

Area Prevenzione Ambientale  
Metropolitana -Distretto Pianura Imola

Direzione Tecnica - Area Monitoraggio  
Reporting ambientale

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

Anni di riferimento: 2015-2022

Imola/Bologna, Giugno 2023

<b>1. Premessa e obiettivi.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Monitoraggio delle acque sotterranee.....</b>	<b>7</b>
2.1. Esecuzione delle campagne di monitoraggio.....	11
2.2. Misure di livello della falda e parametri chimico-fisici misurati in campo.....	11
2.3. Regime pluviometrico nel periodo 2016-2022.....	19
<b>3. Caratterizzazione del percolato e indicatori di contaminazione.....</b>	<b>24</b>
3.1. Identificazione dei markers di contaminazione da percolato.....	25
<b>4. Sintesi del chimismo delle acque sotterranee e superamenti delle CSC.....</b>	<b>29</b>
4.1. Solfati.....	47
4.2. Manganese.....	48
4.3. Boro.....	49
4.4. Ferro.....	52
4.5. Nitriti.....	55
4.6. Metalli: Nichel e Arsenico.....	56
<b>5. Facies idrochimica delle acque sotterranee.....</b>	<b>59</b>
5.1. Ricostruzione delle facies idrochimiche.....	59
<b>6. Caratterizzazione isotopica.....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>64</b>
<b>Documenti di riferimento.....</b>	<b>68</b>

#### **A cura di:**

Isabella Ricciardelli, Elena Guidi, Roberto Riberti, Pamela Morra, Emanuela Lischi, Marco Marcaccio, Cristina Regazzi

#### **Hanno collaborato:**

Distretto Imolese - 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 e obiettivi

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 sottosectori di coltivazione.

La discarica, i cui conferimenti sono stati sospesi il 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/DetailImpiantoPub.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 da novembre 2015 al novembre 2022, 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).

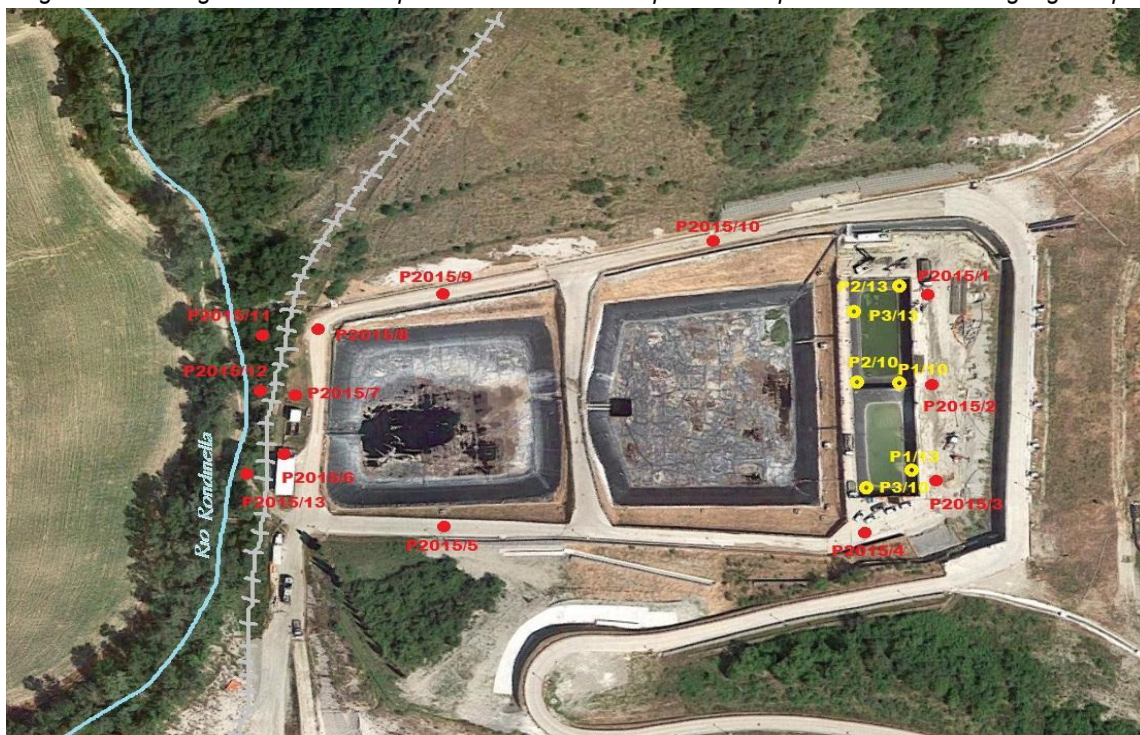
Figura 1.1. Inquadramento area vasche percolato-sito contaminato. Fonte googlemaps.



Ai fini delle indagini, è stata realizzata una rete di monitoraggio delle acque sotterranee composta da 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 aree interne alla discarica, ritenute di "bianco" in quanto non interessate da attività antropica.

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 adiacente alla 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 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 stata 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. Rispetto alla formazione naturale, l'area rimaneggiata risulta, pertanto, caratterizzata da maggiore potenzialità di infiltrazione nel sottosuolo da parte delle acque meteoriche, con formazione di lenti di acque sotterranee di dimensione maggiore ed eventuale generazione di deflusso.

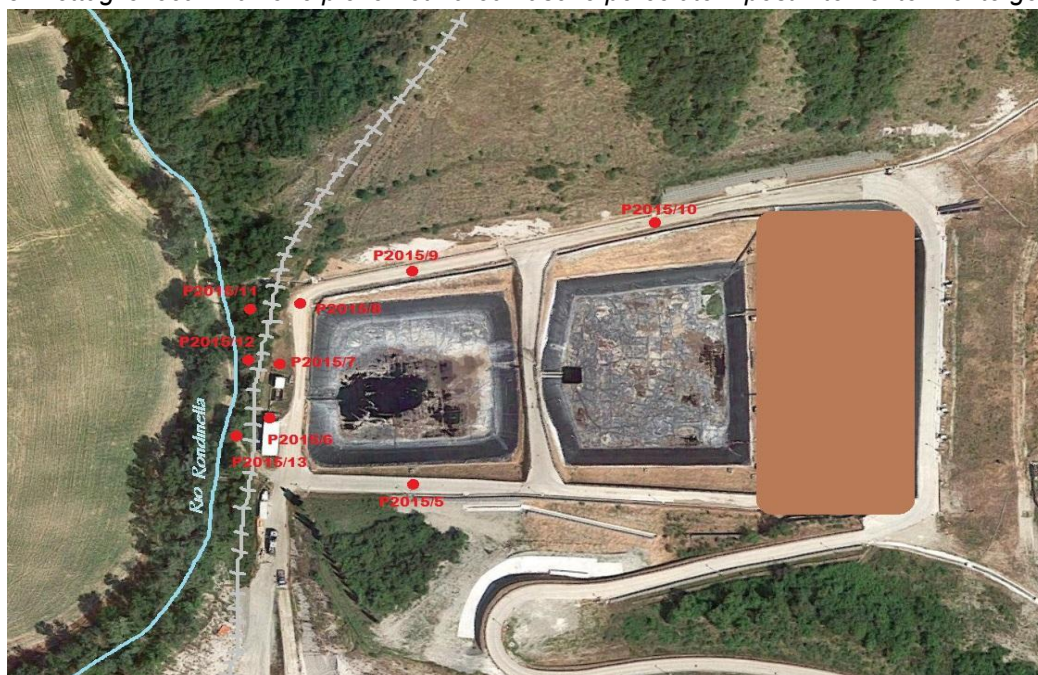
Nell'ambito della Conferenza dei Servizi del 22/07/2016, con DET-AMB-2016-2529 del 26/07/2016, Arpae SAC di Bologna ha approvato con prescrizioni il progetto di dismissione delle



vasche di stoccaggio V1-V2 e la rimozione completa del materiale di rinfranco presente sia lateralmente che al disotto delle vasche, con successivo ritombamento dell'area con argilla.

Il Gestore della discarica, Herambiente Spa, ha avviato i lavori in data 05/12/2016, che si sono sostanzialmente conclusi in data 31/05/2018. Come da atto di approvazione del progetto, l'intervento ha 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, con conseguente dismissione dei pozzi spia e dei piezometri di monitoraggio da Pz2015/1 a Pz2015/4. Completate le demolizioni e le operazioni di scavo, il vuoto risultante è stato reinterrato con terreno argilloso compattato per strati; in Figura 1.3. si riporta la rappresentazione 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 rinterrati con argilla, sono state effettuate caratterizzazioni del terreno di fondo scavo, sia da parte di Herambiente Spa che di Arpa, 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, Arpa SAC di Bologna ha rilasciato la certificazione del completamento degli interventi di bonifica risultati conformi al Progetto di Bonifica autorizzato.

## 2. Monitoraggio delle acque sotterranee

La rete di monitoraggio delle acque sotterranee 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 presenti nell'area di stoccaggio, denominate V3 e V4, hanno costituito 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 Preliminare. Pertanto, la rete di monitoraggio delle acque sotterranee, è stata realizzata individuando principalmente tre gruppi di piezometri rappresentativi di diverse zone:

- interni alla discarica e distribuiti intorno alla zona sorgente;
- esterni alla discarica e in prossimità del bersaglio (corpo idrico superficiale);
- esterni alla discarica e in zona non interessata da attività di gestione rifiuti, considerati punti di "bianco".

I piezometri, rappresentati nelle figure 2.1 e 2.2 sono così ripartiti:

- **10 piezometri interni alla discarica**, distribuiti lungo il perimetro delle vasche di stoccaggio del percolato, di cui 4 all'interno della zona rimaneggiata (**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 piezometri esterni alla discarica**, in prossimità del corpo idrico superficiale (**Pz2015/11, Pz2015/12, Pz2015/13**);
- 3 piezometri esterni alla discarica, in area non interessata dalla gestione dei rifiuti, considerati punti di "bianco" (**Pz2015/B, Pz2015/B2, Pz2015/B3**).

I piezometri, interni ed esterni alla discarica, 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 di profondità 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 rimaneggiata (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, come schematizzato nelle Figure 2.1-2.2.

Figura 2.1 Ubicazione punti di monitoraggio discarica Tre Monti

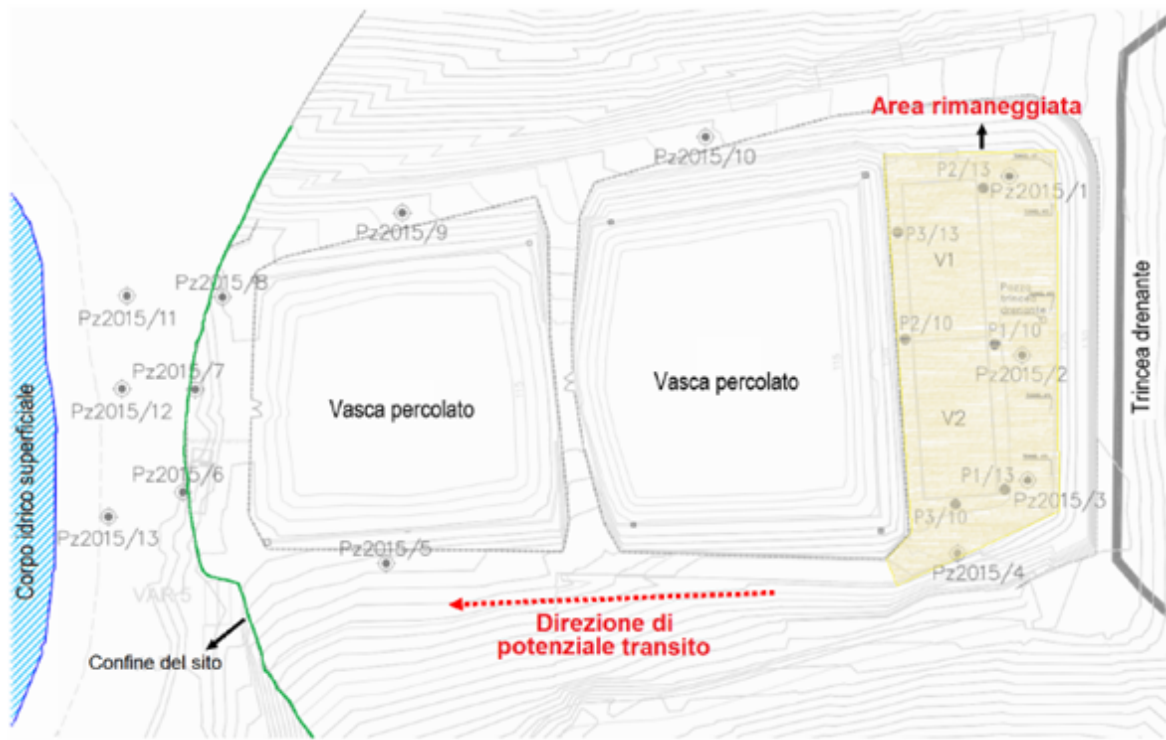
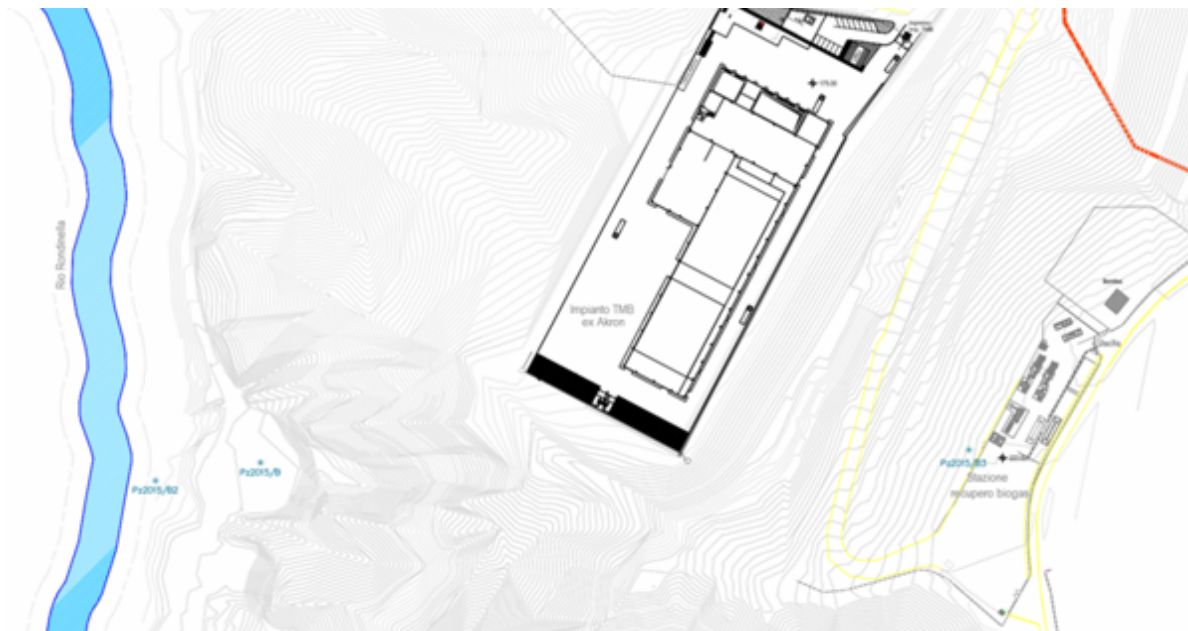


Figura 2.2 Ubicazione punti di monitoraggio "bianco" discarica Tre Monti





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 A e B 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 distinta 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.

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)
<b>Pz2015/1</b>	8	2 - 8	<b>3.30</b>	Unità assente	A, C
<b>Pz2015/2</b>	16	3 - 16	<b>9.15</b>	<b>12.00</b>	A, B, C
<b>Pz2015/3</b>	9	3 - 9	2.10	<b>5.00</b>	B, C
<b>Pz2015/4</b>	10	3 - 10	2.00	<b>3.00</b>	(B), C
<b>Pz2015/5</b>	9	3 - 9	0.50	<b>3.20</b>	B, C
<b>Pz2015/6</b>	11.5	2.5 - 11.5	2.00	<b>6.30</b>	(A), B, C
<b>Pz2015/7</b>	15	3 - 15	3.20	<b>10.00</b>	(A), B, C
<b>Pz2015/8</b>	15	3 - 15	1.30	<b>9.50</b>	B, C
<b>Pz2015/9</b>	9	3 - 9	0.40	<b>Unità assente</b>	C
<b>Pz2015/10</b>	8	2 - 8	1.00	<b>2.00</b>	(B), C
<b>Pz2015/11</b>	8	2 - 8	1.50	<b>5.50</b>	(A), B, C
<b>Pz2015/12</b>	8	2 - 8	1.00	<b>3.20</b>	B, C
<b>Pz2015/13</b>	8	2 - 8		<b>3.10</b>	B, C
<b>Pz2015/B</b>	8.5	2.5 - 8.5		<b>1.10</b>	C
<b>Pz2015/B2</b>	7	1 - 7		<b>1.10</b>	(B), C
<b>Pz2015/B3</b>	11	2 - 11	2.00	<b>6.50</b>	(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.

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 freatometro;
- cationi e anioni principali per caratterizzare la *facies idrochimica* delle acque, da 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 2015-2022

	Data di campionamento																
	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	8/6/20	19/5/21	18/11/21	17/5/22	3/11/22
PZ2015/1	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO
PZ2015/2	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO
PZ2015/3	✓	nc	✓	✓	nc	nc	nc	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO
PZ2015/4	✓	nc	✓	✓	nc	✓	nc	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO	DISMESSO
PZ2015/5	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/6	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/7	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/8	✓	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/9	nc	nc	✓	✓	nc	nc	nc	✓	nc	✓	✓	✓	✓	nc	nc	✓	nc
PZ2015/10	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	✓	nc
PZ2015/11	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	nc
PZ2015/12	nc	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PZ2015/13	nc	nc	✓	✓	nc	nc	nc	nc	nc	✓	✓	nc	✓	nc	nc	✓	nc
PZ2015/B	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
PZ2015/B2	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	✓	nc
PZ2015/B3	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	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 2.3-2.4 si riportano, dal 2016 al 2022, 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 rosa nella tabella 2.3) le misure di livello che sono più alte rispetto l'inizio dei filtri stessi, situazioni che evidenziano una falda in pressione spesso 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 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. 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	14/3/16	19/4/16	3/8/16	8/11/16	18/4/17	21/11/17	8/5/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20	19/05/21	18/11/21	17/05/22	03/11/22
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	1,43	6,94	1,69	5,6	5,19	1,31	6,06
Pz2015/6	114,01	2,5	1,68	1,59	1,81	2,18	1,81	2,04	1,79	1,76	1,58	1,95	1,97	1,84	1,5	1,56	2,2
Pz2015/7	113,14	3	3,15	3,41	4,15	4,83	4,17	4,28	4,15	4	1,93	0,64	4,46	5,87	5	4,52	5,4
Pz2015/8	117,32	3	4,3	4,02	3,94	4,32	4,81	3,94	4,74	4,59	4,31	3,7	5,48	10,14	7,64	5,3	6,36
Pz2015/9	120,49	3	6,12	6,31	5,05	-	-	-	0,95	8,52	2,97	0,55	2,25	-	-	2,82	-
Pz2015/10	125,67	2	-	-	7,7	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	1,13	-
Pz2015/11	109,38	2	1,61	2,04	1,85	5,65	6,8	6,2	1,94	1,69	1,44	1,8	3,26	2,16	2,23	2,09	-
Pz2015/12	110,07	2	2,15	2,15	2,47	3,41	2,87	2,38	2,61	2,23	2,12	2,94	2,94	2,77	4,19	2,49	4,53
Pz2015/13	110,93	2	5,18	2,51	2,9	-	-	-	-	6,81	2,93	-	3,2	-	-	3,03	-
Pz2015/B3	221,07	2	-	-	-	-	-	-	4,47	7,62	3,69	2,97	-	-	-	-	-

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

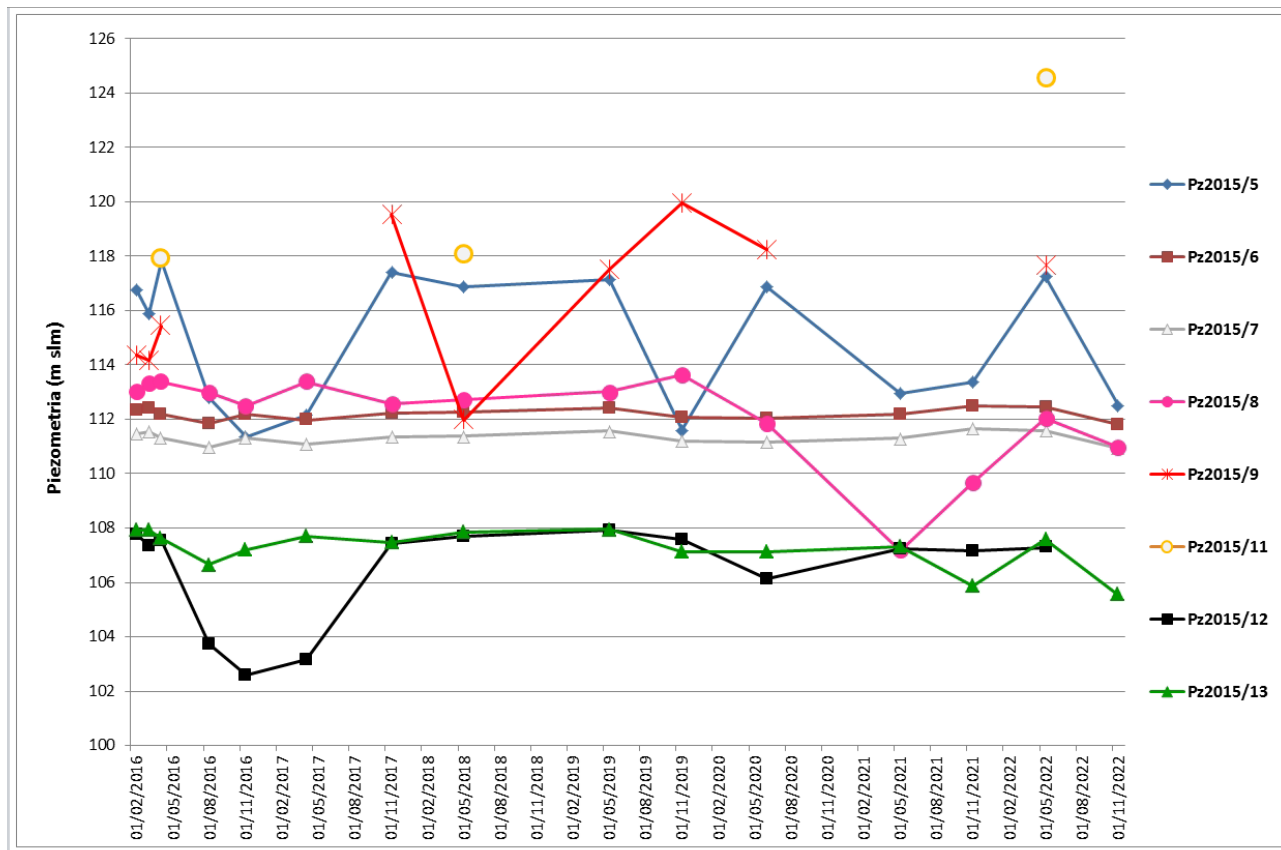
Tabella 2.4 Misure di livello della falda nei piezometri espressa come piezometria

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	7/5/19	21/11/19	08/06/20	19/05/21	18/11/21	17/05/22	03/11/22
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	117,12	111,61	116,86	112,95	113,36	117,24	112,49
Pz2015/6	114,01	2,5	112,33	112,42	112,2	111,83	112,2	111,97	112,22	112,25	112,43	112,06	112,04	112,17	112,51	112,45	111,81
Pz2015/7	113,14	3	109,99	109,73	108,99	108,31	108,97	108,86	108,99	109,14	111,21	112,5	108,68	111,3	111,64	111,58	110,94
Pz2015/8	117,32	3	113,02	113,3	113,38	113	112,51	113,38	112,58	112,73	113,01	113,62	111,84	107,18	109,68	112,02	110,96
Pz2015/9	120,49	3	114,37	114,18	115,44	-	-	-	119,54	111,97	117,52	119,94	118,24	-	-	117,67	-
Pz2015/10	125,67	2	-	-	117,97	-	-	-	-	118,07	-	-	-	-	-	124,54	-
Pz2015/11	109,38	2	107,77	107,34	107,53	103,73	102,58	103,18	107,44	107,69	107,94	107,58	106,12	107,22	107,15	107,29	-
Pz2015/12	110,07	2	107,92	107,92	107,6	106,66	107,2	107,69	107,46	107,84	107,95	107,13	107,13	107,3	105,88	107,58	105,54
Pz2015/13	110,93	2	105,75	108,42	108,03	-	-	-	-	104,12	108	-	107,73	-	-	107,9	-
Pz2015/B3	221,07	2	-	-	-	-	-	-	216,6	213,45	217,38	218,1	-	-	-	-	-

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

Si riporta di seguito il grafico dell'andamento nel tempo (dal 2016 al 2022) della piezometria (quota assoluta rispetto al livello medio del mare).

Grafico 1: Misure di livello della falda nei piezometri espressa come piezometria



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 (Tabelle 2.5.a, 2.5.b e 2.5.c). Dai dati emerge quanto segue:

- TEMPERATURA:** 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 nei 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 sono state registrate anche nel piezometro Pz2015/9 in quasi tutte le campagne, indice di possibile infiltrazione di acque superficiali, tenendo conto che il piezometro filtra solo l'Unità C delle argille azzurre sovraconsolidate;
- POTENZIALE REDOX:** 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 nella campagna di marzo 2016. Dalla campagna di maggio 2019

fino alle ultime campagne del 2022 (eccetto giugno 2020), si osservano condizioni prevalentemente ossidanti evidenziando una stretta relazione con il regime pluviometrico antecedente il campionamento;

- **OSSIGENO DISCIOLTO:** 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 superficiali, ovvero ricche di ossigeno disciolto, sia per l'apporto dall'acqua meteorica che si infiltra, che per arricchimento nella zona insatura.



Tabella 2.5.a: Temperatura misurata 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	17/05/21	18/11/21	17/05/22	03/11/22
P1/10	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1/13	14,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2/10	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/10	9,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/13	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/1	12,8	12,2	21,4	16,7	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/2	14	14,2	22	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	15,3	15,4	14,8	12,5	13,8	15,2	14,7	14,6	14,5	14,3
Pz2015/6	10,8	11,2	16,4	14,9	12,4	14,4	12,7	11,5	15	13,6	12,2	15	12	16,1
Pz2015/7	12,1	12,8	15,4	13,8	13,4	14,1	14,4	12,2	14,3	14,6	14,3	14,3	13,9	14,2
Pz2015/8	12,9	13,9	16,2	14,7	15	15,2	15,5	14,5	16,9	16	15,7	15	16,6	15,2
Pz2015/9	14,2	14,8	-	-	-	16,3	-	15,3	17	18,9	-	-	17,7	-
Pz2015/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,5	-
Pz2015/11	9,3	10,5	16,3	13	-	13,7	14,3	12	14	-	-	14,7	14,3	-
Pz2015/12	9,9	10,7	18	15,1	13,8	14,6	13,8	11,8	14,6	14,3	12,16	14,4	13	14,4
Pz2015/13	12,3	11,6	-	-	12,5	-	-	12,1	-	14,3	12,77	-	13,3	-
Pz2015/B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,2	-	-
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	14,9	-	13,7	14,8	14,3	-	-	-	-

Tabella 2.5.b Potenziale Redox misurato in campo

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	17/05/21	18/11/21	17/05/22	03/11/22
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	153	96,1	78	256
Pz2015/6	103	142	-2,4	-31	39	20	29	80	44	45	150	97	81	152
Pz2015/7	124	175	-6,7	-128	-72	-93	-59	114	97	-22	150	83,1	58	54
Pz2015/8	25	192	-24,2	-91	132	-69	44	35	187	-67	159	82,8	68	52,9
Pz2015/9	157	162	-	-	-	46	-	186	172	91	-	-	75	-
Pz2015/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-
Pz2015/11	122	75	-35	-63	-4	-37	-37	19	111	-21	-	84	54	-
Pz2015/12	67	-2	-40	-57	157	27	-31	48	83	-21	134	899	49	196
Pz2015/13	128	82	-	-	-	-	-	-29	-	50	152	-	11	-
Pz2015/B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88,4	-	-
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	49	-	108	151	-	-	-	-	-

Tabella 2.5.c. Ossigeno disciolto misurato in campo

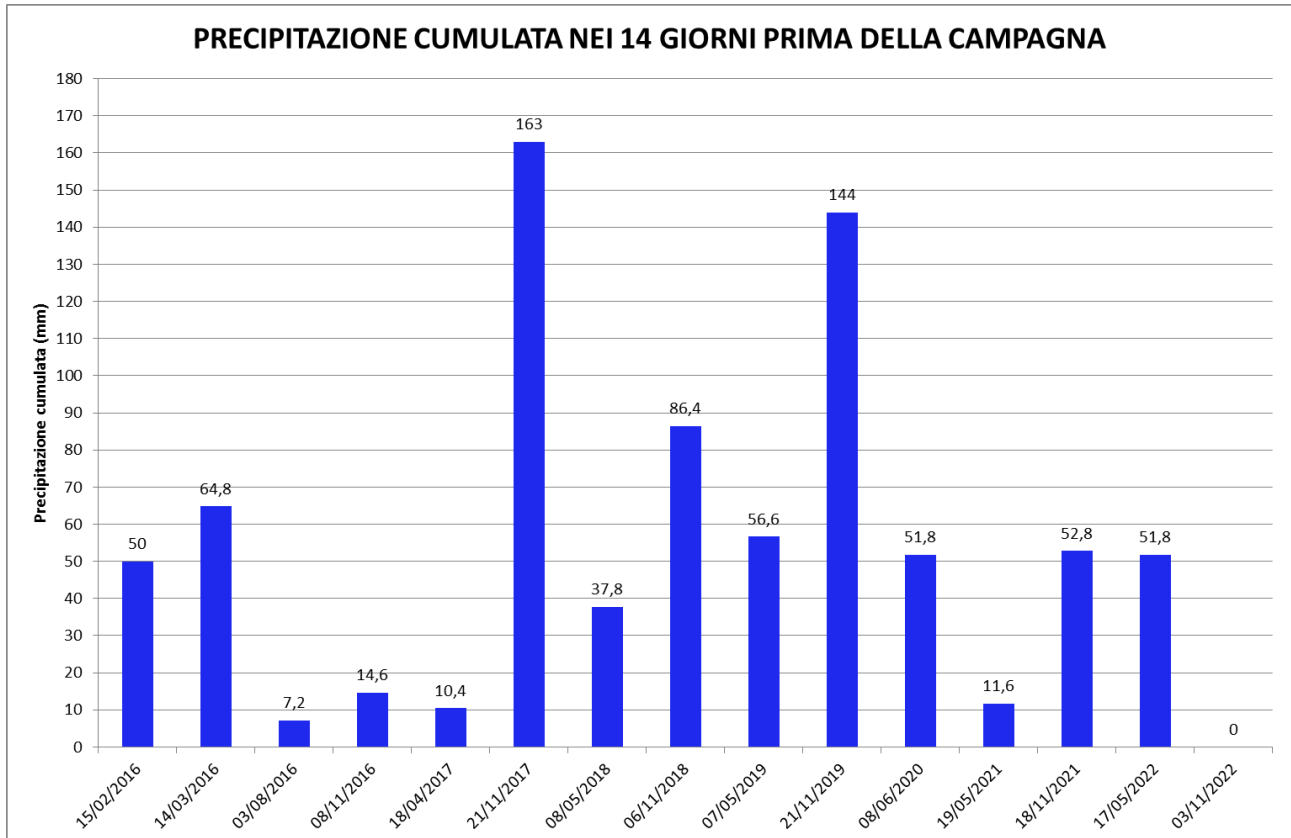
Stazione	Ossigeno disciolto (mg/l)													
	15/02/16	14/03/16	03/08/16	08/11/16	18/04/17	21/11/17	08/05/18	7/5/19	21/11/19	08/06/20	17/05/21	18/11/21	17/05/22	03/11/22
P1/10	4,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1/13	7,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2/10	6,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/10	8,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3/13	4,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/1	3,97	6	3,23	3,61	2,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/2	3,3	4,94	7,71	3,97	6,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/3	5,8	6,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/4	3,23	6,03	-	3,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pz2015/5	5	6,72	7,91	4,58	4,69	5,14	8,72	4,71	3,83	3,32	6,02	4,76	5,8	4,58
Pz2015/6	4,23	6	7,07	3,74	7,18	3,52	4,11	7,38	3,51	3,87	4,75	3,82	5,28	3,84
Pz2015/7	5,15	5,17	6,99	3,41	7,18	2,9	3,64	3,96	5,4	2,58	4,68	3,45	4,1	7,1
Pz2015/8	3,27	4,84	7,1	3,53	4,21	2,8	8,94	3,06	3,09	3,07	3,93	4,98	3,48	6,03
Pz2015/9	3,21	4,52	-	-	-	2,55	-	6,05	-	3,79	-	-	4,92	-
Pz2015/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,7	-
Pz2015/11	3,1	6,68	7,15	4,08	7,19	4,37	3,38	3,87	3,74	3,42	3,98	4,76	3,91	-
Pz2015/12	7,42	6,98	6,74	4,06	4,06	3,18	4,49	4,7	3,72	4,5	4,49	6,52	5,57	5,97
Pz2015/13	6,59	6,71	-	-	-	-	-	3,79	-	2,87	-	-	4,6	-
Pz2015/B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,01	-	-
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	4,95	-	5,92	5,59	-	-	-	-	-

### 2.3. Regime pluviometrico nel periodo 2016-2022

Le caratteristiche quali-quantitative delle acque sotterranee dipendono strettamente dalle condizioni climatiche e in particolare dal regime pluviometrico. E' pertanto importante tenere conto delle precipitazioni che hanno preceduto di 1-2 settimane il campionamento e le misure di livello di 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.

Il grafico 2 di seguito riporta, per ogni campagna di misura, il valore di precipitazione cumulata nelle 2 settimane che hanno preceduto la giornata del campionamento.

Grafico 2: precipitazione cumulata nelle 2 settimane precedenti alla data della campana di misura (stazione Arpae-SIMC Imola Mario Neri)



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

- le misure di febbraio 2016, marzo 2016, maggio 2018, maggio, 2019, novembre 2018, giugno 2020, novembre 2021 e maggio 2022 sono state precedute da un periodo caratterizzato da abbondanti precipitazioni, pari al valore mensile di precipitazione cumulata nella media climatologia 1991-2020;
- le misure di novembre 2017 e novembre 2019 sono state precedute da un periodo caratterizzato da precipitazioni straordinarie e abbondanti, nettamente superiori alle medie del periodo;
- le misure di agosto 2016, novembre 2016, aprile 2017, maggio 2021 sono state precedute da un periodo relativamente povero di precipitazioni.

Nelle Figure da 2.3 e 2.9 si riporta in forma grafica l'andamento della precipitazione cumulata (in  $\text{kg/m}^2$ ) su base giornaliera per i periodi del monitoraggio, dal 2016 al 2022, rilevata da Arpae SIMC presso la stazione di Imola.

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/m<sup>2</sup> di precipitazione cumulata, a fronte di valori sempre inferiori a 800 kg/m<sup>2</sup> per le altre annualità analizzate; in particolare il mese di novembre 2019 è stato caratterizzato da spiccate condizioni perturbate, con accumuli mensili abbondantemente superiori alla media.

Figura 2.3 Precipitazione cumulata giornaliera anno 2016 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC).

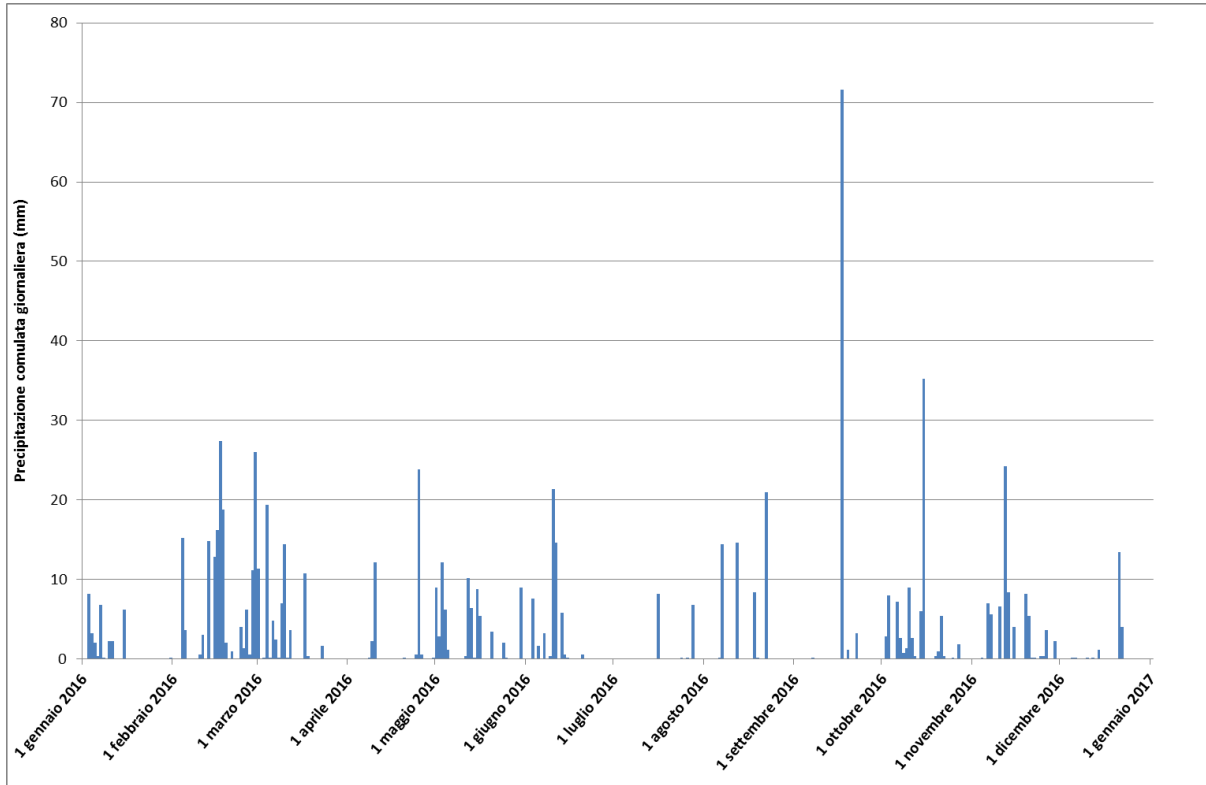


Figura 2.4 Precipitazione cumulata giornaliera anno 2017 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC).

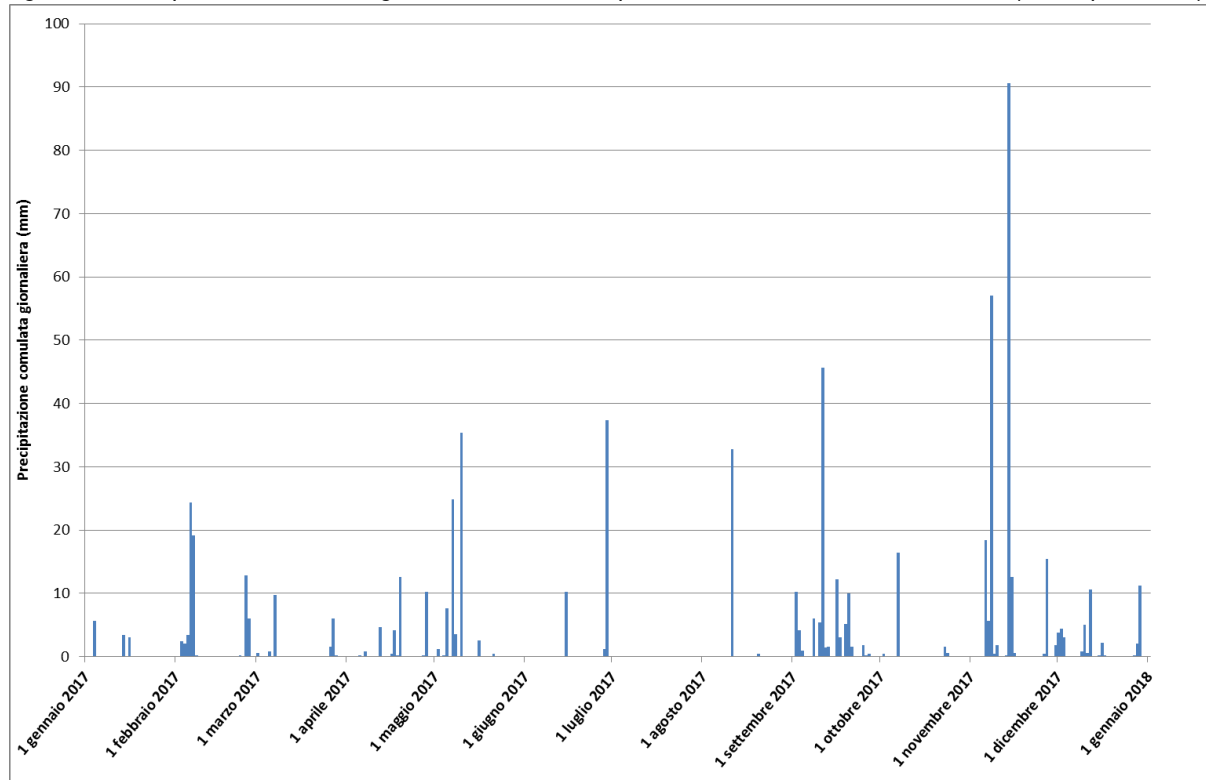




Figura 2.5 - Precipitazione cumulata anno 2018 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC).

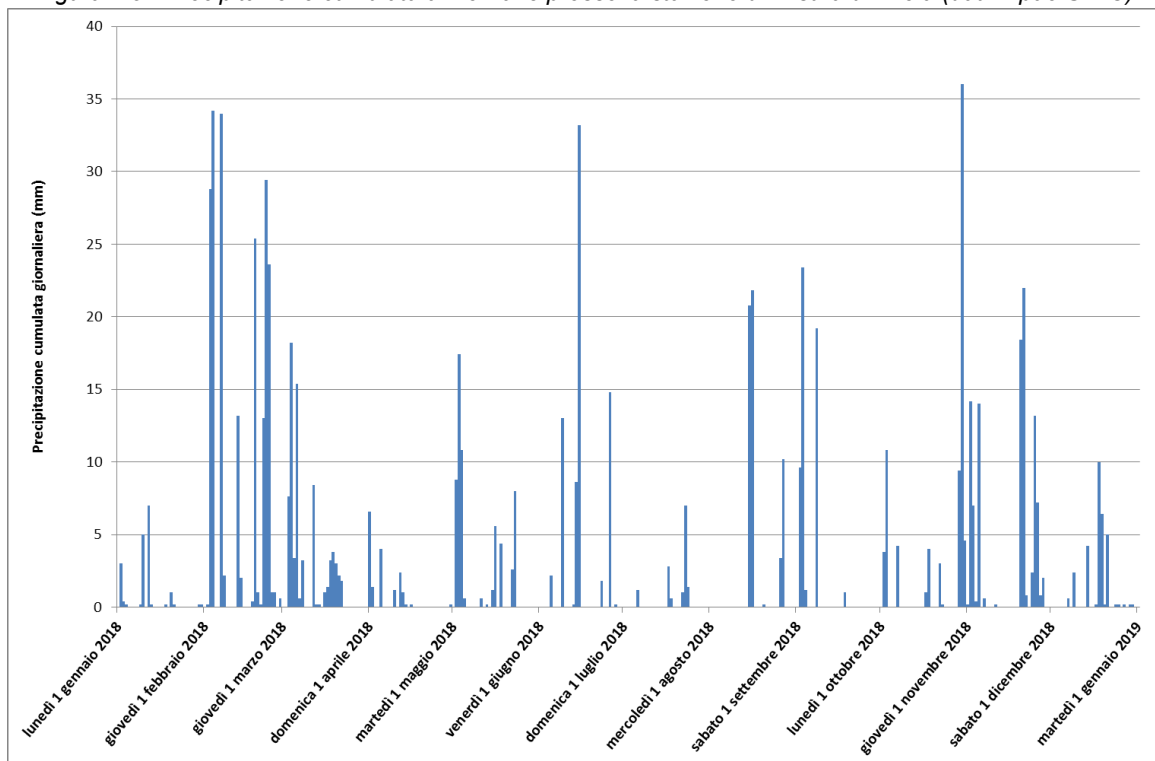


Figura 2.6- Precipitazione cumulata giornaliera anno 2019 presso la stazione di misura di Imola (dati Arpae SIMC)

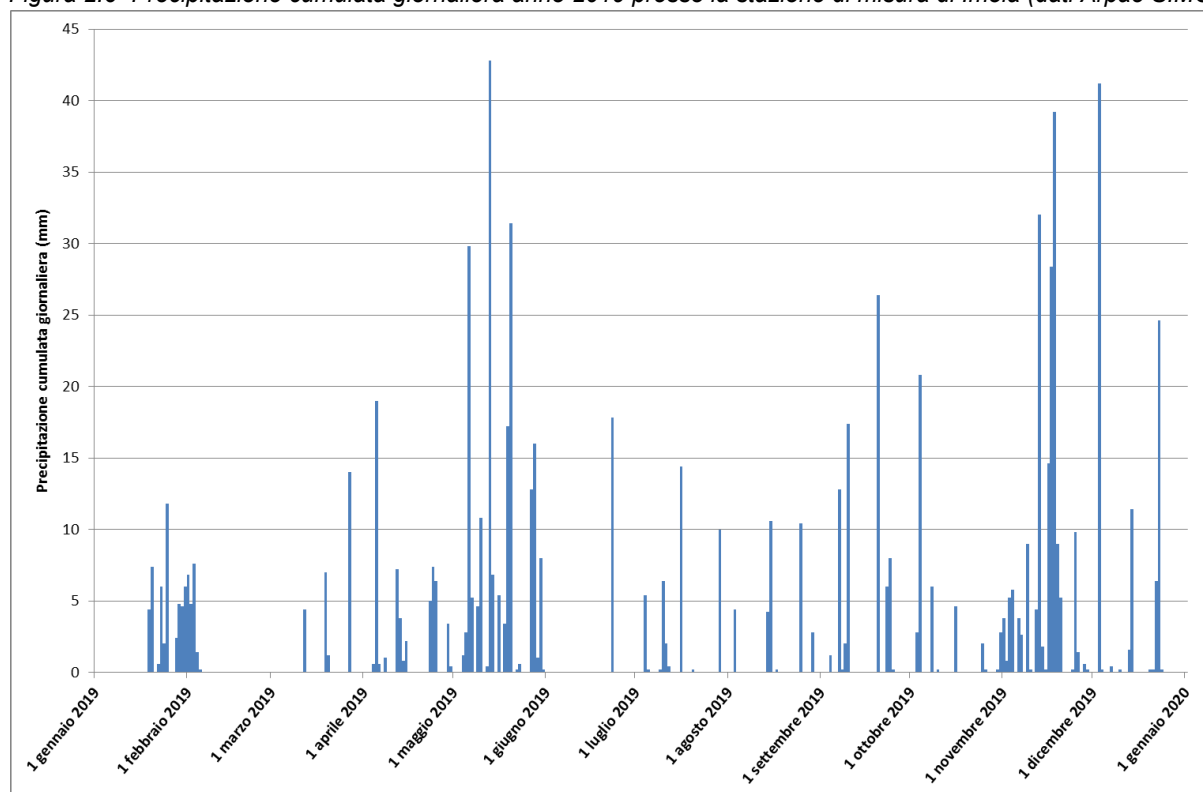


Figura 2.7 - Precipitazione cumulata giornaliera anno 2020 presso stazione di misura Imola (dati Arpae SIMC).

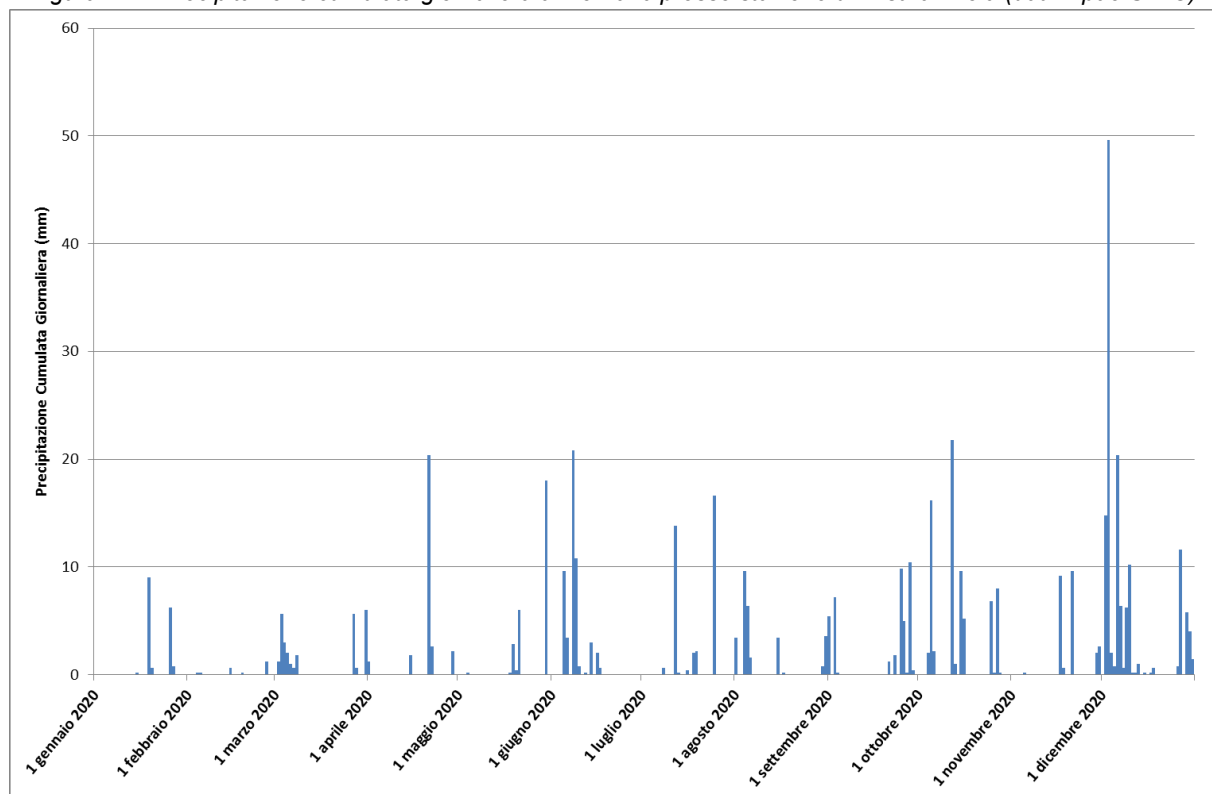


Figura 2.8 - Precipitazione cumulata giornaliera anno 2021 presso stazione di misura Imola (dati Arpae SIMC).

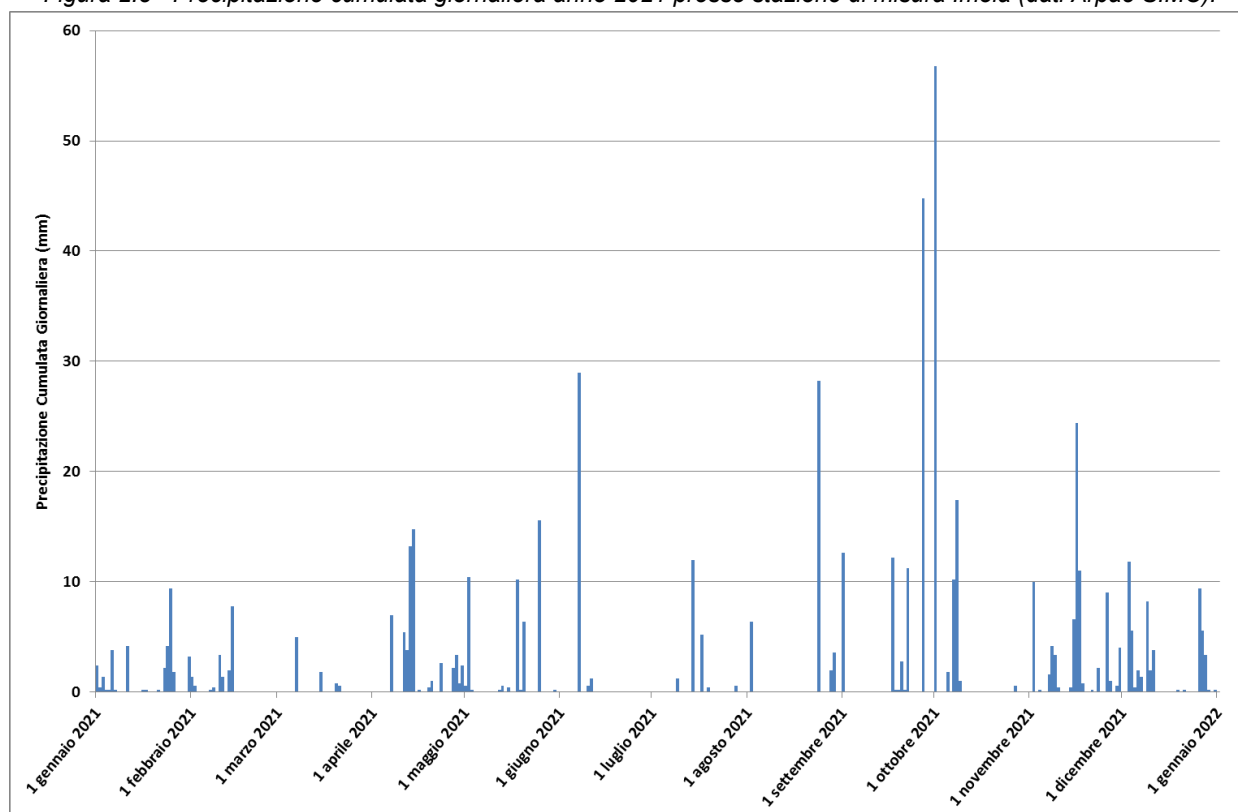
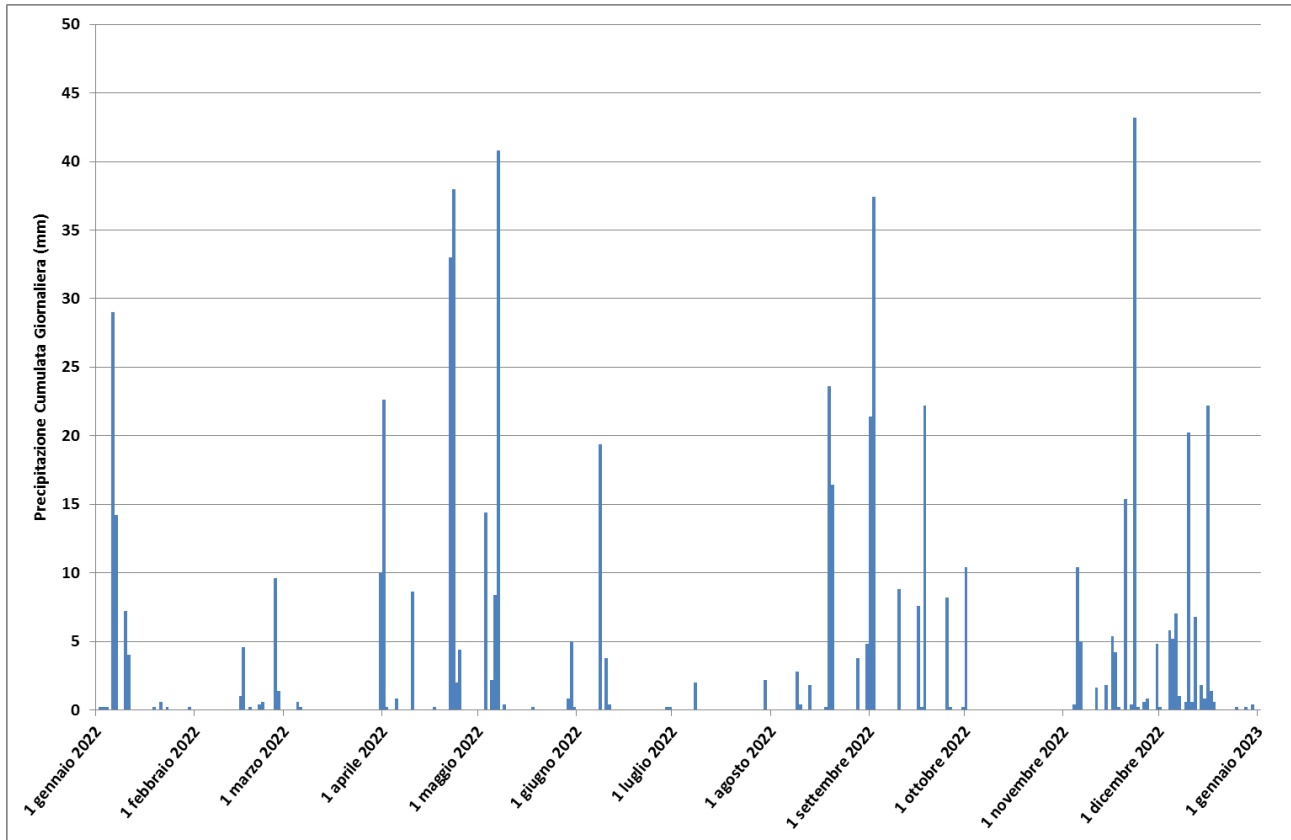


Figura 2.9 - Precipitazione cumulata giornaliera anno 2022 presso stazione di misura Imola (dati Arpae SIMC).



### 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, ovvero 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 solfato 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 ss.mm.ii. (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;

- tutti i campioni successivi sono stati campionati 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.

Dagli esiti delle analisi chimiche del percolato effettuato da Arpae non emergono differenze significative tra i diversi campioni di percolato che risultano 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 quasi tutte le altre rilevazioni inferiori al limite di quantificazione della metodica (ultimo campione del 2022 è 280 mg/L)
- 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;
- 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 del Pz2015/B3, con rilevazioni in tre campagne analitiche e del Pz2015/B2 nella sola campagna del 18/11/2021.

Applicando la metodologia di individuazione dei markers, descritta da Agostini et al. 2016, in Tabella 3.1. si riportano le concentrazioni medie<sup>1</sup> delle rilevazioni per i singoli parametri, nel percolato e nel punto di bianco, evidenziando in grigio i parametri che presentano concentrazione differenziale percolato/falda di almeno due ordini di grandezza<sup>2</sup>, ovvero il rapporto tra le medie risulti superiore o uguale a  $5 \cdot 10^2$ .

Tabella 3.1. Concentrazioni medie nel percolato e nelle acque sotterranee dei punti di bianco

Parametro	UdM	Media percolato	Media piezometro bianco B3	Piezometro Bianco B2 18/11/2021
pH	-	8,08	7,84	7,61
Conducibilità	µS/cm	19994	872,67	8859
Alcalinità**	mg/L	18564	596,67	1055
COD	mg/L	4952	32,67	403
Azoto ammoniacale	mg/L	2367,6	39,03	4,5
Nitriti	µg/L	889,5	41,33	112
Azoto nitrico	mg/L	3,11	4,43	0,4
Cloruri	mg/L	2451,4	62,67	2724
Solfati	mg/L	215	70,33	452
Cianuri liberi	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Arsenico	µg/L	182,1	<LOQ	31
Bario	µg/L	870,2	17,00	379
Boro	µg/L	11728,9	388,33	2048
Cadmio	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Calcio**	mg/L	93,36	37,67	57,1
Cromo VI	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Cromo totale	µg/L	2342,8	<LOQ	<LOQ
Ferro	µg/L	11323,4	622,00	1260
Manganese	µg/L	265	19,33	788
Mercurio	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Molibdeno*	µg/L	13,67	<LOQ	<LOQ
Nichel	µg/L	348,5	<LOQ	10
Piombo	µg/L	26,6	<LOQ	<LOQ
Potassio	mg/L	1045,5	17,57	61,1
Rame	µg/L	191,9	9,67	<LOQ
Selenio	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Sodio**	mg/L	4882	142,67	1954
Vanadio	µg/L	199,1	<LOQ	<LOQ
Zinco	µg/L	452,1	16,17	<LOQ

<sup>1</sup> Concentrazioni medie rilevate secondo approccio *medium bound*

<sup>2</sup> Definita la notazione scientifica di un numero  $sign(a) = m \cdot 10^k$ , con  $1 \leq m < 10$ , se  $1 \leq m \leq 5$  l'ordine di grandezza di  $a$  è  $10^k$ ; se invece  $5 < m < 10$ , l'ordine di grandezza è  $10^{k+1}$ .

2-Clorofenolo	µg/L	7,02	<LOQ	<LOQ
2,4-Diclorofenolo	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ
2,4,6-Triclorofenolo	µg/L	<LOQ	<LOQ	0,3
Pentaclorofenolo	µg/L	<LOQ	<LOQ	<LOQ

\*dato depurato da un outlier nella prima campagna.

\*\* dati disponibili a partire dal 18/04/2017.

Tra le sostanze evidenziate in Tabella 3.1, come suggerito dalla metodologia, 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 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, proprio appunto per avere una risposta tempestiva, in fase successiva 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 pertanto 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 3.2. i valori medi indicati per i radionuclidi da IAEA, 2010

Tabella 3.2 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 3.2. 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 03/11/2022:

- al fine di garantire significatività statistica, il test è stato effettuato per i piezometri con un dataset di almeno nr. 8 osservazioni (Pz2015/5-6-7-8-9-11-12)
- 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 considerando 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 vengono sinteticamente riassunti in Tabella 3.3.

Tabella 3.3. Test M-K parametri markers di percolato

	Azoto ammoniacale	Potassio	Nichel
Pz2015/5	Trend in diminuzione	Nessun trend significativo	Trend in diminuzione
Pz2015/6	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Trend in diminuzione
Pz2015/7	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2015/9	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2016/11	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo	Nessun trend significativo

L'analisi statistica di M-K sui trend delle concentrazioni dei parametri markers azoto ammoniacale, potassio e nichel non evidenzia alcuna tendenza significativa all'aumento dell'inquinamento per nessun piezometro di monitoraggio e si osservano alcune tendenze in decrescita. Si osserva inoltre che, per nessun piezometro, vi è un accordo di trend per i tre indicatori: poiché un'eventuale presenza di percolato nel sottosuolo provocherebbe l'innalzamento contemporaneo nelle concentrazioni nelle acque sotterranee delle sostanze caratterizzanti il percolato, compresi ovviamente i traccianti individuati, si ritiene significativo considerare come “segnali rilevanti” solo incrementi di concentrazione simultanei e persistenti delle sostanze individuate come markers (Agostini, 2006).

Dagli esiti dell'analisi statistica riportata si esclude pertanto che sia in corso un'interazione tra acque sotterranee e percolato.

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

Nel presente paragrafo si riassumono gli esiti delle indagini chimiche effettuate dal novembre 2015 al 2022 sui piezometri di monitoraggio, sintetizzando quanto già riportato nelle note trasmesse da Arpae Servizio Territoriale, con aggiornamento dei dati all'ultima campagna di novembre 2022.

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.

Nelle figure seguenti, vengono riportati, per ciascun parametro misurato, il numero di superamenti rilevati in ogni piezometro in confronto con il numero di campionamenti effettuati.

Figura 4.1 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Solfati in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

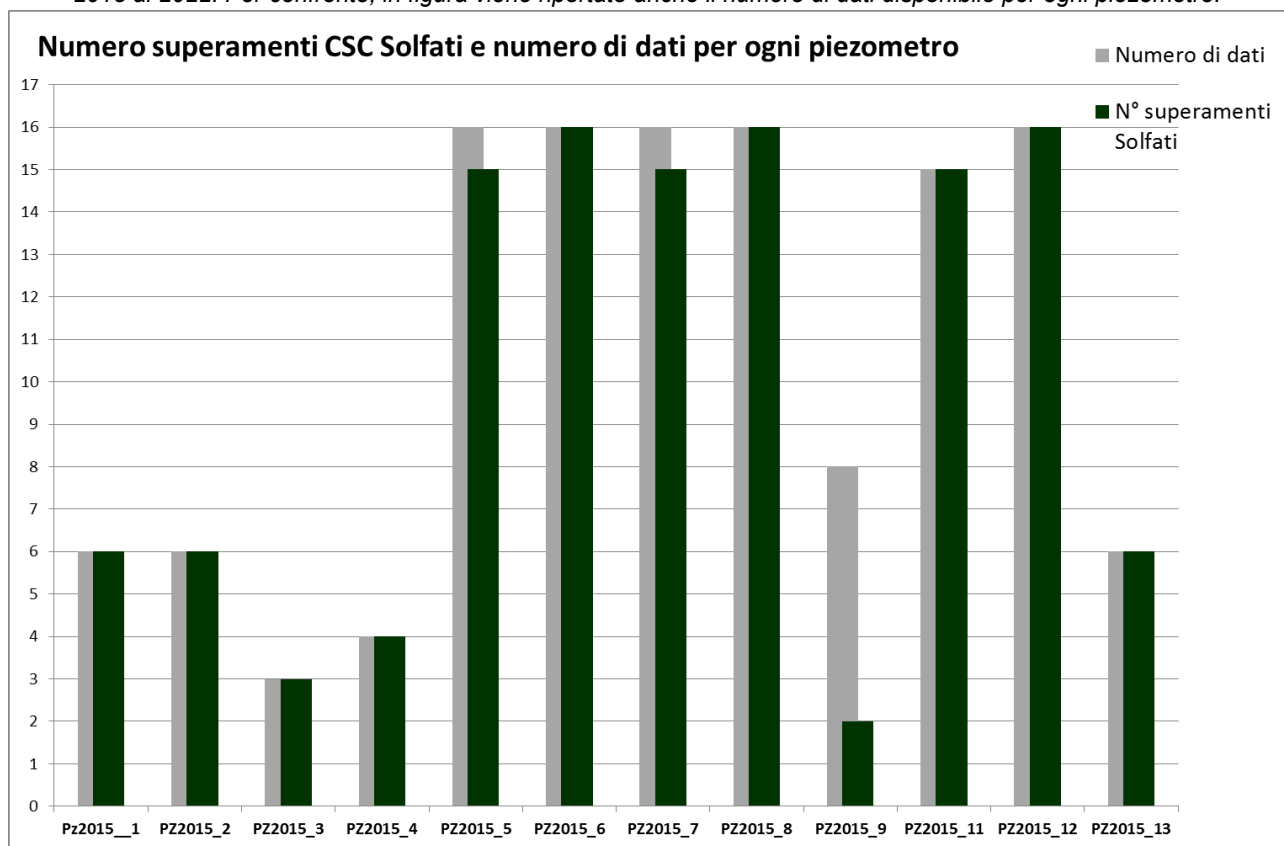


Figura 4.2 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Manganese in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

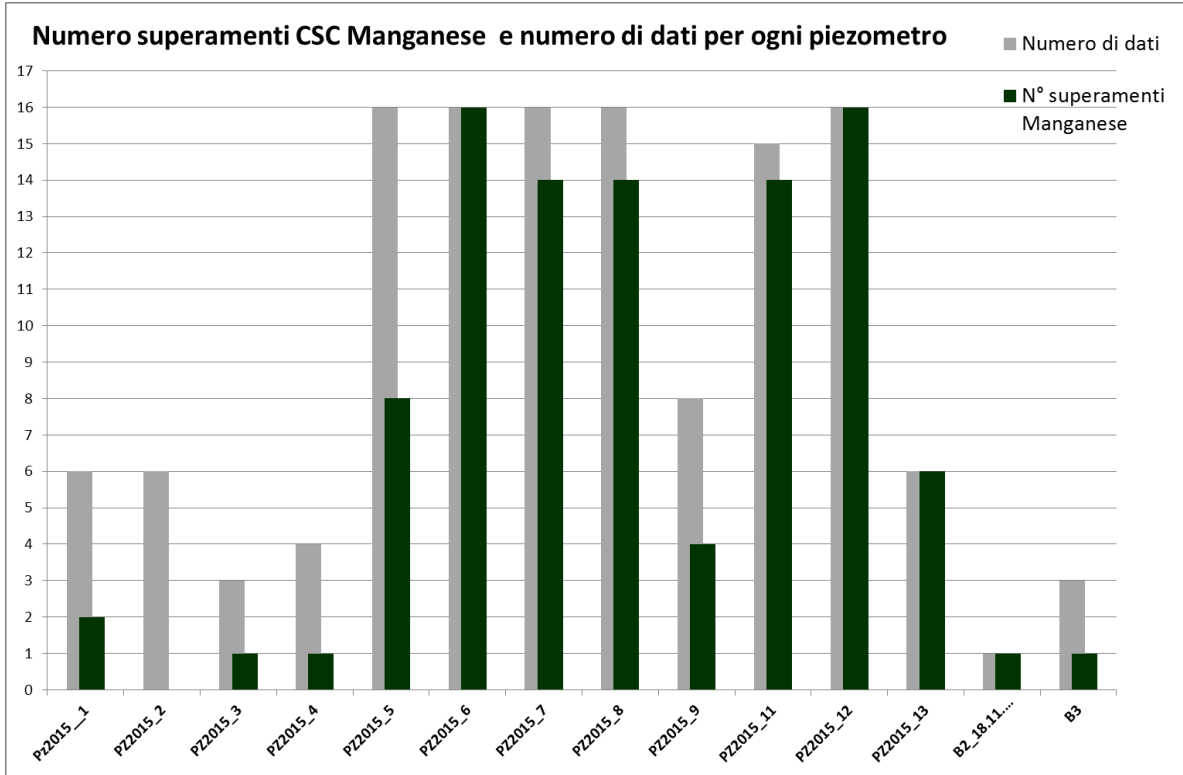


Figura 4.3 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Ferro in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

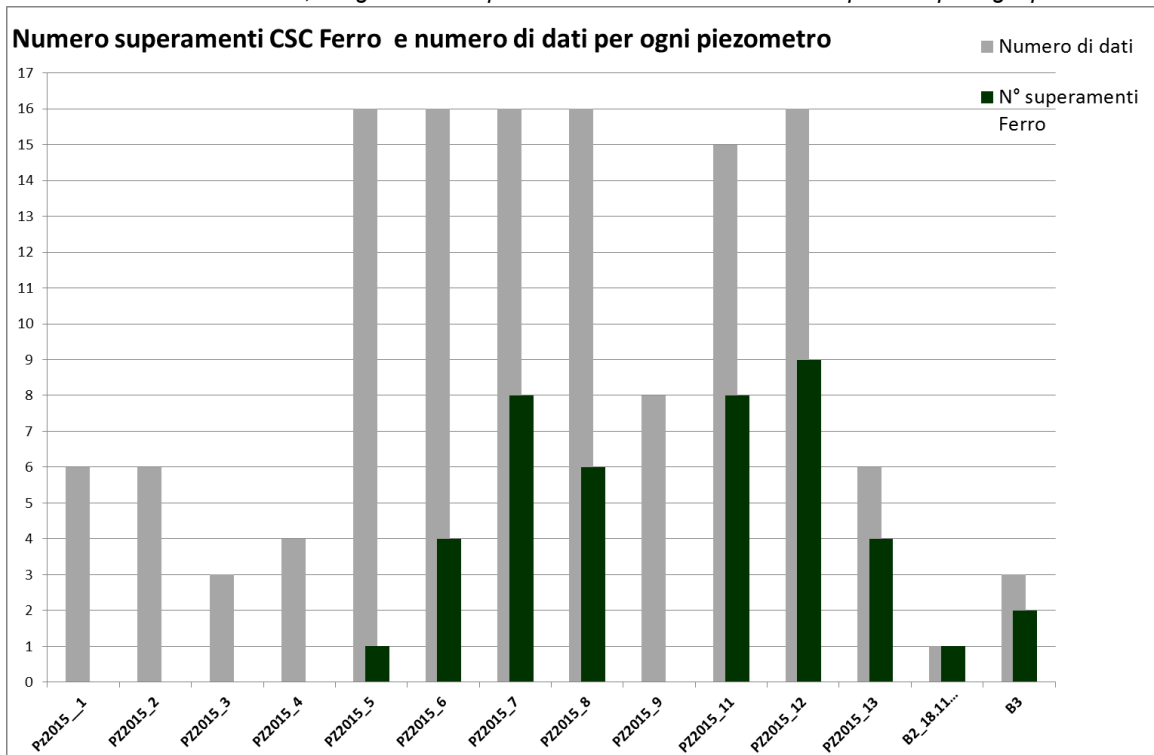


Figura 4.4 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Boro in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

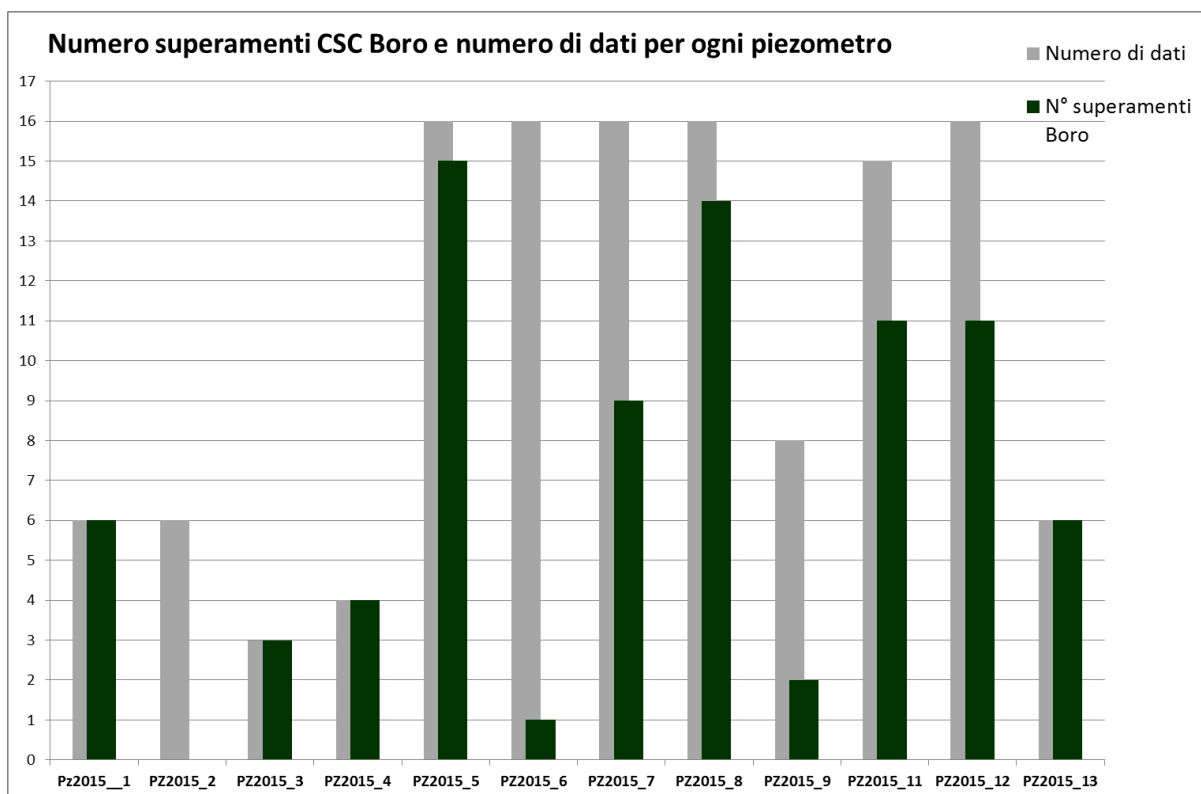


Figura 4.5 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Arsenico in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

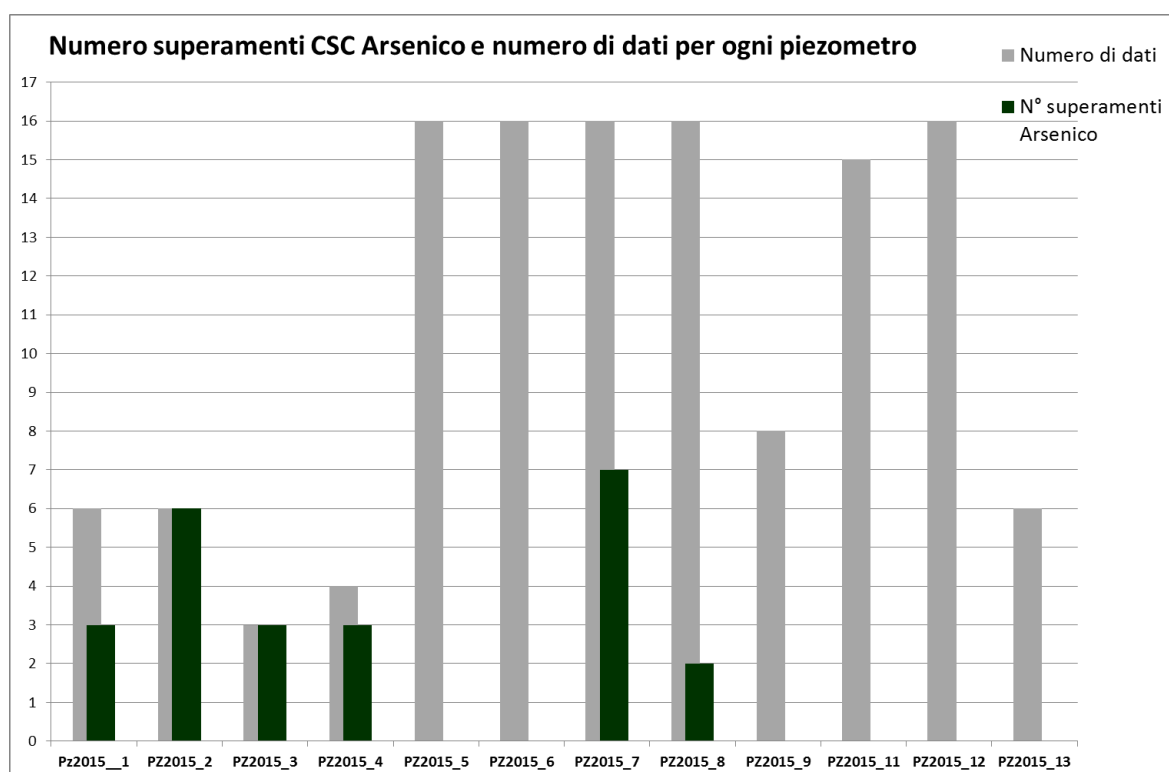


Figura 4.6 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Nichel in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

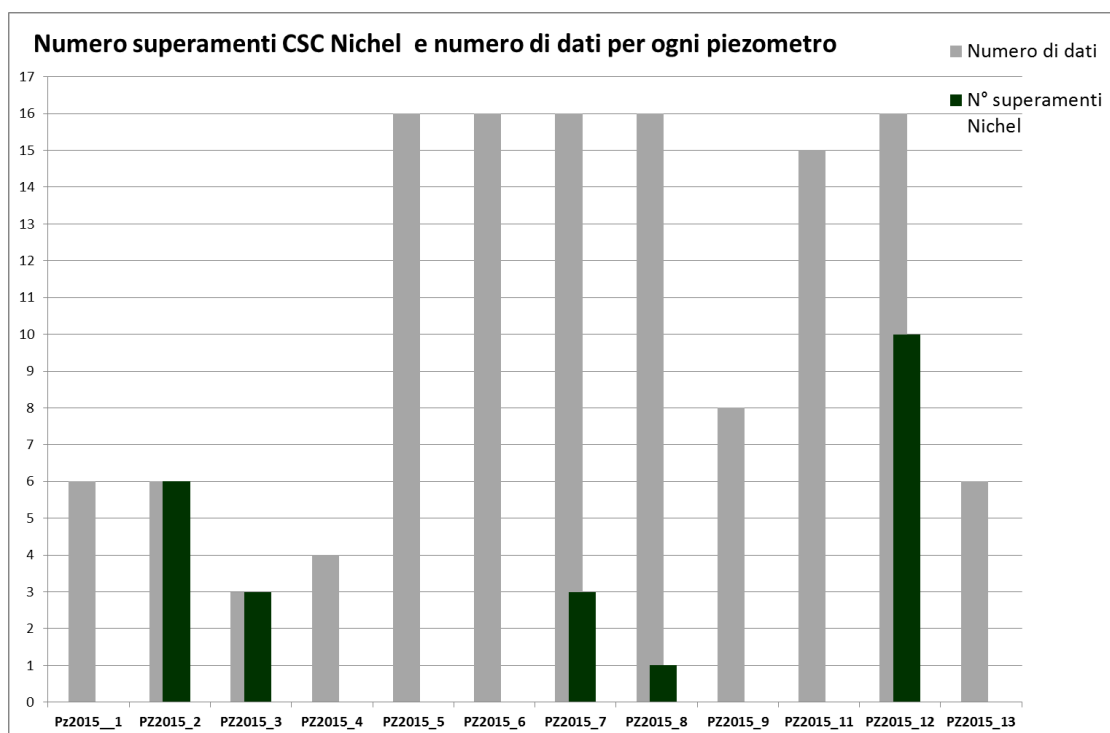


Figura 4.7 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Cadmio in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

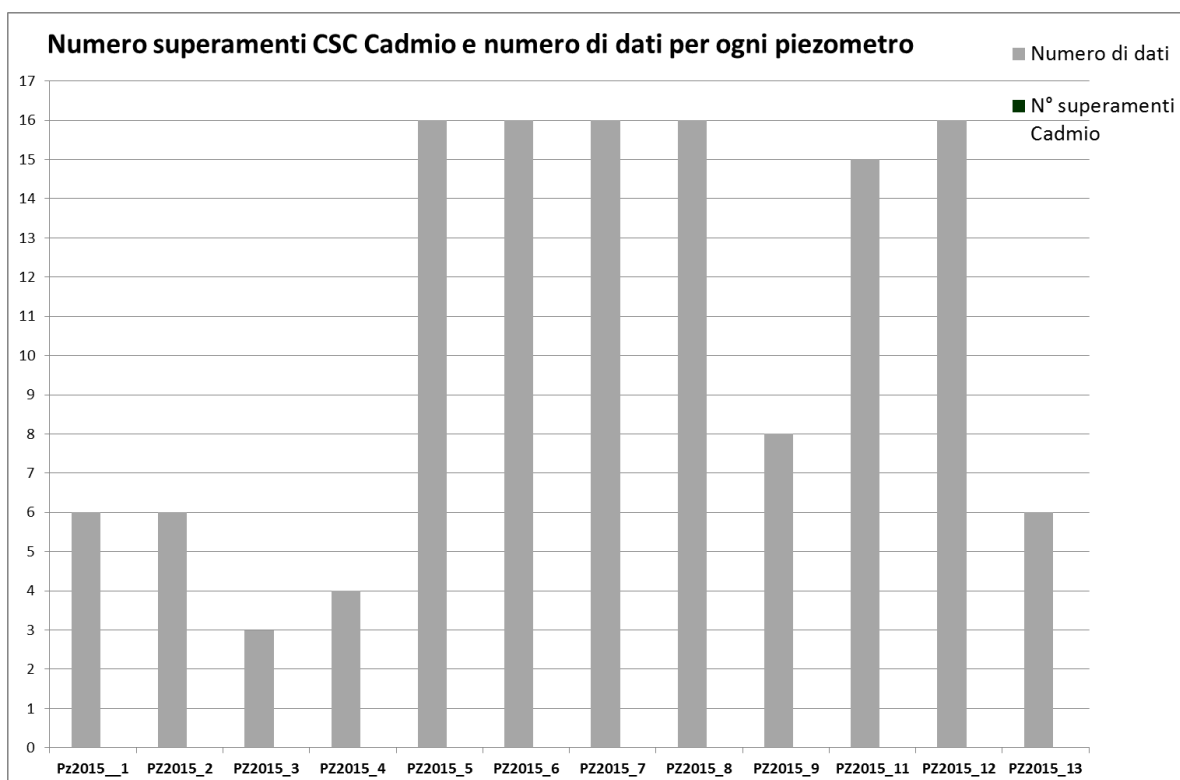


Figura 4.8 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Cianuri in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

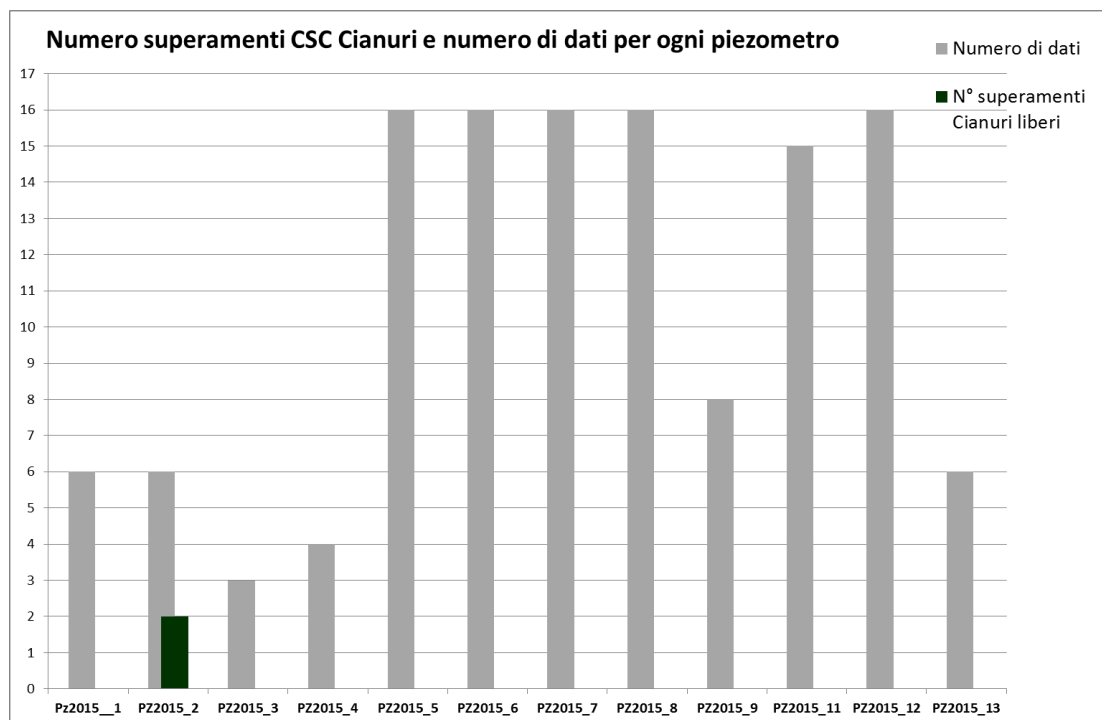


Figura 4.9 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Cromo Totale in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

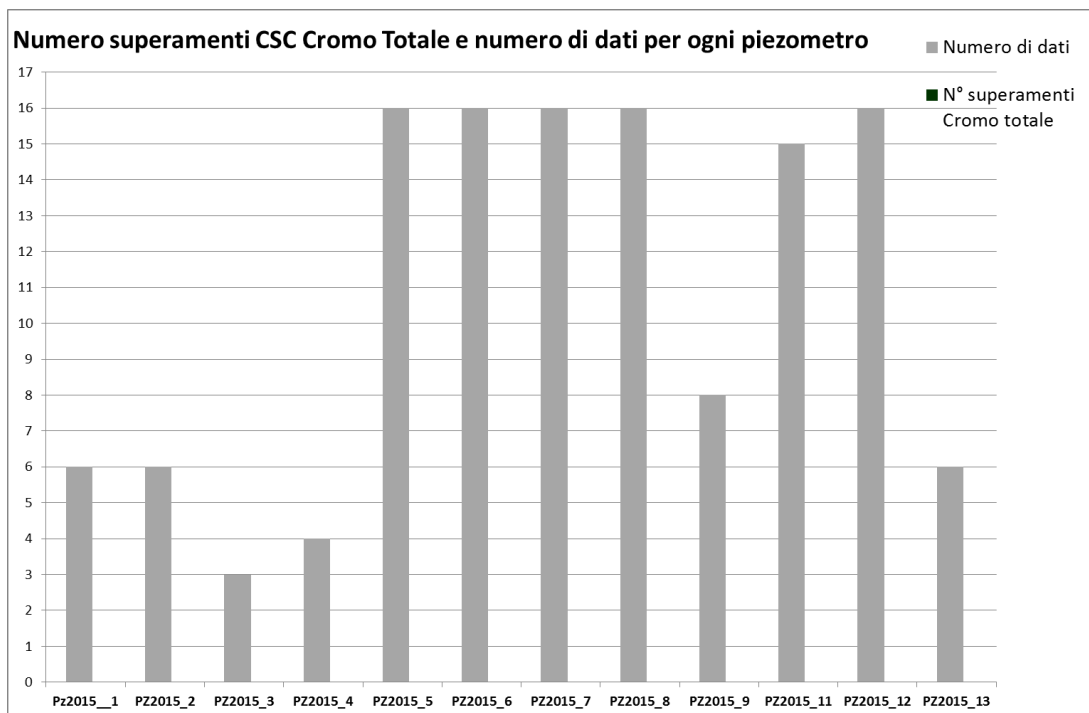


Figura 4.10 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Mercurio in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

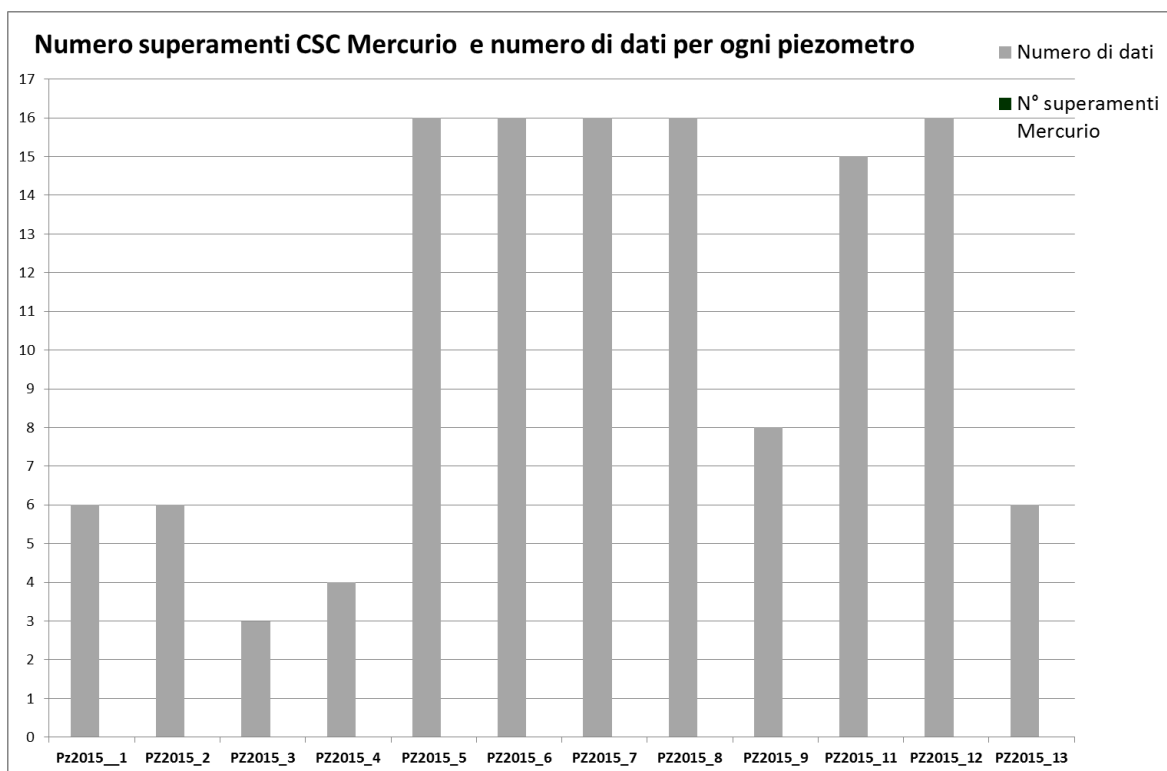


Figura 4.11 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Nitriti in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

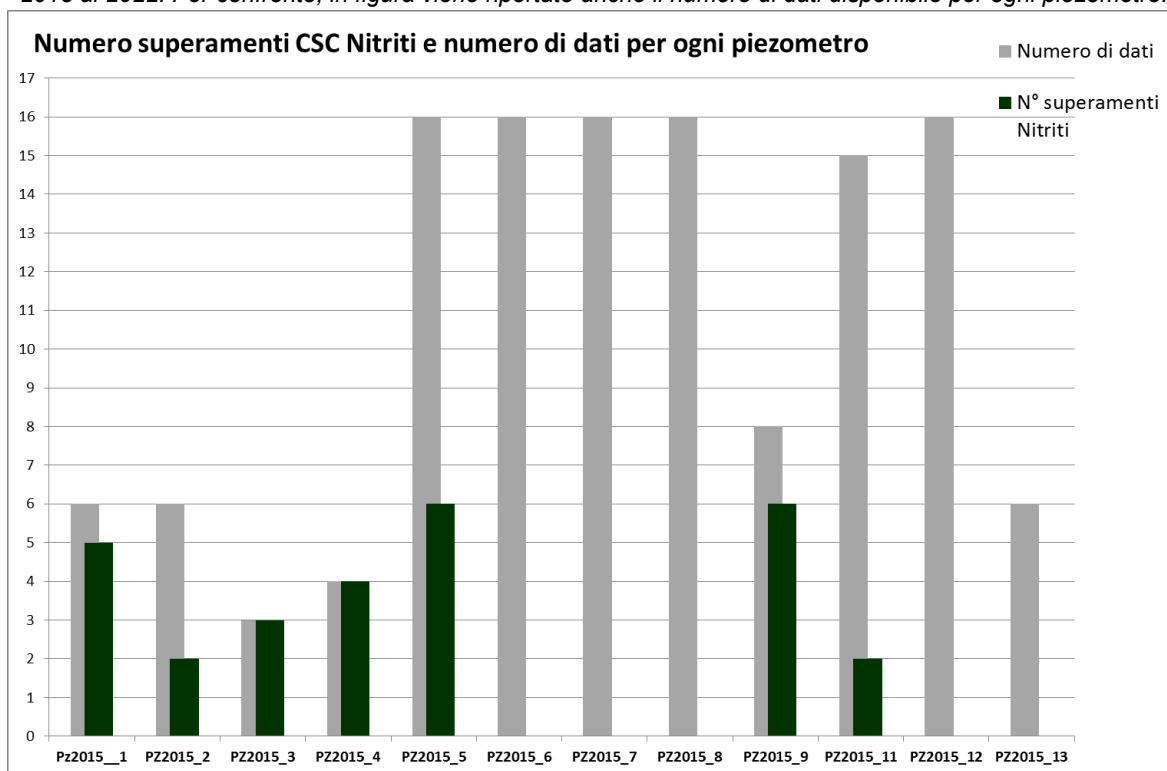




Figura 4.12 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Piombo in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

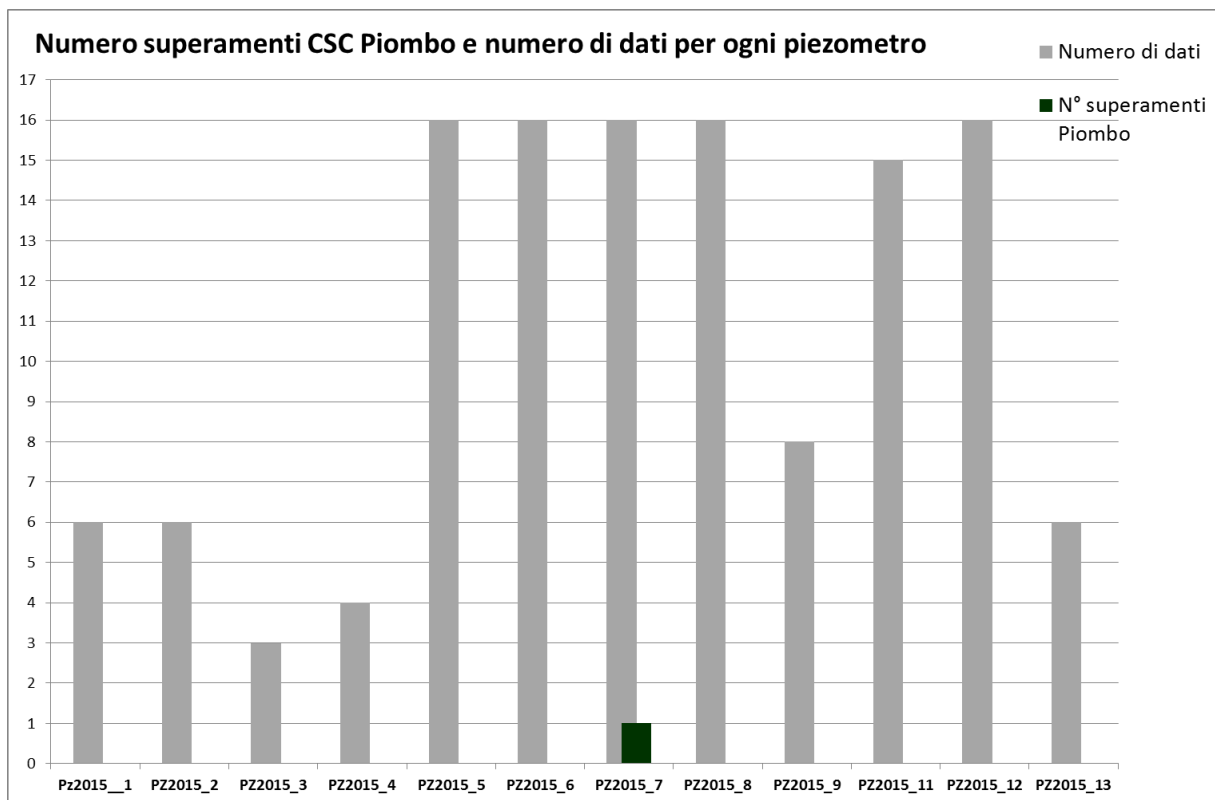


Figura 4.13 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Rame in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

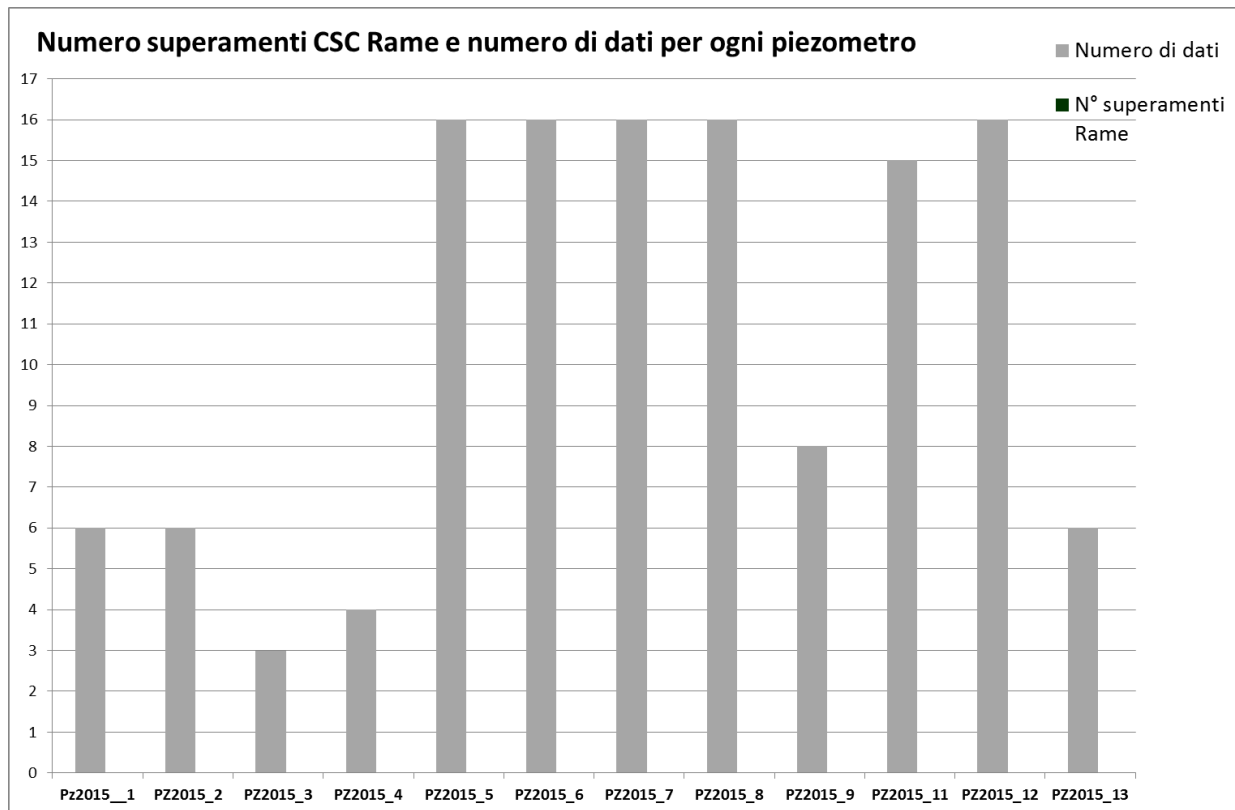


Figura 4.14 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Selenio in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

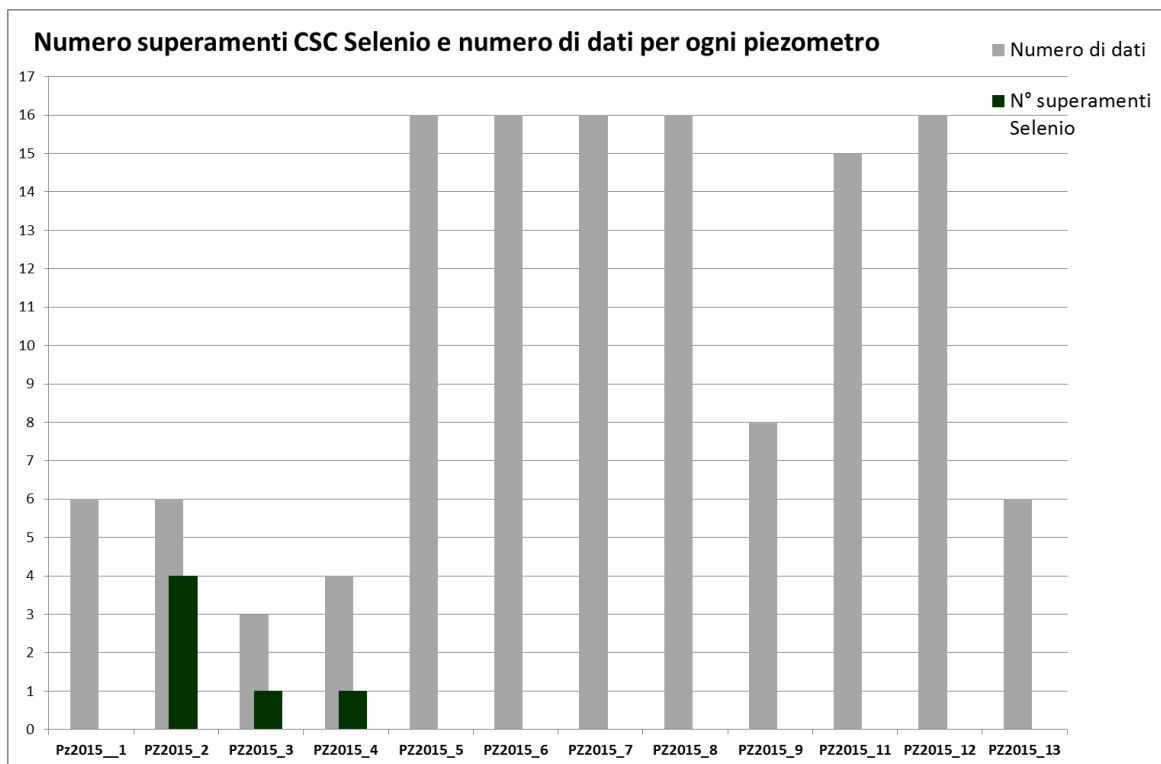
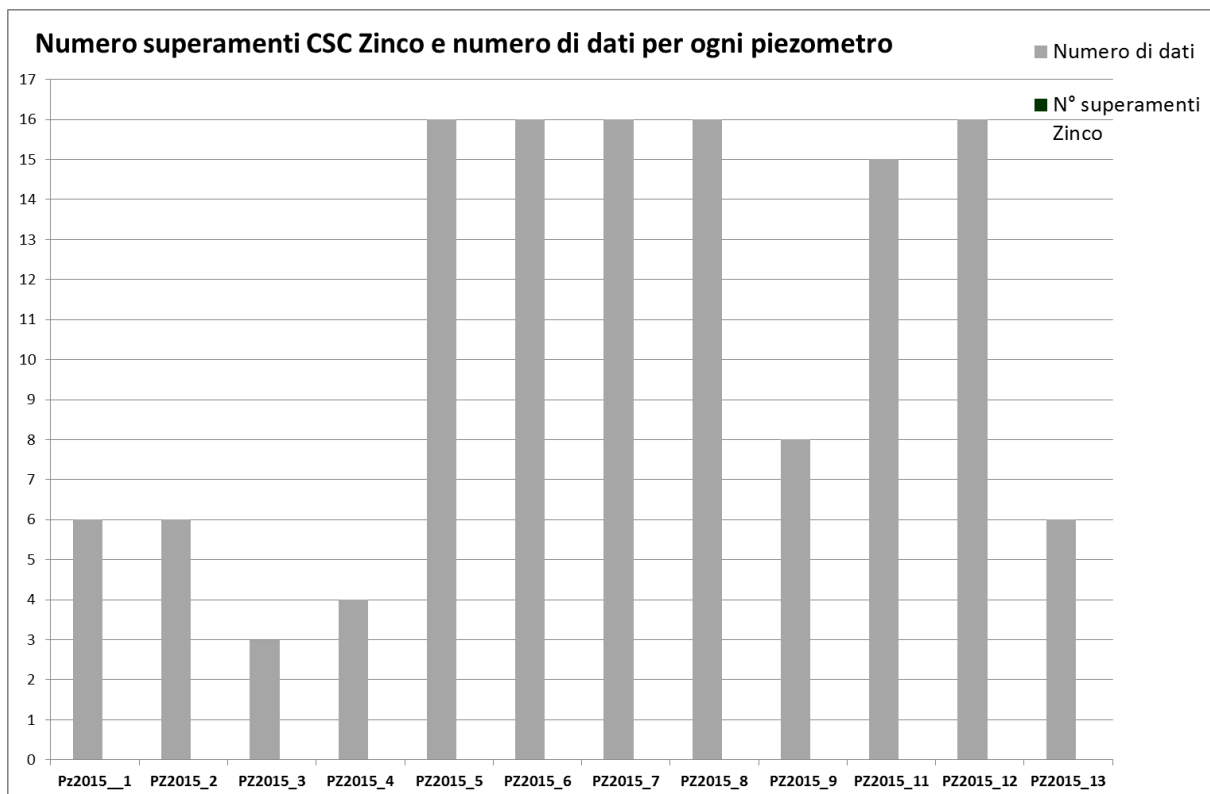


Figura 4.15 - Numero totale di superamenti delle CSC del parametro Zinco in ogni piezometro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.



Nelle figure seguenti vengono riportati grafici relativi a ciascun piezometro con indicazione dei superamenti delle CSC per ogni parametro.

Figura 4.16 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/5 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

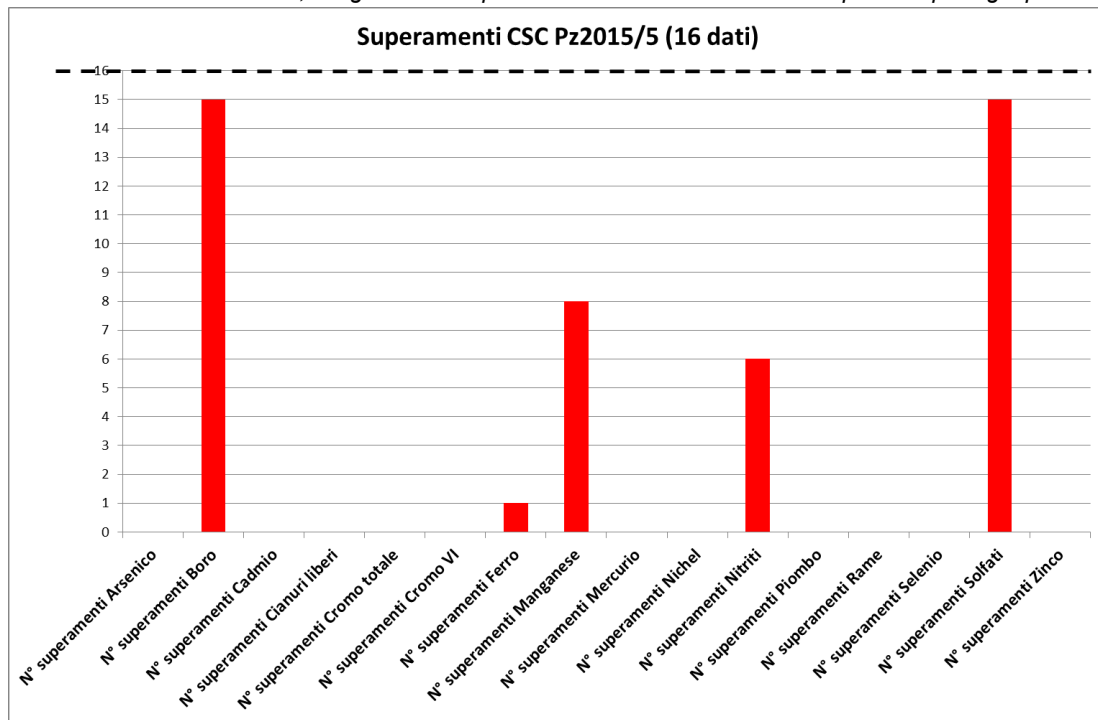


Figura 4.17 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/6 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

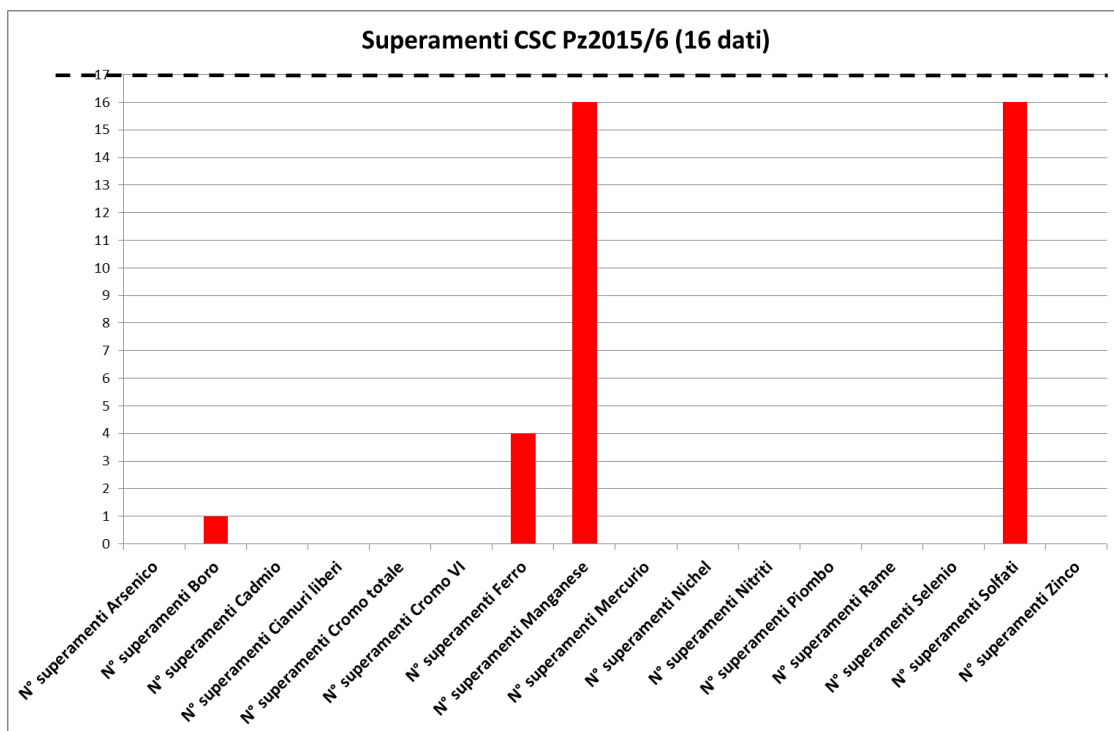


Figura 4.18 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/7 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

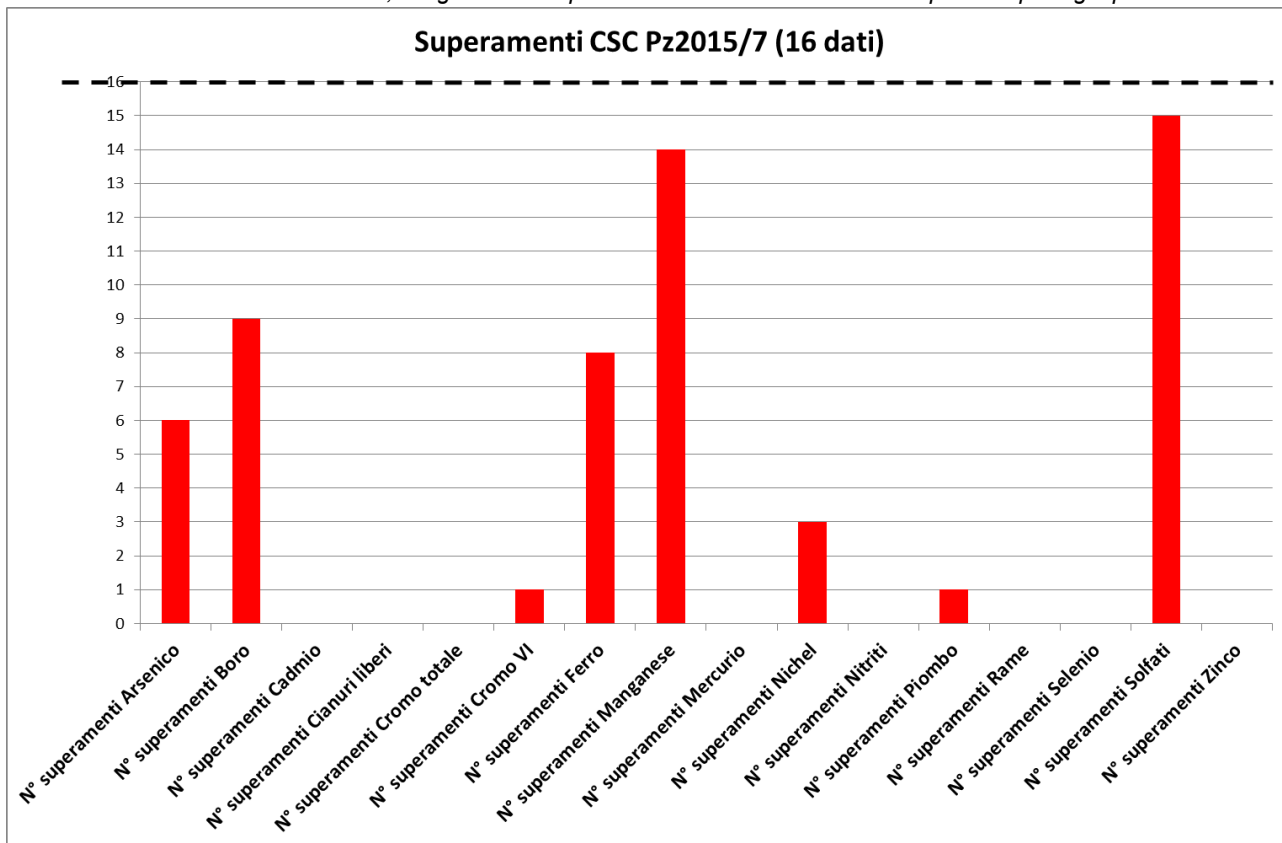


Figura 4.19 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/8 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

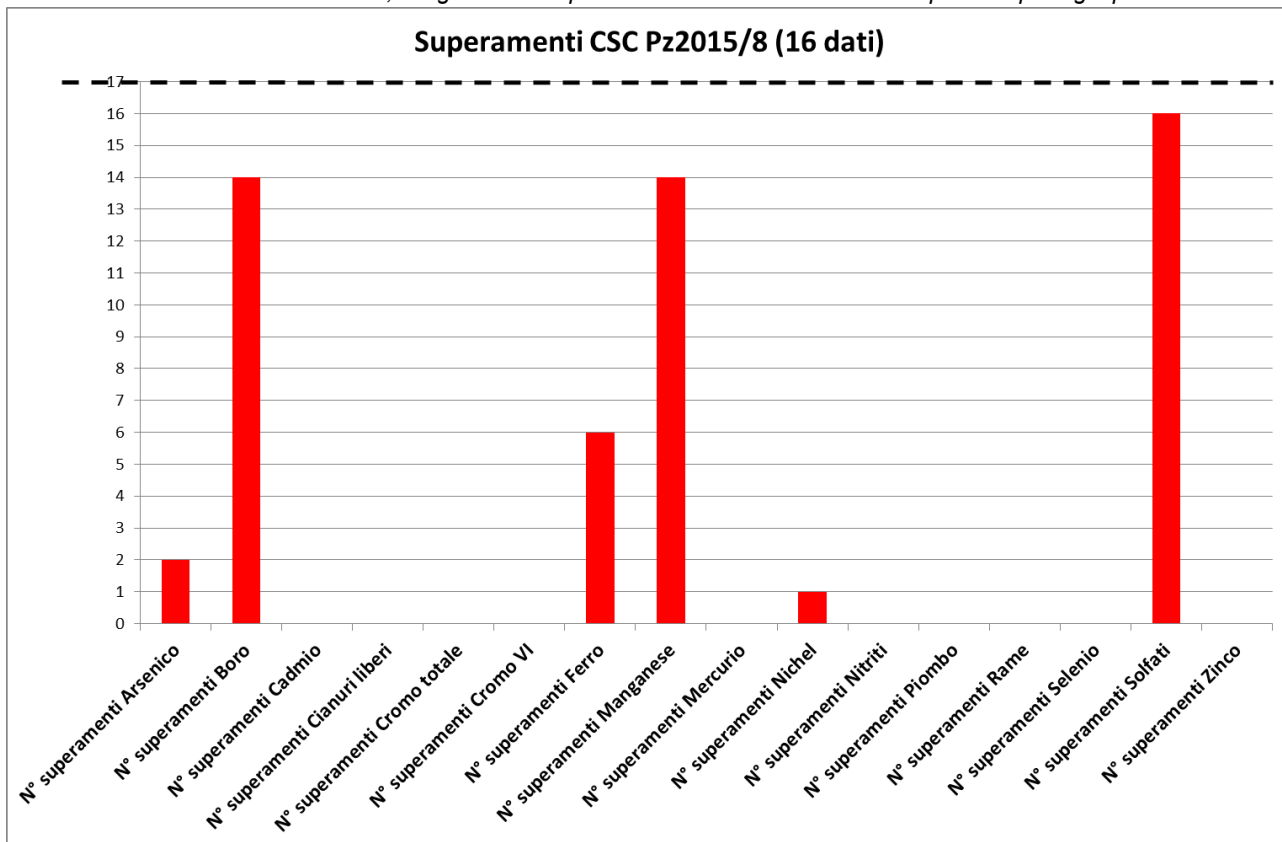


Figura 4.20 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/9 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

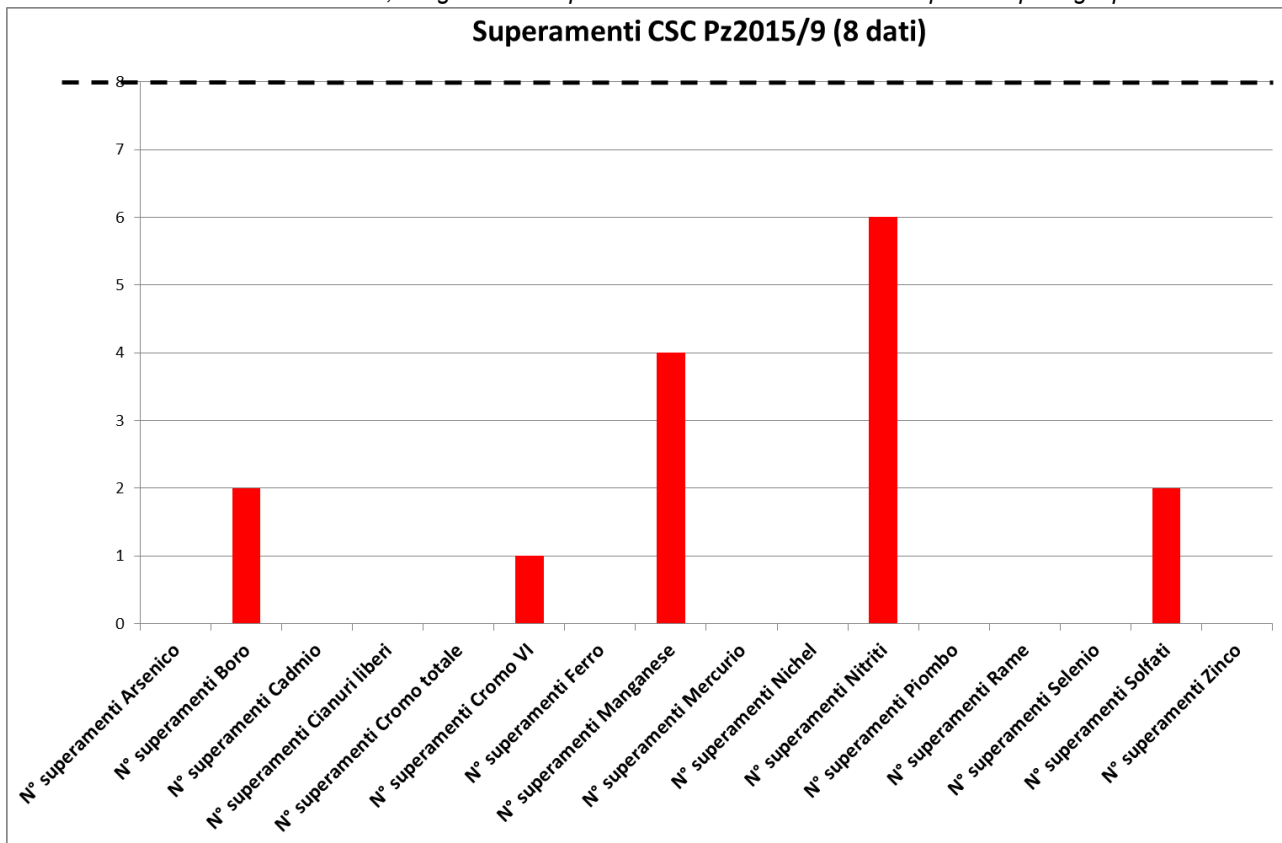


Figura 4.21 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/11 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

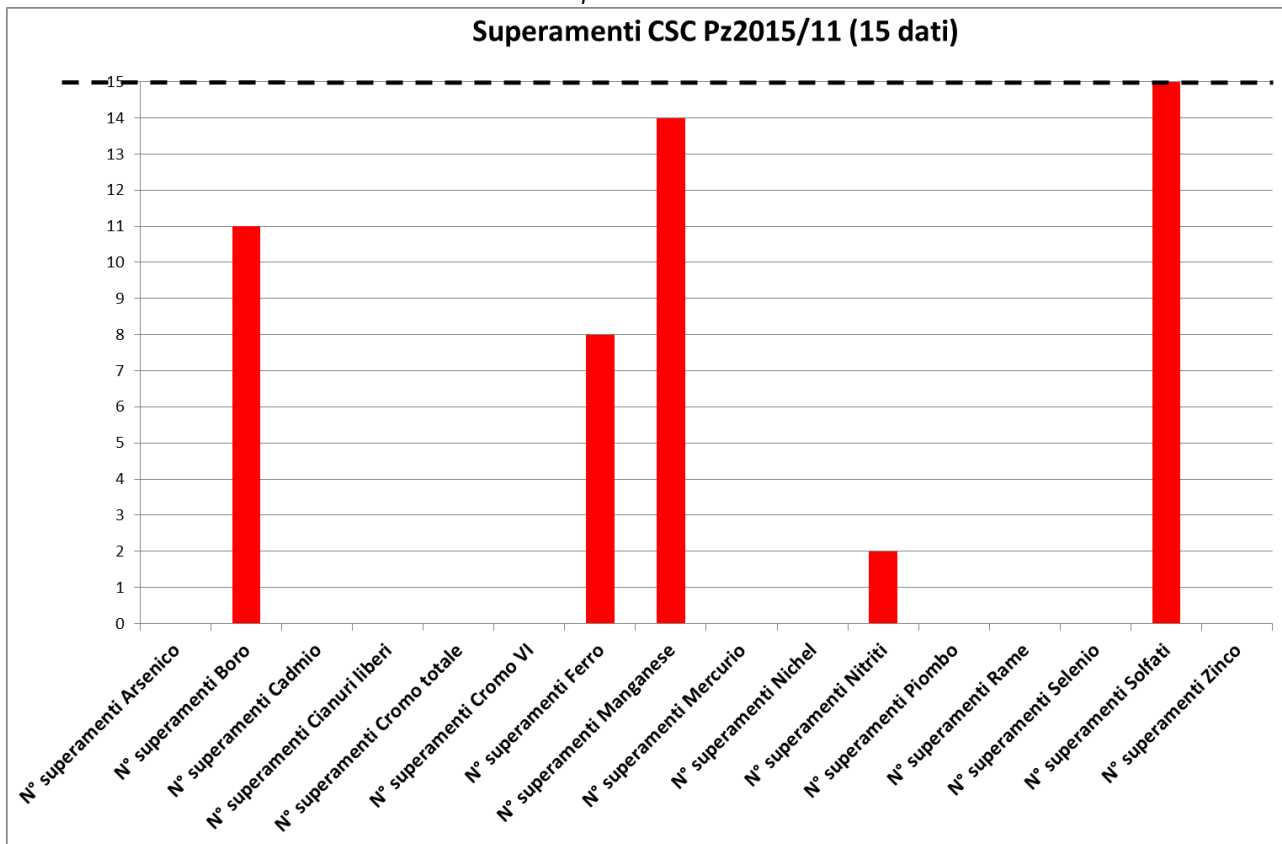


Figura 4.22 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/12 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.

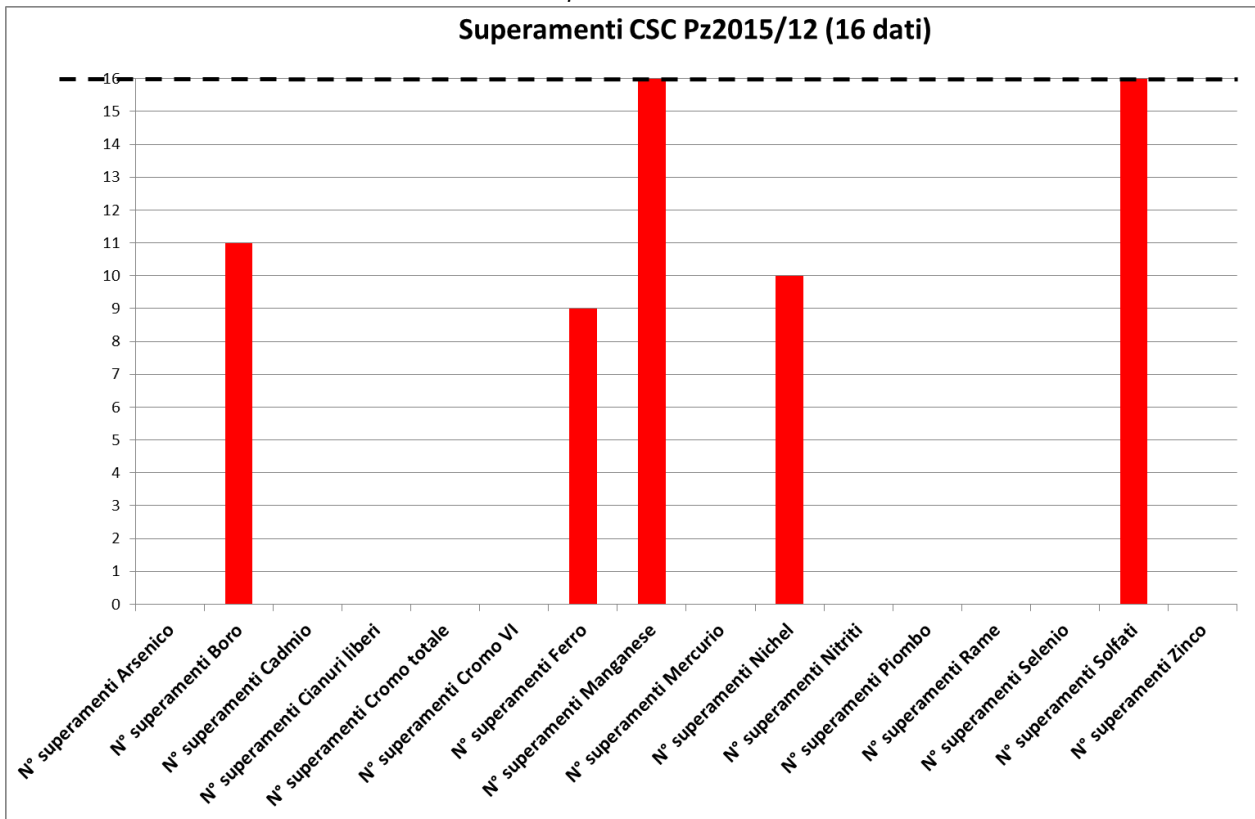
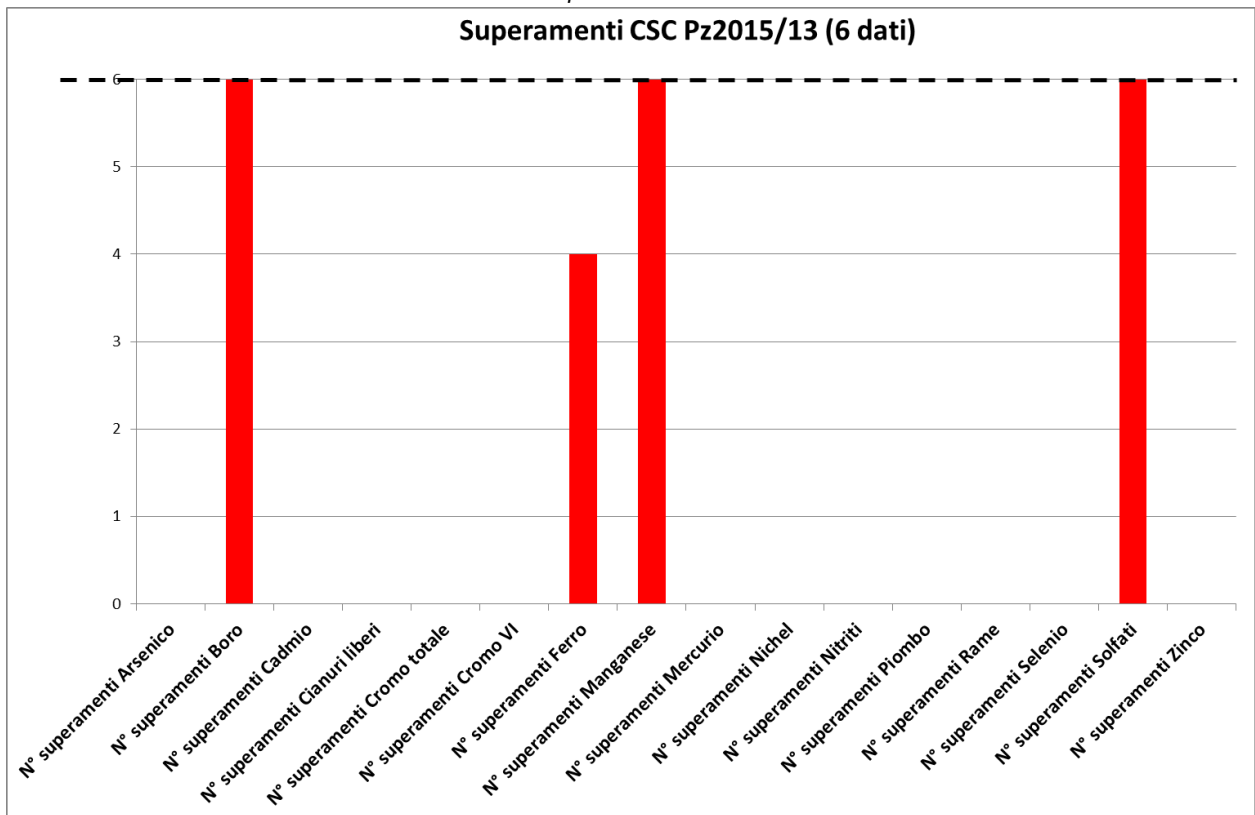
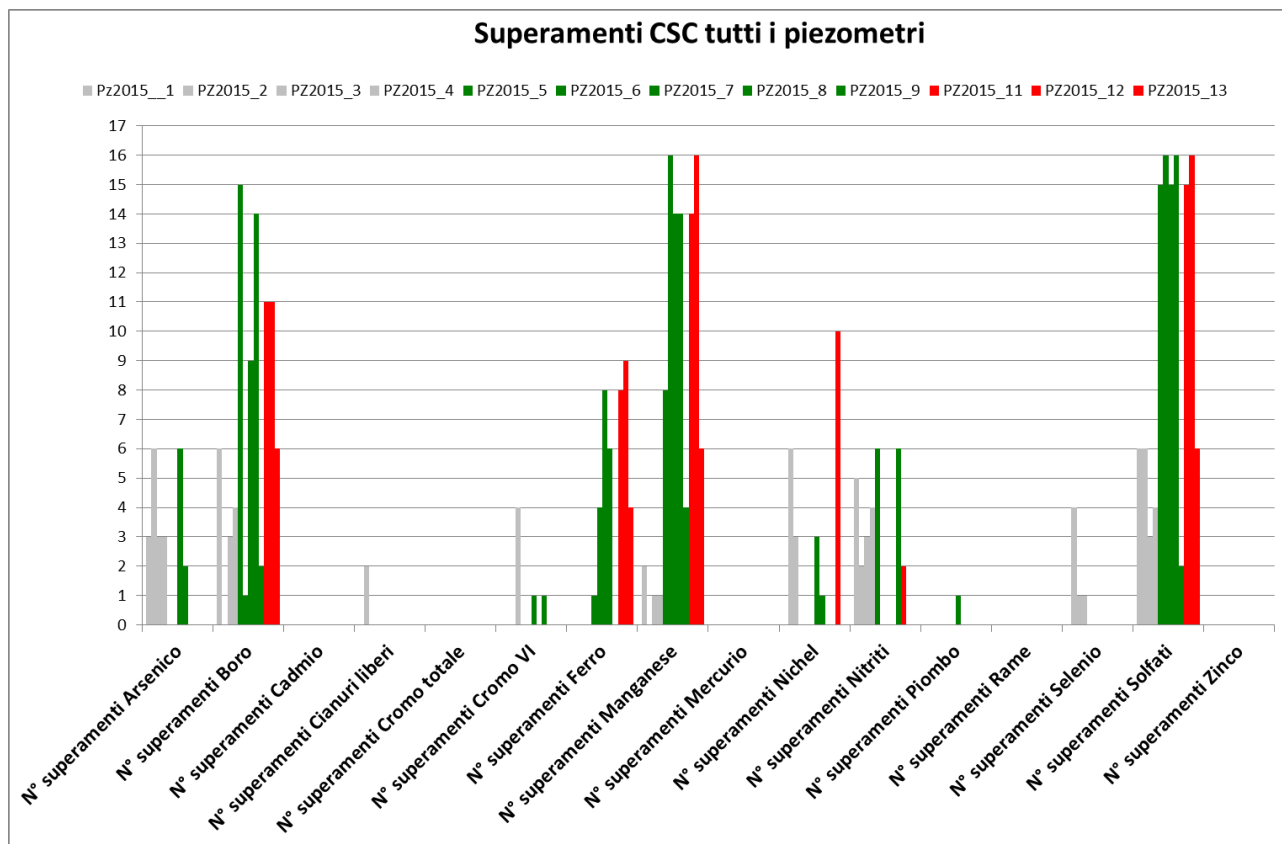


Figura 4.23 - Numero totale di superamenti delle CSC nel Piezometro PZ2015/13 per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022. Per confronto, in figura viene riportato anche il numero di dati disponibile per ogni piezometro.



Il grafico seguente mostra il numero totale di superamenti delle CSC per ogni piezometro e per ogni parametro in tutte le campagne: le diverse colorazioni attribuite mettono in evidenza eventuali criticità specifiche dei 3 diversi gruppi di piezometri.

Figura 4.24 - Numero totale di superamenti delle CSC per ogni piezometro e per ogni parametro in tutte le campagne dal 2015 al 2022: per semplicità di lettura, i piezometri dismessi sono rappresentati in grigio, i piezometri interni alla discarica sono rappresentati in verde e i piezometri esterni sono rappresentati in rosso.



Aggiornando i dati all'ultima campagna del 03/11/2022, si registrano i seguenti superamenti delle concentrazioni CSC:

#### **PIEZOMETRI INTERNI ALLA DISCARICA Pz 2015/5-6-7-8-9:**

- **SOLFATI:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri in quasi tutte le campagne, ad eccezione di Pz2015/9 che mostra superamenti esclusivamente nelle prime 2 campagne di misura del 2016;
- **MANGANESE:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri in quasi tutte le campagne: i piezometri Pz2015/5 e Pz2015/9 mostrano un numero di superamenti più contenuto rispetto agli altri piezometri;
- **FERRO:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri ad eccezione del piezometro Pz2015/9. Il piezometro Pz2015/5 mostra un solo superamento.
- **BORO:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri in quasi tutte le campagne: i piezometri Pz2015/6 e Pz2015/9 mostrano un numero di superamenti più contenuto rispetto agli altri piezometri;

- **ARSENICO:** si registra un numero contenuto di superamenti delli CSC nei piezometri Pz 2015/7 e Pz2015/8.
- **NICHEL:** si osservano alcuni superamenti nei piezometri Pz2015/7 e Pz2015/8.
- **NITRITI:** si osservano alcuni superamenti nei piezometri Pz2015/5 e Pz2015/9.

**PIEZOMETRI ESTERNI ALLA DISCARICA** (PZ2016/11-12-13), adiacenti al Rio Rondinella:

- **SOLFATI:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri in tutte le campagne;
- **MANGANESE:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri in quasi tutte le campagne;
- **FERRO:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri, principalmente al partire dal 2017.
- **BORO:** si osservano superamenti delle CSC in tutti i piezometri.
- **NICHEL:** si osservano superamenti nel solo piezometro Pz2015/12.
- **NITRITI:** si osservano superamenti nel solo piezometro Pz2015/11.

Per gli analiti ritenuti di maggiore interesse, nelle Figure da 4.25 a 4.31 si riporta il dettaglio grafico dell'andamento delle concentrazioni registrate da Arpae sulle acque sotterranee e sul percolato nel periodo dal novembre 2015 a novembre 2022.

In Figura 4.28, 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 4.25 Concentrazioni di solfati in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – giugno 2022)

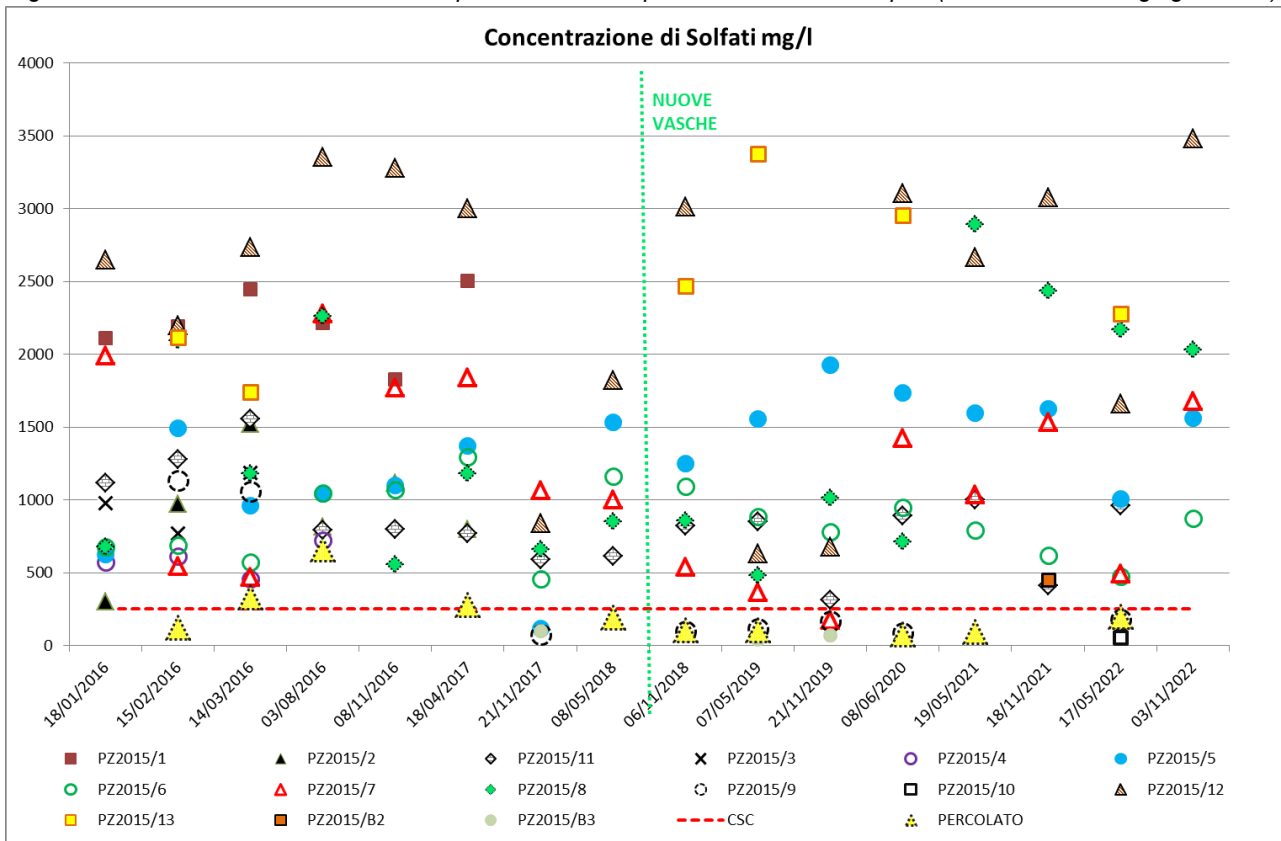


Figura 4.26 Concentrazioni di Manganese in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (2015-2022)

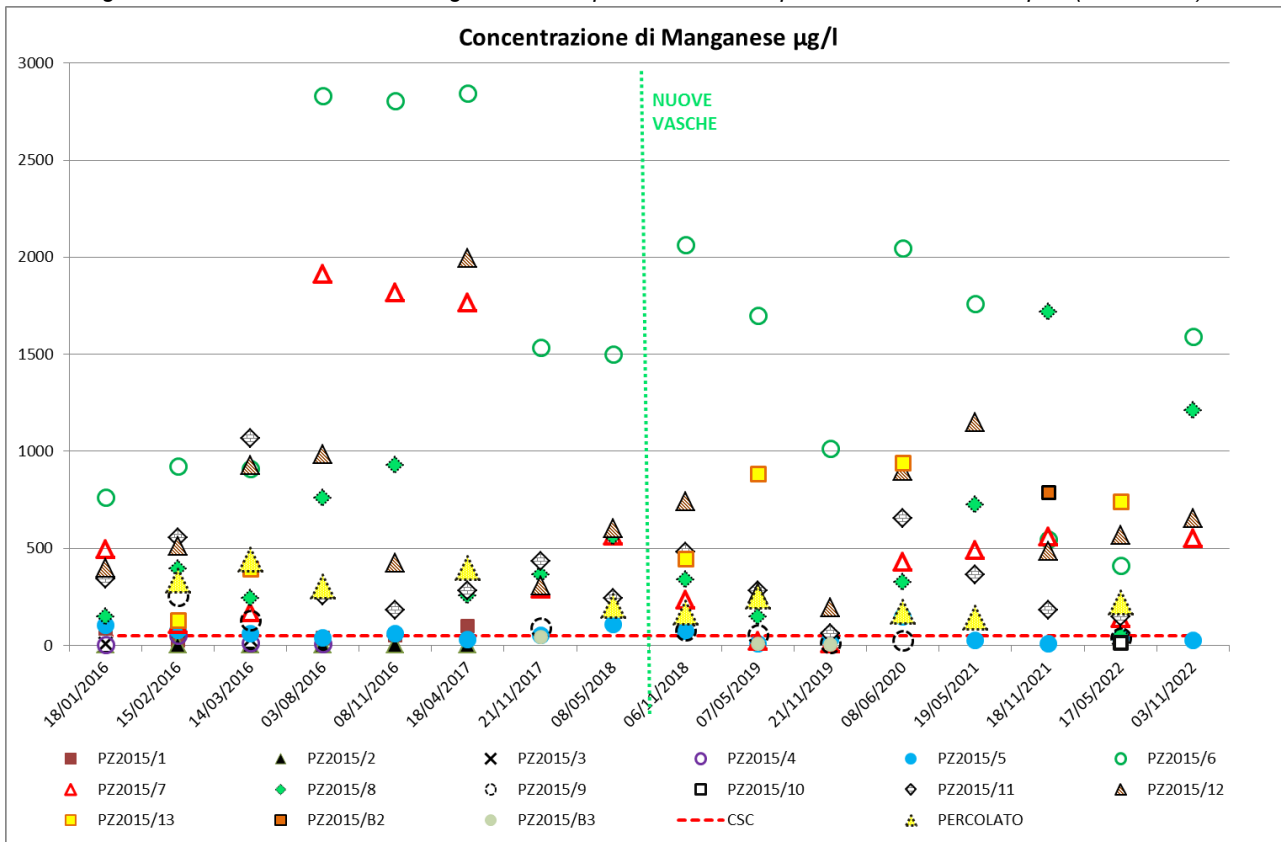


Figura 4.27 Concentrazioni di boro in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (2015 – 2022)

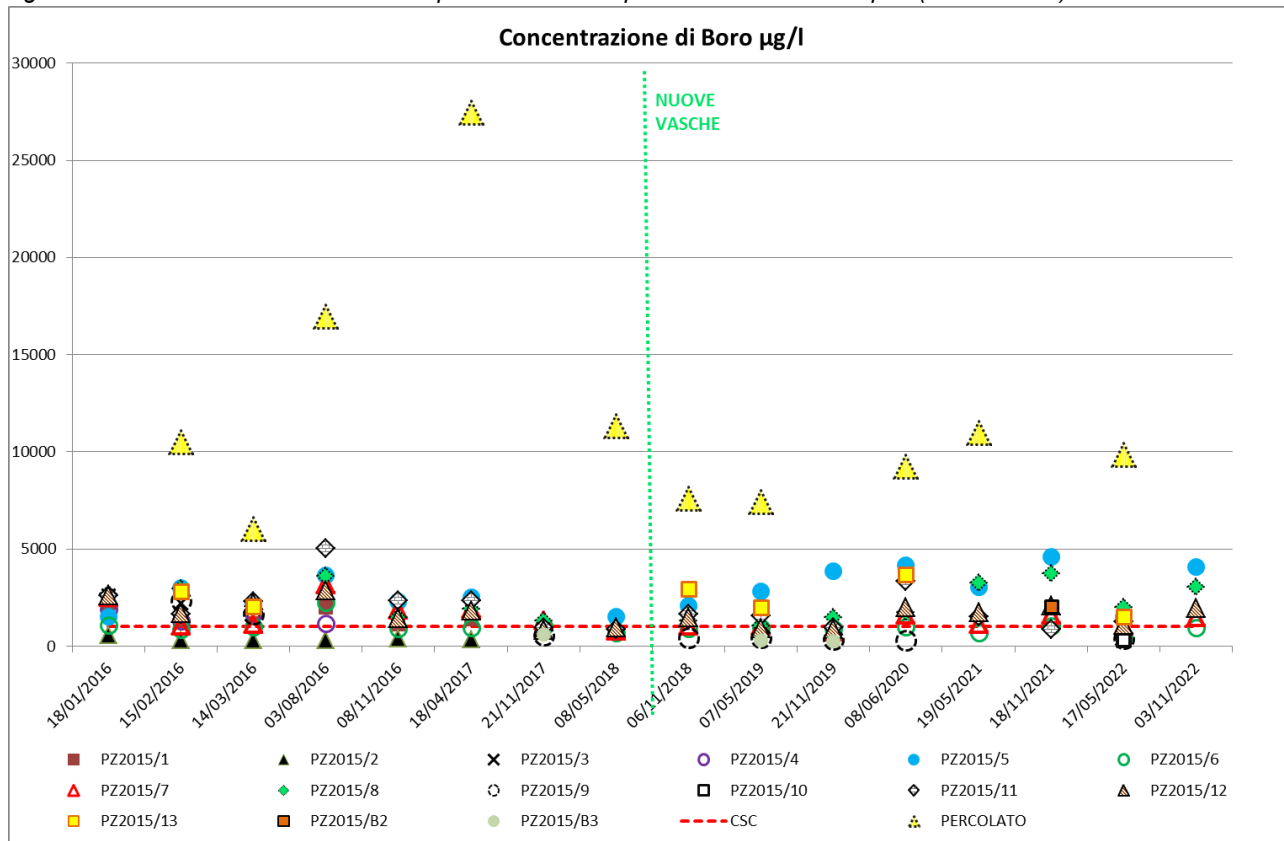


Figura 4.28 Concentrazioni di Ferro in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (novembre 2015 – novembre 2022). Per ragioni di rappresentazione grafica, è stata esclusa la concentrazione di ferro rilevata in data 18/4/2017 sul percolato, già segnalata come potenziale outlier.

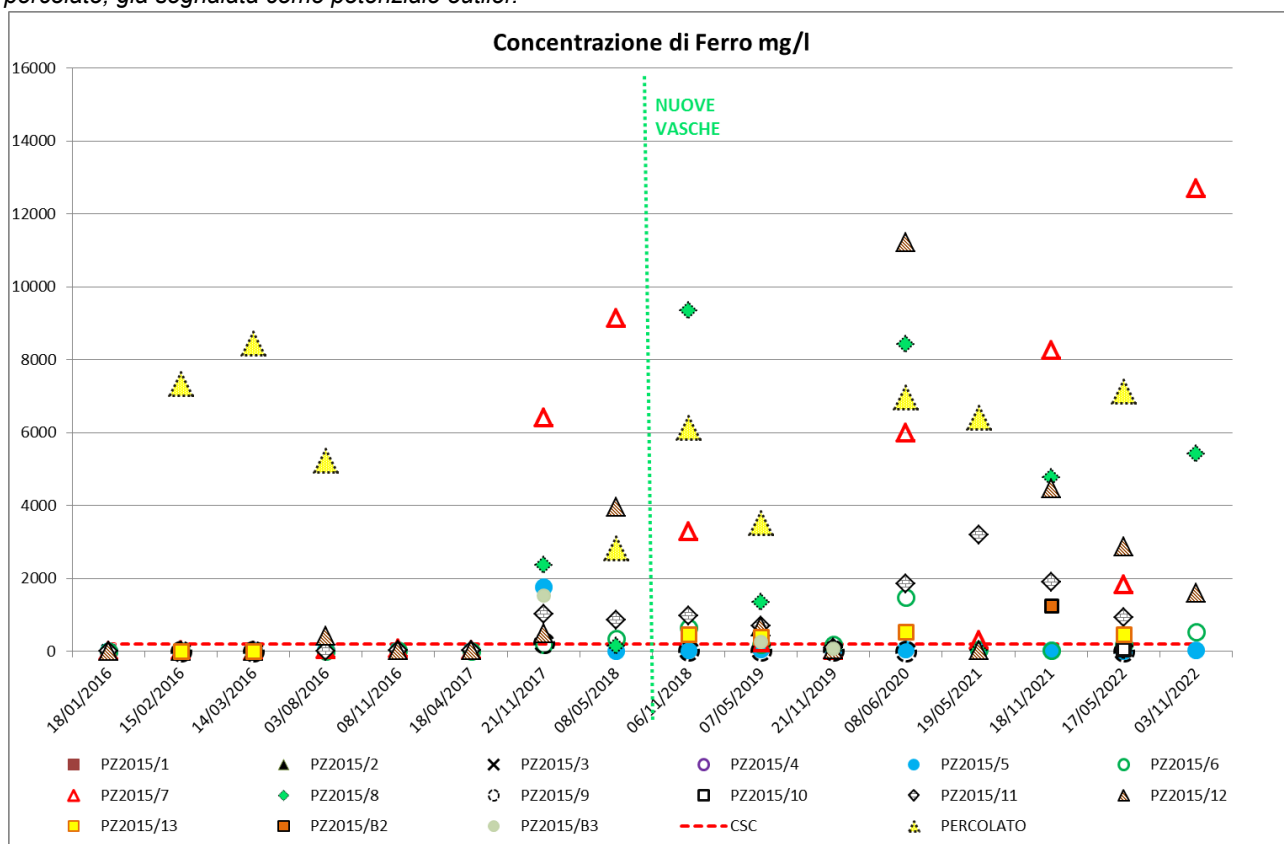


Figura 4.29 Concentrazioni di Nitriti in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (2015 –2022)

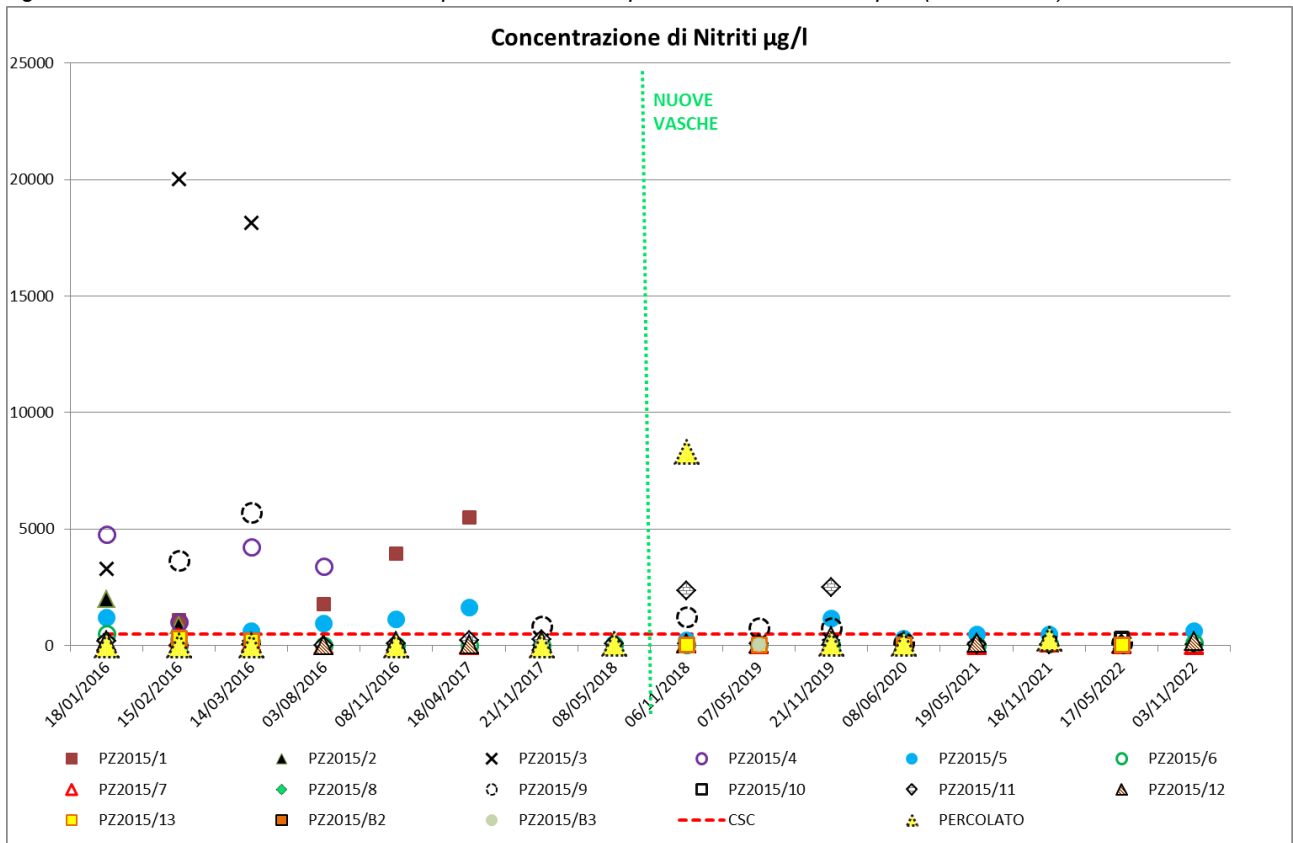


Figura 4.30 Concentrazioni di Nichel in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (2015 – 2022)

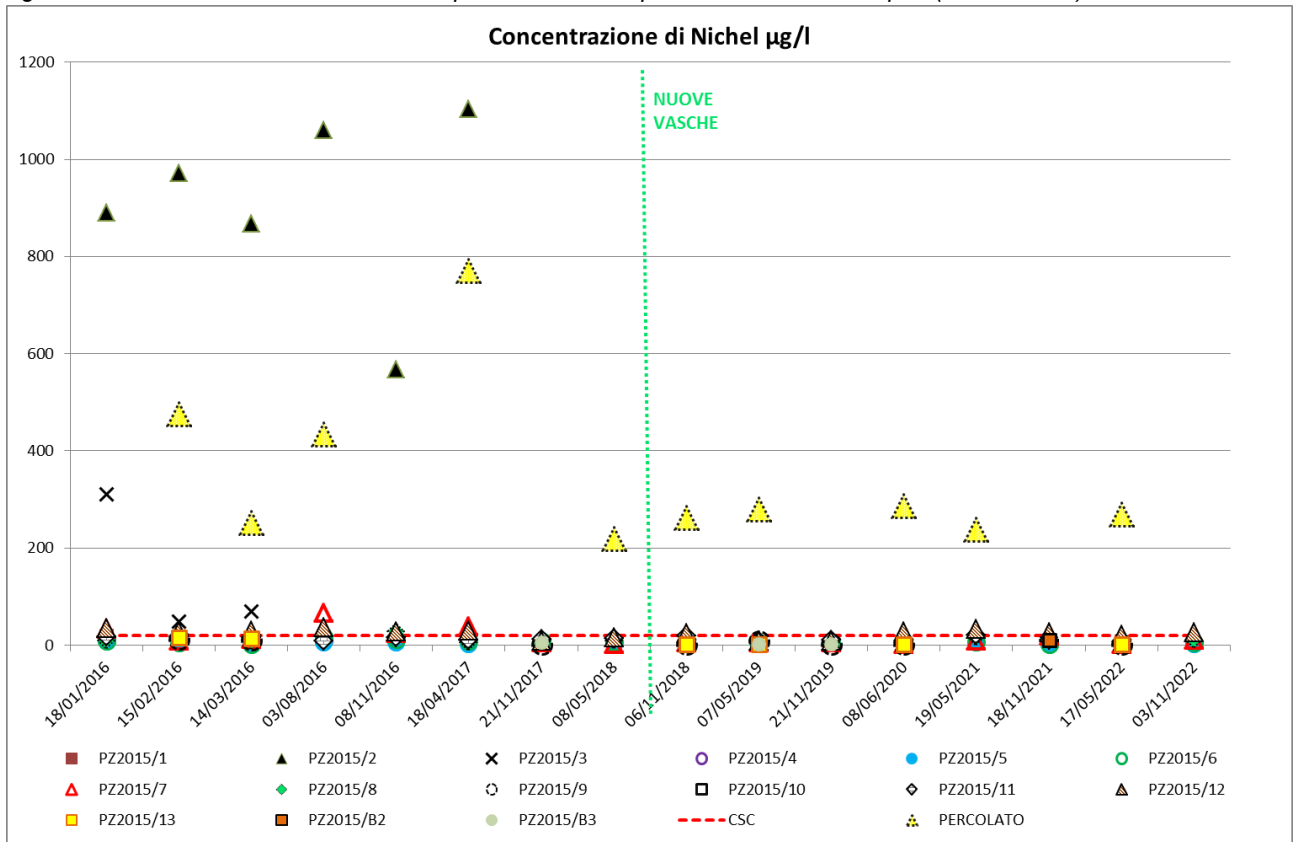
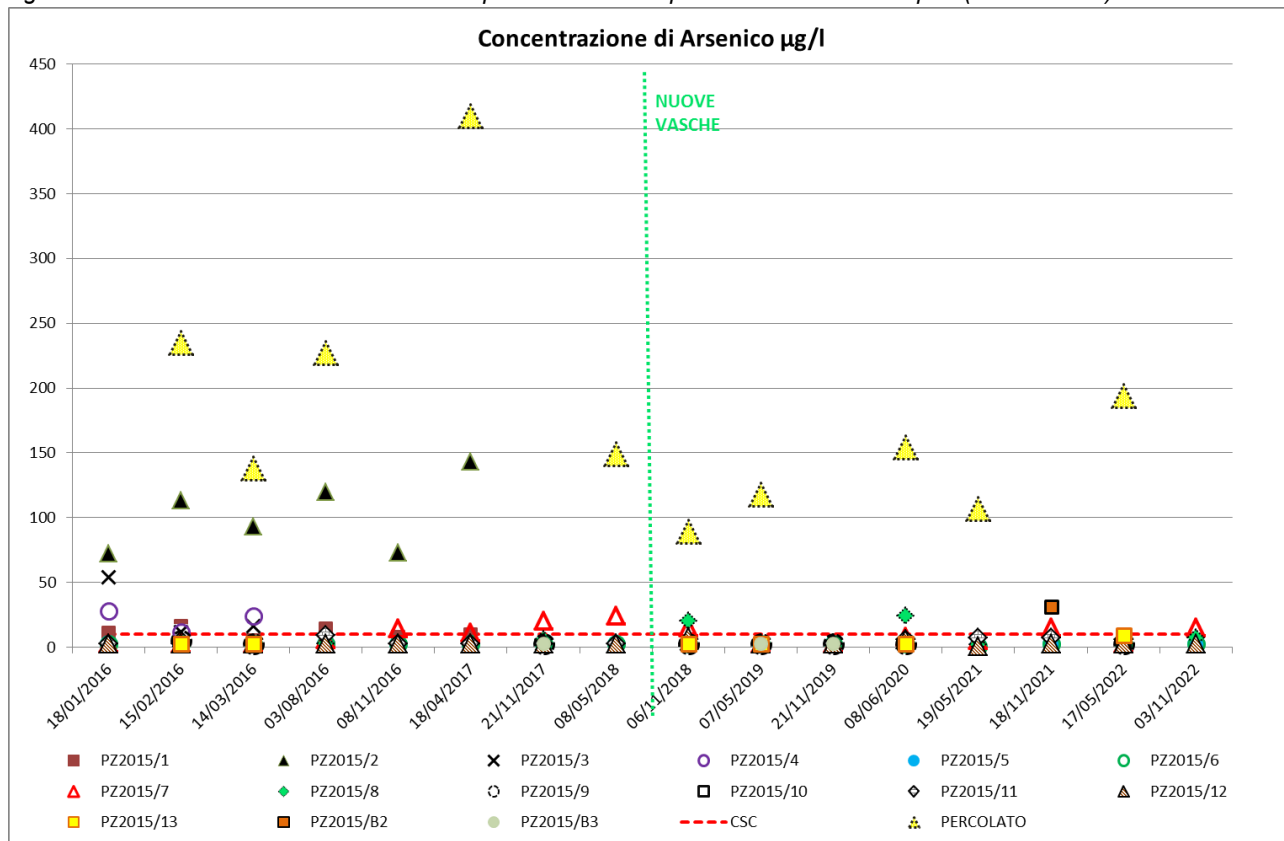


Figura 4.31 Concentrazioni di Arsenico in acque sotterranee e percolato rilevate da Arpae (2015 – 2022)



Nei paragrafi che seguono, si riportano gli esiti delle elaborazioni statistiche del data set, con test M-K ai fini della valutazione del trend.

In accordo alle Linee Guida nazionali (SNPA, 2018), ai fini delle elaborazioni statistiche:

- alle osservazioni con concentrazione inferiore al limite di rilevabilità (Limit of Detection, LOD) o di quantificazione (Limit of Quantification, LOQ) del metodo analitico viene assegnato un valore di concentrazione pari a metà del corrispondente limite ( $\frac{1}{2}$  LOD,  $\frac{1}{2}$  LOQ);
- in via cautelativa non sono stati esclusi dal dataset i potenziali *outliers*.

L'analisi delle serie storiche è stata effettuata con test M-K, in analogia a quanto effettuato per i parametri markers, con applicazione del software "ProUCL 5.1" sviluppato da EPA - United States Environmental Protection Agency.

## 4.1. Solfati

In Tabella 4.1. 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 monitoraggio dal novembre 2015 a novembre 2022. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per i solfati pari a 250 mg/L.

Tabella 4.1. 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	2216	2202	1828	2504	244
Pz2015/2	920	894	301	1519	402
Pz2015/3	978	979	769	1186	209
Pz2015/4	590	591	455	723	111
Pz2015/5	1281	1431	115	1926	460
Pz2015/6	840	833	457	1295	251
Pz2015/7	1136	1048	171	2280	663
Pz2015/8	1378	1097	478	2893	794
Pz2015/9	364	141	73	1131	452
Pz2016/11	851	822	315	1553	316
Pz2016/12	2387	2700	631	3483	975
Pz2016/13	2489	2374	1743	3374	590
Pz2015/B2 18.11.21	452	-	-	-	-
Pz2015/B3	70	69	42	100	29
Percolato	215	153,5	75	659	177

Da Tabella 4.1. emergono, per tutti i piezometri, concentrazioni medie di solfati 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 4.2 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di solfati per i piezometri di monitoraggio.

Tabella 4.2. 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	Nessun trend significativo
Pz2016/11	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Dalla tabella 4.2 emerge un trend di concentrazioni di solfati in aumento per il piezometro Pz2015/5: tuttavia, il trend evidenziato non viene avvalorato dall'andamento dei reali marker del percolato che, contestualmente, evidenziano trend in diminuzione (nicel e azoto ammoniacale) o nessun trend (potassio), escludendo quindi possibili contaminazioni.

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.

Un'ipotesi sulla causa del trend dei solfati in aumento 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 4.3 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 nel periodo dal novembre 2015 a novembre 2022. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per il manganese pari a 50 µg/L.

Tabella 4.3 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	43	24	98	25
Pz2015/2	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
Pz2015/3	38	30	7	76	35
Pz2015/4	18	9	<LOQ	53	23
Pz2015/5	56	47	10	149	39
Pz2015/6	1578	1563	412	2847	795
Pz2015/7	597	459	9	1913	641
Pz2015/8	514	351	54	1719	457
Pz2015/9	86	68	14	255	78
Pz2016/11	369	284	62	1065	250
Pz2016/12	695	584	195	1995	442
Pz2016/13	589	593	128	939	318
Pz2015/B2 18.11.21	788	-	-	-	-
Pz2015/B3	19	8	6	44	21
Percolato	265	238	145	443	102

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 4.4 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di manganese.

Tabella 4.4 Test M-K – parametro manganese

	Trend Manganese
Pz2015/5	Trend in diminuzione
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	Trend in diminuzione
Pz2016/11	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Da tabella 4.4 emergono trend in diminuzione per i piezometri PZ2015/5 e 9 e non emerge alcuna tendenza significativa di crescita nelle concentrazioni di manganese, per nessuno dei piezometri analizzati.

### 4.3. Boro

In Tabella 4.5 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 monitoraggio nel periodo dal novembre 2015 al giugno 2020. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per il boro pari a 1000 µg/L.

Tabella 4.5 Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro boro

	Boro ( $\mu\text{g/L}$ ) – CSC: 1000 $\mu\text{g/L}$				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	1590	1422	1137	2200	412
Pz2015/2	371	332	291	578	106
Pz2015/3	2235	2219	1887	2600	357
Pz2015/4	1514	1486	1186	1900	331
Pz2015/5	2728	2665	907	4586	1108
Pz2015/6	987	946	521	2248	366
Pz2015/7	1461	1214	757	3164	646
Pz2015/8	2152	1961	840	3734	933
Pz2015/9	807	435	293	2328	760
Pz2016/11	1950	1661	856	5033	1119
Pz2016/12	1658	1698	838	2844	622
Pz2016/13	2510	2430	1529	3698	797
Pz2015/B2 18.11.21	2048	-	-	-	-
Pz2015/B3	388	299	243	623	205
Percolato	11729	10179	6011	27444	6277

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, Pz2015/6 e Pz2015/9, che mostrano concentrazioni inferiori.

In Tabella 4.6 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di boro.

Tabella 4.6 Test M-K – parametro boro

	Trend Boro
Pz2015/5	Trend in aumento
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	Trend in diminuzione
Pz2016/11	Trend in diminuzione
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Da tabella 4.6 emerge una tendenza in aumento nelle concentrazioni di boro per il piezometro Pz2015/5.



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  $\delta^{11}\text{B}$ , 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 4.32.

Attraverso la relazione tra  $\delta^{11}\text{B}$  ed il rapporto B/Cl, riportata graficamente in Figura 4.33, 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 4.32 Valori determinazioni isotopiche di  $\delta^{11}\text{B}$  (‰) nelle acque sotterranee e percolato in marzo 2016.

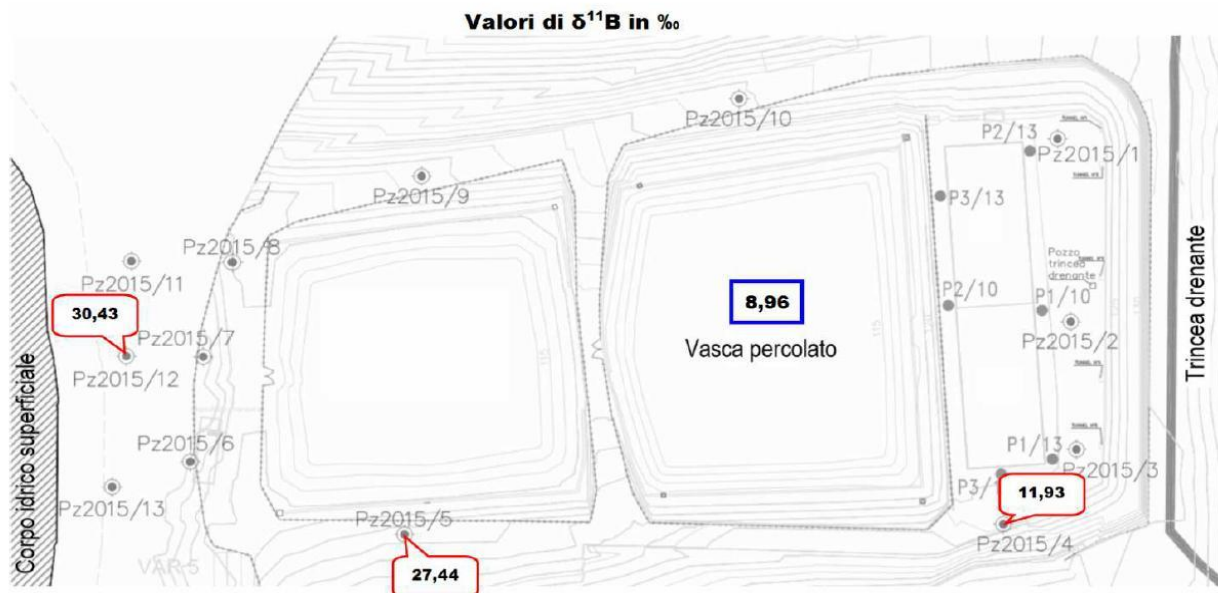
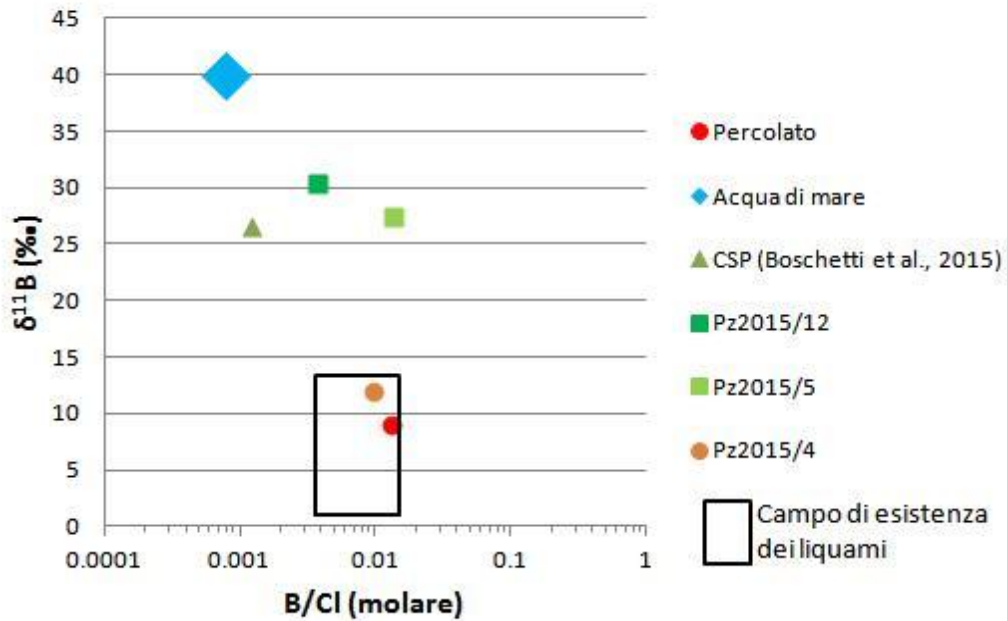


Figura 4.33 Rapporto B/Cl vs  $\delta^{11}\text{B}$  nelle acque sotterranee, nel percolato e in dati bibliografici



#### 4.4. Ferro

Si premette che l'analisi preliminare dei dati di monitoraggio mostra 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 in tutti i piezometri di monitoraggio.

Individuando tale circostanza come "spartiacque", al fine di elaborare data set omogenei, le valutazioni sono state effettuate per i due periodi: dal 25/11/2015 al 18/04/2017 e dal 21/11/2017 al 03/11/2022.

In Tabella 4.7 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 03/11/2022. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per il ferro, pari a 200  $\mu\text{g/L}$ .

Tabella 4.7 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 03/11/2022				
	media	mediana	min	max	dev st	media	mediana	min	max	dev st
PZ2015/1	7	6	<LOQ	18	6	dism*.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/2	24	25	6	46	14	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/3	10	9	5	17	6	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/4	15	10	6	33	13	dism.	dism.	dism.	dism.	dism.
PZ2015/5	8	3	<LOQ	20	8	194	13	7	1752	548
PZ2015/6	9	3	<LOQ	32	12	382	193	23	1477	432
PZ2015/7	28	19	7	78	26	4821	4641	33	12705	4375
PZ2015/8	8	8	<LOQ	19	6	3180	1861	2,5	9339	3591
PZ2015/9	3	3	<LOQ	3	0	53	16	9	231	88
PZ2016/11	13	10	6	34	10	1278	963	104	3199	910
PZ2016/12	78	12	6	412	164	4722	2236	32	21877	6900
PZ2016/13	6	6	5	7	1	461	460	385	538	63
Pz2015/B2 18.11.21	-	-	-	-	-	1260	-	-	-	-
Pz2015/B3	-	-	-	-	-	622	266	64	1536	798
Percolato	16883	7336	4151	59270	23755	5495	6272	2824	7130	1849

\*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 (eccetto Pz2018/9) 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 59270 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 4.8 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 4.8 Valori di concentrazione media, mediana, min e max nel percolato – parametro ferro

	Ferro ( µg/L) nel percolato	
	Data set grezzo	Data set senza dato anomalo
media	10271	5812
mediana	6417	6272
min	2824	2824
max	59270	8432
dev. st	16211	1825

Da Tabella 4.8 si conferma 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 4.9 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di ferro.

Tabella 4.9 Test M-K – parametro ferro

	Trend Ferro
	dal 21/11/2017 al 03/11/2022
Pz2015/5	Nessun trend significativo
Pz2015/6	Nessun trend significativo
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	DATI NON SUFFICIENTI
Pz2016/11	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Dalla Tabella 4.9 non emerge alcuna tendenza significativa delle concentrazioni di ferro nel periodo considerato, 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 4.10 si riportano i valori medi, mediani, minimi e massimi di concentrazione di nitriti, nonché la relativa deviazione standard, rilevati sui piezometri di monitoraggio, da novembre 2015 a novembre 2022. Si evidenziano i dati superiori alla CSC, per i nitriti pari a 500 µg/L.

Tabella 4.10 Valori di concentrazione media, mediana, min e max in piezometri e percolato – parametro nitriti

	Nitriti (µg/L) – CSC: 500 µg/L				
	media	mediana	min	max	deviazione standard
Pz2015/1	2641	2524	312	5480	1938
Pz2015/2	483	15	15	1970	804
Pz2015/3	13820	18144	3284	20032	9173
Pz2015/4	3349	3813	1008	4762	1660
Pz2015/5	604	483	23	1640	500
Pz2015/6	66	23	<LOQ	493	119
Pz2015/7	77	52	<LOQ	328	87
Pz2015/8	92	64	<LOQ	263	76
Pz2015/9	1646	802	99	5714	1992
Pz2016/11	396	60	<LOQ	2510	827
Pz2016/12	135	107	39	406	95
Pz2016/13	126	52	43	335	126
Pz2015/B2 18.11.21	112	-	-	-	-
Pz2015/B3	41	39	15	70	28
Percolato	NC	NC	280	8320	NC

Il dato medio di concentrazione del percolato non viene riportato in quanto il monitoraggio del percolato mostra concentrazioni di nitriti inferiori al limite di quantificazione della metodica per tutte le rilevazioni, con eccezione delle campagne del 18/03/19 e del 16/02/2022 (280 µg/L). Il campione del 2019 ha registrato 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.

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, per i piezometri esterni alla discarica.

In Tabella 4.11 si sintetizzano gli esiti del test M-K sulle concentrazioni di nitriti.

Tabella 4.11 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	Trend in diminuzione
Pz2016/11	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Dal test statistico si evidenzia un trend in diminuzione per il piezometro Pz2015/9; non emerge pertanto alcuna tendenza al peggioramento delle caratteristiche delle acque sotterranee.

Le maggiori concentrazioni di nitriti rilevate sulle acque sotterranee sono state ricondotte alle anomalie individuate sulle acque di drenaggio superficiale della discarica (c.d. “Canala Sud”), rispetto alle 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 4.12 e 4.13 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 novembre 2022. 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 4.12 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	15	15	11	19	4
Pz2015/2	910	931	568	1104	191
Pz2015/3	143	70	49	311	146
Pz2015/4	11	11	10	14	2
Pz2015/5	4	4	<LOQ	9	2
Pz2015/6	7	7	<LOQ	17	4
Pz2015/7	16	9	<LOQ	66	17
Pz2015/8	10	8	<LOQ	27	6
Pz2015/9	5	3	<LOQ	13	4
Pz2016/11	13	12	6	21	5
Pz2016/12	24	27	8	37	9
Pz2016/13	7	3	2,5	15	6
Pz2015/B2 18.11.21	10	-	-	-	-
Pz2015/B3	4	3	<LOQ	6	-
Percolato	349	275	219	770	171

Tabella 4.13 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	deviazione standard
Pz2015/1	11	11	8	16	3
Pz2015/2	102	103	72	143	28
Pz2015/3	27	16	12	54	23
Pz2015/4	17	18	<LOQ	28	12
Pz2015/5	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
Pz2015/6	-	-	<LOQ	<LOQ	-
Pz2015/7	9	7	<LOQ	24	7
Pz2015/8	6	3	<LOQ	24	7
Pz2015/9	-	-	<LOQ	5	-
Pz2016/11	4	3	<LOQ	9	2
Pz2016/12	-	-	<LOQ	8	-
Pz2016/13	-	-	<LOQ	9	-
Pz2015/B2 18.11.21	31	-	-	-	-
Pz2015/B3	<LOQ	-	-	-	-
Percolato	182	152	89	410	94

Dalla Tabella 4.12 emerge una significativa concentrazione di nichel nel percolato, superiore per almeno un ordine di grandezza rispetto alla CSC in tutte le rilevazioni; concentrazioni di nichel comparabili a quelle del percolato si registrano sui piezometri dell'area catino.

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

Tabella 4.14 Test M-K – parametro nichel

	Trend Nichel
Pz2015/5	Trend in diminuzione
Pz2015/6	Trend in diminuzione
Pz2015/7	Nessun trend significativo
Pz2015/8	Nessun trend significativo
Pz2015/9	Nessun trend significativo
Pz2016/11	Nessun trend significativo
Pz2016/12	Nessun trend significativo

Da Tabella 4.13 si osservano significative concentrazioni di arsenico nel percolato, superiori per circa un ordine di grandezza alla CSC; 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 inferiori al limite di quantificazione della metodica, per l'arsenico non è possibile applicare 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:

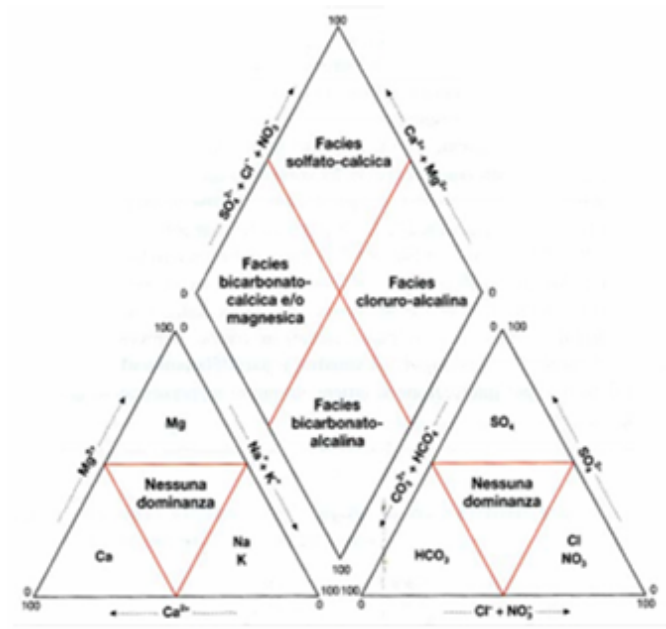
- composizione della roccia-serbatoio;
- interazione acqua-roccia;
- condizioni idrodinamiche esistenti nell'acquifero;
- tempi di residenza nel sottosuolo;
- condizioni di temperatura e pressione in acquifero;
- fenomeni di mescolamento tra acque a differente chimismo.

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: bicarbonato-calcica, solfato-calcica, cloruro-alcaina e bicarbonato-alcaina.

Figura 5.1 Esempio di diagramma di Piper (da Civita, 2005)



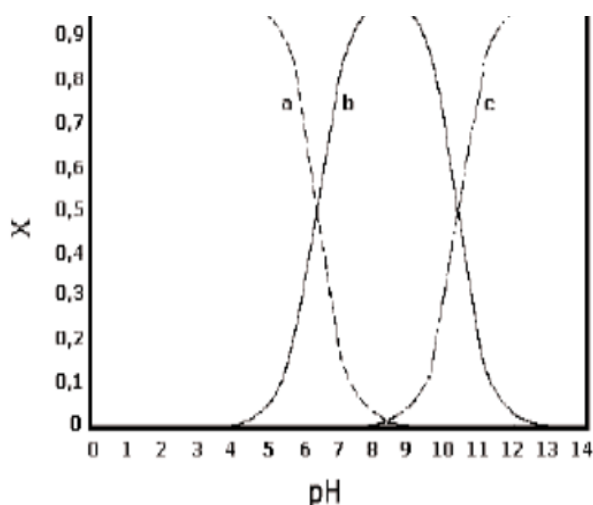
Il diagramma di Piper, schematizzato in Figura 5.1, esprime ciascuna concentrazione come percentuale del contributo totale di ioni presenti in soluzione e permette di riassumere i risultati relativi ai maggiori ioni in soluzione per i campioni raccolti, attraverso un rombo al disotto del quale vi sono 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.

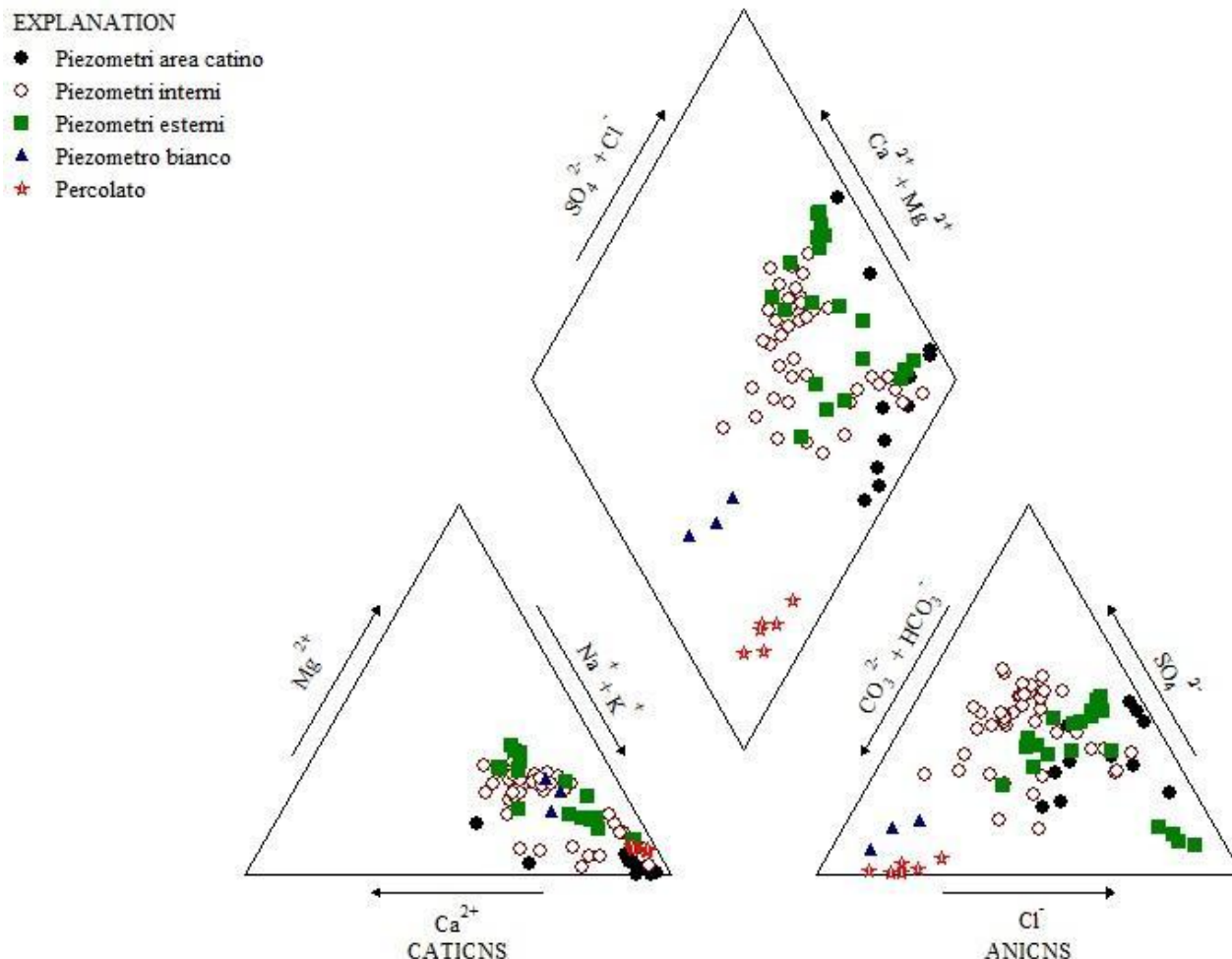
La ripartizione tra ione carbonato e bicarbonato, ai fini dell'elaborazione dei diagrammi di Piper, è stata calcolata considerando la distribuzione delle varie specie, in funzione del pH rilevato nell'acqua sotterranea, come da funzione rappresentata in Figura 5.2; per acque sotterranee con pH intorno 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 5.2 Equilibrio di carbonati e bicarbonati in acqua in funzione del pH (da APAT, 2003)



In Figura 5.3 si riporta il diagramma di Piper inerente i monitoraggi dal novembre 2015 al giugno 2020, elaborato con software GW\_chart (USGS, versione 1.29).

Figura 5.3 Diagramma di Piper monitoraggi 2016-2020



Da Figura 5.3 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 ( $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ ) e dell'idrogeno ( $^1\text{H}$  e  $^2\text{H}$  - 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.

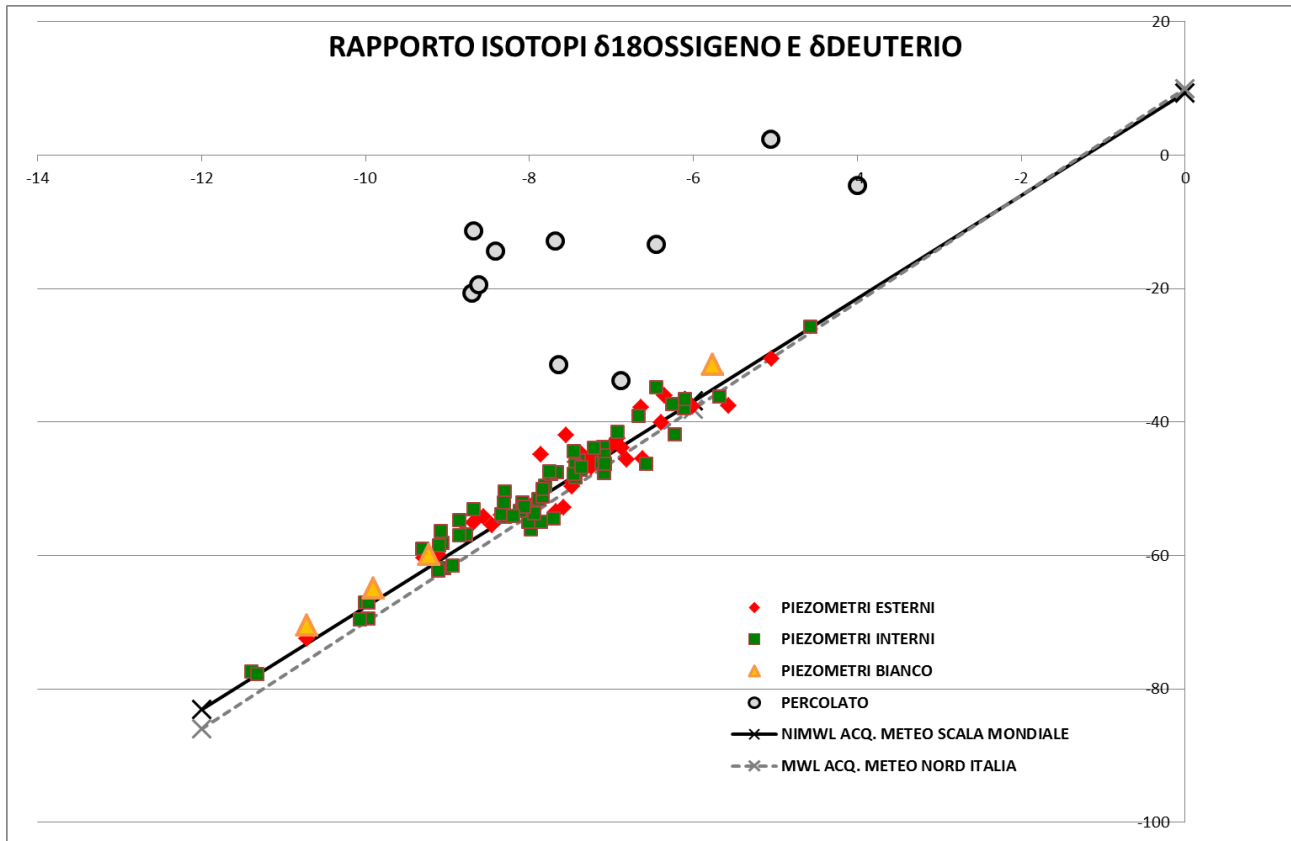
Le aliquote dei campioni destinate alle indagini isotopiche, per determinazione analitica di  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ , è avvenuta contestualmente a quella delle aliquote destinate all'analisi chimica, raccolte in contenitori in polietilene, con sottotappo di sicurezza e tappo a vite,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

Al monitoraggio isotopico eseguito sulle acque sotterranee e superficiali è stato sempre 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  $\delta\text{D}$  di circa  $-15\%$ , in quanto, nel corso delle reazioni di metanogenesi, i microrganismi usano preferibilmente la molecola più leggera dell'idrogeno ( $^1\text{H}$ ) per la produzione del metano ( $\text{CH}_4$ ), 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.

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 scostati verso la medesima direzione del punto rappresentativo del percolato, ovvero caratterizzate da maggiori valori di  $\delta\text{D}$ , indicano una potenziale "impronta" di contaminazione da percolato.

Figura 6.1. Rapporti isotopici ossigeno e deuterio nelle acque sotterranee, nel percolato negli anni 2016-2022 e rapporti isotopici medi delle acque meteoriche a scala mondiale (MWL) e per il nord Italia (NIMWL)



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 novembre 2022 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 e 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 aveva 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 era 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 scarica.

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 scarica, 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 rinterrati 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 a novembre 2022, 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 a novembre 2022, hanno evidenziato per alcuni dei parametri indagati (in particolare **Solfati, Manganese, Boro, Ferro**) 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.

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.

L'analisi mediante test di Mann-Kendall dei 3 parametri markers del percolato (azoto ammoniacale, potassio e Nichel, parametri sicuramente riconducibili al percolato) è un metodo robusto ed attendibile per l'individuazione di variazioni significative della qualità delle acque sotterranee ed eventuali anomalie nelle stesse, come previsto da Linee Guida nazionali (ISPRA, 2017) e come precisato dalla Direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti. I risultati del test mostrano esclusivamente trend non significativi o - in piccola parte - trend in decrescita, a dimostrazione dell'assenza di evidenti incrementi di concentrazione nelle acque sotterranee di parametri riconducibili al percolato.

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 il piezometro PZ2015/5 che vede trend in crescita per i Solfati, il Boro e il 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 ci siano buone probabilità per 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. Va anche evidenziato che i parametri sopra richiamati sono tra quelli oggetto di studi geologici di approfondimento condotti dall'Agenzia sui corpi idrici sotterranei regionali, in quanto rilevati con concentrazioni superiori alle CSC di cui all'Allegato V della Parte Quarta del D.Lgs. 152/2006 ss.mm.ii. in diverse zone del territorio. Il trend in crescita osservato per i Solfati nel piezometro PZ2015/5 non sembra essere correlato alla contaminazione di percolato, sia perché il parametro in questione non è identificato



come marker del percolato in quanto - nel percolato stesso - si osservano concentrazioni di solfati inferiori rispetto alle acque sotterranee campionate, sia perché per tale piezometro non si è osservato un trend significativo in crescita dei marker individuati (azoto ammoniacale, potassio e Nichel).

- per il **Boro**, seppur si osservino concentrazioni maggiori nel percolato rispetto alle acque sotterranee, valgono le stesse considerazioni applicate a Solfati e Manganese, sia per quanto concerne i superamenti delle CSC (parametro tra quelli rilevati ad alta concentrazione nelle acque di falda del territorio) sia per quanto concerne il trend in crescita osservato nel PZ2015/5 (non confutato dai marker). **Per il Boro, inoltre, è stata condotta specifica indagine isotopica che, sulla base del differente frazionamento isotopico dell'elemento, sembra escludere l'origine antropogenica - e quindi di contaminazione da percolato - del boro nelle acque sotterranee esterne all'area catino.**

- i superamenti di **Nitriti** nelle acque sotterranee (piezometri in area catino e nei piezometri PZ2015/5, PZ2015/9 e PZ2015/11), sono stati ricondotti ad una 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 nei successivi campionamenti. Il Test di Mann-Kendall ha confermato l'assenza di anomalie e crescita di concentrazione di tale parametro nel tempo.

- per quanto riguarda il **Ferro**, il suo repentino e significativo aumento di concentrazioni registrato nelle 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 possono 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.

Concentrazioni di ferro elevate - superiori alle CSC previste - sono state oggetto di alcuni studi condotti dall'Agenzia sui corpi idrici sotterranei regionali e riconosciute come endemiche del territorio, di probabile origine naturale geologica. L'assenza di tali concentrazioni nei piezometri dell'area catino in fase di contaminazione da percolato induce a ritenere che tale parametro non possa essere indice di contaminazione. Tuttavia, la crescita nel tempo di tale parametro sarà oggetto di approfondimenti.

- per quanto concerne il **Nichel**, significativi superamenti delle CSC si sono verificati esclusivamente nel piezometro dell'area catino in fase di contaminazione. Le concentrazioni osservate negli altri piezometri sono prossime o inferiori alle CSC. Non si hanno evidenze di anomalie e trend in crescita di tale parametro nelle acque sotterranee.

- per quanto riguarda l'**Arsenico**, anche in questo caso significativi superamenti delle CSC si sono verificati esclusivamente nel piezometro dell'area catino in fase di contaminazione. Le concentrazioni osservate negli altri piezometri sono prossime o inferiori alle CSC, con valori frequentemente inferiori al limite di quantificazione della metodica, cosa che ha impedito l'applicazione del test di verifica delle anomalie.

Gli esiti delle **indagini geochimiche** associate evidenziano 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-alcalina per il percolato, portando ad escludere 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, conducendo pertanto ad escludere 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.

## 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 Metropolitano, 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](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/Relazione_Rondinella_2019.pdf)
- Arpae, Distretto Metropolitano, 2020a. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAAE 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](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/2020_U_PG116335_acque_sott_tre_monti_2019.pdf)
- Arpae, Distretto Metropolitano, 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](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/relazione_web_2018_rev_giugno_finale.pdf)
- Arpae Distretto Metropolitano, 2019. Trasmissione degli esiti analitici dei monitoraggi effettuati da ARPAAE 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](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 Metropolitano, 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](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 ARPAAE 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](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 ARPAAE 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](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 ARPAAE 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](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 ARPAAE 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](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\\_2017pdf.pdf](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/PGBO_2018_21553_RELAZIONE_FINALE_RIO_RONDINELLA_MONITORAGGIO_2017pdf.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/RelazioneMonitoraggiIsotopico\\_2017\\_2018\\_MM.pdf](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/RelazioneMonitoraggiIsotopico_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](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/RelazioneMonitoraggiIsotopico\\_Discarica\\_TreMonti.pdf](https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/bologna/discarica-tre-monti/RelazioneMonitoraggiIsotopico_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](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](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](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](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](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](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/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/banca\\_dati\\_documento\\_supporto\\_marzo\\_2018.pdf](https://www.isprambiente.gov.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.