

<i>Elaborato</i>	<i>Livello</i>	<i>Tipo</i>	<i>Sistema / Edificio / Argomento</i>	<i>Rev. 01</i>
NP VA 01851 ETQ-00111409	A	R - Relazioni tecniche	ISB - Indagini, studi e bonifiche ambientali	Data 26/05/2022
<b>Centrale / Impianto:</b>	IMPIANTI NUCLEARI - Valutazioni Ambientali per le Centrali Nucleari e gli Impianti del Ciclo del Combustibile			
<b>Titolo Elaborato:</b>	Modello di flusso idrogeologico e trasporto del Sito ENEA-Sogin di Trisaia			
revisione 01				
<i>Timbri e firme per responsabilità di legge</i>				
Autorizzato				
SORVEGLIANZA SUGLI ELABORATI PRODOTTI DA IGA-fornitori				
Motivo invio: Per Benestare				
ESTERNO		IAM Ceron A. IAM Gragnanini V.	IAM Volpicelli P.	REA Velletrani I.
<b>Incaricato</b>	<b>Collaborazioni</b>	<b>Verifica</b>	<b>Approvazione / Benestare</b>	<b>Autorizzazione all'uso</b>

PROPRIETA'

Velletrani I.

LIVELLO DI CATEGORIZZAZIONE

Interno

**Livello di categorizzazione:** Pubblico, Interno, Controllato, Ristretto

Il presente elaborato è di proprietà di Sogin S.p.A. È fatto divieto a chiunque di procedere, in qualsiasi modo e sotto qualsiasi forma, alla sua riproduzione, anche parziale, ovvero di divulgare a terzi qualsiasi informazione in merito, senza autorizzazione rilasciata per scritto da Sogin S.p.A.



*Modello di flusso idrogeologico e trasporto del sito ENEA-  
Sogin di Trisaia (MT)*

*RELAZIONE TECNICA*



**IRIDE**

**WEST  
Systems**

*Contratto quadro Servizi di Ingegneria C0487S17*

*Scheda di Attivazione NP VA 01784*

*10 maggio 2022*

## INDICE

1	Introduzione .....	2
2	Inquadramento territoriale del sito ENEA-Sogin di Trisaia.....	3
2.1	Inquadramento geologico e geomorfologico locale.....	3
2.2	Inquadramento idrogeologico locale .....	6
3	Analisi dei dati ambientali .....	9
3.1	Dati pluviometrici .....	9
3.2	Dati freaticometrici .....	10
4	Sviluppo del modello numerico di flusso idrogeologico.....	13
4.1	Descrizione del modello di flusso idrogeologico 2017 (NP VA 01259).....	13
4.2	Descrizione del modello di flusso idrogeologico di dettaglio.....	13
4.3	Modello del sottosuolo.....	14
4.4	Dominio del modello ed impostazione della griglia .....	14
4.5	Parametri idrogeologici dell'acquifero e condizioni al contorno .....	15
4.6	Risultati del modello in condizioni transitorie.....	16
5	Sviluppo del modello numerico di trasporto dei contaminanti .....	18
5.1	Analisi dello stato della contaminazione .....	18
5.2	Risultati del modello di trasporto per il TCE.....	25
5.3	Risultati del modello di trasporto per il Cr VI .....	25
6	Conclusioni .....	26
7	Bibliografia.....	28

## 1 Introduzione

La presente relazione illustra la metodologia ed i risultati dell'attività di modellazione del flusso idrogeologico di dettaglio e del trasporto dei contaminanti nel sito di Trisaia (MT), effettuate da West Systems S.r.l. su richiesta di Sogin (*Contratto quadro Servizi di Ingegneria C0487S17 - Scheda di Attivazione NP VA 01784*). Il presente studio costituisce un approfondimento e un completamento del modello idrogeologico a vasta scala predisposto da Sogin, applicando il codice di calcolo *FeFlow (Finite Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes ©1979-2016, DHI-WASY GmbH – v.7.0)* basato su un approccio di soluzione agli elementi finiti.

Lo sviluppo del modello di flusso ha come obiettivo quello di fornire un riferimento concettuale idrogeologico condiviso dell'area ed una base per la progettazione e la valutazione degli interventi di messa in sicurezza d'emergenza e/o di bonifica ambientale delle acque sotterranee. Il successivo modello di trasporto permette di effettuare una stima della massa dei contaminanti e una possibile individuazione delle sorgenti di contaminazione presenti all'interno del sito Sogin (ed ENEA), con la possibilità di simulare gli effetti attesi dalle attività di risanamento ambientale.

La modellazione numerica del flusso idrogeologico è stata realizzata sulla base dei dati stratigrafici e idrogeologici provenienti dalle varie campagne di indagini eseguite nel sito e dalle attività di monitoraggio in corso. Sono stati inoltre utilizzati i dati provenienti dalle relazioni *NP VA 01259 "Aggiornamento ed implementazione del modello idrogeologico stazionario della falda sottostante il sito della Trisaia"* e *NP VA 01678 "Impianto ITREC Trisaia – Modifica regimentazione acque meteoriche e realizzazione impianto di sollevamento-Relazione geologica"*.

I dati ambientali utilizzati per la costruzione del modello di flusso idrogeologico sono stati selezionati ed elaborati dalla stazione di rilevamento automatico della qualità dell'aria presente nel sito Sogin (<https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclounucleare/sitinucleariitaliani/impiantoitrecrotondella/Pagine/rilevamentoautomaticoqualitaaria.aspx>).

La modellazione numerica del flusso delle acque sotterranee è stata realizzata in condizioni transitorie con l'obiettivo di calibrare il modello con la campagna freaticometrica realizzata a **marzo 2021**. Sono state successivamente realizzate delle simulazioni in condizioni transitorie per simulare il processo di trasporto di alcuni contaminanti presenti nella matrice acque sotterranee e per analizzare possibili interventi per il trattamento dei contaminanti.

Nel **capitolo 2** viene fornito un inquadramento territoriale del sito Sogin ITREC di Trisaia, che comprende anche una sintesi della geologia, dell'idrogeologia ed il relativo modello concettuale dell'area del sito.

Il **capitolo 3** illustra l'analisi dei dati ambientali che sono stati utilizzati per la costruzione del modello di flusso, in particolare per l'elaborazione delle condizioni al contorno e dei contaminanti simulati nel modello di trasporto.

Nel **capitolo 4** vengono descritti le fasi di costruzione del modello numerico di flusso, le modalità di calcolo ed i risultati ottenuti.

Il **capitolo 5** riporta i risultati del modello di trasporto per due diversi contaminanti che presentano superamenti dei valori di soglia di concentrazione (CSC) di Tabella 2 Allegato 5 Parte IV del D. Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii. nel sito Sogin, ossia Tricloroetilene (TCE) e Cromo esavalente (Cr VI).

Nel **capitolo 6** si riportano infine le conclusioni del lavoro.

## 2 Inquadramento territoriale del sito ENEA-Sogin di Trisaia

L'area di studio è ubicata nel Comune di Rotondella e comprende l'area dell'impianto Sogin ITREC, avente estensione di circa 6.8 ettari, all'interno nella porzione più settentrionale dell'area di pertinenza del Centro Ricerche (CR) ENEA di Trisaia. Il CR ENEA è stato realizzato nel 1963, essenzialmente come centro di riprocessamento degli elementi esauriti del combustibile nucleare.

Il Centro Ricerche è delimitato a Nord e Nord/Est dal fiume Sinni, a Est dalla strada statale 106 Ionica, mentre a Sud e ad Ovest il confine è in prossimità della strada comunale della Trisaia, come riportato in Figura 1.

L'impianto Sogin ITREC (*Impianto di Trattamento e Rifabbricazione Elementi di Combustibile*) si trova all'interno del CR ENEA ed è stato costruito tra il 1960 e il 1970 dal CNEN, Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare. Nel 1987, a seguito del referendum sul nucleare, le attività sono state interrotte. Da allora è garantito il mantenimento in sicurezza. Nel 2003 Sogin ha assunto la gestione dell'impianto con l'obiettivo di realizzarne il *decommissioning*.



Figura 1. Ubicazione del Centro Ricerche ENEA e dell'Impianto ITREC Sogin.

### 2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico locale

Il territorio lucano è dominato dalla presenza di tre elementi geologici principali: l'Appennino Meridionale, la Fossa Bradanica (avanfossa adriatica meridionale) e l'Avampese Apulo. L'evoluzione neotettonica della Fossa Bradanica è segnata, tra il Pliocene inferiore ed il Pleistocene superiore, da fasi alterne di abbassamento e sollevamento dell'area con conseguenti migrazioni della linea di costa e formazioni di più ordini di terrazzamenti, sia marini che fluviali.

La zona della provincia di Matera corrisponde alla propaggine meridionale della fossa pliocenico-quadernaria i cui sedimenti di riempimento sono caratterizzati da discordanze intraformazionali e fenomeni di alloctonia e giacciono in discordanza sul substrato calcareo cretaceo della Catena Appenninica. In particolare, l'area in cui sorge il complesso ENEA-Sogin ricade nel **dominio dei depositi marini terrazzati**, caratterizzati da una giacitura dei terreni generalmente sub-orizzontale (Figura 2).

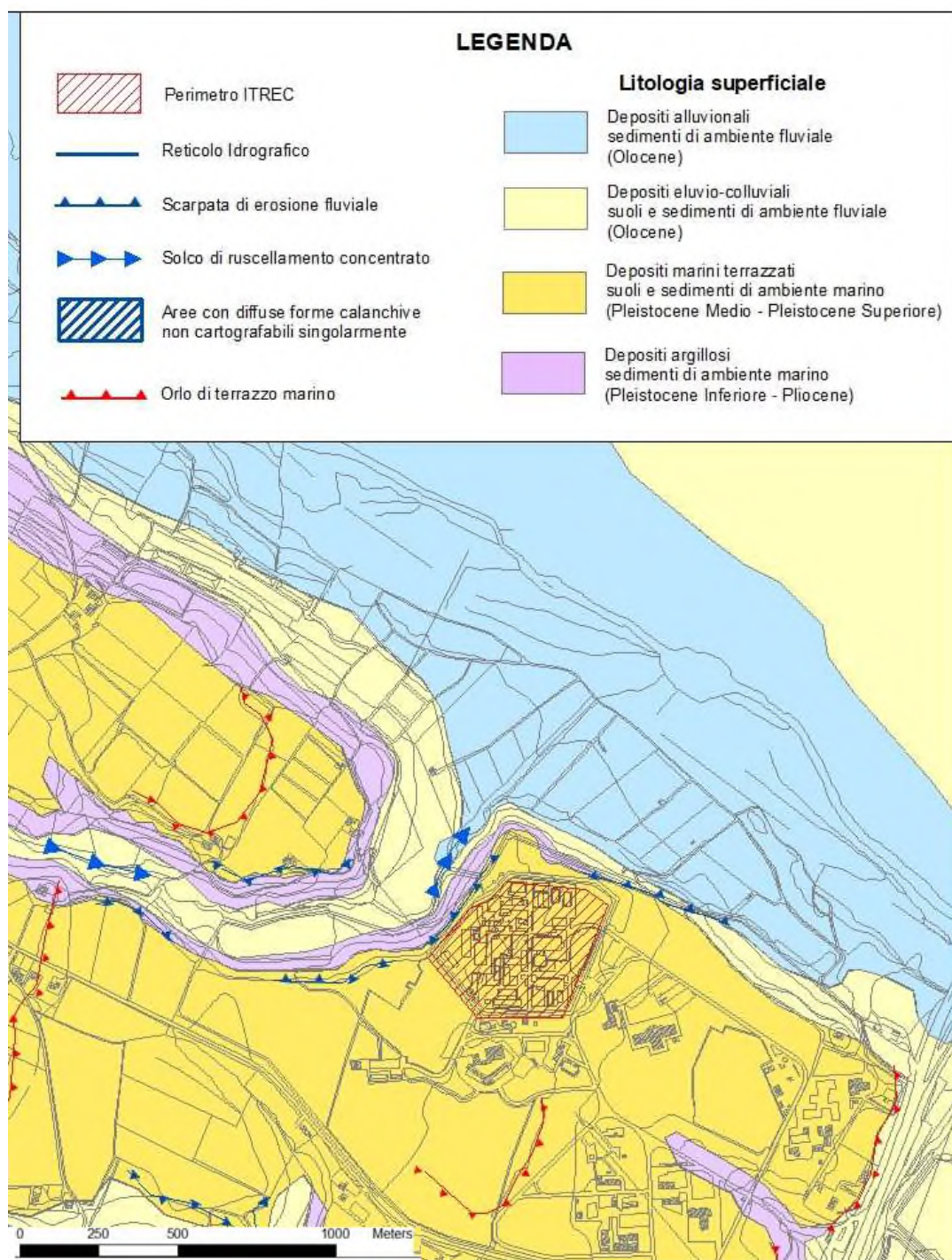


Figura 2. Estratto della carta geologica-morfologica, scala 1:10.000. Fonte: Sogin

Nell'area del CR ENEA ed in prossimità della stessa si riconoscono in affioramento i seguenti terreni (in ordine dal più recente:

- **Depositi alluvionali attuali (Olocene)** – affiorano lungo il corso del fiume Sinni e dei principali corsi d'acqua e sono costituiti da ghiaie e ciottoli eterometrici di natura calcarea con intercalazioni sabbiose e argillose. Lo spessore dei depositi è dell'ordine di qualche metro.
- **Depositi alluvionali recenti (Olocene)** – più antichi rispetto agli attuali, si trovano sospesi di qualche metro sopra gli alvei principali e affiorano in corrispondenza della piana del fiume Sinni, dove

raggiungono spessori massimi di 70 metri circa. Sono costituiti da sabbie e sabbie argillose con livelli di ghiaie. Localmente sono presenti lenti di argilla limosa di spessore centimetrico.

- **Depositi terrazzati (Pleistocene)** – ghiaie poligeniche con clasti eterometrici a componente calcarea e calcareo-marnosa e matrice limoso-sabbiosa, con livelli di sabbie e limi sabbiosi più frequenti e continui in prossimità del letto. Affiorano nel settore nord-occidentale dell'area (e quindi in corrispondenza dell'impianto Sogin ITREC) e sono organizzati secondo diversi ordini di terrazzamento sia marino che fluviale. La potenza di questi depositi è variabile ed in genere compresa tra 5 e 10 metri.
- **Argille grigie (Pliocene)** – limi ed argille plastiche di ambiente marino litorale, a volte lagunare, con sottili livelli di argille sabbiose nella parte sommitale della formazione. Costituiscono una unità di notevole potenza (diverse centinaia di metri), affiorante esclusivamente in corrispondenza delle scarpate di terrazzo.

Le *caratteristiche geomorfologiche* dell'area in esame sono ricollegabili al tipico paesaggio fluviale di pianura costiera caratterizzata da un'importante corso d'acqua rappresentato in questo caso dal tratto terminale del fiume Sinni. Il fiume Sinni nasce a quota 1.380 m, dalla Serra della Giumenta, sul versante orientale del monte Sirino-Papa e percorre da ovest a est l'estremo settore meridionale della Basilicata.

L'area esaminata si presenta per lo più sub-pianeggiante con quote comprese tra i 120 e 10 m s.l.m. degradanti dolcemente verso il mare. Tale morfologia è tuttavia interrotta dal disegno della rete idrografica caratterizzato principalmente dall'incisione valliva del fiume Sinni e da incisioni minori determinate dalla fitta rete di torrenti, fossi e canali presenti. In particolare, nell'area in prossimità del CR ENEA, l'alveo del Sinni ha una larghezza media di 600 m ed è ricoperto da un materasso di alluvioni grossolane. Il corso d'acqua, che scorre mantenendo una direzione principale NW-SE, non presenta un'unica asta fluviale, ma è caratterizzato da una fitta rete di canali anastomizzati. Tale configurazione geomorfologica testimonia l'irregolarità nel tempo del regime fluviale con piene improvvise, associate a notevole trasporto solido, e lunghi periodi di secca. L'unico affluente del Sinni, in questo tratto, è ubicato in sinistra idrografica (Fosso della Torre – Fosso Granata). Il fosso è caratterizzato da un disegno di tipo dendritico con un canale principale che si suddivide in rami via via meno importanti procedendo verso monte, tipico disegno di corsi d'acqua che scorrono su terreni poco permeabili e a limitata acclività. Oltre il fiume Sinni ed il suo affluente nel settore sud orientale dell'area esaminata è presente un altro bacino idrografico minore che drena le sue acque direttamente al Mar Ionio. L'asta principale individuata è il Fosso Rivolta che nasce dall'unione del Fosso Carpali e del Fosso Pantanello. Anche il disegno di tali aste fluviali è di tipo dendritico. Per quanto riguarda il settore nord occidentale dell'area di studio (in destra orografica del fiume Sinni) l'assetto idrografico è caratterizzato dalla presenza di canali irrigui e piccole vene che li alimentano.

L'assetto geomorfologico dell'area è determinato, oltre che dal disegno del reticolo idrografico sopra descritto, dalla natura litologica del substrato costituito principalmente da diversi ordini di depositi terrazzati sia di origine marina (orientati parallelamente alla linea di costa) che alluvionali, nonché da depositi terrigeni pliocenici di origine marina.

L'area dell'Impianto Sogin ITREC, ubicato nel settore nord occidentale del CR ENEA, dall'analisi geomorfologica condotta risulta essere collocata in corrispondenza di un lembo di terrazzo marino posto ad una quota topografica di circa 40 – 45 m s.l.m., pensile rispetto all'alveo del fiume Sinni, che scorre nell'area prossima al Sito a quote topografiche comprese tra i 10 – 15 m s.l.m.

## 2.2 Inquadramento idrogeologico locale

Sulla base dell'assetto geologico-strutturale, nonché delle caratteristiche di permeabilità delle diverse litologie presenti nel substrato dell'area in esame, è possibile identificare **due complessi idrogeologici sovrapposti, superficiale e profondo, separati da un deposito argilloso spesso anche decine di metri pressoché impermeabile** (*Argille di Montalbano Ionico*). La circolazione idrica sotterranea dell'area è impostata all'interno dell'acquifero superficiale costituito da sedimenti clastici, a granulometria grossolana con permeabilità medio-alta, caratteristici dei depositi alluvionali quaternari rappresentati sia da diversi ordini di terrazzamenti marini, sia dai depositi alluvionali. In particolare, la falda sottostante il sito è impostata nei livelli più permeabili dei depositi pleistocenici ed è alimentata principalmente dalle precipitazioni meteoriche. L'alimentazione da parte delle precipitazioni risulta fortemente variabile in funzione della stagionalità, durante i mesi estivi la diminuzione del regime pluviometrico e la scarsa umidità determinano una minore infiltrazione efficace.

In generale lo spessore della falda superficiale varia a seconda della zona e della stagionalità da alcuni centimetri ad un metro, con escursioni medie contenute nell'ordine del metro. Tale falda è quindi caratterizzata da una bassa produttività dovuta sia allo scarso spessore dei sedimenti, che ne costituiscono l'acquifero, sia alla alimentazione prevalentemente meteorica. Gli emungimenti effettuati in questo contesto hanno infatti mostrato depressioni del livello dinamico evidenti e pressoché immediate, seguite da periodi piuttosto prolungati necessari per il ripristino del livello statico.

Una prima campagna di misure piezometriche effettuata a giugno 2017 nei numerosi punti di monitoraggio, ubicati nell'area vasta, misurati durante l'esecuzione del *Piano di Caratterizzazione* ha consentito di ricostruire l'andamento delle falde freatiche presenti (Figura 9). La direzione principale di deflusso è circa NW-SE, verso la costa, mentre in corrispondenza dei depositi terrazzati si osservano localmente delle deviazioni in direzione delle scarpate. Anche il gradiente idraulico subisce delle variazioni in funzione della litologia e della morfologia del territorio, mostrando in particolare dei bruschi aumenti in corrispondenza dei margini di terrazzo. Si parla di più falde freatiche in quanto appare evidente che le scarpate dei terrazzi costituiscono elementi di discontinuità significativi.

Le soggiacenze misurate a giugno 2017 nell'area dell'impianto Sogin ITREC e del terrazzo oscillano tra 4 e 8 m dal p.c. (in relazione alla posizione e alle irregolarità morfologiche); nella piana sottostante oscillano tra 3 e 6 m dal p.c..

È importante sottolineare inoltre la presenza, nel settore nord occidentale del sito, di sistemi di isolamento idraulico in grado di intercettare la falda e/o deviarne il deflusso, che influenzano l'andamento delle curve isofreatiche. Nella figura seguente sono localizzate queste strutture schematicamente costituite da *diaframmi impermeabili o trincee drenanti*, perimetrali ai manufatti interrati particolarmente sensibili dell'impianto nucleare, da nord verso sud: Waste2, Waste1, Fossa 7.1, e piscina dell'impianto ITREC, attrezzate con pozzi di emungimento, atti a garantire il mantenimento del livello piezometrico locale al di sotto dei manufatti indicati.





Figura 3. Ubicazione dei pozzi di emungimento e dei sistemi di isolamento idraulico nell'area Sogin ITREC - Fonte Sogin.

L'andamento della falda superficiale è stato ricostruito con la campagna di monitoraggio effettuata a marzo 2021, circoscrivendo i punti per l'interpolazione numerica nella sola area del CR ENEA e considerando le scarpate dei terrazzi come elemento di discontinuità idrogeologica (Figura 4).

Nella Figura 4 si evidenzia in modo chiaro il deflusso prevalentemente da NW verso SE nell'area CR ENEA e si nota come la circolazione idrica sia caratterizzata dalla presenza di un basso idrogeologico in corrispondenza dei sistemi di isolamento idraulico precedentemente identificati (Figura 5) con un andamento locale della falda SW-NE. L'andamento della superficie libera della falda, allontanandosi dall'area di *dewatering*, riacquista la direzione prevalente NW-SE.

La velocità media del deflusso sotterraneo all'ingresso dell'area SOGIN è compresa fra  $1,0 \times 10^{-2}$  m/d e  $1,5 \times 10^{-2}$  m/d, con un gradiente idraulico compreso fra 0,8 % e 1,2%.

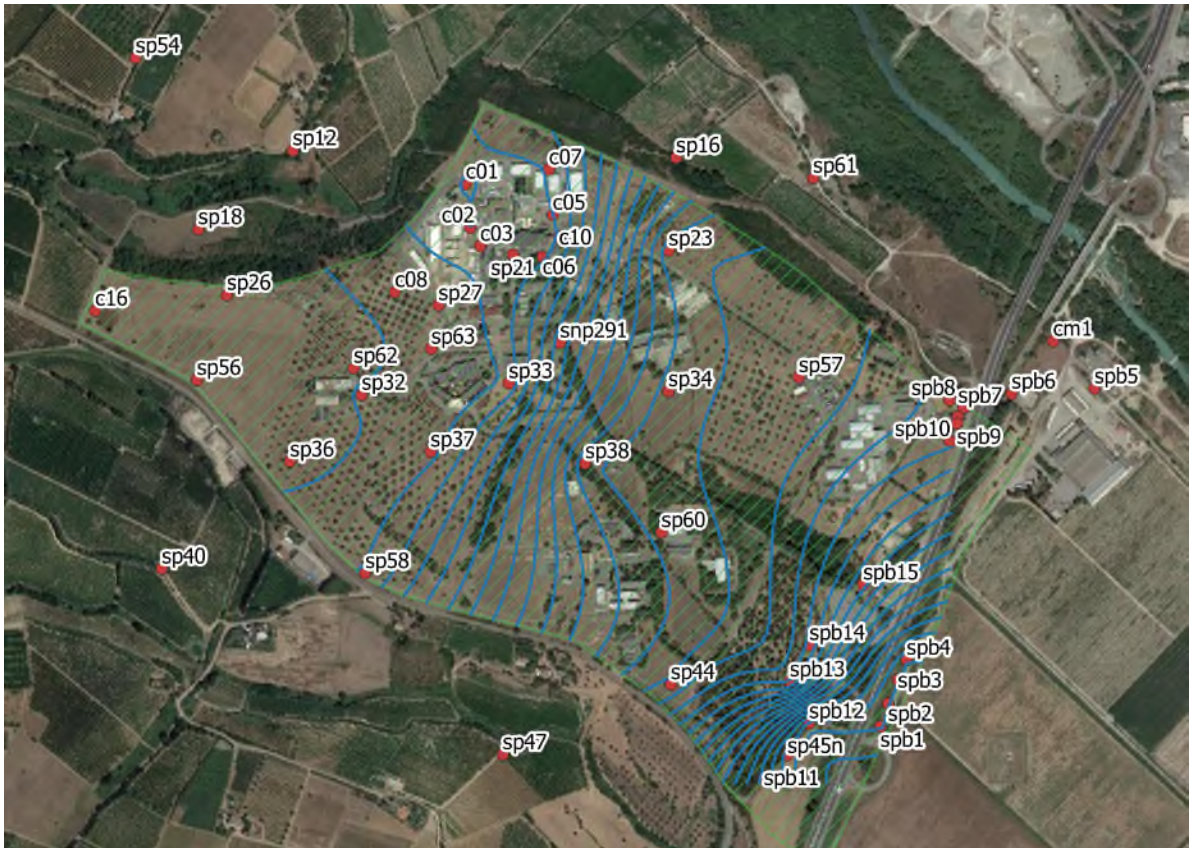


Figura 4. Ricostruzione della superficie freatica nell'area del CR ENEA a marzo 2021.



Figura 5. Dettaglio della superficie freatica nel sito Sogin ITREC riferita a marzo 2021.

### 3 Analisi dei dati ambientali

#### 3.1 Dati pluviometrici

Le precipitazioni giornaliere sono registrate a scala oraria dalla centralina di monitoraggio della qualità dell'aria installata nel sito Sogin ITREC (Coordinate Nord: 4446749,0 - Est: 639554,0 ad un'altitudine di 40 m s.l.m.), i cui dati sono disponibili al seguente link: <https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclounucleare/sitinucleariitaliani/impiantoitrecrondella/Pagine/rilevamentoautomaticoqualitaaria.aspx>

Le precipitazioni giornaliere e cumulate sono riportate in Figura 6, mentre in Figura 7 sono illustrate le precipitazioni aggregate a scala mensile. Da entrambe le figure si può notare come le precipitazioni maggiori siano avvenute tra marzo e aprile 2020 e tra novembre e dicembre 2020. Le precipitazioni cumulate per il 2020 sono state pari a 786.8 mm.

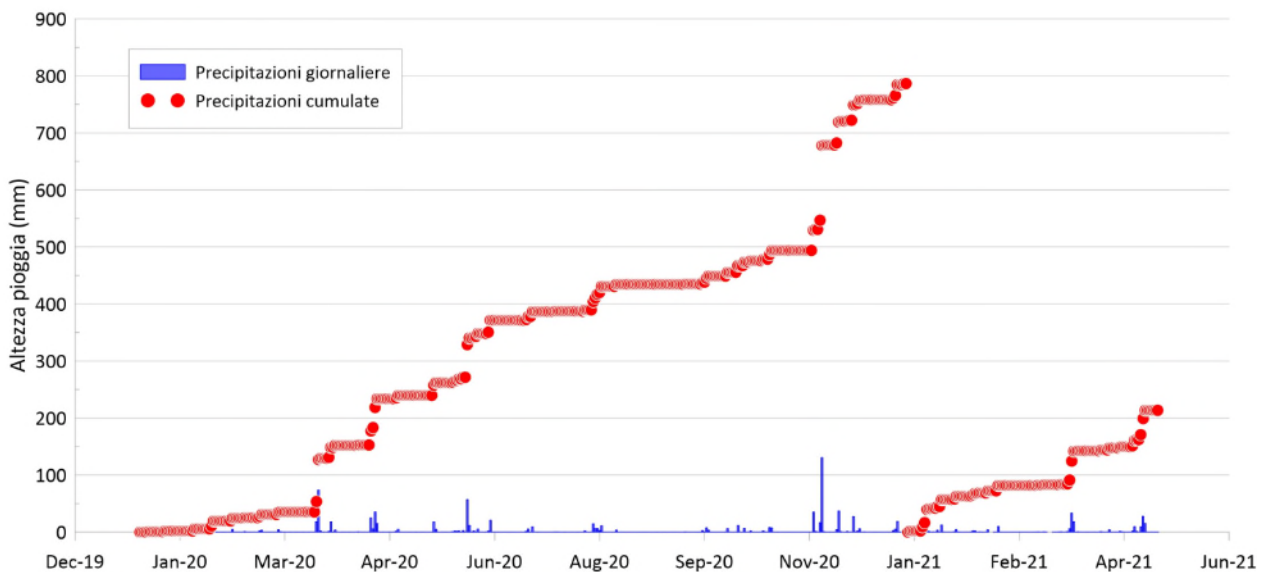


Figura 6. Precipitazioni giornaliere e cumulate della stazione Sogin ITREC.

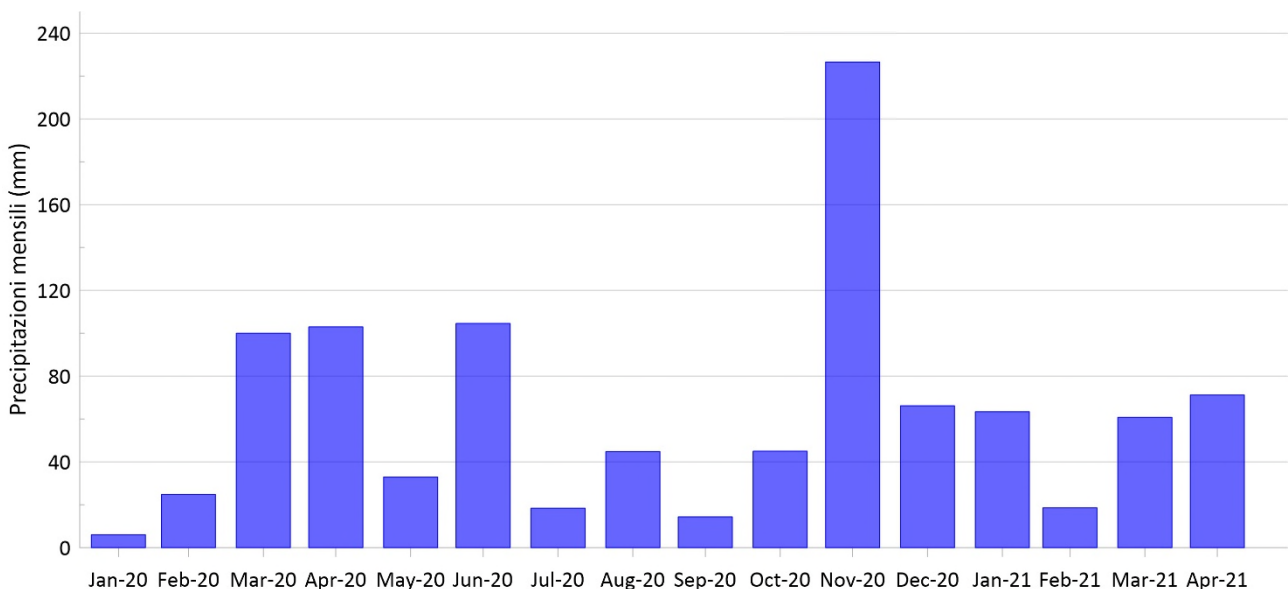


Figura 7. Precipitazioni mensili della stazione Sogin ITREC.

Il periodo considerato risulta particolarmente piovoso, analizzando i dati disponibili per il periodo 2016-2021 la piovosità media annua risulta di circa **670 mm**.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gennaio	48,6	152,0	48,4	111,6	6,0	63,4
Febbraio	19,4	44,8	90,6	32,0	24,8	20,6
Marzo	260,8	12,6	71,6	41,2	100,0	69,6
Aprile	25,2	32,0	0,8	39,8	103,0	71,2
Maggio	91,8	19,4	46,8	70,6	33,0	10,0
Giugno	52,8	4,0	40,8	19,4	104,6	16,0
Luglio	29,2	27,4	8,8	30,4	18,4	32,0
Agosto	88,4	5,4	46,2	0,4	44,8	17,6
Settembre	66,2	52,8	4,6	46,4	14,4	34,6
Ottobre	61,4	17,6	256,4	22,6	45,0	74,0
Novembre	37,8	111,0	59,4	205,4	226,6	141,6
Dicembre	8,0	24,4	33,2	33,4	66,2	26,4
<b>Tot anno</b>	<b>789,6</b>	<b>503,4</b>	<b>707,6</b>	<b>653,2</b>	<b>786,8</b>	<b>577,0</b>

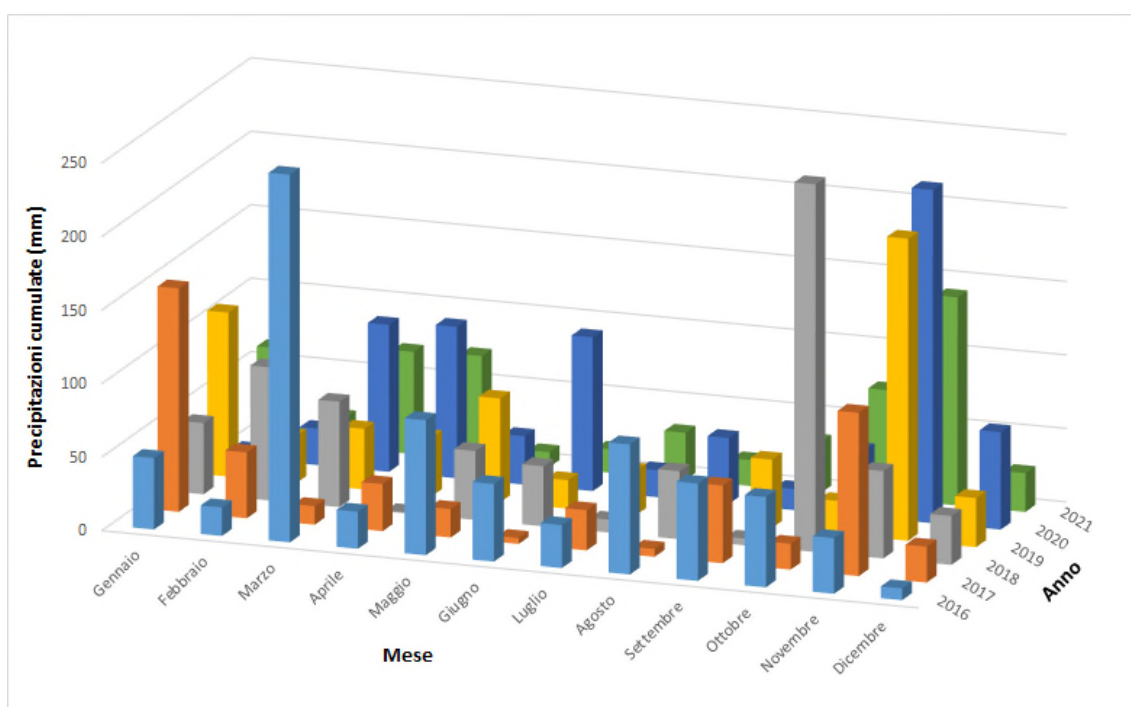


Figura 8. Precipitazioni mensili della stazione Sogin ITREC per il periodo 2016-2021.

### 3.2 Dati freaticometrici

Nella figura seguente è riportato l'andamento delle curve isofreatiche interpolato con i dati relativi alla campagna di monitoraggio effettuata a giugno 2017. Come si nota la direzione di deflusso generale è NW-SE, in direzione della costa, mentre in corrispondenza dei depositi terrazzati si osservano localmente delle deviazioni in direzione delle scarpate (nella zona dell'impianto ITREC il deflusso è prevalentemente da S verso N). Anche il gradiente subisce delle variazioni in funzione della litologia e della morfologia del territorio, mostrando in particolare dei bruschi aumenti in corrispondenza dei margini di terrazzo. Tali variazioni sono probabilmente dovute alla tecnica di interpolazione, poiché è ipotizzabile la presenza di due falde, non in

comunicazione idraulica, sui depositi terrazzati e sui depositi alluvionali del Sinni. Infatti, come illustrato nelle Figura 4 e Figura 5, in cui sono state interpolate le curve isofreatiche di marzo 2021 nella sola area CR Enea, l'andamento della superficie freatica appare più regolare, senza la presenza di elevati gradienti in corrispondenza dei margini di terrazzo.

Le soggiacenze misurate nell'area dell'impianto Sogin ITREC e del terrazzo oscillano tra 4 e 8 m dal p.c. (in relazione alla posizione e alle irregolarità morfologiche). Nella piana sottostante oscillano tra 3 e 6 m dal p.c.. Occorre segnalare che la prolungata mancanza di precipitazioni nei mesi precedenti del 2017 ha causato livelli particolarmente bassi della falda tanto che in alcuni piezometri nelle aree terrazzate sono stati misurati livelli coincidenti o inferiori alla quota del tetto della formazione argillosa di base. Risulta evidente che in queste condizioni il flusso della falda nell'acquifero dei depositi terrazzati è estremamente ridotto e molto influenzato dalle irregolarità morfologiche dello stesso tetto delle argille.

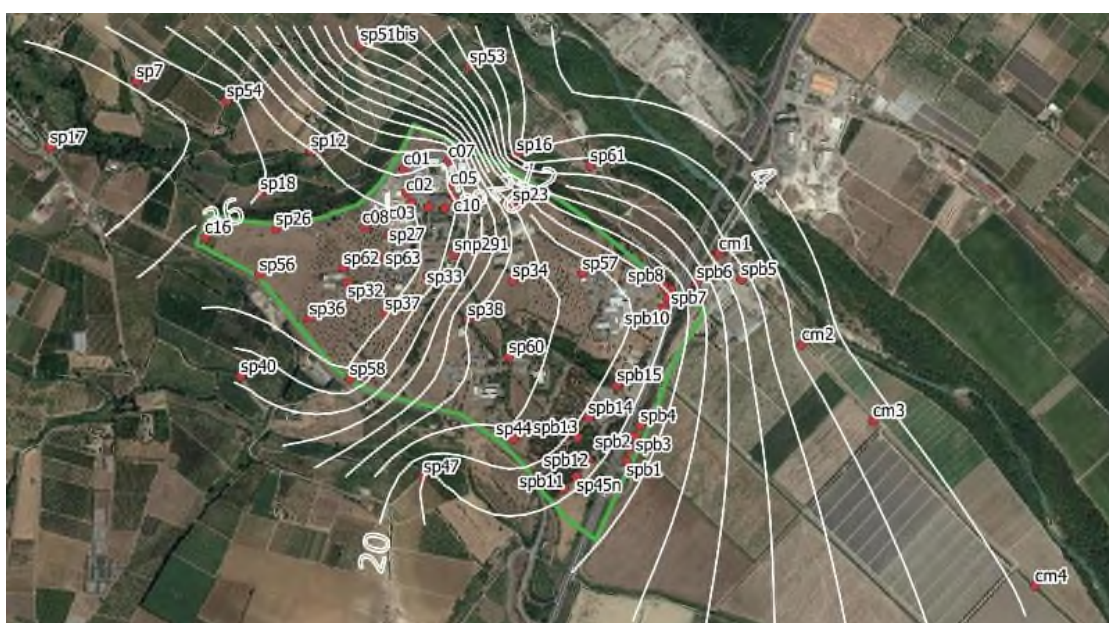


Figura 9. Ricostruzione delle curve isofreatiche a giugno 2017 utilizzando tutti i punti della rete di monitoraggio.

A partire da metà febbraio 2021 sono stati installati **4 diver** per il monitoraggio in continuo del livello piezometrico rispettivamente nei piezometri C01, C07, C10 e SP27. Di seguito si riporta l'andamento giornaliero registrato, in cui *non si evidenziano variazioni sostanziali* per i punti SP27, C07 e C10 posti rispettivamente in direzione Sud-Nord del flusso idrogeologico nella zona Sogin (Figura 10). Diversamente il *diver* installato nel piezometro C01 registra variazioni periodiche nell'ordine di 0.50 metri del livello piezometrico, con picchi di circa 1.50 m. Queste ultime potrebbero essere legate alle attività di manutenzione effettuate sul piezometro, che ha richiesto l'estrazione e successivo riposizionamento della sonda di monitoraggio ad una diversa profondità, mentre le variazioni periodiche sono probabilmente dovute all'effetto di richiamo del dreno, poiché il piezometro C01 è poco distante dal sistema di trincee drenanti del Waste1. Non avendo quindi contezza delle misure effettuate da tale piezometro si trascurano in questa sede tali dati (Figura 10).

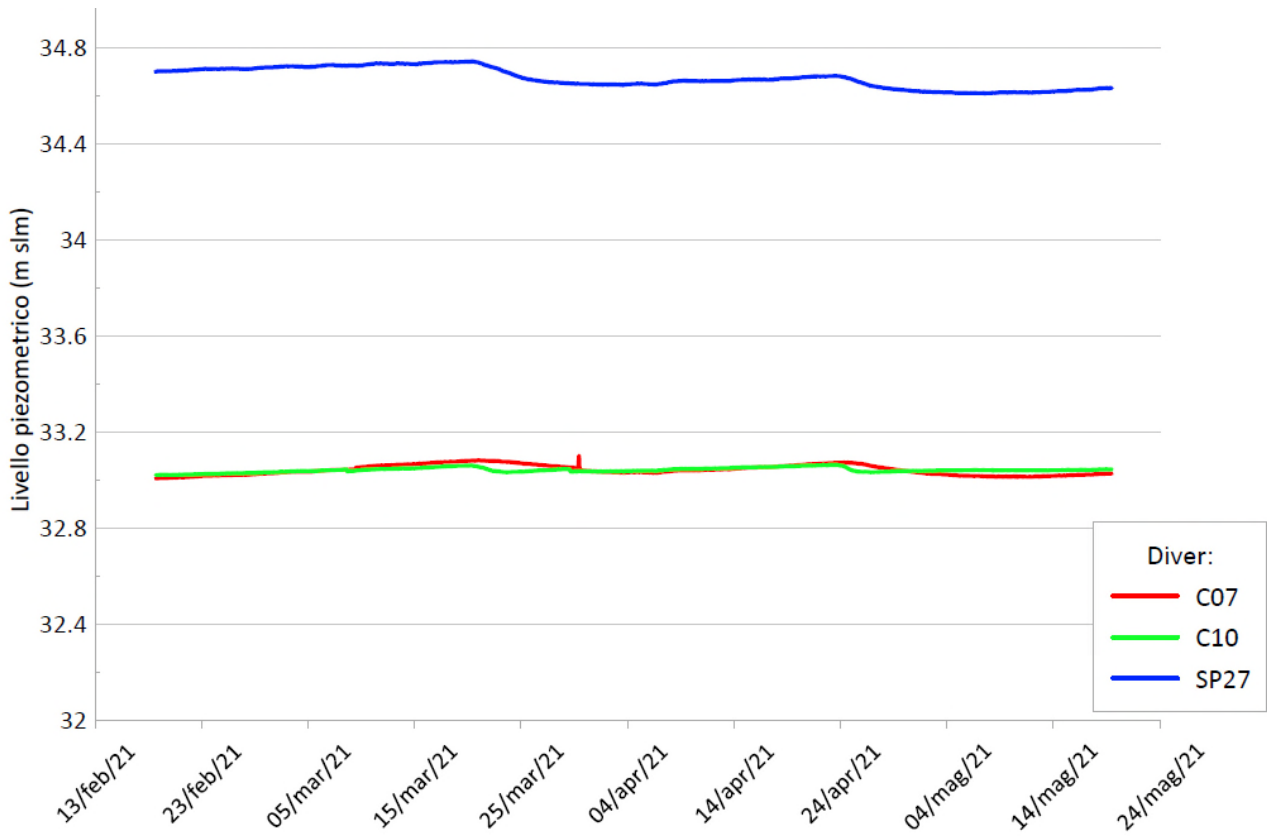


Figura 10. Andamento giornaliero del livello piezometrico registrato nei piezometri della rete di monitoraggio in continuo.

## 4 Sviluppo del modello numerico di flusso idrogeologico

### 4.1 Descrizione del modello di flusso idrogeologico 2017 (NP VA 01259)

Il presente studio costituisce un approfondimento e un completamento del modello idrogeologico predisposto da Sogin nel 2017 (document NP VA 01259), realizzato con il codice di calcolo *FeFlow* basato su un approccio di soluzione agli elementi finiti.

Di seguito si riportano le assunzioni fatte per l'implementazione del modello 2017.

L'area del modello considerata era di circa 2.6 km<sup>2</sup> (circa 2 x 1.3 km).

Per la definizione delle superfici che delimitano il volume di studio in direzione Z erano state individuate le seguenti superfici:

- superficie di tetto, ovvero la superficie topografica ricavata dal *dtm* regionale;
- superficie top del complesso argilloso;
- superficie di base del modello; in questo caso si è scelto di utilizzare come limite inferiore del modello una superficie piana a quota costante (-20 m s.l.m.) e interna alle argille di base, che hanno spessore dell'ordine delle centinaia di metri.

Definite le tre superfici sopra descritte, il modello era stato suddiviso in due *layers*. Per migliorare la risoluzione verticale nel calcolo e per meglio definire le zone di permeabilità, erano state aggiunte varie *slices* intermedie per arrivare ad un totale di 9 *slices* (8 *layers*).

Al modello geometrico erano state assegnate le proprietà del mezzo poroso:

- **Porosità efficace** (*drainable porosity* o *specific yield*)  $S_y$ : 0.2 per i depositi terrazzati ed alluvionali e 0.02 per la formazione argillosa.
- **Conducibilità idraulica**: ai tre principali corpi idrogeologici individuati sono state assegnate i seguenti intervalli di conducibilità idraulica, ottenuti a seguito della calibrazione del modello:
  - Complesso argilloso:  $K_{xy}=1\cdot 10^{-8}$  m/s e  $K_z=1\cdot 10^{-9}$  m/s;
  - Complesso dei depositi marini terrazzati:  $K_{xy}=1\cdot 10^{-6}$  -  $6\cdot 10^{-4}$  m/s e  $K_z=1\cdot 10^{-7}$  -  $6\cdot 10^{-5}$  m/s;
  - Complesso dei depositi alluvionali e litorali recenti ed attuali:  $K_{xy}=1.5\cdot 10^{-4}$  m/s e  $K_z=1.5\cdot 10^{-5}$  m/s;

e le condizioni al contorno:

- **Infiltrazione efficace**: 22 mm/a, definita a seguito della calibrazione del modello;
- **Hydraulic head BC** – carichi idraulici costanti, coerenti con le misure piezometriche, sui nodi posti lungo i bordi di monte e di valle del dominio e lungo i corsi d'acqua;
- **Seepage Face BC** – drenaggio libero sui nodi posti lungo il bordo dell'area di *dewatering*.

### 4.2 Descrizione del modello di flusso idrogeologico di dettaglio

Il modello di flusso di dettaglio della falda superficiale sviluppato nel presente lavoro è stato invece realizzato con il codice alle differenze finite *Visual ModFlow Flex 6.1* ©, *Waterloo Hydrogeologic*. *Visual Modflow Flex* consente di costruire modelli concettuali 3D in ambiente GIS, offrendo la flessibilità di sperimentare differenti tipologie di griglie e simulatori. Da un unico modello concettuale si possono facilmente creare modelli numerici multipli con tipologie di griglie differenti e diversi scenari di modellazione, facilmente aggiornabili e modificabili a seconda delle necessità. Dal modello numerico creato è possibile simulare il flusso delle acque sotterranee in un mezzo saturo, tenendo conto dei parametri fisici imposti dell'acquifero e delle opportune

condizioni al contorno. Il modello di flusso dell'acquifero superficiale (non confinato) è stato realizzato in condizioni di moto transitorio per la fase di calibrazione dei parametri del modello.

È stato deciso di non realizzare una simulazione di validazione del modello a causa dell'assenza di un'ulteriore campagna di monitoraggio recente e rappresentativa delle variazioni stagionali della falda freatica. Infatti l'altra campagna di giugno 2017 risulta non adatta (temporalmente) per essere considerata come obiettivo per la validazione del modello.

Per la ricostruzione del modello geologico del sottosuolo nell'area di interesse si è fatto riferimento ai dati utilizzati nel modello di flusso a vasta scala sviluppato da Sogin, per il quale erano stati impiegati i dati relativi alle stratigrafie dei piezometri e dei sondaggi geognostici realizzati da Sogin negli anni.

### 4.3 Modello del sottosuolo

Il modello del sottosuolo interessato nella modellazione del flusso è stato organizzato su un unico livello, con l'obiettivo di riprodurre la falda presente nei depositi marini terrazzati al di sopra del complesso argilloso. Pertanto le superfici che delimitano il volume del modello in direzione verticale sono le seguenti:

- Superficie superiore coincidente con la superficie topografica.
- Superficie inferiore coincidente con il tetto delle argille.

La ricostruzione 3D di entrambe le superfici è riportata nella figura seguente.

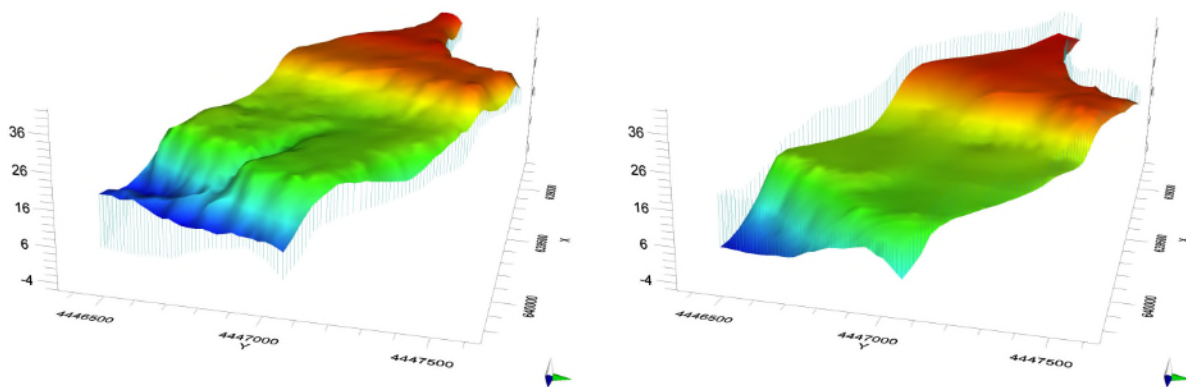


Figura 11. Dettaglio 3D della superficie topografica a sinistra e del tetto delle argille a destra.

### 4.4 Dominio del modello ed impostazione della griglia

Il dominio del modello di flusso di dettaglio ha una superficie complessiva di 0.95 km<sup>2</sup>, con una lunghezza massima pari a 1.5 km ed una larghezza massima di 0.8 km. La griglia di calcolo è stata imposta con un numero di celle quadrate pari a 150 x 130 di lato 10 metri, anche se il numero di celle attive (in cui il modello numerico calcola una soluzione) è molto inferiore poiché l'area presa in considerazione coincide quasi del tutto con l'area del CR ENEA come illustrato nella figura seguente. Il modello è stato rappresentato con un solo strato (1 layer), la cui quota massima della superficie topografica è 46.34 metri s.l.m., mentre la quota minima del tetto delle argille è di circa -6.5 metri s.l.m. La griglia 3D è quindi composta da 150 x 130 x 1 celle.





Figura 12. Definizione dell'area del dominio di calcolo del modello numerico.

#### 4.5 Parametri idrogeologici dell'acquifero e condizioni al contorno

Per ciascuna cella di calcolo attiva è necessario associare dei valori delle proprietà, in particolare per la conducibilità idraulica e parametri di *storage*. Per i parametri idrogeologici dello *storage* sono stati utilizzati quelli di default e sono stati impostati uguali per tutte le celle:

- Porosità totale: 0.3
- Porosità efficace (*Specific yield*):  $S_y=0.2$ .

Per quanto riguarda la conducibilità idraulica, per una caratterizzazione spaziale del parametro K, si è scelto in maniera cautelativa di assegnare per tutto il dominio un valore costante, in linea con quanto utilizzato inizialmente nel precedente modello di flusso a vasta scala e pari a  $K_x = K_y = K_z = 1.0 \times 10^{-5}$  m/s.

Le condizioni al contorno che sono state imposte nel presente modello sono le seguenti (Figura 13):

- **Constant head boundary (GHB) a monte** – Sui nodi posti lungo il bordo Nord-Ovest del dominio è stato attribuito il valore di carico idraulico pari a 35.5 metri coerente con le misure piezometriche.
- **Constant head boundary (GHB) a valle** – Sui nodi posti lungo il bordo Est del dominio è stato attribuito il valore di carico idraulico pari a 11 metri nella parte Nord e 7.5 metri in quella coerente con le misure piezometriche.
- **Recharge** – Diversamente da quanto ipotizzato nel modello di flusso a vasta scala è stato assegnato un valore di ricarica (infiltrazione efficace) pari a 130 mm/a, definita come il 20% della precipitazione media annua.
- **Drains** – Al fine di simulare i sistemi di trincee drenanti, sono stati inseriti lungo il bordo dell'area indicata da Sogin (Figura 3) dei sistemi di drenaggio. Il valore di conduttanza richiesto da *Modflow* è stato scelto in fase di calibrazione del modello in modo da ottenere una portata drenata pari a quella emunta dai pozzetti di raccolta **P2** e **P3**. Le portate medie giornaliere sono state calcolate con i dati forniti da Sogin dei primi 4 mesi del 2021 riportate di seguito.

Al fine di facilitare la convergenza del risolutore del modello, è opportuno che lo stesso possa iniziare la sua simulazione con una definizione dell'altezza piezometrica per ogni cella del dominio. La condizione iniziale è quindi la distribuzione delle altezze piezometriche nell'area del modello all'istante iniziale e deve essere assegnata all'intera area. Nel presente caso, come condizione iniziale della superficie freatica è stata imposta quella interpolata con i dati freaticometrici di febbraio 2021.

Le condizioni al contorno non sono variate durante il periodo di simulazione del modello pari a 31 giorni, che è stato elaborato in condizioni transitorie. In questo modo al termine della simulazione si è ottenuto un risultato adatto per il confronto con l'andamento piezometrico elaborato con i dati della campagna freaticometrica di marzo 2021.



Figura 13. Localizzazione delle condizioni al contorno imposte nel modello numerico di flusso.

mese	P2	P3	P4	P7,1	P8	totali m <sup>3</sup> mensili
gen-21	255	261	52	7	506	1081
feb-21	194	210	29	4	440	877
mar-21	212	207	48	4	460	931
apr-21	213	208	54	3	448	926
<b>Tot</b>	<b>874</b>	<b>886</b>				

Figura 14. Portate mensili emunte dai pozzi di drenaggio delle strutture interraste. Fonte: Sogin.

#### 4.6 Risultati del modello in condizioni transitorie

L'obiettivo del modello di flusso idrogeologico è quello di simulare il più possibile l'andamento dei livelli piezometrici misurati nel corso della campagna di monitoraggio di marzo 2021, cercando di minimizzare gli scarti fra i livelli misurati e quelli calcolati dal modello.

Il campo piezometrico ottenuto dalla simulazione e quello ottenuto dall'interpolazione dei valori della campagna di marzo 2021 sono riportati nella figura seguente.



Figura 15. Andamento piezometrico ottenuto dalla simulazione numerica (destra) ed interpolato con i dati di marzo 2021 (sinistra).

La rappresentazione dei residui riportata in Figura 16 evidenzia una generale buona rispondenza fra valori osservati e simulati, con un valore dell'indicatore *Normalized Root Mean Squared (RMS)* inferiore al 4%.

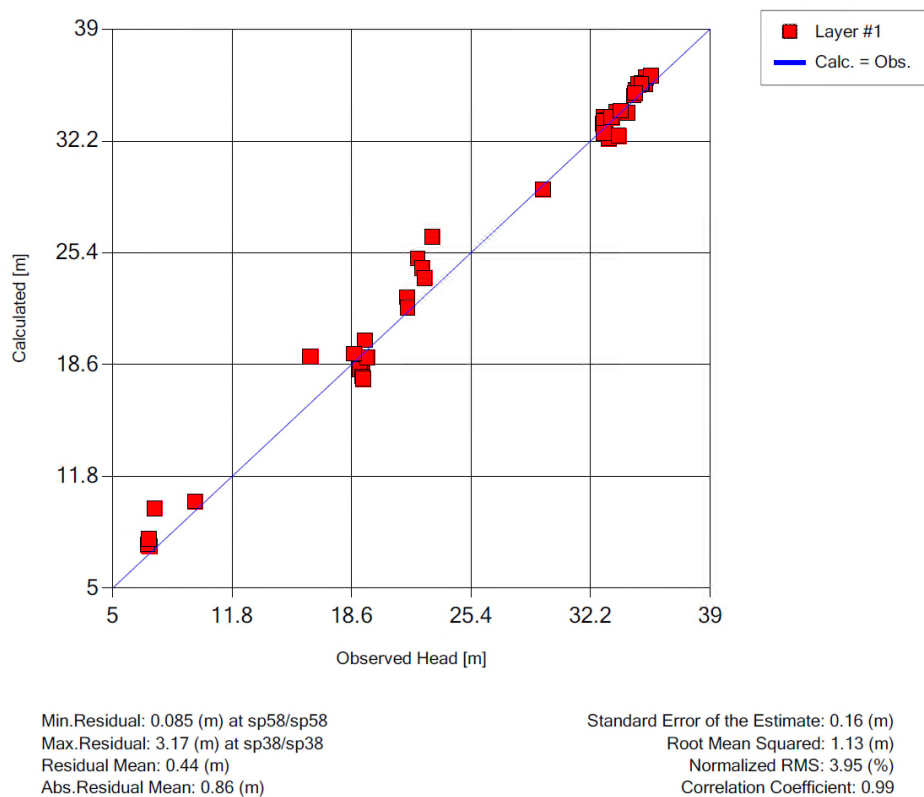


Figura 16. Confronto tra valori di carico piezometrico osservati a marzo 2021 e calcolati dal modello di flusso. In basso sono riportati gli indicatori statistici di accuratezza della simulazione.

Si riporta inoltre nella figura seguente un dettaglio della superficie freatica in corrispondenza della zona di *dewatering* all'interno del sito Sogin, in cui si nota il richiamo del dreno realizzato lungo il bordo del manufatto interrato Waste1.



Figura 17. Dettaglio della superficie freatica simulata nell'area Sogin con effetto del sistema di drenaggio presente intorno al manufatto Waste1.

## 5 Sviluppo del modello numerico di trasporto dei contaminanti

### 5.1 Analisi dello stato della contaminazione

Sogin svolge a partire dal maggio 2017 delle campagne analitiche per effettuare la caratterizzazione qualitativa della matrice acque sotterranee ed il monitoraggio ambientale. La cadenza delle campagne effettuate da Sogin è semestrale, Enea svolge invece campagne con cadenze da mensili a trimestrali. L'ultima campagna di monitoraggio utilizzata è stata quella di febbraio 2021.

I punti di misura comprendono **68** piezometri come previsto dal P.d.C. ed i composti analizzati sono:

- Tricloroetilene
- Triclorometano
- Cromo VI
- Manganese
- Ferro
- Boro
- Solfati.

I risultati delle campagne di monitoraggio risultano necessari per imporre le condizioni iniziali del modello di trasporto. Dalle analisi delle campagne condotte sono emersi in diversi punti di monitoraggio superamenti delle CSC per il Tricloroetilene (TCE) ed il Cromo VI (Cr VI).

Per determinare una distribuzione spaziale della concentrazione dei due contaminanti, da imporre come condizione iniziale nel modello di trasporto, è stata realizzata un'analisi statistica di tutte le campagne analitiche effettuate ed una successiva interpolazione utilizzando il programma *Surfer 16 Goldensoftware*. È stata utilizzata come indicatore statistico la mediana invece della media, poiché quest'ultima risente maggiormente della presenza di valori limite nel set di dati. Nella Tabella 1 e nella Tabella 2 si riportano i risultati delle campagne di monitoraggio effettuate ed il valore della mediana per entrambi i composti TCE e Cr VI.

Dai valori delle tabelle seguenti si evince che quasi la totalità delle campagne presentano superamenti delle CSC per entrambi i composti, ad indicare una contaminazione diffusa nell'area del CR Enea ed all'esterno della stessa.

In Figura 18 e Figura 19 è riportato anche l'andamento nel tempo dei piezometri che presentano superamenti delle CSC. Mentre per il Cr VI i valori delle concentrazioni mostrano una stazionarietà, con valori compresi tra 1.3 e 25.16 µg/l ed una mediana complessiva pari a 9.0 µg/l, per il TCE la variazione delle concentrazioni durante il periodo di monitoraggio è molto maggiore, compresa tra un minimo di 0.37 µg/l ed un massimo di 2'596 µg/l, con il valore della mediana complessiva pari a 30.90 µg/l.

Modello di flusso idrogeologico e trasporto del sito Sogin ITREC di Trisaia (MT)

Relazione Tecnica

Tricloroetilene (µg/l)																					
Codice	N wgs84	E wgs84	Q bp sim	Profondità	Prof sim	May-17	Jun-17	Oct-18	Nov-18	Dec-18	Feb-19	Mar-19	Oct-19	Apr-20	Jun-20	Sep-20	Oct-20	Nov-20	Feb-21	Mediana	
C02	4447434,28	639342,97	37,84	7,10	30,74		45,1														
C03	4447403,21	639359,84	39,47	7,30	32,17		129,0	99,0						44,0			89,0			94,0	
C06	4447385,05	639464,57	38,91	8,10	30,81		4,1	27,0				52,0		81,0			162,0			52,0	
C08	4447325,58	639216,30	41,01	8,86	32,15		63,3	75,0	173,6		31,3	22,0	120,7	57,0		14,9	156,0		38,6	60,2	
C10	4447418,66	639492,16	39,05	8,03	31,02			6,9				2,6		3,4			3,0			3,2	
C16	4447294,29	638712,59	42,66	12,06	30,60		1,6		8,7				5,0							5,0	
CM1	4447243,28	640322,72	13,96	8,28	5,68				0,4				1,7							1,0	
SP21	4447388,64	639414,59	38,80	10,50	28,30		30,5	6,3				3,9					2,5			5,1	
SP23	4447395,32	639676,63	30,16	11,05	19,11	4,6							4,7						3,5	4,6	
SP26	4447320,65	638934,02	40,84	8,09	32,75		1,7														
SP27	4447303,43	639289,62	39,46	11,62	27,84		228,0														
SP32	4447152,77	639160,57	40,23	8,20	32,03	118,0			863,3		82,5		509,7		39,4				69,0	100,3	
SP33	4447172,22	639407,77	38,61	7,88	30,73	50,5				289,3	80,0		689,5		7,2				82,0	81,0	
SP34	4447158,55	639675,99	28,44	10,63	17,81	63,4			206,8		65,0		162,8		7,0	21,2			43,9	63,4	
SP35	4447116,23	640162,42	26,29	11,09	15,25								8,6								
SP36	4447040,42	639040,10	41,27	11,50	29,77		17,4			43,4	40,4		25,2		13,2				9,2	21,3	
SP37	4447056,86	639276,33	39,24	7,79	31,45		290,0			460,0	525,1		1357,0		1,8	202,0			400,0	400,0	
SP38	4447037,53	639536,22	29,59	11,02	18,57	147,0				251,4	121,2		209,0						58,0	147,0	
SP44	4446665,71	639680,05	30,19	14,00	16,19	21,0			60,4				59,8		2,9				19,3	20,1	
SP57	4447182,28	639895,11	28,20	9,67	18,53	30,2		33,0	43,5		46,3	48,0	57,4	44,0	25,9	9,6	63,0	12,6	3,7	38,3	
SP58	4446852,65	639166,54	38,08	13,60	24,48	3,4					9,7									9,7	
SP60	4446921,49	639664,33	28,75	11,05	17,70	24,2					< 0.1		141,9		3,1	13,0			16,1	16,1	
SP62	4447198,04	639147,18	41,12	10,71	30,41		5,3			9,9	20,1		17,9		16,2	7,5			3,3	9,9	
SP63	4447230,23	639277,47	39,09	8,88	30,21		403,0		2596,7		167,0		909,4		1170,2				50,3	162,0	403,0
SP7	4447781,25	638498,43	50,33	15,06	35,27					0,5	2,8									1,6	
SPB10	4447074,79	640149,45	25,90							8,3			14,9							11,6	
SPB12	4446600,28	639912,76	10,25	12,06	-1,81							0,4			5,5					3,0	
SPB5	4447163,46	640391,96	11,89	18,00	-6,11					2,6										2,6	
SPB7	4447130,89	640172,16	25,39	10,58	14,81								6,6			8,5				7,6	
SPB8	4447143,69	640148,80	25,73	10,50	15,23								2,5								
SPN45	4446547,10	639876,04	9,90	12,00	-2,10										27,1						

Tabella 1. Risultati delle analisi dei monitoraggi effettuati da Sogin per il TCE. Sono evidenziati i valori che superano i valori delle CSC di legge pari a 1.5 µg/l.

Modello di flusso idrogeologico e trasporto del sito ENEA-Sogin di Trisaia (MT) - NP VA 01784

Relazione Tecnica

Codice	N wgs84	E wgs84	Q bp slm	Profondità	Prof slm	Crome esavalente (µg/l)																Mediana				
						May-17	Jun-17	Oct-18	Nov-18	Dec-18	Feb-19	Mar-19	Oct-19	Oct-19	Apr-20	Jun-20	Sep-20	Oct-20	Nov-20	Nov-20	Dec-20		Dec-20	Jan-21	Feb-21	
C02	4447434,28	639342,97	37,84	7,1	30,74		6,5																			6,5
C03	4447403,21	639359,84	39,47	7,3	32,17		14,3						8,8													11,6
C06	4447385,05	639464,57	38,91	8,1	30,81									5,7												5,7
C08	4447325,58	639216,30	41,01	8,86	32,15		16,5	19,0	6,7			9,5		5,8	16,8	15,0	13,4	15,9	7,0					7,2	13,4	
CM1	4447243,28	640322,72	13,96	8,28	5,68				1,3			5,5			6,0				4,8	5,4				4,7	5,1	
SP17	4447575,49	638227,59	50,35	15,05	35,3										9,0										9,0	
SP18	4447575,49	638227,59	50,36	15,06	35,4											4,7							5,4		5,1	
SP23	4447575,49	638227,59	50,36	15,06	35,4										5,0		4,9								5,0	
SP27	4447303,43	639289,62	39,46	11,62	27,84		10,1																		10,1	
SP32	4447152,77	639160,57	40,23	8,2	32,03							6,5													6,5	
SP33	4447172,22	639407,77	38,61	7,88	30,73										6,0		5,6								5,8	
SP34	4447158,55	639675,99	28,44	10,63	17,81	6,3			3,2			8,5			10,4		9,5	15,9							9,0	
SP35	4447116,23	640162,42	26,29	11,09	15,25	9,9			5,0			8,5			5,0										6,8	
SP36	4447040,42	639040,10	41,27	11,5	29,77							25,2			5,0										15,1	
SP37	4447056,86	639276,33	39,24	7,79	31,45		9,0					14,0			9,3		9,1								9,2	
SP38	4447037,53	639536,22	29,59	11,02	18,57							5,5													5,5	
SP40	4446860,54	638824,51	37,47	15,8	21,67										5,0										5,0	
SP54	4447719,72	638780,67	47,55	13,81	33,74										11,0				6,5						8,8	
SP57	4447182,28	639895,11	28,2	9,67	18,53	10,6		13,0	4,2			11,5		16,0	12,0	14,7	13,3	6,3			6,4				11,8	
SP58	4446852,65	639166,54	38,08	13,6	24,48										5,0										5,0	
SP60	4446921,49	639664,33	28,75	11,05	17,7							5,0													5,0	
SP61	4447517,76	639919,28	12,95	13,7	-0,75							13,0													13,0	
SP62	4447198,04	639147,18	41,12	10,71	30,41										7,0										7,0	
SP63	4447230,23	639277,47	39,09	8,88	30,21				5,8			12,0			12,0		15,9								12,0	
SP7	4447781,25	638498,43	50,33	15,06	35,27							7,0			11,0		5,3								7,0	
SPB10	4447074,79	640149,45	25,90									10,0													10,0	
SPB7	4447130,89	640172,16	25,39	10,58	14,81										9,0								11,8		10,4	
SPB8	4447143,69	640148,80	25,73	10,50	15,23										16,0		14,2	8,6		4,6	14,1			13,9	10,8	13,9
SPN29	4447240,51	639494,01	35,66									6,0			6,0		5,1								6,0	
SPN45	4446547,10	639876,04	9,90	12,00	-2,10							13,0													13,0	

Tabella 2. Risultati delle analisi dei monitoraggi effettuati da Sogin per il Cr VI. Sono evidenziati i valori che superano i valori delle CSC di legge pari a 5 µg/l.

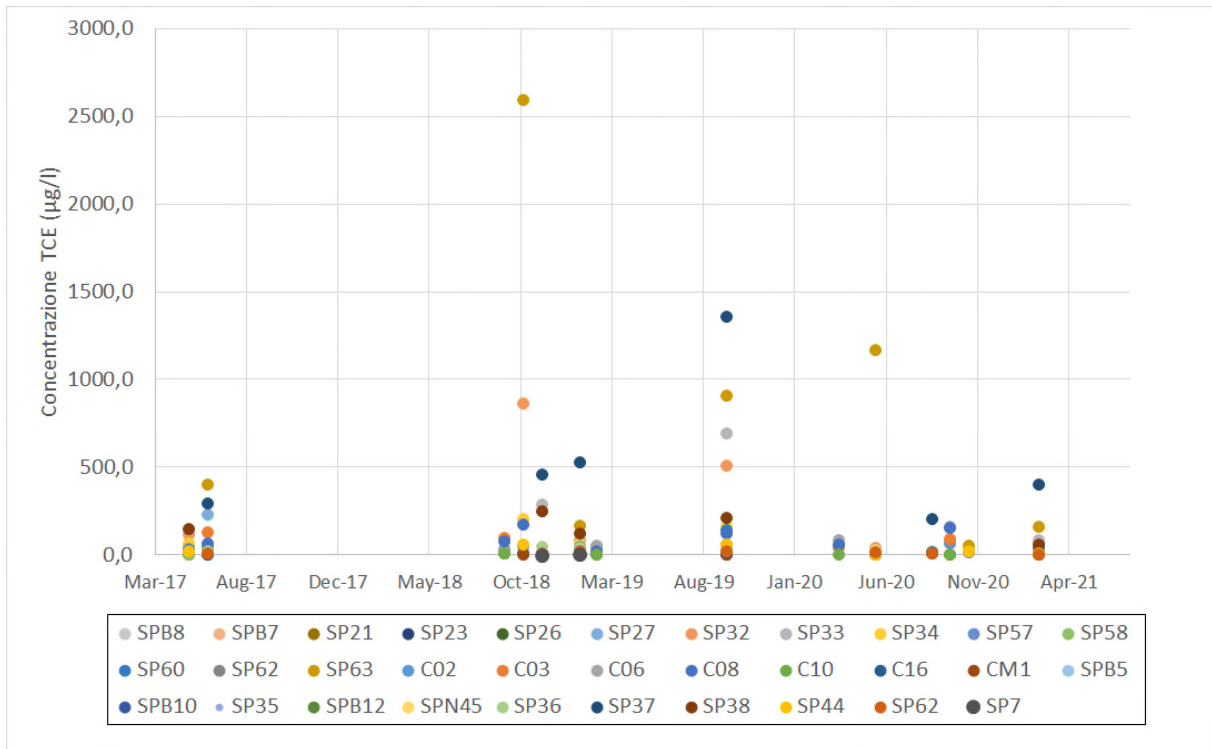


Figura 18. Andamento nel tempo delle concentrazioni di TCE nei punti di monitoraggio da maggio 2017.

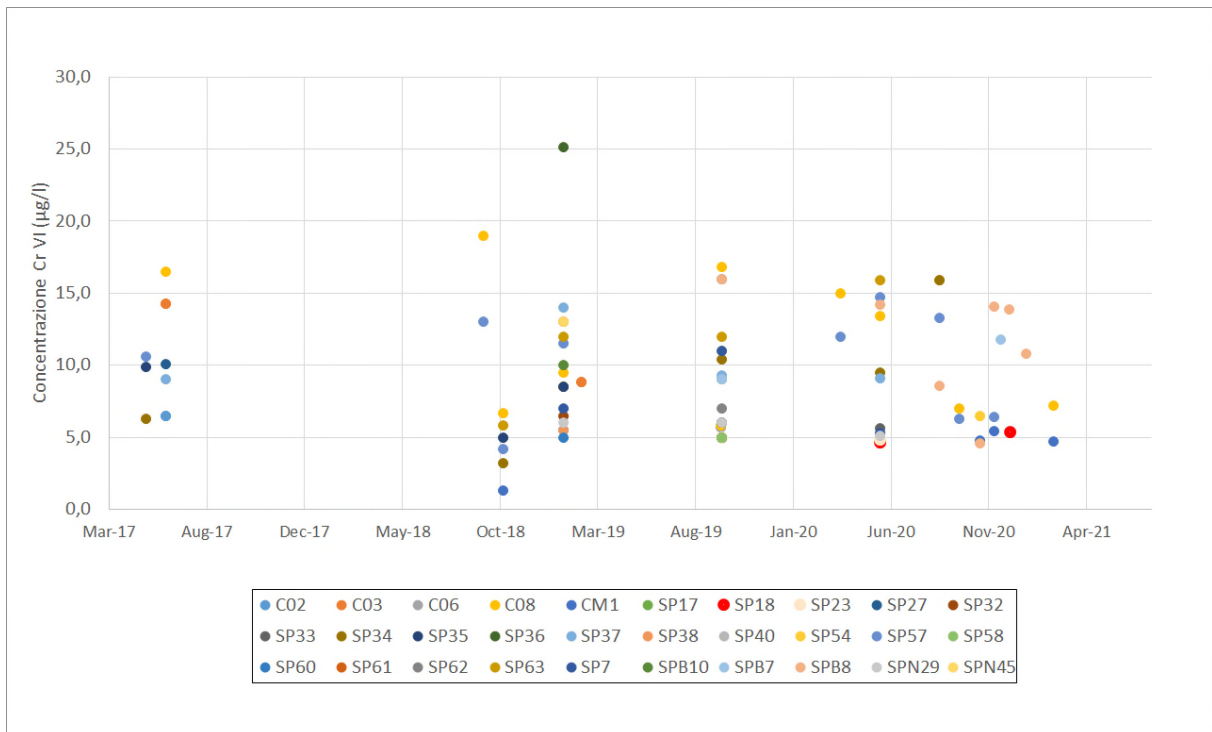


Figura 19. Andamento nel tempo delle concentrazioni di Cr VI nei punti di monitoraggio da maggio 2017.



Le mappe di concentrazione interpolate in seguito all'analisi statistica delle campagne di monitoraggio, (si specifica che i dati di input sono i valori medi dei singoli punti di controllo e non la mediana complessiva) sono riportate nella Figura 20 e nella Figura 21. Dalla ricostruzione delle mappe di concentrazione si evidenzia per il TCE una zona che presenta i valori più alti in prossimità dei piezometri SP63, SP37, SP32 e SP33. La distribuzione della contaminazione per il TCE risulta inoltre circoscritta all'interno dell'area ENEA.

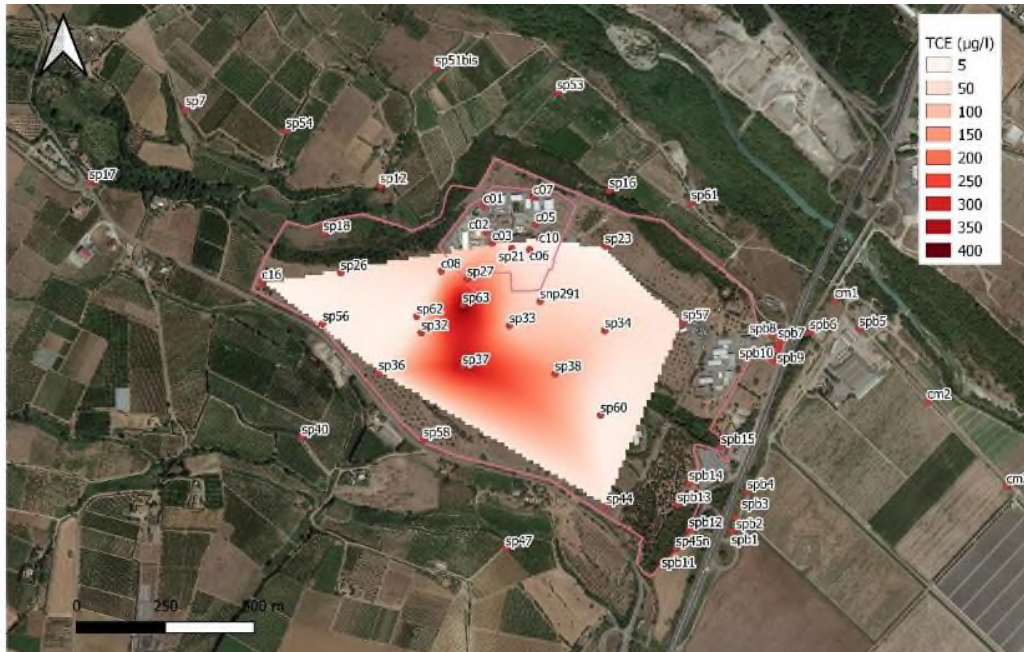


Figura 20. Mappa delle concentrazioni del TCE interpolate con i dati delle campagne di monitoraggio effettuate da maggio 2017.

Per il Cromo VI i risultati dell'interpolazione evidenziano invece una contaminazione diffusa anche all'esterno dei confini del CR ENEA, anche se i punti con i valori più alti di concentrazione sono riscontrati nei piezometri interni SP36 e C08 e nella zona orientale nei piezometri SP61, SPB8 e SPN45; il solo SP61 è esterno all'area ENEA.

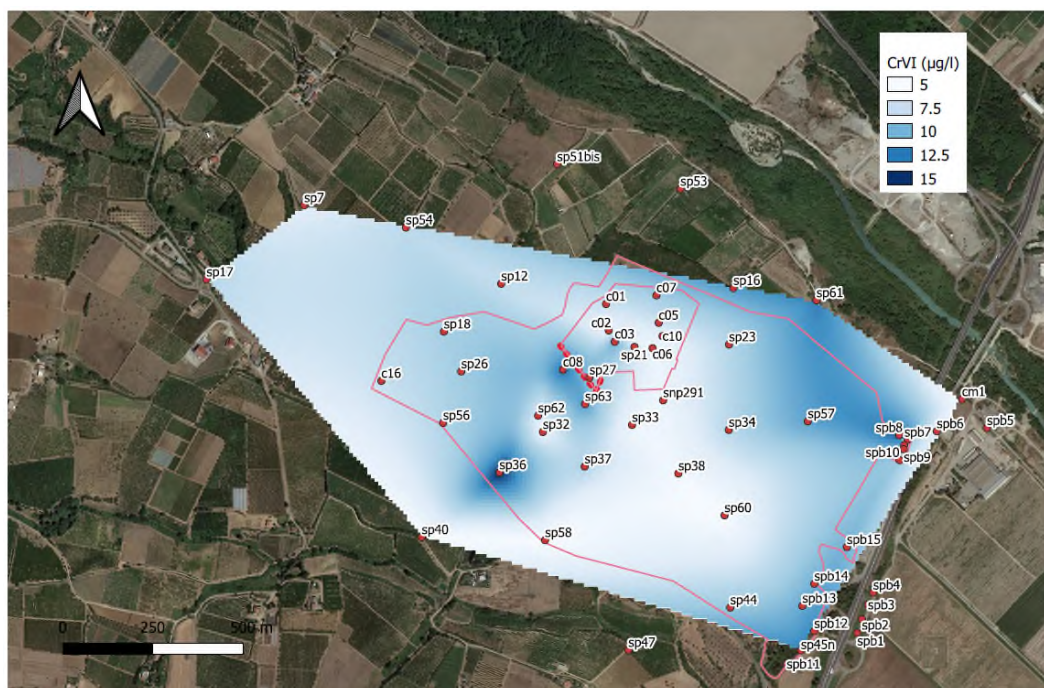


Figura 21. Mappa delle concentrazioni del Cr VI interpolate con i dati delle campagne di monitoraggio effettuate da maggio 2017.

Per entrambi i contaminanti, i piezometri che presentano le concentrazioni più elevate interne al CR ENEA a monte idrogeologico, sono ubicati in prossimità dell'area in cui era installato l'impianto "Magnox" della ex società Combustibile Nucleare S.p.A. (CO.NU.) che ha operato presso il sito di Trisaia per un periodo di circa 20 anni fino alla data di dismissione avvenuta nel 1988 (Figura 22). Questo impianto, considerata la natura storica della potenziale contaminazione, era stato anche ipotizzato nel documento dell'Analisi di Rischio come unica fonte di inquinamento primaria. Tra le pratiche industriali del processo produttivo operato in questi locali, era previsto lo sgrassaggio delle barre in uranio mediante vapori di tricloroetilene riscaldata a circa 80°C da vapore. Sempre tra le pratiche industriali del processo produttivo operato in questi locali era previsto il decapaggio di alcuni elementi mediante l'utilizzo di acido cromico.

Per il Cromo esavalente si individua un'altra zona con concentrazioni significative, tale zona sede di alcuni edifici è posta sempre all'interno dell'area ENEA a sud-est nell'intorno dei piezometri SP57 e SPB8. In tale area potrebbe essere stata presente un'altra fonte (secondaria) di inquinamento non precedentemente individuata.

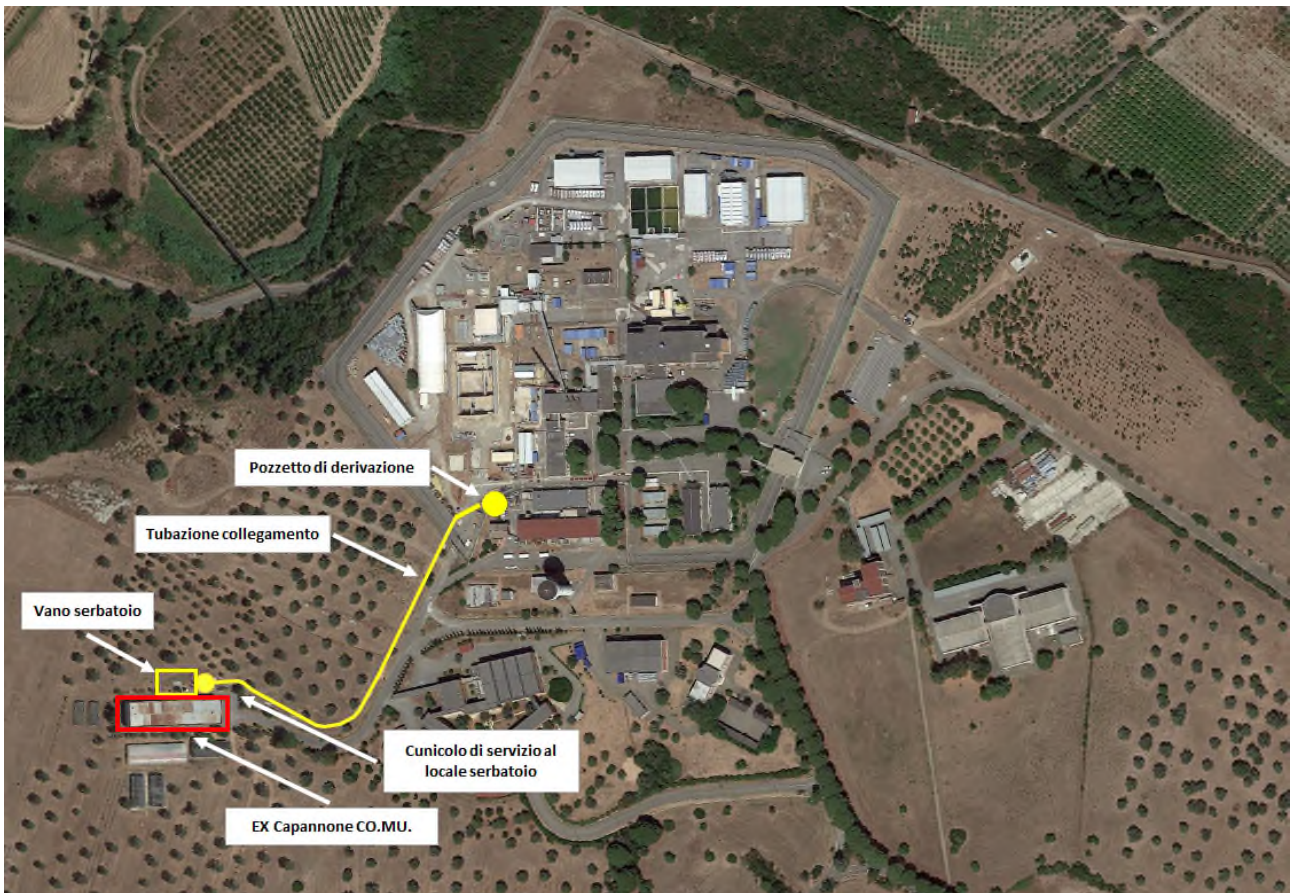


Figura 22. Rielaborazione dello Stralcio planimetrico della componentistica tecnologica dell'ex impianto. Fonte: Sogin - Piano di caratterizzazione del sito della Trisaia (MT) in attuazione degli articoli 245e 242 del D. Lgs 152/06a

Per le simulazioni di trasporto è stato usato il pacchetto MT3DMS all'interno di *Visual Modflow Flex 6.1*. I parametri idrodinamici sono stati impostati uguali per tutti i composti simulati. Non è stata considerata alcuna reazione con la matrice suolo e pertanto non è stato inserito alcun coefficiente di ritardo. Il valore della dispersività longitudinale, necessario per il calcolo del coefficiente idrodinamico di dispersione, è stato impostato uguale a 10 metri, mentre i rapporti dispersività orizzontale/longitudinale e verticale/longitudinale sono stati impostati rispettivamente pari a 0.1 e 0.01.

Le simulazioni di trasporto sono state effettuate in regime transitorio per una durata di 2 anni (730 giorni), con l'obiettivo di stimare l'avanzamento del *plume* di ciascun contaminante e valutare la tecnologia più idonea ad un intervento di trattamento.

### 5.2 Risultati del modello di trasporto per il TCE

Il risultato della simulazione del TCE è riportato in Figura 23, in cui si riporta l'evoluzione delle concentrazioni calcolate dal modello al termine del periodo temporale esaminato (2 anni). Sono visualizzate le concentrazioni iniziali ( $t=0$ ) e a diversi intervalli temporali (180, 365 e 730 giorni). Attraverso il pacchetto MT3D utilizzato, è possibile stimare la massa di ciascun contaminante simulato. Per il TCE è stato calcolato un quantitativo di contaminante presente all'interno di tutto il dominio di calcolo pari a 14,26 kg. Si può notare come il *plume* di TCE rimanga all'interno dell'area del CR ENEA, con un'evidente diramazione verso nord in direzione dell'area Sogin e verso est lungo la direzione del flusso idrogeologico.

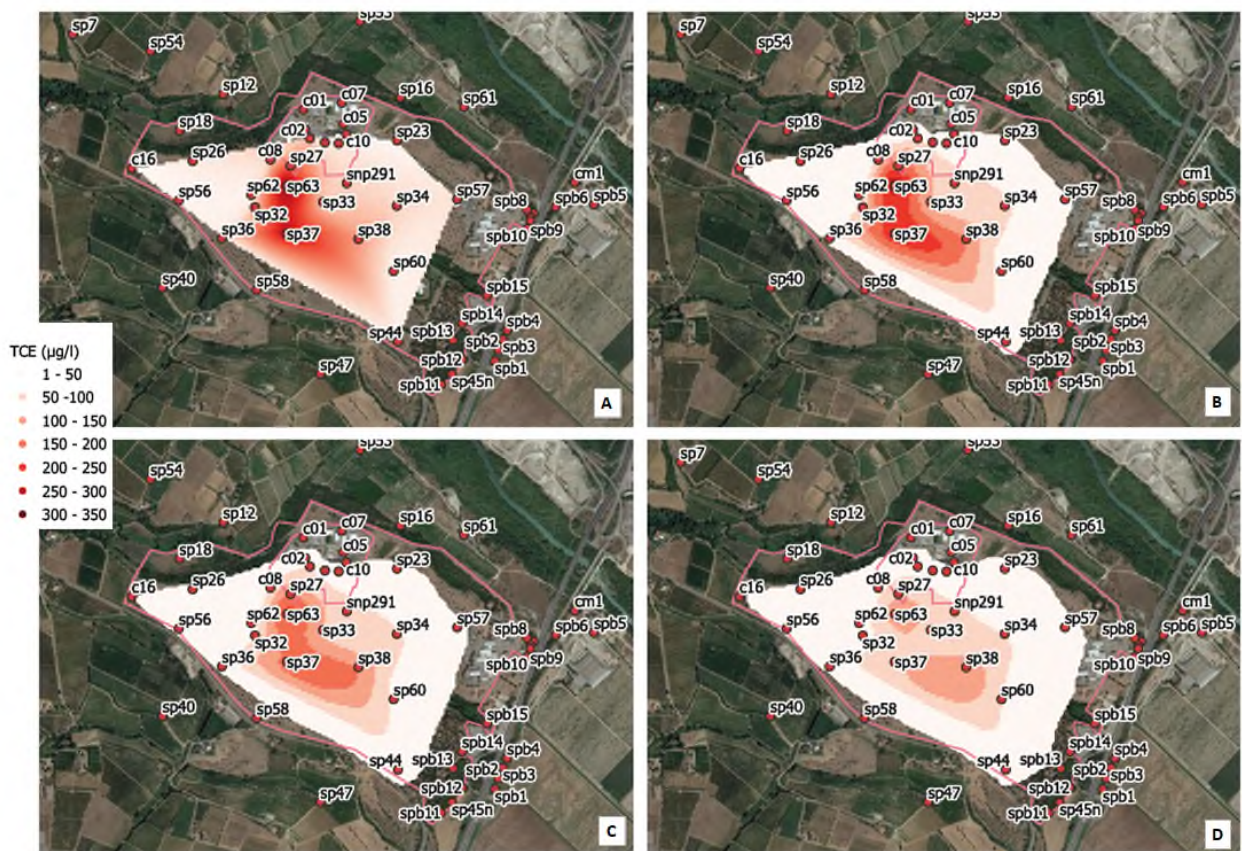


Figura 23. Andamento delle concentrazioni del TCE simulate dal modello di trasporto per una durata di 2 anni. Le figure rappresentano lo stato iniziale ( $t=0$ ) (A) e la distribuzione del contaminante a 180 (B), 365 (C) e 730 (D) giorni.

### 5.3 Risultati del modello di trasporto per il Cr VI

Per il Cromo VI il risultato della simulazione è riportato in Figura 24, da cui si evince l'evoluzione delle concentrazioni calcolate dal modello al termine del periodo temporale esaminato (2 anni). È stata stimata, analogamente all'altro contaminante, la massa presente nel dominio di calcolo pari a 2,3 kg.

La distribuzione del Cr VI è ampiamente diffusa su tutta l'area del CR ENEA ed anche al di fuori di questa, evidenziando una contaminazione non univocamente attribuibile alla sorgente primaria individuata nel P.d.C., è ipotizzabile la presenza di altre sorgenti sia all'interno del sito ENEA che all'esterno.

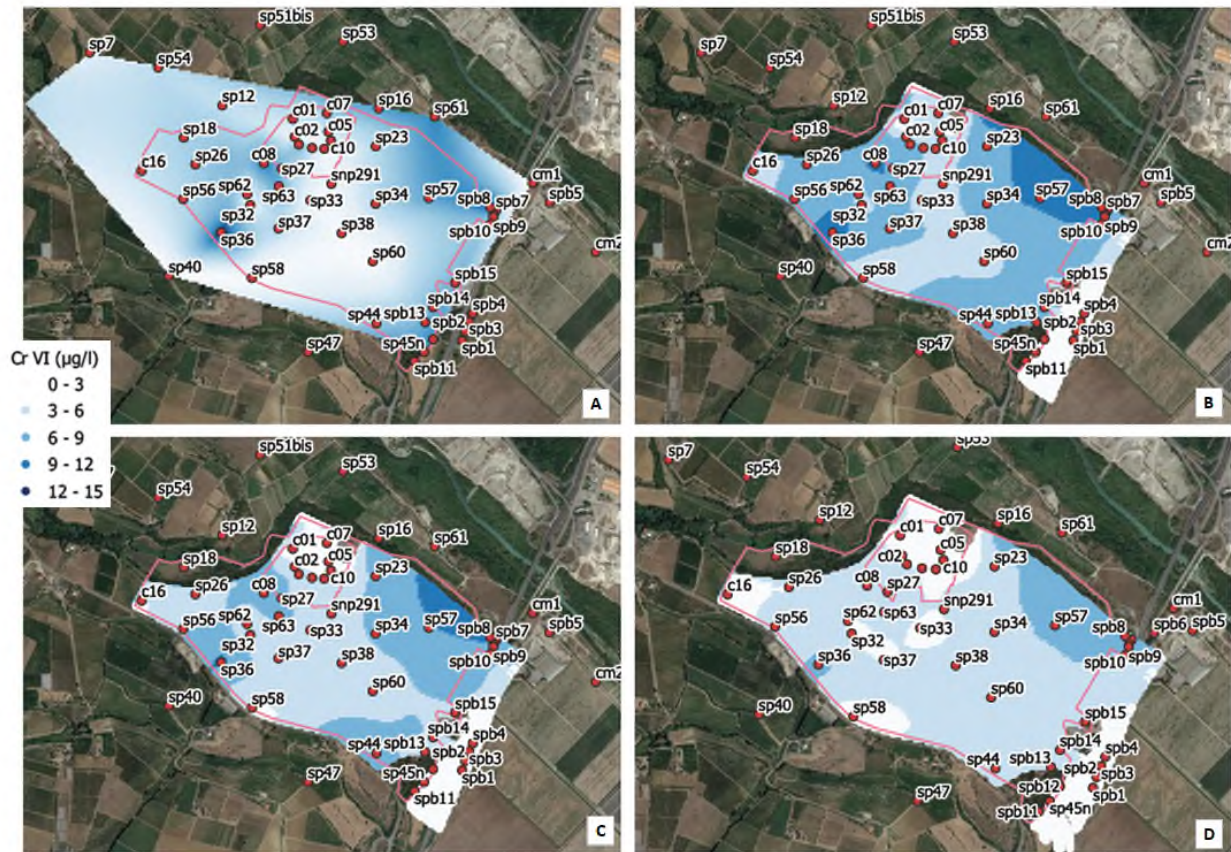


Figura 24. Andamento delle concentrazioni del Cr VI simulate dal modello di trasporto per una durata di 2 anni. Le figure rappresentano lo stato iniziale ( $t=0$ ) (A) e la distribuzione del contaminante a 180 (B), 365 (C) e 730 (D) giorni.

## 6 Conclusioni

Le informazioni ed i dati forniti da Sogin presso il sito di Trisaia hanno consentito di fornire una rappresentazione di dettaglio del sottosuolo, delle condizioni idrodinamiche della falda e dello stato d'inquinamento delle acque sotterranee.

Il presente lavoro ha riguardato lo sviluppo di un modello di flusso idrogeologico di dettaglio del sito Sogin Itrec e di una parte dell'area del CR ENEA ed il successivo modello di trasporto di due contaminanti di cui si sono riscontrati superamenti nelle acque sotterranee delle CSC.

Il modello di flusso di dettaglio realizzato ha restituito risultati coerenti con le misure dei livelli piezometrici monitorati nella campagna di marzo 2021.

Il modello di trasporto dei contaminanti ha simulato gli effetti dei processi advettivo-dispersivi per il Tricloroetilene e il Cromo VI. Dall'analisi delle campagne di monitoraggio delle acque sotterranee svolte da Sogin ed ENEA a partire da maggio 2017, è stata ricostruita la distribuzione spaziale di questi composti, che ha evidenziato superamenti delle CSC all'interno ed all'esterno del sito Sogin Itrec in modo differente, per il TCE si conferma una contaminazione maggiormente diffusa all'interno dell'area CR ENEA, ma presente anche nell'area Sogin in direzione della falda e per effetto del richiamo del sistema di *dewatering* di alcune strutture interrato. Il Cr VI mostra dei superamenti diffusi anche all'esterno dell'area Sogin ed ENEA, indicando quindi una contaminazione distribuita su una parte di territorio maggiore rispetto a quella monitorata dalle due società.

La simulazione del trasporto dei due contaminanti è stata realizzata in condizioni dinamiche per una durata di 2 anni, analizzando la dispersione del TCE e Cr VI rispetto allo stato iniziale.

Si precisa che la ricostruzione modellistica e la simulazione dell'evoluzione del quadro di contaminazione svolta per un periodo di due anni, è riferita all'ipotesi di assenza di sorgenti di contaminazione attive. La variazione dei livelli di concentrazione per gli analiti esaminati è quindi da attribuire ai processi di naturale attenuazione ad invarianza delle masse di inquinanti (TCE e CrVI) valutate e riportate in relazione.

Si evidenzia tuttavia che nel corso delle campagne di monitoraggio, che coprono il periodo da maggio 2017 a febbraio 2021, le concentrazioni riscontrate di TCE e CrVI continuano ad essere sostanzialmente costanti ed al di sopra dei limiti tabellari, facendo ipotizzare la presenza di una fonte primaria ancora attiva.

Ai fini della definizione di uno strumento in grado di guidare alla predisposizione delle azioni di messa in sicurezza e bonifica della falda, il modello realizzato può essere considerato efficace e definitivamente testato. Lo stesso modello, nell'ipotesi di assenza di fonti di contaminazione attive, potrà essere quindi utilizzato per la valutazione dell'evoluzione temporale dello stato di qualità della falda in condizioni naturali ovvero a seguito di interventi tecnologici di disinquinamento.

## 7 Bibliografia

Doc. NP VA 01678 *Impianto ITREC Trisaia – Modifica regimentazione acque meteoriche e realizzazione impianto di sollevamento - Relazione geologica (2020).*

Doc. NP VA 01259 *Aggiornamento ed implementazione del modello idrogeologico stazionario della falda sottostante il sito della Trisaia - Relazione Tecnica (2017).*

Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (pp. 6-A16). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

Romano E., Preziosi E., Araneo F., Fiori C., & Guerra M. (2019). *Linee guida per lo sviluppo di modelli numerici di flusso in acquiferi porosi: Una proposta IRSA-ISPRA*. Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater.

Zheng C., & Wang P. P. (1999). *MT3DMS: 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*. Alabama University.