

Monitoraggio chimico e isotopico delle acque sotterranee presso la Discarica “ Tre Monti ” – Imola

Periodo di monitoraggio: 2015-2020

Bologna, febbraio 2021





Sommario

1. PREMESSA.....	3
2. MONITORAGGIO DELLE ACQUE SOTTERRANEE.....	6
2.1. Esecuzione delle campagne di monitoraggio.....	9
2.2. Misure di livello della falda e parametri chimico-fisici misurati in campo	10
2.3. Regime pluviometrico nel periodo 2016-2018.....	14
3. CARATTERIZZAZIONE DEL PERCOLATO E INDICATORI DI CONTAMINAZIONE.....	17
4. SINTESI DEL CHIMISMO DELLE ACQUE SOTTERRANEE E SUPERAMENTI DELLE CSC	21
4.1. Solfati.....	27
4.2. Manganese.....	28
4.3. Boro	29
4.4. Ferro	31
4.5. Nitriti.....	33
4.6. Metalli: Nichel e Arsenico	34
5. FACIES IDROCHIMICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE.....	36
5.1. Ricostruzione delle facies idrochimiche	36
6. CARATTERIZZAZIONE ISOTOPICA	39
CONCLUSIONI.....	42

A cura di:

Emanuela Lischi, Marco Marcaccio, Cristina Regazzi

Hanno collaborato:

Distretto Imolese - Sezione di Bologna/APAM per le attività di campionamento

Direzione tecnica - Laboratorio Multisito sede di Bologna - Unità analitica Chimica Acque sanitarie e ambientali per le analisi chimiche

Direzione Tecnica - CTR Radioattività Ambientale - Unità analitica Chimica Isotopia, per le analisi isotopiche



1. Premessa

La discarica di Tre Monti, sita in Comune di Imola (BO), Località Pediano, operativa dagli anni '70 per lo smaltimento dei rifiuti urbani prodotti nei Comuni del Comprensorio Imolese, si configura come una discarica di versante, dove l'invaso destinato all'abbancamento dei rifiuti sfrutta la naturale morfologia ad anfiteatro dei calanchi che caratterizzano l'area. L'invaso della discarica esistente è costituito da tre Lotti di abbancamento rifiuti, suddivisi a loro volta in settori e sottosettori di coltivazione.

La discarica, i cui conferimenti sono terminati dal 11/01/2018, è attualmente autorizzata da Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), DGP n. 36 del 09/02/2010 rilasciata dalla Provincia di Bologna, così come modificata da Delibera Giunta Provinciale D.G.P. n°241 del 10/7/2012 e gli annessi atti di modifica/integrazione, per il dettaglio dei quali si rimanda alla pagina web dell'Osservatorio IPPC regionale (<http://ippc-aia.arpa.emr.it/ippc-aia/DettaglioImpiantoPub.aspx?id=62>).

La presente relazione costituisce la sintesi delle indagini effettuate da Arpae sulle acque sotterranee poste nell'area stoccaggio percolato della suddetta discarica, effettuate dal novembre 2015 al giugno 2020, a seguito Diffida P.G. n°130084 del 9/11/2015 emanata dalla Città Metropolitana di Bologna, ai sensi dell'art. 244, comma 2, D.Lgs. n° 152/2006 (notifica di sito potenzialmente contaminato).

Tale notifica riguardava l'area di stoccaggio del percolato evidenziata in colore rosa in Figura 1.1, in quanto a fine 2015, campionamenti sulle acque sotterranee dei pozzi adiacenti le vasche di raccolta del percolato V1-V2, effettuati dalla Sezione Provinciale Arpae di Bologna, avevano evidenziato superamenti delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) di cui al D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i. (Tabella 2, Allegato 5 alla Parte IV) per i parametri Nitriti, Solfati, Nichel, Arsenico, Cromo esavalente (Cr VI);



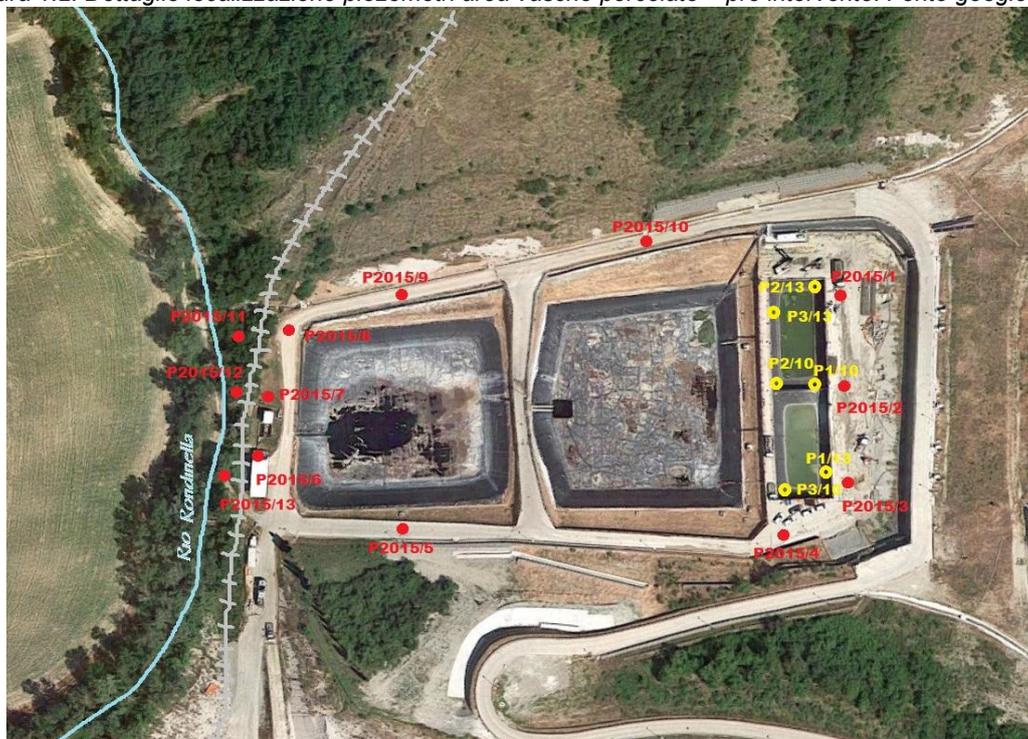
Figura 1.1. Inquadramento area vasche percolato-sito contaminato. Fonte googlemaps.



Ai fini delle indagini, è stata realizzata una rete di monitoraggio delle acque sotterranee composta di 16 nuovi piezometri, di cui 10 interni all'area di discarica, 3 esterni all'area, a valle della direzione di presumibile migrazione del plume di contaminazione, e 3 in aree ritenute di "bianco".

In Figura 1.2 si riportano in giallo i piezometri oggetto di notifica, denominati "pozzi spia", ed in rosso i piezometri di monitoraggio realizzati a seguito della notifica.

Figura 1.2. Dettaglio localizzazione piezometri area vasche percolato – pre intervento. Fonte googlemaps.



Nell'ambito della procedura di sito contaminato, e sulla base del modello concettuale approvato (Arpae, 2016b; Arpae, 2017a), sono stati eseguiti campionamenti sul suolo e sulle acque sotterranee; per queste ultime, dal 2016, è stato effettuato un monitoraggio con frequenza semestrale (stagione estiva /stagione invernale). A complemento delle indagini sono stati eseguiti monitoraggi a frequenza mensile del Rio Rondinella, corpo idrico superficiale a valle della discarica.

Gli approfondimenti condotti hanno individuato la sorgente di inquinamento nell'area adiacente le vasche di raccolta del percolato V1-V2, c.d. "area catino", causa perdite di percolato avvenute in passato dalle stesse vasche V1 e V2.

Come già riportato nelle precedenti relazioni Arpae (Arpae, 2017a; Arpae, 2018e), benché l'area della discarica Tre Monti sia quasi esclusivamente costituita da terreni appartenenti alla formazione delle argille e marne siltose di colore grigio-azzurro, che non permette l'esistenza di falde acquifere, l'intorno delle vasche di stoccaggio del percolato, invece, è stato oggetto di rimaneggiamento in occasione degli scavi effettuati per l'installazione delle vasche stesse, con riporto di materiali permeabili (sabbie e sabbie ghiaiose), favorenti l'infiltrazione di acque meteoriche nel sottosuolo. La profondità dello strato di materiale di riporto non è trascurabile, raggiungendo nell'intorno delle vasche di stoccaggio del percolato V1 e V2 una profondità di circa 8 metri. Il rimaneggiamento dei materiali con altri di riporto aventi granulometria più grossolana e quindi più permeabili è avvenuta con spessori più modesti e variabili anche in altre zone a valle della discarica, in particolare lungo la strada che costeggia le vasche V3 e V4. Rispetto alla formazione naturale indisturbata, argilla compatta e sovraconsolidata, l'area rimaneggiata risulta, pertanto, caratterizzata da maggiore permeabilità e potenzialità di infiltrazione nel primo sottosuolo da parte delle acque meteoriche, creando falde idriche sotterranee effimere, che in determinate



condizioni possono dare luogo a deflussi idrici sotterranei verso valle.

Nell'ambito della Conferenza dei Servizi del 22/07/2016, con DET-AMB-2016-2529 del 26/07/2016, Arpae SAC di Bologna ha approvato con prescrizioni il progetto di dismissione delle vasche di stoccaggio V1-V2 e la rimozione completa del materiale di rinfranco presente sia lateralmente che al di sotto delle vasche, con successivo tombamento dell'area con argilla, al fine di non avere nella zona catino un diverso comportamento idraulico del materiale di riempimento rispetto a quello presente ai bordi dello scavo.

Il Gestore della discarica, Herambiente, ha avviato i lavori in data 05/12/2016. Come da progetto approvato, prima di procedere alle operazioni di scavo delle vasche, ha realizzato, con funzione di sostegno strutturale, sul fronte dell'argine della discarica (ad est), un diaframma in cemento armato di spessore 1 m, e sviluppo 93 m, con profondità variabile da 9 a 19 m, adattato all'andamento naturale dell'unità di argille azzurre in posto. L'opera assume quindi anche funzione di presidio per le acque sotterranee, rappresentando intervento di cinturazione parziale a monte dell'area delle vasche.

L'intervento ha quindi determinato la demolizione delle strutture consistenti le vasche V1-V2 (pareti in elevazione e solette di fondo) e la rimozione dei terreni di rinfranco e di quelli sottostanti l'area di sedime delle vasche stesse, con conseguente dismissione dei pozzi spia e dei piezometri di monitoraggio Pz2015/1, Pz2015/2, Pz2015/3 e Pz2015/4.

Completate le demolizioni e le operazioni di scavo, quest'ultimo è stato riempito con terreno argilloso, compattato per strati, al disopra del quale è attualmente posto un misto stabilizzato in ghiaia. Il terreno argilloso in questione è stato compattato artificialmente fino ad elevato grado di addensamento, allo scopo di predisporlo eventualmente in futuro ad ospitare una platea in cemento e un parco serbatoi. I lavori si sono conclusi in data 31/05/2018.

In Figura 1.3. si riporta la situazione attuale dell'area delle vasche di stoccaggio percolato.



Figura 1.3. Dettaglio localizzazione piezometri area vasche percolato – post intervento. Fonte googlemaps.

Tra la fase di completamento degli scavi e l'inizio dei successivi rinterri con argilla, sono state effettuate caratterizzazioni del terreno di fondo scavo, sia da parte di Herambiente che di Arpae, dalle quali è emersa per il suolo la conformità alle CSC definite nel D.Lgs 152/2006 alla colonna B, tabella 1, Allegato 5, Parte Quarta, Titolo V per i parametri analizzati: Metalli (Piombo, Rame, Cadmio, Nichel, Zinco, Cromo totale, Cromo VI, Arsenico e Mercurio), Cianuri, Fenoli clorurati, IPA e PCB; con atto n. 5901 del 14/11/2018, Arpae SAC di Bologna ha rilasciato la certificazione del completamento degli interventi di bonifica, risultati conformi al Progetto di Bonifica autorizzato. Come previsto dalla Conferenza dei Servizi del 22/07/2016, il monitoraggio delle acque sotterranee, nei piezometri rimasti a seguito della bonifica, doveva proseguire per altri due anni successivi alla data di ultimazione dei lavori di bonifica.



2. Monitoraggio delle acque sotterranee

La rete di monitoraggio delle acque sotterranee, come già detto in premessa, è stata progettata a seguito dei superamenti delle concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) riscontrate nelle acque prelevate dai piezometri localizzati nell'intorno delle vasche di stoccaggio del percolato di discarica, denominate V1 e V2, c.d. "pozzi spia".

Tali vasche, insieme alle altre due vasche presenti nell'area stoccaggio, denominate V3 e V4, costituiscono il sistema di stoccaggio del percolato della discarica. Di fatto, le vasche V1 e V2, fatta eccezione per un breve periodo di utilizzo nel 2015, sono state mantenute vuote dal 2013, a seguito di rilevazione di anomalia nella struttura di fondo.

La progettazione della rete di monitoraggio delle acque sotterranee ha tenuto conto della necessità di individuare dei punti di indagine posti sia a monte (nell'intorno delle vasche) che a valle idrogeologico della zona sorgente, rispetto al possibile percorso di migrazione ipotizzato nell'ambito del modello concettuale. Pertanto, la rete di monitoraggio delle acque sotterranee schematizzata nelle Figure 2.1 e 2.2, è stata realizzata individuando principalmente tre gruppi di piezometri rappresentativi di diverse zone:

- 10 interni alla discarica, di cui 4 distribuiti intorno alla zona sorgente (Pz2015/1, Pz2015/2, Pz2015/3, Pz2015/4), 1 lungo la zona di potenziale transito adiacente le vasche lato sud (Pz2015/5), 3 a valle delle vasche di stoccaggio del percolato (Pz2015/6, Pz2015/7, Pz2015/8), 2 adiacenti le vasche lato nord, ovvero dal lato opposto rispetto la direzione di potenziale transito del plume di contaminazione (Pz2015/9, Pz2015/10);
- 3 esterni alla discarica e in prossimità del bersaglio, il corpo idrico superficiale Rio Rondinella (Pz2015/11, Pz2015/12, Pz2015/13);
- 3 interni alla discarica in zona non interessata dall'attività di gestione rifiuti, considerati punti di "bianco" (Pz2015/B, Pz2015/B2, Pz2015/B3).

Tutti i piezometri sono stati realizzati dal gestore, alla presenza dei tecnici di Arpae, a fine anno 2015 ed inizio anno 2016. In ogni foro di sondaggio è stato installato un tubo piezometrico di diametro pari a 3 pollici, microfessurato per gran parte della profondità, ad esclusione dei primi 2-3 metri dal piano di campagna, al fine di ridurre al minimo le possibili infiltrazioni di acqua dalla superficie all'interno del piezometro. La testa del pozzo è stata sigillata con bentonite in corrispondenza del tratto cieco e ricoperta, a scopo protettivo, con un pozzetto carrabile comprensivo di botola in ghisa.

Come già accennato, i lavori di rimozione delle vasche V1-V2 hanno determinato la necessaria dismissione dei piezometri installati nell'area adiacente le vasche V1-V2, e conseguentemente, da agosto 2016 non sono stati più effettuati campionamenti sui "pozzi spia" (P1/10, P2/10, P3/10, P1/13, P2/13 e P3/13), e da novembre 2017 sui piezometri in area catino (Pz2015/1-2-3-4). La rete di monitoraggio dal 2018 è pertanto costituita da 6 piezometri interni al confine Herambiente, 3 piezometri adiacenti al Rio Rondinella, e 3 piezometri di bianco.

Figura 2.1 Ubicazione punti di monitoraggio scarica Tre Monti



Figura 2.2 Ubicazione punti di monitoraggio "bianco" scarica Tre Monti





In Tabella 2.1 si riportano le principali caratteristiche costruttive dei piezometri realizzati, dove si indicano anche le profondità in cui terminano le unità stratigrafiche riconosciute:

- Unità A: terreni di origine antropica o spessore fortemente rimaneggiato. È una unità costituita da diverse unità in funzione della tipologia di attività in essa svolta, ad esempio A2: si tratta dei materiali di riporto a granulometria sabbiosa e sabbioso-ghiaiosa intorno alle vasche V1 e V2 e come sottofondo di stabilizzazione delle strade interne alla discarica;
- Unità B: substrato di origine naturale allentato e/o alterato costituito da limo, limo argilloso e argilla limosa di colore marrone con variegature grigiastre e striature e puntature nere, con presenza di frustoli organici e rari bioclasti, avente un grado bassissimo di sovraconsolidazione.
- Unità C: formazione delle argille azzurre distinto in due unità con la profondità (C1 e C2) avente un grado di sovraconsolidazione che progressivamente va da medio a elevato.

Nella medesima Tabella 2.1 sono inoltre evidenziate in grassetto le profondità raggiunte dalle Unità A e B comprese nel tratto filtrante dei diversi piezometri, dove l'Unità C (argille azzurre) viene filtrata dai piezometri dalla fine dell'Unità B fino alla fine del tratto filtrante di ciascun piezometro, che coincide sempre con la profondità massima di ciascun piezometro. In questo modo è possibile distinguere le stazioni sulla base delle Unità che vengono intercettate, rispettivamente le 3 Unità (A, B, C), quelle che filtrano 2 Unità (B e C) e quelle che filtrano solo l'Unità C delle argille azzurre:

- Unità A, B, C – stazioni Pz2015/1 (A e C) e Pz2015/2;
- Unità B e C – stazioni Pz2015/3, Pz2015/5, Pz2015/6, Pz2015/7, Pz2015/8, Pz2015/11, Pz2015/12, Pz2015/13, Pz2015/B3;
- Unità C – stazioni Pz2015/4, Pz2015/9, Pz2015/10, Pz2015/B, Pz2015/B2.

Occorre osservare che alcune stazioni hanno i filtri alla stessa profondità o prossimi al passaggio di Unità, pertanto in tabella sono state indicate tra parentesi le Unità potenzialmente filtrate, ovvero quando la distanza dal filtro è inferiore a circa 50 centimetri. In questo modo l'Unità A risulta pertanto potenzialmente filtrata dai piezometri Pz2015/6, Pz2015/7, Pz2015/11 e Pz2015/B3.

Tabella 2.1 Caratteristiche costruttive dei piezometri di monitoraggio e relative Unità intercettate.

Stazione	Profondità (m da p.c.)	Profondità filtri (inizio - fine filtri da p.c.)	Profondità Unità A (Rimaneggiata)	Profondità Unità B (Substrato naturale allentato/alterato)	Unità filtranti (A, B, C)
Pz2015/1	8	2 - 8	2.90	Unità assente	A, C
Pz2015/2	16	3 - 16	8.75	12.00	A, B, C
Pz2015/3	9	3 - 9	1.70	4.60	B, C
Pz2015/4	10	3 - 10	2.00	3.00	(B), C
Pz2015/5	9	3 - 9	0.50	3.20	B, C
Pz2015/6	11.5	2.5 - 11.5	2.00	5.90	(A), B, C
Pz2015/7	15	3 - 15	2.80	10.00	(A), B, C
Pz2015/8	15	3 - 15	1.30	9.50	B, C
Pz2015/9	9	3 - 9	0.40	Unità assente	C
Pz2015/10	8	2 - 8	1.00	2.00	(B), C
Pz2015/11	8	2 - 8	1.50	5.50	(A), B, C
Pz2015/12	8	2 - 8	1.00	3.20	B, C
Pz2015/13	8	2 - 8	Unità assente	3.10	B, C
Pz2015/B	8.5	2.5 - 8.5	Unità assente	0.70	C
Pz2015/B2	7	1 - 7	Unità assente	0.70	(B), C
Pz2015/B3	11	2 - 11	2.00	6.50	(A), B, C

Note: in **grassetto** le profondità delle Unità A e B comprese nel tratto filtrante dei piezometri, tra parentesi le unità potenzialmente filtrate dai piezometri.



Il protocollo analitico ha riguardato i seguenti parametri:

- i parametri definiti fondamentali dal D. Lgs. 36/03, individuati tenendo conto della tipologia di impatto da indagare e sulla base dei monitoraggi eseguiti negli anni di gestione della discarica nell'ambito del Piano di Monitoraggio e Controllo AIA (Arpae, 2016a; Arpae 2019a; Arpae, 2020b);
- parametri misurati in campo con strumentazione portatile: parametri chimico-fisici, pH, conducibilità, ossigeno disciolto e potenziale redox, nonché i livelli della falda tramite freatimetro;
- cationi e anioni principali per caratterizzare la *facies idrochimica* delle acque, dal marzo 2016;
- isotopi stabili di ossigeno e idrogeno (delta ossigeno e delta deuterio) dal febbraio 2016.

I parametri chimici, congiuntamente ad anioni e cationi, sono stati analizzati presso l'Unità analitica Chimica Acque sanitarie e ambientali del Laboratorio Multisito Arpae sede di Bologna, mentre le indagini isotopiche sono state effettuate presso l'Unità analitica Chimica Isotopia del CTR Arpae Radioattività Ambientale.

2.1. Esecuzione delle campagne di monitoraggio

In Tabella 2.2 si riporta lo schema riassuntivo delle stazioni della rete di monitoraggio costituita da piezometri e pozzi spia campionati nelle diverse campagne.

Tabella 2.2 Campionamenti effettuati nei piezometri e pozzi spia anni 2015-2020

	25/11/15	18/01/16	15/02/16	14/03/16	03/08/16	08/11/16	18/04/17	21/11/17	08/05/18	06/11/18	07/05/19	21/11/19	08/06/20
PZ2015/1	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO
PZ2015/2	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO
PZ2015/3	✓	nc	✓	✓	nc	nc	nc	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO
PZ2015/4	✓	nc	✓	✓	nc	✓	nc	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO	DISMES-SO
PZ2015/5	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/6	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/7	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/8	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/9	nc	nc	✓	✓	nc	nc	nc	✓	nc	✓	✓	✓	✓
PZ2015/10	nc	nc	nc	nc	nc	nc							
PZ2015/11	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/12	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/13	nc	nc	✓	✓	nc	nc	nc	nc	nc	✓	✓	nc	✓
PZ2015/B	nc	nc	nc	nc	nc	nc							
PZ2015/B2	nc	nc	nc	nc	nc	nc							
PZ2015/B3	nc	✓	nc	nc	✓	✓	nc						

Legenda: ✓ Campionamento eseguito; nc Campionamento non eseguito per mancanza di acqua



2.2. Misure di livello della falda e parametri chimico-fisici misurati in campo

Nelle Tabelle 2.3 e 2.4 e nella Figura 2.3, si riportano, dal 2016 al 2020, le misure di livello della falda espresse, rispettivamente, come soggiacenza (profondità rispetto al piano campagna) e come piezometria (quota assoluta rispetto il livello medio del mare).

Sulla base della profondità di inizio dei filtri nelle diverse stazioni, è possibile evidenziare (celle in grigio nelle Tabelle 2.3 e 2.4) le misure di livello che sono più alte rispetto l'inizio dei filtri stessi, situazioni che evidenziano una falda in pressione di modesta entità. Ciò risulta sempre evidente nelle stazioni Pz2015/2-6, non si verifica mai nelle stazioni Pz2015/3-8-10-12-13-B3, ed è variabile per le altre stazioni.

Sulla base delle Unità intercettate dai filtri delle rispettive stazioni, si osserva quindi una condizione idrogeologica governata dal flusso delle acque nelle unità più superficiali (A e B) rispetto a quella più profonda (C), nella quale le acque hanno una limitatissima capacità di movimento. Osservando infatti le variazioni di livello nelle diverse stagioni emerge che le stazioni dove si registrano le variazioni stagionali più rilevanti sono quelle che filtrano sia la sola Unità C, risultando anche senza acqua nella misura di agosto, sia quelle che filtrano le Unità B e C. Risultano invece avere variazioni di livello stagionale molto limitate le stazioni che intercettano le 3 Unità ed in particolare l'Unità A, quella più superficiale rimaneggiata e permeabile.

Nella misura di novembre 2019, periodo caratterizzato come già detto da abbondanti precipitazioni, i piezometri Pz2015/10-13 sono risultati secchi, mentre il Pz2015/5 con un livello molto basso, pari a quanto verificatosi nel periodo dall'estate 2016 alla primavera 2017. Solo i piezometri Pz2015/7-9 evidenziano un significativo innalzamento del livello della falda. Ciò conferma che i livelli di falda nei diversi piezometri sono regolati dal regime delle precipitazioni e le condizioni di equilibrio della falda vengono raggiunte in tempi diversi nei diversi piezometri.

Tabella 2.3 Misure di livello della falda nei piezometri espressa come soggiacenza

Piezometro	Quota PC (m s.l.m.)	Prof. inizio filtri (m)	Soggiacenza (m)											
			15/2/16	14/03/16	19/4/16	3/8/16	8/11/16	18/4/17	21/11/17	8/5/18	06/11/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20
Pz2015/1	120,08	2	0,95	0,93	0,89	1,09	0,82	3,78	-	-	-	-	-	-
Pz2015/2	122,66	3	2,23	2,12	2,42	2,58	2,82	2,48	-	-	-	-	-	-
Pz2015/3	122,86	3	6,78	6,7	3,95	8,11	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	122,91	3	2,75	3,44	2,93	-	6,54	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	118,55	3	1,81	2,67	0,73	5,76	7,19	6,39	1,14	1,68	2,13	1,43	6,94	1,69
Pz2015/6	114,01	2,5	1,68	1,59	1,81	2,18	1,81	2,04	1,79	1,76	1,7	1,58	1,95	1,97
Pz2015/7	113,14	3	3,15	3,41	4,15	4,83	4,17	4,28	4,15	4	4,36	1,93	0,64	4,46
Pz2015/8	117,32	3	4,3	4,02	3,94	4,32	4,81	3,94	4,74	4,59	4,23	4,31	3,70	5,48
Pz2015/9	120,49	3	6,12	6,31	5,05	-	-	-	0,95	8,52	3,04	2,97	0,55	2,25
Pz2015/10	125,67	2	-	-	7,7	-	-	-	-	7,6	5,26	-	-	-
Pz2015/11	109,38	2	1,61	2,04	1,85	5,65	6,8	6,2	1,94	1,69	2,15	1,44	1,80	3,26
Pz2015/12	110,07	2	2,15	2,15	2,47	3,41	2,87	2,38	2,61	2,23	3,28	2,12	2,94	2,94
Pz2015/13	110,93	2	5,18	2,51	2,9	-	-	-	-	6,81	5,98	2,93	-	3,2
Pz2015/B3	221,07	2	-	-	-	-	-	-	4,47	7,62	-	3,69	2,97	-

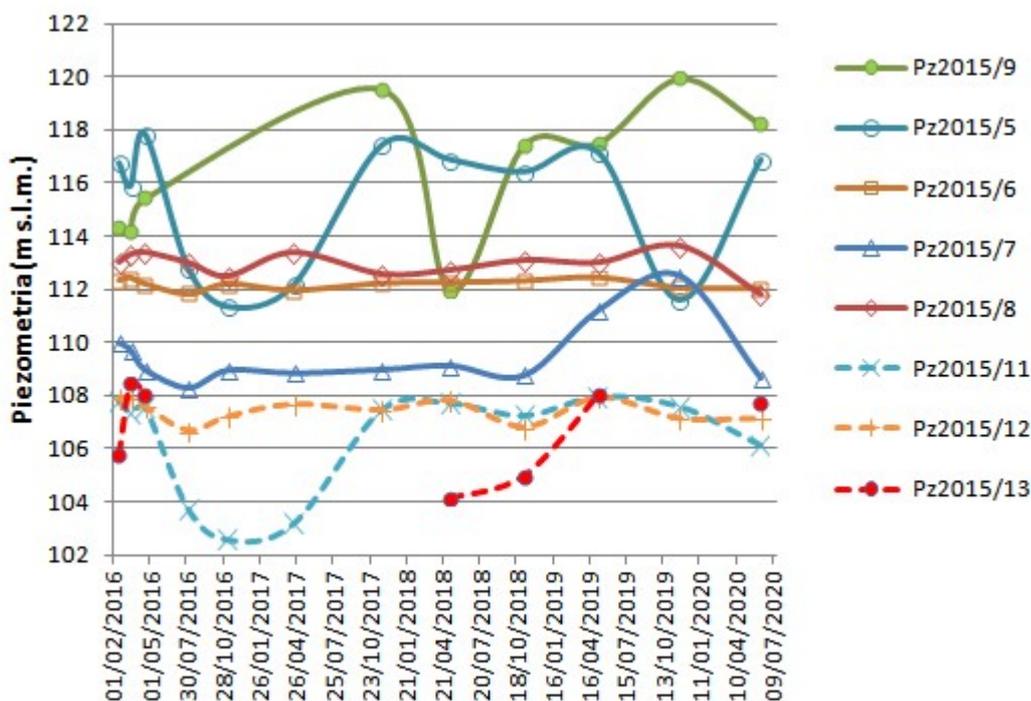
Legenda: evidenziati in **grigio** i livelli di falda più elevati rispetto la profondità di inizio dei filtri.

Tabella 2.4 Misure di livello della falda nei piezometri espressa come piezometria

Stazione	Quota PC (m s.l.m.)	Prof. inizio filtri (m)	Piezometria (m)											
			15/2/16	14/3/16	19/4/16	3/8/16	8/11/16	18/4/17	21/11/17	8/5/18	06/11/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20
Pz2015/1	120,08	2	119,13	119,15	119,19	118,99	119,26	116,3	-	-	-	-	-	-
Pz2015/2	122,66	3	120,43	120,54	120,24	120,08	119,84	120,18	-	-	-	-	-	-
Pz2015/3	122,86	3	116,08	116,16	118,91	114,75	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	122,91	3	120,16	119,47	119,98	-	116,37	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	118,55	3	116,74	115,88	117,82	112,79	111,36	112,16	117,41	116,87	116,42	117,12	111,61	116,86
Pz2015/6	114,01	2,5	112,33	112,42	112,20	111,83	112,20	111,97	112,22	112,25	112,31	112,43	112,06	112,04
Pz2015/7	113,14	3	109,99	109,73	108,99	108,31	108,97	108,86	108,99	109,14	108,78	111,21	112,5	108,68
Pz2015/8	117,32	3	113,02	113,30	113,38	113,00	112,51	113,38	112,58	112,73	113,09	113,01	113,62	111,84
Pz2015/9	120,49	3	114,37	114,18	115,44	-	-	-	119,54	111,97	117,45	117,52	119,94	118,24
Pz2015/10	125,67	2	-	-	117,97	-	-	-	-	118,07	120,41	-	-	-
Pz2015/11	109,38	2	107,77	107,34	107,53	103,73	102,58	103,18	107,44	107,69	107,23	107,94	107,58	106,12
Pz2015/12	110,07	2	107,92	107,92	107,60	106,66	107,20	107,69	107,46	107,84	106,79	107,95	107,13	107,13
Pz2015/13	110,93	2	105,75	108,42	108,03	-	-	-	-	104,12	104,95	108,00	-	107,73
Pz2015/B3	221,07	2	-	-	-	-	-	-	216,6	213,45	-	217,38	218,1	-

Legenda: evidenziati in **grigio** i livelli di falda più elevati rispetto la profondità di inizio dei filtri.

Figura 2.3 Andamento temporale della piezometria nei piezometri



In concomitanza al campionamento delle acque sotterranee effettuato nelle diverse stazioni, sono stati determinati i seguenti parametri di campo: temperatura, potenziale redox e ossigeno disciolto (Tabella 2.5). Dai dati emerge quanto segue:

- la campagna estiva di agosto 2016 ha registrato le temperature più elevate rispetto le altre campagne, condotte in stagioni primaverili, autunnali ed invernali; le maggiori temperature sono state misurate per i piezometri interni all'area catino, Pz2015/1-2, a conferma che le acque sotterranee contenute sono da infiltrazione di acque superficiali che nel periodo estivo assumono valori di temperatura superiori ai 20°C. Temperature superiori rispetto agli altri piezometri anche per Pz2015/9, indice di possibile infiltrazione di acque superficiali, tenendo conto che il piezometro filtra solo l'Unità C delle argille azzurre sovraconsolidate;
- il potenziale redox evidenzia una discreta variabilità tra le diverse campagne analitiche, a dimostrazione di una variabilità dello stato di ossidazione delle acque; i valori più bassi non sono particolarmente negativi come ci si potrebbe aspettare in materiali argillosi con basso o assente deflusso idrico. Nella campagna di agosto 2016 il potenziale redox è negativo in tutti i piezometri monitorati, mentre si osservano condizioni sostanzialmente ossidanti nelle campagne di marzo 2016 e maggio-novembre 2019, evidenziando una stretta relazione con il regime pluviometrico antecedente il campionamento;
- rispetto al contenuto di ossigeno disciolto, si osservano condizioni ossidanti per tutte le campagne analitiche, con valore minimo di 2,55 mg/L rilevato nella campagna di novembre 2017 nel piezometro PZ2015/9, e valore massimo di 8,94 mg/L rilevato nella campagna di maggio 2018 nel piezometro PZ2015/8. In generale si osservano valori coerenti con quelli che si riscontrano nelle acque di falda più superficiale, ovvero ricche di ossigeno disciolto, sia per l'apporto dall'acqua meteorica che si infiltra, che per arricchimento nella zona insatura.



Tabella 2.5 Parametri chimico-fisici misurati in campo

Stazione	Temperatura (°C)									
	15/02/16	14/03/16	03/08/16	08/11/16	18/04/17	21/11/17	08/05/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20
P1/10	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1/13	14,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2/10	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/10	9,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/13	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/1	12,8	12,2	21,4	16,7	17,0	-	-	-	-	-
Pz2015/2	14,0	14,2	22,0	16,8	16,6	-	-	-	-	-
Pz2015/3	13,3	13,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	12,4	13,1	-	13,9	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	11,5	12,9	16,3	13,0	15,3	15,4	14,8	12,5	13,8	15,2
Pz2015/6	10,8	11,2	16,4	14,9	12,4	14,4	12,7	11,5	15,0	13,6
Pz2015/7	12,1	12,8	15,4	13,8	13,4	14,1	14,4	12,2	14,3	14,6
Pz2015/8	12,9	13,9	16,2	14,7	15,0	15,2	15,5	14,5	16,9	16
Pz2015/9	14,2	14,8	-	-	-	16,3	-	15,3	17	18,9
Pz2015/11	9,3	10,5	16,3	13,0	-	13,7	14,3	12,0	14	-
Pz2015/12	9,9	10,7	18,0	15,1	13,8	14,6	13,8	11,8	14,6	14,3
Pz2015/13	12,3	11,6	-	-	12,5	-	-	12,1	-	14,3
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	14,9	-	13,7	14,8	14,3
Stazione	Potenziale Redox (mV)									
	15/02/16	14/03/16	03/08/16	08/11/16	18/04/17	21/11/17	08/05/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20
P1/10	-87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1/13	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2/10	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/10	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/13	-37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/1	85	124	-117	116	85	-	-	-	-	-
Pz2015/2	-74	23	-141	-178	-126	-	-	-	-	-
Pz2015/3	214	281	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	205	266	-	138	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	145	187	-150	11	114	33	89	141	171	107
Pz2015/6	103	142	-2,4	-31	39	20	29	80	44	45
Pz2015/7	124	175	-6,7	-128	-72	-93	-59	114	97	-22
Pz2015/8	25	192	-24,2	-91	132	-69	44	35	187	-67
Pz2015/9	157	162	-	-	-	46	-	186	172	91
Pz2015/11	122	75	-35	-63	-4	-37	-37	19	111	-21
Pz2015/12	67	-2	-40	-57	157	27	-31	48	83	-21
Pz2015/13	128	82	-	-	-	-	-	-29	-	50
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	49	-	108	151	-
Stazione	Ossigeno disciolto (mg/l)									
	15/02/16	14/03/16	03/08/16	08/11/16	18/04/17	21/11/17	08/05/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20
P1/10	4,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1/13	7,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2/10	6,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/10	8,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/13	4,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/1	3,97	6,00	3,23	3,61	2,84	-	-	-	-	-
Pz2015/2	3,30	4,94	7,71	3,97	6,96	-	-	-	-	-
Pz2015/3	5,80	6,42	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	3,23	6,03	-	3,18	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	5,00	6,72	7,91	4,58	4,69	5,14	8,72	4,71	3,83	3,32
Pz2015/6	4,23	6,00	7,07	3,74	7,18	3,52	4,11	7,38	3,51	3,87
Pz2015/7	5,15	5,17	6,99	3,41	7,18	2,9	3,64	3,96	5,4	2,58
Pz2015/8	3,27	4,84	7,1	3,53	4,21	2,8	8,94	3,06	3,09	3,07
Pz2015/9	3,21	4,52	-	-	-	2,55	-	6,05	-	3,79
Pz2015/11	3,10	6,68	7,15	4,08	7,19	4,37	3,38	3,87	3,74	3,42
Pz2015/12	7,42	6,98	6,74	4,06	4,06	3,18	4,49	4,7	3,72	4,5
Pz2015/13	6,59	6,71	-	-	-	-	-	3,79	-	2,87
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	4,95	-	5,92	5,59	-



2.3. Regime pluviometrico nel periodo 2016-2018

Le caratteristiche quali-quantitative delle acque sotterranee nel sito in esame dipendono strettamente dalle condizioni climatiche e in particolare dal regime pluviometrico. È pertanto importante tenere conto delle precipitazioni che hanno preceduto di 1-2 settimane il campionamento e le misure di livello della falda nei piezometri, al fine di valutare sia la velocità di risposta dell'acquifero agli eventi meteorici, sia di caratterizzare il campionamento come in periodo siccitoso o piovoso.

Nelle Figure da 2.4 a 2.8 si riporta in forma grafica l'andamento della precipitazione cumulata (in kg/m²) su base giornaliera, per gli anni dal 2016 al 2020, rilevata da Arpae SIMC presso la stazione di Imola che risulta quella più vicina all'impianto.

Dall'analisi dei dati meteorologici, il 2019 è risultato l'anno caratterizzato dalla maggiore piovosità: presso la stazione di Imola si sono registrati complessivamente 824 kg/m² di precipitazione cumulata annua, a fronte di valori sempre inferiori a 800 kg/m² per le altre annualità analizzate; in particolare il mese di novembre 2019 è quello caratterizzato da intense e abbondanti precipitazioni, con accumuli mensili abbondantemente superiori alla media. Anche il mese di febbraio 2018 ha evidenziato abbondanti precipitazioni.

Per quanto riguarda il periodo di effettuazione dei monitoraggi, si riporta che:

- le misure di febbraio 2016, marzo 2016, novembre 2016, novembre 2017, maggio 2018, novembre 2019 sono state precedute da un periodo di circa 2 settimane caratterizzato da abbondanti precipitazioni;
- le misure di agosto 2016, aprile 2017, maggio 2019 e giugno 2020 sono state precedute da un periodo di circa 2 settimane con scarse o poche precipitazioni.

Figura 2.4 Precipitazione cumulata anno 2016 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC).

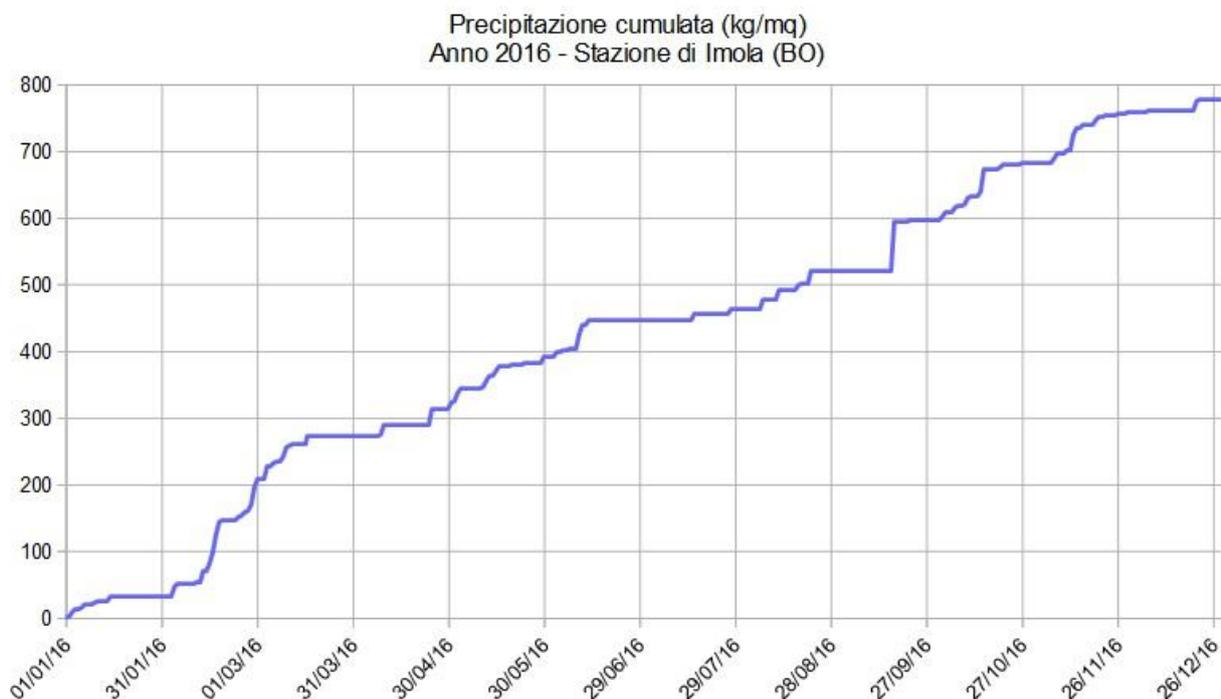




Figura 2.5 Precipitazione cumulata anno 2017 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC)

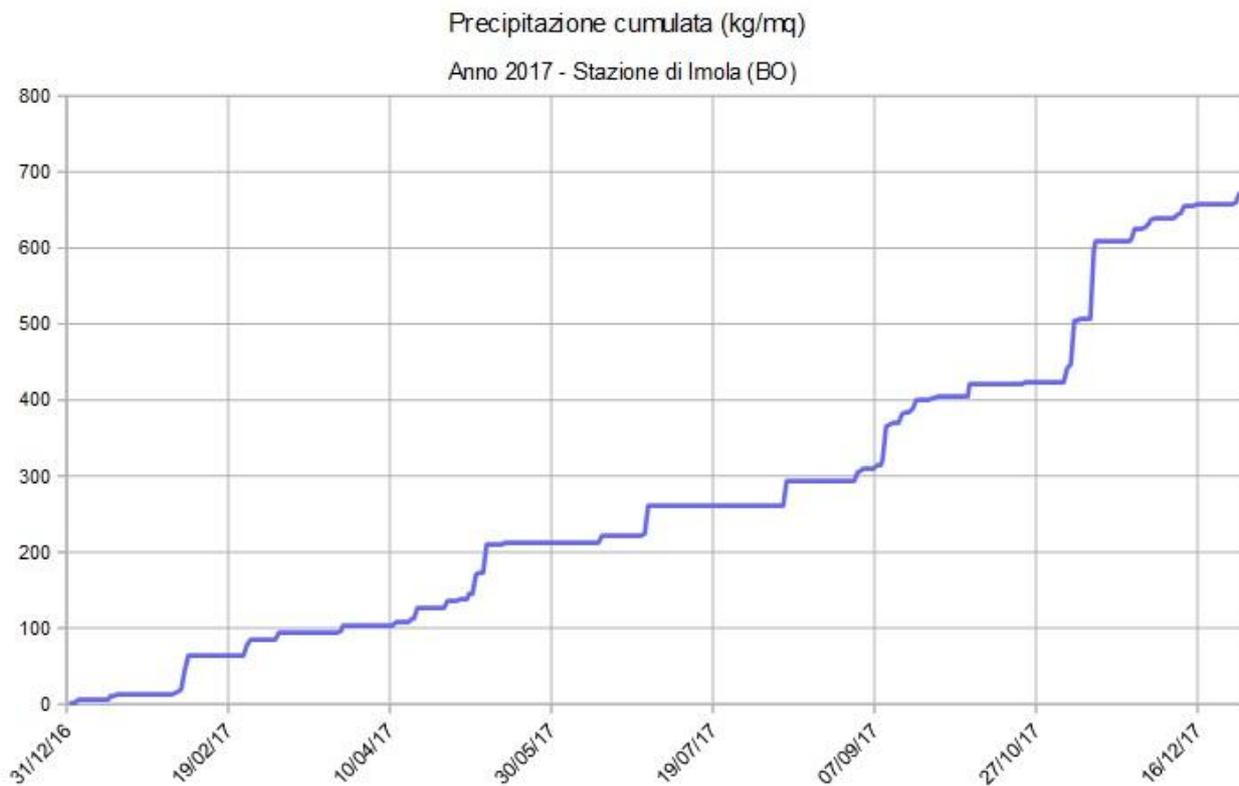


Figura 2.6 - Precipitazione cumulata anno 2018 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC).

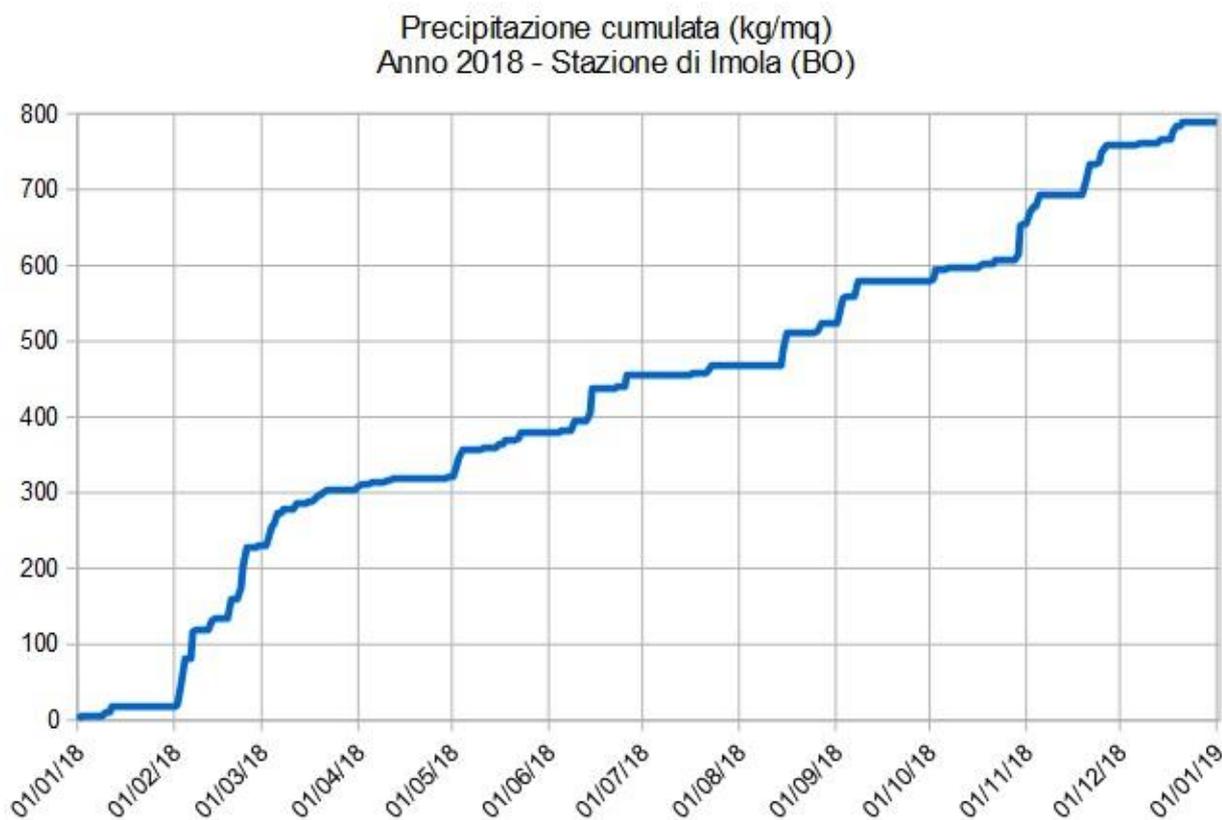


Figura 2.7- Precipitazione cumulata anno 2019 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC)

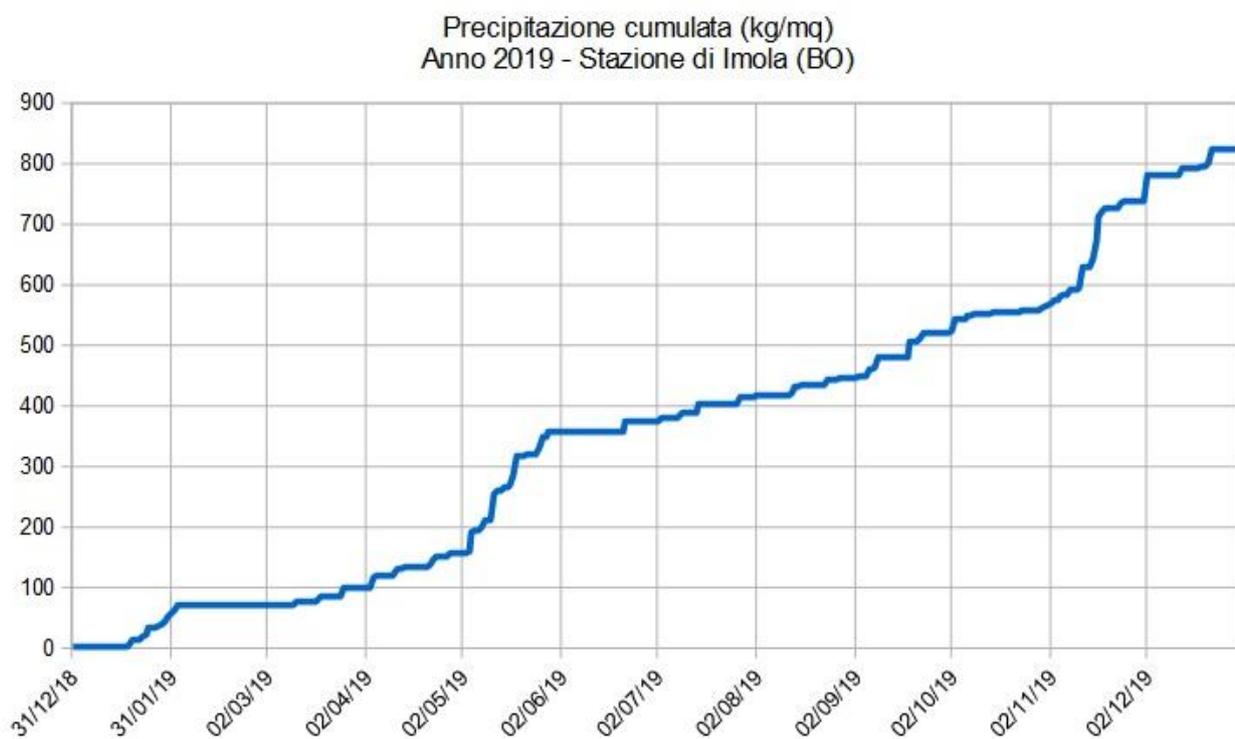
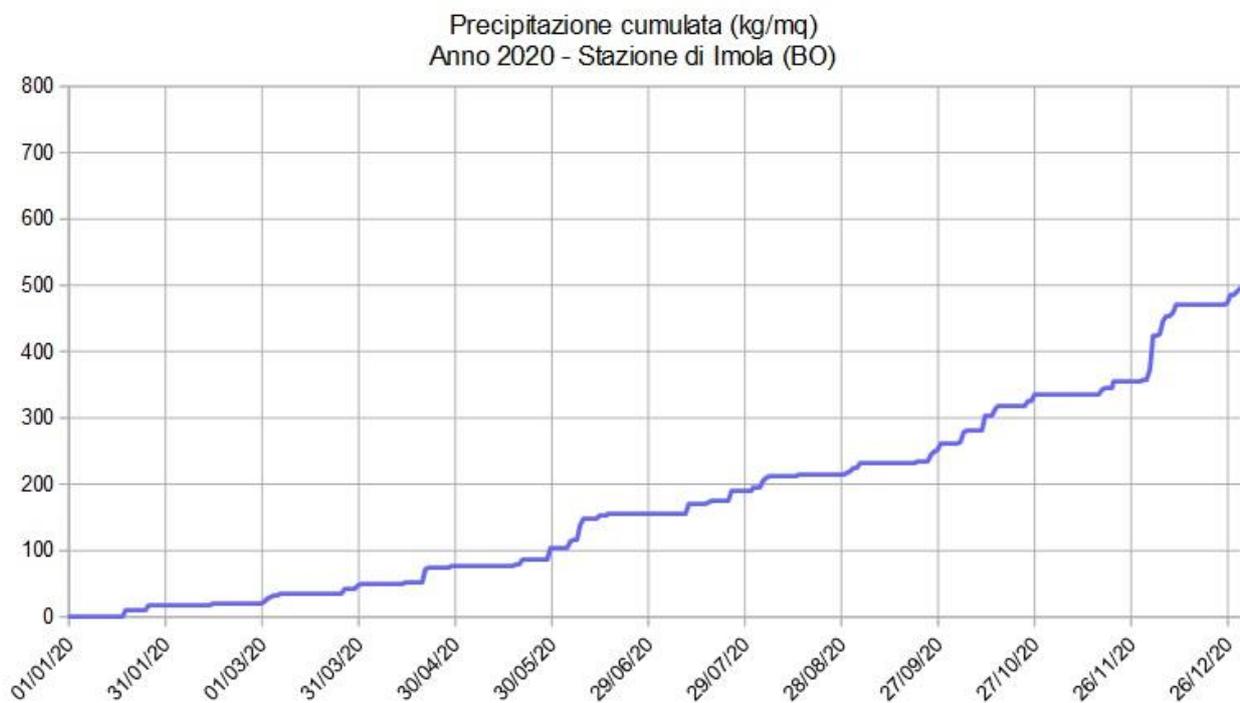


Figura 2.8 - Precipitazione cumulata anno 2020 presso stazione di misura Imola (dati Arpae SIMC).





3. Caratterizzazione del percolato e indicatori di contaminazione

Il recente D.Lgs. n°121 del settembre 2020 definisce il percolato come *“qualsiasi liquido che si origina prevalentemente dall'infiltrazione di acqua nella massa dei rifiuti o dalla decomposizione degli stessi, e che sia emesso da una discarica o contenuto all'interno di essa”*.

Le caratteristiche qualitative del percolato sono influenzate da diversi fattori, in particolare connessi alle caratteristiche del rifiuto conferito, alle modalità di gestione della discarica, in termini di compattazione e grado di umidità del rifiuto, agli eventi meteorologici, nonché all'età della discarica (Canziani e Cossu, 1989), subendo variazioni nel corso del tempo per effetto delle diverse reazioni chimiche che avvengono nel corpo della discarica.

In una discarica per rifiuti urbani, dalla decomposizione anaerobica dei rifiuti si formano essenzialmente sostanze come il metano, anidride carbonica, ammoniaca e solfuro di idrogeno; il percolato è quindi tipicamente composto da materiali organici, prodotti di decomposizione, prodotti chimici organici e metalli.

Il percolato di discarica costituisce un rifiuto liquido, che può o meno, possedere caratteristiche di pericolosità, sulla base delle analisi chimiche, e che nell'ambito dell'Elenco Europeo dei Rifiuti viene classificato o con il codice 190702* (percolato di discarica, contenente sostanze pericolose) o con il codice 190703 (percolato di discarica, diverso da quello di alla voce precedente); in qualità di rifiuto, il percolato raccolto dal fondo della discarica deve essere avviato ad idonei impianti di smaltimento (per trattamento chimico-fisico).

Il percolato prodotto dalla discarica Tre Monti costituisce un rifiuto non pericoloso; questo viene estratto dal fondo della discarica mediante nr. 5 pompe, dette “slope riser”, avviato ad accumulo in vasche aperte (V3/V4), e da queste, previo passaggio in serbatoi posti a monte, viene inviato tramite una condotta dedicata (percolatodotto) ai serbatoi di accumulo presso il Depuratore Santerno di Imola, per poi essere trasportato via autobotte ad impianti terzi per il trattamento di smaltimento.

Ai sensi del D.Lgs. 36/2003 ssmmii (ref. Allegato II, punto 5.3) il campionamento del percolato deve essere eseguito *“in ciascun punto in cui il percolato fuoriesce dall'area”*; a tale proposito, il Piano di Monitoraggio e Controllo allegato ad autorizzazione AIA, prevede, tra le diverse misure, la caratterizzazione qualitativa del percolato prodotto dalla discarica Tre Monti, attraverso protocolli di frequenza trimestrale e semestrale in capo al Gestore ed un controllo annuale in capo ad Arpae, nel punto di campionamento di ingresso ai bacini di lagunaggio. Nell'atto DET-AMB-2016-5011 di Arpae SAC di Bologna, che ha autorizzato le modalità di gestione del percolato mediante percolatodotto, è stato indicato come punto di campionamento sia l'ingresso alle vasche di stoccaggio che i serbatoi presenti nell'area del Depuratore Santerno destinati a raccogliere il percolato proveniente dal percolatodotto; quest'ultimo punto è stato inoltre individuato come punto di campionamento per la caratterizzazione del rifiuto liquido ai fini dello smaltimento (procedura di omologazione).

Secondo quanto indicato al Piano di Monitoraggio e Controllo AIA di cui alla D.G.P. n°241/2012, Arpae esegue dal 2012 controlli a frequenza annuale sulla qualità del percolato della discarica; per il periodo 2016-2020, contestuale agli approfondimenti sulle acque sotterranee dell'area delle vasche V1-V2, la frequenza dei controlli sul percolato è stata aumentata rispetto quanto indicato in AIA, secondo le seguenti campagne di campionamento del percolato:

- in data 15/02/2016, 14/03/2016 il percolato è stato campionato in ingresso alla vasca V3;
- in data 03/08/2016 il percolato è stato campionato in vasca V4;



- in data 17/11/2016 e 18/04/2017 il percolato è stato campionato sia in ingresso ai bacini di lagunaggio che nel rubinetto di campionamento nei serbatoi di stoccaggio a valle del percolatodotto (presso il depuratore Santerno) – per il protocollo di verifica del percolatodotto;
- in data 03/08/2016 e 08/05/2018 il percolato è stato campionato nei serbatoi di stoccaggio a monte del percolatodotto;
- in data 06/11/2018, 18/03/2019, 08/06/2020 il percolato prodotto è stato campionato direttamente dal rubinetto delle pompe di estrazione del percolato (slope riser), in quanto da novembre 2018, come verificato in sede di ispezione AIA le acque di drenaggio prodotte dai lavori di dismissione delle vasche V1 e V2, sono state avviate alle vasche di stoccaggio del percolato e quindi smaltite unitamente a questo, come autorizzato da DET-AMB-2018-1173 del 08/03/2018 di Arpae SAC di Bologna.

In Allegato 1 alla relazione si riportano gli esiti delle analisi chimiche del percolato effettuato da Arpae, dalle quali non emergono differenze significative tra i diversi campioni di percolato, caratterizzati da valori di pH lievemente basici e una composizione chimica sostanzialmente costante, con variazioni di concentrazione attribuibili al diverso grado di diluizione, funzione del regime pluviometrico e della relativa infiltrazione delle acque meteoriche nel corpo di discarica, anche in considerazione dell'incertezza associata alle misure di laboratorio.

Le caratteristiche qualitative sono peraltro in linea con i dati di letteratura (Christensen et al., 2001; Environment Agency UK, 2004), ovvero elevati valori di conducibilità e concentrazioni significative di azoto ammoniacale e metalli pesanti; le concentrazioni di fenoli sono in linea con l'età della discarica ed il relativo stadio di biostabilizzazione (anaerobico metanogenico).

Si specifica che per i monitoraggi del 17/11/2016 e 18/04/2017, in cui è stato effettuato un doppio campionamento di percolato, sia in ingresso ai bacini di lagunaggio sia a valle del percolatodotto presso il depuratore Santerno, gli esiti riportati, e quindi elaborati anche ai fini statistici, si riferiscono ai soli campioni prelevati in ingresso ai bacini di lagunaggio.

Pur considerando una certa variabilità tra le diverse campagne, viste anche le incertezze associate alle misure di laboratorio, si individuano quali valori distanti dal resto del dataset (potenziali *outliers*), le seguenti rilevazioni:

- la concentrazione di ferro registrata nel campionamento del 18/04/2017, superiore per circa un ordine di grandezza alle altre rilevazioni del dataset;
- la concentrazione di nitriti registrata nel campionamento del 18/03/2019, a fronte di tutte le altre rilevazioni inferiori al limite di quantificazione della metodica;
- la concentrazione di 2-clorofenolo registrata il 06/11/2018, superiore di circa un ordine di grandezza alle altre rilevazioni del dataset.

In via cautelativa tali dati non sono comunque stati esclusi dalle successive elaborazioni statistiche.

3.1. Identificazione dei markers di contaminazione da percolato

Gli indicatori delle potenziali contaminazioni nelle matrici suolo, acque sotterranee e acque superficiali nell'intorno della discarica stessa, c.d. "*markers*", vengono individuati con l'obiettivo di riconoscere variazioni significative della qualità dell'acqua sotterranea, al fine di rilevare tempestivamente eventuali situazioni di inquinamento; le sostanze individuate come markers devono possedere le seguenti caratteristiche:

- presenza in concentrazione particolarmente significativa nel percolato di discarica;
- elevata mobilità in acqua.



Al fine di individuare i markers per la discarica Tre Monti sono state confrontate le concentrazioni medie dei diversi parametri chimici contenuti nel percolato, desunti dai campionamenti effettuati dal 2016, con quelle presenti nelle acque sotterranee dei punti di "bianco", al fine di valutare le concentrazioni e la relativa variabilità nel tempo dei parametri in condizioni naturali e indisturbate. Per il caso specifico, dei 3 punti di bianco individuati (Pz2015/B, Pz2015/B2, Pz2015/B3), è stato possibile procedere al campionamento solo per uno di questi, Pz2015/B3, con rilevazioni in tre campagne analitiche; per i restanti piezometri di bianco non si è potuto procedere al campionamento per assenza di acqua in tutte le rilevazioni.

Applicando la metodologia di individuazione dei markers, descritta da Agostini et al. 2016, in Tabella 3.1.1. si riportano le concentrazioni medie¹ delle rilevazioni per i singoli parametri, nel percolato e nel punto di bianco, evidenziando in grigio i parametri che presentano concentrazione differenziale percolato/acque sotterranee di almeno due ordini di grandezza, ovvero il rapporto tra le medie risulti superiore o uguale a $5 \cdot 10^1$.

Tabella 3.1.1. Concentrazioni medie nel percolato e nelle acque sotterranee del punto di bianco

Parametro	UdM	Media percolato	Media piezometro bianco B3
pH	-	8,12	7,84
Conducibilità	$\mu\text{S/cm}$	20642,22	872,67
Alcalinità	mg/L	17838,86	596,67
COD	mg/L	5284,44	32,67
Azoto ammoniacale	mg/L	2583,44	39,03
Nitriti	$\mu\text{g/L}$	950,56	41,33
Azoto nitrico	mg/L	3,49	4,43
Cloruri	mg/L	2574,44	62,67
Solfati	mg/L	215,56	70,33
Cianuri liberi	$\mu\text{g/L}$	10,56	5,00
Arsenico	$\mu\text{g/L}$	196,00	2,50
Bario	$\mu\text{g/L}$	845,86	17,00
Boro	$\mu\text{g/L}$	12058,00	388,33
Cadmio	$\mu\text{g/L}$	0,50	0,25
Calcio	mg/L	99,33	37,67
Cromo VI	$\mu\text{g/L}$	4,00	1,00
Cromo totale	$\mu\text{g/L}$	2625,67	2,50
Ferro	$\mu\text{g/L}$	11537,56	622,00
Magnesio	mg/L	111,33	27,00
Manganese	$\mu\text{g/L}$	278,00	19,33
Mercurio	$\mu\text{g/L}$	0,25	2,50
Molibdeno	$\mu\text{g/L}$	14,71	2,50
Nichel	$\mu\text{g/L}$	373,00	3,67
Piombo	$\mu\text{g/L}$	28,22	2,50
Potassio	mg/L	1027,71	17,57
Rame	$\mu\text{g/L}$	172,00	9,67
Selenio	$\mu\text{g/L}$	4,22	2,50
Sodio	mg/L	2211,57	142,67
Stagno	$\mu\text{g/L}$	663,75	25,00
Vanadio	$\mu\text{g/L}$	202,43	2,50
Zinco	$\mu\text{g/L}$	502,33	16,17
2-Clorofenolo	$\mu\text{g/L}$	7,91	0,05
2,4-Diclorofenolo	$\mu\text{g/L}$	1,12	0,05
2,4,6-Triclorofenolo	$\mu\text{g/L}$	0,44	0,05
Pentaclorofenolo	$\mu\text{g/L}$	0,22	0,05

Tra le sostanze evidenziate in Tabella 3.1.1., come indicato da metodologia sopra richiamata, non sarà considerato il COD. Non è stata inoltre verificata la non-correlazione tra i parametri, per la ridotta significatività statistica determinata dalla limitata serie temporale di dati. Ciò risulta

1 Concentrazioni medie rilevate secondo approccio *medium bound*



comunque ininfluenza per determinare la rappresentatività dei markers in quanto la verifica statistica è solo orientata a ridurre il numero dei markers eliminando quelli ridondanti.

Poiché la metodica di individuazione dei markers prevede che gli stessi siano caratterizzati da elevata mobilità nel mezzo saturo e insaturo, al fine di avere una risposta tempestiva, sono stati analizzati i coefficienti di ripartizione suolo/acqua (K_D), che descrivono, per uno specifico suolo o sedimento, una misura della partizione di un composto chimico tra il suolo/sedimento e l'acqua, ovvero esprimono quanto un inquinante abbia la tendenza ad essere presente nella fase solida (ovvero subisca il fenomeno dell'adsorbimento), oppure rimanga in fase acquosa. La metodica suggerisce la scelta di sostanze caratterizzate da basso o addirittura nullo K_D .

Premesso che K_D è una costante sito-specifica e spesso dipendente dal pH locale, a titolo esemplificativo, si riportano in Tabella 3.1.2. i valori medi indicati per i radionuclidi da IAEA, 2010

Tabella 3.1.2 Valori del coefficiente K_D per radionuclidi (L/kg) – fonte IAEA, 2010

Radionuclide	K_D (L/kg)
Arsenico (As)	550
Cromo (Cr)	40
Nichel (Ni) -pH > 6,5	820
Potassio (K)	13
Vanadio (V)	300

Da Tabella 3.1.2. è possibile dedurre la seguente scala dei K_D (*metal partitioning*) ordinati dal più elevato al più basso:

$$Ni > As > V > Cr > K$$

In caso di fuoriuscita di percolato sul suolo, pertanto, i primi contaminanti ad essere rilevati nelle acque sotterranee saranno potassio e cromo, e solo successivamente seguiranno vanadio, arsenico ed in ultimo il nichel.

Potassio e cromo sono caratterizzati da valori di coefficiente K_D inferiori anche al 2-clorofenolo, per il quale, da Banca dati ISS-INAIL (Beccaloni E. et al., 2008), in considerazione del pH dei terreni analizzati, risulta un K_D di circa 300 L/kg, e pertanto con caratteristiche di ripartizione acqua/suolo assimilabili al vanadio; per quanto attiene l'azoto ammoniacale, il range di K_D , indicato da Environment Agency UK, 2003, varia da 0 a 6,5 L/kg, e pertanto le caratteristiche di ripartizione suolo/acqua si assumono assimilabili a quelle del potassio.

Per i markers individuati viene effettuata un'analisi statistica delle serie storiche, mediante test non parametrico di Mann Kendall, nel seguito M-K, come previsto da Linee Guida nazionali (ISPRA, 2017), al fine di valutare eventuali tendenze significative delle concentrazioni di tali parametri nelle acque sotterranee; per il caso specifico tale analisi non può essere effettuata per arsenico, vanadio, 2-clorofenolo e cromo, in quanto la quasi totalità delle concentrazioni rilevate sui piezometri, sia interni che esterni, risulta inferiore al limite di quantificazione della metodica (LOQ), e di conseguenza tali dataset non restituiscono tendenze statisticamente significative.

Il test di M-K è stato applicato per i parametri rimanenti (azoto ammoniacale, potassio e nichel) ai piezometri di monitoraggio mediante software "ProUCL 5.1" sviluppato da EPA - United States Environmental Protection Agency, con elaborazione dei dati dal 25/11/2015 al 08/06/2020:

- al fine di garantire significatività statistica, il test è stato effettuato per i piezometri con un dataset di almeno nr. 8 osservazioni (Pz2015/5-6-7-8-11-12);
- l'intervallo di confidenza definito per rigettare l'ipotesi che non esista una tendenza (ipotesi nulla) è stato imposto pari/superiore a 99%;
- in via cautelativa, considerato il numero ridotto di osservazioni per piezometro, dal dataset non sono stati esclusi i potenziali valori *outliers*;
- i dati minori del limite di quantificazione della metodica analitica sono stati inclusi nelle elaborazioni statistiche utilizzando il metodo "*medium-bound*", ovvero considerano un valore pari alla metà del relativo limite di quantificazione, in base a quanto raccomandato nella Linea Guida

161/2017 (Ispra, 2017) ed a livello internazionale e nazionale (Direttiva Quadro 2000/60/CE, ISS 04/15/04, World Health Organization etc...).

I risultati delle elaborazioni statistiche sono riportati nel dettaglio in Allegato 2 della relazione, e vengono sinteticamente riassunti in Tabella 3.1.3.

Tabella 3.1.3. Test M-K parametri markers di percolato

	Azoto ammoniacale	Potassio	Nichel
Pz2015/5	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Trend decrescente
Pz2015/6	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Trend decrescente
Pz2015/8	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-	-	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/12	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/13	-	-	-

Dalla tabella emergono tendenze statisticamente significative per i piezometri Pz2015/5-7 per il parametro nichel, entrambi con trend di concentrazioni in diminuzione.

Il test di M-K sull'andamento delle concentrazioni dei parametri markers di contaminazione da percolato (azoto ammoniacale, potassio e nichel) non evidenzia alcuna tendenza significativa all'aumento delle concentrazioni, ovvero dell'inquinamento, per nessun piezometro di monitoraggio, escludendo fenomeni di contaminazione da percolato in atto.

4. Sintesi del chimismo delle acque sotterranee e superamenti delle CSC

Nel presente capitolo si riassumono gli esiti delle indagini chimiche effettuate dal novembre 2015 al giugno 2020 sui piezometri di monitoraggio, sintetizzando quanto già riportato nelle note trasmesse da Arpae Servizio Territoriale, con aggiornamento dei dati all'ultima campagna di giugno 2020.

Le concentrazioni rilevate nelle acque sotterranee sono state confrontate con le Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) di cui all'Allegato V, Parte Quarta del D.Lgs. 152/2006 ss.mm.ii., ove presenti. La valutazione di conformità è stata condotta in considerazione dell'intervallo di confidenza delle misure, così come indicato nell'autorizzazione AIA: il risultato di ciascun campione è stato, pertanto, considerato superiore al valore limite quando la differenza tra il "Risultato della Misurazione e l'Incertezza di Misura" è risultato superiore al valore limite fissato dalla normativa.

Gli esiti del monitoraggio chimico delle acque sotterranee sono riassunti in Allegato 1 per singolo piezometro di monitoraggio; per semplicità di lettura, le concentrazioni superiori in valore assoluto alla CSC sono espresse con la relativa incertezza di misura, e di queste sono evidenziati in carattere **grassetto** i valori **non conformi** (ovvero, come già detto, quelli dove il risultato della differenza tra la concentrazione misurata e il valore assoluto dell'incertezza di misura risulta superiore alla CSC).

Con riferimento all'ultima campagna del 08/06/2020, si registrano i seguenti superamenti delle concentrazioni CSC:

a) nei **PIEZOMETRI INTERNI ALLA DISCARICA** Pz 2015/5-6-7-8-9:

- **solforati**: si confermano, in analogia con le precedenti campagne analitiche, superamenti delle CSC in tutti i piezometri, ad eccezione di Pz2015/9;



- **manganese**: in linea con quanto osservato nei precedenti monitoraggi si osservano valori superiori alle CSC per Pz2015/5, con concentrazione prossima alla CSC, Pz2015/6 e Pz2015/7, con concentrazioni maggiori, superiori per circa un ordine di grandezza alla CSC;
- **ferro**: si confermano superamenti delle CSC per Pz2015/6 e Pz2015/7;
- **boro**: si confermano superamenti delle CSC per Pz2015/5, Pz2015/7 e Pz2015/8, con concentrazioni dello stesso ordine di grandezza della CSC;
- **arsenico**: si registra un superamento della CSC nel piezometro Pz2015/8, superamento già rilevato in un precedente campionamento (6/11/2018), in concentrazioni sempre prossime alla CSC;

b) nei **PIEZOMETRI ESTERNI ALLA DISCARICA** (Pz2015/11-12-13), adiacenti al Rio Rondinella:

- **solforati e manganese** per tutti i piezometri si sono registrati superamenti delle CSC confermando quanto già osservato nelle precedenti campagne analitiche, con concentrazioni superiori di circa un ordine di grandezza alla CSC;
- **ferro**: si osservano superamenti delle CSC per i tre piezometri, con le maggiori concentrazioni in Pz2015/12, superiori a circa due ordini di grandezza alla CSC;
- **boro**: si sono registrati superamenti delle CSC per tutti e tre i piezometri, con concentrazioni dello stesso ordine di grandezza della CSC.

Nella campagna di giugno 2020 non si registrano superamenti delle CSC dei **nitriti** per nessun piezometro, interno o esterno; non si evidenzia inoltre la presenza di **fenoli** e i **metalli pesanti**, le cui concentrazioni sono entro i limiti di conformità.

Per gli analiti ritenuti di maggiore interesse, ovvero quelli che nel corso dei monitoraggi hanno registrato un superamento delle CSC, nelle Figure da 4.1. a 4.5. si riporta il dettaglio grafico dell'andamento delle concentrazioni registrate da Arpae sulle acque sotterranee e sul percolato nel periodo dal novembre 2015 al giugno 2020.

In Figura 4.4., per ragioni di rappresentazione grafica, è stata esclusa la concentrazione di ferro rilevata in data 18/4/2017 sul percolato, già segnalata come potenziale *outlier*.





Figura 4.1. Concentrazioni di solfati in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

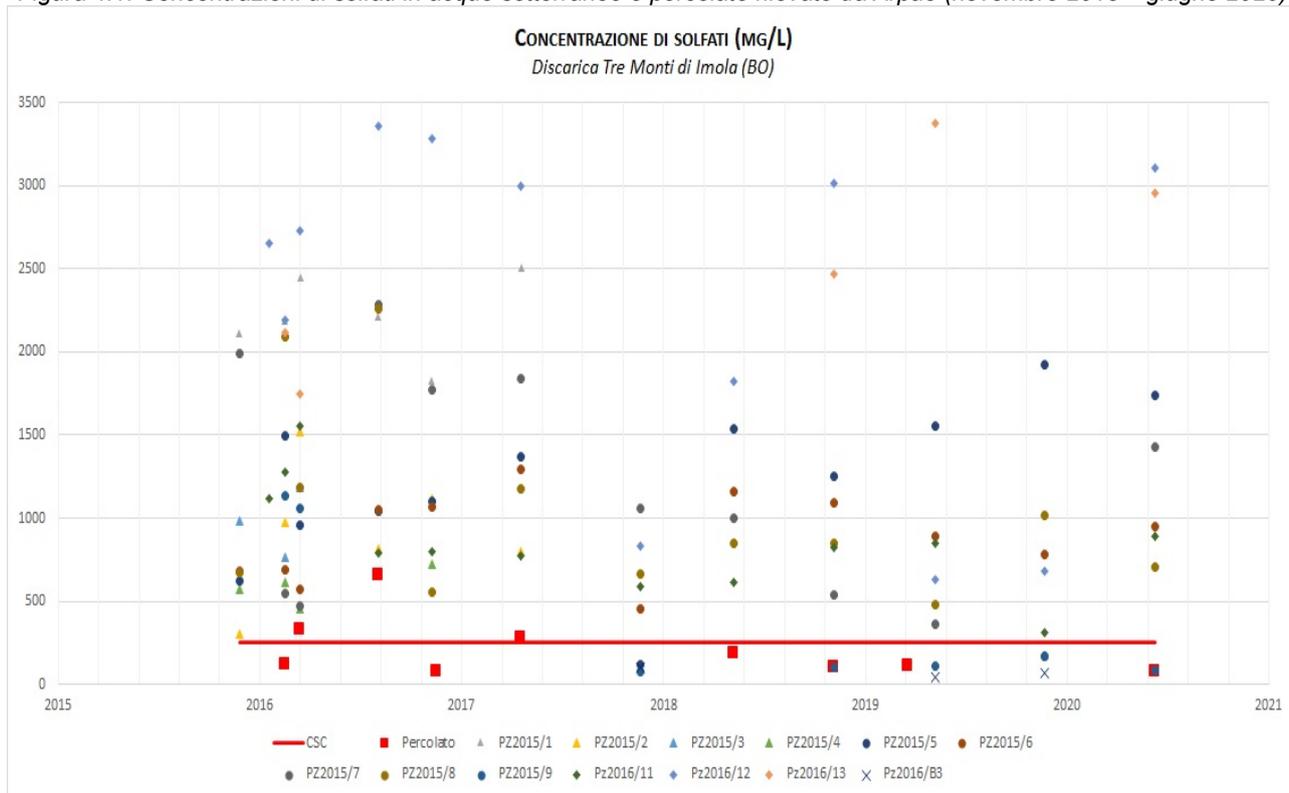


Figura 4.2. Concentrazioni di Mn in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

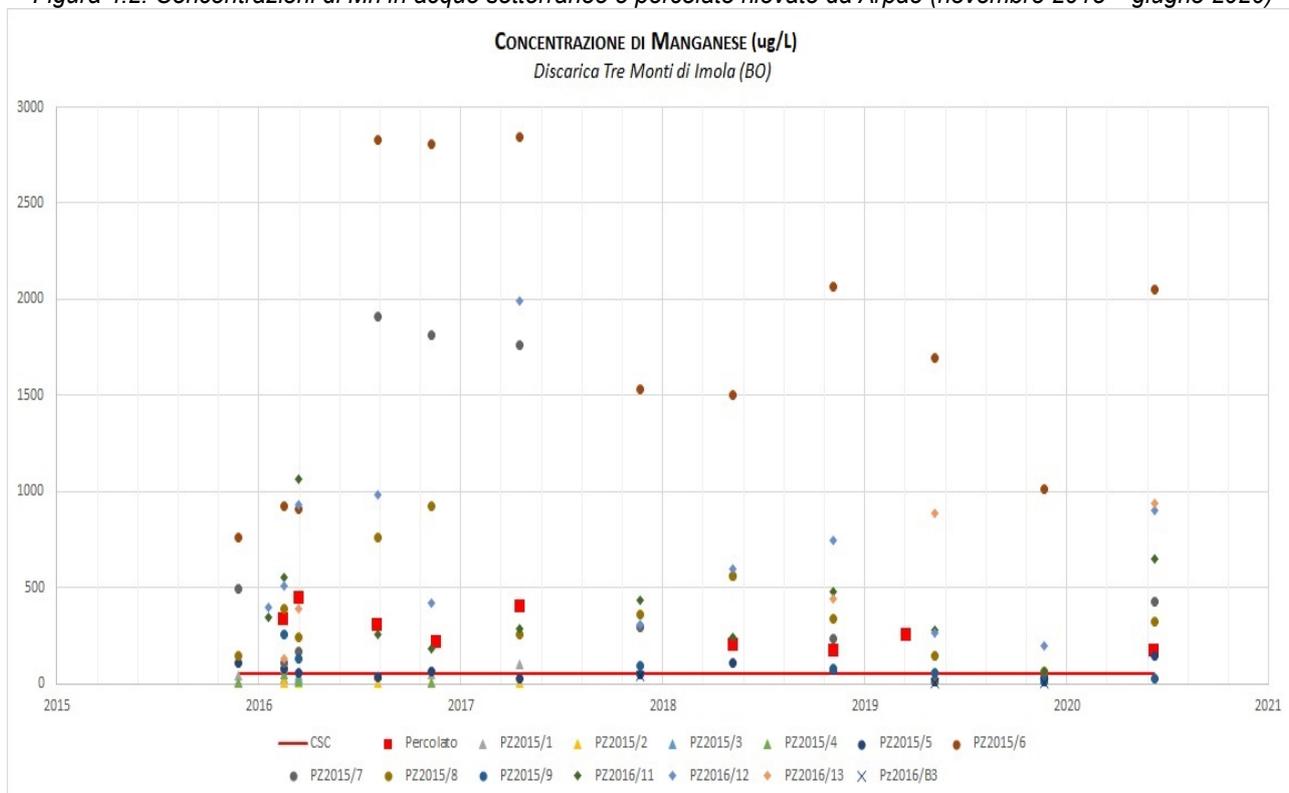




Figura 4.3. Concentrazioni di boro in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

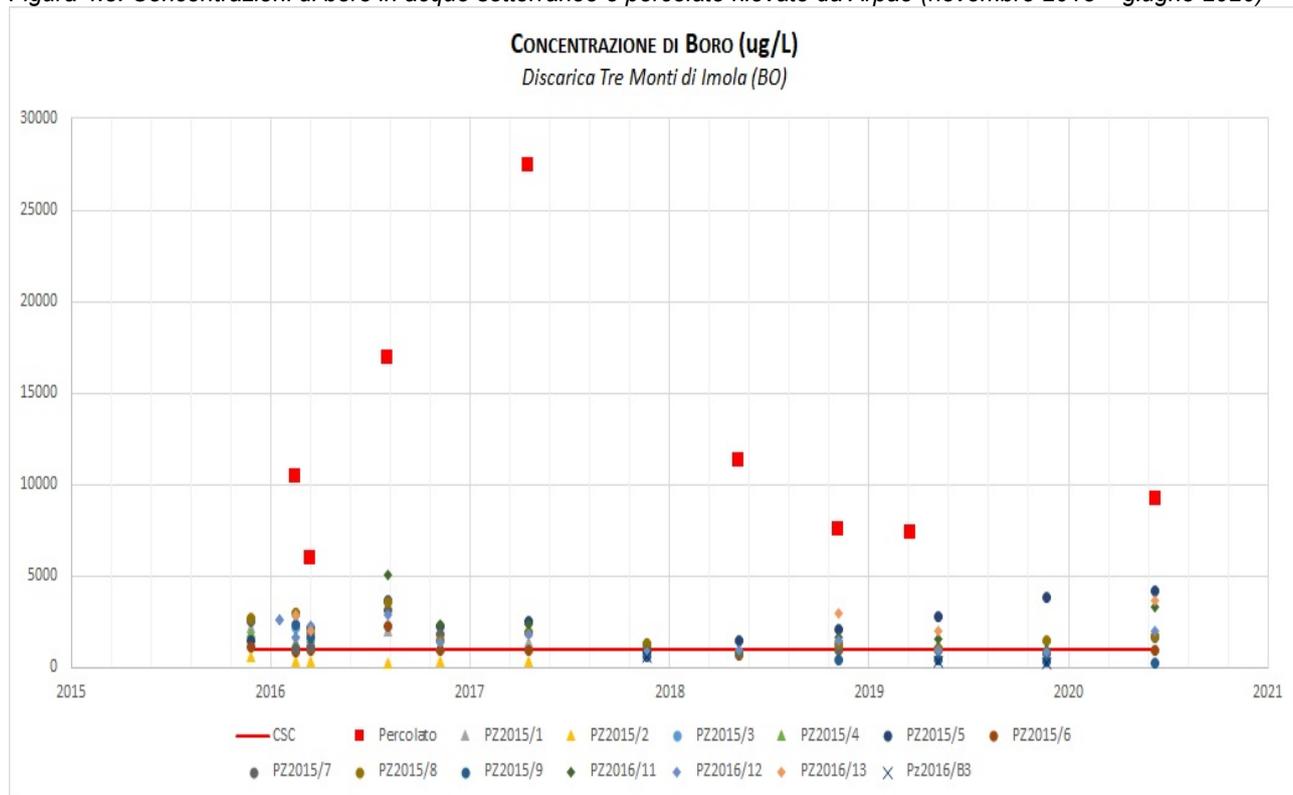


Figura 4.4. Concentrazioni di ferro in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

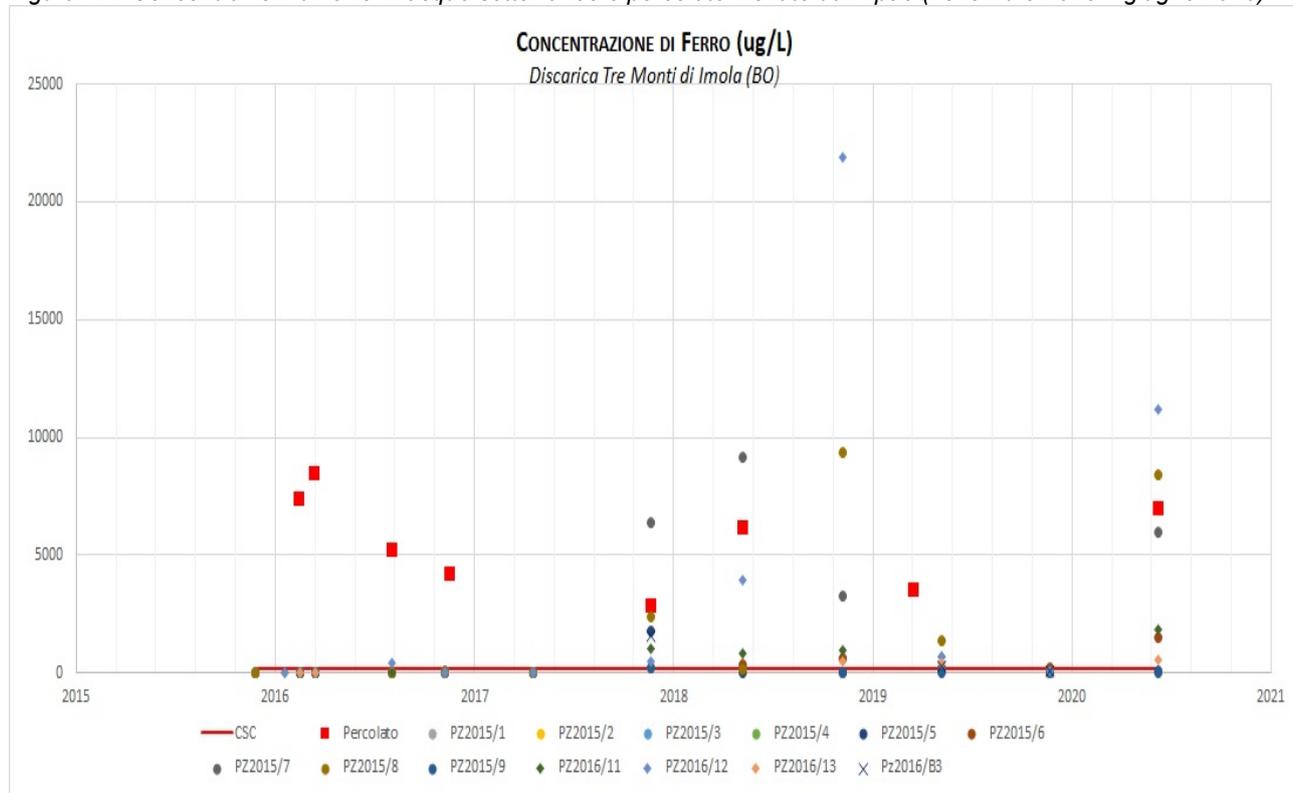




Figura 4.5. Concentrazioni di nitriti in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

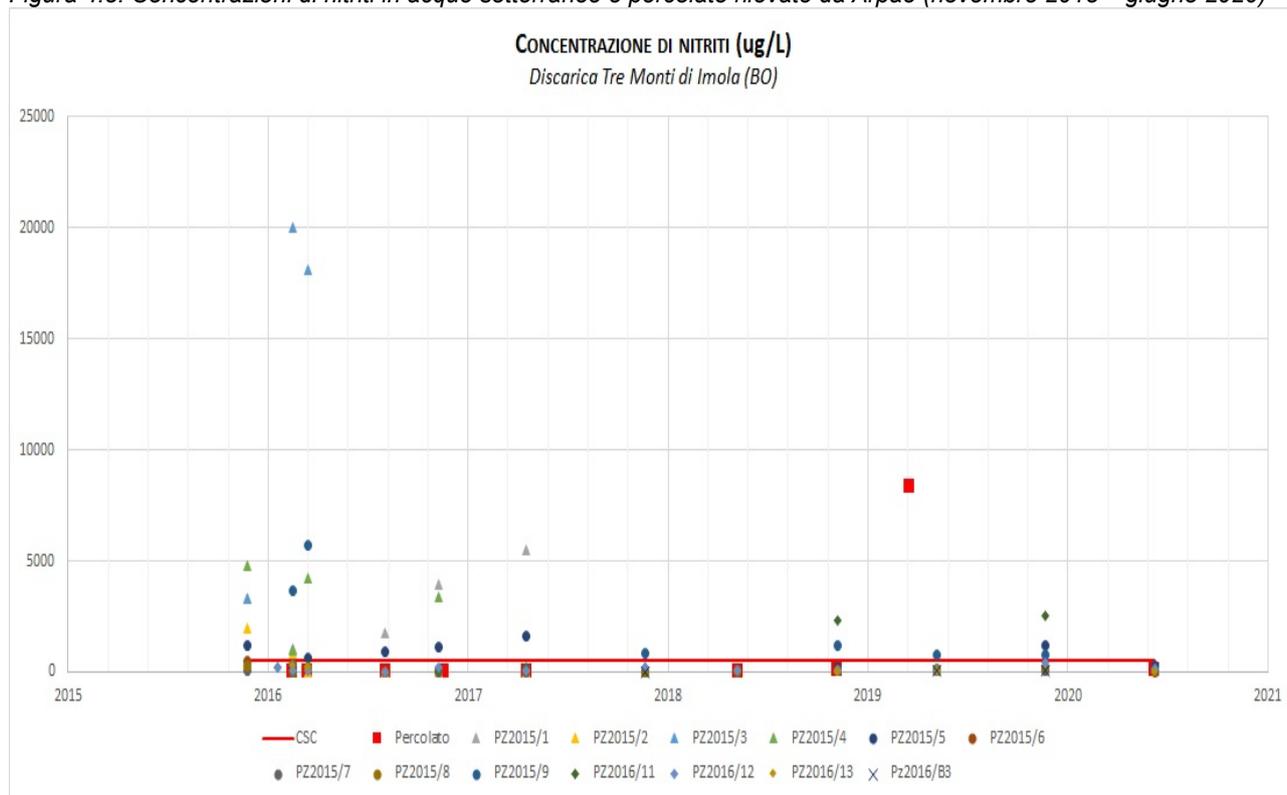


Figura 4.6. Concentrazioni di nichel in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)

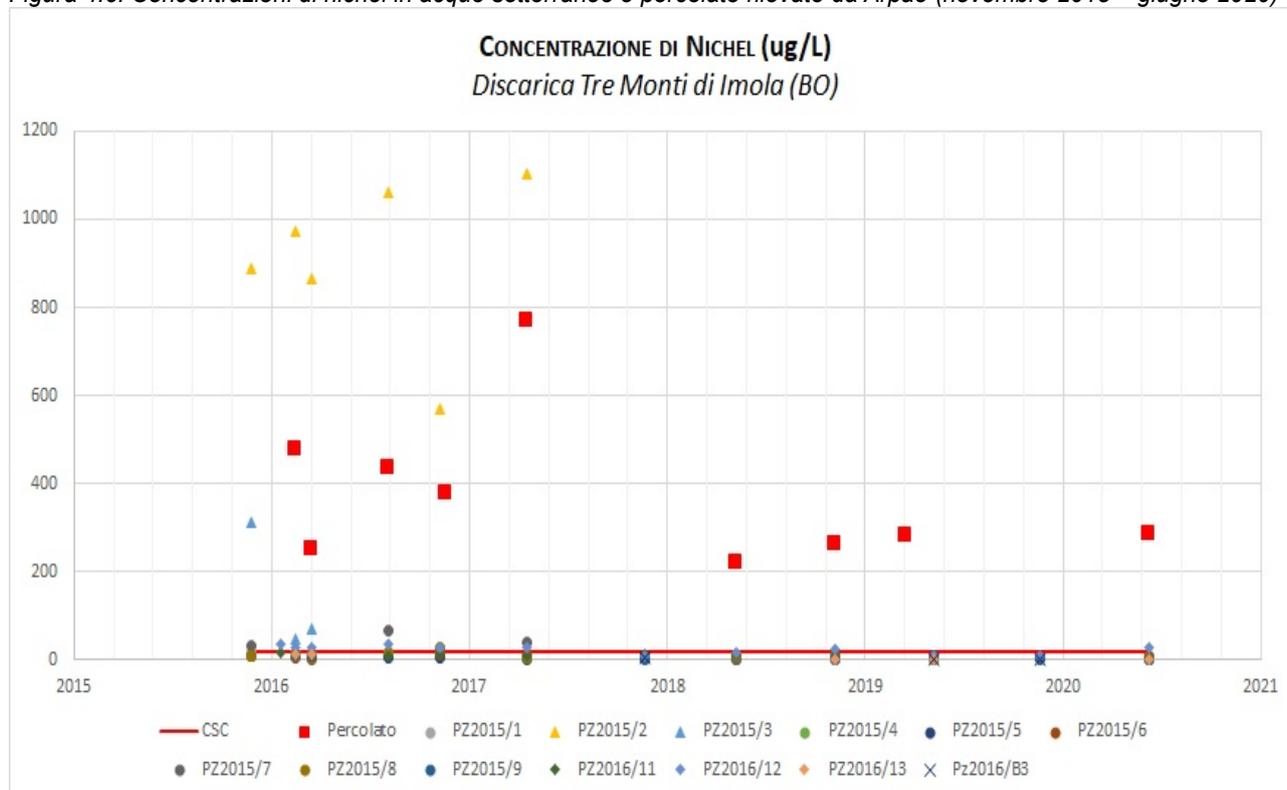
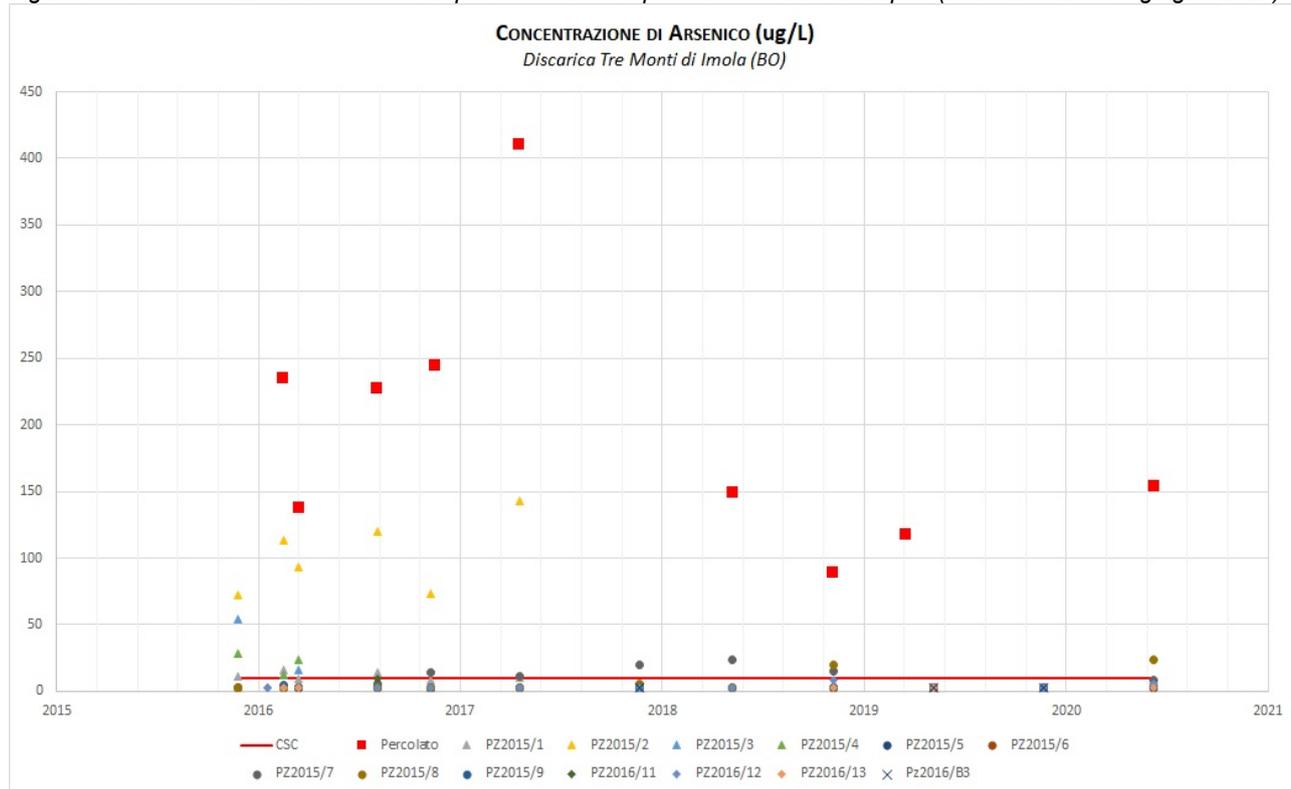




Figura 4.6. Concentrazioni arsenico in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2020)



Il test statistico di Mann-Kendall per la definizione degli andamenti delle concentrazioni è stato esteso anche agli analiti per i quali, nel corso dei monitoraggi si sono registrati superamenti delle CSC. In analogia a quanto effettuato per i parametri markers, ed in accordo alle Linee Guida 161/2017 (Ispra, 2017), ai fini delle elaborazioni statistiche sono stati adottati i seguenti criteri:

- per garantire significatività statistica, il test è stato effettuato per i piezometri con un dataset di almeno nr. 8 osservazioni (Pz2015/5-6-7-8-11-12);
- l'intervallo di confidenza definito per rigettare l'ipotesi che non esista una tendenza (ipotesi nulla) è stato imposto pari/superiore a 99%;
- in via cautelativa, considerato il numero ridotto di osservazioni per piezometro, dal dat set non sono stati esclusi i potenziali valori *outliers*;
- i dati inferiori al limite di quantificazione della metodica analitica sono stati inclusi nelle elaborazioni statistiche utilizzando il metodo "medium-bound", ovvero, come già detto, pari a metà del relativo limite di quantificazione, in base anche a quanto raccomandato a livello internazionale e nazionale (Direttiva Quadro 2000/60/CE, ISS 04/15/04, World Health Organization, Ispra 161/2017, etc...).

Il test M-K, sempre in analogia a quanto effettuato per i parametri markers, è stato applicato mediante software "ProUCL 5.1" sviluppato da EPA - United States Environmental Protection Agency; gli esiti delle elaborazioni sono riportate in dettaglio nei paragrafi che seguono.

4.1. Solfati

In Tabella 4.1.1. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di solfati, e la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri, nei monitoraggi dal novembre 2015 al giugno 2020. Si evidenziano in grassetto i dati superiori alla CSC, per i solfati pari a 250 mg/L.

Tabella 4.1.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro solfati

	Solfati (mg/L) – CSC: 250 mg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	2215,83	2202	1828	2504	244,29
Pz2015/2	920	894	301	1519	402,31
Pz2015/3	978	979	769	1186	208,5
Pz2015/4	590	591	455	723	110,63
Pz2015/5	1224,92	1308,5	115	1926	501,5
Pz2015/6	890,17	917,5	457	1295	256,9
Pz2015/7	1120,67	1032,5	171	2280	720,9
Pz2015/8	1042,42	852	478	2258	575,2
Pz2015/9	389,86	114	73	1131	482,1
Pz2015/11	865,75	809,5	315	1553	326,0
Pz2015/12	2275,33	2692	631	3355	1037
Pz2015/13	2531,20	2471	1743	3374	649,6
Percolato	215,56	119,00	75,00	659,00	189,18

Da Tabella 4.1.1. emergono, per tutti i piezometri, concentrazioni di solfati mediamente superiori alla CSC, per circa un ordine di grandezza, con i valori maggiori per i piezometri esterni prossimi al Rio Rondinella, ed i valori minori per i piezometri in area catino. Per il percolato si osservano concentrazioni di solfati inferiori rispetto alle acque sotterranee campionate, con valori prossimi alla CSC, ed oscillazioni più contenute attorno al valore medio.

In Tabella 4.1.2 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di solfati per i piezometri di monitoraggio; per il dettaglio delle elaborazioni si rimanda all'Allegato 3 della relazione

Tabella 4.1.2. Test M-K – parametro solfati

	Trend Solfati
Pz2015/5	Trend in aumento
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo
Pz2015/12	Nessun trend significativo
Pz2015/13	-

Dalla tabella 4.1.2. emerge un trend di concentrazioni di solfati in aumento per il piezometro Pz2015/5, per il quale, contestualmente, si evidenziano concentrazioni in diminuzione per il parametro marker nichel.

Nel piezometro Pz2015/5 si osservano condizioni ossidanti nella quasi totalità delle rilevazioni, con variazioni importanti nel tempo del livello di falda, non sempre spiegate dalle condizioni meteo precedenti i campionamenti, che determinano variazioni nel tempo delle concentrazioni in acqua delle sostanze tipiche derivanti dall'interazione tra acque e argille azzurre, come già illustrato nelle precedenti relazioni (Arpae, 2017a). Il piezometro filtra le unità B e C, mentre l'unità A rimaneggiata è presente in superficie per soli 50 cm, determinando pertanto un ritardo all'infiltrazione delle



acque meteoriche nel piezometro che causa i conseguenti fenomeni di diluizione della soluzione concentrata in equilibrio con la matrice solida. Il trend dei solfati in aumento è determinato infatti dagli ultimi 2 campionamenti, in particolare quello del novembre 2019 in concomitanza ad un livello delle acque molto basso nel piezometro seppure a seguito di abbondanti precipitazioni e ciò potrebbe essere determinato dalla minore acqua di circolazione nell'unità A in corrispondenza della strada, a seguito dei lavori di bonifica che hanno aumentato l'impermeabilizzazione con argilla della zona catino e le opere di sistemazione della canale sud che hanno aumentato la capacità di raccolta e drenaggio delle acque meteoriche.

4.2. Manganese

In Tabella 4.2.1. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di manganese, e la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri, nei monitoraggi dal novembre 2015 al giugno 2020. Si evidenziano in grassetto i dati superiori alla CSC, per il manganese pari a 50 µg/L.

Tabella 4.2.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro manganese

	Manganese (µg/L) – CSC: 50 µg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	50,33	43	24	98	25,18
Pz2015/2	2,5	2,5	2,5	2,5	0
Pz2015/3	37,67	30	7	76	35,13
Pz2015/4	18,38	7	2,5	53	23,34
Pz2015/5	66,33	60	10	149	39,74
Pz2015/6	1745,00	1616	764	2847	779,6
Pz2015/7	651,00	360	9	1913	732,7
Pz2015/8	376,92	332	64	926	256,2
Pz2015/9	92,57	80	14	255	81,81
Pz2015/11	403,33	314	62	1065	265,4
Pz2015/12	688,25	556,5	195	1995	491,6
Pz2015/13	558,40	446	128	939	345,5
Percolato	278,00	253	169	443	98,68

Dalla tabella emergono concentrazioni di manganese mediamente inferiori alla CSC per i piezometri dell'area catino, e valori superiori alla CSC, fino a un ordine di grandezza nei piezometri al di fuori dell'area catino, sia quelli interni alla discarica che quelli esterni.

La concentrazione di manganese nel percolato è mediamente inferiore a quella registrata sulle acque sotterranee.

In Tabella 4.2.2 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di manganese; per il dettaglio delle elaborazioni si rimanda all'Allegato 3 della relazione.

Tabella 4.2.2. Test M-K – parametro manganese

	Trend Manganese
Pz2015/5	Nessun trend significativo
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo
Pz2015/12	Nessun trend significativo
Pz2015/13	-



Da tabella 4.2.2. non emerge alcuna una tendenza significativa nelle concentrazioni di manganese, per nessuno dei piezometri analizzati.

4.3. Boro

In Tabella 4.3.1. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di boro, e la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri, nei monitoraggi dal novembre 2015 al giugno 2020. Si evidenziano in grassetto i dati superiori alla CSC, per il boro pari a 1000 µg/L.

Tabella 4.3.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro boro

	Boro (µg/L) – CSC: 1000 µg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	1590	1422	1137	2200	411,89
Pz2015/2	371	331,5	291	578	105,92
Pz2015/3	2235,33	2219	1887	2600	356,78
Pz2015/4	1514,25	1299	1186	1900	330,54
Pz2015/5	2535,75	2398	907	4156	1005
Pz2015/6	1047,25	945,5	713	2248	390,3
Pz2015/7	1511,75	1204,5	757	3164	734,0
Pz2015/8	1866,25	1614,5	840	3601	828,3
Pz2015/9	868,14	443	293	2328	799,2
Pz2015/11	2132,58	1981,5	856	5033	1179
Pz2015/12	1637,92	1582	838	2844	687,9
Pz2015/13	2706,00	2836	2009	3698	710,6
Percolato	12058,00	9862,5	6011	27444	7068

Dai dati di monitoraggio si evidenzia come il percolato presenti concentrazioni in boro elevate, costantemente superiori alla CSC per circa un ordine di grandezza, seppure non risulti essere un marker di contaminazione secondo la metodologia applicata nei paragrafi precedenti di questa relazione. Il boro è presente anche nelle acque sotterranee con concentrazioni mediamente superiori alla CSC, dello stesso ordine di grandezza della CSC, ad eccezione dei piezometri Pz2015/2 e Pz2015/9, che mostrano concentrazioni inferiori.

In Tabella 4.3.2 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di boro; per il dettaglio delle elaborazioni si rimanda all'Allegato 3 della relazione.

Tabella 4.3.2. Test M-K – parametro boro

	Trend Boro
Pz2015/5	Nessun trend significativo
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo
Pz2015/12	-
Pz2015/13	Nessun trend significativo

Da tabella 4.3.2. non emerge alcuna una tendenza significativa nelle concentrazioni di boro per nessuno dei piezometri analizzati.

L'origine della presenza di boro nelle acque sotterranee è stata studiata nel marzo 2016 attraverso l'analisi isotopica del boro nelle acque (Arpae, 2017a), al fine di caratterizzare il δ11B, per il percolato e per alcuni piezometri aventi le maggiori concentrazioni di boro (Pz2015/4-5-12) in



soluzione, scelti anche tenendo conto del modello concettuale del sito. Da tale indagine sono emersi, per le acque sotterranee, valori di $\delta^{11}\text{B}$ compresi tra 11.93‰ e 30.43‰, in aumento allontanandosi dall'area rimaneggiata del catino. Si registra il valore minimo di $\delta^{11}\text{B}$ per il percolato, pari a 8.96‰, a fronte delle maggiori concentrazioni di boro in soluzione: gli esiti dell'indagine sul $\delta^{11}\text{B}$ vengono riassunti in forma grafica in Figura 4.3.1.

Attraverso la relazione tra $\delta^{11}\text{B}$ ed il rapporto B/Cl, riportata graficamente in Figura 4.3.2., è stato possibile il confronto con dati di letteratura, che hanno evidenziato come il percolato rientrasse all'interno del campo di esistenza dei liquami, così come Pz2015/4 in zona catino, soggetto a passata contaminazione. Le altre acque sotterranee analizzate (Pz2015/5 e Pz2015/12) evidenziavano rapporti isotopici esterni e ben distinti dal campo di esistenza dei liquami, presentando un rapporto isotopico confrontabile con campioni di acque presenti in bibliografia, della medesima facies geochimica presenti in zone limitrofe all'area di studio, e risultavano avere una composizione isotopica intermedia rispetto alla composizione media dell'acqua di mare.

Per maggiori dettagli si rimanda pertanto alla nostra precedente relazione (Arpae, 2017a).

Figura 4.3.1. Valori determinazioni isotopiche di $\delta^{11}\text{B}$ (‰) nelle acque sotterranee e percolato in marzo 2016.

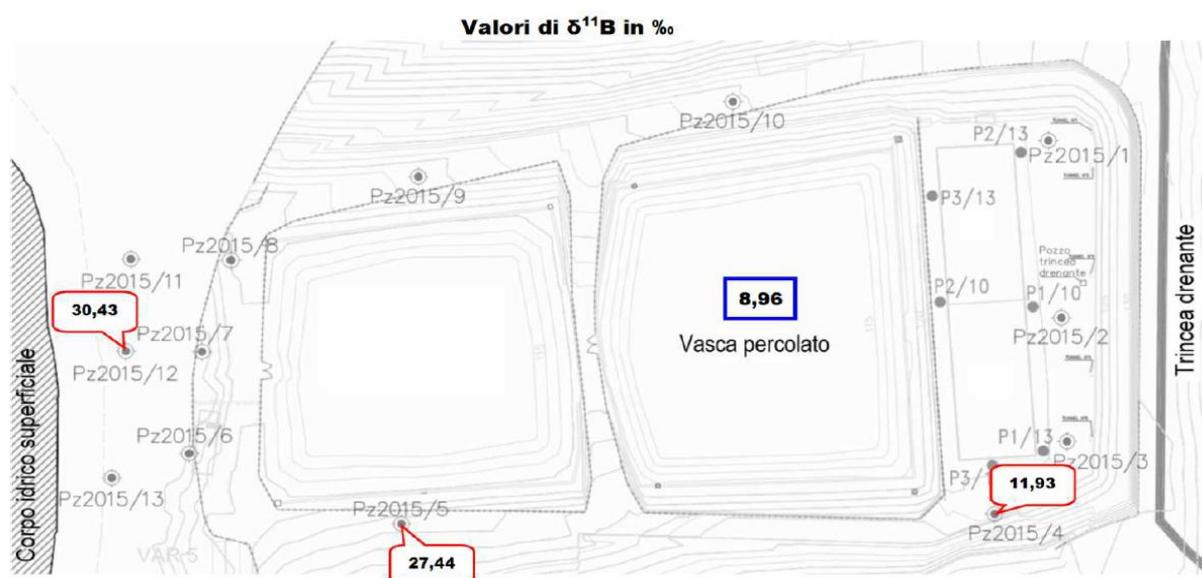
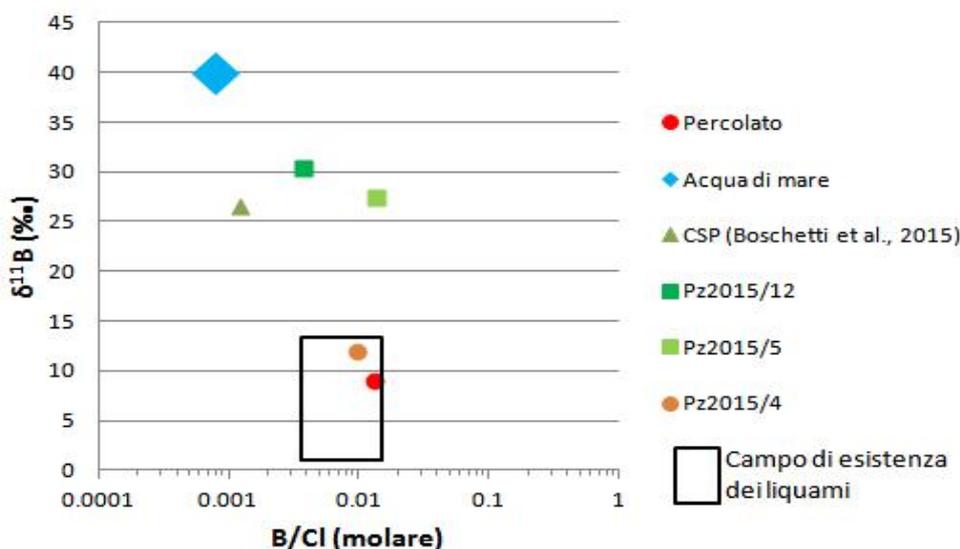


Figura 4.3.2. Rapporto B/Cl vs $\delta^{11}\text{B}$ nelle acque sotterranee, nel percolato e in dati bibliografici



4.4. Ferro

Dall'analisi preliminare dei dati di monitoraggio si osserva un significativo aumento delle concentrazioni di ferro nelle acque sotterranee a partire dal novembre 2017, un aumento di circa uno/due ordini di grandezza, registrato diffusamente in tutti i piezometri di monitoraggio.

Per questa ragione, al fine di elaborare dataset omogenei, le valutazioni sono state effettuate per i due periodi omogenei: dal 25/11/2015 al 18/04/2017 e dal 21/11/2017 al 08/06/2020.

In Tabella 4.4.1. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di ferro, e la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri, nei monitoraggi dal 25/11/2015 al 18/04/2017 e dal 21/11/2017 al 08/06/2020. Si evidenziano in grassetto i dati superiori alla CSC, per il ferro, pari a 200 µg/L.

Tabella 4.4.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri – parametro ferro

	Ferro (µg/L) – CSC 200 µg/L									
	dal 25/11/2015 al 18/04/2017					dal 21/11/2017 al 08/06/2020				
	media	mediana	min	max	dev st	media	mediana	min	max	dev st
PZ2015/1	7,17	6	2,5	18	5,73	dism*	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/2	24,00	25	6	46	13,84	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/3	10,33	9	5	17	6,11	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/4	14,75	10	6	33	12,55	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/5	7,50	2,5	2,5	20	7,91	314,33	28,5	8	1752	704,61
PZ2015/6	8,50	2,5	2,5	32	11,80	505,17	272	180	1477	509,10
PZ2015/7	28,17	19	7	78	26,30	4182,83	4640,5	33	9140	3646,81
PZ2015/8	7,83	7,5	2,5	19	6,04	3602,33	1861	7	9339	4183,65
PZ2015/9	2,50	2,5	2,5	2,5	0,00	61,40	18	10	231	95,25
Pz2015/11	13,17	10	6	34	10,44	911,33	906,5	104	1857	568,03
Pz2015/12	77,67	12	6	412	163,83	6375,67	2309,5	49	21877	8682,03
Pz2015/13	6,00	6	5	7	1,41	458,33	452	385	538	76,70

*dism: piezometro dismesso

L'analisi delle concentrazioni medie e mediane di ferro nelle acque sotterranee confermano la distinzione dei due dataset: mentre prima del 21/11/2017 non si osservano superamenti delle CSC, se non un dato isolato in Pz2015/12, nel periodo successivo le concentrazioni superano le CSC per tutti i piezometri, sia interni che esterni, con un aumento di uno/due ordini di grandezza rispetto al periodo precedente.

Per il percolato si confermano valori di ferro costantemente superiori alla CSC, per circa un ordine di grandezza, seppure non sia stato individuato come marker di contaminazione in base alla metodologia applicata. Come già riportato, si registra un dato di concentrazione anomalo, significativamente distante dal resto del dataset, per circa un ordine di grandezza, in data 18/4/2017 (potenziale outlier), pari a 59'270 µg/L; nella stessa data, il campionamento di percolato presso il Depuratore Santerno registrava invece una concentrazione di ferro significativamente inferiore, pari a 7523 µg/L.

In Tabella 4.4.2. si riportano per il percolato le concentrazioni medie, mediane, minime, massime e la relativa deviazione standard; nelle elaborazioni, è stato rispettivamente inclusa ed esclusa la rilevazione del 18/4/2017.

Tabella 4.4.2. Valori di concentrazione media, mediana, min e max nel percolato – parametro ferro

	Ferro (µg/L) nel percolato	
	dataset grezzo	dataset senza dato anomalo
media	11537,56	5571,00
mediana	6126,00	5675,50
min	3520	3520
max	59270	8432
dev. st	17995,12	1978,82

Da Tabella 4.4.2 risulta evidente l'anomalia del dato del 18/4/2017, che influenza in maniera significativa il valore medio e la deviazione standard, interessando invece solo marginalmente il valore mediano.

In Tabella 4.4.3 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di ferro nei piezometri; per il dettaglio delle elaborazioni si rimanda all'Allegato 3 della relazione.

Tabella 4.4.3. Test M-K – parametro ferro

	Trend Ferro	
	dal 25/11/2015 al 18/04/2017	dal 21/11/2017 al 08/06/2020
Pz2015/5	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/6	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/12	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/13	-	-

Dalla Tabella 4.4.3. non emerge alcuna una tendenza significativa delle concentrazioni di ferro nei due periodi considerati, per nessuno dei piezometri analizzati.

I dati di monitoraggio nel periodo fino al 18/04/2017 (prima di iniziare le attività di bonifica), hanno mostrato concentrazioni di ferro inferiori alla CSC per i pozzi spia e tutti i piezometri dell'area catino (Pz2015/1-4), a fronte di altri segnali di contaminazione da percolato rilevati, quali superamenti per le CSC di nichel, cromo e fenoli, e per i quali è stato effettuato l'intervento di bonifica.

Si osservano concentrazioni di ferro conformi alla CSC anche per i piezometri di monitoraggio, fino al 18/04/2017; successivamente, dal 21/11/2017, invece, si registra un aumento diffuso nelle concentrazioni di ferro, per uno/due ordini di grandezza, con superamento delle CSC per tutti i piezometri di monitoraggio.

L'aumento delle concentrazioni di ferro nelle acque sotterranee avviene contestualmente alle operazioni di rimozione delle vasche V1-V2, ed in particolare ai lavori preliminari la rimozione, consistenti nella realizzazione del diaframma strutturale in c.a., di spessore 1 m, sviluppo 93 m, e profondità da 9 a 19 m, adattata all'andamento dell'unità rimaneggiata in posto.

Tale opera, realizzata prevalentemente in stagione asciutta e comunque in condizioni di cantiere tali da evitare ristagni di acqua meteorica negli scavi effettuati, può avere esercitato una significativa modifica dei campi di tensione nelle argille a valle dell'opera, tale da favorire un naturale rilascio di acque interstiziali. Questo fenomeno, che non si esaurisce in poco tempo, si ritiene possa favorire la mobilità del ferro nelle acque sotterranee, attraverso il rilascio di acque interstiziali dove è presente naturalmente. La prosecuzione del monitoraggio consentirà di verificare l'evoluzione del fenomeno, anche in considerazione dell'elevata inerzia che caratterizza questi fenomeni.

Si precisa comunque che la presenza di ferro nelle acque sotterranee non risulta legata al percolato, in quanto il ferro presenta un coefficiente di ripartizione solido/liquido di 880 L/kg (IAEA,





2010), ovvero è caratterizzato da mobilità in acqua assimilabile al nichel, il marker individuato con il maggiore fattore di ritardo, e per il quale non si evidenziano trend in aumento per nessun piezometro, così come per gli altri marker (azoto ammoniacale e potassio) che presentano maggiori velocità di filtrazione.

4.5. Nitriti

In Tabella 4.5.1. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di nitriti, nonché la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri di monitoraggio, da novembre 2015 a giugno 2020. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per i nitriti pari a 500 µg/L.

Tabella 4.5.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – nitriti

	Nitriti (µg/L) – CSC: 500 µg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	2640,5	2523,5	312	5480	1938,32
Pz2015/2	482,83	15	15	1970	804,33
Pz2015/3	13820	18144	3284	20032	9173,15
Pz2015/4	3349	3390	1008	4762	1659,85
Pz2015/5	624,58	450	15	1640	561,3
Pz2015/6	70,17	20	15	493	137,8
Pz2015/7	68,33	47	15	328	87,29
Pz2015/8	103,83	89	15	263	82,11
Pz2015/9	1867,29	840	107	5714	2042
Pz2015/11	482,92	69	15	2510	911,2
Pz2015/12	121,83	75	15	406	107,6
Pz2015/13	142,40	53	44	335	133,2
Percolato	950,56	15	10	8320	2763,67

Il monitoraggio mostra concentrazioni di nitriti mediamente superiori alla CSC, per circa un ordine di grandezza per i piezometri dell'area catino, con le maggiori concentrazioni registrate in Pz2015/3, dove la concentrazione media è superiore alla CSC per due ordini di grandezza.

Concentrazioni superiori alla CSC, di pari ordine di grandezza della CSC, si registrano nei piezometri interni alla discarica, al di fuori dell'area catino. Concentrazioni ancora inferiori, mediamente conformi alla CSC, si osservano per i piezometri esterni alla discarica.

Il monitoraggio del percolato mostra concentrazioni di nitriti inferiori al limite di quantificazione della metodica per tutte le rilevazioni, con eccezione della campagna del 18/03/19, che registra nel percolato una concentrazione di nitriti pari a 8320 µg/L, condizione non ripetuta ed assimilabile ad un dato estremo (outlier); in proposito, anche la letteratura conferma che nel percolato il contenuto di azoto organico sia preferenzialmente, per la prevalenza di condizioni anaerobiche, nella forma di azoto ammoniacale e ammoniaca libera.

In Tabella 4.5.2 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di nitriti; per il dettaglio delle elaborazioni si rimanda all'Allegato 3.

Tabella 4.5.2. Test M-K – parametro nitriti

	Trend Nitriti
Pz2015/5	Nessun trend significativo
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	-
Pz2015/11	Nessun trend significativo
Pz2015/12	Nessun trend significativo
Pz2015/13	-



Dalla Tabella 4.5.2. non emerge alcuna una tendenza significativa nelle concentrazioni di nitriti, per nessuno dei piezometri analizzati.

Le maggiori concentrazioni di nitriti rilevate nelle acque sotterranee sono state ricondotte all'anomalia individuata sulle acque di drenaggio superficiale della discarica (c.d. "Canala Sud"), rispetto le quali, dal maggio 2018, viene posta in atto l'intercettazione ed il convogliamento alla vasca del percolato V4, intervento ad oggi risultato efficace ai fini della tutela della qualità idrica del Rio Rondinella. Per maggiori dettagli si rimanda a specifica relazione (Arpae, 2020).

4.6. Metalli: Nichel e Arsenico

Nelle Tabelle 4.6.1. e 4.6.2. si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione, rispettivamente di nichel e arsenico, nonché la relativa deviazione standard, rilevati sul percolato e sui piezometri di monitoraggio, da novembre 2015 a giugno 2020. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, rispettivamente per il nichel pari a 20 µg/L, e per l'arsenico pari a 10 µg/L.

Tabella 4.6.1. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro nichel

	Nichel (µg/L) – CSC: 20 µg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	14,5	14,5	11	19	3,56
Pz2015/2	910,17	931	568	1104	191,41
Pz2015/3	143,33	70	49	311	145,58
Pz2015/4	11,25	10	10	14	1,89
Pz2015/5	4,79	5	2,5	9	2,311
Pz2015/6	8,21	8	2,5	17	3,763
Pz2015/7	17,50	7	2,5	66	19,62
Pz2015/8	9,63	7	2,5	27	6,833
Pz2015/9	5,86	2,5	2,5	13	4,432
Pz2015/11	12,75	13	6	19	4,202
Pz2015/12	23,17	27	8	37	10,35
Pz2015/13	7,30	2,5	2,5	15	6,582
Percolato	372,38	283	219	770	184,7

Tabella 4.6.2. Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro arsenico

	Arsenico (µg/L) – CSC: 10 µg/L				
	media	mediana	min	max	dev standard
PZ2015/1	11,33	10,5	8	16	3,08
PZ2015/2	102,33	103	72	143	28,10
PZ2015/3	27,33	16	12	54	23,18
PZ2015/4	16,63	2,5	2,5	28	11,61
PZ2015/5	2,5	2,5	2,5	2,5	0,00
PZ2015/6	2,5	2,5	2,5	2,5	0,00
PZ2015/7	9,21	7	2,5	24	7,58
PZ2015/8	6,04	2,5	2,5	24	7,57
PZ2015/9	2,86	2,5	2,5	5	0,94
Pz2015/11	3,33	2,5	2,5	9	2,05
Pz2015/12	3,25	2,5	2,5	8	1,80
Pz2015/13	2,5	2,5	2,5	2,5	0,00
Percolato	196	154	89	410	97,12

Dalla Tabella 4.6.1. emerge una significativa concentrazione di nichel nel percolato, considerato tra i marker di contaminazione, superiore per almeno un ordine di grandezza rispetto alla CSC delle acque sotterranee in tutte le rilevazioni; concentrazioni di nichel comparabili a quelle del percolato si registrano sui piezometri dell'area catino.

Per i piezometri interni alla discarica, al di fuori dell'area catino, si osservano concentrazioni inferiori, dove i superamenti registrati risultano prossimi alla CSC; stesse considerazioni anche per



i piezometri esterni, dove si registra un superamento in Pz2015/12, con concentrazioni sempre prossime alla CSC.

Il test di M-K effettuato sulle concentrazioni di nichel, per il quale si rimanda nel dettaglio in Allegato 2, non ha evidenziato per nessun piezometro di monitoraggio trend in crescita, ovvero non emerge alcuna tendenza al peggioramento delle caratteristiche delle acque sotterranee.

Da Tabella 4.6.2. si osservano significative concentrazioni di arsenico nel percolato, superiori per circa un ordine di grandezza alla CSC delle acque sotterranee; valori superiori alla CSC si registrano anche per i piezometri dell'area catino (Pz2015/1-4), dove per Pz2015/2 si rilevano peraltro concentrazioni di arsenico assimilabili a quelle del percolato.

Per gli altri piezometri di monitoraggio si osservano concentrazioni mediamente inferiori alla CSC, con valori frequentemente inferiori al limite di quantificazione della metodica, come si evince dai valori mediani. Come già riportato, causa il numero troppo elevato di rilevazioni inferiore al limite di quantificazione della metodica, per l'arsenico non è possibile applicare il test statistico.



5. Facies idrochimica delle acque sotterranee

5.1. Ricostruzione delle facies idrochimiche

Le caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee sono influenzate da diversi fattori, tra cui:

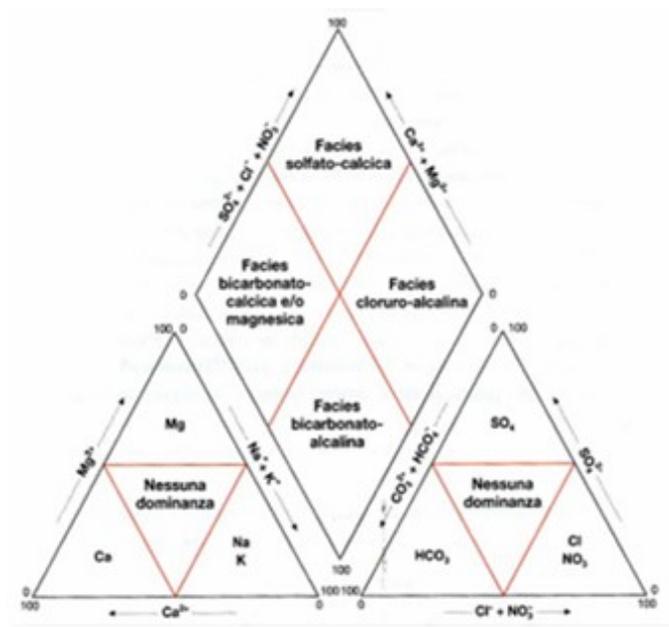
- composizione della roccia-serbatoio;
- interazione acqua-roccia;
- condizioni idrodinamiche esistenti nell'acquifero;
- tempi di residenza nel sottosuolo;
- condizioni di temperatura e pressione in acquifero;
- fenomeni di mescolamento tra acque a differente chimismo.

La determinazione analitica dei cationi e anioni nei campioni di acque consente di determinare, sulla base della coppia catione-anione predominante, la "facies idrochimica" dell'acqua, intesa come la famiglia geochimica di appartenenza dell'acqua.

L'identificazione della facies idrochimica del campione d'acqua permette di ricavare importanti informazioni relativamente ai meccanismi di circolazione sotterranea e sull'idrodinamica degli acquiferi. La maggior parte degli ioni è presente in acqua a seguito della dissoluzione di sali e di fenomeni di scambio ionico da parte di minerali argillosi presenti nel terreno; per queste motivazioni, campioni di acqua di falda prelevati dallo stesso bacino idrogeologico sono caratterizzati, in genere, dalla stessa facies idrochimica.

La facies chimica identificativa viene attribuita sulla base dell'anione predominante che funge da "sostantivo", cui si aggiunge un "aggettivo" che indica il tipo di catione dominante. Esistono 4 facies chimiche principali (Civita, 2005), come riportato in Figura 5.1.1: bicarbonato-calcica, solfato-calcica, cloruro-alcaina e bicarbonato-alcaina.

Figura 5.1.1 Esempio di diagramma di Piper (da Civita, 2005)



Il diagramma di Piper, schematizzato in Figura 5.1.1, esprime ciascuna concentrazione come percentuale del contributo totale di ioni presenti in soluzione e permette di riassumere i risultati relativi ai maggiori ioni in soluzione per i campioni raccolti, attraverso un rombo al disotto del quale vi sono due triangoli equilateri, uno rappresentativo dei cationi e uno degli anioni.

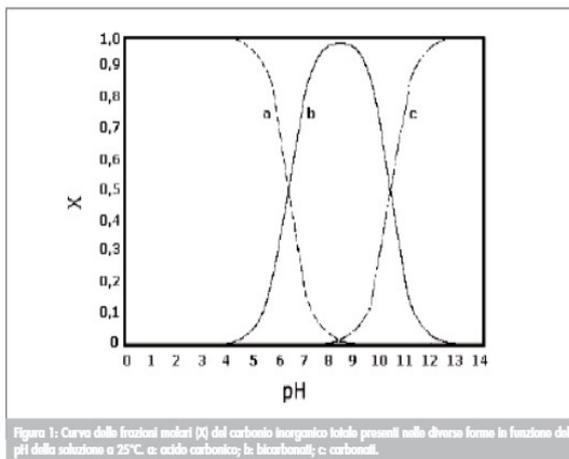
I punti rappresentativi dell'analisi sono localizzati all'interno del diagramma, sia nella losanga che nei triangoli equilateri, tenendo conto che ogni lato è suddiviso in 100 parti: l'osservazione contestuale della localizzazione di un punto di analisi consente la caratterizzazione dell'acqua campionata, al fine di distinguere la presenza di più sorgenti e valutare gli effetti del loro mescolamento.

Per completezza di informazione, si precisa che l'alcalinità determinata nei campioni di acqua, secondo metodo potenziometrico, esprime il complesso di carbonati e bicarbonati.



La ripartizione tra ione carbonato e bicarbonato, ai fini dell'elaborazione dei diagrammi di Piper, è stata calcolata considerando la distribuzione delle varie specie, in funzione del pH rilevato nell'acqua sotterranea, come da funzione rappresentata in Figura 5.1.2; per acque sotterranee con pH intorno alla neutralità, fino a 8-8,5, la concentrazione di carbonati è trascurabile rispetto a quella dei bicarbonati, che quindi contribuiscono totalmente all'alcalinità dell'acqua.

Figura 5.1.2 Equilibrio di carbonati e bicarbonati in acqua in funzione del pH (da APAT, 2003)



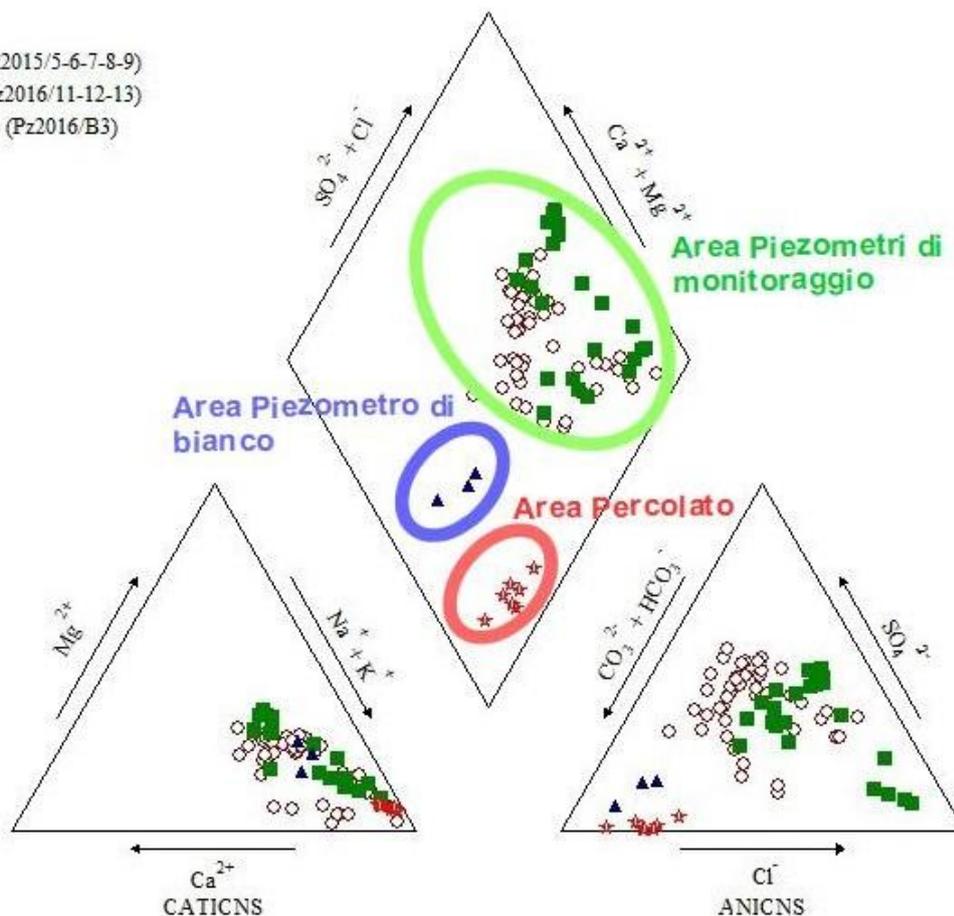
In Figura 5.1.3 si riporta il diagramma di Piper inerente i monitoraggi dal marzo 2016 al giugno 2020, elaborato con software GW_chart (USGS, versione 1.29).

Figura 5.1.3 Diagramma di Piper monitoraggi 2016-2020

Discarica Tre Monti di Imola (BO) - Monitoraggio 2016/2020

EXPLANATION

- Piezometri interni (Pz2015/5-6-7-8-9)
- Piezometri esterni (Pz2016/11-12-13)
- ▲ Piezometro di bianco (Pz2016/B3)
- ★ Percolato





Da Figura 5.1.3. emerge che le caratteristiche del percolato risultano, in tutti i monitoraggi, ben distinte da quelle delle acque sotterranee, confermando la *facies bicarbonato-alkalina*, con predominanza di sodio e potassio per i cationi, e bicarbonato per gli anioni.

Il piezometro di bianco Pz2015/B3, con attribuzione della *facies bicarbonato-alkalina*, mostra una distribuzione degli anioni distinta da quella del percolato seppure nella medesima facies idrochimica del percolato, ovvero predominanza di cloruri rispetto ai solfati, ed una distribuzione dei cationi simile a quella dei piezometri prossimi al Rio Rondinella. Tale piezometro ha pertanto caratteristiche idrogeologiche distinte dagli altri piezometri di monitoraggio, rispetto ai quali risulta peraltro spazialmente molto distante e nonché in zona a quota topografica maggiore; si ipotizza quindi un diverso meccanismo di ricarica dello stesso, ad opera esclusiva di infiltrazione dell'acqua meteorica, nella porzione di unità rimaneggiata che finisce poco sopra l'inizio dei filtri del piezometro di monitoraggio. L'acqua che percola all'interno del piezometro in tempi brevi viene adsorbita dalle unità argillose B e C sottostanti. Tale meccanismo chiarisce anche l'assenza di acqua nella maggior parte delle rilevazioni.

Alle acque sotterranee dei piezometri di monitoraggio, al di fuori dell'area catino, si attribuisce la *facies cloruro-solfato-alkalina*, con predominanza di sodio e potassio nei cationi; si osserva una modesta variabilità nel contenuto di anioni e cationi, compatibile con gli effetti indotti dalle variazioni stagionali determinate dal diverso regime pluviometrico.



6. Caratterizzazione isotopica

A partire dal febbraio 2016, alle analisi chimiche, per i campioni disponibili di acque sotterranee, acque superficiali e di percolato, è stato affiancato il monitoraggio isotopico dell'ossigeno (^{18}O e ^{16}O) e dell'idrogeno (^1H e ^2H - deuterio), con la finalità di confermare il potenziale percorso di migrazione delle acque sotterranee nell'area rimaneggiata vicino le vasche V1 e V2, nonché evidenziare eventuali interazioni antropiche con le acque sotterranee e superficiali.

Le aliquote dei campioni destinate alle indagini isotopiche, per determinazione analitica di $\delta^{18}\text{O}$ e δD , è avvenuta contestualmente a quella delle aliquote destinate all'analisi chimica, raccolte in contenitori in polietilene, con sottotappo di sicurezza e tappo a vite, di capacità massima 200 ml. Le determinazioni analitiche di $\delta^{18}\text{O}$ e δD sono state eseguite da Laboratorio Arpae mediante spettrometro di massa per misure di alta precisione delle abbondanze isotopiche relative di $\delta^{18}\text{O}$ e δD , con riferimento per entrambi allo standard V-SMOW $\pm 0,15\%$.

Al monitoraggio isotopico eseguito sulle acque sotterranee e superficiali è stato affiancato l'esito isotopico del percolato, che costituisce riferimento per l'individuazione dell' "impronta del percolato" da utilizzare come confronto sia per le acque sotterranee che superficiali.

Occorre ricordare che in discariche di rifiuti solidi urbani, il processo di metanogenesi, mediato da batteri, è causa di *arricchimento del deuterio* nel percolato: il percolato risulta generalmente caratterizzato da valori δD di circa -15% , in quanto, nel corso delle reazioni di metanogenesi, i microrganismi usano preferibilmente la molecola più leggera dell'idrogeno (^1H) per la produzione del metano (CH_4), comportando un conseguente arricchimento di deuterio nell'acqua residuale. Considerato che la discarica è un ambiente semichiuso, con infiltrazione e circolazione limitata di acqua, i valori del deuterio nel percolato tendono ad arricchirsi nel tempo, col procedere della metanogenesi; per tale arricchimento, il deuterio costituisce nella maggior parte dei casi un tracciante utile a determinare eventuali stati di contaminazione delle acque sotterranee e superficiali adiacenti e drenanti l'area di discarica.

In Tabella 6.1. e Figura 6.1. si riportano gli esiti delle campagne di monitoraggio isotopico effettuate dal 2016 al 2020 per i campioni di acque sotterranee e percolato, in termini di $\delta^{18}\text{O}$ e δD .

Nel grafico sono state riportate le rette che indicano la composizione media delle acque meteoriche a scala mondiale (MWL) e per il nord Italia (NIMWL); per il fenomeno di arricchimento in deuterio del percolato descritto precedentemente, ci si attende che in un grafico $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$, i valori tipici del percolato si posizionino in una zona significativamente più in alto rispetto le rette standard delle precipitazioni, che rappresentano acque con composizione isotopica naturale di ossigeno e deuterio. In altre parole, le acque campionate rappresentate da punti spostati verso la medesima direzione del punto rappresentativo del percolato, ovvero caratterizzate da maggiori valori di δD , indicano una potenziale "impronta" di contaminazione da percolato.

Tabella 7.1. Dati del monitoraggio isotopico di ossigeno e deuterio nelle acque sotterranee e percolato 2016-2020

Piezometri in area catino			
Data	Punto	$\delta^{18}\text{O}$	δD
15/02/16	P1/10	-7,32	-53,9
15/02/16	P3/10	-7,93	-52,8
15/02/16	P3/13	-7,7	-52,5
15/02/16	P2/10	-8,11	-54,2
15/02/16	P1/13	-8,31	-52,1
15/02/16	Pz2015/1	-6,85	-45,2
15/02/16	Pz2015/2	-5,76	-43,2
15/02/16	Pz2015/3	-7,08	-44,4
15/02/16	Pz2015/4	-8,33	-53,4
14/03/16	P1/10	-7,63	-49,9
14/03/16	P3/10	-8,16	-53,2
14/03/16	P3/13	-7,76	-50,1
14/03/16	P2/10	-8,43	-54,3
14/03/16	P1/13	-8,33	-57,3
14/03/16	Pz2015/1	-7,13	-48,9
14/03/16	Pz2015/2	-6,2	-47,1
14/03/16	Pz2015/3	-7,37	-47,6
14/03/16	Pz2015/4	-8,79	-59,7
03/08/16	Pz2015/1	-6,8	-44,7
03/08/16	Pz2015/2	-5,75	-41,2
18/04/17	PZ2015/1	-6,4	-37,7
18/04/17	PZ2015/2	-5,47	-38,4

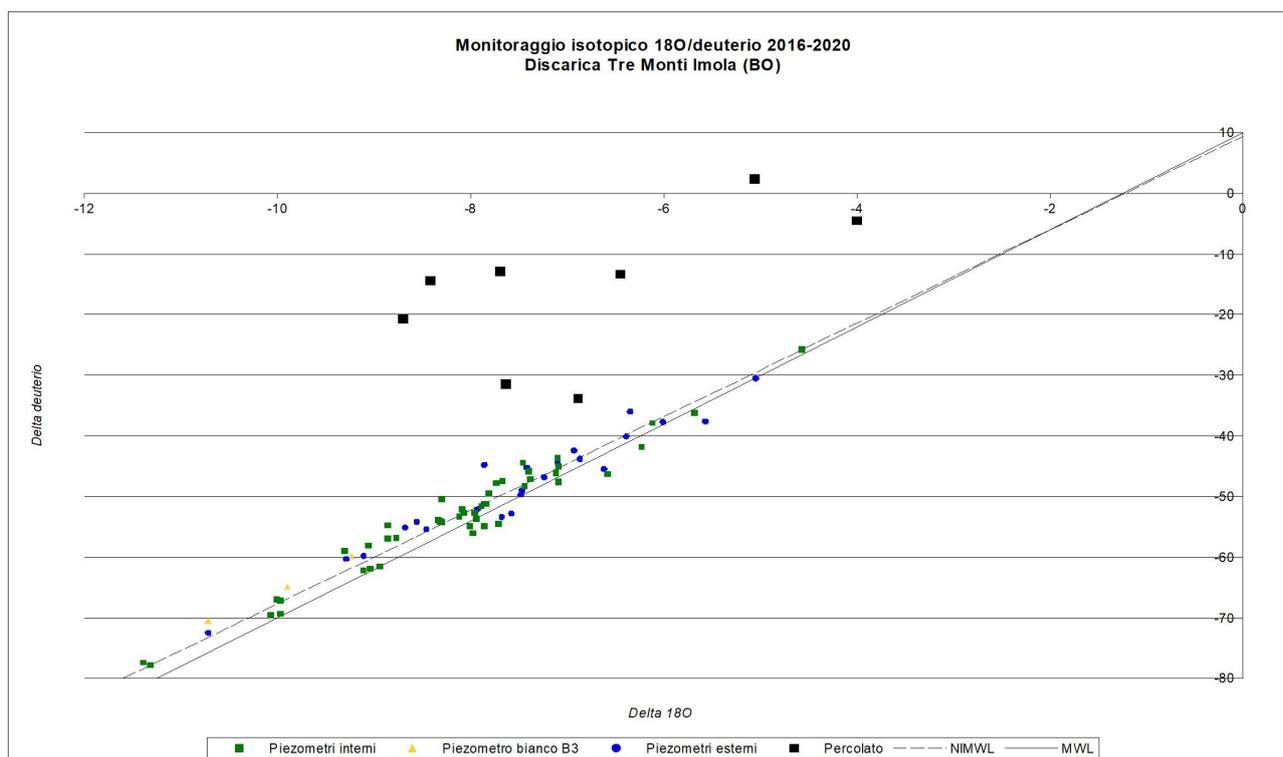
Piezometri esterni			
Data	Punto	$\delta^{18}\text{O}$	δD
15/02/16	Pz2015/11	-7,68	-53,4
15/02/16	Pz2015/12	-7,58	-52,8
15/02/16	Pz2015/13	-6,62	-45,5
14/03/16	Pz2015/11	-7,48	-49,7
14/03/16	Pz2015/12	-7,47	-49
14/03/16	Pz2015/13	-7,93	-52,1
03/08/16	Pz2015/11	-5,05	-30,5
03/08/16	Pz2015/12	-7,42	-45,2
18/04/17	PZ2015/11	-6,01	-37,7
18/04/17	PZ2015/12	-7,24	-46,8
21/11/2017	PZ2015/11	-9,11	-59,8
21/11/2017	PZ2015/12	-10,72	-72,5
08/05/18	PZ2015/11	-8,34	-53,9
08/05/18	PZ2015/12	-8,56	-54,2
06/11/18	Pz2015/11	-6,39	-40,1
06/11/18	Pz2015/12	-6,87	-43,8
06/11/18	Pz2015/13	-5,57	-37,6
07/05/19	PZ2015/11	-7,86	-51,2
07/05/19	PZ2015/12	-8,46	-55,4
07/05/19	PZ2015/13	-7,1	-44,4
21/11/19	PZ2015/11	-9,29	-60,3
21/11/19	PZ2015/12	-8,68	-55,1
08/06/20	PZ2015/11	-6,35	-36
08/06/20	PZ2015/12	-7,86	-44,8
08/06/20	PZ2015/13	-6,93	-42,4

Piezometro di bianco			
Data	Punto	$\delta^{18}\text{O}$	δD
21/11/2017	PZ2015/B3	-10,72	-70,5
07/05/19	PZ2015/B3	-9,9	-64,9
21/11/19	PZ2015/B3	-9,23	-59,8

Piezometri interni			
Data	Punto	$\delta^{18}\text{O}$	δD
15/02/16	Pz2015/5	-7,44	-48,3
15/02/16	Pz2015/6	-8,32	-54,1
15/02/16	Pz2015/7	-9,04	-61,9
15/02/16	Pz2015/8	-7,98	-56,1
15/02/16	Pz2015/9	-7,86	-54,9
14/03/16	Pz2015/5	-8,01	-54,9
14/03/16	Pz2015/6	-8,3	-54,2
14/03/16	Pz2015/7	-9,06	-58,1
14/03/16	Pz2015/8	-8,12	-53,3
14/03/16	Pz2015/9	-7,96	-52,7
03/08/16	Pz2015/5	-7,12	-46,1
03/08/16	Pz2015/6	-7,89	-51,6
03/08/16	Pz2015/7	-7,81	-49,5
03/08/16	Pz2015/8	-8,09	-52,1
18/04/17	PZ2015/5	-7,1	-43,7
18/04/17	PZ2015/6	-7,74	-47,8
18/04/17	PZ2015/7	-7,4	-45,8
18/04/17	PZ2015/8	-8,34	-53,8
21/11/2017	PZ2015/5	-8,94	-61,5
21/11/2017	PZ2015/6	-7,94	-53,7
21/11/2017	PZ2015/7	-10,01	-67
21/11/2017	PZ2015/8	-11,39	-77,4
21/11/2017	PZ2015/9	-11,32	-77,8
08/05/18	PZ2015/5	-7,09	-47,6
08/05/18	PZ2015/6	-7,84	-51,2
08/05/18	PZ2015/7	-9,97	-69,4
08/05/18	PZ2015/8	-10,07	-69,6
06/11/18	Pz2015/5	-6,58	-46,3
06/11/18	Pz2015/6	-7,71	-54,5
06/11/18	Pz2015/7	-5,68	-36,2
06/11/18	Pz2015/8	-9,11	-62,2
06/11/18	Pz2015/9	-4,57	-25,7
07/05/19	PZ2015/5	-7,38	-47,1
07/05/19	PZ2015/6	-8,07	-52,7
07/05/19	PZ2015/7	-8,77	-56,8
07/05/19	PZ2015/9	-6,23	-41,8
21/11/19	PZ2015/5	-7,09	-45
21/11/19	PZ2015/6	-8,86	-57
21/11/19	PZ2015/7	-9,97	-67,1
21/11/19	PZ2015/9	-7,46	-44,4
08/06/20	PZ2015/5	-7,67	-47,5
08/06/20	PZ2015/6	-8,3	-50,4
08/06/20	PZ2015/7	-8,86	-54,7
08/06/20	PZ2015/8	-9,31	-59
08/06/20	PZ2015/9	-6,12	-37,9

Percolato		
Data	$\delta^{18}\text{O}$	δD
15/02/16	-6,45	-13,3
14/03/16	-7,64	-31,4
03/08/16	-4	-4,5
18/04/17	-5,06	2,4
08/05/18	-6,89	-33,8
06/11/18	-7,69	-12,8
18/03/19	-8,7	-20,7
08/06/20	-8,42	-14,4

Figura 7.1. Monitoraggio isotopico ossigeno e deuterio nelle acque sotterranee e percolato, anni 2016-2020



I dati dei monitoraggi isotopici delle acque sotterranee indicano una buona aderenza alla composizione isotopica delle acque meteoriche, per tutto il periodo di indagine, escludendo situazioni di composizione isotopica intermedia tra quella del percolato e quella delle acque meteoriche, ovvero non si riscontra l' "impronta isotopica" del percolato nei campioni di acque sotterranee ad oggi rilevati.

La distribuzione dei rapporti isotopici ossigeno-deuterio secondo le rette globali di precipitazione meteorica indica inoltre che le acque sotterranee campionate sono di prevalente origine meteorica di infiltrazione diretta dalla superficie, escludendo pertanto che vi siano acque sotterranee di origine più profonda.

Le indagini condotte sul sito dal 2016 mostrano per il percolato elevati valori di deuterio, distanti da entrambe le rette standard delle acque meteoriche, permettendo una netta differenziazione di composizione isotopica tra il percolato e le acque sotterranee.

La caratterizzazione isotopica delle acque sotterranee si conferma significativamente differenziata da quella del percolato, pur nella variabilità indotta dai diversi regimi stagionali, escludendo fenomeni di contaminazione da percolato sulle acque sotterranee.



Conclusioni

La presente relazione riporta gli esiti delle indagini e degli approfondimenti tecnici effettuati da Arpae dal novembre 2015 al giugno 2020 relativi alle acque sotterranee sottostanti l'area delle vasche di stoccaggio percolato della discarica Tre Monti, in Comune di Imola (BO), a seguito della Diffida P.G. n°130084 del 9/11/2015 emanata dalla Città Metropolitana di Bologna, ai sensi dell'art. 244, comma 2, D.Lgs. n° 152/2006 (notifica di sito potenzialmente contaminato).

Il progetto iniziale della discarica prevedeva lo stoccaggio del percolato prodotto dalla discarica in quattro vasche aperte (V1-V2-V3-V4), la cui installazione ha comportato il rimaneggiamento del suolo, ovvero il riporto di materiali permeabili, quali sabbie e sabbie ghiaiose, di spessore non trascurabile, fino ad 8 m nell'intorno delle vasche, determinando condizioni idrogeologiche e di permeabilità del suolo diverse dalle restanti aree in cui sorgono i corpi di discarica e relativi servizi. Il rimaneggiamento favorisce infatti i processi di infiltrazione di acque meteoriche nel sottosuolo, con formazione di lenti effimere di acque sotterranee ed eventuale generazione di lento deflusso superficiale verso le zone di valle.

La restante area dove sorge il corpo di discarica è costituita quasi esclusivamente da terreni appartenenti alla formazione delle argille e marne siltose di colore grigio azzurro, a bassissima permeabilità, con grado di sovraconsolidazione elevato nelle unità più profonde, tale da non permettere l'esistenza di falde acquifere in queste ultime.

All'intorno delle vasche V1-V2 erano stati realizzati dal gestore alcuni piezometri a presidio del monitoraggio della tenuta idraulica delle vasche stesse (c.d. "pozzi spia"); nell'ambito dell'attività di vigilanza sulla discarica svolta dal Servizio Territoriale di Arpa (oggi Arpae), in data 12/10/2015, a seguito di prelevamento di acque sotterranee dai suddetti pozzi spia, sono stati riscontrati dei superamenti delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) fissate dal D. Lgs. n. 152/06 e ss.mm.ii. (Tabella 2, Allegato 5 alla Parte IV) per alcuni parametri (*nitriti, solfati, nichel, arsenico, cromo esavalente*). In data 16/10/2015, Herambiente comunicava la presenza di due discontinuità nell'impermeabilizzazione in HDPE della vasca V1, che avevano permesso il contatto tra il percolato e le pareti in c.a. della vasca stessa.

A seguito di tali evidenze analitiche e della notifica da parte di Arpa di potenziale sito contaminato, la Città Metropolitana di Bologna ha emanato l'atto di Diffida P.G. n°130084 del 9/11/2015, ai sensi dell'art. 244, comma 2, D.Lgs. n° 152/2006 e s.m.i. che imponeva ad Herambiente di effettuare una serie di approfondimenti, sia sulle acque sotterranee che sul suolo, al fine di accertare eventuale presenza di contaminazione, derivante da un trafileamento di percolato dalle vasche V1-V2.

Lo studio ha previsto la realizzazione di 16 punti di campionamento, successivamente attrezzati a piezometro, dai quali sono stati prelevati sia campioni di suolo, sia campioni di acque sotterranee. I punti di campionamento risultano ubicati come segue: 10 distribuiti lungo il perimetro delle vasche di stoccaggio, 3 ubicati all'esterno del perimetro della discarica in adiacenza al Rio Rondinella, e 3 ubicati all'interno del perimetro della discarica, in una vallecchia non interessata dalla gestione dei rifiuti, con la funzione di punti di "bianco".

In particolare i 10 piezometri localizzati nell'intorno delle vasche V1 e V2, sono stati realizzati all'interno dell'area rimaneggiata, confinata a monte dall'argine di contenimento della discarica, lateralmente dall'argilla impermeabile di cui sono costituiti i versanti e, come emerge dalle stratigrafie, in profondità dalle argille compatte del suolo naturale. A causa di questa conformazione, a seguito di eventi meteorici, le acque di corrivazione superficiale tendono ad infiltrarsi e ristagnare in questi strati più permeabili rimaneggiati o di riporto.

Il modello concettuale ricostruito del sito ha quindi indicato che le acque sotterranee presenti nell'area indagata siano prevalentemente contenute nei materiali granulari permeabili (sabbie e sabbie ghiaiose) intorno alle vasche di stoccaggio V1 e V2 (zona "catino"), e nelle zone più superficiali dove le argille azzurre, che costituiscono la formazione geologica naturale (unità B e C), sono state rimaneggiate. Nelle zone dove il rimaneggiamento delle argille azzurre non è



avvenuto, il modello ha confermato l'assenza di una falda in grado di avere un flusso e una quantità significativa, come testimoniato dall'assenza di acqua durante i monitoraggi eseguiti in diversi piezometri realizzati.

Il modello concettuale ha inoltre evidenziato la presenza di un dosso naturale di argilla azzurra, che permette di confinare la zona della contaminazione rispetto al Rio Rondinella entro una certa altezza: il rischio di migrazione degli inquinanti nella falda superficiale, contenuta nei materiali rimaneggiati o di riporto, verso il Rio Rondinella è dunque possibile lungo il percorso del materiale permeabile, solo nel caso in cui il livello delle acque sotterranee avesse superato una quota piezometrica individuata, mentre in tutte le altre situazioni possibili individuate, il percorso di migrazione verso il Rio Rondinella risultava interrotto dal dosso che confina idrogeologicamente l'area catino.

Considerato che le indagini eseguite hanno individuato la sorgente di inquinamento nell'area catino ed in particolare nelle perdite di percolato avvenute in passato dalle vasche V1 e V2, nella Conferenza dei servizi del 22/07/2016, con DET-AMB-2016-2529 del 26/07/2016, Arpae SAC ha approvato con prescrizioni il progetto di dismissione delle vasche di stoccaggio V1-V2 (sorgente di inquinamento primaria) e la rimozione completa del materiale di rinfranco presente sia lateralmente che al disotto delle vasche (sorgente di inquinamento secondaria), con successivo ritombamento dell'area con argilla; la bonifica andava così ad annullare anche l'unico percorso di migrazione possibile dall'area catino al Rio Rondinella.

L'intervento di bonifica ha quindi determinato la demolizione delle strutture consistenti le vasche (pareti in elevazione e solette di fondo) e la rimozione dei terreni di rinfranco e di quelli sottostanti l'area di sedime delle vasche stesse. Completate le demolizioni e le operazioni di scavo, il vuoto risultante è stato interrato con terreno argilloso compattato per strati. I lavori, avviati in data 05/12/2016, si sono sostanzialmente conclusi in data 31/05/2018.

L'atto DET-AMB-2016-2529 del 26/07/2016 prescriveva anche monitoraggi periodici sulle acque sotterranee dei piezometri, da eseguirsi per almeno 2 anni dalla data di avvenuta conclusione dei lavori di sistemazione dell'area delle vasche V1-V2.

I suddetti monitoraggi hanno riguardato esclusivamente l'area di installazione delle vasche di stoccaggio del percolato fino al Rio Rondinella, che rappresenta quindi una porzione limitata e non rappresentativa, sia per dimensioni, sia per caratteristiche idrogeologiche, dell'intero sito di discarica. Di conseguenza il monitoraggio sulle acque sotterranee effettuato ai fini della procedura di sito contaminato, secondo DET-AMB-2016-2529, non si considera estensibile all'intero sito di discarica, rispetto al quale, si rimanda a quanto riportato nel Rapporto di VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) allegato a DGP n°241/2012: *“Per il sito in esame si può affermare che la natura prevalentemente argillosa del substrato e la bassissima permeabilità non permettono la circolazione delle acque all'interno dello stesso, come dimostrato dalla totale assenza di acqua nei fori di sondaggio, al termine della campagna indagini realizzata nel mese di Luglio 2007 e dettagliatamente descritta negli elaborati del progetto definitivo”.*

Come da progetto di bonifica approvato, preliminarmente alle procedure di scavo, Herambiente ha realizzato un diaframma strutturale in cemento armato, con funzione di sostegno, di spessore 1 m, sviluppo 93 m, e profondità da 9 a 19 m, adattato all'andamento dell'unità stratigrafica in posto. Tale opera, oltre alla funzione di sostegno, costituisce anche misura di presidio per le acque sotterranee.

Tra la fase di completamento degli scavi e l'inizio dei successivi rinterri con argilla, sono state effettuate da Arpae caratterizzazioni del terreno di fondo scavo, dalle quali è emersa la conformità del terreno alle CSC definite per il suolo nel D.Lgs 152/2006 alla colonna B, tabella 1, Allegato 5, Parte Quarta, Titolo V per i parametri analizzati: *Metalli (Piombo, Rame, Cadmio, Nichel, Zinco, Cromo totale, Cromo VI, Arsenico e Mercurio), Cianuri, Fenoli clorurati, IPA e PCB.*

Per quanto attiene al controllo delle acque sotterranee, da fine 2015 al giugno 2020, Arpae ha eseguito presso il sito, monitoraggi sulle acque sotterranee con frequenza semestrale, ancorché nell'ambito di un procedimento di sito contaminato la vigente normativa metta in capo al solo gestore il monitoraggio delle acque e del suolo; alle indagini sulle acque sotterranee è stato



affiancato un monitoraggio mensile sul Rio Rondinella, con campionamento di acque dove consentito da sufficiente deflusso del corpo idrico.

Oltre alle indagini chimiche eseguite secondo i criteri previsti dalla normativa tecnica sia sulle acque sotterranee che sul percolato, Arpae ha applicato un approccio integrato e multidisciplinare, associando alle analisi chimiche, indagini geochimiche ed isotopiche, queste ultime riconosciute da bibliografia come valido supporto analitico nei casi di inquinamento da percolato di discarica.

L'apporto della geochimica ha contribuito ad individuare le facies idrochimiche presenti nei diversi piezometri, con prima valutazione sull'omogeneità nelle acque sotterranee, mentre la caratterizzazione isotopica delle acque sotterranee e del percolato ha consentito di definire l'origine delle acque sotterranee e ha fornito informazioni su eventuali contatti/contaminazioni delle acque sotterranee con il percolato e hanno permesso di identificare in altri casi le sostanze chimiche presenti nelle acque sotterranee come di origine naturale e non di derivazione del percolato.

Le **indagini chimiche** condotte sulle acque sotterranee del sito, dal novembre 2015 al giugno 2020, hanno evidenziato per alcuni dei parametri indagati, superamenti delle CSC, sia nei piezometri interni alla discarica che in quelli esterni prossimi al Rio Rondinella, con significative differenze composizionali tra le acque dei piezometri in area catino e quelli al di fuori di questa: mentre per le acque sotterranee dell'area catino, oggi bonificata con la dismissione delle vasche V1-V2, si sono registrate in passato concentrazioni significative di *metalli pesanti e fenoli*, in tenore talvolta confrontabile al percolato, per le acque sotterranee esterne all'area catino i superamenti di CSC hanno interessato piuttosto *solfati, boro, manganese, nitriti*, e da fine 2017 anche *ferro*. In dettaglio, riassumendo per i suddetti parametri, pur nella variabilità analitica insita in ogni monitoraggio, valutando il set di dati disponibili, sia in rapporto alle concentrazioni analitiche di percolato, sia alla luce degli esiti delle indagini suppletive geochimiche ed isotopiche, emergono le seguenti considerazioni:

- per i superamenti delle CSC in *solfati e manganese* si ritiene di poter escludere il contributo del percolato della discarica, in quanto la concentrazione di tali parametri nelle acque sotterranee nella maggior parte dei piezometri sia in fase ante che post bonifica è sempre risultata maggiore rispetto alle concentrazioni registrate nel percolato, individuato quale sorgente di contaminazione da modello concettuale;
- per il *boro* è stata condotta specifica indagine isotopica che, sulla base del differente frazionamento isotopico dell'elemento, ha escluso l'origine antropogenica del boro nelle acque sotterranee esterne all'area catino;
- i superamenti di *nitriti* nelle acque sotterranee, sono stati ricondotti ad un'anomalia individuata sulle acque di drenaggio superficiale, rispetto la quale nel 2018 sono stati attuati interventi, ad oggi efficaci, in considerazione degli esiti dei monitoraggi sulle acque superficiali e per concentrazioni conformi alle CSC registrate su tutti i piezometri nel campionamento 2020;
- il repentino e significativo aumento nelle concentrazioni di *ferro* registrato sulle acque sotterranee a partire da fine 2017, può essere messo in relazione con la realizzazione delle infrastrutture in cemento armato in sotterraneo, svolte nell'ambito del progetto di bonifica per la rimozione delle vasche V1 e V2, che possano avere influito sui meccanismi di rilascio e di mobilità del ferro naturalmente presente nelle acque interstiziali della matrice solida alle acque sotterranee campionate nei piezometri.

Si segnala che nell'ultima campagna di monitoraggio eseguita da Arpae nel giugno 2020 si è registrato in un piezometro interno (Pz2015/8) un superamento della CSC del parametro *arsenico*, superamento già rilevato in un precedente campionamento nel 2018, con concentrazioni comunque sempre prossime ai valori CSC.

Gli esiti delle **indagini geochimiche** associate confermano significative differenze composizionali tra le acque sotterranee ed il percolato, con attribuzione della facies cloruro-solfato-alcalina per le



acque sotterranee e della facies bicarbonato-alcaina per il percolato, escludendo pertanto fenomeni di mescolamento tra le acque sotterranee e il percolato.

Le **indagini isotopiche** mostrano una composizione isotopica delle acque sotterranee, per tutti i punti di monitoraggio, significativamente diversa rispetto quella tipica del percolato, confermando pertanto l'esclusione di fenomeni di mescolamento tra acque sotterranee e percolato. I riscontri isotopici delle acque sotterranee, inoltre, mostrano una discreta aderenza alle rette standard globali e per il nord Italia di precipitazione meteorica, confermando l'assenza nell'area di acquiferi aventi quantità e flusso significativi, ma piuttosto di lenti di carattere "effimero", isolate e non connesse tra loro, alimentate non da flusso idrico sotterraneo come avviene per le falde acquifere propriamente dette, ma dall'infiltrazione diretta dalla superficie, seppure limitata dalla natura litologica fine, delle acque meteoriche. L'infiltrazione delle acque meteoriche e l'eventuale deflusso idrico sotterraneo delle stesse verso valle avviene in particolare nelle zone dove i materiali sono stati rimaneggiati o sono presenti materiali di riporto sabbioso-ghiaiosi.

Contestualmente ai monitoraggi sulle acque sotterranee, aumentando peraltro la frequenza dei controlli Arpae indicata in AIA, sono state valutate le caratteristiche del percolato prodotto dalla discarica, la cui composizione è stata confrontata con quella delle acque del piezometro di bianco, al fine di determinare i potenziali analiti traccianti di contaminazione (c.d. "markers") e di determinarne possibili trend di variazione, se occorsi nel periodo monitorato.

L'elaborazione statistica dei dati ha permesso di individuare quali marker del percolato di discarica i parametri *azoto ammoniacale, potassio e nichel*.

Secondo quanto indicato dalle Linee Guida ISPRA, i trend nelle concentrazioni dei parametri markers sono stati valutati elaborando tutti i dati con test statistico di Mann-Kendall, dal quale non sono emerse tendenze all'aumento delle concentrazioni per nessuno dei tre markers individuati.

Il test statistico di Mann-Kendall è stato esteso anche agli analiti di maggiore interesse, ovvero a quei parametri per i quali, nel corso dei monitoraggi delle acque sotterranee, sono stati registrati superamenti delle CSC e per i quali si disponeva di un numero sufficiente di dati a garantire una significatività statistica; i test statistici effettuati non evidenziano tendenze significative all'aumento delle concentrazioni, fatta eccezione per un caso di un singolo piezometro per i solfati.

Alla luce di quanto sopra riportato, si può affermare che i monitoraggi effettuati sulle acque sotterranee nell'area di installazione delle vasche di stoccaggio percolato, non evidenziano segnali o tendenze al peggioramento delle caratteristiche qualitative delle stesse, e risultando già rimossa sia la sorgente primaria che quella secondaria dell'inquinamento, non si ritiene di chiedere ulteriori interventi alla Ditta.

Considerato concluso il monitoraggio delle acque sotterranee dei piezometri localizzati nell'area di stoccaggio del percolato previsto da DET-AMB-2016-2529, si ritiene comunque opportuno proseguire il controllo delle acque sotterranee sia per consolidare il dataset, permettendo per tutti i piezometri valutazioni statisticamente significative di trend delle concentrazioni, sia per confermare contestualmente l'assenza di altri segnali.

Si propone pertanto di **proseguire il monitoraggio sulle acque sotterranee dei piezometri attualmente presenti nell'area interessata (Pz2015/5-6-7-8-9-10-11-12-13-B-B2-B3) per ulteriori 2 anni mediante n° 4 campagne analitiche, da ripartire stagionalmente n° 2 in primavera/estate e n° 2 in autunno/inverno, secondo il seguente protocollo analitico:**

pH, Conducibilità, Torbidità, Potenziale redox, Alcalinità, COD, Azoto ammoniacale, Nitriti, Azoto nitrico, Cloruri, Solfati, Cianuri liberi, metalli pesanti (Arsenico, Bario, Boro, Cadmio, Calcio, Cromo VI, Cromo totale, Ferro, Magnesio, Manganese, Mercurio, Molibdeno, Nichel, Piombo, Potassio, Rame, Selenio, Sodio, Vanadio, Zinco) e Fenoli (con speciazione almeno di 2-Clorofenolo, 2,4-Diclorofenolo, 2,4,6-Triclorofenolo, Pentaclorofenolo).



Documenti di riferimento

- Agostini G. et al., 2016. Determinazione e gestione dei livelli di guardia per il monitoraggio delle discariche, RECONnet Rete Nazionale sulla gestione e la Bonifica dei Siti Contaminati, 63 pp
- APAT - IRSA/CNR, 2003. Metodi analitici per le acque. Manuali e Linee Guida 29/2003, 1149 pp. <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/metodi-analitici-per-le-acque>
- Arpae, Distretto Metropolitan, 2020. Monitoraggio qualità acque superficiali Rio Rondinella anno 2019, 15 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/Relazione_Rondinella_2019.pdf
- Arpae, Distretto Metropolitan, 2020a. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE sulle acque sotterranee della discarica Tre Monti nel corso dell'anno 2019, 33 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/2020_U_PG116335_acque_sott_tre_monti_2019.pdf
- Arpae, Distretto Metropolitan, 2020b. Esiti attività controllo e monitoraggio 2018, 40 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/relazione_web_2018_rev_giugno_finale.pdf
- Arpae Distretto Metropolitan, 2019. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di Novembre 2018 sulle acque sotterranee presso la discarica, 29 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/PG_2019_68613_acque_sotterranee_disc_tre_monti_nov_2018.pdf
- Arpae Distretto Metropolitan, 2019a. Esiti dell'attività di controllo e monitoraggio . Anni di gestione 2016 2017, 54pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/tremonti_gestione_2016_2017.pdf
- Arpae Emilia-Romagna, 2018. Trasmissione esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di novembre 2017 sulle acque sotterranee presso la discarica per rifiuti non pericolosi HERAMBIENTE SpA situata in Comune di Imola, Località Tre Monti, via Pediano n° 52. 22 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/TreMonti_piezo_Novembre2017_timbrato.pdf
- Arpae Emilia-Romagna, 2018a. Trasmissione esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di maggio 2018 sulle acque sotterranee presso la discarica per rifiuti non pericolosi HERAMBIENTE SpA situata in Comune di Imola, Località Tre Monti, via Pediano n° 52. 27 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/Relazione_piezometri_TreMonti_Maggio2018_timbrato.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2018b. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di Novembre 2017 sulle acque sotterranee presso la discarica, 22 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/TreMonti_piezo_Novembre2017_timbrato.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2018c. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di Maggio 2018 sulle acque sotterranee presso la discarica, 27 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/Relazione_piezometri_TreMonti_Maggio2018_timbrato.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2018d. Monitoraggio qualità acque superficiali Rio Rondinella anno 2017, 11 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/PGBO_2018_21553_RELAZIONE_FINALE_RIO_RONDINELLA_MONITORAGGIO_2017.pdf



- Arpae Sezione di Bologna, 2018e. Relazione contenente i risultati relativi al monitoraggio isotopico effettuato da Arpae negli anni 2017 e 2018 sia sulle acque sotterranee che superficiali della Discarica, 34 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/RelazioneMonitoraggioIsotopico_2017_2018_MM.pdf
- Arpae Emilia-Romagna, 2017. Trasmissione esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nei mesi di agosto e novembre 2016 sulle acque sotterranee presso la discarica per rifiuti non pericolosi HERAMBIENTE SpA situata in Comune di Imola, Località Tre Monti, via Pediano n° 52. 20pp. https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3524&idlivello=1962
- Arpae Emilia-Romagna, 2017a. Monitoraggio chimico e isotopico delle acque sotterranee presso la Discarica " Tre Monti " – Imola - Anni di riferimento: 2015-2016. A cura di Marco Marcaccio, Manuela Aloisi, Emanuela Lischi, Cristina Bonora e Giovanna Biagi. 56 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/RelazioneMonitoraggioIsotopico_Discarica_TreMonti.pdf
- Arpae Emilia-Romagna, 2017b. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE sulla qualità del Rio Rondinella nel corso dell'anno 2016, 11 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/RELAZIONE_FINALE_1.pdf
- Arpae Emilia-Romagna, 2017c. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nel mese di Aprile 2017 sulle acque sotterranee presso la discarica per rifiuti non pericolosi HERAMBIENTE SpA situata in Comune di Imola, Località Tre Monti, via Pediano n° 52. 18 pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/Relazione_piezometri_Aprile_TreMonti_finale.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2016a. Esiti delle attività di controllo e monitoraggio - Anno di gestione 2015. Discarica di rifiuti non pericolosi Herambiente SpA in Località Tre Monti di Imola. A cura di: Manuela Aloisi, Emanuela Lischi, Barbara Sotto Corona, Massimo Vezzali. 46pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/Sez_BO_Report_Rifiuti/Relazione_web_2015_TREMONTI.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2016b. Conferenza dei Servizi del 12/02/2016: trasmissione esiti analitici dei campioni effettuati da Arpae a seguito di diffida ai sensi dell'art. 244 c.2 del D. Lgs. 152/06 e s.m.i. presso la discarica di rifiuti non pericolosi "Tre Monti", situata nel Comune di Imola in via Pediano n. 52. 14pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/SezBO_TreMonti/Risultati_Campionamenti_Notifica_firmato.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2016c. Monitoraggio qualità delle acque superficiali del Rio Rondinella in località Tre Monti di Imola. Trasmissione esiti del monitoraggio gennaio – agosto 2016. 14pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/SezBO_TreMonti/rondinella_2016/monitoraggio_gennaio_agosto/Monitoraggio_Rio_Rondinella_gennaio_agosto_2016.pdf
- Arpae Sezione di Bologna, 2016d. - Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAE nei mesi di Febbraio e Marzo 2016 sulle acque sotterranee presso la discarica e sulle acque superficiali del Rio Rondinella nel periodo novembre 2015-febbraio 2016. 30pp. https://www.arpae.it/cms3/documenti/SezBO_TreMonti/TreMont_Esiti_acque_2016_WEB.pdf
- Beccaloni E. et al., 2008. Banca dati ISS-INAIL. Documento di supporto. https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/banca_dati_documento_supporto_marzo_2018.pdf
- Canziani R., Cossu R., 1989. Landfill hydrology and leachate production, sanitary landfilling: process, technology and environmental impact. Academic Press, San Diego, CA, 1989
- Christensen et al., 2001. Review biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry 16, p. 659-718.
- Civita, 2005. Idrogeologia applicata e ambientale, 800 pp.



- Environment Agency UK, 2003. Review of ammonium attenuation in soil and groundwater. Technical Report NGWCLC report NC/02/49. 74 pp.
- Environment Agency UK, 2004. Improved definition of leachate source term from landfills Phase 1: review of data from European landfills. Science Report P1-494/SR1. p. 58
- IAEA International Atomic Energy Agency, 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series No. 472. pp. 44-47
- ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2017. Linee Guida per la valutazione delle tendenze ascendenti e d'inversione degli inquinanti nelle acque sotterranee. Manuali e Linee Guida 161/2017. 33 pp.
- Longinelli A., Selmo E., 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. Journal of Hydrology, 270, p. 75-88
- SNPA Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 2018. Linea Guida per la determinazione dei valori di fondo per i suoli e per le acque sotterranee. Manuale n°8/2018. 318 pp.