare il comportamento dell’opera (layer “galleria” e layer “pali”, il primo corrispondente alla quota di fondo scavo per la realizzazione del solettone di fondazione che arriva a circa 10.00 m di profondità dal p.c., il secondo alla profondità raggiunta dai pali, circa 17.4 m dal p.c.). Per avere un ordine di grandezza degli spessori in gioco nell’area di interesse, il primo strato di copertura va da uno spessore di circa 4-5 m nell’intorno dell’area di progetto fino ad uno spessore di 15 metri nelle zone più meridionali. Il livello relativo all’acquifero principale invece va dai 35 agli oltre 50 m di spessore nell’area centro settentrionale del modello fino a 15-17 m al suo limite meridionale.

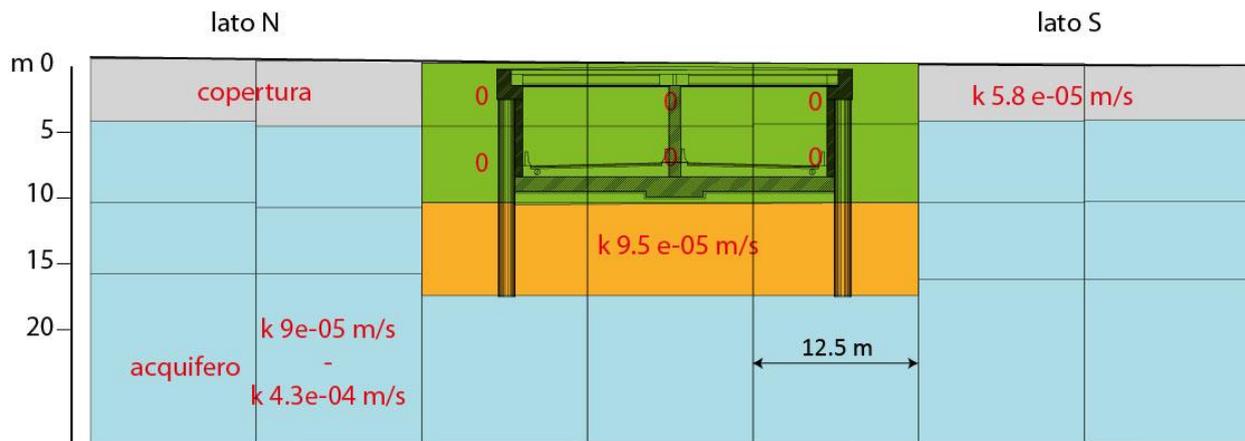
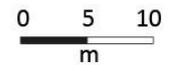
Ogni cella del modello è stata caratterizzata da una serie di proprietà idrauliche quali la permeabilità e i parametri di immagazzinamento. Le proprietà idrauliche sono state derivate dal precedente modello dell’Autorità di Bacino e opportunamente confrontate e modificate sulla base delle indagini eseguite. In particolare, il report Tecnoin del 12/2018 contiene prove Lefranc e Slug Test eseguite nei piezometri realizzati e i relativi valori di permeabilità. I risultati degli slug test sono stati ritenuti più rappresentativi rispetto alle prove Lefranc in quanto costituiscono una misura della conducibilità idraulica dell’acquifero nell’immediato intorno del piezometro e quindi caratterizzano un volume di terreno maggiormente rappresentativo rispetto alla prova Lefranc che fornisce un dato puntuale. I dati degli slug test sono risultati del tutto compatibili con i valori di conducibilità utilizzati nel modello dell’Adb e quindi, dove disponibili, si è scelto di utilizzarli per caratterizzare le celle del modello assegnate allo strato acquifero comprendenti i piezometri in cui sono state eseguite tali prove. I valori di permeabilità attribuiti ai vari orizzonti sono i seguenti:

- Copertura: $5.8 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Acquifero: da $9.0 \cdot 10^{-5}$ a $4.3 \cdot 10^{-4}$ m/s
- Depositi fluvio lacustri profondi (falde profonde): $8 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Il seguente schema mostra in sezione quanto contenuto in Figura 14: si possono notare la geometria delle celle che in senso verticale assumono lo spessore del layer a cui sono assegnate. Le celle verdi e arancioni sono quelle che nel modello vengono intersecate dall’opera e che nella modellazione allo stato di progetto sono state disattivate (valore 0, per simulare la presenza di una barriera impermeabile) o di cui è stato modificato il parametro permeabilità.

In via cautelativa, nelle modellazioni allo stato di progetto la barriera impermeabile che rappresenta la galleria è stata estesa in senso longitudinale fino a comprendere anche il sottopasso esistente in corrispondenza di Via Nenni, pur essendo costituito quest’ultimo, come rilevato dai disegni “as built” a disposizione, da muri prefabbricati laterali su fondazione superficiale e non su pali.

Sezione schematica del modello in corrispondenza dell'opera



Durante la simulazione in presenza dell'opera, le celle verdi sono state disattivate mentre quelle arancioni hanno permeabilità ridotta.

Figura 15 – sezione schematica passante per l'opera. Il layer relativo agli acquiferi profondi non è visualizzato perché a più alta profondità.

Al di sotto della quota di imposta della galleria (celle verdi di Figura 15) i pali hanno un interasse di 2 m e un'apertura pari a 80 cm e offrono solo una parziale resistenza al passaggio dell'acqua. A favore di sicurezza, le simulazioni sono state eseguite sia considerando come totalmente impermeabile anche l'orizzonte occupato dai pali, sia attribuendogli un valore intermedio. La valutazione della permeabilità da attribuire al layer "pali" cioè quello compreso tra la quota di imposta della galleria e la punta dei pali (17.4 m di profondità dal p.c.) è derivata nel modo seguente: la permeabilità nelle due direzioni orizzontali è stata calcolata come proporzionale alla superficie "libera" presente all'interno di ogni cella a partire dal valore attribuito al terreno naturale. La permeabilità verticale è stata invece ottenuta facendo riferimento al volume occupato dal palo nella medesima cella. I valori ottenuti sono: K_x e $K_y = 9.57 \cdot 10^{-5}$ m/s, $K_z = 2.4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

7 Modello di flusso

Il modello è stato impostato per simulare le condizioni di flusso stagionale per gli anni dal 2007 al 2014 utilizzando alcuni parametri di input dello studio dell'Autorità di Bacino, e per gli anni dal 2015 al 2018 ricostruendo le condizioni al contorno e i valori di ricarica e utilizzando i dati degli emungimenti aggiornati laddove disponibili. Nonostante la carenza di dati aggiornati, il nuovo periodo simulato ha permesso di verificare il flusso della falda in differenti condizioni stagionali, con diverse altezze della falda e con differenti valori di emungimento dei pozzi.

L'intero periodo coperto è stato suddiviso in "stress periods" trimestrali (32 per l'intervallo 2007-2014 e 16 per l'intervallo 2015-2018), all'interno dei quali le sollecitazioni sono rimaste costanti (con l'eccezione del constant head per il quale sono stati considerati valori differenti all'inizio e alla fine di ogni periodo di stress.)

Si è proceduto così all'aggregazione delle diverse variabili fin qui descritte e acquisite e alla determinazione delle *forzanti idrologiche* e delle *condizioni al contorno*, cioè tutti quei fattori che condizionano la circolazione idrica come ad esempio la ricarica, i prelievi dai pozzi, le interazioni falda-fiume e gli apporti dagli acquiferi adiacenti.

Condizioni al contorno

Il modello realizzato non ha limiti idrogeologici reali, si tratta di un semplice “ritaglio” all’interno di un contesto idrogeologico più ampio. Si è scelto quindi di attribuire un *constant head* lungo i margini NE e S della griglia di modellazione, definito per ogni *stress period* a partire dai livelli piezometrici disponibili per i vari periodi (in particolare si sono utilizzate le isofreatiche dell’anno 2015 e i livelli misurati nei piezometri Publiacqua disponibili dal 2015 al 2018; mentre il constant head per il periodo 2007-2014 è stato derivato da quello dell’Adb). Non è stato possibile attribuire tale condizione all’intero perimetro del modello a causa della distribuzione non omogenea dei dati di livello piezometrico; d’altra parte, la naturale conformazione della falda che possiede un gradiente di flusso impostato in direzione NE-SO, ha permesso di delimitare in modo abbastanza netto i segmenti a cui attribuire il flusso in ingresso e in uscita, impostando un flusso nullo lungo il margine Ovest dove si ha un generalizzato “appiattimento” della falda con scambi idrici trascurabili a fini della simulazione (Figura 14).

Ricarica zenitale

Mentre per il periodo 2007-2014 i valori di ricarica erano già a disposizione, per le annualità 2015-2018 la forzante idrologica della ricarica verticale è stata derivata dalle precipitazioni sfruttando relazioni tra pioggia e ricarica ottenute dalle precedenti modellazioni idrologiche.

Al fine di stimare la quantità di acqua che va ad alimentare la falda per ricarica zenitale abbiamo per prima cosa analizzato i valori attribuiti nel modello numerico dell’acquifero della piana di Prato realizzato dell’Autorità di Bacino. L’area è stata sostanzialmente classificata in base alla presenza di aree verdi o di aree urbanizzate: sono state quindi separate le celle in cui è preponderante la porzione urbanizzata (area cittadina e aree industriali) e quelle dove il tessuto urbano è più discontinuo o dove prevale il “verde”.

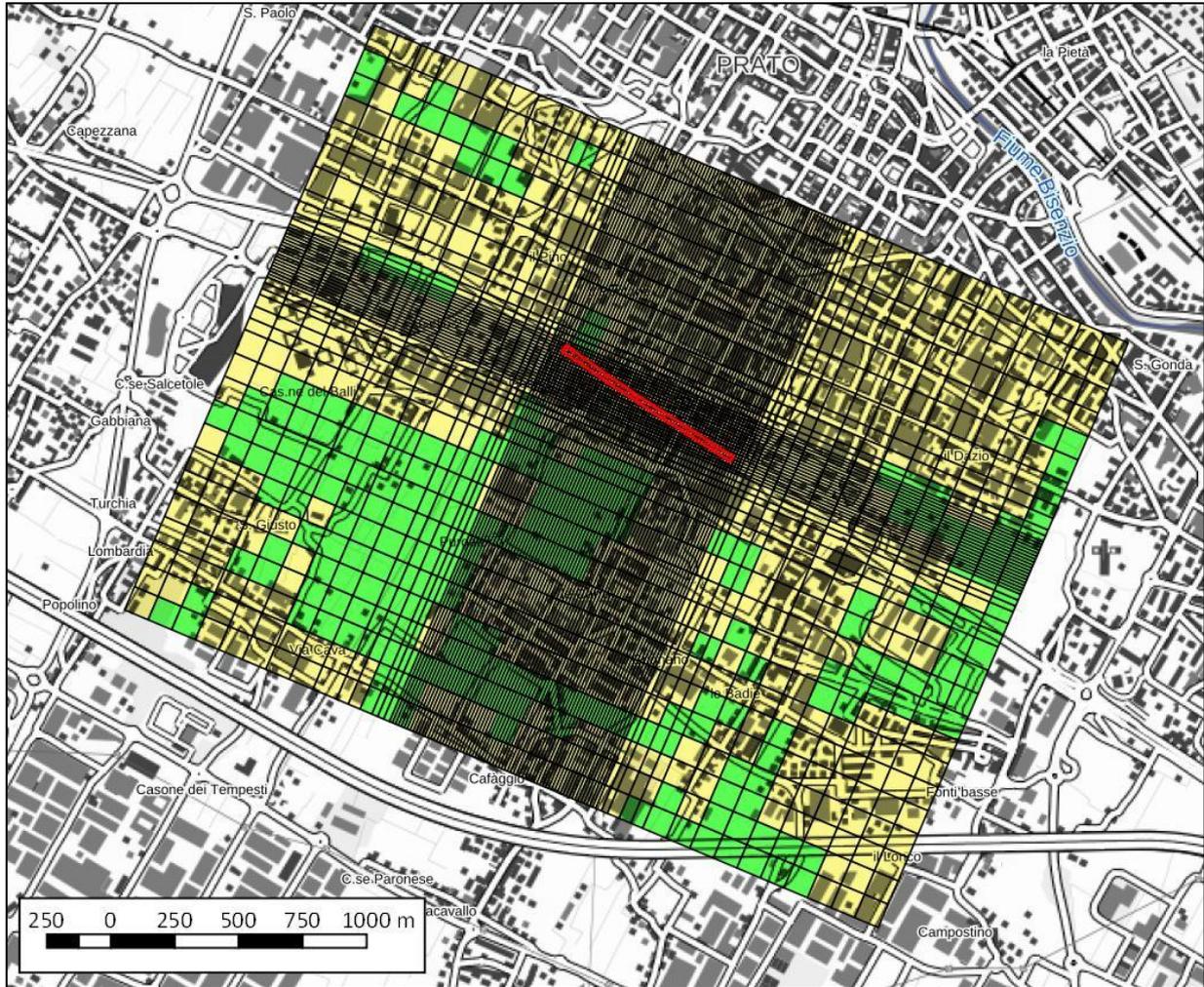


Figura 16 – differenziazione tra aree urbanizzate (in giallino) e aree a verde ai fini dell’attribuzione dei valori di ricarica.

Trattandosi di un’area in larga parte urbanizzata non è trascurabile il termine dovuto alle infiltrazioni dalle perdite delle reti. La ricarica zenitale è quindi composta da due termini: l’infiltrazione da precipitazioni, quella dovuta alle perdite di rete idrica ed, in misura molto minore, di quella fognaria. Anche nel nostro caso, il dominio del modello è stato inizialmente diviso in zone urbanizzate e zone non urbanizzate. Per quanto riguarda le prime, il contributo dell’infiltrazione da piogge è stato considerato pari a zero, a seguito della estesa impermeabilizzazione del suolo; in queste zone la ricarica è rappresentata unicamente dalle perdite della rete. Nelle aree non urbanizzate invece è stato valutato dove era presente la rete di distribuzione e dove era assente.

Confrontando il nostro modello con quello della piana di Prato è stato possibile associare una ricarica differente per le zone urbanizzate con presenza di rete di distribuzione (solo infiltrazione da perdite della rete), zone non urbanizzate con presenza di rete di distribuzione (infiltrazione da pioggia e da perdite della rete) e zone non urbanizzate con assenza di rete di distribuzione (solo infiltrazione da pioggia).

Il modello dell’Autorità di Bacino ha ottenuto il dato di infiltrazione efficace da pioggia, effettuando la cumulata trimestrale, la quale è stata regionalizzata sull’intero dominio di studio per mezzo dell’algoritmo kriging ordinario previa analisi geostatistica dei dati di base. Dalla pioggia lorda è stata quindi ricavata la pioggia efficace utilizzando il metodo del calcolo dell’evapotraspirazione potenziale di Thornthwaite.

Confrontando le precipitazioni nel periodo 2007-2014 e il valore di ricarica nel modello nello stesso periodo è stato possibile ottenere un coefficiente di infiltrazione nei quattro stress period per ogni anno analizzato (gennaio-marzo, aprile-giugno, luglio-settembre, ottobre-dicembre). La media dei coefficienti ottenuti nei quattro periodi trimestrali risulta molto attendibile, ottenendo una deviazione standard massima pari 0.07.

		coefficiente di infiltrazione	PIOGGIA mm	RICARICA mm/trimestre	RICARICA m/g
2015	gen-mar	0.287163323	195.8	56.22657866	0.00062474
	apr-giu	0.294160287	181.4	53.36067605	0.000592896
	lug-set	0.24768135	124.2	30.76202363	0.0003418
	ott-dic	0.259635392	222.2	57.69098401	0.000641011
2016	gen-mar	0.287163323	396.8	113.9464066	0.001266071
	apr-giu	0.294160287	215.4	63.36212581	0.000704024
	lug-set	0.24768135	131.2	32.49579308	0.000361064
	ott-dic	0.259635392	291.8	75.76160726	0.000841796
2017	gen-mar	0.287163323	244.8	70.29758149	0.000781084
	apr-giu	0.294160287	92.2	27.12157846	0.000301351
	lug-set	0.24768135	163	40.37206	0.000448578
	ott-dic	0.259635392	308.4	80.07155476	0.000889684
2018	gen-mar	0.287163323	369.4	106.0781316	0.001178646
	apr-giu	0.294160287	244.2	71.83394207	0.000798155
	lug-set	0.24768135	74.8	18.52656496	0.000205851
	ott-dic	0.259635392	238.6	61.94900443	0.000688322

Quindi, nelle celle ricadenti in territorio non urbanizzato e senza la presenza di reti di distribuzione, la ricarica associata è stata calcolata come prodotto tra le precipitazioni cumulate nei periodi di riferimento e il coefficiente di infiltrazione efficace ottenuto.

Per quanto riguarda la quantificazione dell'infiltrazione da perdite idriche, non avendo dati misurati nel periodo di riferimento (2015-2018), sono stati utilizzati i valori presenti nel modello dell'Autorità di Bacino, che per le aree urbanizzate, in tutto il periodo risultano costanti. Per le perdite idriche è stato applicato un coefficiente d'infiltrazione pari al 20%, mentre per il calcolo delle perdite da fognatura è stato applicata una percentuale dello 0.02%.

Prelievi

L'area pratese è caratterizzata dalla presenza di numerosi pozzi che attingono all'acquifero principale: alcuni (di cui non si conosce l'esatto numero e la portata emunta) sono pozzi privati, altri sono gestiti da Publiacqua e sono collegati in parte alla rete acquedottistica. Di questi ultimi è stato possibile ottenere la portata di emungimento su scala annuale per il periodo 2016-2017, mentre per gli altri pozzi conosciuti sono state applicate le portate inserite nel modello 2007-2014 dell'Autorità di Bacino. I prelievi più importanti (industriali e idropotabili) sono situati nel settore meridionale, fuori dall'area urbanizzata: è il motivo per il quale i coni di depressione più accentuati si trovano attualmente posizionati in zona Grignano- Le Badie.

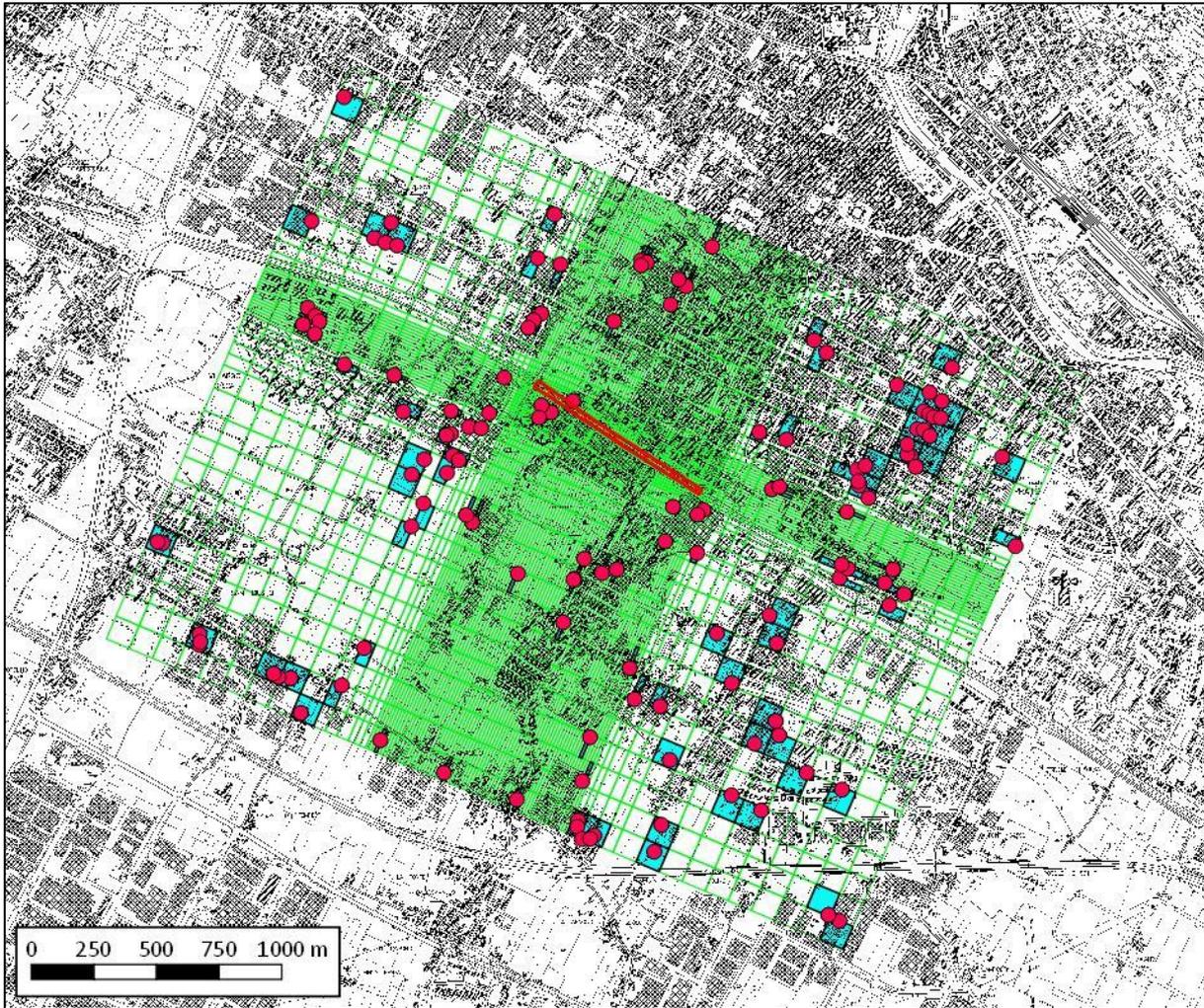


Figura 17 – pozzi di prelievo inseriti nel modello. In azzurro le celle interessate dagli emungimenti.

Una volta inseriti i dati di portata emunta per ogni pozzo e per ogni stress period, sono state create le celle interessate dagli emungimenti all'interno della griglia. In questo modo è stato possibile simulare il flusso di falda in condizioni di emungimento attivo.

8 Simulazione e verifica del modello

Sulla base di quanto esposto è stato ricostruito il modello in regime stazionario per il periodo 2007-2014 e implementato quello per il 2015-2018. All'interno di ogni *stress period* trimestrale sono stati variati i dati di input verificando che le quote piezometriche simulate corrispondessero a quelle misurate realmente nei punti in cui avevamo a disposizione i dati.

La simulazione consiste quindi nella soluzione delle equazioni del flusso per ogni cella del sistema (con esclusione delle celle non attive) e per l'intero periodo considerato. Al termine del calcolo, viene prodotta una piezometria risultante per ogni *stress period*.

La fase di taratura e calibratura ha riguardato essenzialmente i valori del "constant head" e di ricarica in quanto gli altri dati di input come i valori di permeabilità erano stati già validati nel modello dell'Autorità di Bacino.

I target di calibrazione presenti nell'area sono rappresentati dalle stazioni della rete piezometrica monitorate da Publiacqua. Ulteriori misure usate come target derivano dalle piezometrie più recenti rese disponibili dal CNR per giugno e settembre 2015, rappresentative del periodo di morbida e di magra. I punti a disposizione all'interno del modello sono stati solamente tre, di cui due (Malfante1 e Macelli) posizionati in prossimità dell'opera. Mentre per i piezometri "Macelli" e "Malfante1" si osserva una significativa corrispondenza tra valore osservato e valore simulato, per il piezometro "Badie (PTN43)" il valore simulato è di circa 4 metri inferiore rispetto a quello misurato. Tale differenza si osserva anche confrontando le altezze piezometriche di giugno e settembre 2015 pubblicate nello "Studio conoscitivo dell'acquifero di Prato, indagini idrogeologiche e geochimico-isotopiche 2015-2016" a cura di West Systems srl, PIN srl e IGG-CNR. Il comportamento anomalo di questo piezometro è stato osservato durante le indagini con perturbazione idrodinamica eseguite nell'ambito del medesimo studio: *"tenuto conto della profondità del piezometro, della stratigrafia da questo attraversata e della sua ubicazione, la spiegazione di questo anomalo comportamento rispetto ai pozzi vicini è verosimilmente da ricercare in un'inefficienza idraulica dell'opera maturata nel tempo (si ricorda infatti che l'opera è antecedente gli anni settanta e che da molti anni non è interessata da operazioni di spurgo)"*.

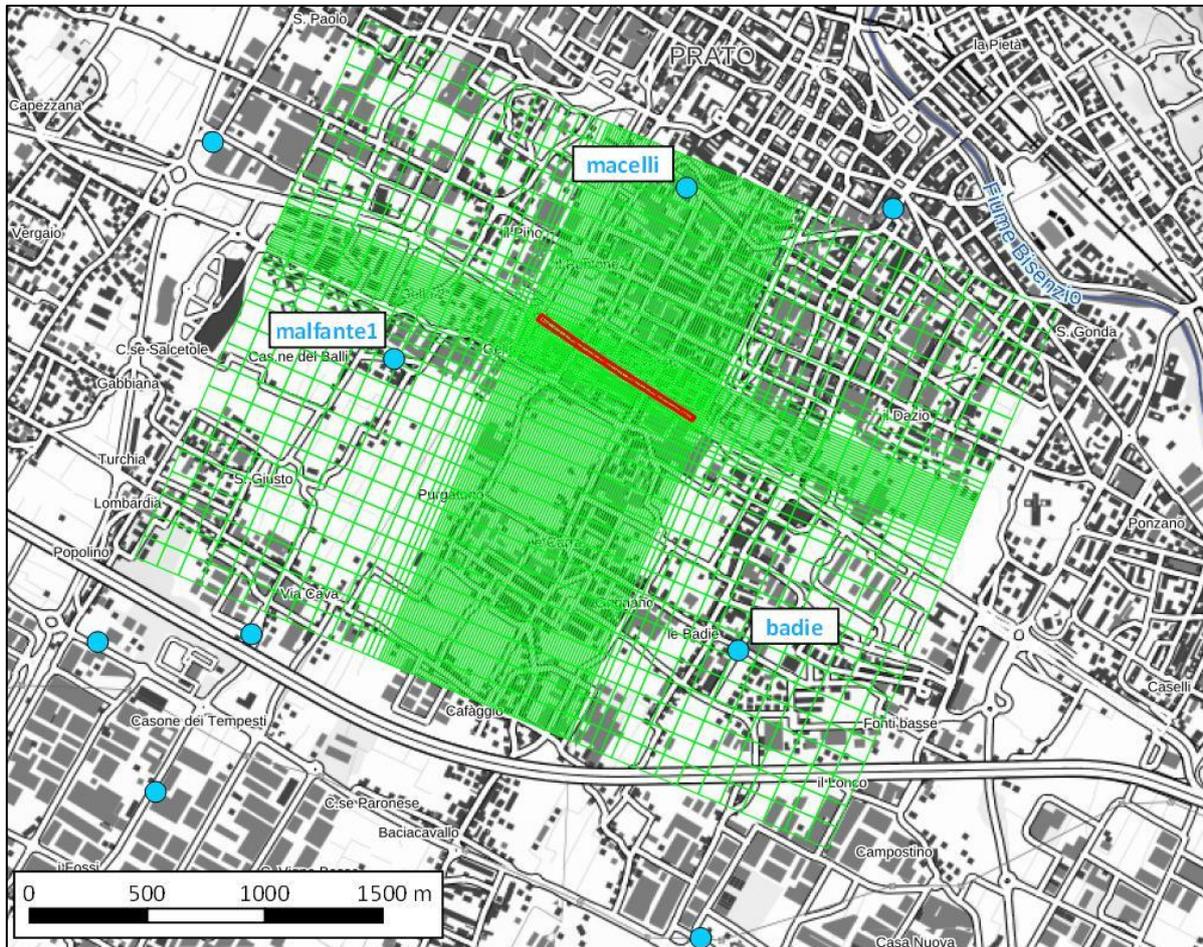


Figura 18 – posizione dei punti di controllo piezometrico.

Per il processo di verifica si è scelto quindi di utilizzare solamente i piezometri Malfante 1 e Macelli in quanto ubicati in aree solo in minima parte affette da perturbazioni e quindi più rappresentativi di una simulazione in moto stazionario come quella eseguita.

In ogni caso, la discrepanza individuata presso il piezometro Badie non incide sui risultati di interesse per questo approfondimento in quanto abbastanza lontano dalla zona di progetto.

Nel complesso, il fit del modello stazionario appare soddisfacente. Di seguito le tabelle riepilogative con i principali dati statistici:

modello 2007-2014	modello 2015-2018
Residual count: 28	Residual count, 16
Mean: 0.0973763465679	Mean, -0.496500253656
Standard dev.: 2.32446602043	Sd, 1.16877074301
Min: -4.0781669617	Min, -3.6059150695
Max: 6.8703327178	Max, 1.3252906799
Absolute Residual Mean: 1.76413066047	Absolute Residual Mean, 0.962401390069
Standard Error of the Estimate: 0.447343694206	Standard Error of the Estimate, 0.301775308215
Residual RMS: 0.0973763465679	Residual RMS, 0.496500253656
Normalized RMS: 0.0973763465679	Normalized RMS, 0.496500253656
Pearson Correlation Coefficient: 0.00427089217896	Pearson Correlation Coefficient, 0.0596755134458

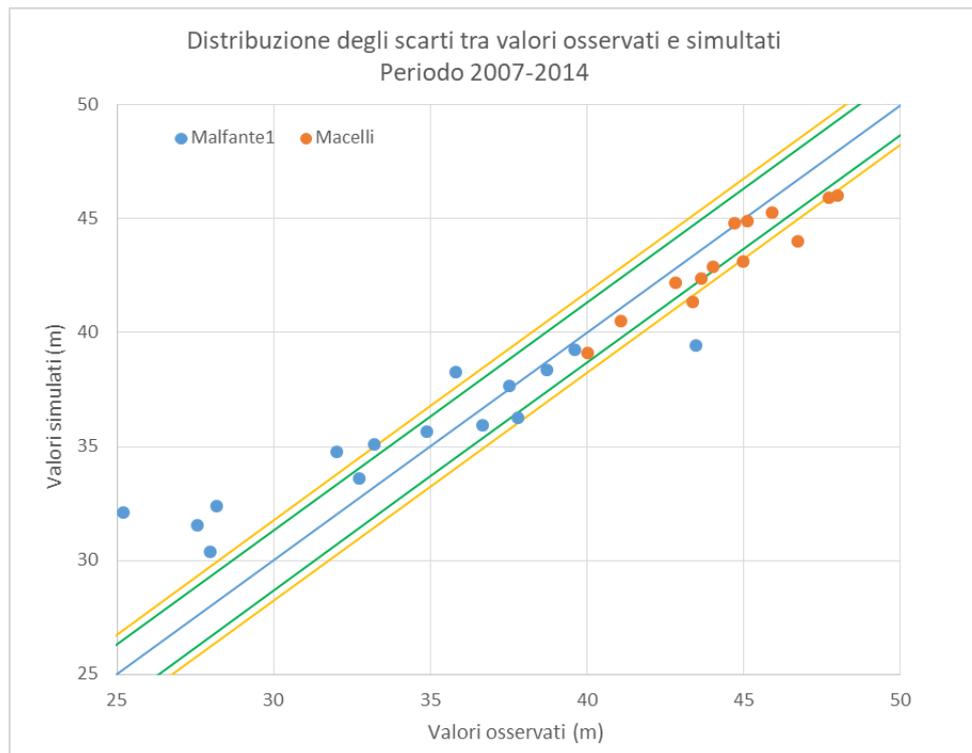


Figura 19 – grafico valori osservati/valori simulati per il periodo 2007-2014

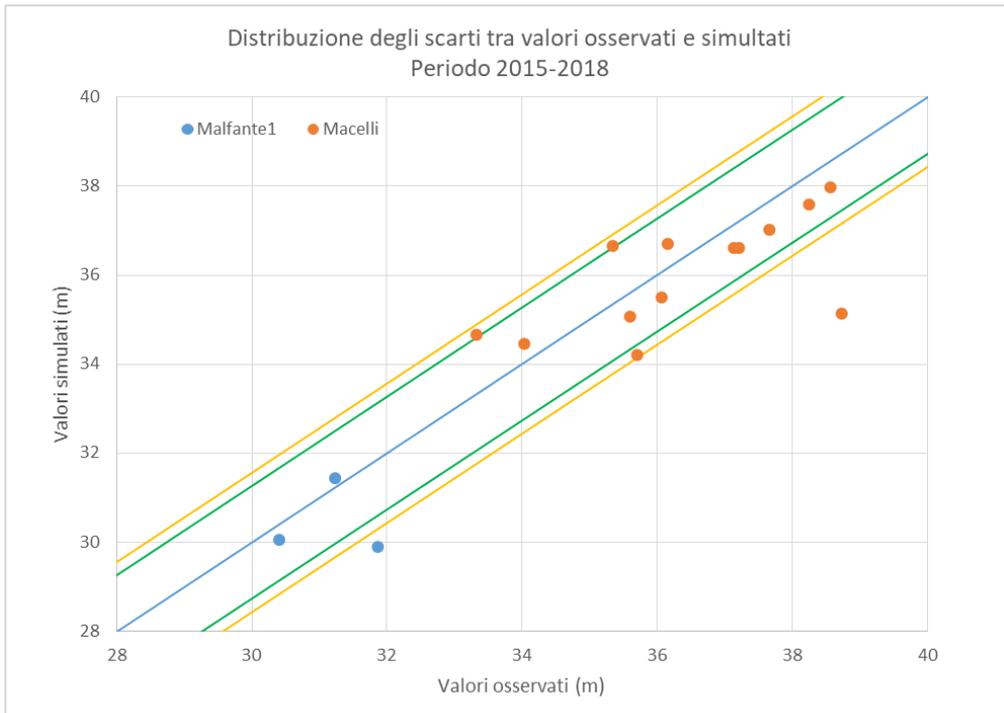


Figura 20 - grafico valori osservati/valori simulati per il periodo 2015-2018

9 Risultati del modello

Sono state prodotte diverse simulazioni in relazione a svariati scenari, sia riguardo allo stato attuale che allo stato di progetto, cercando di simulare anche le situazioni maggiormente critiche.

La direzione di flusso naturale della falda è impostata in direzione ortogonale allo sviluppo dell'opera che diventa in questo modo una barriera impermeabile (almeno fino alla quota di base della galleria). Si configura perciò come un ostacolo al normale flusso dell'acqua, determinando un innalzamento del livello lungo il fronte nord e un conseguente abbassamento lungo quello sud.

Si riportano alcuni risultati selezionati dalle elaborazioni sui 32 stress periods del 2007-2014 e sui 16 riguardanti il periodo 2015-2018. In più, è stata eseguita una simulazione (non riferita ad uno specifico intervallo temporale) dell'interferenza dell'opera con una soggiacenza della falda di circa 4.5 m (considerata la quota massima raggiungibile nello studio idrogeologico presente nel progetto di fattibilità tecnica), introducendo come variabili l'assenza di emungimenti e la totale impermeabilità della fascia occupata dai pali sotto la nuova galleria. I risultati sono rappresentati lungo una sezione tipo passante per l'opera (nella fattispecie la sezione X-X) e anche in planimetria (riportata in allegato) dove è possibile apprezzare la distribuzione spaziale delle variazioni di livello piezometrico indotte dall'opera e l'estensione della fascia interessata dalla perturbazione.

Ad ogni modo, il modello permette di interrogare una qualsiasi cella per ognuno dei 32+16 stress periods simulati, potendo verificare la quota della falda in quel punto in condizioni attuali e di progetto.

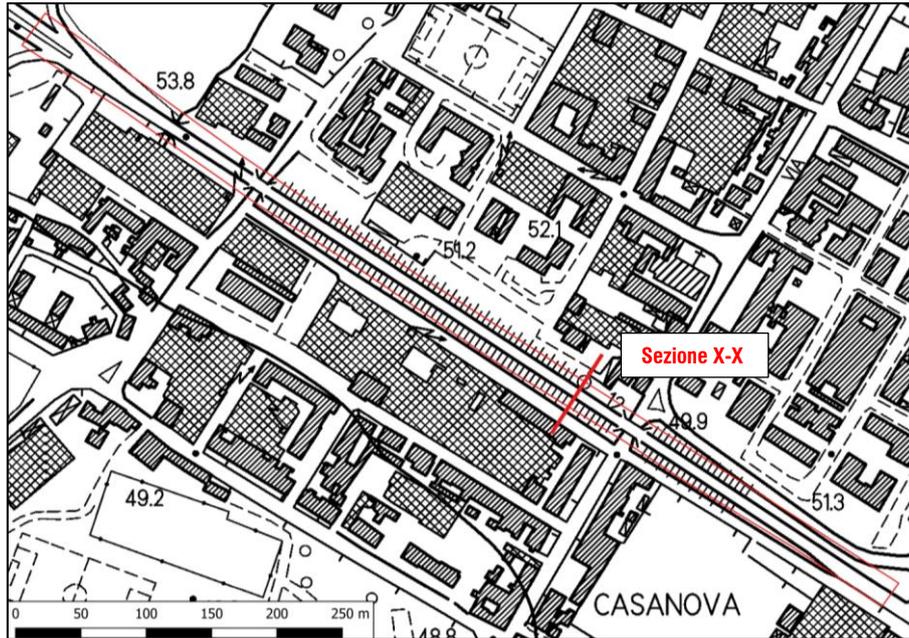


Figura 21 – ubicazione della sezione utilizzata per rappresentare l'interferenza dell'opera.

2007-2014

Il periodo 2007-2014 è caratterizzato da una notevole variabilità climatica, con alternanza di periodi piovosi e di siccità in un contesto in cui si assiste ad una diminuzione degli emungimenti industriali ma anche ad un aumento del prelievo acquedottistico per far fronte ai periodi siccitosi. Tra gli stress periods simulati, quello relativo all'Aprile-Maggio-Giugno 2014 è rappresentativo di livelli piezometrici piuttosto elevati in tutta la zona ed è stato scelto per eseguire la simulazione dell'interferenza dell'opera. In tale periodo, risulta una soggiacenza simulata (stato ante operam) nell'intorno dell'area di interesse pari a 11.40 m.

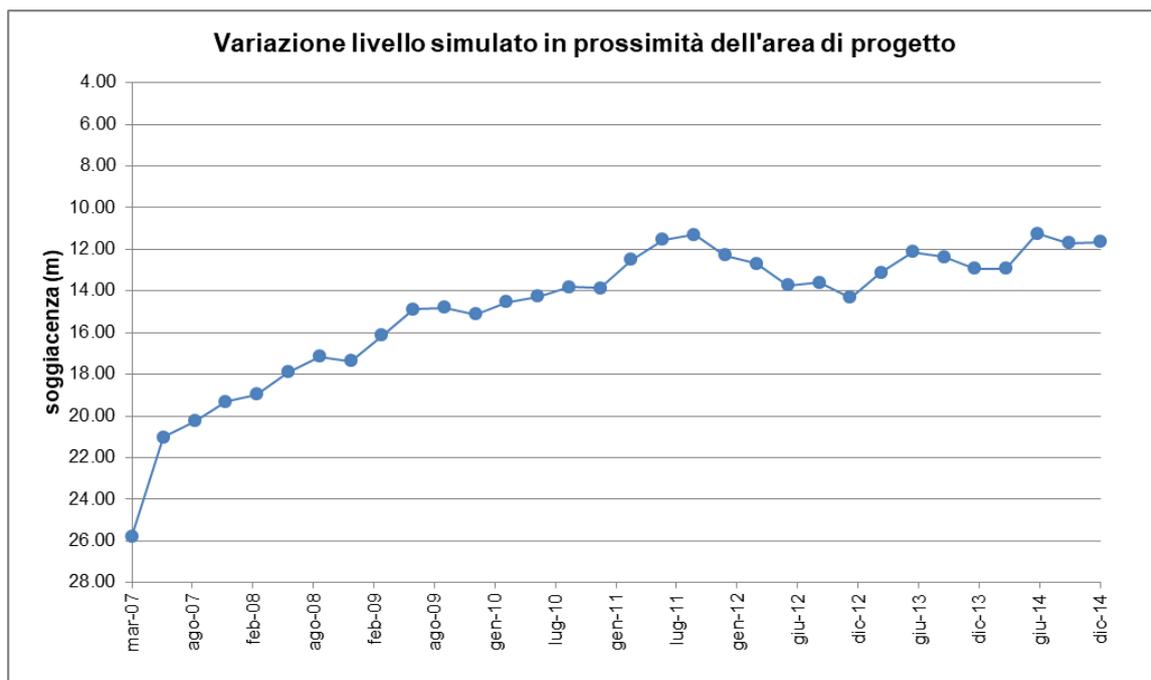


Figura 22 - andamento dei valori di soggiacenza simulati nel periodo 2007-2014 (stato ante-operam). Si è fatto riferimento ad una cella situato a metà dello sviluppo dell'area di progetto.

cella PKUID 2855	soggiacenza (m)											
	mar-07	giu-07	set-07	dic-07	mar-08	giu-08	set-08	dic-08	mar-09	giu-09	set-09	dic-09
	25.79	21.04	20.26	19.31	18.96	17.91	17.16	17.37	16.14	14.89	14.81	15.13
	mar-10	giu-10	set-10	dic-10	mar-11	giu-11	set-11	dic-11	mar-12	giu-12	set-12	dic-12
	14.53	14.27	13.80	13.86	12.50	11.55	11.29	12.28	12.70	13.72	13.59	14.33
	mar-13	giu-13	set-13	dic-13	mar-14	giu-14	set-14	dic-14				
	13.13	12.13	12.37	12.92	12.93	11.25	11.70	11.66				

Figura 23 - i valori del grafico precedente riportati in forma tabellare

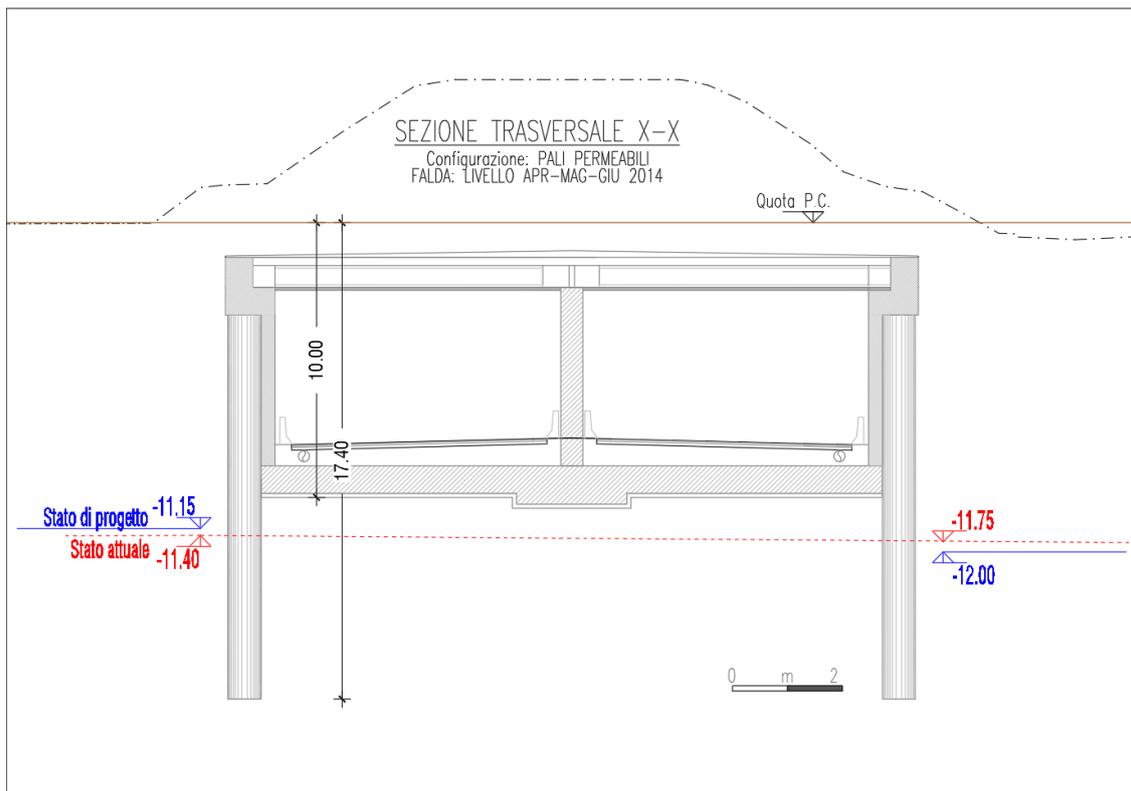


Figura 24 – simulazione interferenza lungo la sezione X-X con le condizioni relative al trimestre apr-mag-giu 2014.

Lungo la sezione X-X, l'opera produce un innalzamento di 0,25 m lungo il lato Nord e un eguale abbassamento lungo il lato sud (Figura 24). Si è osservato che, alle medesime condizioni, ma considerando i pali secanti (quindi una barriera totalmente impermeabile), tali valori subiscono un incremento di circa 20 cm.

2015-2018

Il periodo 2015-2018 è caratterizzato invece da livelli piezometrici più bassi e la soggiacenza nell'area di progetto è maggiore della profondità raggiunta dall'opera sotterranea (a partire da 17.5 m nel giugno 2015, arrivando a oltre 19 m nel dicembre 2018). L'unica fonte di incertezza relativa a questo periodo è la mancata disponibilità, per i pozzi considerati, delle portate di emungimento per il 2015 e il 2018. Per far fronte a questa mancanza di dati, le portate 2015 sono state assunte pari a quelle del 2016 mentre le portate 2018 sono state assunte uguali a quelle del 2017. La considerevole differenza di soggiacenza simulata tra dicembre 2014 e fine marzo 2015 è l'effetto della notevole differenza nei valori del *constant head* lungo il lato nord tra l'ultimo stress period del modello Adb e quello iniziale della modellazione 2015-2018. Nonostante questo, già a partire dal secondo trimestre del 2015 i valori sono molto ben allineati con le piezometrie disponibili.

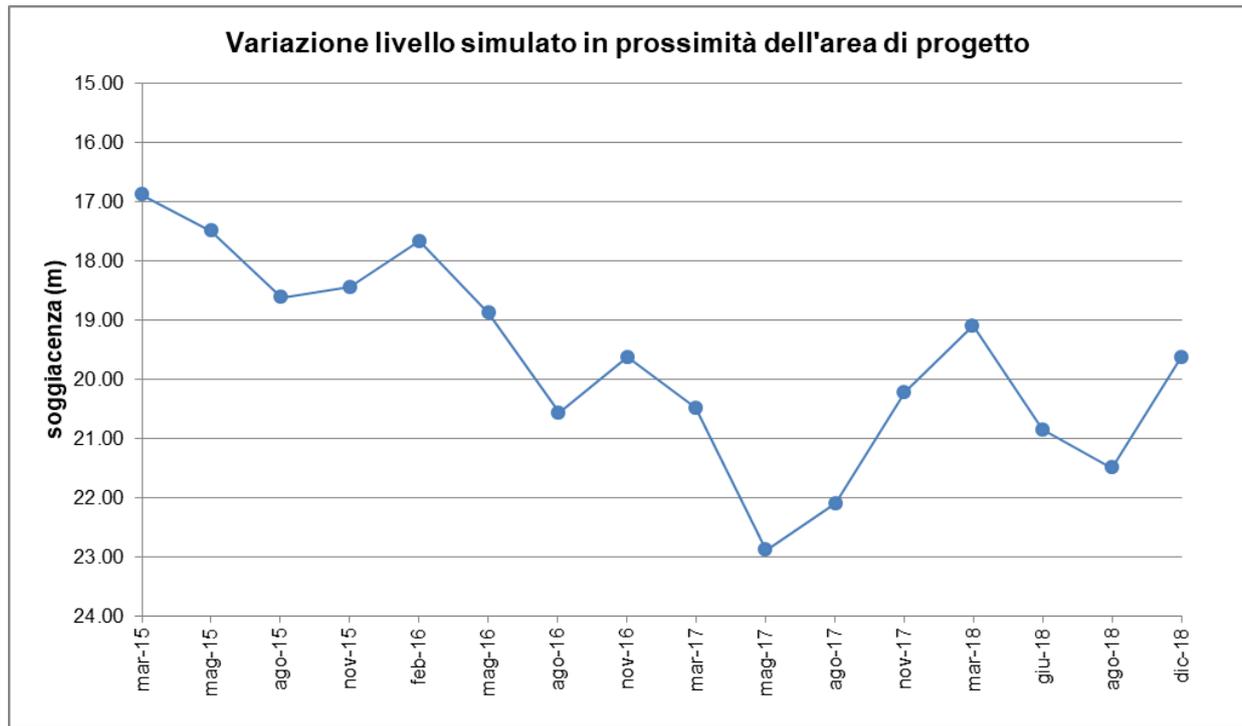


Figura 25 – andamento dei valori di soggiacenza simulati nel periodo 2015-2018 (stato ante-operam). Si è fatto riferimento ad una cella situato a metà dello sviluppo dell'area di progetto.

cella PKUID 2855	soggiacenza (m)							
	mar-15	giu-15	set-15	dic-15	mar-16	giu-16	set-16	dic-16
	16.88	17.49	18.62	18.44	17.67	18.88	20.57	19.63
	mar-17	giu-17	set-17	dic-17	mar-18	giu-18	set-18	dic-18
	20.48	22.88	22.10	20.22	19.10	20.85	21.50	19.63

Figura 26 – i valori del grafico precedente riportati in forma tabellare

Simulazione con livello massimo ipotizzabile della falda

Allo scopo di verificare il comportamento dell'opera nello scenario peggiore possibile, sono state ricreate nuove condizioni al contorno in modo da avere una soggiacenza quanto più vicina possibile a quella massima ipotizzata, pari a circa 4.5 m, coincidente con lo stato della falda antecedente allo sviluppo industriale degli anni '60 del secolo scorso.

A partire da questa condizione di partenza sono stati simulati due scenari dello stato di progetto: uno in cui l'opera è stata considerata totalmente impermeabile (pali secanti anche al di sotto del piano di imposta della galleria), l'altro in cui è stato considerato l'effetto dell'apertura dei pali (vedi punto 6 - Modello concettuale).

All'interno di ognuno dei due scenari è stato verificato anche l'effetto dei pompaggi (con i valori aggiornati all'ultimo periodo disponibile).

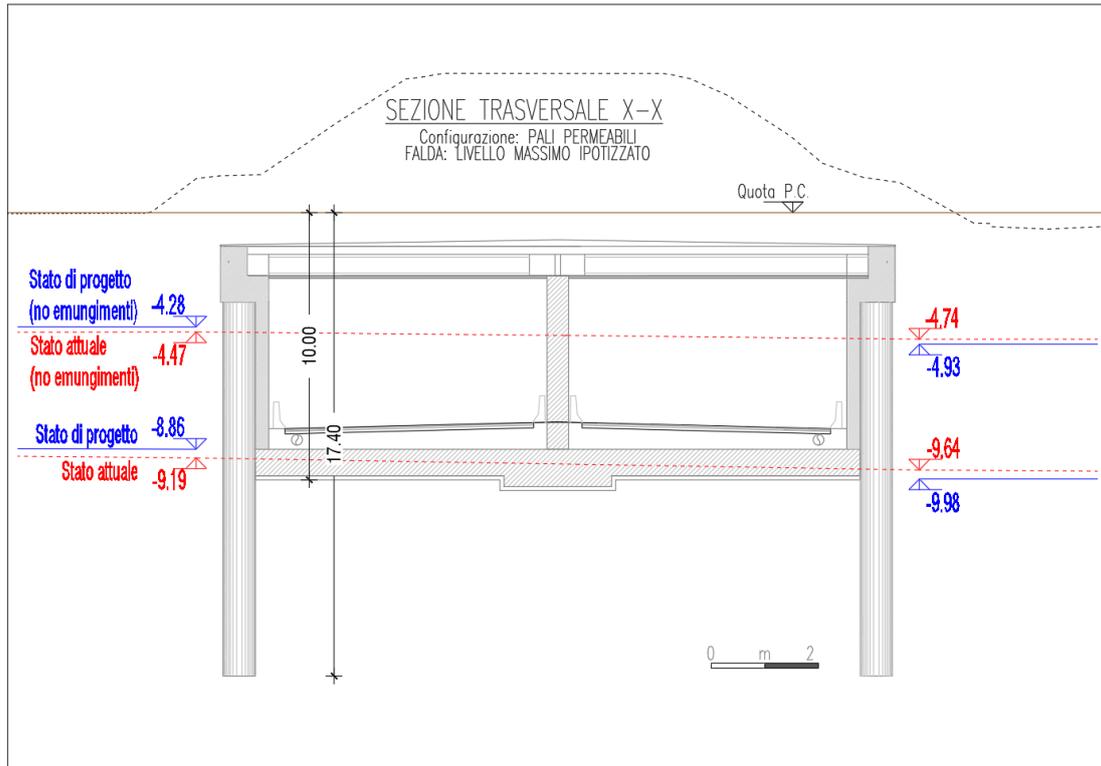


Figura 27 - simulazione interferenza in condizioni di soggiacenza minima ipotizzabile, con apertura tra i pali.

Sempre lungo la sezione X-X si osserva che con i pali secanti si ottiene un innalzamento della falda di 0.32 m senza l'influenza degli emungimenti che sale a 0.54 m considerando l'effetto dei pompaggi. Considerando invece l'apertura tra i pali sotto la galleria, risultano valori di 0.19 m senza emungimenti che salgono fino a 0.33 m con i pozzi attivi.

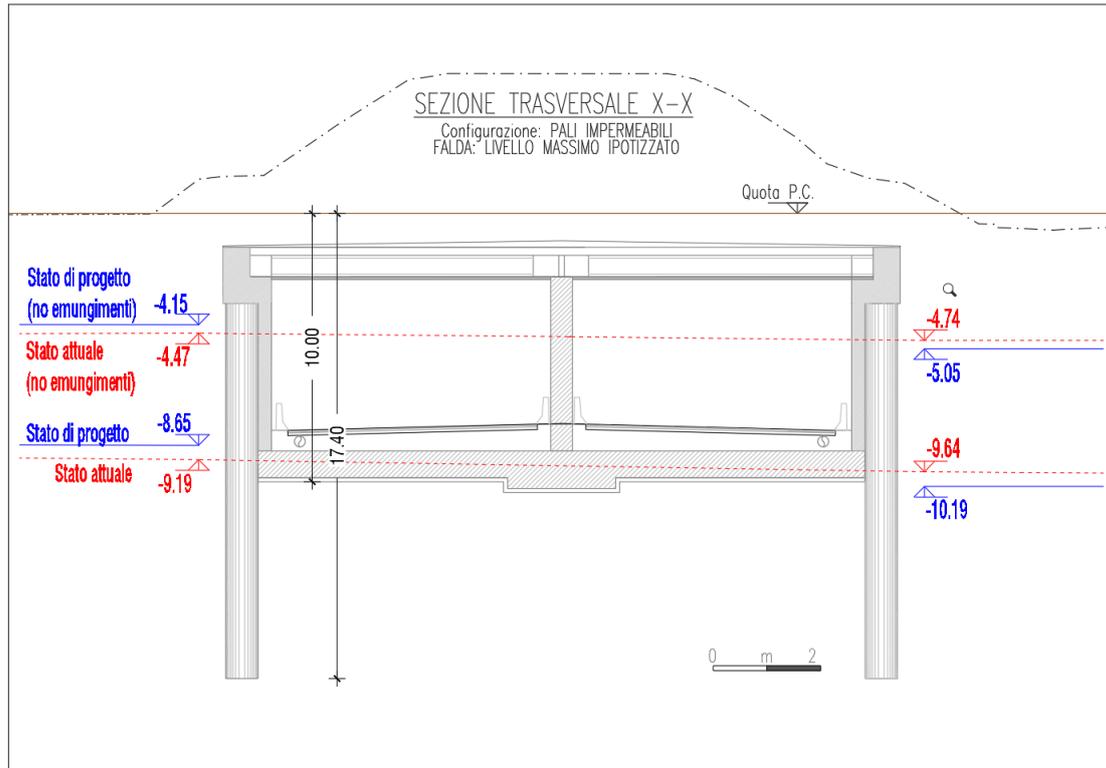


Figura 28 - simulazione interferenza in condizioni di soggiacenza minima ipotizzabile, con pali secanti.

Quest'ultimo gruppo di simulazioni è sicuramente rappresentativo delle condizioni più critiche che potrebbero presentarsi. L'effetto drenante derivante dall'apertura tra i pali, che permette un flusso meno disturbato della falda, è quindi da ritenersi una buona soluzione che consente di minimizzare l'effetto barriera da parte dell'opera.

Come peraltro facilmente intuibile, si è osservato che l'entità di queste variazioni dipende dal gradiente posseduto dalla falda: più questo è alto, maggiore sarà l'interferenza del manufatto. È stato anche verificato che il gradiente è controllato localmente soprattutto dall'entità dei pompaggi che sono in grado di determinare la formazione di coni di depressione più o meno accentuati. Eseguendo le simulazioni con pozzi inattivi il gradiente diminuisce e si riducono i valori dell'innalzamento a nord e dell'abbassamento a sud dell'opera, con una riduzione nell'estensione della fascia soggetta a perturbazione.

Di seguito una tabella riepilogativa degli scenari descritti precedentemente, questa volta contenente i valori massimi riscontrabili nell'area indagata.

scenario simulato	sogg. falda STATO ATTUALE (m)		sogg. falda STATO DI PROGETTO (m)		INNALZAMENTO MASSIMO ATTESO con emungimento	INNALZAMENTO MASSIMO ATTESO senza emungimento
	con emungimento	senza emungimento	con emungimento	senza emungimento		
Apr-Mag-Giu 2014	11.81		11.55		0.26	
falda massima ipotizzabile (apertura tra i pali)	9.89	4.21	9.56	3.99	0.33	0.22
falda massima ipotizzabile (pali secanti)	9.86	4.26	9.3	3.92	0.56	0.34

In conclusione si può affermare che l'opera (come risulta dal progetto di fattibilità tecnica) consente il normale deflusso delle acque di falda introducendo un disturbo che in ogni caso non supererebbe i 50-60 cm di innalzamento della falda nelle condizioni al momento ipotizzabili. Inoltre come bene visibile nelle planimetrie allegate, l'estensione della fascia in cui si ha un risentimento apprezzabile non va, nel peggiore dei casi, oltre i 150-160 m rispetto all'asse del tracciato.

10 Allegati grafici – Mappe della soggiacenza simulata per i vari scenari di progetto

SIMULAZIONE SP30 Aprile-Maggio-Giungo 2014

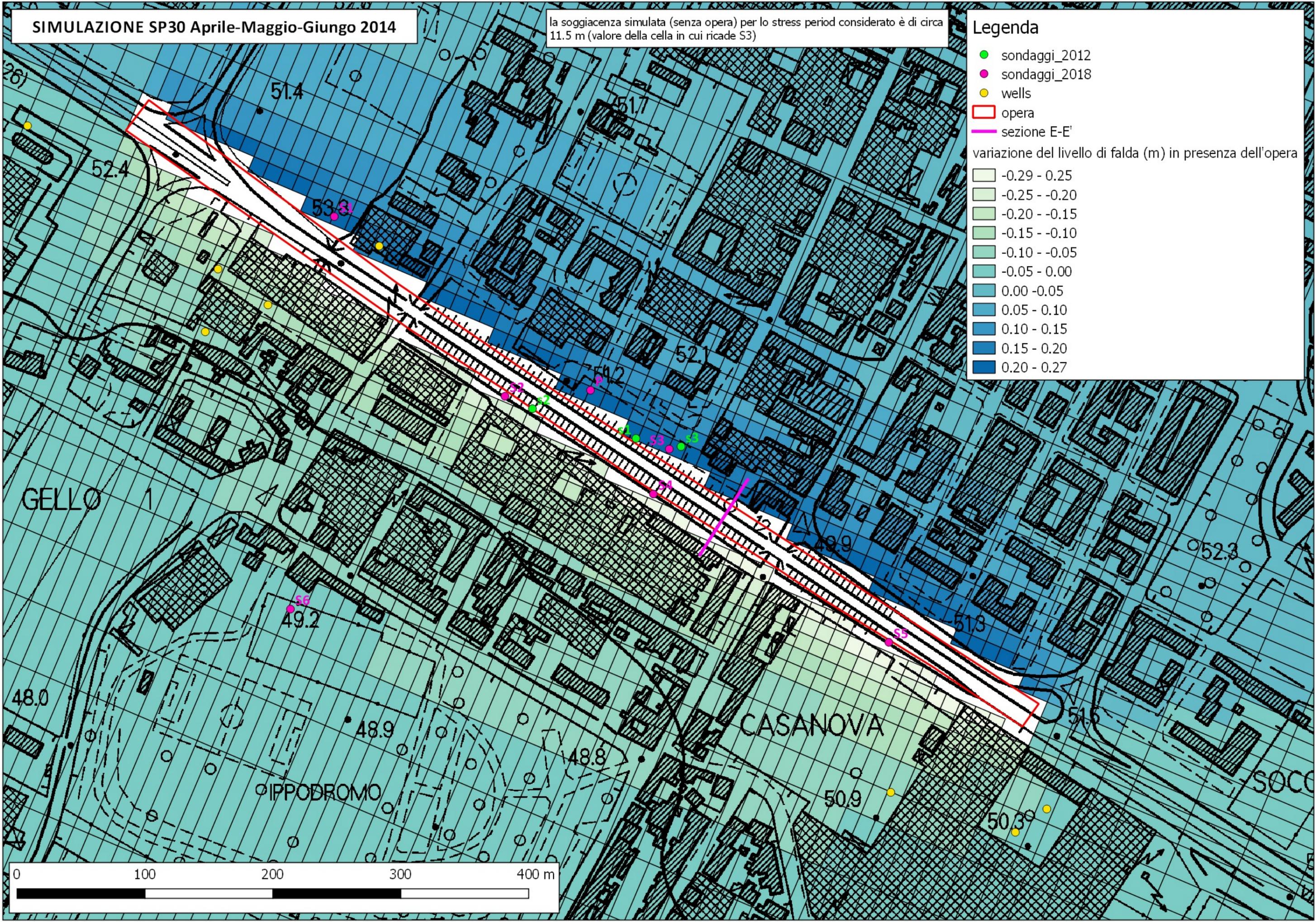
la soggiacenza simulata (senza opera) per lo stress period considerato è di circa 11.5 m (valore della cella in cui ricade S3)

Legenda

- sondaggi_2012
- sondaggi_2018
- wells
- ▭ opera
- ▬ sezione E-E'

variazione del livello di falda (m) in presenza dell'opera

- -0.29 - 0.25
- -0.25 - -0.20
- -0.20 - -0.15
- -0.15 - -0.10
- -0.10 - -0.05
- -0.05 - 0.00
- 0.00 - 0.05
- 0.05 - 0.10
- 0.10 - 0.15
- 0.15 - 0.20
- 0.20 - 0.27



SIMULAZIONE SP30 Aprile-Maggio-Giugno 2014
PALI SECANTI - CON EMUNGIMENTI

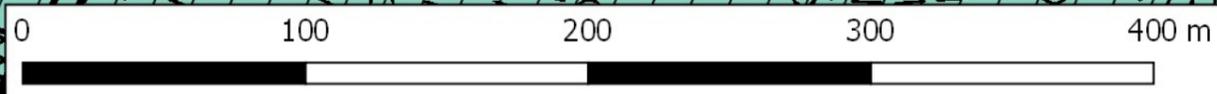
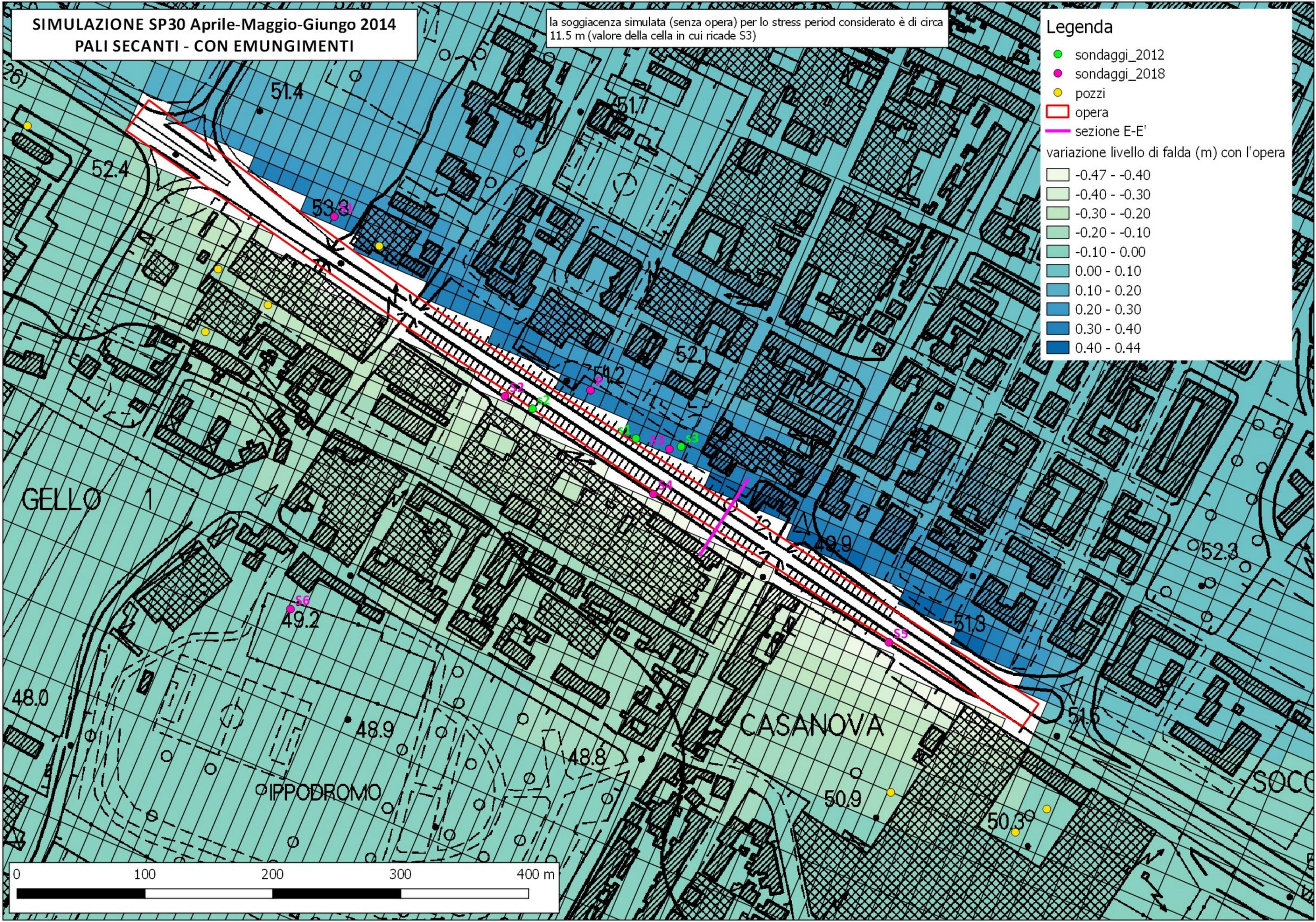
la soggiacenza simulata (senza opera) per lo stress period considerato è di circa 11.5 m (valore della cella in cui ricade S3)

Legenda

- sondaggi_2012
- sondaggi_2018
- pozzi
- ▭ opera
- sezione E-E'

variazione livello di falda (m) con l'opera

□	-0.47 - -0.40
□	-0.40 - -0.30
□	-0.30 - -0.20
□	-0.20 - -0.10
□	-0.10 - 0.00
□	0.00 - 0.10
□	0.10 - 0.20
□	0.20 - 0.30
□	0.30 - 0.40
□	0.40 - 0.44



**SIMULAZIONE FALDA MASSIMA IPOTIZZABILE
CON APERTURA TRA I PALI E SENZA EMUNGIMENTI**

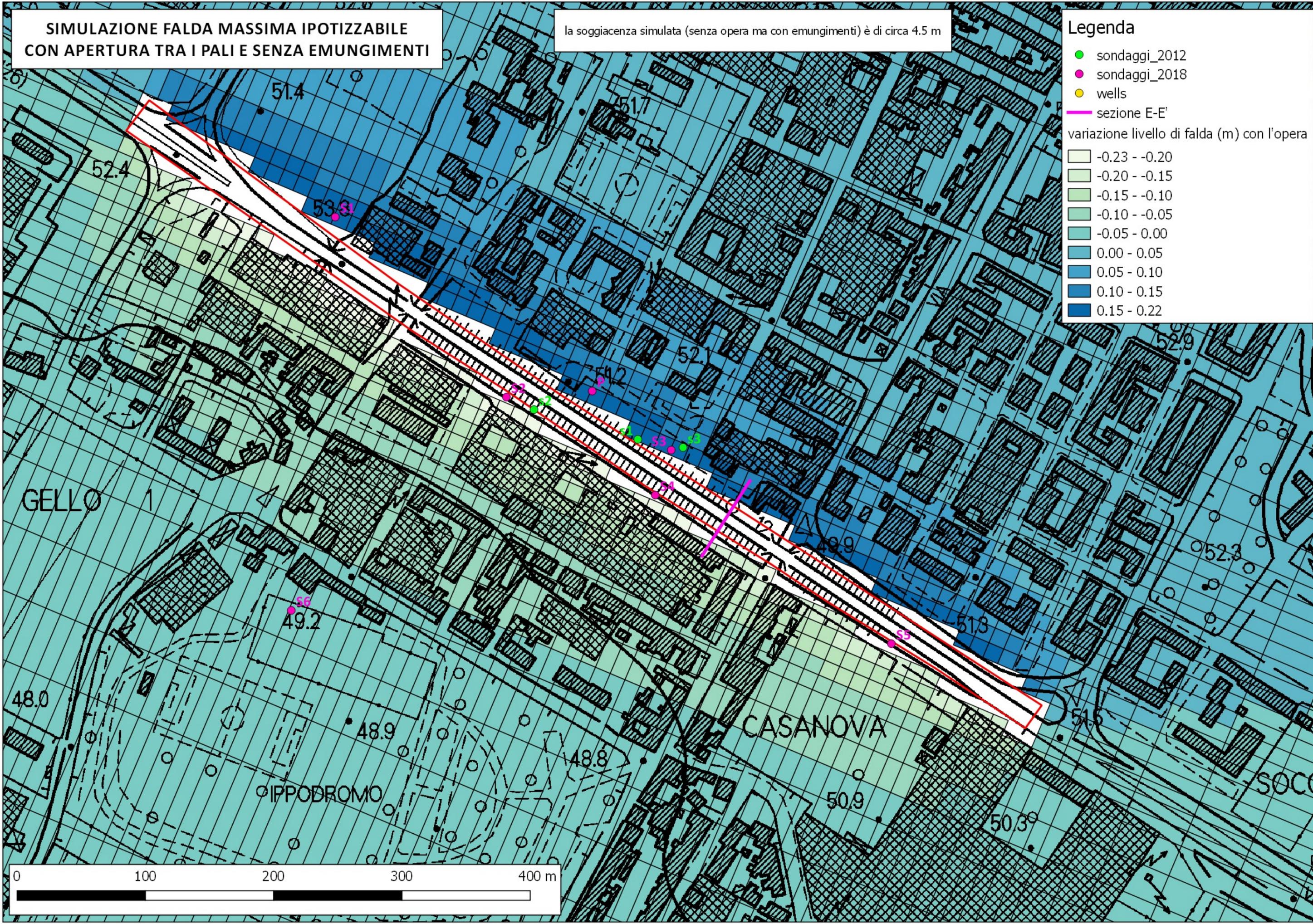
la soggiacenza simulata (senza opera ma con emungimenti) è di circa 4.5 m

Legenda

- sondaggi_2012
- sondaggi_2018
- wells
- sezione E-E'

variazione livello di falda (m) con l'opera

- 0.23 - -0.20
- 0.20 - -0.15
- 0.15 - -0.10
- 0.10 - -0.05
- 0.05 - 0.00
- 0.00 - 0.05
- 0.05 - 0.10
- 0.10 - 0.15
- 0.15 - 0.22



**SIMULAZIONE FALDA MASSIMA IPOTIZZABILE
CON APERTURA TRA I PALI E CON EMUNGIMENTI**

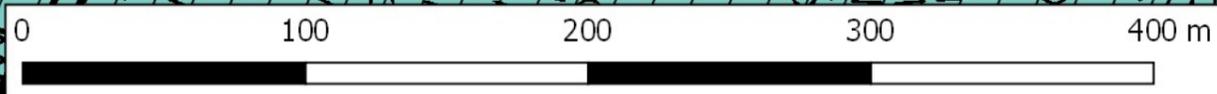
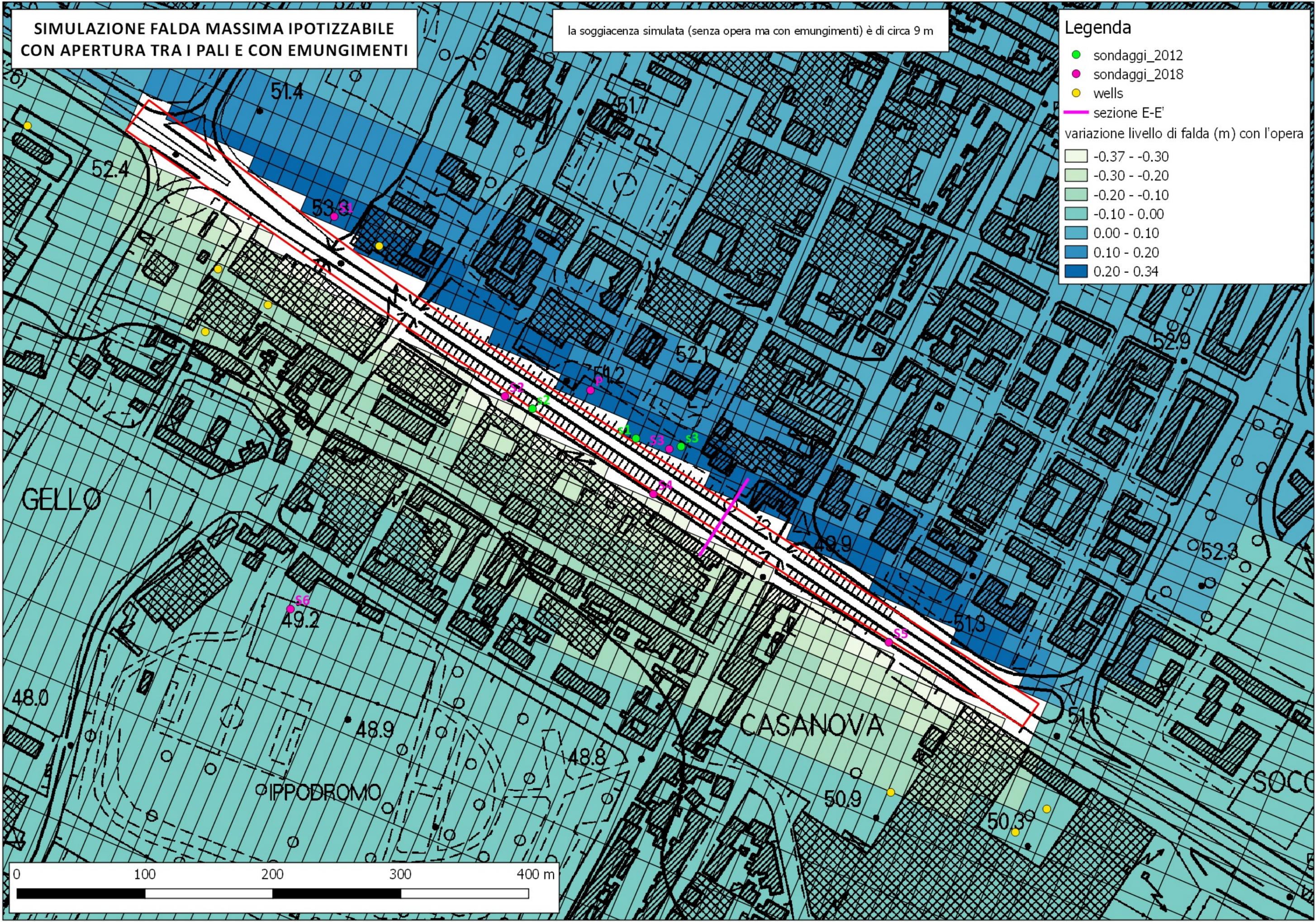
la soggiacenza simulata (senza opera ma con emungimenti) è di circa 9 m

Legenda

- sondaggi_2012
- sondaggi_2018
- wells
- sezione E-E'

variazione livello di falda (m) con l'opera

- 0.37 - -0.30
- 0.30 - -0.20
- 0.20 - -0.10
- 0.10 - 0.00
- 0.00 - 0.10
- 0.10 - 0.20
- 0.20 - 0.34



**SIMULAZIONE FALDA MASSIMA IPOTIZZABILE
PALI SECANTI - SENZA EMUNGIMENTI**

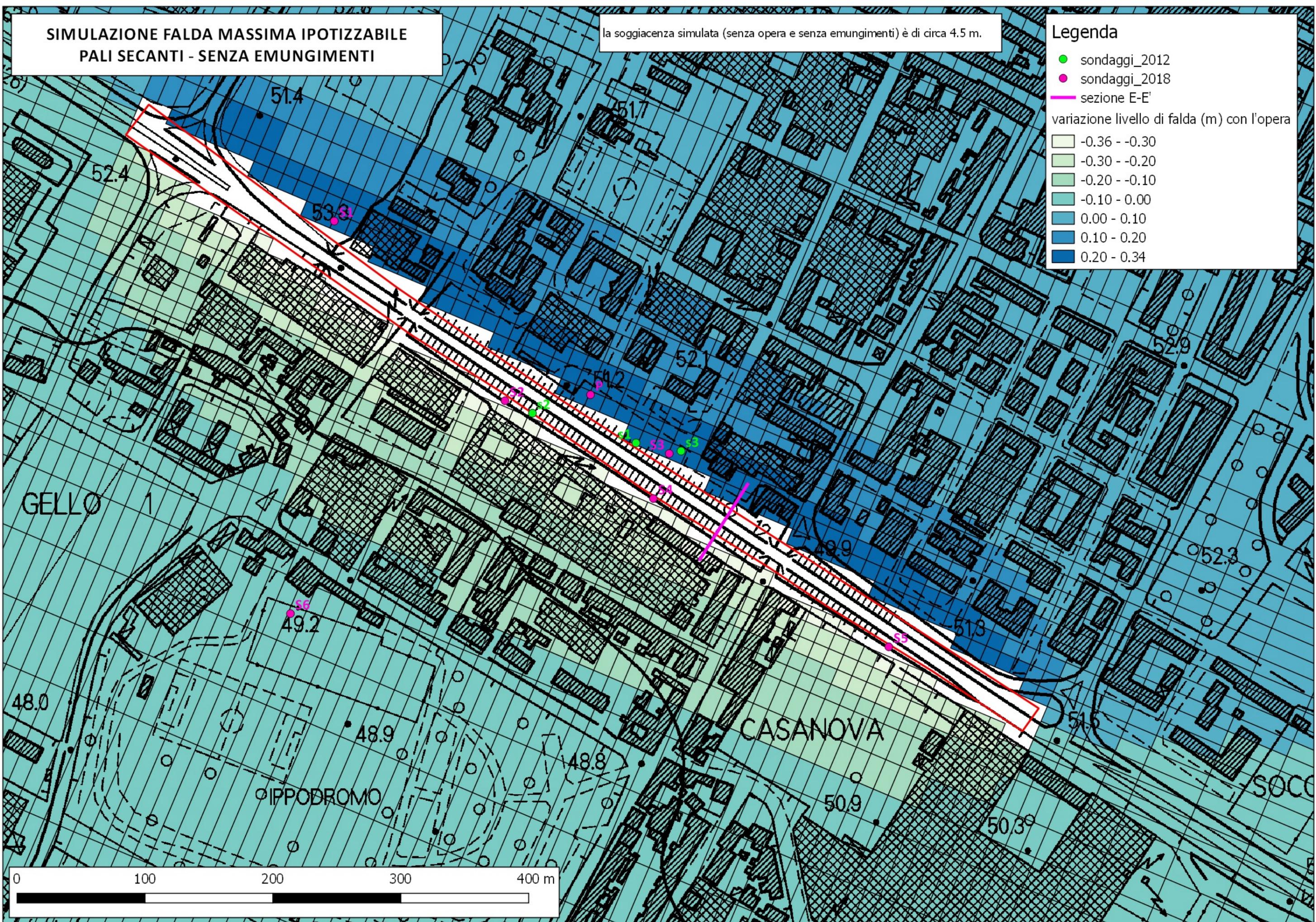
la soggiacenza simulata (senza opera e senza emungimenti) è di circa 4.5 m.

Legenda

- sondaggi_2012
- sondaggi_2018
- sezione E-E'

variazione livello di falda (m) con l'opera

- -0.36 - -0.30
- -0.30 - -0.20
- -0.20 - -0.10
- -0.10 - 0.00
- 0.00 - 0.10
- 0.10 - 0.20
- 0.20 - 0.34



**SIMULAZIONE FALDA MASSIMA IPOTIZZABILE
PALI SECANTI - CON EMUNGIMENTI**

la soggiacenza simulata (senza opera ma con emungimenti) è di circa 9 m

Legenda

- sondaggi_2012
 - sondaggi_2018
 - wells
 - sezione E-E'
- variazione livello di falda (m) con l'opera
- 0.61 - -0.40
 - 0.40 - -0.20
 - 0.20 - 0.00
 - 0.00 - 0.20
 - 0.20 - 0.40
 - 0.40 - 0.56

