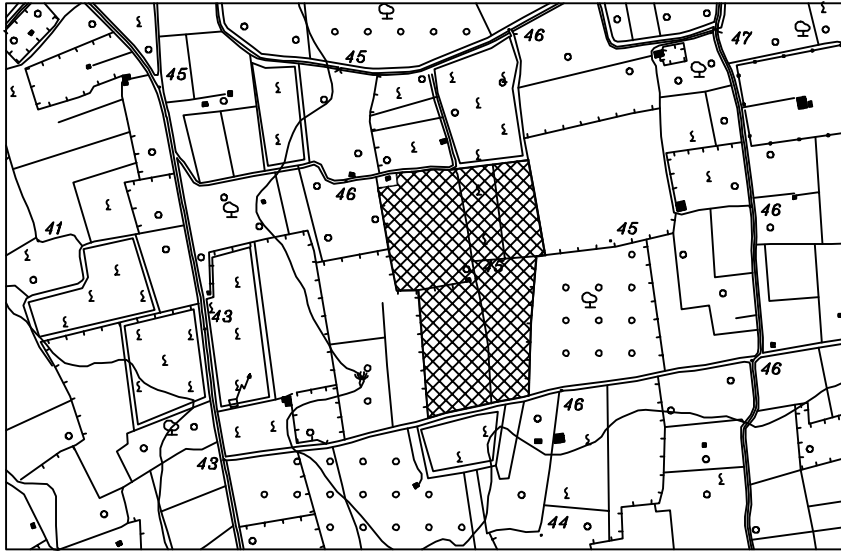


Comune di ALEZIO

Prov. di LECCE



RICHIEDENTE: GEOAMBIENTE s.r.l.

Via Beatrice Acquaviva D'Aragona, 5
73020 - Cavallino (LE)

**Progetto di coltivazione mineraria di una
cava di materiale argilloso in loc. "L'Arpa"
Foglio 17 p.lle 50 (parte)-51-52-53-112**

ELABORATO: E14

**TITOLO: Modello idrogeologico numerico
del flusso idrico sotterraneo**

Giugno 2018

I Tecnici
Ing. Antonio Di Gennaro



Comune di Alezio (LE)



**Progetto di coltivazione mineraria di una cava
di materiale argilloso in località *L'Arpa***



Modello idrogeologico numerico del flusso idrico sotterraneo



Relazione tecnica

Preparato per: **GEOAMBIENTE s.r.l.**
Via Beatrice Acquaviva D'Aragona, 5
73020 - Cavallino (LE)

File: **MOD2018-07-REP03**

Versione corrente: **03**

Data emissione: **8 giugno 2018**

Redatto da: Ing. Antonio di Gennaro
Ordine della Provincia di Torino
n. 10785V



SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	1
1.1	Obiettivi del lavoro.....	1
1.2	Strumenti utilizzati	1
1.3	Documentazione tecnica acquisita	2
1.4	Sistema Informativo Territoriale.....	9
2	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO	10
2.1	Modello concettuale.....	10
2.2	Parametrizzazione del dominio di studio.....	16
2.2.1	Active domain e discretizzazione areale.....	16
2.2.2	Discretizzazione verticale	19
2.2.3	Morfologia e idrografia.....	25
2.2.4	Caratteristiche idrodinamiche	30
2.3	Condizioni al contorno e calibrazione	34
2.3.1	Osservazioni e ricostruzioni piezometriche di riferimento.....	34
2.3.2	Emungimenti e ricarica.....	37
2.3.3	Obiettivi e modalità di calibrazione.....	39
2.3.4	Risultati della calibrazione	41
3	SIMULAZIONI EFFETTUATE.....	48
3.1	Sintesi del progetto di coltivazione e obiettivi	48
3.2	Risultati e commenti.....	49
	BIBLIOGRAFIA.....	55

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 Ubicazione del sito rispetto ai limiti dell'acquifero Salento leccese sud-occidentale	12
Figura 2-2 Geolitologia e schemi idrogeologici dell'acquifero Salento leccese sud-occidentale.....	13
Figura 2-3 Sezione idrostratigrafica A-A', passante presso l'area di interesse (cfr. Figura 2-2).....	15
Figura 2-4 Dominio modellizzato e area di progetto su ortofoto regionale 2016	17
Figura 2-5 Dettaglio della discretizzazione areale nella zona di interesse (quadtree refinement)	18
Figura 2-6 Ubicazione e ID delle stratigrafie acquisite per la ricostruzione del basamento della falda	21
Figura 2-7 Dettaglio della stratigrafia del pozzo EI 594 prossimo all'area di progetto	23
Figura 2-8 Confronto tra le superfici del tetto e del letto dell'orizzonte permeabile modellizzato	24
Figura 2-9 Digital Terrain Model e principali elementi morfologici nel dominio modellizzato	26
Figura 2-10 Vista D1-1 del Fosso de' Samari, circa 1.0 km a S-SW dall'area di progetto.....	27
Figura 2-11 Vista D1-2 del Fosso de' Samari, circa 1.7 km a SW dall'area di progetto.....	27
Figura 2-12 Vista D2-1 del canale 2, circa 1.2 km a W dall'area di progetto	27
Figura 2-13 Vista D2-2 del canale 2, circa 500 m a NW dall'area di progetto.....	28
Figura 2-14 Vista D2-3 del canale 2, circa 450 m a NW dall'area di progetto.....	28
Figura 2-15 Vista D3-1 del canale 3, circa 750 m ad E dell'area di progetto.....	28
Figura 2-16 C.C. di tipo DRAINS e quote medie segmenti modellizzati vs isofreatiche giugno 2016	29
Figura 2-17 Dominio del modello su stralcio del Foglio 214 della Carta Geologica d'Italia al 100k	32
Figura 2-18 Stralcio della legenda del foglio 214 della Carta Geologica d'Italia al 100k.....	33
Figura 2-19 Piezometrie di riferimento e ubicazione dei targets per la calibrazione del modello	36
Figura 2-20 Esempio di scatterplot per la valutazione della calibrazione	40
Figura 2-21 Ubicazione dei 79 Pilot Points utilizzati nel processo di calibrazione automatica.....	42
Figura 2-22 Scatterplot finale della calibrazione sui 18 targets di giugno 2016	46
Figura 2-23 Isopieze calcolate dal modello calibrato vs isopieze di riferimento (da misure giugno 2016	47
Figura 3-1 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 0 vs isofreatiche di riferimento.....	51
Figura 3-2 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 1 e variazioni rispetto all'indisturbato, in m..	53
Figura 3-3 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 2 e variazioni rispetto all'indisturbato, in m..	54

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Documentazione tecnica acquisita dalla Committenza.....	2
Tabella 2 Valori (pre-calibrazione automatica) attribuiti alle conducibilità idrauliche dei layers	31
Tabella 3 Punti di osservazione disponibili e misure h' del livello assoluto di falda acquisite.....	35
Tabella 4 Bilanci idrologici per la stima delle RCH considerate nel modello.....	38
Tabella 5 Valori di K finali stimati in corrispondenza dei 79 Pilot Points	43
Tabella 6 Scarti (residuals) finali in corrispondenza dei 18 targets di calibrazione	46
Tabella 7 Carichi H calcolati nei punti di osservazione e scostamenti con la situazione indisturbata.....	52

1 Introduzione

1.1 Obiettivi del lavoro

Nel presente documento è descritto un modello numerico di flusso alle differenze finite, impostato e calibrato in modo da simulare conservativamente gli effetti idrogeologici degli scavi e dell'opera di protezione idraulica previsti dal progetto di coltivazione mineraria di materiale argilloso in località Arpa nel comune di Alezio (LE), presentato dalla ditta GEOAMBIENTE srl e discusso in CdS il 10 maggio 2017.

Come richiesto dall'Autorità di Bacino della Puglia con il parere dell'8 maggio 2017 (prot. generale A00_AFF_GEN 0006046 U), il modello in oggetto potrà consentire di *indagare ... l'entità delle perturbazioni indotte sul naturale regime del flusso idrico sotterraneo, sia nelle fasi iniziali sia in quelle di esercizio di cava.*

I parametri e le condizioni al contorno del modello, nonché le ipotesi e le assunzioni che caratterizzano gli scenari simulati, sono stati definiti sulla base delle informazioni desumibili dalla corposa documentazione fornita dalla Committenza, sintetizzata nel paragrafo 1.3.

Posto che un modello idrogeologico, numerico o analitico, è comunque una schematizzazione di una realtà fisica complessa, schematizzazione funzionale ad uno specifico obiettivo, è importante sottolineare che il presente modello non ambisce ad essere rappresentativo del comportamento di un acquifero¹ effimero (nonché di scarsa potenza e di limitata capacità di trasporto e immagazzinamento) quanto, piuttosto, di consentire di stimare l'entità del *worst case* di disturbo idrogeologico sulla base dei dati disponibili.

1.2 Strumenti utilizzati

Il modello numerico descritto nel presente documento è stato costruito utilizzando il noto codice di pubblico dominio **MODFLOW**² dell'US Geological Survey (USGS), standard internazionale per la modellazione tridimensionale alle differenze finite del flusso delle acque sotterranee; in particolare, è stata utilizzata una delle versioni più recenti, stabili e testate del codice, la MODFLOW-USG (MODFLOW for UnStructured Grid) versione 1.4.00 che, tra l'altro, consente di lavorare flessibilmente sia con griglie strutturate in modo classico sia con griglie annidate (*nested*) o basate su forme triangolari, esagonali, etc.

Ogni fase della costruzione del modello è stata gestita per mezzo della versione 7.17 build 48 del software proprietario **Groundwater Vistas**³ (Rumbaugh, et al., 2017), interfaccia grafica per i codici dell'USGS in grado di gestire non solo MODFLOW-USG, ma anche le sue versioni classiche MODFLOW 2000 e 2005 e/o specializzate LGR2 (che consente il raffinamento locale della griglia alle differenze finite) e NWT (che usa un nuovo approccio numerico per la soluzione dei problemi di flusso in acquiferi liberi).

Groundwater Vistas, inoltre, consente di configurare e utilizzare altri fondamentali pacchetti-software (*packages*) modflow-compatibili: per il tracking (*MODPATH*), per il calcolo di bilanci idrici (*ZONEBUDGET*), per la simulazione del trasporto 3D di contaminanti disciolti (*MT3DMS*) (Zheng, et al., 1999), per il flusso 2/3D a densità variabile e con trasporto di soluto o calore (*SEAWAT*) (Langevin, et al., 2008).

Particolarmente importante per il presente studio, l'interfaccia di Groundwater Vistas ha consentito di configurare ed eseguire efficacemente il codice di modellazione inversa **PEST** (*Parameter ESTimation*) (Doherty, 2015), avanzata suite di programmi finalizzati, oltre che alla calibrazione su osservazioni reali, anche alla generazione di realizzazioni Monte Carlo e all'analisi dell'incertezza delle previsioni simulate dai modelli numerici.

¹ In realtà, sulla base delle evidenze di campo, considerare *acquifero* il sistema idrogeologico in esame può essere considerato una prima forzatura, sebbene funzionale ad esigenze di conservatività (tutela dell'ambiente e della salute pubblica)

² <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html>

³ <http://www.groundwatermodels.com>

1.3 Documentazione tecnica acquisita

Il modello numerico idrogeologico descritto è stato costruito sulla base di informazioni qualitative e quantitative desunte dai documenti tecnici elencati in Tabella 1, appositamente forniti dalla Committenza.

Per ciascun documento sono indicati titolo, autore, mese e anno di redazione, nonché un identificativo univoco (ID) utilizzato come riferimento per le citazioni della fonte nel testo della relazione. Le eventuali informazioni scientifiche integrative utilizzate sono segnalate con citazioni intertestuali abbreviate (in stile *autore-anno*, ISO 690) che rimandano alla bibliografia completa riportata in fondo al documento (pag. 55).

Tabella 1 Documentazione tecnica acquisita dalla Committenza

ID (data), autori, Titolo e formato	Sintesi
<p>E1 (luglio 2017) Geol. G. Calò, Ing. D. Calò, Geol. F. Macri Relazione geologica e geotecnica Relazione tecnica, 124 pagine</p>	<p>Elaborato E1 del <i>Progetto di coltivazione mineraria</i> costituito da relazione descrittiva dello studio finalizzato alla definizione degli aspetti litologici, idrogeologici e geotecnici del progetto stesso.</p> <p>Sono analizzate, in particolare, le caratteristiche geologico-morfologiche generali e di dettaglio dell'area, sulla base di dati di letteratura, rilevamenti di campo e degli esiti del sondaggio geognostico a c.c. (26.5 m di profondità, diametro 101 mm) appositamente realizzato il 31 maggio 2016</p> <p>I risultati delle analisi sui 6 campioni di suolo prelevati a diverse profondità del sondaggio (cap. 5 e Allegato 2) hanno permesso di parametrizzare le unità litologiche presenti e di condurre una verifica della stabilità delle scarpate del progetto di coltivazione con il metodo dell'equilibrio limite (cap. 6) tramite il software SSAP v.4.5.2 (2015).</p> <p>Sono al contempo verificate la vincolistica idrogeologica sussistente sull'area, la classificazione sismica e l'inquadramento nel PAI.</p> <p>Nel cap. 7, infine, son descritti i caratteri dell'idrografia superficiale e della circolazione idrica sotterranea: sia superficiale, interessata dall'intervento in progetto (par. 7.2.1), sia profonda (par. 7.2.2). Sulla base del monitoraggio dei livelli freatici in 18 pozzi presenti in prossimità del sito nell'arco di un anno idrologico (giugno 2016 - luglio 2017).</p> <p>Le misure dei livelli della falda superficiale sono confrontati con i dati di precipitazione e triangolati ricostruire 5 superfici piezometriche; presso il sito la falda superficiale, <i>già di per sé modestissima come spessore durante il periodo di massima ricarica in anni particolarmente piovosi, presenta carattere stagionale, arrivando a depauperarsi completamente nel periodo estivo, in perfetta coerenza con l'andamento delle precipitazioni.</i></p> <p>Dati ed elaborazioni sono rappresentati in 12 allegati cartografici:</p> <ul style="list-style-type: none"> - G1: carta geologica - G2: carta geomorfologica - G3: carta isofreatiche falda superficiale, giugno 2016 - G3a: carta isofreatiche falda superficiale, gennaio 2017 - G3b: carta isofreatiche falda superficiale, aprile 2017 - G3c: carta isofreatiche falda superficiale, maggio 2017 - G3d: livelli falda a 48 h da svuotamento P7 e P8, maggio 2017 - G3e: carta isofreatiche falda superficiale, giugno 2017 - G3f: livelli falda a 48 h da svuotamento pozzi P7 e P8, giugno 2017 - G3g: carta isofreatiche falda superficiale, luglio 2017 - G4: carta idrogeologica - G5: sezione idrogeologica generale e di dettaglio <p>Sono inoltre allegati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Allegato 1: stratigrafia del sondaggio, con foto dell'esecuzione dei lavori e delle 6 cassette catalogatrici

ID (data), autori, Titolo e formato	Sintesi
	<p>– Allegato 2: certificati delle analisi geotecniche effettuate dal laboratorio MBS di Surbo (LE): analisi granulometrica, massa volumica, contenuto d'acqua, indice dei vuoti, porosità, limiti di consistenza, contenuti in carbonati, permeabilità diretta in cella edometrica, resistenza a taglio); le analisi sono state effettuate su 6 campioni recuperati durante il sondaggio a diverse profondità:</p> <ul style="list-style-type: none"> – C1 (4.5 m): identificato come <i>limo con sabbia argilloso</i> – C2 (8.0 m): identificato come <i>limo con sabbia e argilla</i> – C3 (12.0 m): identificato come <i>limo con sabbia argilloso</i> – C4 (16.0 m): identificato come <i>limo con sabbia argilloso</i> – C5 (20.0 m): identificato come <i>limo con sabbia argilloso</i> – C6 (25.0 m): identificato come <i>sabbia con limo argilloso</i>
<p>G1 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta geologica Tavola, scala 1:5000</p>	<p>Tavola G1 allegata ad E1, rappresentante la distribuzione delle litologie affioranti nell'area; si riscontra assoluta prevalenza di <i>Deposti marini terrazzati</i> del Pleistocene medio-superiore (<i>calcareni organogene a grana medio grossolana, di colore giallastro-ocraceo, ben cementate e tenaci (tipo carparo)</i>); tale litologia, sulla base della carta geologica d'Italia al 100k, foglio 214 <i>Gallipoli</i>, è riconducibile all'intercalazione Q1c della <i>Formazione di Gallipoli</i> (Pleistocene).</p> <p>Sulla tavola è riportata traccia della sezione geologica AA' passante per l'area di progetto, rappresentata nell'elaborato G5</p> <p>NB: lungo la traccia della sezione AA' NON si riscontra la discontinuità laterale del banco di calcarenite riportata in G5. Da chiarire con gli autori.</p>
<p>G2 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta geomorfologica Tavola, scala 1:5000</p>	<p>Tavola G2 allegata ad E1, rappresentante gli elementi geomorfologici presenti presso l'area di progetto, come desunti dal foglio 526 <i>Nardò</i> della <i>Carta Idrogeomorfologica</i> dell'Autorità di Bacino della Puglia (2014).</p>
<p>G3 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta delle isofreatiche della falda superficiale: Giugno 2016 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3 allegata ad E1, riportante le isopieze di giugno 2016 (passo 1 m) ottenute per triangolazione dalle misure dei livelli in 18 pozzi presenti in prossimità dell'area; in corrispondenza del sito di progetto il deflusso risulta verso W-SW; gradiente piezometrico dell'ordine dello 0.5%.</p> <p>H massimo pari a 41.63 m s.l.m.; H minimo pari a 35.04 m s.l.m. (media 40.02 m s.l.m.)</p>
<p>G3a (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta delle isofreatiche della falda superficiale: Gennaio 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3a allegata ad E1, riportante le isopieze di gennaio 2017 (passo 1 m) ottenute per triangolazione dalle misure dei livelli di 18 pozzi; in corrispondenza dell'area di progetto la direzione di deflusso risulta essere verso SW; gradiente piezometrico medio pari a 1.3%.</p> <p>H massimo rilevato pari a 41.42 m s.l.m.; H minimo pari a 34.83 m s.l.m. (media 39.82 m s.l.m.)</p>
<p>G3b (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta delle isofreatiche della falda superficiale: Aprile 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3b allegata ad E1, riportante le isopieze di aprile 2017 (passo 1 m) ottenute per triangolazione dalle misure dei livelli di 18 pozzi; in corrispondenza dell'area di progetto la direzione di deflusso risulta essere verso SW; gradiente piezometrico dell'ordine dell'1.3%.</p> <p>H massimo rilevato pari a 40.91 m s.l.m.; H minimo pari a 34.33 m s.l.m. (media 39.33 m s.l.m.)</p>
<p>G3c (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì</p>	<p>Tavola G3c allegata ad E1, riportante le isopieze di maggio 2017 (passo 1 m) ottenute per triangolazione dalle misure dei livelli di 18 pozzi; in</p>

ID (data), autori, Titolo e formato	Sintesi
<p>Carta delle isofreatiche della falda superficiale: Maggio 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>corrispondenza dell'area di progetto la direzione di deflusso risulta essere verso SW; gradiente piezometrico dell'ordine dell'1.3%. H massimo rilevato pari a 40.65 m s.l.m.; H minimo pari a 34.07 m s.l.m. (media 39.04 m s.l.m.)</p>
<p>G3d (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì, Ing. M. Luperto Livelli della falda superficiale dopo 48h dalla prova di svuotamento dei pozzi P7 e P8: Maggio 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3d allegata ad E1, riportante ubicazione degli 8 pozzi monitorati a 48h dallo svuotamento di P7 e P8 effettuato il 22 maggio 2017, con annotazione delle misure di livello: dopo 2 giorni dallo svuotamento pressoché istantaneo NON si constata alcun recupero nei pozzi svuotati né propagazione di alcun disturbo a quelli vicini.</p>
<p>G3e (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì, Ing. M. Luperto Carta delle isofreatiche della falda superficiale: Giugno 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3e allegata ad E1, riportante le isopieze di giugno 2017 (passo 1 m) ottenute per triangolazione dalle misure dei livelli dei 18 pozzi rilevati; in corrispondenza dell'area di progetto la direzione di deflusso risulta essere verso SW; gradiente piezometrico dell'ordine dell'1%. H massimo rilevato pari a 40.27 m s.l.m.; H minimo pari a 33.69 m s.l.m. (media 38.68 m s.l.m.)</p>
<p>G3f (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì, Ing. M. Luperto Livelli della falda superficiale dopo 48h dalla prova di svuotamento dei pozzi P7 e P8: Giugno 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3f allegata ad E1, riportante ubicazione degli 8 pozzi monitorati a 48h dallo svuotamento di P7 e P8 effettuato il 19 giugno 2017, con annotazione delle misure di livello: dopo 2 giorni dallo svuotamento (pressoché istantaneo) NON si constata alcun recupero nei pozzi svuotati né propagazione di alcun disturbo a quelli vicini.</p>
<p>G3g (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì, Ing. M. Luperto Livelli della falda superficiale - Luglio 2017 Tavola, scala 1:2000</p>	<p>Tavola G3g allegata ad E1, riportante le misure effettuate a luglio 2017 sugli 8 pozzi interni o più vicini al sito in esame; dalla rappresentazione si evince che in tutti i pozzi NON si è rilevata presenza di acqua.</p>
<p>G4 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Carta idrogeologica Tavola, scala 1:5000</p>	<p>Tavola G4 allegata ad E1, riportante un'unica isopieza (2 m s.l.m.) della falda profonda, ospitata nei calcari di base, come desunta dal PTA regionale (e risultante ben al di sotto dell'ultimo livello di coltivazione mineraria). In corrispondenza del sito di interesse la falda si stabilizza a profondità dell'ordine di 40 metri dall'attuale p.c. Si rileva altresì la presenza di uno spartiacque sotterraneo che separa il deflusso in due componenti, da NE verso SO e da NO verso SE. Tale elemento, tuttavia, non influisce sull'oggetto del presente modello.</p>
<p>G5 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Sezione idrogeologica generale e di dettaglio Tavola, scale 1:5000 – 1:500</p>	<p>Tavola G5 allegata ad E1, rappresentante 4 sezioni idrogeologiche (due lungo la traccia AA' riportata su G2, da 2.5 km, e due a scala maggiore, da 500 m, centrate sull'area di progetto); sulle sezioni sono proiettati i contatti litostratigrafici, le ricostruzioni delle superfici piezometriche della falda superficiale e di quella profonda, sia in situazione indisturbata (stato di fatto) che al termine dello scavo di progetto, nonché elementi topografici quali confini, strade e canali.</p>

ID (data), autori, Titolo e formato	Sintesi
	<p>NB1: Dalle rappresentazioni si evince che la formazione calcarenitica sede della falda superficiale che si intende modellizzare, posta al di sopra dei limi argillosi da coltivare, non risulta continua lateralmente, interrompendosi in direzione W, circa 250 m prima del canale, alla quota approssimativa di 35 m s.l.m. Tale relazione tra gli strati pleistocenici è evidente anche sulla carta geologica al 100k, sebbene il contatto risulti posto più a E rispetto a quanto riportato su G5 (che si presume basata su di un rilievo sito specifico)</p> <p>NB2: La suddetta discontinuità laterale NON risulta sulla carta geologica allegata G1. Chiarire con gli autori...</p>
<p>E2 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Relazione di progetto di coltivazione e di recupero ambientale Relazione tecnica, 32 pagine</p>	<p>Elaborato E2 del <i>Progetto di coltivazione mineraria</i> costituito dal piano di coltivazione e recupero ambientale di una nuova cava di materiale argilloso ubicata nell'agro del Comune di Alezio località L'Arpa e distinta in catasto terreni al Foglio 17, particelle 50 (parte), 51, 52, 53 e 112 (superficie totale interessata di ca 6 ha, mentre quella effettivamente interessata dall'attività estrattiva è pari a ca 4.7 ha)</p> <p>Il materiale estraibile, limi argillosi e limi sabbiosi, ascrivibili alla formazione delle Argille Subappennine, ammonta a 650300 m³, con una produzione annuale media prevista di circa 50000 m³ e una durata della coltivazione di 13 anni; tali materiali verranno impiegati per la realizzazione di capping di 3 discariche di RSU della provincia di Lecce non ancora bonificate, e/o come materia prima nell'industria cementiera.</p> <p>Nel cap. 3 è dettagliato lo stato dei luoghi (par. 3.1) e descritto il piano di coltivazione vero e proprio (par. 3.2 e 3.3), compreso l'allestimento del cantiere e le operazioni preliminari; il piano di coltivazione prevede la realizzazione di una cava a fossa con morfologia a gradoni (3 scarpate a 40° da 7 m di altezza, alternate a 2 gradoni larghi 5 m). La cava si approfondirà nel complesso di circa 21 m rispetto al piano di campagna originario, raggiungendo la quota minima assoluta di 21 m s.l.m.</p> <p>La coltivazione avverrà contestualmente al recupero ambientale delle aree già coltivate e si svilupperà in 6 fasi successive, rappresentate in pianta e in sezione nei seguenti allegati cartografici:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tav. 5: Piano di coltivazione/recupero - PRIMA Fase - Tav. 6: Piano di coltivazione/recupero - SECONDA Fase - Tav. 7: Piano di coltivazione/recupero - TERZA Fase - Tav. 8: Piano di coltivazione/recupero - QUARTA Fase - Tav. 9: Piano di coltivazione/recupero - QUINTA Fase - Tav. 10: Piano di coltivazione/recupero - SESTA Fase - Tav. 12: Piano di c./r – Sezioni vaie fasi e recupero - Luglio 2016 - Tav. 12a: Piano di c./r – Sezioni vaie fasi e recupero - Luglio 2017 - Tav. 13: Particolari costruttivi scarpate, canali e drenaggi, setto impermeabile, opere in verde – Luglio 2017 - Tav. 13a: Particolari costruttivi scarpate, canali e drenaggi, setto impermeabile, opere in verde – Luglio 2016 - Tav. 14a: Particolari: spogliatoio, uffici e pesa - Tav. 14b: Particolari: recinzione e cancelli - Tav. 15: Impianto di irrigazione e abbattimento polveri, planimetria <p>Si osserva che già nello schema della prima fase (Tav. 5) è riportata in pianta l'opera di protezione idraulica (diaframma impermeabile e dreno) completa, a cinturazione dell'intera area di progetto.</p>

ID (data), autori, <i>Titolo</i> e formato	Sintesi
	Il progetto è completato dalla descrizione del recupero ambientale del sito (cap. 5), per uso naturalistico, rappresentato nelle tavole allegate Tav. 11 e Tav. 12 , nonché supportato da apposito studio agronomico.
Tav. 4a (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Rilievo dello stato di fatto Planimetrie Tavola, scala 1:500	Tavola 4a allegata ad E2, riportante i punti sul p.c. dell'area di progetto quotati nel corso di apposito rilievo plano-altimetrico di dettaglio dello stato di fatto. Sono riportate le tracce delle due sezioni verticali AA' e BB' rappresentate in Tav. 4b
Tav. 4b (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Rilievo dello stato di fatto Sezioni luglio 2016 Tavola, scala 1:500	Tavola 4b allegata ad E2, riportante le due sezioni verticali AA' e BB' rappresentate in traccia sulla Tav. 4° ; sulle sezioni sono rappresentati i contatti litostratigrafici e la superficie piezometrica della falda freatica oggetto di studio.
E3 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Relazione economico-finanziaria Relazione tecnica, 8 pagine	Elaborato E3 del Progetto di coltivazione mineraria costituito dal Piano economico-finanziario, nel quale sono valutati nel dettaglio i costi annuali (di investimento, di gestione e per il recupero finale) e vengono stimati il ricavo lordo medio annuo dalla vendita dei materiali e l'utile presuntivo al lordo delle tasse e delle imposte, a dimostrazione della redditività economica dell'attività.
E4 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Studio di Impatto Ambientale L.R. 12 aprile 2001, n° 11 Relazione tecnica, 77 pagine	Elaborato E4 del Progetto di coltivazione mineraria costituito dal relativo Studio di Impatto Ambientale (SIA), redatto in conformità con le linee guida contenute nella L.R. 11/2001 e articolato nelle seguenti parti: <ul style="list-style-type: none"> - Quadro di riferimento legislativo. Riferimenti normativi e legislativi attualmente vigenti nel settore dell'attività estrattiva; compatibilità del progetto con gli strumenti di pianificazione e programmazione vigenti. - Quadro di riferimento ambientale: condizioni iniziali dell'ambiente fisico, biologico e antropico. Stato dei luoghi; caratteri geologici e morfologici; lineamenti idrogeologici; geopedologia e uso del suolo; caratteri climatici; flora e fauna; rumorosità; qualità dell'aria; analisi del sistema insediativo. - Quadro di riferimento progettuale. Caratteristiche strutturali e funzionali della cava di progetto; modalità di gestione ed esercizio; piano di recupero finale dell'area; cronoprogramma; analisi costi-benefici. - Valutazione degli impatti ambientali, misure di mitigazione e monitoraggio ambientale. Descrizione e valutazione delle diverse tipologie di impatto ambientale nelle fasi di attuazione, gestione e dismissione dell'attività estrattiva di progetto; descrizione e valutazione delle misure tecniche adottate per ridurre o eliminare gli impatti ambientali negativi; piano di monitoraggio ambientale.
E5 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Studio di Impatto Ambientale Sintesi in linguaggio non tecnico Relazione tecnica, 12 pagine	Elaborato E5 del Progetto di coltivazione mineraria costituito dalla <i>Sintesi in linguaggio non tecnico</i> dello Studio di Impatto Ambientale (E4), redatto secondo le linee guida della L.R. 11/2001.
E6 (luglio 2017)	Elaborato E6 del Progetto di coltivazione mineraria costituito da relazione avente finalità di descrivere la compatibilità delle previsioni progettuali con

ID (data), autori, <i>Titolo</i> e formato	Sintesi
Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Relazione di compatibilità paesaggistica ai sensi dell'art. 92 delle NTA del PPTR Relazione tecnica, 20 pagine	la normativa di tutela paesaggistica introdotta dal PTTR (approvato dalla Regione Puglia con D.G.R. n.176 del 16 febbraio 2015).
E7 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Piano di gestione rifiuti ai sensi del D.Lgs 117/2008 Relazione tecnica, 7 pagine	Elaborato E7 del Progetto di coltivazione mineraria costituito dal <i>piano di gestione dei rifiuti</i> prodotti durante tutte le fasi di realizzazione del progetto.
E8 (luglio 2017) Ing. D. Calò, Geol. F. Macrì Documentazione fotografica Catalogo fotografico, 11 pagine	Elaborato E8 del Progetto di coltivazione mineraria costituito da relazione-catalogo contenente 18 riprese fotografiche dello stato attuale del sito oggetto del progetto o di elementi di interesse: viste generali dell'area di cava di progetto, ripresa satellitare, strade vicinali, affioramenti di calcareniti, fosso de' Samari, oliveti attaccati dal patogeno <i>Xilella</i> e/o già disseccati, superfici incolte e a vigneto, essenze arboree e specie erbacee ruderali poliannuali presenti presso il sito.
E9 (luglio 2016) Dott. Agr. F. Lefons Relazione agronomica Relazione tecnica, 30 pagine	Elaborato E9 del Progetto di coltivazione mineraria costituito da relazione tecnico agronomica dal titolo <i>Analisi dello stato vegetativo e dell'uso del suolo per opere di sistemazione a verde nelle fasi di coltivazione e di recupero post dismissione aree di cava</i> . L'elaborato contiene: <ul style="list-style-type: none"> - un censimento vegetazionale delle specie presenti nell'area con un'indicazione generale delle caratteristiche dimensionali e fitosanitarie degli individui; - un'analisi generale dell'area in cui si intende eseguire il piano di coltivazione di cava, con particolare attenzione al recupero della cava e al riutilizzo del terreno vegetale; - indicazione delle essenze vegetali da destinarsi alla ricomposizione ambientale della cava, sulla base del progetto di coltivazione
E10 (luglio 2016) Dott. L. Palmisano Valutazione di impatto delle emissioni in atmosfera Relazione tecnica, 41 pagine	Elaborato E10 del Progetto di coltivazione mineraria costituito da relazione descrittiva dello studio modellistico della dispersione delle polveri in atmosfera emesse dall'attività di progetto, effettuato implementando il modello <i>CALPUFF</i> con postprocessore <i>RUNANALYZER</i> della Maind srl. Le emissioni sono state valutate sulla base delle Linee Guida ARPAT (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Toscana) <i>Linee guida per la valutazione delle emissioni di polveri provenienti da attività di produzione, manipolazione, trasporto, carico o stoccaggio di materiali polverulenti</i> . Viene proposta una stima quantitativa delle emissioni di polveri prodotte sia dalle attività di scavo sia da quelle di movimentazione del materiale (carico/scarico, formazione cumuli, etc.). Sono descritte simulazioni numeriche basate su specifica caratterizzazione del sito da un punto di vista meteo-climatico, emissivo, orografico e fluidodinamico, considerando una scala spaziale della valutazione del tipo <i>Urbana/agglomerato (1-300 km)</i> , in conformità con le indicazioni del D.Lgs. 155 del 13 agosto 2010.
E11 (luglio 2016) Dott. G. Totaro	Elaborato E11 del Progetto di coltivazione mineraria costituito da relazione descrittiva dello studio previsionale di impatto acustico appositamente realizzato, finalizzato a quantificare l'apporto acustico del progetto e

ID (data), autori, <i>Titolo</i> e formato	Sintesi
<p>Valutazione previsionale di impatto acustico Relazione tecnica, 30 pagine</p>	<p>valutare l'eventualità di necessità di bonifica (tramite adeguato progetto di insonorizzazione).</p> <p>A supporto dello studio si è proceduto all'effettuazione di una campagna di misure fonometriche il giorno venerdì 27 Luglio 2016, durante il periodo di riferimento diurno. Lo studio conclude che, mantenendo le condizioni di svolgimento dell'attività secondo gli standard utilizzati durante la campagna di misura, l'installazione non è in grado di superare i limiti di immissione consentiti per la zona D <i>tutto il territorio nazionale</i>.</p>
<p>E12 (luglio 2016) Dott. L. Palmisano Piano di monitoraggio ambientale Relazione tecnica, 7 pagine</p>	<p>Elaborato E12 del Progetto di coltivazione mineraria costituito dal Piano di Monitoraggio ambientale predisposto nell'ambito della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (ex. art. 22D.Lgs. 152/2006 e smi); descrive le modalità e le frequenza di monitoraggio delle matrici ambientali potenzialmente coinvolte dalle attività di progetto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - par. 1.1: aria (emissioni diffuse di polveri) - par. 1.2: rumore - par. 1.3: acque sotterranee (falda superficiale, dai pozzi 2, 4 6 e 8)
<p>E13 (198X) Dott. Geol. G. Calò Dott. Geol. R. Gnoni Progetto di una discarica intercomunale pubblica dei R.S.U. Estratto di Relazione geologica, 11 pagine</p>	<p>Estratto della relazione geologica allegata al Progetto di una discarica intercomunale pubblica dei R.S.U. nel Comune di Gallipoli; sono descritte modalità esecutive e di interpretazione dei seguenti test in situ, eseguiti su pozzo singolo (n.26), finalizzati alla determinazione della conducibilità idraulica della formazione calcarenitica:</p> <ul style="list-style-type: none"> - prova di emungimento a Q costante (1.5 l/s) fino a raggiungimento della stabilizzazione, durata circa 2 h; - monitoraggio della risalita fino al completo ripristino del livello statico originale, raggiunto in circa 1 h e mezza; - prova di emungimento a Q costante (2 l/s), della durata di circa 3 h, fino a raggiungimento della stabilizzazione <p>Sulla base dei risultati si è stimata una trasmissività T di $3.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dalla quale, posto uno spessore saturo di 3.7 m, una conducibilità idraulica K dell'ordine di $9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.</p> <p>Sono descritte, inoltre, modalità esecutive e interpretazione di 3 ulteriori prove in situ a carico variabile, eseguite su due pozzetti a sezione quadrata e pareti verticali appositamente realizzati nelle rocce calcarenitiche, a circa 350 m l'uno dall'altro e 500 m dal pozzo 26, scavati fino al raggiungimento del livello di falda; dall'interpretazione dei dati di discesa si evincono conducibilità idrauliche comprese tra $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.</p>

1.4 Sistema Informativo Territoriale

L'implementazione del Sistema Informativo Geografico funzionale al modello, all'interno del quale sono state svolte tutte le operazioni necessarie di spatial analysis e geostatistica sui dati acquisiti e i risultati ottenuti, è stata effettuata in ambiente **QGIS**⁴, noto software GIS desktop Open Source le cui funzionalità di spatial ben si prestano al pre/post processing dei dati in I/O di MODFLOW; nella versione utilizzata (2.16 Nødebo per SO Windows), QGIS integra nativamente gli strumenti avanzati di **SAGA GIS**⁵ (*System for Automated Geoscientific Analyses*), **GRASS**⁶ (*Geographic Resources Analysis Support System*) v.7 e **Orfeo Toolbox**⁷.

Il SIT risultante, nella versione più recente (giugno 2018), consiste in un file-progetto di estensione *.qgs* che consente la gestione di diversi strati informativi (*layers*): tabelle, layers vettoriali e raster: ogni livello informativo è di fatto un collegamento a files vettoriali o raster ubicati in cartelle dello stesso livello del file di progetto, ed è caratterizzato da una specifica vestizione (grafica, etichettatura, filtri sui contenuti, etc.) ritenuta funzionale agli obiettivi del lavoro; per la struttura conferitagli, l'insieme dei dati è trasportabile senza perdite di informazione copiando e incollando il file di progetto AND tutte le cartelle dello stesso livello, avendo cura di conservarne la posizione relativa.

Per coerenza con i dati di origine, il Sistema di Riferimento (CRS) adottato nell'implementazione del SIT e del modello è il WGS84 / UTM33N (codice EPSG:32633).

Le informazioni geografiche elaborate a partire dai documenti acquisiti dalla Committenza sono state integrate nel SIT con dati di pubblico dominio distribuiti da fonti istituzionali; in particolare, sono stati acquisiti da fonti esterne i seguenti livelli informativi:

- Carta Tecnica Regionale numerica della Regione Puglia⁸, in formato *pdf* e *shapefile* e scala nominale 1:5000, basata su aerofotogrammetria del 2006 (elementi 526143, 526144, 526131, 526132, 526133, 526134, 526092 e 526094);
- Digital Terrain Model (DTM) della Regione Puglia⁹, in formato *asc* e risoluzione 8 m (elementi *g_526143*, *g_526144*, *g_526131*, *g_526132*, *g_526133*, *g_526134*, *g_526092* e *g_526094*);
- Ortofoto AGEA 2006 e 2015 ufficiali della Regione Puglia
- Riprese satellitari aggiornate dell'area di interesse: da Google Maps (level zoom = 19) e MS BING (level zoom = 20), originariamente nel SR EPSG 3785 (*Popular visualization / Mercator*), caricate e riproiettate OTF (*On The Fly*) nel SIT tramite il plugin *OpenLayers* di QGIS
- Carta Idrogeomorfologica, a cura dell'Autorità di Bacino della Regione Puglia¹⁰
- DEM (Digital Elevation Model) TINITALY/01¹¹, in formato *asc* e con risoluzione 10 m, limitatamente all'area di interesse (tile e44525);
- Limiti amministrativi dei Comuni italiani in versione non generalizzata¹², aggiornati al 2016, in formato *shapefile* e sistema di riferimento WGS84/UTM32 (EPSG:32632)

⁴ <https://www.qgis.org/it/site/>

⁵ <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

⁶ <https://grass.osgeo.org/>

⁷ <https://www.orfeo-toolbox.org/>

⁸ http://www.sit.puglia.it/portale/portale_cartografie_tecniche_tematiche/Cartografie%20tecniche/CTR

⁹ http://www.sit.puglia.it/portale/portale_cartografie_tecniche_tematiche/Cartografie%20Tematiche/DTM

¹⁰ http://cartografia.sit.puglia.it/doc/Relazione_illustrativa_Carta_Idrogeomorfologica.pdf

¹¹ <http://tinality.pi.ingv.it/>

¹² <https://www.istat.it/it/archivio/124086>

2 Implementazione del modello

2.1 Modello concettuale

Su buona parte della Penisola Salentina (circa il 35% dell'intero territorio), i depositi miocenici e plio-pleistocenici sovrastanti al basamento carbonatico cretacico ospitano acquiferi superficiali, di spessore, rilevanza ed estensione molto variabili, intensamente sfruttati come fonte di approvvigionamento idrico locale almeno fino al momento della valorizzazione dell'acquifero profondo.

Sulla base delle perimetrazioni riportate nel P.T.A. (Figura 2-1 a pag. 12), il sito oggetto di studio risulta compreso entro i limiti dell'acquifero denominato *Salento leccese sud-occidentale* (codice di distretto: ITF16CLEC-SW; codice regionale: 7-4-1), appartenente ai Complessi idrogeologici detritici 7 - *Serre salentine*, ed al quale risultano attribuiti uno stato chimico quali-quantitativo *N.D.* e la classe *Probabilmente a rischio*.

Come riportato nel P.T.A., l'acquifero in questione risulta localizzato nel territorio che si estende tra gli abitati di Gallipoli, Alezio, Matino, Melissano, Taviano, Racale ed Alliste; si tratta di una *falda superficiale abbastanza estesa (circa 120 Km²) e piuttosto continua, con un **andamento della superficie freatica che segue all'incirca quello della superficie topografica**. Essa circola nei depositi sabbiosi calabriani ed in quelli calcarenitici post calabriani con una potenza generalmente **non superiore a 10 m**, pur presentando modesti valori delle portate estraibili dai pozzi (1 l/s). Tali valori possono diventare consistenti (10 l/s) laddove le opere di captazione ricadono in corrispondenza delle principali direttrici di deflusso sotterraneo. Per quanto riguarda la salinità essa risulta piuttosto bassa e compresa tra 0.2 e 0.6 g/l.*

Un'analisi sistematica dei rapporti idraulici esistenti tra gli acquiferi superficiali ed il sottostante acquifero cretacico, illustrata nel più autorevole e aggiornato studio sull'idrogeologia del Salento (Cotecchia, 2014) e basata sulle informazioni rilevate durante la realizzazione dei pozzi dell'Ente Irrigazione (a partire dagli anni '50), ha consentito di definire sette tipologie distinte di assetto idrogeologico (denominate **T0f, T0p, T1, T2, T3, T4, T5**), ciascuna caratterizzata da specifici rapporti idraulici tra i vari acquiferi intercettati lungo la verticale.

Come si evince dalla suddetta analisi, nell'area di pertinenza dell'acquifero *Salento leccese sud-occidentale* l'assetto di gran lunga prevalente è ben rappresentato dallo schema **T3** (Figura 2-2 a pag. 13), esemplificato peraltro da una colonna litostratigrafica (Ente Irrigazione n. **583**) prossima al sito di interesse e acquisita per il presente lavoro (cfr. par.2.2.2); lo schema T3 è caratterizzato da *Acquifero profondo nei calcari mesozoici con falda idrica confinata e acquifero superficiale nelle formazioni mioceniche e/o plio-pleistoceniche con **falda idrica freatica ed indipendente da quella profonda***, dunque dall'**assenza di connessioni idrauliche** tra l'acquifero cretacico e quelli sovrastanti, ospitati nei terreni post-cretacei.

Esempi di questo tipo di assetto sono molto diffusi a Sud-Ovest di Lecce, *dove i calcari acquiferi del Cretaceo giacciono a profondità anche superiori a 150 m s.l.m. e sono ricoperti da terreni oligocenici e/o miocenici, la cui permeabilità è in genere molto ridotta. Nelle porzioni più permeabili dei terreni più recenti, a quote in genere superiori al livello mare, si rinvengono, tuttavia, **livelli acquiferi superficiali di modesta potenzialità idrica**; solo in alcuni casi possono registrarsi significative portate idriche* (Cotecchia, 2014).

In corrispondenza della perforazione 583, ubicata circa 1 km a NW del sito di progetto, la falda superficiale è stata rinvenuta nei Depositi marini terrazzati del Pleistocene medio-superiore, a quota di circa 40 m s.l.m.; il tetto dei calcari acquiferi, ben isolato da una potente formazione argillosa impermeabile, risulta a quote di circa - 5 m s.l.m. e la falda profonda presenta una concentrazione salina dell'ordine di 1 g/l.

Come confermato nello studio geologico di dettaglio e dai rilievi effettuati dalla Committenza (**E1**), i terreni calcarenitici diffusamente affioranti nell'area in esame ospitano una *modesta falda freatica*, sostenuta alla base dai limi argillosi pleistocenici e avente *marcate caratteristiche di stagionalità*; tali terreni sabbioso-calcarenitici risultano permeabili per porosità interstiziale, sicché favoriscono una rapida infiltrazione delle acque meteoriche laddove non coperti da coltre limoso-argillosa, spesso riscontrata.

Sebbene lo schema **T3** sia quello di gran lunga più osservato nelle stratigrafie relative all'area di interesse, nella porzione centro-meridionale dell'acquifero *Salento leccese sud-occidentale* (cfr. Figura 2-2) sembra prevalere lo schema **Top** (*Acquifero profondo con falda confinata*), caratterizzato da un acquifero profondo con caratteristiche di confinamento e dalla riscontrata assenza, almeno al momento della perforazione, di falda superficiale.

In almeno una postazione prossima al sito, infine, è riscontrabile la presenza dello schema **Tof**: *Acquifero profondo nei calcari mesozoici con falda idrica freatica*: in corrispondenza di tale verticale (relativa a stratigrafia presente nell'Archivio¹³ della n. 464/1984, cfr. par.2.2.2) non si rileva nemmeno la presenza di formazioni argillose in grado di sostenere una falda superficiale e confinare quella profonda, le formazioni calcarenitiche appoggiano direttamente sui calcari fratturati all'interno dei quali la falda profonda risulta in condizioni freatiche. Tale tipologia di punto, pertanto, fungerebbe da *sink* per la falda superficiale, annullandone di fatto la continuità laterale e la già esigua potenza.

Tenuto conto della distribuzione dei suddetti assetti idrogeologici rispetto all'area di interesse, nonché delle incertezze delle diverse fonti (stratigrafie non certificate) e degli obiettivi di conservatività del presente modello, si è scelto di non cercare di rappresentare tali (ulteriori) discontinuità di assetto, adottando su tutto il dominio modellizzato il prevalente schema T3: schematizzando dunque con un layer unico l'orizzonte sabbioso-calcarenitico permeabile sede di circolazione idrica, delimitato al top dalla superficie del piano campagna (come risultante dal DTM) e al bottom dal contatto con il tetto della formazione argillosa ricostruita per interpolazione dei punti disponibili, acquisiti da fonti verificate e attentamente valutati (cfr. par.2.2.2)

Al suddetto layer, di spessore variabile tra 18 e 3.5 m circa, sono state attribuite proprietà idrodinamiche realistiche e variabili cella per cella, ottimizzate attraverso la procedura di calibrazione (sulla base delle osservazioni reali disponibili) descritta nel par. 2.3.3

Data la morfologia del piano campagna locale e la continuità della coltre limoso-argillosa presente, la zona di ricarica principale della falda (alimentata unicamente dalle precipitazioni meteoriche) è presumibilmente situata nell'entroterra, tra Alezio e Parabita; lo spessore massimo del saturo risulta dell'ordine di una decina di metri nelle aree più interne, presso Alezio, e si riduce in direzione del mare fino ad arrivare a pochi decimetri lungo la costa. Nell'area in esame, come confermato dallo studio geologico di dettaglio e dai rilievi effettuati dalla Committenza (**E1**), la falda raggiunge lo **spessore massimo di 2 metri** nei periodi di maggiore alimentazione autunnali e invernali, mentre si deprime nel periodo estivo, sino a non essere rilevata se il periodo di assenza di precipitazioni si protrae per lungo tempo (come peraltro evidenziato dai monitoraggi dell'estate 2016).

¹³ L'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo è il risultato dell'applicazione della legge n. 464/84 istituita per permettere all'ex Servizio Geologico d'Italia, ora ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, l'acquisizione di *elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale*, rendendo obbligatoria, a chiunque eseguisse indagini nel sottosuolo, la comunicazione dei risultati acquisiti. Le informazioni sono quindi relative a studi o indagini nel sottosuolo nazionale effettuate per scopi di ricerca idrica o per opere di ingegneria civile, relative in particolare ad indagini a mezzo di scavi, perforazioni e rilievi geofisici spinti a profondità di almeno 30 m e, nel caso delle gallerie, maggiori di 200 m di lunghezza. La Puglia risulta ad oggi la seconda regione italiana, dopo la Toscana, quanto a contributo informativo, avendo riportato oltre 27000 schede informative (sulle 138000 del database nazionale). Le informazioni sono consultabili tramite webgis dedicato, all'URL <http://sgi.isprambiente.it/GMV2/>

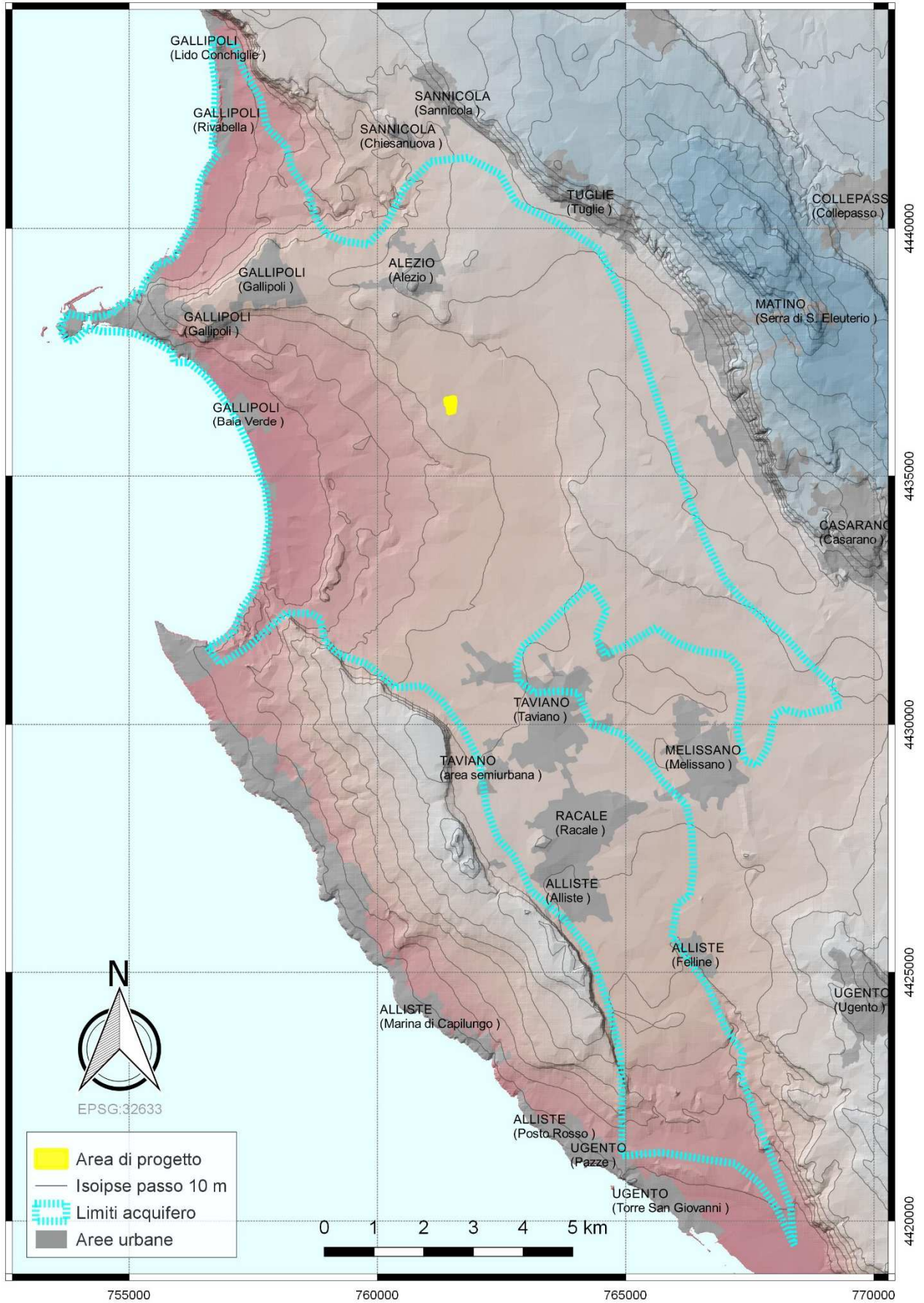


Figura 2-1 Ubicazione del sito rispetto ai limiti dell'acquifero Salento leccese sud-occidentale

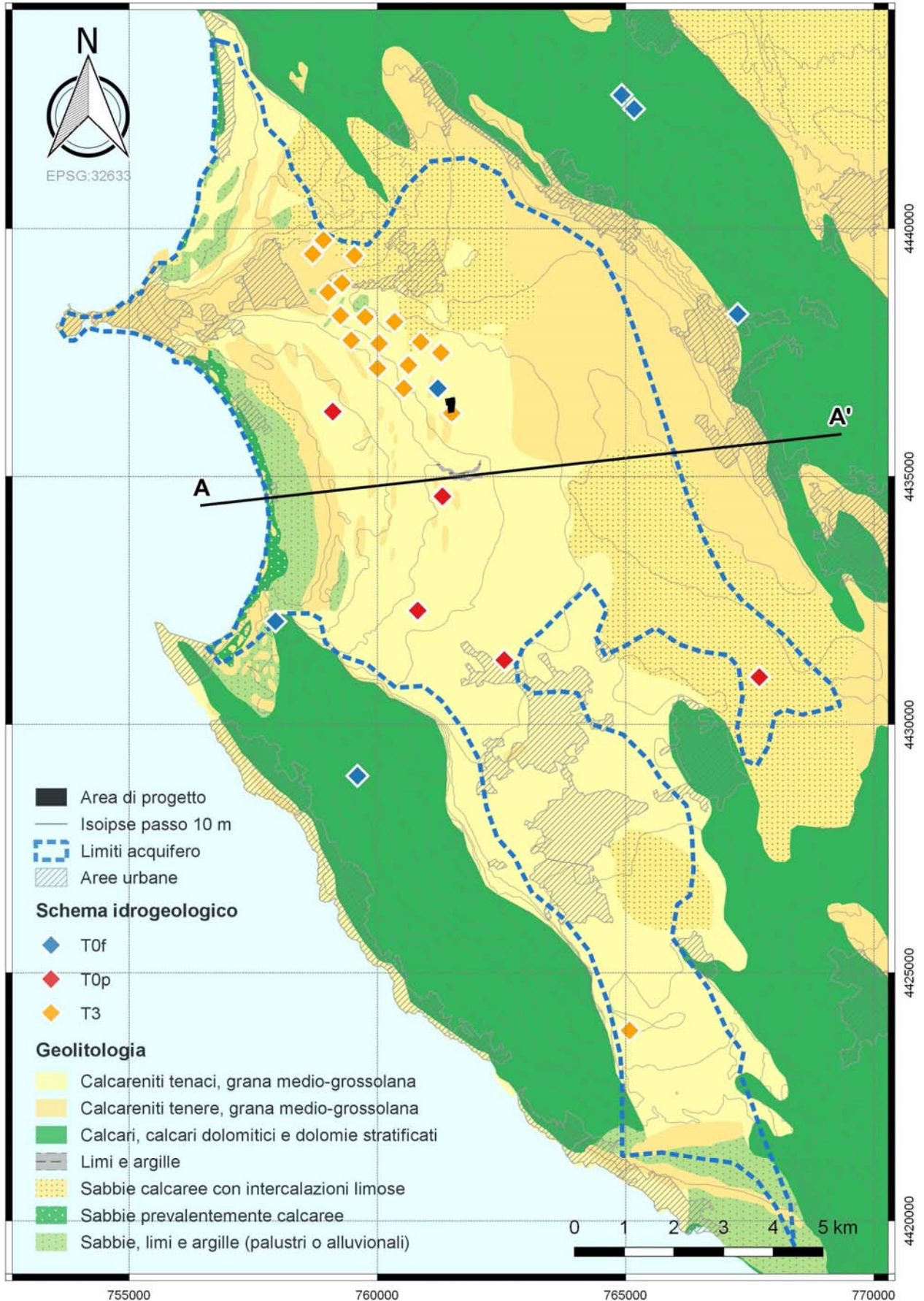


Figura 2-2 Geolitologia e schemi idrogeologici dell'acquifero Salento leccese sud-occidentale

Come si evince dalle rappresentazioni grafiche delle superfici piezometriche acquisite (tavole **G3, G3a, G3b, G3c, G3e, G3g**) ricostruite sulla base delle misurazioni di soggiacenza nei 18 pozzi disponibili:

- la direzione deflusso prevalente in tutte le campagne di misura è risultata essere da NE verso SW
- lungo la direzione di deflusso la distanza tra le isopieze, a parità di passo (1 m), diminuisce: il gradiente sembra aumentare

All'aumento del gradiente corrisponde un incremento delle perdite di carico nel moto di filtrazione, per la legge di Darcy imputabile sia ad un effettivo decremento della conducibilità idraulica della matrice lungo la direzione di deflusso (presumibilmente dovuto a variazioni laterali di litologia), sia ad una possibile restrizione della sezione di deflusso (per assottigliamento in direzione del mare); a ciò si aggiunge l'effetto della morfologia del basamento (tetto delle argille), che immerge evidentemente verso il mare a valle dell'area di progetto.

Nei dintorni dell'area di interesse si riscontra la presenza di numerosi canali di regimazione idraulica delle acque di ruscellamento superficiale nonché di drenaggio delle acque di falda superficiale; con l'eccezione del Fosso de' Samari, gran parte di essi ospitano un battente solo in occasione di precipitazioni meteoriche particolarmente intense, al punto che vengono definiti dall'Autorità di Bacino della Puglia come *corsi d'acqua episodici*. Nonostante la funzione di regimazione delle acque di ruscellamento sia chiaramente prevalente su quella di drenaggio della falda superficiale, si è prestata particolare attenzione nel rilevare le quote altimetriche e le larghezze dei canali (nonché del fosso) al fine di stimarne (conservativamente) l'inevitabile effetto di *profilatura* (drenante) sulla morfologia della superficie piezometrica di massimo; come descritto nel par. 2.2.3, tali elementi sono stati modellizzati con condizioni al contorno di tipo *Drain*, con proprietà geometriche e fisiche variabili lungo gli assi principali (interpolate linearmente tra i vertici dei rispettivi shapefile di tipo polilinea).

In definitiva, il modello descritto nel presente documento si propone l'obiettivo di stimare conservativamente tipologia ed ampiezza degli effetti idrogeologici stabilizzati dovuti allo scavo e alle opere di protezione idraulica previsti dal progetto di coltivazione mineraria, attraverso le seguenti assunzioni e ipotesi:

- falda continua, in condizioni di massimo piezometrico, con caratteristiche di deflusso (direzione e gradiente) coerenti con quelle note e rilevate; ricarica simulata con condizioni al contorno (cfr. cap. 2.3) di tipo *Constant Head* (CHD) imposte a monte del dominio (estrapolate dalle ricostruzioni piezometriche disponibili); effetti del reticolo idrografico locale simulati con condizioni al contorno di tipo *Drain* (DRN) (cfr. par. 2.2.3,)
- morfologia e spessori dell'orizzonte sabbioso-calcareo che ospita la falda coerenti con l'andamento della superficie topografica e delle sezioni idrogeologiche acquisite (cfr. Figura 2-3), ricostruiti a partire dal DTM regionale (di passo 8 m) e sulla base dell'interpolazione lineare dei contatti con la formazione argillosa, come risultanti da stratigrafie acquisite e selezionate (cfr. par.2.2.2)
- caratteristiche idrauliche della formazione permeabile variabili con continuità cella per cella, calibrate in stazionario sul set di dati reali di massimo piezometrico (cfr. par. 2.3.1), con risultati della calibrazione soddisfacenti per gli standard di modellizzazione e coerenti con i valori di letteratura, cfr. par. 2.3.3 e 0).

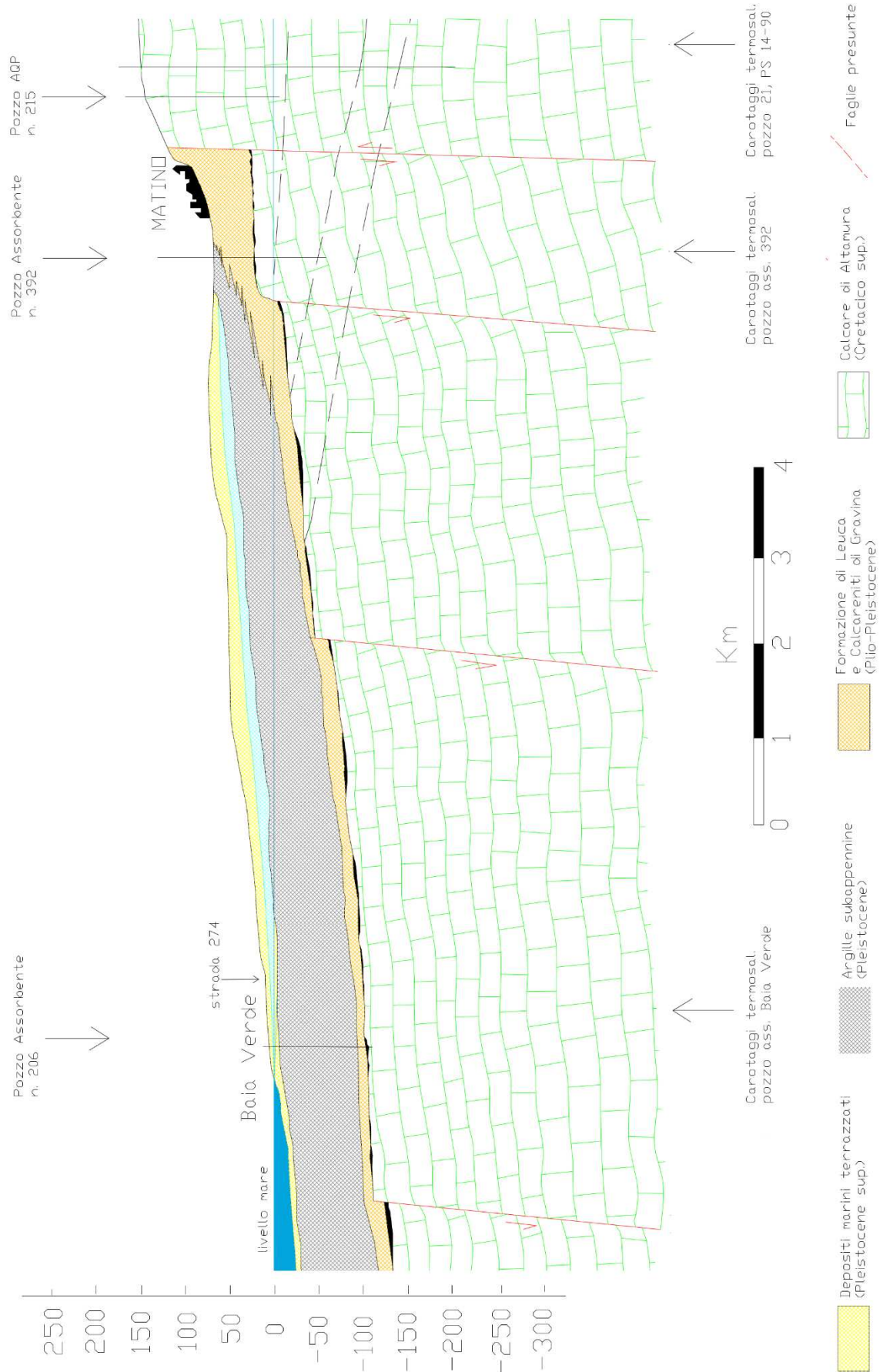


Figura 2-3 Sezione idrostratigrafica A-A', passante presso l'area di interesse (cfr. Figura 2-2)

2.2 Parametrizzazione del dominio di studio

2.2.1 Active domain e discretizzazione areale

L'area interessata dal progetto di coltivazione mineraria è ubicata a circa 2.2 km a sud del comune di Alezio (LE), in località L'Arpa, interamente compresa nelle particelle catastali 50 (parte), 51, 52, 53 e 112 del foglio di mappa 17 dello stesso comune salentino; nella Carta Tecnica Regionale pugliese in scala 1:5000 del 2006 essa ricade nell'elemento 526131 *Masseria Goline* del foglio 526 *Nardò*.

Al fine di minimizzare i disturbi indotti dalle condizioni al contorno, tenuto conto degli obiettivi dello studio e della buona pratica nel campo della modellistica idrogeologica, il dominio da modellizzare è stato esteso ad un'area rettangolare di 5.2 km², centrata sul sito di interesse, ruotata di 45° rispetto al Nord e avente lati di lunghezza 2.6 km lungo la direzione prevalente di deflusso della falda, da NE a SW, e 2.0 km lungo la direttrice NW-SE (cfr. Figura 2-4).

Nel sistema di riferimento WGS84/UTM33 (EPSG:32633), le coordinate dei vertici del dominio sono:

- **A:** X = 759853.4 m; Y = 4436243.7 m;
- **B:** X = 761267.6 m; Y = 4434829.5 m;
- **C:** X = 763106.1 m; Y = 4436667.9 m;
- **D:** X = 761691.9 m; Y = 4438082.2 m

Gran parte del dominio modellizzato (4.63 km², pari a circa l'89 %), compresa interamente l'area oggetto di intervento e la sua valle idrogeologica, rientra nei limiti amministrativi del Comune di Alezio; il resto del dominio (0.57 km²), a monte dell'area di maggiore interesse, rientra nel comune di Parabita.

Il dominio di studio è stato inizialmente discretizzato con una griglia uniforme a maglia quadrata di lato 10 m; al fine di meglio definire le proprietà specifiche per l'area a maggiore densità di dati, la griglia iniziale è stata infittita in prossimità dell'area di interesse, in particolare in corrispondenza del tracciato previsto per le opere di protezione idraulica (diaframma impermeabile e dreno verticale esterno).

Le suddette operazioni di *refining* sono state effettuate sfruttando la possibilità di definire griglie *unstructured* offerta dalla nuova versione del codice utilizzato (MODFLOW-USG), applicando alle zone di interesse un per un raffinamento di tipo *quadtree* di livello 4 (ogni cella da 10 m x 10 m è stata suddivisa in 64 celle quadrate da 1.25 m x 1.25 m); la calibrazione e le simulazioni degli scenari sono state dunque effettuate su una griglia finale non uniforme caratterizzata da un numero complessivo di 161621 celle, di larghezza variabile tra un massimo di 10 m x 10 m, nelle zone periferiche del modello, e un minimo di 1.25 m x 1.25 m, nelle aree di maggiore interesse, come rappresentato in Figura 2-5.

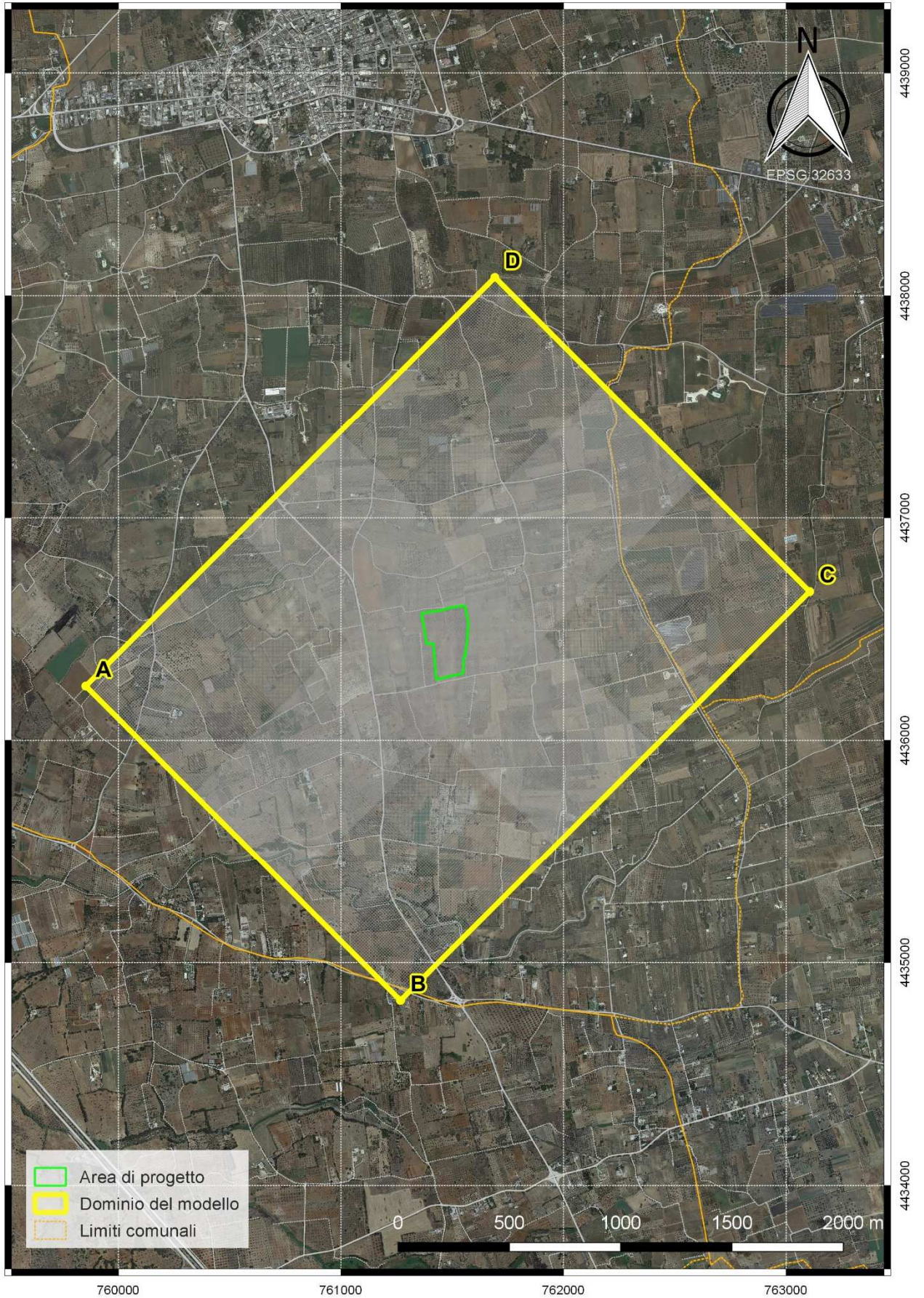


Figura 2-4 Dominio modellizzato e area di progetto su ortofoto regionale 2016

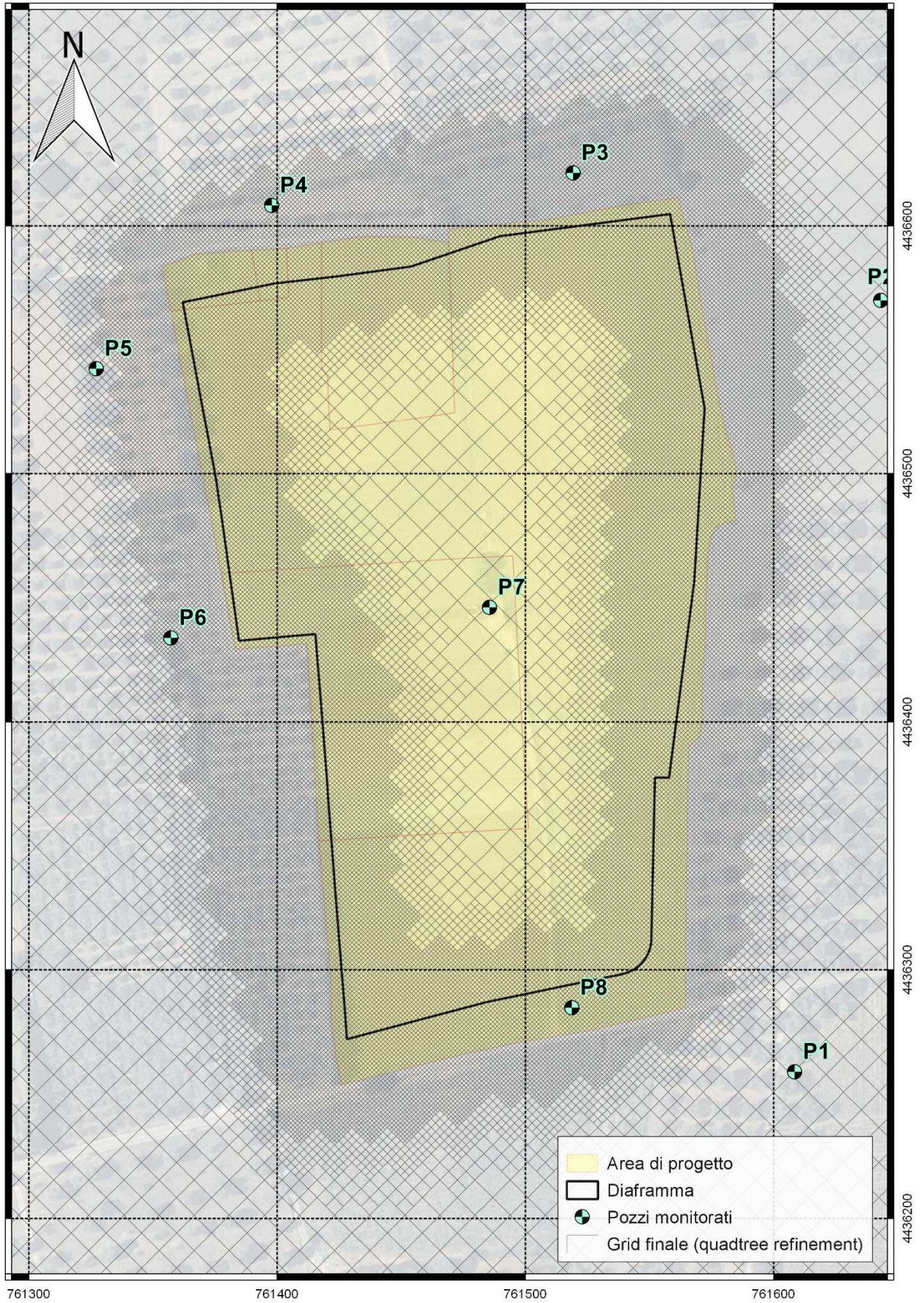


Figura 2-5 Dettaglio della discretizzazione areale nella zona di interesse (quadtree refinement)

2.2.2 Discretizzazione verticale

L'assetto idrogeologico dell'acquifero di interesse è stato tradotto nel modello numerico adottando una discretizzazione verticale che prevede due layer di spessore variabile: il primo, rappresentativo dell'orizzonte permeabile sede di circolazione idrica e il secondo, sottostante, definito per sole ragioni di stabilità numerica e di fatto caratterizzato da condizioni di *no flusso*.

Per rappresentare al meglio l'effimera circolazione idrica sotterranea nel layer 1, caratterizzata da un modesto spessore saturo e da una morfologia della tavola d'acqua sostanzialmente coerente con l'andamento della superficie topografica, tenuto anche conto che l'esiguo spessore del materiale permeabile sovrastante le argille è interessato da trasgressioni litologiche e incisioni morfologiche del p.c., si è prestata particolare attenzione alla ricostruzione dello spessore permeabile potenzialmente sede di falda, stimandolo per differenza tra la quota del DTM regionale e quella del tetto della formazione argillosa che sostiene la falda oggetto di studio, come desumibile da informazioni stratigrafiche ritenute di sufficiente e confrontabile qualità.

A tal fine, in aggiunta alle informazioni riportate nello studio geologico commissionato dalla Committenza (**E1**), sono state acquisite e valutate criticamente ulteriori informazioni stratigrafiche relative a vicini pozzi pubblici o privati completati nella falda profonda, focalizzando l'attenzione sugli orizzonti più superficiali incontrati in fase di perforazione e descritti nella documentazione (sebbene con terminologie e accuratezze variabili); si è dunque costruito un database di **38** record corrispondenti ad altrettante stratigrafie georiferite e ritenute di interesse, provenienti dalle seguenti fonti:

- Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo¹⁴ istituito ai sensi della legge 4 agosto 1984, n. 464 (*Norme per agevolare l'acquisizione da parte del Servizio geologico della Direzione generale delle miniere del Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato di elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale*): **8** stratigrafie di pozzi profondi da 38 a 105 m, pubblici e privati, realizzati tra il 1990 e il 2004, riportanti anche indicazione dei livelli acquiferi incontrati in perforazione.
- Geoambiente: dallo studio E1, finalizzato alla definizione degli aspetti litologici, idrogeologici e geotecnici del progetto di coltivazione, si è acquisita la stratigrafia del sondaggio appositamente realizzato nel 2016, nonché le informazioni sulla profondità del tetto delle argille¹⁵ desumibili dalla descrizione dei 18 pozzetti utilizzati per il monitoraggio dei livelli di falda;
- Ex Ente Irrigazione (EI) Puglia e Lucania: **11** stratigrafie di pozzi profondi da 5 a 100 m, di cui 9 realizzati nel 1963¹⁶, riportanti anche indicazione dei livelli acquiferi incontrati in perforazione; alcuni di questi pozzi sono tutt'ora in funzione e gestiti dal locale Consorzio di Bonifica Ugento e Li Foggi (distretto irriguo *Brile Trappeto Raho*).

¹⁴ L'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo è il risultato dell'applicazione della legge n. 464/84 istituita per permettere all'ex Servizio Geologico d'Italia, ora ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, l'acquisizione di *elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale*, rendendo obbligatoria, a chiunque eseguisse indagini nel sottosuolo, la comunicazione dei risultati acquisiti. Le informazioni sono quindi relative a studi o indagini nel sottosuolo nazionale effettuate per scopi di ricerca idrica o per opere di ingegneria civile, relative in particolare ad indagini a mezzo di scavi, perforazioni e rilievi geofisici spinti a profondità di almeno 30 m e, nel caso delle gallerie, maggiori di 200 m di lunghezza. La Puglia risulta ad oggi la seconda regione italiana, dopo la Toscana, quanto a contributo informativo, avendo riportato oltre 27000 schede informative (sulle 138000 del database nazionale). Le informazioni sono consultabili tramite webgis dedicato, all'URL <http://sgi.isprambiente.it/GMV2/>

¹⁵ Sebbene indicato che i pozzi romani monitorati risultino scavati nelle argille, al fondo, a mo' di cisterna, per circa mezzo metro, si è assunto conservativamente uno spessore permeabile pari alla profondità del pozzi come riportata nelle tavole G3

¹⁶ *Ricerche idrogeologiche eseguite in territorio di Gallipoli con l'esecuzione di 9 pozzi*, Progetto Arch. Cassa n. 5650 Conc. n. 5287 del 20/12/1963 – *Corografia e caratteristiche dei pozzi*

Il database così costruito, allegato alla presente relazione in formato shapefile e georiferito nel sistema EPSG 32633 (WGS84/UTM33), è caratterizzato dai seguenti campi:

- **ID**: identificativo della postazione come indicato dalla fonte di acquisizione;
- **FONTE**: ente o società responsabile dell'informazione;
- **ANNO**: anno di documentazione dell'opera o del rilievo, come (e se) riportato nella scheda acquisita;
- **ZTP**: quota altimetrica della testa pozzo, come (e se) riportata nella scheda acquisita, in m s.l.m.
- **ZPC_DTM**: quota altimetrica del piano campagna, come risultante da verifica con DTM regionale di passo 8m, in m s.l.m.
- **DELTA_Z**: differenza tra ZPC_DTM e ZTP, utilizzata per la stima della quota del tetto delle argille (e anche come verifica di qualità per le postazioni di dubbia ubicazione);
- **PROF**: profondità della perforazione, come (e se) riportata nella scheda acquisita, in m
- **th_COLTRE**: spessore dell'eventuale coltre limosa superficiale sovrastante lo strato calcarenitico permeabile, in m, come (e se) rilevabile dalla stratigrafia acquisita;
- **th_CALCAR**: spessore complessivo dello strato calcarenitico permeabile, in m, come (e se) rilevabile dalla stratigrafia acquisita;
- **th_CLAY**: spessore complessivo dello strato argilloso calcarenitico permeabile, in m, come (e se) rilevabile dalla stratigrafia acquisita;
- **FALDA**: indicatore (SI/NO) della presenza o meno di falda freatica nel corso della perforazione o del rilievo
- **s_FALDA**: soggiacenza della falda, se rilevata e riportata sulla scheda acquisita, in m.
- **H_FALDA**: quota assoluta approssimativa della falda, se rilevata e riportata sulla scheda acquisita, in m. s.l.m.
- **NOTE**: ulteriori informazioni e giudizio complessivo di qualità
- **PESO**: valore numerico variabile da 0 a 1 attribuito al record in base alla qualità dell'informazione, utilizzato come peso nella procedura di interpolazione della superficie del basamento dell'acquifero (0 se l'informazione è stata ritenuta inutilizzabile)
- **Z_BASE**: valore utilizzato per la ricostruzione del basamento

L'ubicazione di (quasi) tutte le postazioni rispetto al dominio modellizzato è riportata in Figura 2-6; per ciascuna postazione sono riportati gli identificativi (in nero grassetto) e gli spessori dell'orizzonte permeabile desumibile dalla relativa stratigrafia (in rosso, espresso in metri), distinti per fonte;

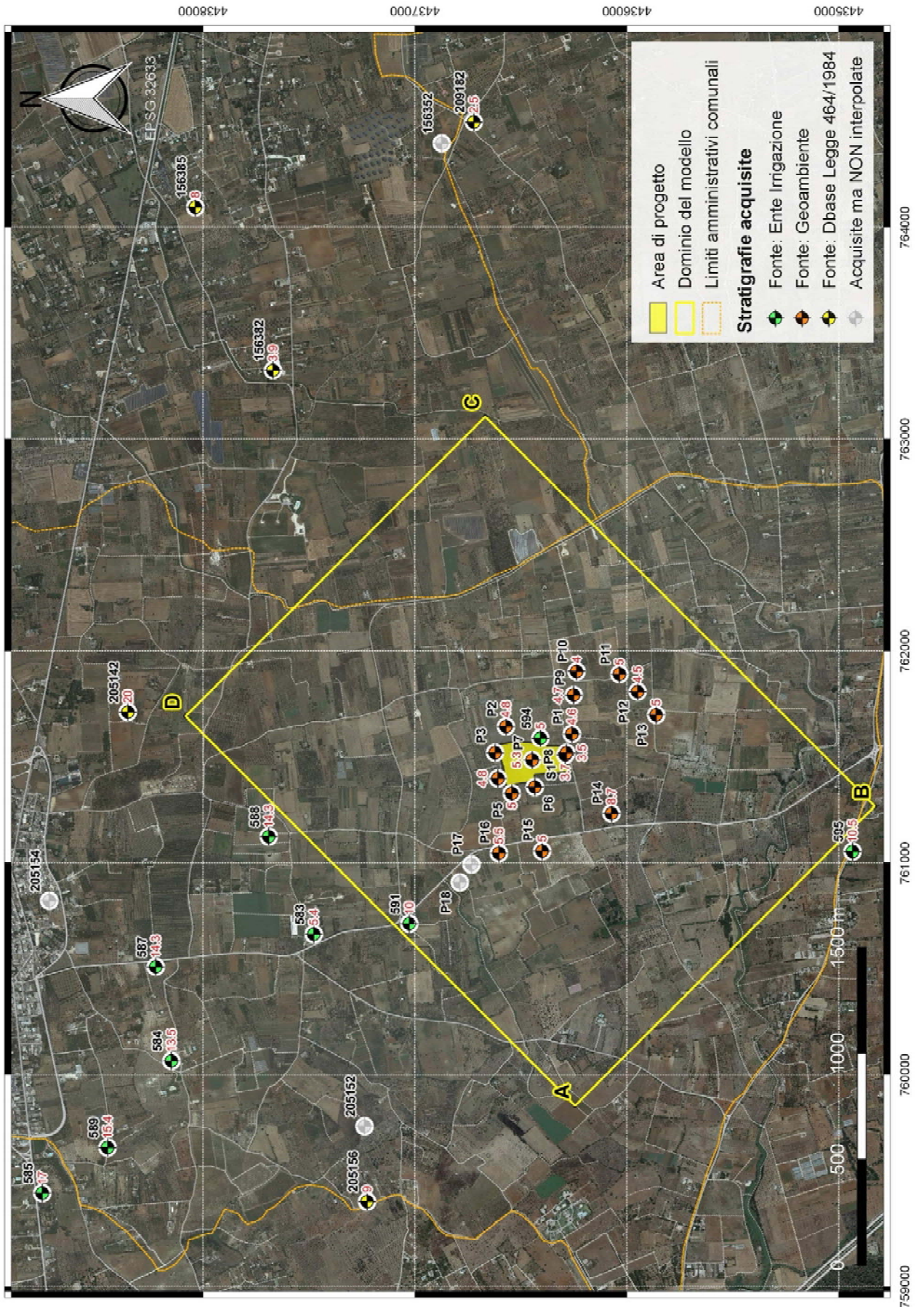


Figura 2-6 Ubicazione e ID delle stratigrafie acquisite per la ricostruzione del basamento della falda

A titolo di esempio, in Figura 2-7 è rappresentata la colonna litostratigrafica relativa al sondaggio EI **594**, risultato prossimo all'area di interesse; come si evince dalla figura, per quanto la terminologia usata sia sensibilmente differente, la rappresentazione dell'orizzonte superficiale permeabile è coerente quantitativamente e qualitativamente con la successione rilevata durante la perforazione del sondaggio geognostico da 26.5 m sul sito di progetto¹⁷, eseguita il 31 maggio 2016 a supporto dell'apposito studio geologico (elaborato **E1** e foto delle cassette catalogatrici), ovvero:

- da **0.0 m** a **0.8 m**: coltre colluviale limoso-argillosa di colore brunastro
- da **0.8 m** a **1.9 m**: calcareniti ricristallizzate di colore avana, fratturate (cappellaccio)
- da **1.9 m** a **3.4 m**: calcareniti organogene ocracee, ben cementate e tenaci (carparo)
- da **3.4 m** a **3.7 m**: sabbie grossolane di colore giallastro
- da **3.7 m** a **12.2 m**: limi argillosi di colore ocraceo con fiammate grigio-verdastre
- da **12.2 m** a **14.0 m**: limi argillosi di colore grigio-verdastro con fiammate ocracee
- da **14.0 m** a **16.0 m**: limi sabbiosi di colore grigio verdastro
- da **16.0 m** a fondo foro: limi sabbiosi di colore grigio-azzurro

La suddetta successione litostratigrafica è peraltro generalizzata nel Piano di coltivazione (cfr. doc. **E2**), come di seguito descritto (dall'alto verso il basso):

- coltre colluviale limoso-argillosa di colore brunastro (terreno vegetale): spessore di circa **0.8 m**;
- calcareniti organogene a grana medio-grossolana, di colore giallastro-ocraceo, ben cementate e tenaci (carparo): spessore circa **3.0 m**;
- limi argillosi di colore ocraceo o grigio-verdastro: spessore di circa **9.3 m**;
- limi sabbiosi di colore grigio-verdastro o grigio-azzurro: spessore di circa **12.7 m**

Coerentemente con la successione descritta, il modello implementato prevede un unico layer di spessore variabile, definito a tetto dal DTM regionale ricampionato sulle celle della griglia, e a letto dalla superficie corrispondente al contatto con i limi argillosi oggetto di coltivazione, come risultante dall'interpolazione lineare di 33 dati selezionati sui 38 acquisiti.

Una confronto grafico tra le due superfici importate nel modello è proposto in Figura 2-8 a pag. 24.

¹⁷ nella posizione di coordinate N 4436290.30 ed E 761509.39 nel SR WGS84/UTM33; intestato ad una quota di P.C. di circa 42 s.l.m., è stato spinto fino alla quota di circa 15.50 m s.l.m.

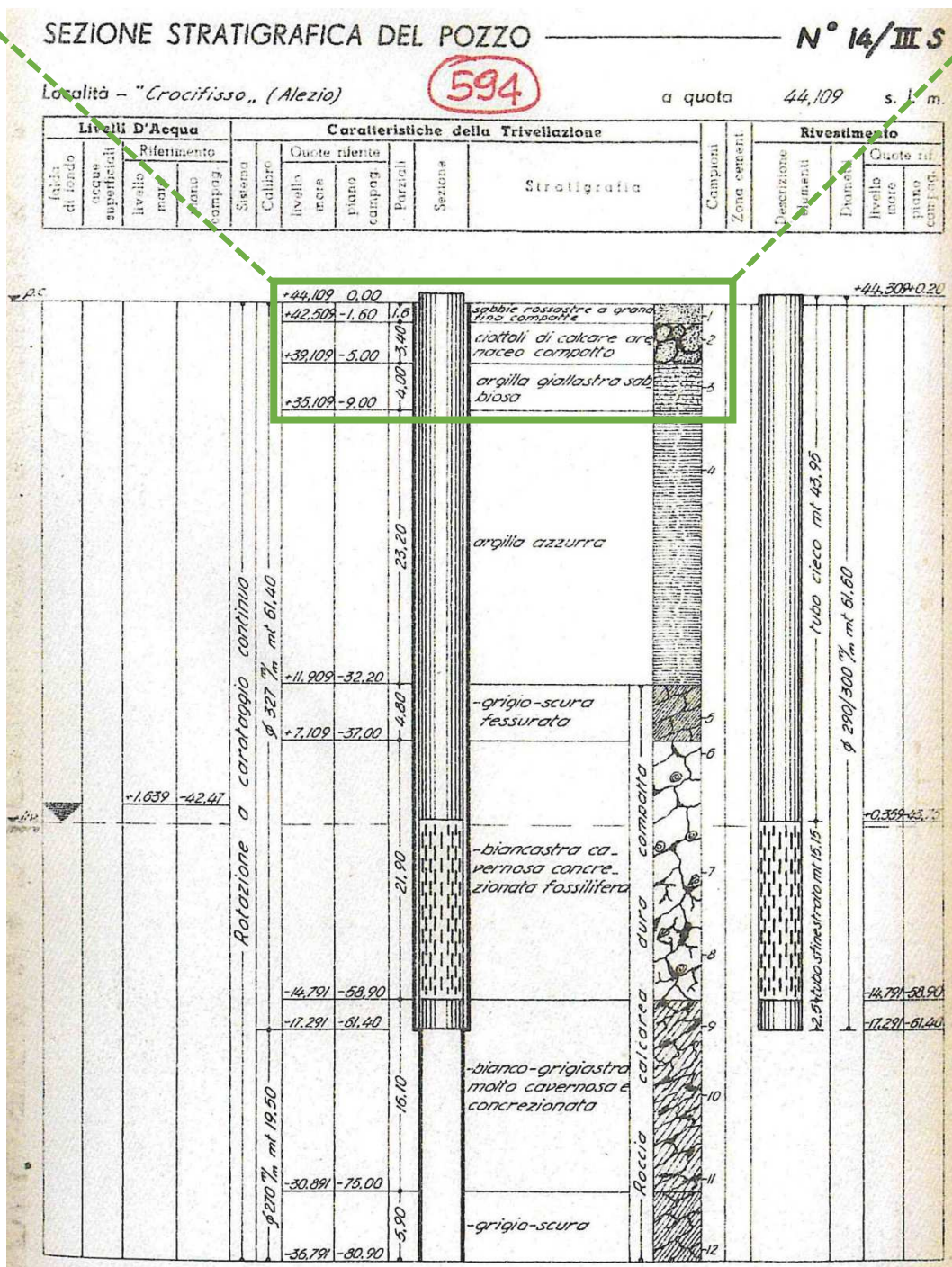


Figura 2-7 Dettaglio della stratigrafia del pozzo El 594 prossimo all'area di progetto

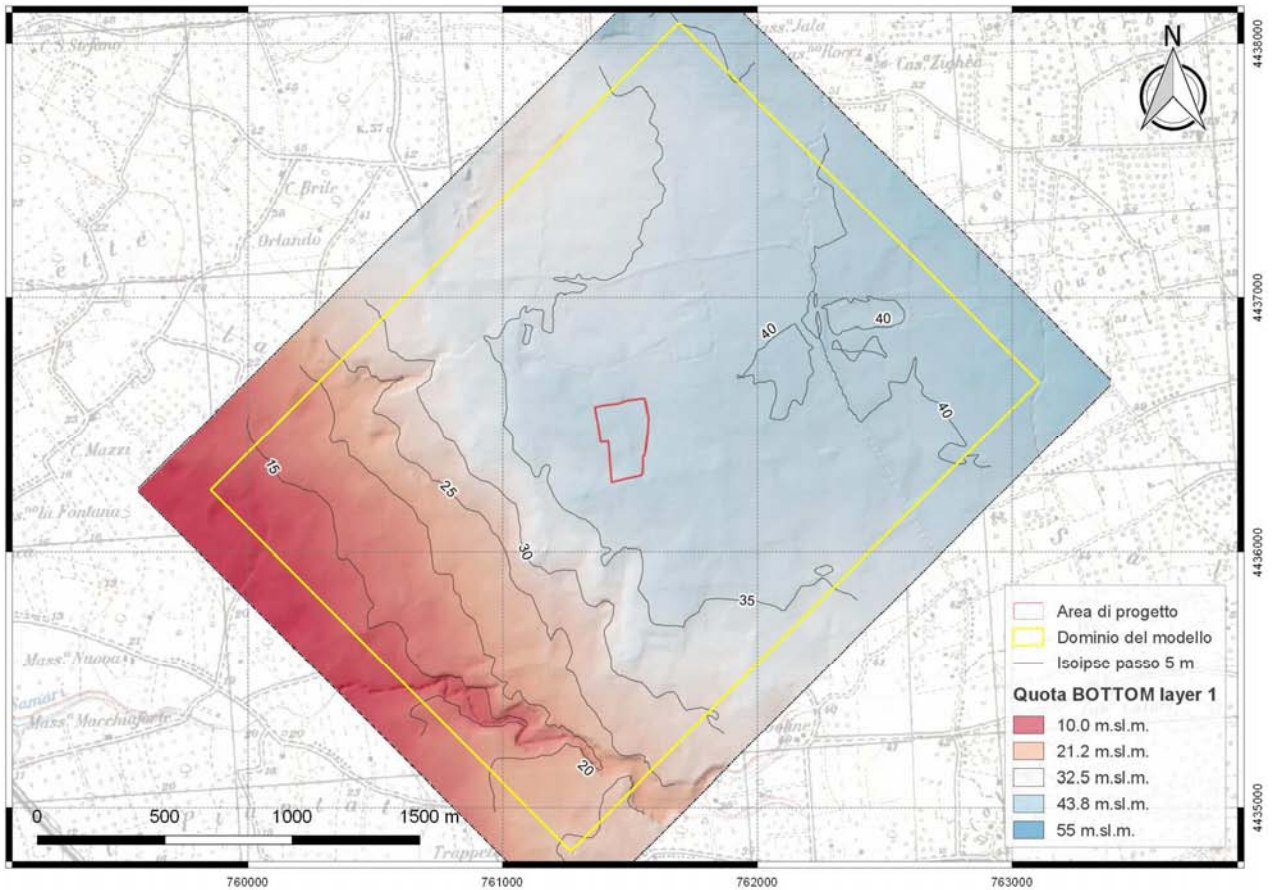
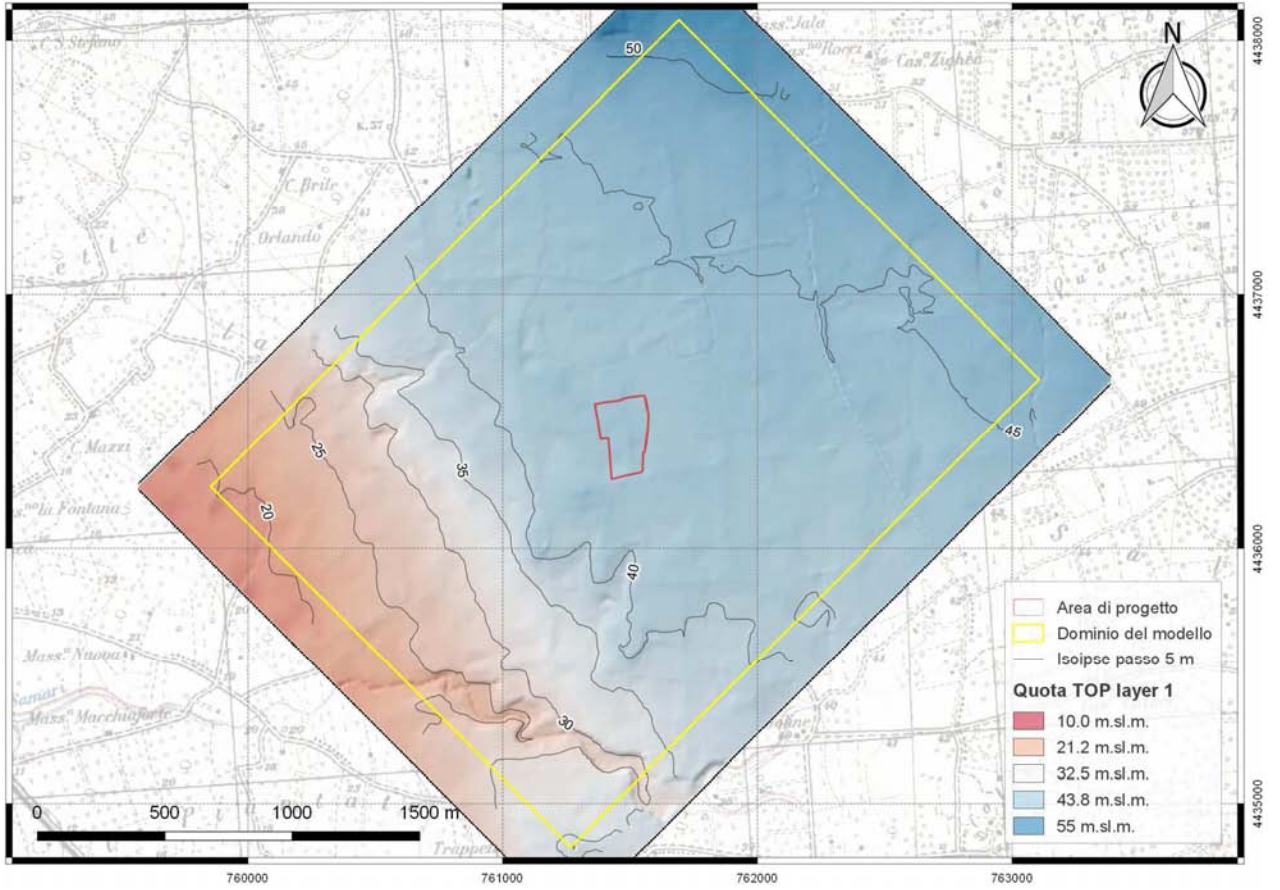


Figura 2-8 Confronto tra le superfici del tetto e del letto dell'orizzonte permeabile modellizzato

2.2.3 Morfologia e idrografia

La morfologia del contesto nel quale il sito è inserito risulta fortemente condizionata dai ripetuti episodi di ingressione marina causati dalle oscillazioni del livello marino verificatesi nel Quaternario (cfr. E1): il progressivo ritiro del mare è testimoniato dalla presenza di diversi cordoni di dune fossili disposti parallelamente all'attuale linea di costa (cfr. Tav. G2), nonché di vari gradini morfologici correlabili ad antiche linee di costa. Come si evince dal DTM regionale (elemento 526131), la morfologia dell'area di progetto e di quella immediatamente a monte risulta subpianeggiante, con quote del piano di campagna comprese tra 42.5 e 43.7 m s.l.m. e pendenze mai superiori al 2.5%; solo a valle, a partire da quote di 35-40 m s.l.m., la superficie topografica si abbassa progressivamente in direzione della costa, con pendenze localmente anche piuttosto accentuate.

Di fondamentale importanza, ai fini dell'impostazione del presente modello di flusso, è la presenza all'interno del dominio modellizzato degli elementi idrogeomorfologici rilevati in **G2** (Carta geomorfologica) e desumibili dal foglio 526 *Nardò* della *Carta Idrogeomorfologica* predisposta dall'Autorità di Bacino della Puglia (2014):

- forme di modellamento fluviale, costituite da
 - ripe di erosione fluviale
 - cigli di sponda fluviale
- elementi del reticolo idrografico, tutti classificati come *corsi d'acqua episodici*, costituiti da canali cdi regimazione idraulica delle acque di ruscellamento superficiale nonché di drenaggio delle acque di falda superficiale; di diversa larghezza e profondità, i più importanti corrispondono alle suddette forme di modellamento fluviale e sono situati sia a valle sia a monte dell'area di interesse; in particolare, il *Fosso de' Samari*, che incide profondamente (anche di 4-5 m) la locale superficie, operando presumibilmente da dreno per la falda superficiale quando questa è in condizioni di alto piezometrico.

Considerata l'esiguità dello spessore della formazione calcarenitica e l'evidente importanza del reticolo idrografico nella regolazione del flusso oggetto di studio, nell'impostare il modello numerico si è ritenuto di schematizzare i suddetti canali con condizioni al contorno di tipo misto ed *Head-dependent (DRAIN)*, attribuendo alla caratteristica *Hb (boundary head)*, delle singole celle la locale quota topografica del fondo del canale (ipotizzata a 30 cm dalla quota restituita dal DTM).

In particolare, sono stati modellizzati con differenti caratteristiche geometriche e idrodinamiche tre distinti corsi d'acqua episodici, anche sulla base delle differenze evidenziate da una ricognizione fotografica di massima (cfr. viste ubicate in Figura **2-9** e presentate dalla Figura **2-10** alla Figura **2-15**), come di seguito sintetizzato:

1. **DRN1** (Fosso de' Samari), circa 1 km a SW del sito, a valle idrogeologica, cfr. viste D1-1 (Figura **2-10**) e D1-2 (Figura **2-11**): modellizzato con condizione al contorno di tipo *drain* introdotta con 23 segmenti ad *Hb* variabile linearmente tra 30 e 19 m s.l.m (larghezza 4 m, spessore 1 m e K_v pari a $5 \cdot 10^{-4}$ m/s)
2. **DRN2** (Canale 2), a N e a W del sito, cfr. viste D2-1 (Figura **2-12**), D2-2 (Figura **2-13**) e D2-3 (Figura **2-14**), modellizzato con condizione di tipo *drain* introdotta con 24 segmenti ad *Hb* variabile linearmente tra 44 e 18 m s.l.m (larghezza 1.5 m, spessore 0.5 m e K_v pari a $5 \cdot 10^{-4}$ m/s)
3. **DRN3** (Canale 2), a NE del sito, cfr. vista D3-1 (Figura **2-15**), modellizzato con condizione di tipo *drain* introdotta con 14 segmenti ad *Hb* variabile linearmente tra 48 e 41 m s.l.m (larghezza 2.0 m, spessore 0.5 m e K_v pari a $5 \cdot 10^{-4}$ m/s).

In Figura **2-16**, infine, sono riportate le quote medie (media tra le quote dei due estremi) per ognuno dei segmenti in cui sono state scomposte le tre condizioni di tipo Drain considerate, sullo sfondo della superficie topografica e della piezometria di riferimento di giugno 2016 (desunta da G3).

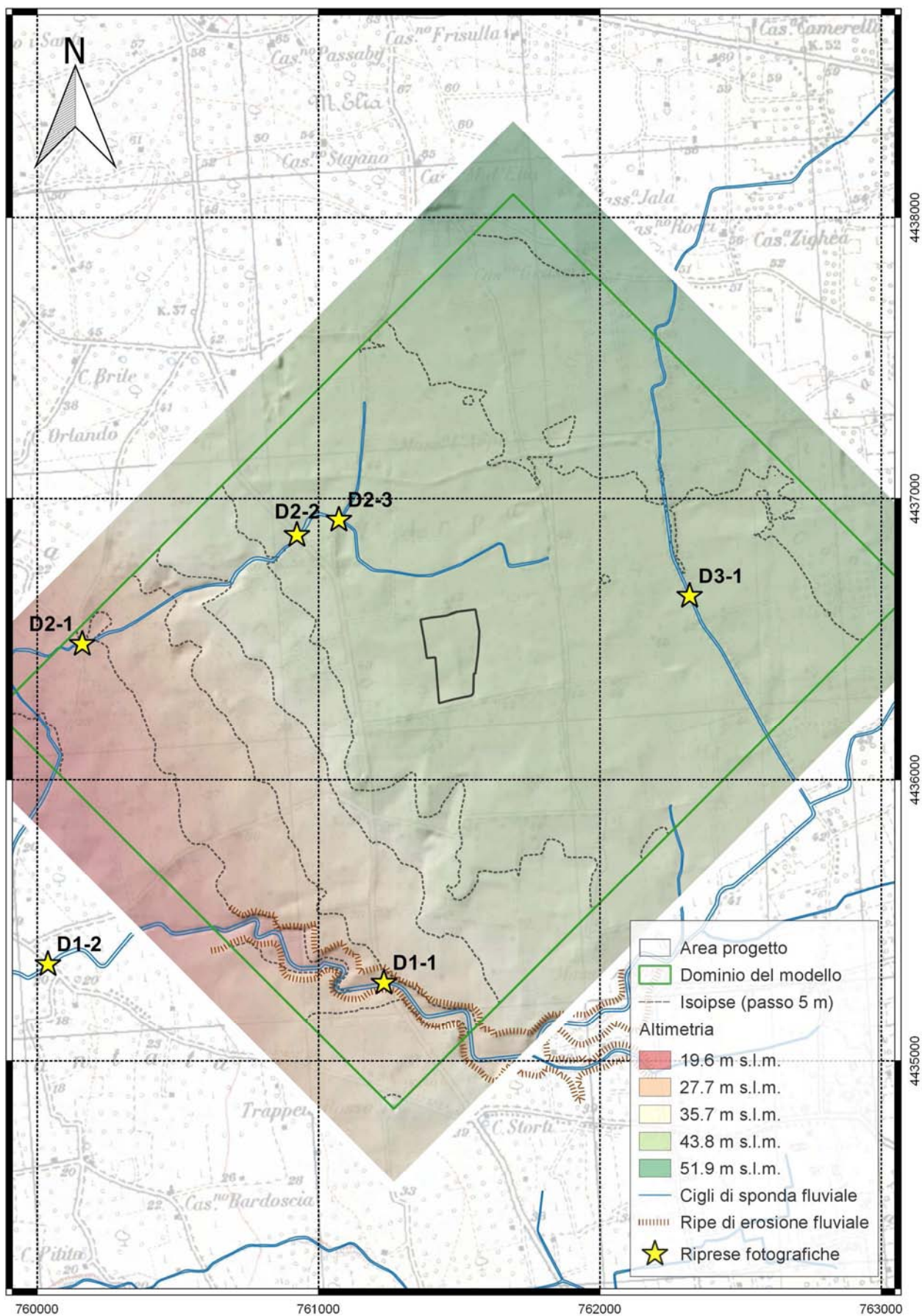


Figura 2-9 Digital Terrain Model e principali elementi morfologici nel dominio modellizzato



Figura 2-10 Vista D1-1 del Fosso de' Samari, circa 1.0 km a S-SW dall'area di progetto



Figura 2-11 Vista D1-2 del Fosso de' Samari, circa 1.7 km a SW dall'area di progetto



Figura 2-12 Vista D2-1 del canale 2, circa 1.2 km a W dall'area di progetto



Figura 2-13 Vista D2-2 del canale 2, circa 500 m a NW dall'area di progetto



Figura 2-14 Vista D2-3 del canale 2, circa 450 m a NW dall'area di progetto



Figura 2-15 Vista D3-1 del canale 3, circa 750 m ad E dell'area di progetto

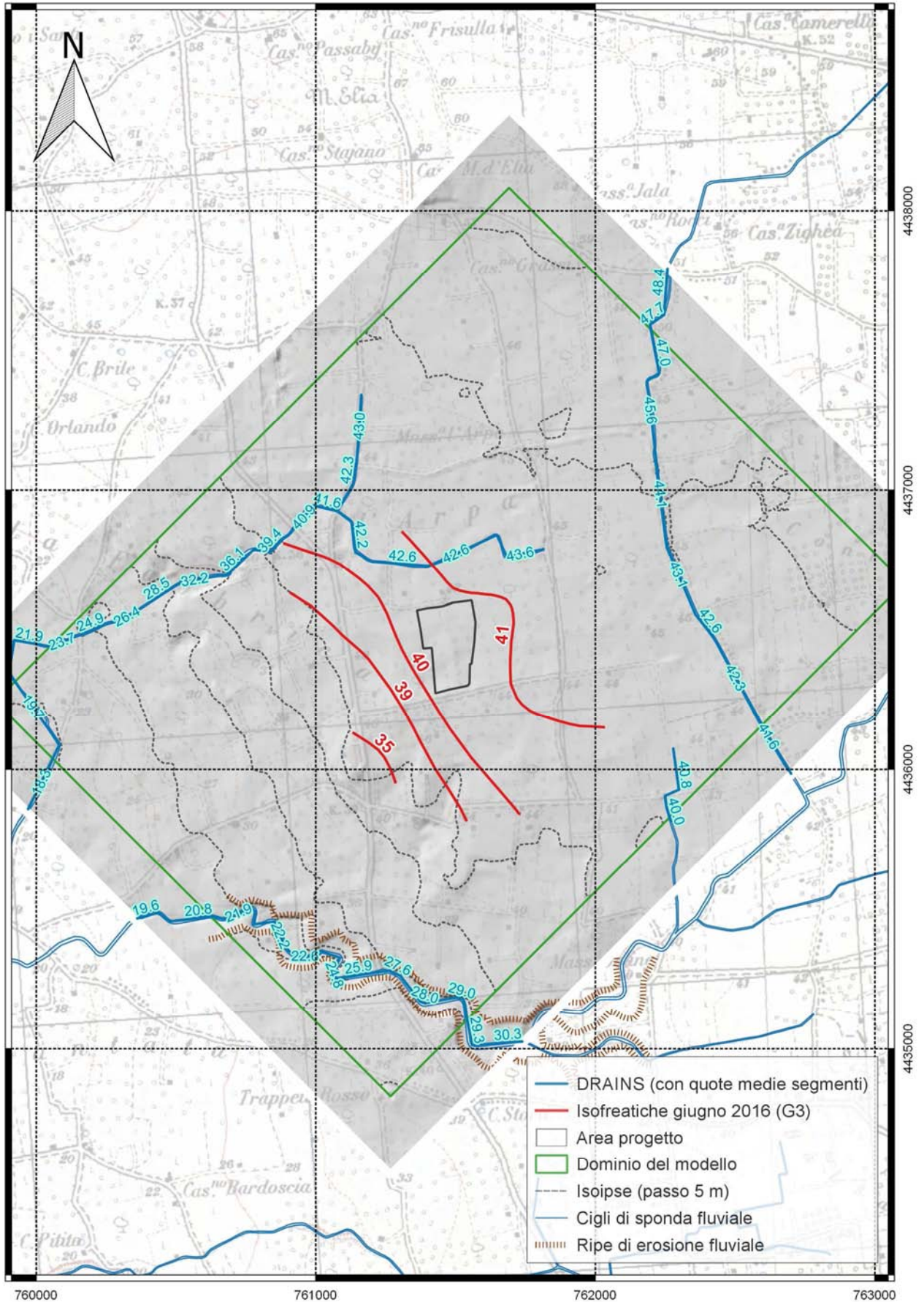


Figura 2-16 C.C. di tipo DRAINS e quote medie segmenti modellizzati vs isofreatiche giugno 2016

2.2.4 Caratteristiche idrodinamiche

Come riassunto in **E1** (par. 7.3) e rappresentato graficamente in **G1**, le formazioni affioranti nell'area in esame e/o costituenti la matrice solida degli acquiferi della locale successione idrostratigrafica, presentano caratteristiche di permeabilità diverse, in base alle quali possono essere ricondotte a tre categorie:

- permeabili per fessurazione e carsismo;
- praticamente impermeabili
- permeabili per porosità interstiziale

Le rocce calcareo-dolomitiche (*Calcarea di Altamura*) del basamento mesozoico che ospita la locale falda profonda (non oggetto di modellizzazione in quanto isolata dalle soprastanti argille, cfr. par. 2.1), sono caratterizzate da un'elevata permeabilità di tipo secondario, cioè indotta da fenomeni tettonici o di dissoluzione carsica: caratterizzate da un diffuso stato di fessurazione e da un carsismo a luoghi piuttosto spinto, presentano conducibilità idraulica media elevata, dell'ordine di $10^{-4} \div 10^{-5}$ m/s.

Alla categoria dei terreni impermeabili ($K < 10^{-10}$ m/s) vanno ascritti i terreni limoso-argillosi della formazione delle Argille Subappennine che costituiscono il materiale da coltivare nella cava e che affiorano su porzioni trascurabili del dominio modellizzato; prelevati nel corso di apposito sondaggio geognostico, due campioni di tale formazione sono stati sottoposti in laboratorio a prove di permeabilità a carico variabile in cella edometrica, da cui è risultato un valor medio di K pari a $5.4 \cdot 10^{-11}$ m/s (cfr. par. 7.3.2 del doc. E1, *Prove di permeabilità*)

Nella categoria delle formazioni permeabili (prevalentemente) per porosità interstiziale rientrano i terreni sabbioso-calcarenitici pleistocenici appartenenti ai *Depositi marini terrazzati* che ospitano la falda oggetto di studio: sulla base di dati di letteratura in accordo con le considerazioni riportate in E1, l'elevata porosità efficace conferisce a tali depositi una discreta permeabilità, che può esprimersi con valori di conducibilità idraulica K compresi tra 10^{-5} e 10^{-6} m/s nel caso delle calcareniti, e dell'ordine di 10^{-6} m/s per le sabbie.

Come descritto nella documentazione di riferimento, il 22 maggio e il 19 giugno 2017 sono stati effettuati due test sui pozzi P7 e P8, ubicati nell'area di progetto, inserendo in ciascun pozzo il pescatore di una pompa ed emungendo una portata di 2 l/s sino a completo svuotamento, con l'intenzione di rilevare al contempo, e nelle successive 48 h, tempi e livelli della risalita nei pozzi di prova e tempi e livelli nei pozzi circostanti; si sottolinea, tuttavia, che a causa dell'esiguo spessore saturo tipico del periodo di magra i test non hanno consentito alcuna interpretazione in quanto

- non si è registrata alcuna significativa variazione di livello nei pozzi circostanti quello di prova (cfr. Tav. G3d, G3f);
- non si è registrata alcuna risalita, seppur minima, nei due pozzi svuotati.

Si può dunque affermare che in periodi di magra (quale quello di prova) i pozzi locali completati nella formazioni di interesse svolgono esclusivamente funzione di cisterna, conservando un battente minimo (in corrispondenza del fondo scavato in argilla, costituito da acqua immagazzinata precedentemente).

Da ulteriore attendibile documentazione tecnica è comunque possibile stimare conservativamente le principali caratteristiche idrodinamiche della formazione di interesse: in particolare, nella relazione geologica allegata al vecchio progetto di una discarica RSU tra Gallipoli ed Alezio (cfr. **E13**), sono descritte modalità esecutive e di interpretazione dei seguenti test in situ, eseguiti su un pozzo singolo completato nell'acquifero calcarenitico di interesse (ID n.26), in presenza di spessore saturo significativo (pari a 3.7 m):

- prova di emungimento a Q costante (1.5 l/s) fino a raggiungimento della stabilizzazione, della durata circa 2 h;
- monitoraggio della risalita fino al completo ripristino del livello statico originale, raggiunto in circa 1 h e mezza;

- prova di emungimento a Q costante (2 l/s), della durata di circa 3 h, fino a raggiungimento della stabilizzazione

Sulla base dei risultati si è stimata una trasmissività T di $3.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dalla quale, posto uno spessore saturo di 3.7 m, una conducibilità idraulica K dell'ordine di 10^{-3} m/s .

Nello stesso documento E13 sono inoltre descritte modalità esecutive e interpretazione di 3 ulteriori prove in situ a carico variabile, eseguite su due pozzetti a sezione quadrata e pareti verticali appositamente realizzati nelle rocce calcarenitiche, a circa 350 m l'uno dall'altro e 500 m dal pozzo 26, scavati fino al raggiungimento del livello di falda; dall'interpretazione dei dati di discesa si evincono conducibilità idrauliche comprese tra $4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ e $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Sulla base delle suddette informazioni, tenuto anche conto della distribuzione degli affioramenti sabbioso-calcarenitici rispetto al dominio del modello e all'area caratterizzata, come desumibile¹⁸ da G1 e dal foglio 214 Gallipoli della Carta Geologica d'Italia al 100000 (cfr. Figura 2-17 e Figura 2-18), si è scelto di attribuire uniformemente ai due layer del modello i valori **iniziali** di conducibilità idraulica (K) orizzontale riportati in Tabella 2, con componenti verticali di un ordine di grandezza inferiori.

Tabella 2 Valori (pre-calibrazione automatica) attribuiti alle conducibilità idrauliche dei layers

Layer	K _x [m/s]	K _y [m/s]	K _z [m/s]
1	5.0E-04	5.0E-04	5.0E-05
2	5.0E-11	5.0E-11	5.0E-12

Nel corso del processo di calibrazione automatica descritto nel par. 2.3.3, i suddetti parametri sono stati fatti variare in corrispondenza di 79 punti arbitrari (Pilot Points), entro limiti fisici coerenti con i dati acquisiti, al fine di fittare al meglio le 18 osservazioni disponibili, fino ad ottenere per il modello finale (usato per le simulazioni) una distribuzione delle conducibilità di tipo non uniforme che, nell'area in esame, è caratterizzata da valori compresi tra $2.0\text{E-}04$ e $1.8\text{E-}03 \text{ m/s}$.

¹⁸ Sulla base della cartografia geologia storica, si riscontra nell'area di interesse il prevalente affioramento della formazione **Q^{1c}** (banchi arenacei e calcarenitici della Formazione di Gallipoli), corrispondente alla litologia indicata in G1 come *Calcareniti organogene a grana medio grossolana, di colore giallastro ocraceo, ben cementate e tenaci (tipo Carparo)*, appartenente alla successione dei *Depositi marini terrazzati del Pleistocene medio-superiore*; si riscontra, più a valle, in corrispondenza zona di ricarica dell'acquifero oggetto di studio, l'affioramento della formazione definita **Q_P** (*Calcareniti fossilifere, calcari grossolani tipo Panchina, sabbioni calcarei più o meno cementati, talora argillosi, caratterizzata dalla presenza di Strombus bubionus*).

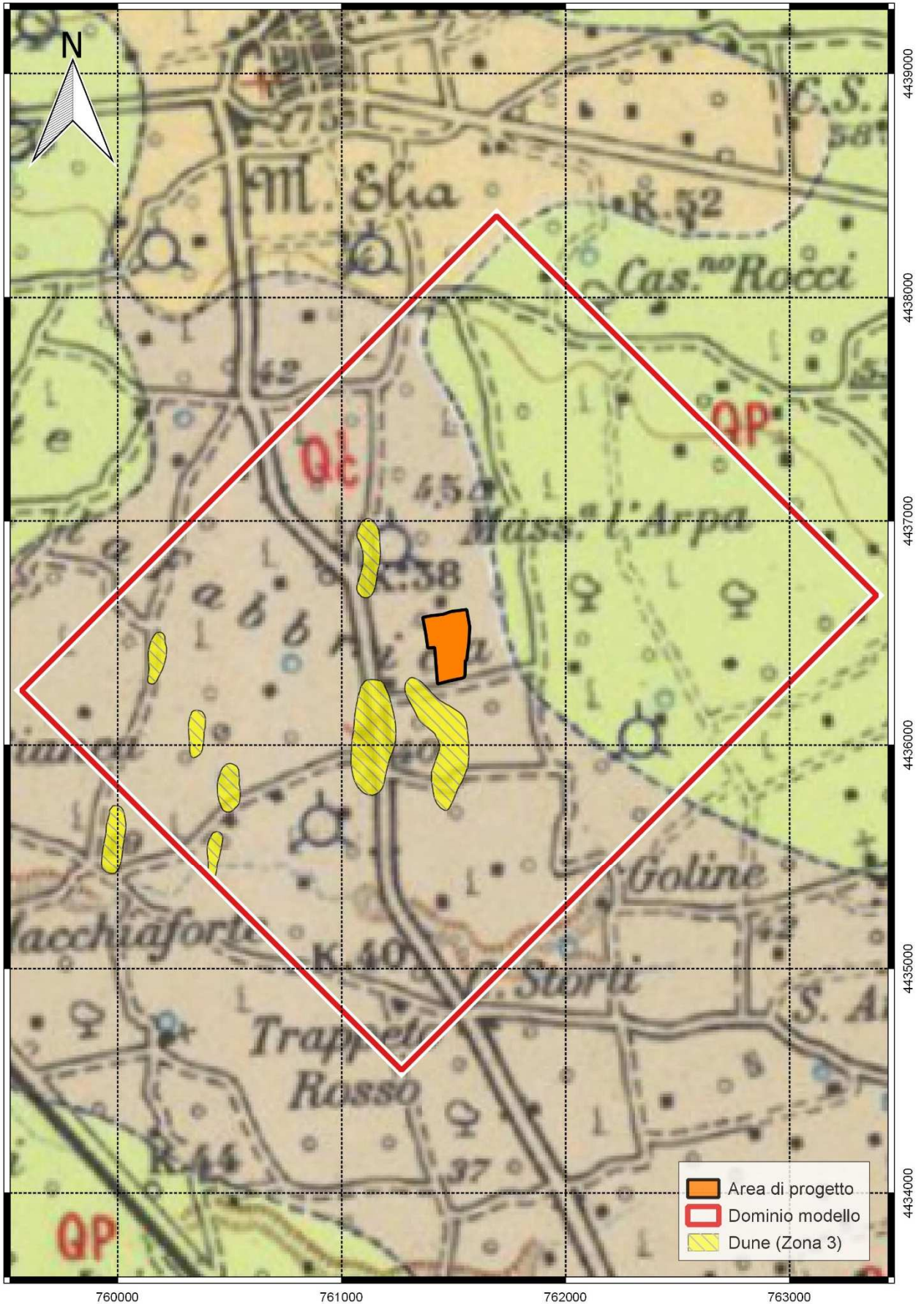


Figura 2-17 Dominio del modello su stralcio del Foglio 214 della Carta Geologica d'Italia al 100k

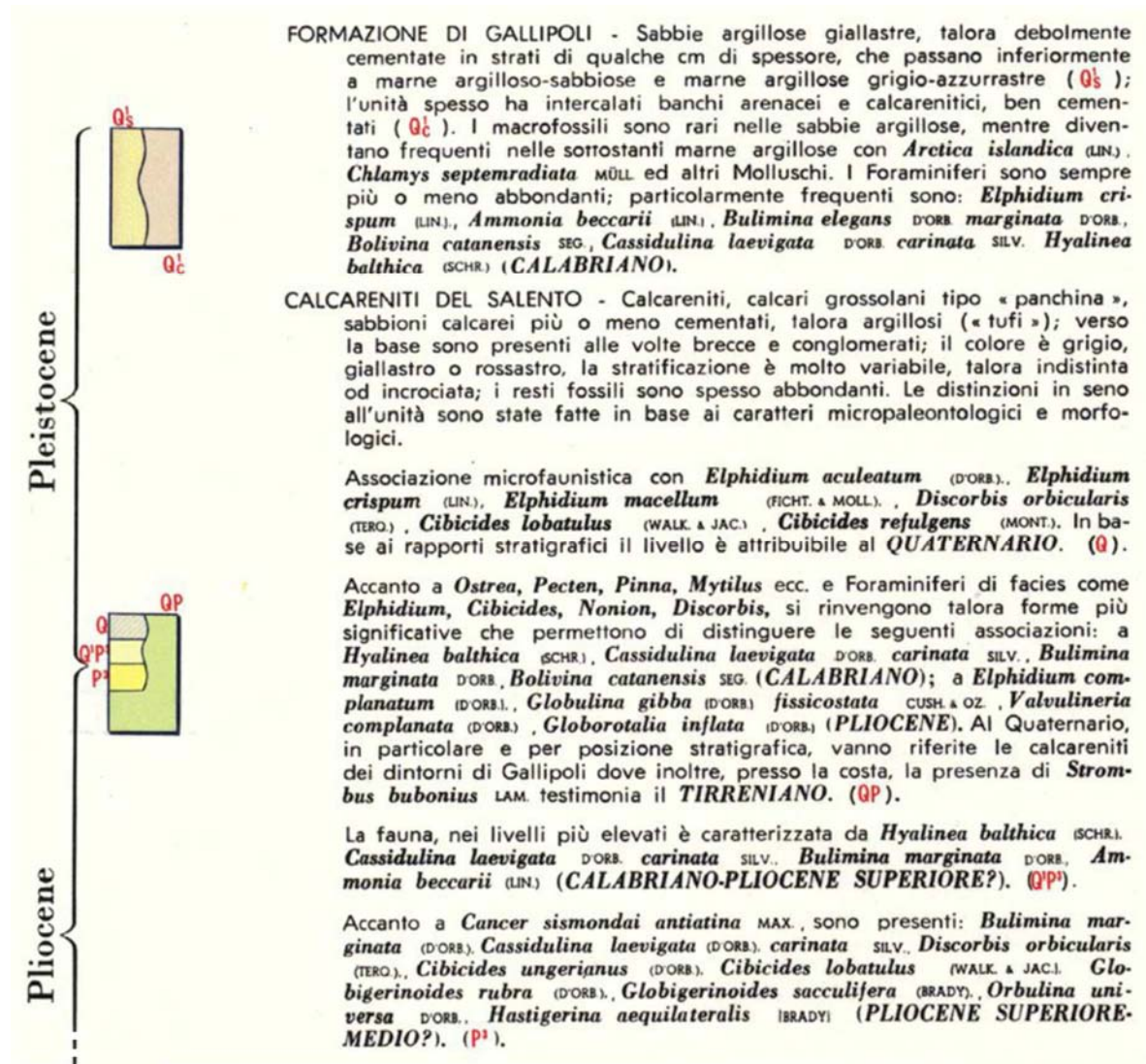


Figura 2-18 Stralcio della legenda del foglio 214 della Carta Geologica d'Italia al 100k

2.3 Condizioni al contorno e calibrazione

2.3.1 Osservazioni e ricostruzioni piezometriche di riferimento

L'ottimizzazione delle soluzioni (in termini di distribuzioni di conducibilità idraulica K) testate nel processo di calibrazione automatica descritto nel par. 2.3.3 è stata effettuata realizzando in modo iterativo la convergenza (minimizzazione) di una funzione obiettivo Φ definita come somma ponderata dei quadrati degli scarti tra le osservazioni sperimentali h' ed i carichi simulati h :

$$\Phi = \sum_{i=1}^m [w_i (h'_i - h_i)]^2$$

dove w_i è il peso attribuito alla i -esima osservazione, inversamente proporzionale alla sua incertezza, in modo da dare maggiore risalto alle osservazioni più affidabili.

A tal fine, l'analisi della documentazione di cui al par. 1.3 ha consentito di acquisire, valutare ed integrare nel modello informazioni relative a 6 campagne di misure piezometriche appositamente effettuate dalla Committenza tra giugno 2016 e luglio 2017.

Le misure di soggiacenza sono state effettuate su un insieme di 18 punti di osservazione interni o prossimi all'area di progetto (cfr. Tabella 3 e Figura 2-19), costituiti da antichi pozzi in disuso scavati a mano, aventi diametro dell'ordine di 1.5 m e profondità di circa 5 m: a tale approssimativa profondità, infatti, si riscontra in tutti i punti il contatto delle calcareniti con il substrato impermeabile oggetto di coltivazione mineraria (terreni limoso-argillosi).

Ciascun pozzo risulta attestato per circa 0.5 metri nel substrato argilloso impermeabile, allargandosi alla base e fungendo da cisterna di raccolta delle acque che percolano lateralmente dalla formazione calcarenitica; sul fondo dei pozzi, pertanto, è sempre presente un battente di circa 0.5 m di acqua stagnante e melma che permane anche nei momenti estivi, allorquando la falda risulta del tutto assente nella zona di interesse.

Il rilievo della quota topografica del boccapozzo dei pozzi ha permesso di calcolare i livelli assoluti h' della falda oggetto di interesse, la cui interpolazione per triangolazione ha consentito di rappresentare graficamente (Tavole G3, G3a, G3b, G3c e G3e) la morfologia della superficie piezometrica per 5 delle 6 campagne di misura, risultando la falda di fatto inesistente nel caso dell'ultima campagna (a luglio 2017, Tavola G3g).

Come si evince dai dati e più volte evidenziato nella documentazione acquisita, la falda superficiale, già di per sé modesta come spessore durante il periodo di massima ricarica in anni particolarmente piovosi, presenta *carattere stagionale*, arrivando a depauperarsi completamente nel periodo estivo, coerentemente con l'andamento delle precipitazioni. Per quanto debba sempre usarsi cautela nella lettura delle rappresentazioni grafiche ottenute da interpolazioni numeriche (cfr. Figura 2-19), è possibile osservare

- una prevalente direzione di deflusso è costante in tutte le campagne di misura, da NE verso SW
- un gradiente idraulico medio compreso tra 0.5% e 1.5%
- una distanza tra le isopieze, a parità di passo (1 m), che diminuisce sensibilmente lungo la direzione di deflusso, a indicare un incremento delle perdite di carico nel moto di filtrazione collegabile ad un possibile decremento della conducibilità idraulica della matrice lungo la stessa direzione e/o a una restrizione della sezione di deflusso (la morfologia del basamento si fa più acclive)

Tabella 3 Punti di osservazione disponibili e misure h' del livello assoluto di falda acquisite

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	Z _{BP} [m s.l.m.]	PROF [m]	h' [m s.l.m.]					
					giu 16	gen 17	apr 17	mag 17	giu 17	lug 17
P01	761608.5	4436258.9	43.09	4.55	40.49	40.25	39.81	39.47	39.13	NR
P02	761643.2	4436570.0	43.60	4.80	40.90	40.69	40.20	39.91	39.55	NR
P03	761519.2	4436621.3	43.66	4.76	41.06	40.85	40.37	40.03	39.72	NR
P04	761397.8	4436608.2	42.98	4.48	40.58	40.35	39.88	39.59	39.24	NR
P05	761327.2	4436542.5	43.48	5.38	40.28	40.09	39.61	39.30	38.91	NR
P06	761357.2	4436433.8	43.52	5.32	40.32	40.11	39.62	39.35	38.96	NR
P07	761485.6	4436446.1	43.73	5.33	40.63	40.44	39.95	39.65	39.30	NR
P08	761518.7	4436284.7	41.70	3.40	40.40	40.19	39.69	39.38	39.05	NR
P09	761791.7	4436250.6	44.33	NA	41.63	41.42	40.91	40.65	40.27	NA
P10	761902.5	4436237.0	43.16	NA	41.26	41.04	40.56	40.28	39.92	NA
P11	761890.3	4436034.5	43.43	NA	40.43	40.22	39.71	39.47	39.06	NA
P12	761807.6	4435948.8	43.16	NA	40.16	39.98	39.47	39.16	38.82	NA
P13	761698.1	4435861.5	42.80	NA	39.90	39.71	39.21	38.94	38.57	NA
P14	761232.5	4436072.1	42.74	NA	35.04	34.83	34.33	34.07	33.69	NA
P15	761055.4	4436399.5	41.30	NA	38.30	38.12	37.58	37.34	36.94	NA
P16	761047.5	4436600.8	43.08	NA	39.58	39.38	38.89	38.56	38.25	NA
P17	760991.9	4436732.8	41.52	NA	39.52	39.33	38.85	38.54	38.17	NA
P18	760907.6	4436788.0	41.25	NA	39.95	39.75	39.29	38.98	38.60	NA

Tenuto conto degli obiettivi del modello, nel processo di calibrazione descritto nel par. 2.3.3 sono state considerate come targets le 18 osservazioni sperimentali h' relative alla campagna di giugno 2016 (massimo spessore saturo osservato); in Tabella 6 a pag. 46 sono riportati i risultati del processo in termini di scarti finali (differenza tra i valori restituiti dal modello calibrato e le osservazioni reali).

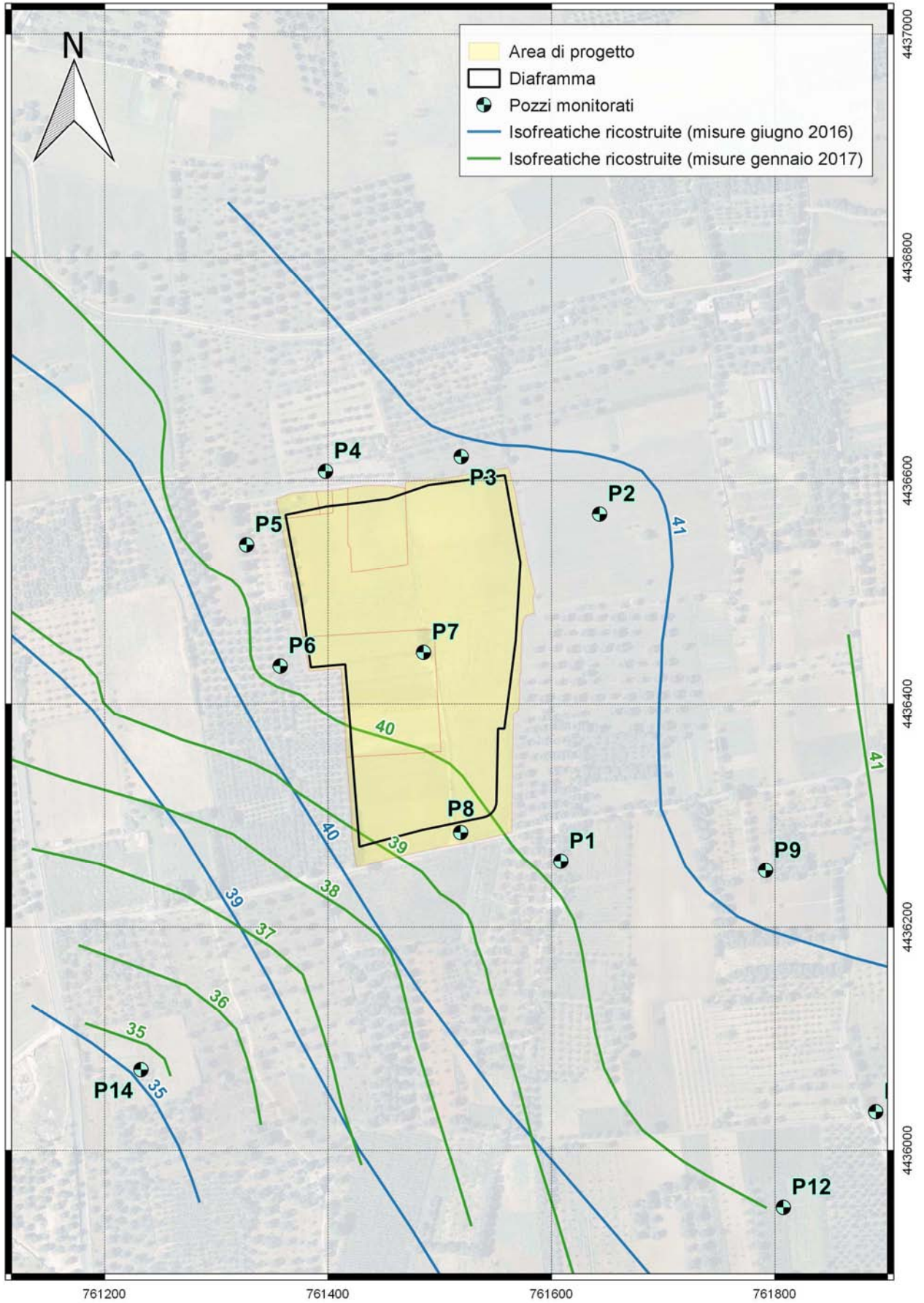


Figura 2-19 Piezometrie di riferimento e ubicazione dei targets per la calibrazione del modello

2.3.2 Emungimenti e ricarica

Come emerso dalla documentazione acquisita, il dominio modellato è caratterizzato dalla presenza di numerosi pozzi poco profondi e in disuso, di largo diametro e non attrezzati con pompe, comunque utilizzabili per il monitoraggio dei livelli idrici; coerentemente con gli obiettivi conservativi del modello, non sono stati simulati emungimenti.

La ricarica **RCH** che insiste sull'area modellizzata è stata stimata indirettamente, sulla base dei dati registrati presso la stazione meteorologica più vicina, attraverso il calcolo del deflusso globale (o eccedenza idrica) secondo le relazioni generali di bilancio idrologico:

$$P - ETR = I + R$$

$$DG = I + R$$

dove:

- **DG** è il *deflusso globale*, in mm/anno
- **P** è la *precipitazione media*, in mm/anno
- **ETR** è l'*evapotraspirazione reale*, in mm/anno
- **I** è l'*infiltrazione*, in mm/anno
- **R** è il *ruscellamento*, in mm/anno

L'evapotraspirazione reale **ETR** è stata stimata con la relazione empirica di Turc, ovvero

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

con

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Dove **T** è il valor medio della temperatura nel periodo considerato, in °C. A partire dal **DG**, è possibile stimare l'infiltrazione efficace **IE** attraverso l'applicazione di un coefficiente di infiltrazione potenziale (CIP) conservativo da letteratura (Celico 1988, Civita 2005)

$$IE = [DG * CIP] = [(P - ETR) * CIP]$$

Sulla base dei risultati ottenuti per ciascun periodo di riferimento (Tabella 4), si è optato per l'utilizzo di un CIP unitario e si è introdotto un valore di RCH iniziale, su tutta l'area modellizzata, pari a quello dell'anno medio *storico* (periodo 1921-1913), assumendo la condizione variabile nella prima fase (*Trial & Error*) della procedura di calibrazione descritta nel par. 2.3.4; nella seconda fase di calibrazione (con Pilot Points) alla condizione RCH è stato attribuito il valore costante derivante dalla calibrazione preliminare (pari a 1.2E-8), peraltro in linea con le assunzioni del modello concettuale (falda in condizioni di massimo).

Tabella 4 Bilanci idrologici per la stima delle RCH considerate nel modello

Anno	Mese	P [mm]	Tm [°C]	P [mm/y]	L	ETR [mm/y]	DG	IE [mm/y]	RCH [m/s]
Storico	GEN	74.1	9.4	889.2	576.5	491.1	398.1	398	1.28E-08
Storico	FEB	58.0	9.4	696	576.5	453.3	242.7	243	7.80E-09
Storico	MAR	64.1	11.8	769.2	677.2	519.7	249.5	249	8.02E-09
Storico	APR	41.4	14.8	496.8	832.1	443.2	53.6	54	1.72E-09
Storico	MAG	25.0	19.2	300	1133.9	304.6	0	0	0.00E+00
Storico	GIU	14.7	23.4	176.4	1525.6	184.6	0	0	0.00E+00
Storico	LUG	8.0	26.1	96	1841.5	101.0	0	0	0.00E+00
Storico	AGO	17.3	26.1	207.6	1841.5	217.3	0	0	0.00E+00
Storico	SET	46.4	22.7	556.8	1452.4	544.2	12.6	13	4.06E-10
Storico	OTT	89.6	18.4	1075.2	1071.5	778.6	296.6	297	9.54E-09
Storico	NOV	104.2	14.1	1250.4	792.7	679.3	571.1	571	1.84E-08
Storico	DIC	91.6	10.8	1099.2	633.0	555.5	543.7	544	1.75E-08
Storico	Medio	634.4	17.2	634.4	983.3	553.0	81.4	81	2.62E-09
2015	LUG	0	28.6	0	2184.7	0.0	0	0	0.00E+00
2015	AGO	29.4	27.6	352.8	2041.2	365.9	0	0	0.00E+00
2015	SET	56.8	24.0	681.6	1591.2	654.8	26.8	27	8.61E-10
2015	OTT	126.0	19.1	1512	1125.9	919.6	592.4	592	1.90E-08
2015	NOV	71.0	15.3	852	861.6	621.7	230.3	230	7.40E-09
2015	DIC	0.4	11.8	4.8	677.2	5.1	0	0	0.00E+00
2016	GEN	35.2	10.6	422.4	624.6	362.5	59.9	60	1.92E-09
2016	FEB	33.4	13.0	400.8	734.9	366.3	34.5	35	1.11E-09
2016	MAR	63.4	12.3	760.8	700.5	527.6	233.2	233	7.50E-09
2016	APR	10.8	16.8	129.6	957.1	135.2	0	0	0.00E+00
2016	MAG	72.6	18.3	871.2	1063.9	695.2	176.0	176	5.66E-09
2016	GIU	0.0	24.0	0	1591.2	0.0	0	0	0.00E+00
2016	LUG	1.0	27.1	12	1972.6	12.6	0	0	0.00E+00
2016	AGO	12.6	26.2	151.2	1854.2	158.8	0	0	0.00E+00
2016	SET	77.0	22.4	924	1422.0	803.6	120.4	120	3.87E-09
2016	OTT	99.4	18.8	1192.8	1102.2	828.8	364.0	364	1.17E-08
2016	NOV	75.4	14.8	904.8	832.1	627.0	277.8	278	8.93E-09
2016	DIC	0.8	10.0	9.6	600.0	10.1	0.0	0	0.00E+00
2017	GEN	106.0	7.1	1272	495.4	464.7	807.3	807	2.60E-08
2017	FEB	21.6	11.8	259.2	677.2	253.4	5.8	6	1.87E-10
2017	MAR	24.0	13.6	288	765.8	282.2	5.8	6	1.86E-10
2017	APR	15.6	15.1	187.2	849.6	192.2	0.0	0	0.00E+00
2017	MAG	7.0	19.6	84	1166.5	88.3	0.0	0	0.00E+00
2017	GIU	0.0	24.9	0	1694.4	0.0	0.0	0	0.00E+00

2.3.3 Obiettivi e modalità di calibrazione

La calibrazione di un modello numerico può essere eseguita in condizioni stazionarie, transitorie o secondo una combinazione dei due stati. Anche se nella pratica modellistica prevale in genere la calibrazione in stazionario, questa dovrebbe costituire solo una soluzione preliminare, in quanto:

- il flusso delle acque sotterranee è transitorio per sua natura ed è spesso soggetto a cambiamenti naturali o artificiali, a loro volta transitori;
- lo scopo tipico di un modello è di effettuare previsioni che, per definizione, sono funzione del tempo; la calibrazione in stazionario non considera il coefficiente di immagazzinamento, fondamentale per le simulazioni in transitorio tanto quanto la conducibilità idraulica.

La tecnica di calibrazione più semplice e più diffusa è quella del *Trial & Error* (Anderson, et al., 2015), in cui la distribuzione spaziale ed i valori della conducibilità idraulica sono modificati manualmente, fino a quando per ogni punto di osservazione non si ottiene un buon accordo tra i livelli piezometrici misurati e simulati.

Tale metodo, anche se soggettivo, risulta utile nelle primissime fasi della calibrazione. Modificando manualmente i valori dei parametri e analizzandone le conseguenze, si può testare la struttura del modello, la discretizzazione e le condizioni al contorno operando una prima grossolana riduzione dell'errore tra carichi idraulici misurati e simulati.

A seguito di questa prima fase, possono essere applicate le tecniche di calibrazione automatica più recenti, dette dei *metodi inversi*: modificando i parametri idrogeologici iniziali, si tenta di minimizzare la differenza tra il carico idraulico misurato e quello calcolato nei diversi punti di osservazione.

I metodi bayesiani non-lineari, applicati in questo lavoro, fanno parte dei metodi inversi ed utilizzano una procedura iterativa per ottimizzare i parametri. Le tappe per la risoluzione dell'equazione del flusso, della verifica della correlazione tra piezometria calcolata ed osservata e la modifica dei campi per migliorare la correlazione, sono ripetute fino a che la differenza tra i carichi calcolati e misurati non raggiunge un minimo (in generale dell'ordine di grandezza dell'errore di misura). Il criterio usato è generalmente chiamato *funzione obiettivo* ed è espresso sia da una funzione ponderata ai minimi quadrati, sia da una funzione di verosimiglianza; sono le derivate della funzione obiettivo che guidano le modifiche da apportare al campo della conducibilità idraulica in una direzione o nell'altra.

L'ottimizzazione dei parametri porta a minimizzare la funzione obiettivo Φ definita come somma ponderata dei quadrati degli scarti tra le osservazioni sperimentali h' ed i carichi simulati h :

$$\Phi = \sum_{i=1}^m [w_i (h'_i - h_i)]^2$$

dove w_i è il peso attribuito alla i -esima osservazione, inversamente proporzionale alla sua incertezza, in modo da dare maggiore risalto alle osservazioni più affidabili.

In Figura 2-20 si riporta un classico *scatterplot* dove i valori delle osservazioni simulate dal modello sono messe a confronto con i dati realmente misurati. L'errore, o residuo, è dato dal valore reale meno quello simulato e corrisponde nel grafico alla distanza tratteggiata tra il punto e la retta 1:1.

Aumentando il numero di parametri in un modello (ad esempio incrementando le zone di conducibilità idraulica) si ottiene una diminuzione degli scarti con conseguente migliore calibrazione. La calibrazione che utilizza zone omogenee è ad oggi la tecnica più diffusa in quanto intuitiva e poco vincolata dalla potenza di calcolo. Il modellista suddivide il dominio in poligoni omogenei (a K costante all'interno della stessa zona) in base alla geologia o ad altre evidenze. In seguito regola gradualmente i valori di conducibilità idraulica fino a che la discrepanza tra valori osservati e simulati sia ridotta al minimo. L'uso di zone uniformi, tuttavia, può risultare insoddisfacente. Anche se la cartografia geologica è di aiuto, non sempre le caratteristiche geologiche sono note col dettaglio necessario. È inoltre evidente che zone che in cartografia hanno lo stesso

colore non necessariamente avranno proprietà idrodinamiche uniformi. Il modellista, di conseguenza, definisce e introduce nel modello ulteriori zone, per migliorare la calibrazione. Anche laddove venga utilizzata la calibrazione automatica, il processo è lungo e laborioso, implicando una grossa parte di lavoro in modalità *trial & error*.

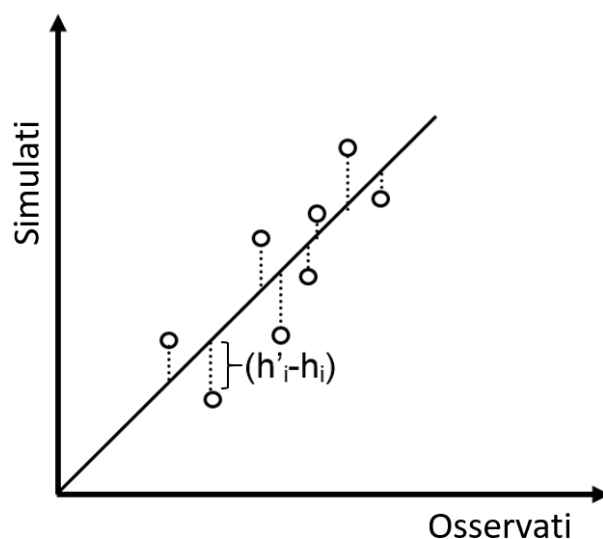


Figura 2-20 Esempio di scatterplot per la valutazione della calibrazione

I parametri che entrano nel processo di calibrazione possono essere assegnati, oltre che secondo le classiche zone a valore uniforme, anche tramite distribuzioni spaziali definite in alcuni punti, detti *pilot points*. Nel primo caso si parla di *regolarizzazione manuale* dei parametri, nel secondo di **regolarizzazione matematica**. Quest'ultima applica i principi della geostatistica per passare dai punti in cui è associato il valore del parametro (pilot point) alla distribuzione spaziale su tutta l'area considerata (dominio del modello).

A partire dai pilot points si generano superfici tramite Kriging in cui il parametro (solitamente la conducibilità idraulica) varia spazialmente in modo graduale; questo consente di effettuare avanzate valutazioni geostatistiche e probabilistiche sulla eterogeneità del modello e, sulla base di queste, la creazione di un campo del parametro più rappresentativo della realtà (che continua comunque a rimanere incognita).

2.3.4 Risultati della calibrazione

La calibrazione è stata attuata preliminarmente in modalità *trial & error* su grid uniforme a maglia quadrata di 10 m di lato. Questa fase ha permesso di valutare la validità delle scelte sulle condizioni al contorno e le assunzioni idrodinamiche iniziali (comunque conservative e coerenti con i valori derivanti dagli studi acquisiti o da letteratura), nonché di testare la stabilità numerica del modello, caratterizzato da un esiguo spessore e dunque particolarmente sensibile alla morfologia delle superfici e alle variazioni orizzontali di conducibilità idraulica.

A partire dai risultati ottenuti in tal modo (funzione obiettivo PHI pari a **24.02**), si è successivamente proceduto alla calibrazione automatica tramite **Pilot Points** con il codice *PEST 13* (Doherty, 2015); come descritto nel precedente paragrafo, tale tecnica risulta particolarmente adatta al caso in esame in quanto riproduce variazioni graduali del parametro conducibilità idraulica indipendenti dalla arbitraria assegnazione di zone predefinite a valore uniforme.

Nello specifico la tecnica è stata applicata alla ottimizzazione della distribuzione delle conducibilità idrauliche orizzontali del layer 1, rappresentativo dell'orizzonte calcarenitico sede della falda interessata dall'intervento in progetto; come si evince dalla Tabella 3 a pag. 35, nel corso del processo di calibrazione sono stati considerati un totale di **18 Targets**, corrispondenti alle misure reali del livello piezometrico di massimo effettuate dalla Committenza sugli altrettanti pozzi presenti presso l'area di progetto (giugno 2016, cfr. tavola **G3** allegata a E1).

Il codice utilizzato è stato in grado di minimizzare la funzione obiettivo PHI (sommatoria degli scarti quadratici calcolati sui targets) fino al valore finale di **0.1485**, facendo variare ripetutamente e opportunamente¹⁹ (per un totale di 17 *Optimisation iterations* e 2434 *model calls*) i valori di conducibilità idraulica orizzontale attribuiti ai **79 Pilot Points** ubicati in corrispondenza di zone di interesse reali e/o in posizioni intermedie fittizie, come illustrato in Figura 2-21 e riportato in Tabella 5.

Al suddetto insieme finale di valori di conducibilità idraulica, interpolato su tutte le celle del dominio di modellizzazione, corrispondono gli scarti calcolati in corrispondenza dei Targets riportati in Tabella 6 e rappresentati sullo Scatterplot di Figura 2-22

Si riportano di seguito i principali descrittori statistici della distribuzione degli scarti nella versione calibrata del modello:

- Residual Mean: 0.0126
- Absolute Residual Mean: 0.0479
- Residual Standard Deviation: 0.0899
- Sum of Squares: 0.1485
- RMS Error: 0.0908
- Minimum Residual: -0.2378
- Maximum Residual: 0.2776
- Range in Observations: 6.5900
- Scaled Residual Std. Deviation: 0.0136
- Scaled Abs. Residual Mean: 0.0073
- Scaled RMS Error: 0.0138
- Scaled Residual Mean: 0.0019

Il modello così calibrato è in grado di restituire (calcolare) una morfologia della superficie piezometrica che nella zona di progetto risulta particolarmente aderente a quella misurata a giugno 2016 e adottata come riferimento nel modello concettuale, come illustrato in Figura 2-23.

¹⁹ Per approfondimenti sull'affascinante mondo della soluzione del problema inverso si rimanda a

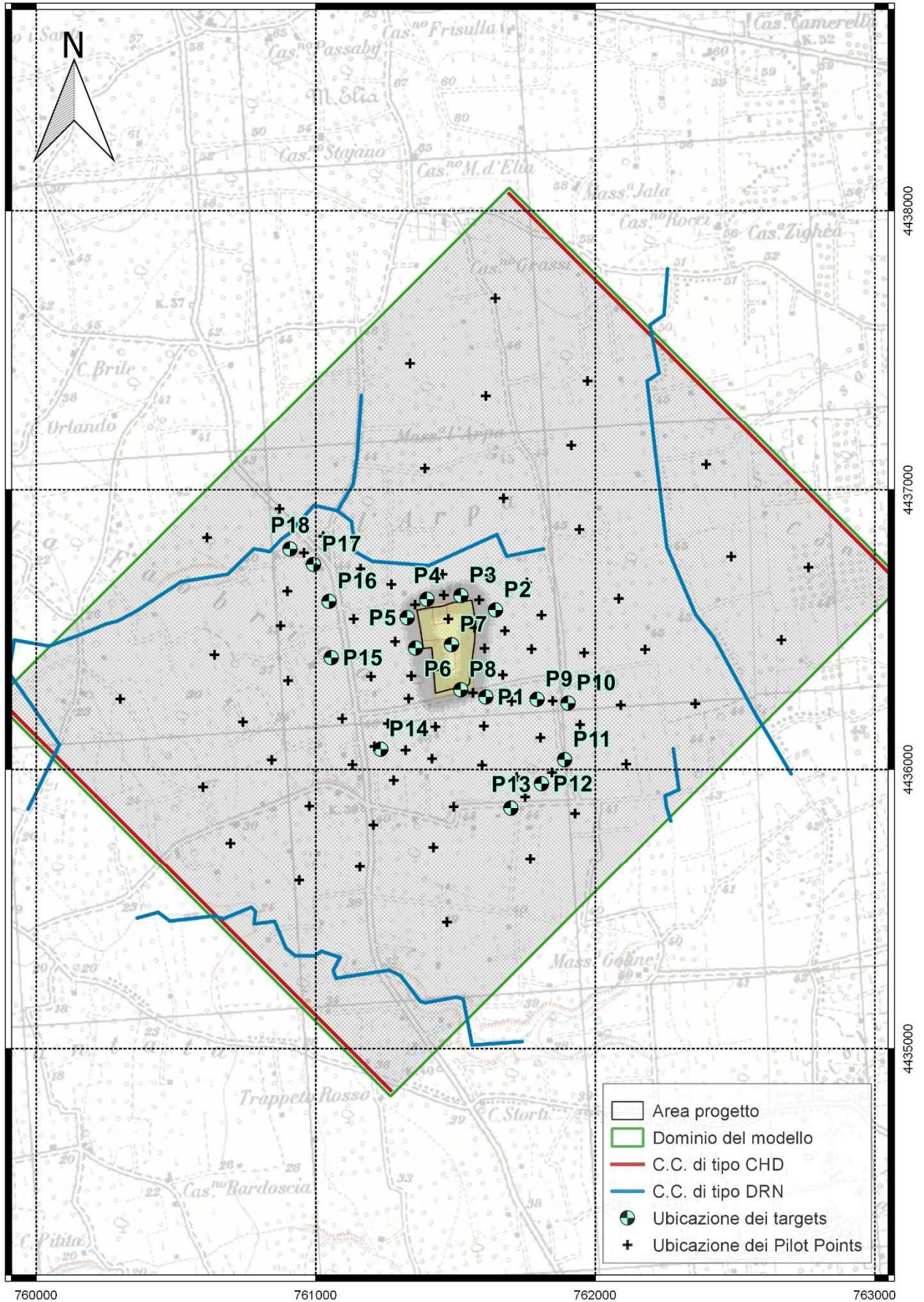


Figura 2-21 Ubicazione dei 79 Pilot Points utilizzati nel processo di calibrazione automatica

Tabella 5 Valori di K finali stimati in corrispondenza dei 79 Pilot Points

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	K _{INIZ} [m/s]	K _{FIN} [m/s]
pp0	761807.8	4436551.8	1.80E-04	2.20E-05
pp1	761474.2	4436537.9	1.80E-04	4.73E-04
pp2	761446.3	4436356.1	1.80E-04	1.40E-03
pp3	761603.9	4436432.5	1.80E-04	1.40E-03
pp4	761772.4	4436430.0	1.80E-04	2.20E-05
pp5	761700.9	4436243.3	1.80E-04	2.20E-05
pp6	761562.7	4436273.6	1.80E-04	1.40E-03
pp7	761847.6	4436244.5	1.80E-04	2.20E-05
pp8	761584.5	4436605.8	1.80E-04	1.40E-03
pp9	761355.4	4436588.8	1.80E-04	8.80E-04
pp10	761283.9	4436456.7	1.80E-04	1.40E-03
pp11	761332.4	4436253.0	1.80E-04	3.49E-05
pp12	761197.8	4436331.8	1.80E-04	1.83E-04
pp13	761094.8	4436181.5	1.80E-04	2.49E-04
pp14	761136.0	4436537.9	1.80E-04	1.40E-03
pp15	761270.5	4436661.6	1.80E-04	1.40E-03
pp16	761026.9	4436833.7	1.80E-04	5.94E-04
pp17	760957.8	4436774.3	1.80E-04	1.40E-03
pp18	760870.5	4436931.9	1.80E-04	1.40E-03
pp19	760898.4	4436637.3	1.80E-04	1.40E-03
pp20	761428.1	4436152.4	1.80E-04	4.53E-04
pp21	761803.9	4436113.6	1.80E-04	2.20E-05
pp22	761601.5	4436154.8	1.80E-04	3.81E-04
pp23	761595.4	4436015.4	1.80E-04	2.20E-05
pp24	761416.0	4436038.5	1.80E-04	3.74E-04
pp25	761258.4	4436163.3	1.80E-04	2.09E-04
pp26	761279.0	4435960.9	1.80E-04	6.29E-05
pp27	761131.1	4436016.6	1.80E-04	1.14E-03
pp28	761209.9	4436082.1	1.80E-04	2.87E-04
pp29	761321.5	4436068.8	1.80E-04	2.44E-04
pp30	761342.1	4436334.3	1.80E-04	5.13E-05

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	K _{INIZ} [m/s]	K _{FIN} [m/s]
pp31	761669.4	4436337.9	1.80E-04	1.40E-03
pp32	761719.1	4435973.0	1.80E-04	5.75E-04
pp33	761927.6	4435842.1	1.80E-04	1.40E-03
pp34	761767.6	4435679.6	1.80E-04	7.26E-04
pp35	761420.9	4435720.8	1.80E-04	3.92E-05
pp36	761493.6	4435866.3	1.80E-04	1.45E-04
pp37	760977.2	4435868.7	1.80E-04	3.87E-04
pp38	760739.6	4436169.4	1.80E-04	8.12E-04
pp39	760637.7	4436409.4	1.80E-04	2.20E-05
pp40	760300.7	4436251.8	1.80E-04	2.20E-05
pp41	760596.5	4435936.6	1.80E-04	1.40E-03
pp42	760940.8	4435602.0	1.80E-04	2.20E-05
pp43	761469.4	4435451.7	1.80E-04	1.20E-04
pp44	760611.1	4436828.9	1.80E-04	2.20E-05
pp45	761453.6	4436697.9	1.80E-04	2.20E-05
pp46	761622.1	4436694.3	1.80E-04	2.20E-05
pp47	761755.5	4436667.6	1.80E-04	2.20E-05
pp48	761943.4	4436858.0	1.80E-04	2.20E-05
pp49	761671.8	4436969.5	1.80E-04	4.34E-05
pp50	761390.6	4437076.2	1.80E-04	1.40E-03
pp51	761337.2	4437454.4	1.80E-04	1.40E-03
pp52	761642.7	4437687.2	1.80E-04	1.40E-03
pp53	761608.8	4437338.0	1.80E-04	1.40E-03
pp54	761972.5	4437391.4	1.80E-04	7.41E-04
pp55	761914.3	4437158.6	1.80E-04	1.40E-03
pp56	762084.0	4436610.7	1.80E-04	1.19E-04
pp57	761960.3	4436416.7	1.80E-04	2.06E-04
pp58	762091.3	4436230.0	1.80E-04	1.40E-03
pp59	762110.7	4436019.1	1.80E-04	1.40E-03
pp60	762358.0	4436234.8	1.80E-04	5.07E-04
pp61	762178.5	4436428.8	1.80E-04	4.46E-04
pp62	762396.8	4437090.7	1.80E-04	4.58E-05

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	K_{INIZ} [m/s]	K_{FIN} [m/s]
pp63	762486.5	4436761.0	1.80E-04	2.03E-04
pp64	762665.9	4436462.8	1.80E-04	3.58E-04
pp65	762762.9	4436722.2	1.80E-04	1.83E-04
pp66	761157.8	4435650.5	1.80E-04	2.04E-04
pp67	760842.6	4436033.6	1.80E-04	1.35E-04
pp68	760900.8	4436317.3	1.80E-04	7.67E-05
pp69	760874.1	4436513.7	1.80E-04	2.37E-05
pp70	761206.3	4435800.9	1.80E-04	2.96E-04
pp71	761160.2	4436717.3	1.80E-04	2.20E-05
pp72	761458.4	4436622.8	1.80E-04	2.20E-05
pp73	761567.6	4436506.4	1.80E-04	1.40E-03
pp74	761676.7	4436495.5	1.80E-04	1.40E-03
pp75	761845.2	4435988.8	1.80E-04	1.40E-03
pp76	761749.4	4435901.5	1.80E-04	1.40E-03
pp77	761945.8	4436159.7	1.80E-04	1.40E-03
pp78	760694.7	4435735.4	1.80E-04	6.22E-04

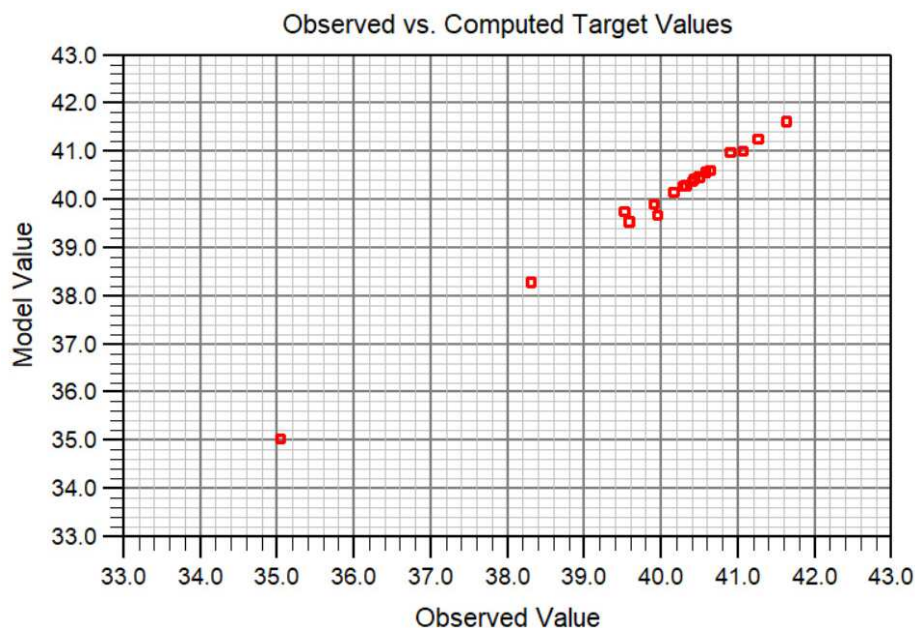


Figura 2-22 Scatterplot finale della calibrazione sui 18 targets di giugno 2016

Tabella 6 Scarti (residuals) finali in corrispondenza dei 18 targets di calibrazione

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	Observed [m s.l.m.]	Modelled [m s.l.m.]	Weight [-]	Residuals [m]
P01	761608.5	4436258.9	40.490	40.466	1.0	0.0242
P02	761643.1	4436570.0	40.900	40.978	1.0	-0.0782
P03	761519.2	4436621.3	41.060	40.999	1.0	0.0607
P04	761397.8	4436608.2	40.580	40.567	1.0	0.0131
P05	761327.2	4436542.5	40.280	40.277	1.0	0.0028
P06	761357.2	4436433.8	40.320	40.291	1.0	0.0291
P07	761485.6	4436446.1	40.630	40.604	1.0	0.0265
P08	761518.7	4436284.7	40.400	40.374	1.0	0.0263
P09	761791.7	4436250.6	41.630	41.625	1.0	0.0046
P10	761902.5	4436237.0	41.260	41.262	1.0	-0.0021
P11	761890.3	4436034.5	40.430	40.427	1.0	0.0031
P12	761807.6	4435948.8	40.160	40.150	1.0	0.0097
P13	761698.1	4435861.5	39.900	39.895	1.0	0.0053
P14	761232.5	4436072.1	35.040	35.034	0.8	0.0061
P15	761055.4	4436399.5	38.300	38.284	1.0	0.0155
P16	761047.5	4436600.8	39.580	39.540	1.0	0.0401
P17	760991.9	4436732.8	39.520	39.758	1.0	-0.2378
P18	760907.6	4436788.0	39.950	39.672	1.0	0.2776

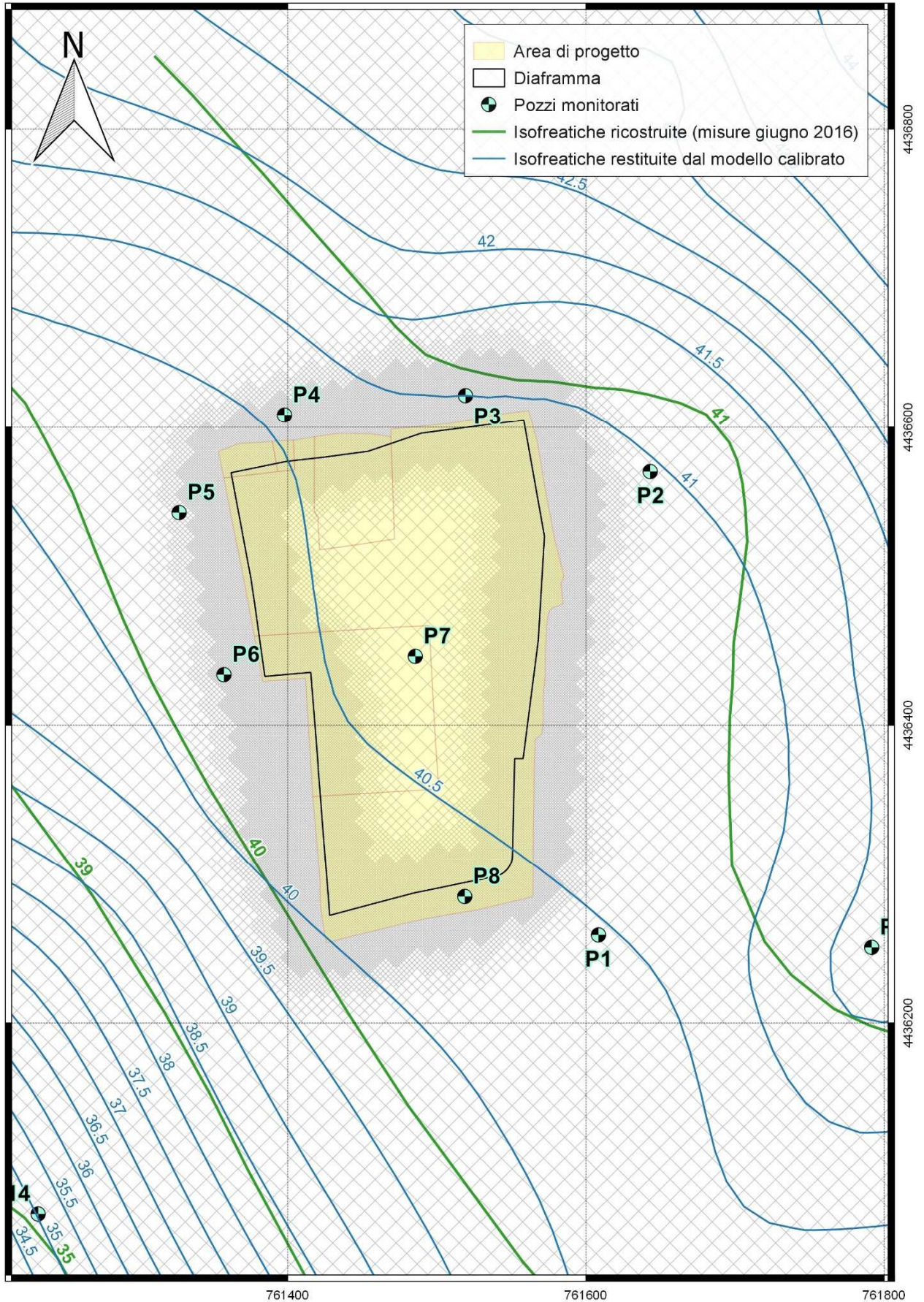


Figura 2-23 *Isopieze calcolate dal modello calibrato vs isopieze di riferimento (da misure giugno 2016)*

3 Simulazioni effettuate

3.1 Sintesi del progetto di coltivazione e obiettivi

Il piano di coltivazione descritto nel par. 3.3 del doc. E2 prevede la realizzazione di una cava a fossa con morfologia a gradoni; in particolare, è prevista la realizzazione di 3 scarpate con inclinazione di 40° aventi altezza di 7 m, alternate a 2 gradoni di larghezza media pari a 5 m (cfr. Tavole 10, 11, 12 e 13). La cava si approfondirà nel complesso di circa 21 m rispetto al piano di campagna originario, raggiungendo la quota minima assoluta di 21 m s.l.m.

La coltivazione mineraria avverrà contestualmente alle operazioni di recupero ambientale delle aree già coltivate e si svilupperà in 6 fasi successive, ciascuna delle quali di durata inferiore a 5 anni, in conformità a quanto sancito dall'art. 23 delle NTA del PRAE; le suddette fasi sono descritte dai progettisti nel Piano di coltivazione (in E2, par. 3.3, cui si rimanda) e rappresentate graficamente, sia in pianta che con sezioni significative, nei seguenti elaborati acquisiti

- Piano di coltivazione/recupero - PRIMA Fase (Tav. 5)
- Piano di coltivazione/recupero - SECONDA Fase (Tav. 6)
- Piano di coltivazione/recupero - TERZA Fase (Tav. 7)
- Piano di coltivazione/recupero - QUARTA Fase (Tav. 8)
- Piano di coltivazione/recupero - QUINTA Fase (Tav. 9)
- Piano di coltivazione/recupero - SESTA Fase (Tav. 10)
- Sezioni (Tav. 12).

Nonostante il modesto spessore della falda superficiale nel sito di progetto ed il suo carattere di stagionalità che l'annulla completamente durante il periodo estivo, al fine di evitare qualsiasi interferenza con le operazioni di coltivazione di progetto, si è previsto di realizzare, preventivamente all'inizio delle operazioni di sbancamento (prima fase), un diaframma impermeabile che isolerà completamente la cava da eventuali modesti afflussi idrici che si potrebbero verificare in occasioni di periodi particolarmente piovosi

Considerato il limitato spessore dello strato saturo, il diaframma verrà realizzato mediante l'esecuzione di uno scavo a sezione ristretta (di larghezza 1 m) avente profondità di 5 m, in modo da attestarsi per un metro all'interno dei depositi limoso-argillosi di base; lo scavo sarà riempito con terreni argillosi caratterizzati da conducibilità idraulica di 10^{-9} m/s.

Il setto impermeabile in argilla verrà realizzato ad una distanza di 2 m dal limite dello scavo (cfr. Tav. 13 allegata alla *Relazione di progetto di coltivazione e di recupero ambientale* di luglio 2017 (**E2**). Considerando la direzione di deflusso nota (da NE verso SW), il progetto prevede anche la realizzazione di un dreno verticale, di larghezza 0.5 m, davanti al setto in argilla (tra il setto e la barriera arborea), con la funzione di agevolare il deflusso della falda in modo da prevenire eventuali rigurgiti a monte.

Come materiale drenante si prevede di utilizzare lo stesso materiale calcarenitico scavato, previa riduzione ad idonea pezzatura.

A supporto delle suddette scelte progettuali, sono stati dunque definiti 3 distinti scenari di simulazione in regime stazionario:

- **Scenario 0** – Indisturbato
- **Scenario 1** – Realizzazione del (solo) diaframma impermeabile
- **Scenario 2** – Realizzazione del diaframma impermeabile e del setto drenante

Nel paragrafo che segue sono sintetizzati assunzioni e risultati dei tre scenari simulati con l'ausilio del modello numerico.

3.2 Risultati e commenti

Lo **Scenario 0** intende rappresentare le condizioni teoriche di flusso prima dello scavo e, nelle ipotesi conservative del modello concettuale (cfr. par.2.1) e con le assunzioni sui parametri e condizioni al contorno riportate nei par. 2.2 e 2.3), al fine di valutare successivamente il disturbo piezometrico limite indotto dalle opere di cui agli scenari 1 e 2 (disturbati), in termini di variazioni massime del carico H calcolato su ciascuna cella del domino; il campo di flusso restituito dalla simulazione dello Scenario 0 corrisponde, di fatto, a quello della calibrazione finale, ottenuto accettando la distribuzione delle conducibilità idrauliche orizzontali interpolata sulle migliori stime (*best parameters*) di K calcolate sui 79 pilot points utilizzati (par. 2.3.4).

In Figura 3-1 si riporta l'andamento delle isofreatiche di passo 1 m restituite dalla simulazione nell'area di interesse, contestualmente alle isofreatiche ricostruite sulla base delle misure reali di luglio 206 (G3), utilizzate come riferimento (*targets*) nella calibrazione. In Tabella 7 (quarta colonna) sono riportati i valori calcolati dal modello in corrispondenza dei 18 punti di osservazione abitualmente monitorati.

Lo **Scenario 1** intende essere rappresentativo degli effetti massimi, in regime stazionario, indotti sulla piezometria indisturbata dalla realizzazione del (solo) diaframma impermeabile, nelle stesse ipotesi conservative del modello concettuale dello Scenario 0 e con le medesime assunzioni su parametri e condizioni al contorno; il diaframma è stato simulato attraverso la speciale condizione al contorno *WALL* disponibile in Groundwater Vistas, che consente di utilizzare il pacchetto modflow-compatibile *HFB* (*Horizontal Flow Barrier package*); come da progetto si è adottato un spessore pari a 1 m, un'altezza pari a quella di tutto il layer 1 e una conducibilità idraulica di 10^{-9} m/s.

In Figura 3-2 si riporta l'andamento delle isofreatiche di passo 1 m restituite dalla simulazione dello scenario 1 nell'area di interesse, contestualmente alle curve rappresentative delle variazioni, in m, rispetto alla condizione indisturbata; per agevolare la lettura si è scelto di rappresentare²⁰ in rosso le curve corrispondenti ad innalzamenti, localizzati prevalentemente a monte del muro; in verde quelle relative agli abbassamenti, meno diffusi e prevedibilmente localizzati a valle dell'opera.

Nella quinta colonna della Tabella 7 sono riportati i valori calcolati in corrispondenza dei 18 punti di osservazione, mentre nella colonna successiva sono riportate le variazioni rispetto allo scenario indisturbato (in rosso gli innalzamenti positivi e in verde gli abbassamenti, negativi).

Come si evince dai risultati della simulazione, l'innalzamento più consistente del livello di falda si riscontrerebbe nella zona immediatamente a monte del muro (tra P3 e P2), con valori dell'ordine di 1 m (massimo) entro un raggio di circa **40 m** dal vertice NE del tracciato dell'opera idraulica; al contempo gli abbassamenti maggiori risultano dell'ordine di mezzo metro e riguardano un'area particolarmente limitata, entro 25 m dall'angolo occidentale della proprietà.

I disturbi massimi leggibili, tenuto conto dell'approssimazione delle condizioni e degli errori introdotti dall'elaborazione dei raster, possono essere quantificati in +/- 30 cm rispetto all'indisturbato, più estesi a monte, fino ad una distanza di circa 250 m ad Est della proprietà, e meno rilevanti a valle, limitati ad una distanza di circa 90 m dal muro.

Lo **Scenario 2**, infine, intende rappresentare gli effetti massimi, in regime stazionario, indotti sulla piezometria indisturbata dalla realizzazione del diaframma impermeabile e del setto drenante, nelle stesse ipotesi conservative del modello concettuale dello Scenario 0 e con le medesime assunzioni su parametri e condizioni al contorno; come nello Scenario 1 il diaframma è stato simulato attraverso la condizione al contorno *WALL*, mentre il setto drenante è stato simulato modificando opportunamente la conducibilità idraulica delle corrispondenti celle del layer 1, fino a renderle rappresentative della caratteristica di progetto

²⁰ La rappresentazione grafica del disturbo con curve di iso-innalzamento e iso-abbassamento, ottenute per interpolazione dei raster dei residuals restituiti dal modello, è limitata a variazioni di entità superiore ai 30 cm in valore assoluto per ragioni di rumore numerico

(spessore mezzo metro, altezza pari a quella dell'intero layer), nell'ipotesi di utilizzare per il riempimento un materiale caratterizzato da un valore di K (isotropa) pari a $4 \cdot 10^{-2}$ m/s.

In Figura 3-3 si riporta l'andamento delle isofreatiche restituite dalla simulazione dello scenario 2, contestualmente alle curve rappresentative del disturbo, mentre i valori puntuali dei carichi e delle variazioni in corrispondenza dei 18 punti di osservazione sono riportati nelle ultime due colonne della Tabella 7.

Come si evince dalle rappresentazioni grafiche dei risultati e dai carichi restituiti nei punti di osservazione, gli effetti risultano qualitativamente identici a quelli dello scenario privo di dreno e quantitativamente molto simili, con un sensibile miglioramento della situazione (dell'ordine di 5-10 cm) nelle zone più vicine alla barriera e con una lieve diminuzione del raggio del disturbo, dell'ordine di 10 m, soprattutto a valle dell'opera.

La sostanziale equivalenza tra gli effetti degli scenari 1 e 2 è comunque coerente con le assunzioni e le condizioni al contorno adottate, necessarie per rendere *simulabile* un campo di moto estremamente conservativo, rappresentativo della situazione di massimo (*worst case*) di una falda effimera che in realtà, e non raramente, risulta del tutto assente.

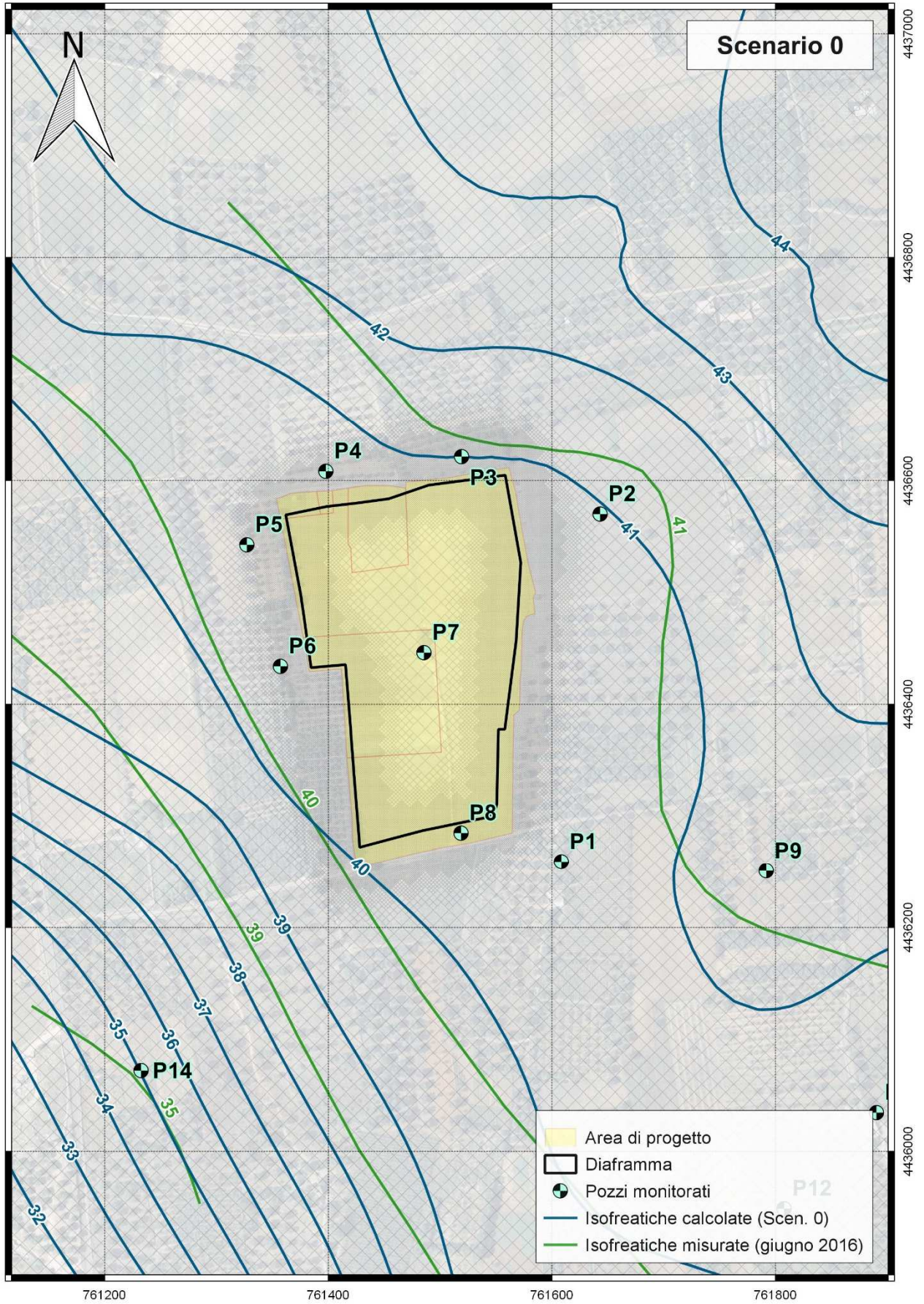


Figura 3-1 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 0 vs isofreatiche di riferimento

Tabella 7 Carichi H calcolati nei punti di osservazione e scostamenti con la situazione indisturbata

ID	X [EPSG32633]	Y [EPSG32633]	H Scen. 0 [m s.l.m.]	H Scen. 1 [m s.l.m.]	Δ Scen. 1 [m]	H Scen. 2 [m s.l.m.]	Δ Scen. 2 [m]
P01	761608.5	4436258.9	40.466	40.966	0.50	40.949	0.48
P02	761643.1	4436570.0	40.978	41.883	0.91	41.846	0.87
P03	761519.2	4436621.3	40.999	41.964	0.97	41.915	0.92
P04	761397.8	4436608.2	40.567	40.571	0.01	40.554	-0.01
P05	761327.2	4436542.5	40.277	39.997	-0.28	40.006	-0.27
P06	761357.2	4436433.8	40.291	39.870	-0.42	39.883	-0.41
P07	761485.6	4436446.1	40.604	NA	NA	NA	NA
P08	761518.7	4436284.7	40.374	40.672	0.30	40.673	0.30
P09	761791.7	4436250.6	41.625	41.896	0.28	41.884	0.27
P10	761902.5	4436237.0	41.262	41.328	0.07	41.325	0.06
P11	761890.3	4436034.5	40.427	40.462	0.03	40.461	0.03
P12	761807.6	4435948.8	40.150	40.184	0.04	40.183	0.04
P13	761698.1	4435861.5	39.895	39.933	0.04	39.932	0.04
P14	761232.5	4436072.1	35.034	35.084	0.03	35.087	0.04
P15	761055.4	4436399.5	38.284	38.116	-0.16	38.121	-0.16
P16	761047.5	4436600.8	39.540	39.424	-0.12	39.427	-0.11
P17	760991.9	4436732.8	39.758	39.729	-0.03	39.730	-0.03
P18	760907.6	4436788.0	39.672	39.663	-0.01	39.663	-0.01

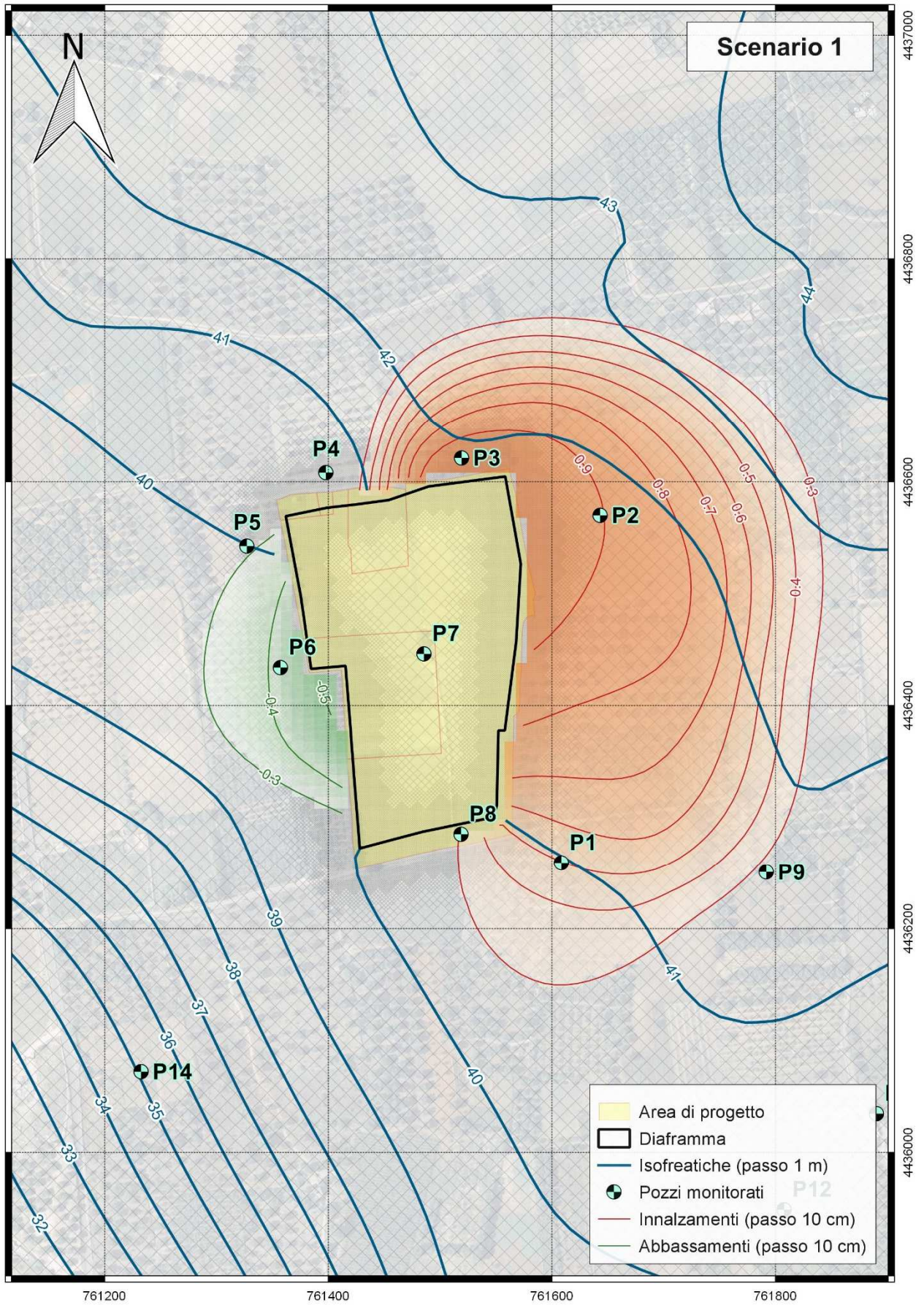


Figura 3-2 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 1 e variazioni rispetto all'indisturbato, in m

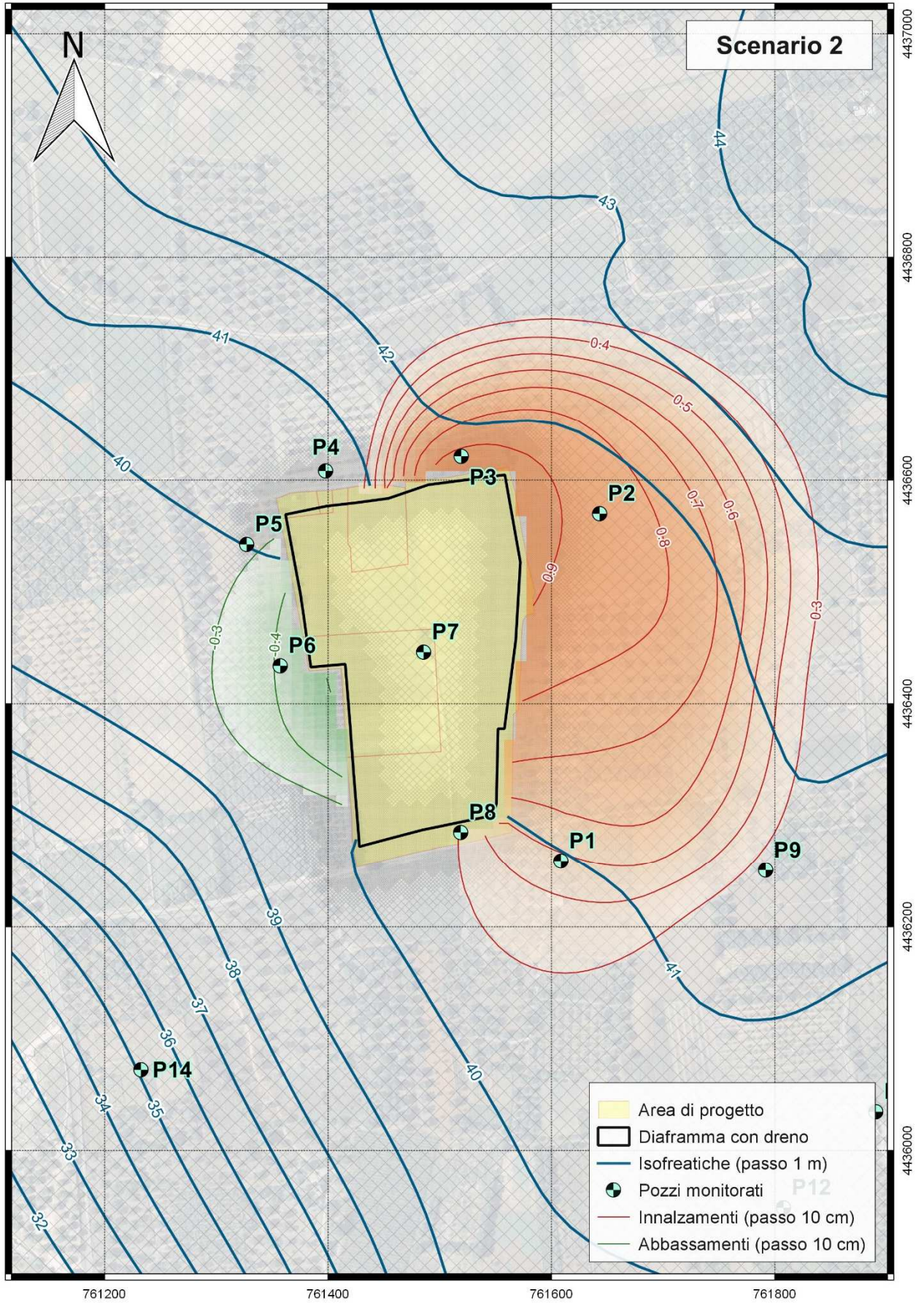


Figura 3-3 Isofreatiche restituite dal modello nello Scenario 2 e variazioni rispetto all'indisturbato, in m

Bibliografia

- Anderson, Mary, Woessner, William e Hunt, Randall. 2015.** *Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport*. 2nd Edition. s.l. : Academic Press, 2015. ISBN: 978-0120581030.
- Bear, Jacob e Cheng, Alexander H.-D. 2010.** *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. s.l. : Springer, 2010. ISBN: 978-1-4020-6681-8.
- Cotecchia, Vincenzo. 2014.** *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia. Vol. XCII - Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa*. . s.l. : ISPRA Servizio Geologico d'Italia, 2014. ISBN: 978-88-9311-003-7.
- Di Molfetta, Antonio e Sethi, Rajandrea. 2012.** *Ingegneria degli acquiferi*. Milano : Springer-Verlag Mailand, 2012. ISBN: 9788847018518.
- Doherty, John. 2015.** *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models - PEST: complete theory and what it means for modelling the real world*. Brisbane : Watermark Numerical Computing, 2015.
- Genetier, Bernard. 2010.** *La pratica delle prove di pompaggio in idrogeologia*. 2a edizione. Palermo : Dario Flaccovio Editore, 2010. ISBN: 9788877582089.
- Hamill, Leslie e Bell, Frederic. 1992.** *Acque sotterranee - Ricerca e sfruttamento*. Palermo : Dario Flaccovio Editore, 1992. ISBN: 88-7758-136-0.
- Langevin, Christian D., et al. 2008.** *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*. s.l. : U.S. Geological Survey, 2008. USGS Techniques and Methods Book 6,.
- Rumbaugh, James O. e Rumbaugh, Douglas B. . 2017.** *Guide to Using Groundwater Vistas version 7*. Leesport : Environmental Simulations, Inc., 2017.
- Zheng, Chunmiao e Wang, Patrick. 1999.** *A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems - Documentation and User's Guide*. University of Alabama. s.l. : U.S. Army Corps of Engineers, 1999. Contract Report SERDP-99-1.