

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

- Gestione dei Rischi Naturali

Tesi di Laurea

**Presenza di cloroformio negli acquiferi piemontesi: evidenze e
variazioni pre e post emergenza Covid-19**



Relatore

Prof. Adriano Fiorucci

Candidata

Francesca Squadrito

Indice

Introduzione	5
Capitolo 1 – Cloroformio: proprietà, fonti e implicazioni ambientali e sanitarie	6
1.1 Inquadramento generale	6
1.2 Proprietà chimico-fisiche del cloroformio e comportamento nelle matrici ambientali.....	7
1.3 Meccanismi di trasporto e dinamica del DNAPL negli acquiferi contaminati (Majone M. et al., 2006).....	8
1.3.1 Modelli concettuali della dinamica del DNAPL negli acquiferi (Majone M. et al., 2006) .	9
1.4 Origine del cloroformio nelle matrici ambientali.....	11
1.4.1 Fonti di origine antropica e meccanismo chimico di formazione.....	11
1.4.2 Fonti naturali e processi biotici.....	13
1.5 Limiti normativi per il cloroformio e i solventi clorurati (ARPA Piemonte, 2020)	13
1.6 Rischi per la salute	16
Capitolo 2 – Inquadramento idrogeologico del Piemonte e rete di monitoraggio delle acque sotterranee	17
2.1 Inquadramento idrogeologico del Piemonte (Bove A. et al., 2005).....	17
2.2 Assetto idrogeologico della pianura piemontese (Regione Piemonte – ARPA Piemonte, 2021)	19
2.5 Rete di monitoraggio delle acque sotterranee in Piemonte	22
2.6 Tipologie di monitoraggio e dataset utilizzato	22
2.7 Considerazioni sulla qualità e sui limiti dei dati	25
Capitolo 3 – Analisi spazio-temporale dei dati di monitoraggio del cloroformio (2000-2023)	26
3.1 Dataset e metodologia di analisi.....	26
3.1.1 Origine e struttura del dataset	26
3.1.2 Limiti di quantificazione e implicazioni metodologiche	27
3.1.3 Classificazione delle concentrazioni e organizzazione dei dati.....	29
3.1.4 Strutturazione del database e criteri di analisi	30
3.2 Analisi descrittiva delle concentrazioni e dei superamenti	30
3.2.1 Copertura del monitoraggio	30
3.2.2 Distribuzione delle concentrazioni e superamenti del limite normativo	32
3.2.3 Sintesi delle evidenze preliminari e impostazione delle analisi successive	34
Capitolo 4 – Valutazione dell’impatto del periodo COVID-19: analisi comparativa delle concentrazioni di cloroformio pre-, durante e post-pandemia	35
4.1 Distribuzione dei superamenti e confronto tra fase pre-, durante e post-pandemica	35
4.2 Analisi semestrale delle variazioni e classificazione degli aumenti.....	47

4.3 Verifica della persistenza storica dei punti critici	52
4.4 Analisi spaziale dei punti critici e individuazione dei possibili centri di pericolo	56
4.5 Analisi della correlazione con le precipitazioni	75
4.6 Sintesi delle evidenze e considerazioni conclusive sul periodo COVID-19	88
Capitolo 5 – Valutazione integrata dei risultati e considerazioni conclusive	89
5.1 Individuazione delle aree maggiormente critiche	89
5.2 Confronto con studi esistenti	91
5.3 Interventi di bonifica e gestione delle contaminazioni	93
5.4 Stima del rischio sanitario	95
Capitolo 6 – Conclusioni	97
Bibliografia	99
Sitografia	101

Introduzione

La contaminazione delle acque sotterranee rappresenta una delle principali criticità ambientali per la gestione sostenibile della risorsa idrica. Gli acquiferi costituiscono, infatti, una riserva strategica di acqua destinata a molteplici usi, tra cui l'approvvigionamento potabile, agricolo e industriale (Freeze R.A & Cherry J.A., 1979). La presenza di contaminanti chimici persistenti può compromettere in modo significativo la qualità delle acque, con potenziali ripercussioni sull'ambiente e sulla salute umana (Ade P. & Funari E., 2005).

Tra i contaminanti di maggiore interesse rientrano i composti organoalogenati, sostanze caratterizzate da elevata stabilità chimica e da una marcata capacità di persistenza nei sistemi naturali. Il cloroformio, appartenente alla famiglia dei trihalometani, è uno di tali composti ed è frequentemente riscontrato nelle acque sotterranee, sia in contesti urbani sia industriali. La sua presenza può essere ricondotta a differenti sorgenti, naturali e antropiche, nonché a processi di trasformazione chimica che avvengono nell'ambiente (Ade P. & Funari E., 2005).

Il monitoraggio a lungo termine delle concentrazioni di tali composti negli acquiferi può assumere, dunque, un ruolo importante per comprendere l'evoluzione temporale del fenomeno, individuare eventuali trend e valutare l'efficacia delle politiche di gestione ambientale. Analisi estese su archi temporali pluridecennali permettono, inoltre, di mettere in relazione le variazioni qualitative delle acque sotterranee con i cambiamenti delle pressioni antropiche sul territorio (ARPA Piemonte, 2023).

Un elemento di particolare interesse è rappresentato dal periodo compreso tra il 2020 e il 2022, caratterizzato dalle restrizioni legate alla pandemia da Covid-19. La drastica riduzione di numerose attività produttive e della mobilità ha costituito un evento eccezionale, potenzialmente in grado di influenzare i carichi contaminanti immessi nell'ambiente. L'analisi delle concentrazioni di cloroformio, che può originarsi come sottoprodotto della clorazione della materia organica (Ade P. & Funari E., 2005) e dunque potenzialmente legato al maggiore utilizzo di solventi e disinfettanti durante tale intervallo temporale, consente di valutare se e in che misura tali cambiamenti abbiano avuto effetti misurabili sulla qualità delle acque sotterranee.

La presente tesi si inserisce in tale contesto e si propone di analizzare la presenza di cloroformio in acquiferi superficiali e profondi attraverso i dati di monitoraggio derivanti dalla rete di pozzi e piezometri ARPA Piemonte, raccolti nel periodo 2000-2023, con particolare attenzione al confronto tra le condizioni antecedenti, concomitanti e successive al periodo pandemico.

Capitolo 1 – Cloroformio: proprietà, fonti e implicazioni ambientali e sanitarie

1.1 Inquadramento generale

Il cloroformio è un composto organoalogenato alifatico appartenente alla famiglia dei trialometani (THM). I trialometani sono composti identificabili dalla formula generale CHX_3 , in cui l'atomo di carbonio può legarsi a un qualsiasi atomo di alogeno X come cloro, bromo, azoto, iodio o una combinazione di questi. Nel caso del cloroformio, l'atomo centrale di carbonio è legato a tre atomi di cloro e a un atomo di idrogeno, conferendogli la denominazione di triclorometano (CHCl_3). Oltre al cloroformio tra i trialometani più comuni si annoverano il bromodiclorometano (CHBrCl_2), il dibromoclorometano (CHBr_2Cl) e il bromoformio (CHBr_3), come mostrato in Figura 1.1 (ARPA Piemonte, 2020).

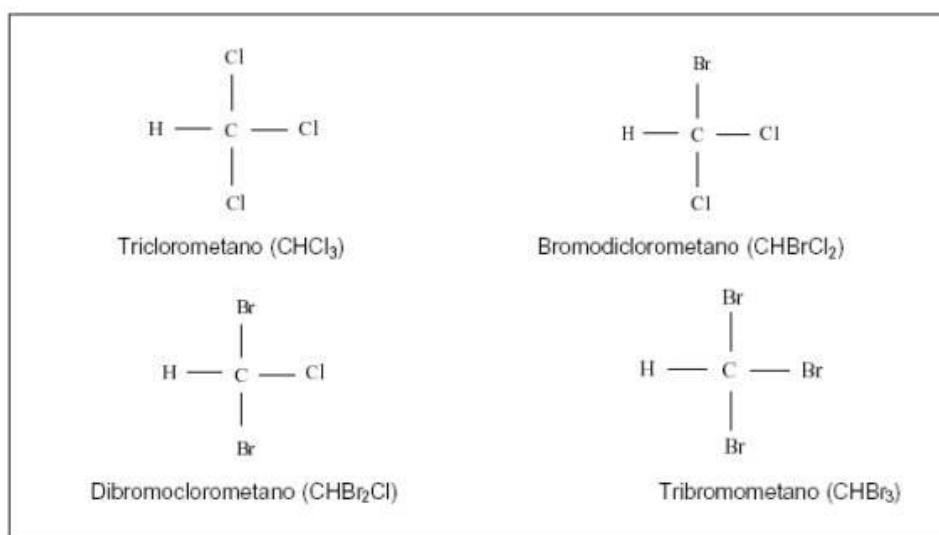


Figura 1.1 - Struttura chimica dei principali THM (Fonte: https://www.elaguapotable.com/subproductos_de_la_desinfeccion.htm)

Largamente sfruttato come anestetico umano, l'utilizzo del cloroformio è stato abbandonato nel 1912 a causa della sua tossicità (Galli C.L. et al, 2007). Ad oggi, la sua presenza nei diversi comparti ambientali è principalmente imputabile ai processi di disinfezione per clorazione delle acque potabili di cui il cloroformio e i trialometani in generale rappresentano i sottoprodotti più comuni (ARPA Piemonte, 2020). Inoltre, come meglio verrà esplicitato nei paragrafi successivi, la sua presenza sarebbe giustificata da processi di trasformazione chimica, da fonti antropiche di diversa natura e, secondo studi più recenti, anche da fonti naturali in condizioni chimico-fisiche favorevoli.

A ciò va, ancora, aggiunto che la qualità delle acque in molte aree del Paese è stata nel tempo compromessa a causa dello smaltimento diretto di reflui attraverso i pozzi, pratica ormai vietata, ma i cui effetti sono ancora oggi visibili dai risultati delle analisi di monitoraggio che mostrano livelli di composti organoalogenati non certo trascurabili (Ade P. & Funari E., 2005).

Come verrà esplicitato nel successivo paragrafo, le proprietà chimico-fisiche del cloroformio lo rendono chimicamente stabile, mobile nei mezzi porosi e persistente, giustificandone l'interesse come contaminante ambientale e come indicatore dei processi di interazione tra attività antropiche e sistemi idrogeologici.

1.2 Proprietà chimico-fisiche del cloroformio e comportamento nelle matrici ambientali

Il destino ambientale dei solventi clorurati, analogamente a quello degli inquinanti organici in generale, è strettamente correlato alle loro specifiche proprietà chimico-fisiche, che ne determinano i meccanismi di trasporto, distribuzione e persistenza nel suolo e nel sottosuolo (ARPA Piemonte, 2020).

Il cloroformio presenta caratteristiche chimico-fisiche particolarmente rilevanti ai fini della comprensione del suo comportamento all'interno degli acquiferi, tra cui densità, solubilità in acqua, volatilità e viscosità, riassunte in Tabella 1.1.

Tabella 1.1 - Proprietà chimico-fisiche del cloroformio (Majone M. et al., 2006 modificata)

Peso molecolare [g/mol]	119,38
Densità [g/mL] a 20°C	1,4832
Viscosità [mPa·s] a 20°C	0,57
Solubilità [g/L] a 20°C	8
Temperatura di ebollizione	61°C
Tensione di vapore [atm] a 20°C	0,243
Costante di Henry [-] a 20°C	0,15
Log KOC [-]	1,8-2,6

Una delle proprietà più significative è rappresentata dalla densità, nettamente superiore a quella dell'acqua, che consente di classificare il cloroformio tra i DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids). In presenza di rilasci nel sottosuolo, tali composti tendono a costituire una fase liquida separata e, per effetto della gravità, a migrare verso gli strati più profondi fino a incontrare livelli a bassa permeabilità, sui quali possono accumularsi e stratificarsi. Questo comportamento condiziona fortemente la distribuzione verticale del contaminante e ne favorisce la persistenza nelle porzioni

profonde degli acquiferi. I solventi clorurati caratterizzati da una densità solo lievemente superiore a quella dell'acqua e da una maggiore solubilità possono invece migrare più lentamente, seguendo la direzione di deflusso dell'acquifero e interessando aree estese, potenzialmente dell'ordine di alcuni chilometri quadrati (Vanzetti et al., 2016).

La solubilità in acqua, sebbene limitata, risulta comunque sufficiente a permettere un significativo trasferimento di massa dalla fase DNAPL alla fase acquosa. Ciò determina la formazione di pennacchi di contaminazione disciolta che possono propagarsi nel tempo all'interno dell'acquifero. Tale mobilità è ulteriormente favorita dai bassi valori del coefficiente di adsorbimento sul carbonio organico (Koc), che riducono l'interazione del cloroformio con la matrice solida del mezzo poroso e ne incrementano la capacità di trasporto nell'acquifero (Majone M. et al., 2006).

Un ulteriore aspetto rilevante è la volatilità, che colloca il cloroformio tra i composti organici volatili (VOC). Questo parametro influisce in modo significativo sulla ripartizione del contaminante tra le diverse fasi presenti nel sottosuolo, in particolare nella zona insatura, dove il cloroformio tende a trasferirsi preferenzialmente nella fase gassosa occupante gli spazi interstiziali del suolo. I processi di volatilizzazione e diffusione in fase vapore possono quindi contribuire sia alla dispersione del contaminante sia all'esposizione di recettori ambientali e umani (Majone M. et al., 2006).

Infine, la viscosità, relativamente bassa, influisce sulle modalità di flusso della fase DNAPL e sulle dinamiche di migrazione nel mezzo poroso, concorrendo a definire la velocità di spostamento e la capacità del contaminante di penetrare negli strati più profondi (Vanzetti et al., 2016).

Nel loro insieme, le proprietà chimico-fisiche del cloroformio rappresentano quindi un elemento chiave per interpretarne il comportamento negli acquiferi e costituiscono la base per l'analisi dei processi di contaminazione e delle strategie di gestione e bonifica dei siti impattati.

1.3 Meccanismi di trasporto e dinamica del DNAPL negli acquiferi contaminati (Majone M. et al., 2006)

Il trasporto di cloroformio e di altri solventi clorurati nel sottosuolo dipende fortemente dalle caratteristiche idrogeologiche del sito e dalle proprietà chimico-fisiche del contaminante. I principali meccanismi coinvolti includono:

1. **Convezione**, ossia il trasporto di soluti lungo gradienti idraulici;
2. **Dispersione**, causata da velocità di flusso differenziate nei pori;

3. **Adsorbimento**, che determina la ripartizione tra fase acquosa e matrice solida;
4. **Trasporto di sostanze immiscibili**, come le fasi DNAPL non solubili;
5. **Diffusione**, che regola la migrazione di molecole nei pori sotto gradiente di concentrazione.

Nel caso del cloroformio, DNAPL denso e poco solubile, la contaminazione si manifesta come fase separata che interagisce contemporaneamente con acqua, aria e matrice solida. Questo comporta una migrazione complessa, controllata da densità, viscosità, bagnabilità e tensione interfacciale, che determinano la mobilità complessiva nel mezzo poroso (Figura 1.2).

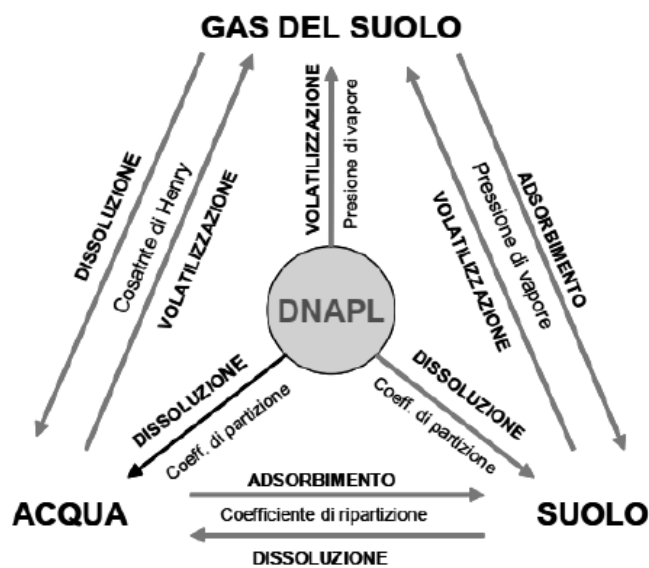


Figura 1.2 – Equilibrio tra il DNPL e le fasi del sistema acquifero (Majone M. et al., 2006)

1.3.1 Modelli concettuali della dinamica del DNAPL negli acquiferi (Majone M. et al., 2006)

Nonostante le variazioni nelle proprietà dei contaminanti e nelle condizioni dei siti, i processi fisici alla base della migrazione dei DNAPL sono simili. I modelli concettuali consentono di descrivere le caratteristiche generali del loro comportamento nel suolo e nelle falde, fornendo uno schema per la previsione della distribuzione della contaminazione.

Migrazione dei DNAPLs nella zona non satura

Il cloroformio rilasciato nel suolo insaturo fluisce verso il basso guidato dalla gravità e dai gradienti di pressione, interagendo con acqua, aria e matrice solida. In alcuni casi rimane immobilizzato nei pori come film sottile sui granuli (fluidos bagnabili) o come accumuli discontinui, determinando saturazioni residue del 2–20%. Acqua di infiltrazione o fluttuazioni piezometriche possono

rimobilizzare questi volumi, che tendono a seguire percorsi preferenziali attraverso gli spazi maggiori dei pori, condizionati dalla pressione capillare e dalla tensione interfacciale tra DNAPL e altri fluidi.

Migrazione dei DNAPLs nella frangia capillare

Prima di raggiungere la zona satura, la frangia capillare può ostacolare il flusso del DNAPL. Il cloroformio può attraversarla in forma disciolta, più facilmente integrandosi con l'acqua dell'acquifero, o in fase pura, dove il moto verticale si arresta fino a quando il peso del DNAPL genera una pressione sufficiente a superare la pressione capillare. Così, si crea un equilibrio tra la densità del DNAPL e la resistenza capillare dell'acqua, regolando la penetrazione nella zona satura.

Migrazione dei DNAPLs nella zona satura

Nella zona satura, il flusso del cloroformio dipende dal volume rilasciato e dalle proprietà fisico-chimiche, come viscosità e bagnabilità. Per volumi elevati, il DNAPL sostituisce l'acqua nei pori formando fronti di avanzamento apparentemente continui, mentre per volumi limitati il movimento segue percorsi preferenziali determinati dalle tensioni interfacciali e dall'eterogeneità del mezzo. La presenza di strati a bassa permeabilità arresta il flusso verticale e favorisce la migrazione laterale, creando percorsi dendritici che possono estendersi per decine di metri in orizzontale, influenzati da stratificazione e fratturazione del substrato (Figura 1.3).

Il DNAPL può rimanere intrappolato come residuo, trattenuto dalle forze capillari, o accumularsi in zone continue dette pools sopra strati a bassa conducibilità. Le saturazioni locali nei pools possono raggiungere il 70% della porosità, mentre il residuo generalmente varia tra il 5 e il 50%, a seconda delle caratteristiche dell'acquifero e del contaminante. La bassa solubilità del cloroformio determina una lenta dissoluzione, generando pennacchi di contaminazione persistenti nel tempo, con concentrazioni spesso superiori ai limiti normativi.

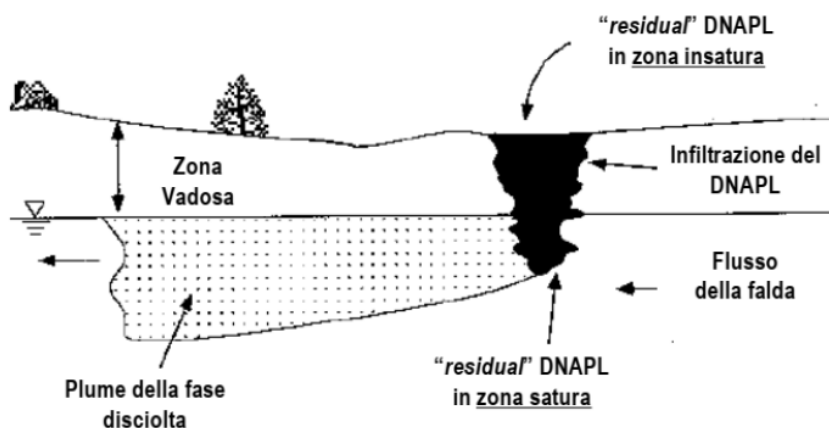


Figura 1.3 – Dinamica di un DNAPL in un acquifero costituito da materiale sciolto (Fonte: ARPA Piemonte, 2020)

1.4 Origine del cloroformio nelle matrici ambientali

1.4.1 Fonti di origine antropica e meccanismo chimico di formazione

Come precedentemente anticipato e come meglio verrà esplicitato di seguito, il cloroformio presente nelle acque sotterranee deve la sua origine principalmente alle attività antropiche, non tanto per rilascio diretto quanto per formazione secondaria.

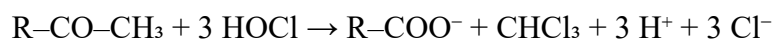
Tra le fonti antropiche di tipo industriale si annoverano principalmente: sbiancamento della carta, tintura e pretrattamento di fibre tessili, produzione di fitosanitari, farmaci, clinker, calce viva e vetro, fusione di sostanze minerali, incenerimento di rifiuti urbani e industriali, produzione di pasta di carta e carbonio, oltre a fonderie e industrie metalmeccaniche (Deborde et al., 2008; Biancardi et al., 2009). Il cloroformio è inoltre stato impiegato come solvente per lacche, gomme, resine, cere, vernici, mastici e plastiche, e storicamente come anestetico, fumigante, insetticida e precursore di HCFC-22 (Deborde et al., 2008; Biancardi et al., 2009).

Altre fonti antropiche provengono da scarichi civili e industriali, comprese acque di lavanderie, piscine, impianti di raffreddamento, percolati di discariche, depuratori e sfioratori di piena. In questi contesti, l'uso del cloro per disinfezione porta alla formazione di cloroformio attraverso la reazione con la materia organica presente (acidi umici, fulvici e altri composti pedogenici e biogenici) (Deborde et al., 2008; Biancardi et al., 2009).

Il cloro applicato per la disinfezione può essere introdotto come cloro molecolare (Cl_2) o come ipoclorito (NaOCl). In acqua, questi reagenti generano acido ipocloroso (HOCl), che costituisce la specie chimica attiva responsabile della clorurazione della materia organica (National Research Council, 1980):



La formazione di cloroformio avviene attraverso la reazione di haloformio, in cui intermedi carbonilici derivati dalla materia organica (come i metilchetoni) reagiscono con l'acido ipocloroso (Rook J.J., 1974):



La quantità di cloroformio dipende da diversi fattori chimico-fisici: il pH neutro-alcalino aumenta la reattività del cloro verso la materia organica, temperature più elevate e tempi di contatto prolungati favoriscono la produzione di trialometani, tipicamente osservata nelle acque delle falde e nei sistemi di distribuzione (Deborde et al., 2008; Biancardi et al., 2009).

La composizione della materia organica è determinante: gli acidi umici, pur rappresentando circa il 3% della materia organica disciolta (DOM), generano quantità di cloroformio fino a tre volte superiori rispetto agli acidi fulvici, che costituiscono la maggioranza (circa 90%) della DOM. Queste dinamiche (Figura 1.4) spiegano perché le acque reflue clorate producono generalmente meno cloroformio rispetto alle acque potabili e superficiali (Biancardi et al., 2009).

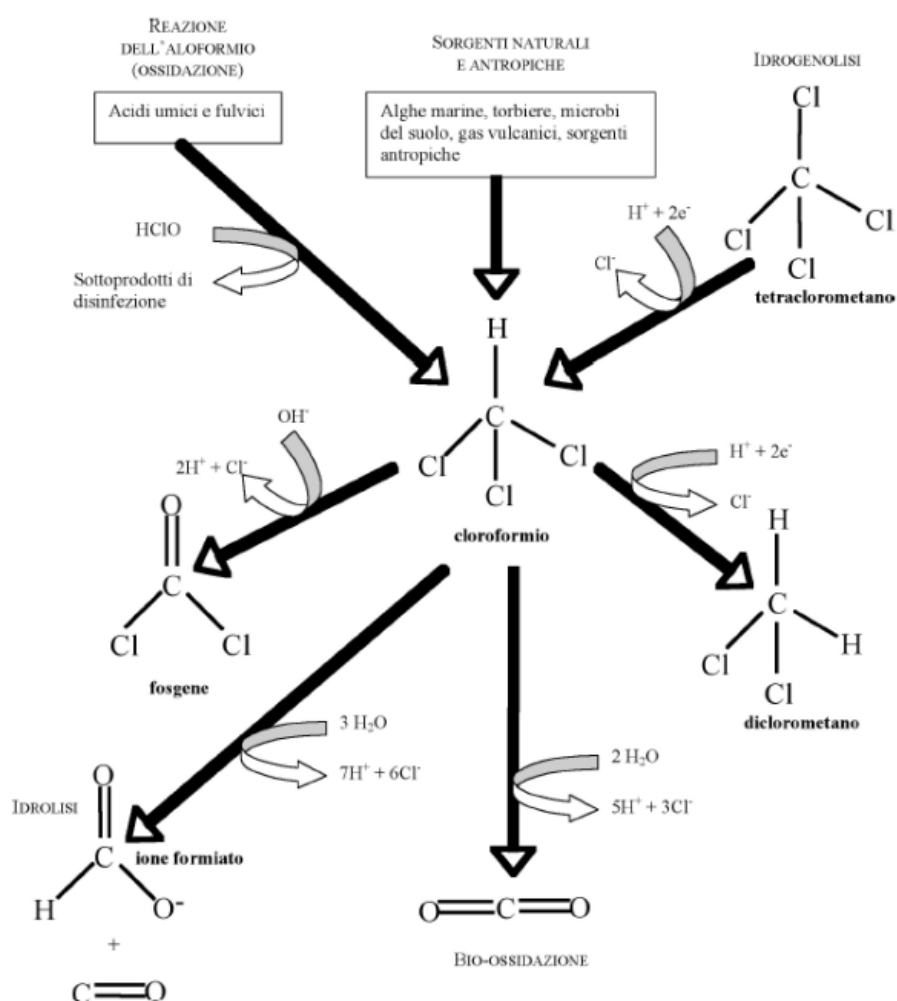


Figura 1.4 – Processi che possono interessare la formazione e la trasformazione di triclorometano nell'ambiente (Biancardi et al., 2009)

1.4.2 Fonti naturali e processi biotici

Studi condotti su acque sotterranee e suoli forestali in Danimarca hanno dimostrato che il cloroformio può formarsi naturalmente, anche in assenza di contaminazioni antropiche dirette. Questi lavori hanno evidenziato che alcuni microrganismi, in particolare funghi, sono in grado di produrre cloroformio a partire dal cloruro inorganico presente nel terreno (Hoekstra et al., 1998; Hunkeler et al., 2012).

Analisi isotopiche hanno confermato l'origine naturale del composto: il cloroformio naturale mostra valori di ^{13}C simili a quelli della materia organica naturale, distinguendosi dal cloroformio industriale, caratterizzato da una firma isotopica simile al metano (Hunkeler et al., 2012).

La formazione naturale può avvenire anche tramite meccanismi abiotici, come la decarbossilazione dell'acido tricloroacetico o in ambienti ferroriducenti. Ulteriori contributi provengono da emissioni vulcaniche, sorgenti idrotermali e composti rilasciati da alghe, funghi e termiti, sebbene la quantità prodotta sia relativamente bassa rispetto alle origini antropiche (Biancardi et al., 2009; Huber et al., 2009).

In sintesi, pur contribuendo ai livelli di fondo di cloroformio negli acquiferi, le fonti naturali rimangono generalmente secondarie rispetto a quelle antropiche, che rappresentano la principale causa di contaminazione (Deborde et al., 2008; Biancardi et al., 2009; Hunkeler et al., 2012).

Per quanto concerne il contesto regionale piemontese oggetto del presente studio, non risultano al momento evidenze scientifiche che documentino la formazione naturale di cloroformio.

1.5 Limiti normativi per il cloroformio e i solventi clorurati (ARPA Piemonte, 2020)

La regolamentazione dei solventi clorurati presenti nelle acque sotterranee è principalmente definita dalla Direttiva 2006/118/CE, recepita in Italia con il D.Lgs. 30/2009, e dalla Direttiva 2014/80/UE, recepita tramite il DM 06/07/2016. Tali normative stabiliscono i Valori Soglia (VS) nazionali, ai fini del buono stato chimico, per gli inquinanti di interesse, riportati nella Tabella 3 dell'Allegato 2 del D.Lgs. 30/2009.

Per i siti sottoposti a bonifica, i valori soglia di contaminazione nelle acque sotterranee (CSC) sono definiti dalla Tabella 2 dell'Allegato 5, Titolo V, Parte IV del D.Lgs. 152/2006 e indicano le concentrazioni oltre le quali il solvente clorurato richiede interventi di bonifica.

Per quanto riguarda le acque destinate al consumo umano, il D.Lgs. 31/2001 (Allegato 1, parte B) stabilisce i limiti per alcuni solventi clorurati, tra cui il cloroformio, al fine di garantire la sicurezza sanitaria dei cittadini.

La normativa sui limiti di scarico di solventi clorurati è definita dalla Tabella 3 dell'Allegato 5, Parte III del D.Lgs. 152/2006, che fissa i valori limite a 1 mg/L per scarichi in acque superficiali e 2 mg/L per scarichi in rete fognaria, come concentrazione massima consentita per la sommatoria dei solventi clorurati. Questi valori possono essere resi più restrittivi dalle Regioni, in base ai piani di tutela delle acque e agli obiettivi di qualità locale.

Tra i composti organo-alogenati considerati, il cloroformio è classificato come possibile cancerogeno per l'uomo dall'International Agency for Research on Cancer (IARC, Gruppo 2B), dettaglio che sarà approfondito nel prossimo paragrafo dedicato ai rischi per la salute.

Un confronto tra i limiti per gli scarichi e i valori soglia in acque sotterranee evidenzia la significativa differenza: il valore massimo accettabile per la sommatoria di composti organo-alogenati cancerogeni nelle acque sotterranee è pari a 10 µg/L, mentre i limiti per scarichi industriali sono rispettivamente di 1 o 2 mg/L. Questa differenza sottolinea l'elevato potenziale di contaminazione delle falde in caso di perdite o infiltrazioni da reti fognarie o impianti industriali, confermando la necessità di controlli rigorosi sulle emissioni e sugli scarichi (D.Lgs. 152/2006; D.Lgs. 30/2009).

Per facilitare la consultazione, di seguito vengono riportate due tabelle sintetiche: la prima (Tabella 1.2) raccoglie i valori soglia previsti dal D.Lgs. 30/2009 e dal D.Lgs. 152/2006, mentre la seconda (Tabella 1.3) riporta i limiti stabiliti dal D.Lgs. 31/2001 per le acque destinate al consumo umano.

Tabella 1.2 – Sintesi dei valori soglia per i solventi clorurati ai sensi del D.Lgs. 30/2009 e del D.Lgs. 152/2006 (Fonte: ARPA Piemonte, 2020)

SOLVENTI CLORURATI	D.Lgs. 30/2009 valore soglia (µg/L)	D.Lgs. 152/2006 valore soglia (µg/L)
Alifatici Clorurati Cancerogeni		
Triclorometano	0,15	0,15
Cloruro di Vinile	0,5	0,5
1,2 Dicloroetano	3	3
Tricloroetilene (Trielina)	1,5	1,5
Tetracloroetilene (Percloroetilene)	1,1	1,1
Esaclorobutadiene	0,15	0,15
Clorometano	(*)	1,5
1,1 Dicloroetilene	(*)	0,05
Sommatoria organoalogenati	10	10
Alifatici Clorurati Non Cancerogeni		
1,2 Dicloroetilene	60	

SOLVENTI CLORURATI	D.Lgs. 30/2009 valore soglia (µg/L)	D.Lgs. 152/2006 valore soglia (µg/L)
Alifatici Alogenati Cancerogeni		
Dibromoclorometano	0,13	
Bromodiclorometano	0,17	
Tribromometano (bromoformio)	(*)	0,3
1,2 Dibromoetano	(*)	0,001
Alifatici Clorurati non cancerogeni		
1,1 Dicloroetano	(*)	810
1,2 Dicloroetilene	(*)	60
1,2 Dicloropropano	(*)	0,15
1,1,2 Tricloroetano	(*)	0,2
1,2,3 Tricloropropano	(*)	0,001
1,1,2,2 Tetracloroetano	(*)	0,05

(*) valore limite non riportato

Tabella 1.3 - Sintesi dei valori soglia per i solventi clorurati ai sensi del D.Lgs. 31/2001 (Fonte: ARPA Piemonte, 2020)

SOLVENTI CLORURATI	D.Lgs. 31/2001 valore soglia (µg/L)
1,2 Dicloroetano	3,0
Somma di Tricloroetilene e Tetracloroetilene	10
Triometani - Totale	30
Cloruro di vinile	0,5

1.6 Rischi per la salute

L'esposizione umana al cloroformio avviene principalmente attraverso ingestione e inalazione, di cui la prima via risulta la più significativa. La popolazione può essere esposta tramite il consumo di acqua potabile clorata, alimenti preparati con tale acqua (come pesci, burro, formaggio e cereali) o inalando il composto durante attività quotidiane quali la doccia o il lavaggio di stoviglie (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1997).

Studi su animali indicano che dosi elevate di cloroformio possono essere letali: la dose letale stimata è di circa 630 mg/kg di peso corporeo, equivalente a circa 44 g per un adulto di 70 kg. Dosi inferiori hanno mostrato effetti mutageni e cancerogeni. Studi epidemiologici sull'uomo non hanno stabilito con certezza una relazione causale forte tra THM e cancro, ma esistono prove di associazione tra esposizione cronica a bassi livelli di THM e un aumento del rischio di tumore della vescica, del retto e dell'intestino (OMS, 1984; Evlampidou et al., 2020).

L'indagine di Evlampidou et al. (2020), condotta dal 2005 al 2018 su circa il 75% della popolazione europea, ha evidenziato una correlazione significativa tra la presenza di triclorometano nelle acque potabili e il rischio di cancro alla vescica. Parallelamente, il cloroformio è classificato dall'International Agency for Research on Cancer (IARC) nel Gruppo 2B, come possibile cancerogeno per l'uomo.

Nonostante queste evidenze, l'OMS stima che il rischio di contrarre il cancro a seguito di esposizione cronica a cloroformio nell'acqua potabile a concentrazione di 30 µg/L, con un consumo giornaliero di 2 L, sia inferiore a 1 su 100.000. Ciò suggerisce che, sebbene il rischio sanitario esista, la probabilità di effetti gravi a livello individuale sia relativamente bassa (WHO, 2017).

Un altro interessante dato tossicologico da segnalare è la dose giornaliera di riferimento orale per effetti non-cancerogeni (RfD) che l'EPA stima pari a 0,01 mg/kg/die (EPA, 2023).

Per ridurre l'esposizione, in particolare nelle aree in cui le acque contengono elevate concentrazioni di materia organica naturale — che favorisce la formazione di THM durante la clorazione — è raccomandata la massima cautela nell'uso del cloro, considerando eventualmente metodi alternativi di disinfezione (Galli C.L. et al., 2007).

Capitolo 2 – Inquadramento idrogeologico del Piemonte e rete di monitoraggio delle acque sotterranee

Il presente capitolo si pone come obiettivo quello di fornire un inquadramento generale del contesto regionale all'interno del quale si inseriscono i dati di monitoraggio analizzati nel presente studio.

Considerata la scala regionale dell'analisi e l'approccio prevalentemente statistico adottato, l'inquadramento idrogeologico verrà limitato agli elementi essenziali, rinviando l'interpretazione quantitativa dei dati al capitolo successivo.

2.1 Inquadramento idrogeologico del Piemonte (Bove A. et al., 2005)

Dal punto di vista morfologico e idrogeologico, il territorio piemontese può essere suddiviso in tre principali settori: il settore alpino, il settore collinare e la pianura piemontese, ciascuno caratterizzato da differenti modalità di circolazione delle acque sotterranee.

Il settore alpino si sviluppa lungo l'arco occidentale della regione ed è caratterizzato da una limitata circolazione idrica sotterranea, prevalentemente confinata all'interno di fratture e discontinuità delle rocce cristalline del substrato. Le emergenze idriche sono generalmente rappresentate da sorgenti con portate modeste ma di buona qualità, localizzate in corrispondenza del contatto tra substrato roccioso e copertura detritica. Fanno eccezione alcune sorgenti carsiche delle Alpi Marittime, che presentano portate medio-elevate.

Il settore collinare interessa la parte centrale della regione e comprende, tra gli altri, i sistemi collinari del Roero, del Monferrato e delle Langhe, oltre alle colline torinesi, canavesi e vercellesi. Dal punto di vista geologico è dominato dai depositi del Bacino Terziario Piemontese, generalmente a bassa permeabilità. Tuttavia, localmente sono presenti circolazioni sotterranee associate a zone di fessurazione o a livelli più permeabili, come le sabbie plioceniche (Sabbie di Asti), che danno origine ad acquiferi di modesta estensione e produttività.

Il comparto di maggiore interesse per il presente studio è rappresentato dalla pianura piemontese, dove si concentrano i principali acquiferi regionali sfruttati a scopo potabile. La pianura è caratterizzata da una potente copertura di depositi alluvionali quaternari, il cui spessore risulta fortemente variabile in funzione della morfologia del substrato marino sottostante, modellato da

processi tettonici e sedimentari. Tali depositi ospitano sistemi acquiferi di tipo superficiale e profondo, in stretta interazione con la rete idrografica superficiale.

Le acque presenti nei sedimenti sotterranei al di sotto della falda superficiale sono chiamate falde profonde, mentre i sedimenti che le contengono prendono il nome di acquiferi profondi. La separazione tra acquifero superficiale e acquifero profondo è generalmente assicurata da strati poco permeabili o impermeabili, di solito costituiti da materiali limosi o argillosi. Le falde profonde possono presentare differenti gradi di interconnessione con gli acquiferi superficiali, a seconda della continuità laterale, della geometria e dello spessore degli strati impermeabili. In alcune aree, questa separazione non è netta; tali zone, caratterizzate da spessori considerevoli di depositi grossolani uniformi, sono note come acquiferi indifferenziati. Anche nelle zone di acquifero indifferenziato, però, esiste una distinzione tra circolazione superficiale e profonda, legata a diverse condizioni di deflusso, all'età dell'acqua e alle proprietà idrochimiche. In generale, le acque profonde sono più antiche, si muovono più lentamente e mostrano caratteristiche chimico-fisiche significativamente diverse rispetto a quelle superficiali (Regione Piemonte, 2005).

In Figura 2.1 viene riportata la piezometria degli acquiferi di pianura che riveste un ruolo fondamentale per l'individuazione delle direzioni di flusso delle acque sotterranee, ad essa perpendicolari, e, dunque, come verrà approfondito successivamente, nella ricerca di correlazione tra presenza di cloroformio e plausibile centro di pericolo.

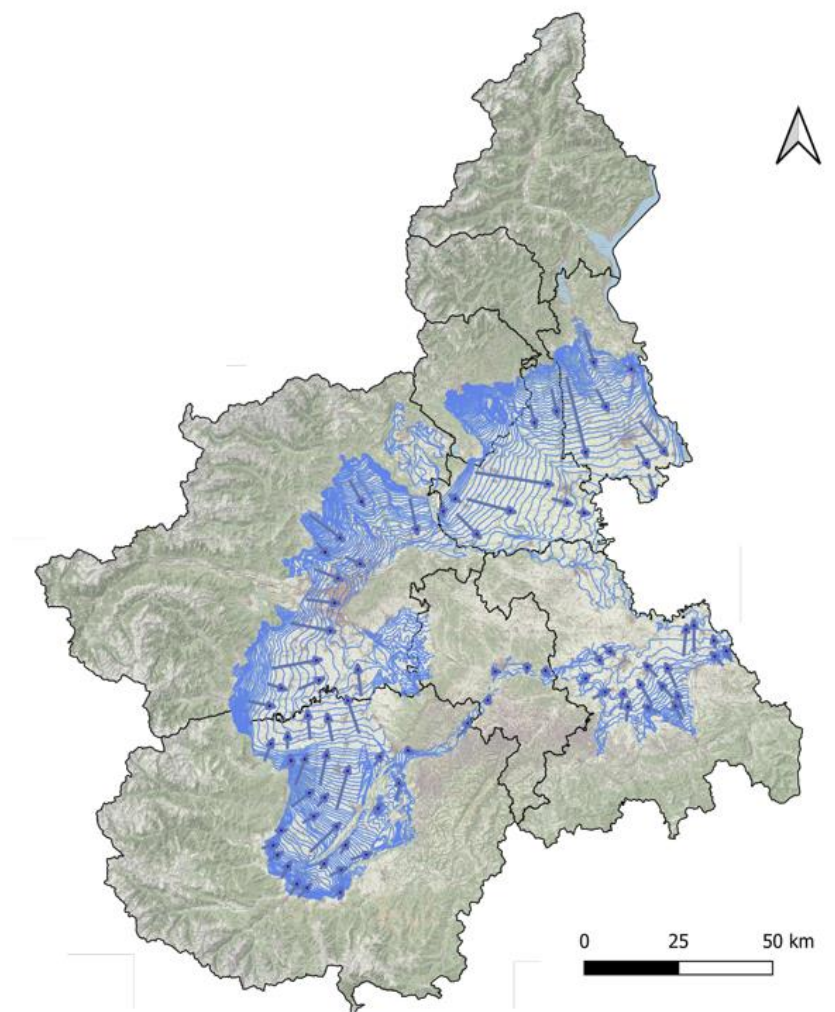


Figura 2.1 – Piezometria degli acquiferi di pianura (Fonte: Geoportale Regione Piemonte, modificata). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso idrico sotterraneo

2.2 Assetto idrogeologico della pianura piemontese (Regione Piemonte – ARPA Piemonte, 2021)

L'assetto idrogeologico della pianura piemontese è stato ricostruito da ARPA Piemonte su scala regionale attraverso l'integrazione di dati di letteratura e informazioni stratigrafiche derivanti da sondaggi e pozzi. Dal punto di vista geologico, la pianura è costituita da una copertura alluvionale di spessore variabile che si adagia su un substrato marino pliocenico fortemente irregolare.

ARPA Piemonte distingue, ai fini idrogeologici, quattro principali Serie Idrogeologiche, ciascuna costituita da differenti complessi litologici (Figura 2.2):

- la Serie dei Depositi Fluviali, di età pliocenica–quaternaria, caratterizzata da ghiaie grossolane localmente alternate a livelli sabbiosi, limosi e argillosi, che ospitano acquiferi superficiali a permeabilità variabile;

- la Serie dei Depositi Glaciali, di età pleistocenica, costituita da sedimenti eterogenei associati agli archi morenici, localmente in grado di ospitare acquiferi di interesse;
- la Serie dei Depositi di Transizione Villafranchiani, caratterizzata da alternanze di sedimenti fini e grossolani, che ospita sistemi multifalda in pressione con produttività medio–elevata;
- la Serie dei Depositi Marini, di età pliocenica, costituita prevalentemente da sedimenti fini, con la presenza di acquiferi profondi generalmente confinati.

All'interno di questo assetto, lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee avviene prevalentemente attraverso tre tipologie di acquiferi: un acquifero superficiale impostato nei depositi alluvionali grossolani quaternari, un sistema multifalda in pressione associato ai depositi villafranchiani e un acquifero profondo in pressione impostato nei depositi marini pliocenici.

Sulla base delle caratteristiche stratigrafiche e idrogeologiche, la pianura piemontese è stata suddivisa da ARPA Piemonte in aree idrogeologicamente omogenee, finalizzate alla gestione e alla valutazione della risorsa idrica sotterranea su scala regionale. A un primo livello, sono riconoscibili quattro grandi zone acquifere principali: la pianura cuneese–torinese meridionale, la pianura torinese settentrionale, la pianura biellese–vercellese–novarese e la pianura alessandrina.

Tali zone sono ulteriormente articolate in Aree Idrogeologiche (AI), che rappresentano unità omogenee dal punto di vista idrogeologico (Figura 2.3). Si fa presente che tale suddivisione è richiamata esclusivamente come riferimento generale e per completezza espositiva, senza entrare nel dettaglio delle singole aree, vista la natura a grande scala e non sito-specifica sulla quale sono state impostate le analisi del presente lavoro.

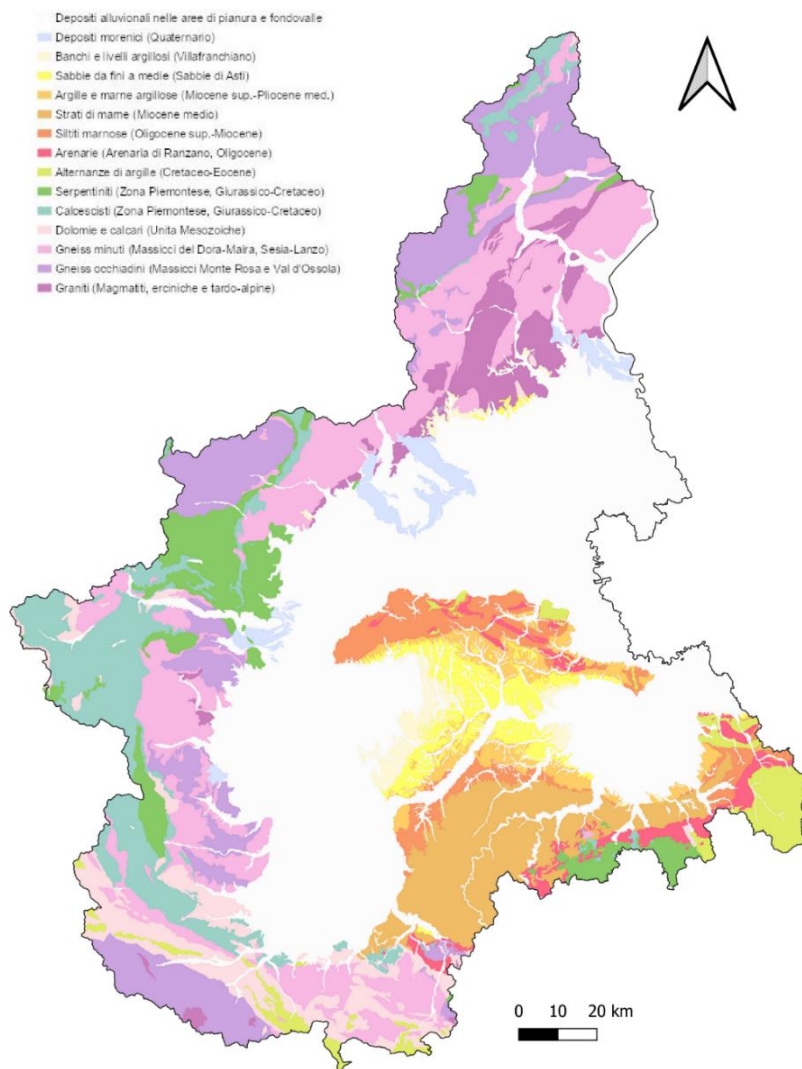


Figura 2.2 – Litologia del Piemonte (Fonte: Geoportale Regione Piemonte)

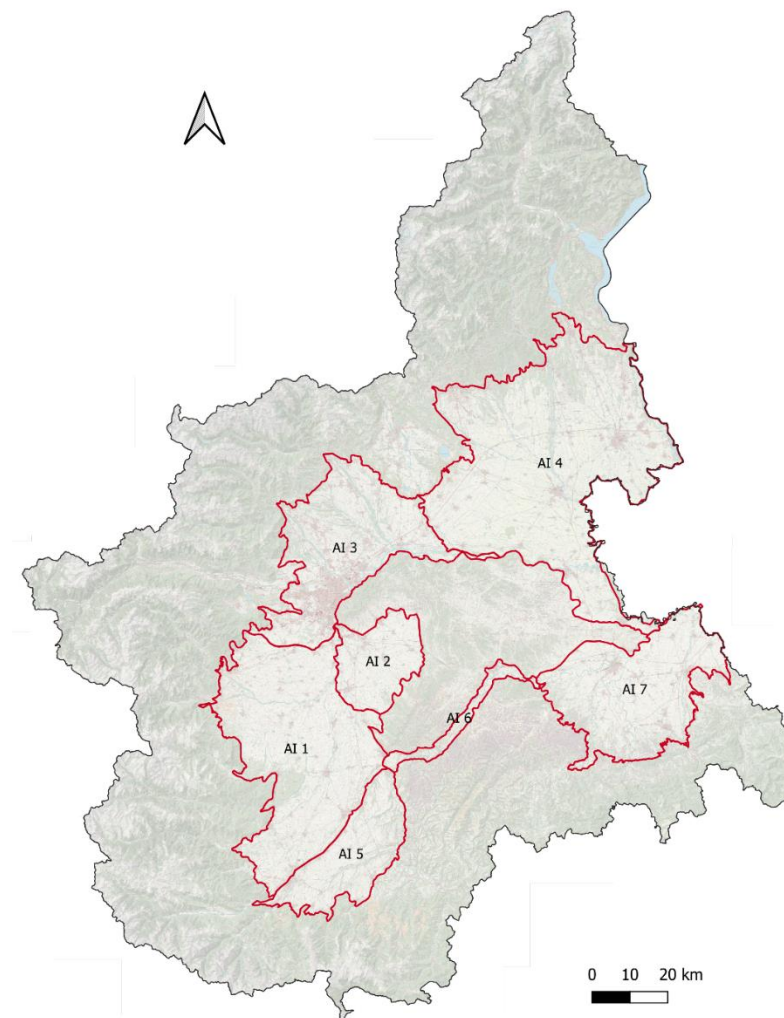


Figura 2.3 – Aree idrogeologiche omogenee (AI) secondo classificazione ARPA Piemonte (Fonte: Geoportale Regione Piemonte, modificata)

2.5 Rete di monitoraggio delle acque sotterranee in Piemonte

Il monitoraggio qualitativo delle acque sotterranee in Italia è regolato dal D.Lgs. 152/2006 e dal Decreto Ministeriale 8 novembre 2010, n. 260, che recepiscono la Direttiva 2000/60/CE (Direttiva Quadro sulle Acque). Tali normative definiscono i criteri tecnici per la classificazione dello stato chimico dei corpi idrici sotterranei e le modalità di attuazione del monitoraggio.

In base alla normativa vigente, il monitoraggio dello stato chimico delle acque sotterranee si articola in monitoraggio di sorveglianza e monitoraggio operativo. Il primo è finalizzato alla caratterizzazione generale dei corpi idrici e alla definizione delle condizioni di fondo, mentre il secondo è rivolto ai corpi idrici ritenuti a rischio di non raggiungere gli obiettivi di qualità ambientale, con l'obiettivo di valutare gli effetti delle pressioni antropiche. Entrambe le tipologie di monitoraggio prevedono la misura dei principali parametri chimici indicativi dello stato del corpo idrico e consentono l'analisi dell'evoluzione temporale delle concentrazioni (ARPA Piemonte, 2024).

La Rete di Monitoraggio Regionale delle Acque Sotterranee (RMRAS) del Piemonte è operativa sull'intero territorio regionale a partire dagli anni Novanta. A partire dal 2001, con l'affidamento della gestione ordinaria dalla Regione Piemonte ad ARPA Piemonte, la rete è stata progressivamente resa più omogenea e strutturata; dal 2009 risulta pienamente conforme alle direttive europee in materia di protezione delle acque sotterranee (Regione Piemonte, 2022).

La gestione della rete avviene attraverso un programma operativo concordato tra Regione Piemonte e ARPA Piemonte, che definisce i criteri di monitoraggio, la frequenza dei campionamenti e i parametri da analizzare. In generale, i campionamenti vengono effettuati almeno due volte l'anno, in periodi rappresentativi delle diverse condizioni idrologiche, al fine di cogliere sia l'evoluzione temporale dei parametri sia eventuali oscillazioni stagionali (Regione Piemonte, 2022).

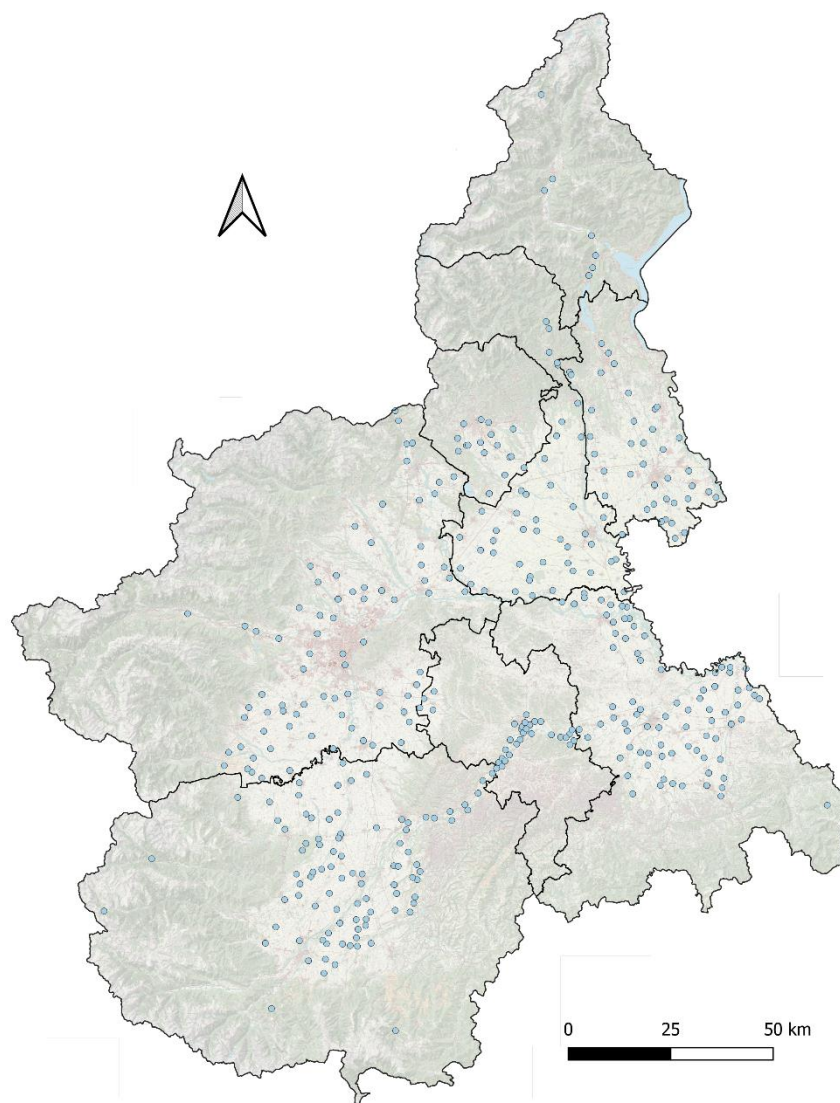
2.6 Tipologie di monitoraggio e dataset utilizzato

I dati di monitoraggio sono organizzati all'interno di una piattaforma WebGIS di proprietà ARPA Piemonte e che raccoglie e rende consultabili i dati relativi a tutti i corpi idrici monitorati sul territorio piemontese. Tale portale rappresenta a tutti gli effetti il patrimonio informativo sul tema acqua in Piemonte alla cui compilazione hanno contribuito l'ARPA, la Regione e l'Università, comprendendo le diverse tipologie di monitoraggio, sia automatiche sia manuali, relative ai corpi idrici superficiali e sotterranei (ARPA Piemonte, 2024).

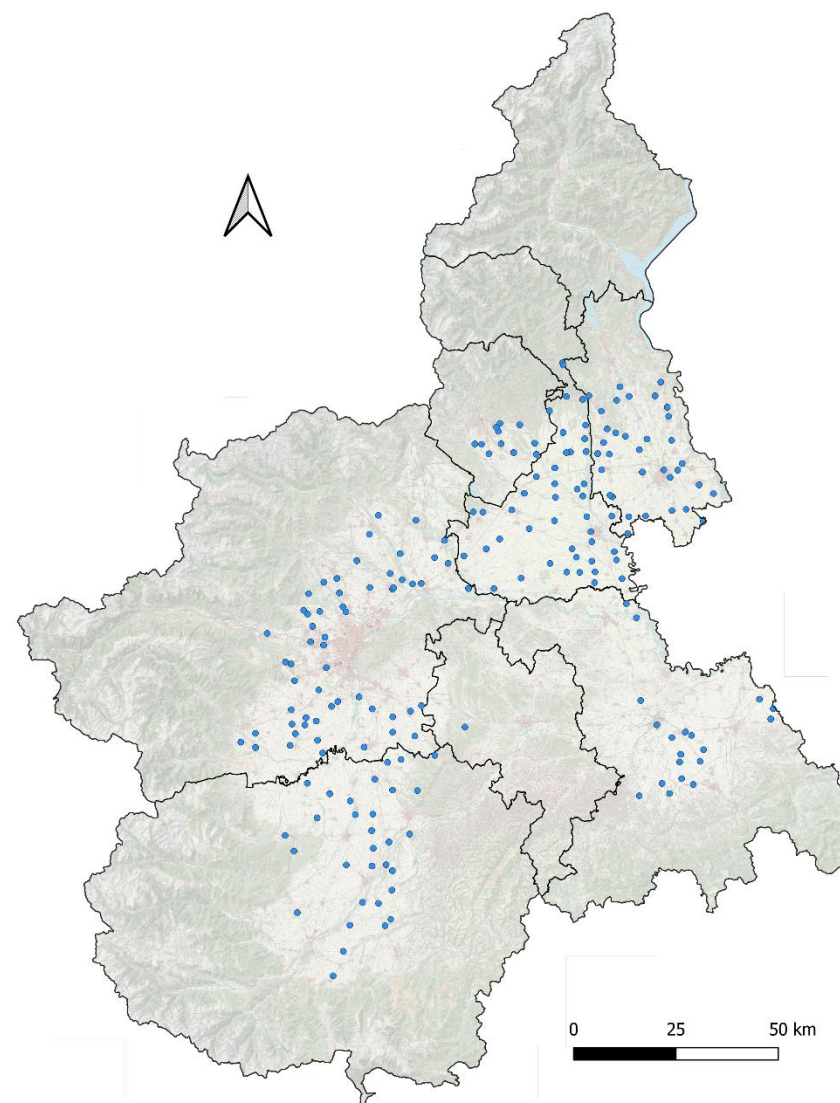
Tali punti di monitoraggio corrispondono a pozzi, piezometri e sorgenti che, a seconda della profondità raggiunta, monitorano le acque sotterranee più superficiali e più profonde e la cui proprietà compete ad ARPA Piemonte, privati cittadini, comuni, enti acquedottistici ecc. (ARPA Piemonte, 2024).

Attualmente (2026) la RMRAS è costituita complessivamente da 560 stazioni di monitoraggio, 360 delle quali afferenti all'acquifero superficiale, 190 all'acquifero profondo e 10 alle sorgenti. Tuttavia, nel tempo il numero delle stazioni è soggetto a variazioni con conseguente dismissione di quelle non più utilizzabili per motivi, ad esempio, legati all'impossibilità permanente di accesso al sito di monitoraggio, o con l'aggiunta di nuove se ritenuto necessario e in base alle risorse disponibili (ARPA Piemonte, 2024).

Come meglio verrà descritto nel prossimo capitolo, i dati analizzati nel presente lavoro coprono un intervallo temporale piuttosto esteso, dal 2000 al 2023 e, pertanto, a causa della variabilità nel numero di stazioni di monitoraggio, il dataset finale utilizzato per le analisi è costituito da 645 punti afferenti all'acquifero superficiale (Figura 2.4) e 259 a quello profondo (Figura 2.5), dato direttamente fornito dalla Regione Piemonte attraverso un apposito file contenente tutte le informazioni di interesse (codici dei punti di monitoraggio, coordinate UTM della loro collocazione sul territorio, tipologia di acquifero intercettato). Coerentemente con l'obiettivo di condurre l'analisi sul territorio di pianura, si ritengono escluse le stazioni di monitoraggio afferenti alle sorgenti e, inoltre, si considerano i dati relativi alla sola rete manuale sotterranea, in quanto essa fornisce le misure chimiche di laboratorio necessarie per l'analisi delle concentrazioni di cloroformio nelle acque sotterranee.



*Figura 2.4 – Punti di monitoraggio ARPA Piemonte in acquifero superficiale
(Fonte: Geoportale Regione Piemonte)*



*Figura 2.5 – Punti di monitoraggio ARPA Piemonte in acquifero profondo
(Fonte: Geoportale Regione Piemonte)*

2.7 Considerazioni sulla qualità e sui limiti dei dati

L'utilizzo di una rete di monitoraggio basata anche su pozzi esistenti è certamente vantaggioso in termini di copertura territoriale e disponibilità dei dati, ma comporta al tempo stesso alcune limitazioni legate alla conoscenza delle caratteristiche costruttive dei pozzi e alla continuità temporale delle misure. In alcuni casi, come verrà esplicitato nel prossimo capitolo, si è rilevata incertezza nell'attribuzione del punto di monitoraggio al comparto acquifero superficiale o profondo in quanto non esplicitamente dichiarato e non avendo a disposizione informazioni dettagliate sulla stratigrafia e sulla profondità dei filtri che potessero sopperire al problema.

Inoltre, anche l'assenza di serie temporali complete di campionamenti (due volte l'anno) o l'assenza totale rappresenta un limite nell'interpretazione finale delle analisi condotte.

Tuttavia, considerando la volontà di interpretare i risultati in termini di tendenze generali e differenze tra comparti acquiferi e non come valutazioni sito-specifiche, si ritiene che tali aspetti non compromettano in maniera significativa l'approccio adottato ma possano considerarsi come spunti di miglioramento per il futuro.

Capitolo 3 – Analisi spazio-temporale dei dati di monitoraggio del cloroformio (2000-2023)

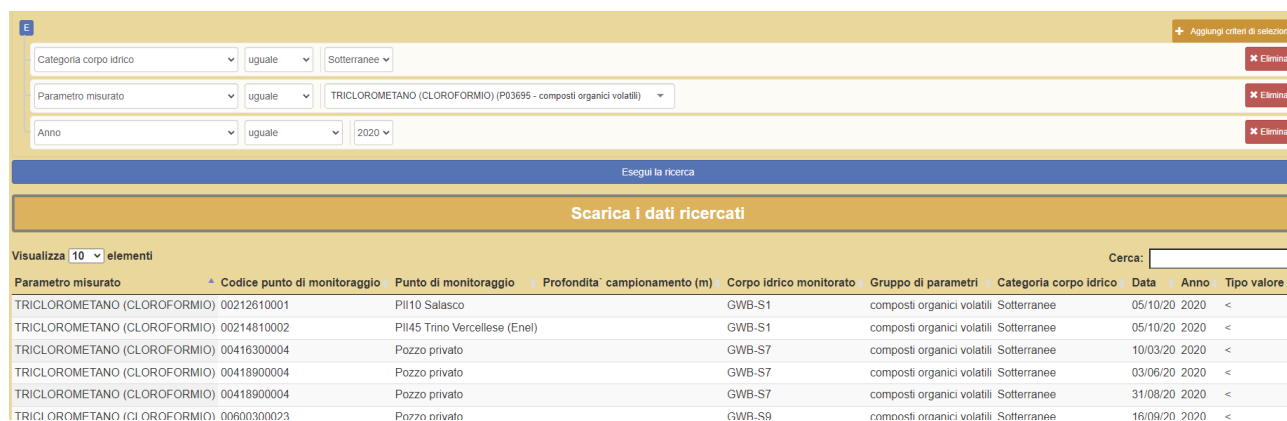
Il presente capitolo si pone come obiettivo quello di descrivere gli elementi che sono stati presi in considerazione per l'elaborazione dei dati raccolti dalla rete di monitoraggio e di fornirne una prima interpretazione. In particolare, il capitolo si articola in una prima parte prettamente metodologica, in cui vengono descritti l'origine del dataset, le modalità di trattamento dei dati e i criteri di classificazione adottati, e in una seconda parte dedicata all'analisi descrittiva dell'intero periodo di osservazione (2000-2023).

3.1 Dataset e metodologia di analisi

3.1.1 Origine e struttura del dataset

I dati analizzati nel presente lavoro sono stati scaricati dalla piattaforma WebGIS di ARPA Piemonte dedicata al monitoraggio della qualità delle acque sotterranee. Il portale consente l'interrogazione e lo scarico dei dati ambientali selezionando parametri chimici, categoria di corpo idrico e intervallo temporale di interesse.

Nel caso specifico, l'estrazione è stata effettuata impostando come parametro misurato il triclorometano (cloroformio) e selezionando la categoria "acque sotterranee", con interrogazione annuale per l'intero periodo 2000–2023 (Figura 3.1).



The screenshot displays the ARPA Piemonte WebGIS search interface. At the top, there are three filter rows: 'Categoria corpo idrico' set to 'Sotterranee', 'Parametro misurato' set to 'TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO) (P03695 - composti organici volatili)', and 'Anno' set to '2020'. Each row has an 'Elimina' button. Below the filters is a blue bar with 'Esegui la ricerca' and a yellow bar with 'Scarica i dati ricercati'. A table below shows the search results with columns: Parametro misurato, Codice punto di monitoraggio, Punto di monitoraggio, Profondità campionamento (m), Corpo idrico monitorato, Gruppo di parametri, Categoria corpo idrico, Data, Anno, and Tipo valore. The table contains six rows of data for Triclorometano (Cloroformio) at various monitoring points (P110 Salasco, P1145 Trino Vercellese (Enel), Pozzo privato) with sampling dates in 2020.

Parametro misurato	Codice punto di monitoraggio	Punto di monitoraggio	Profondità campionamento (m)	Corpo idrico monitorato	Gruppo di parametri	Categoria corpo idrico	Data	Anno	Tipo valore
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00212610001	P110 Salasco		GWB-S1	composti organici volatili	Sotterranee	05/10/20	2020	<
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00214810002	P1145 Trino Vercellese (Enel)		GWB-S1	composti organici volatili	Sotterranee	05/10/20	2020	<
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00416300004	Pozzo privato		GWB-S7	composti organici volatili	Sotterranee	10/03/20	2020	<
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00418900004	Pozzo privato		GWB-S7	composti organici volatili	Sotterranee	03/06/20	2020	<
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00418900004	Pozzo privato		GWB-S7	composti organici volatili	Sotterranee	31/08/20	2020	<
TRICLOROMETANO (CLOROFORMIO)	00600300023	Pozzo privato		GWB-S9	composti organici volatili	Sotterranee	16/09/20	2020	<

Figura 3.1 – Piattaforma WebGIS ARPA Piemonte per il monitoraggio delle acque sotterranee (https://webgis.arpa.piemonte.it/monitoraggio_qualita_acque_mapseries/introduzionePage)

Per ciascun anno è stato scaricato il file in formato Excel contenente:

- il codice identificativo del punto di monitoraggio (pozzo o piezometro);

- la data di campionamento (campionamento manuale);
- la concentrazione misurata, espressa in $\mu\text{g/L}$.

Come accennato nel capitolo precedente, la rete di monitoraggio considerata per il presente lavoro comprende complessivamente:

- 645 punti attribuiti all'acquifero superficiale;
- 259 punti attribuiti all'acquifero profondo.

I campionamenti sono generalmente effettuati con frequenza semestrale, secondo due finestre temporali principali: febbraio–giugno (identificato nel presente lavoro come *primo semestre*) e settembre–novembre (*secondo semestre*). Tuttavia, la copertura del monitoraggio non risulta uniforme nel tempo. Non sempre, infatti, i pozzi risultano possedere un campionamento semestrale: in maniera variabile, in alcuni casi è presente un solo campionamento annuale, mentre in altri anni determinati punti non risultano campionati. Inoltre, come già accennato, il numero complessivo di pozzi attivi varia di anno in anno.

Al fine di distinguere tra acquifero superficiale e acquifero profondo è stato utilizzato un ulteriore file fornito dalla Regione Piemonte, contenente le coordinate UTM dei punti di monitoraggio e l'indicazione della tipologia di acquifero captato (“SUPERFICIALE” o “PROFONDO”). L'integrazione dei due database ha consentito di associare a ciascun campionamento la relativa categoria idrogeologica.

È emersa tuttavia una limitazione metodologica: un numero molto ridotto di pozzi presenta una classificazione discordante tra i file disponibili. Ai fini dell'analisi è stata, pertanto, mantenuta la classificazione riportata nei file scaricati dal portale ufficiale di monitoraggio. Considerata l'esiguità dei casi discordanti, si ritiene che tale scelta non influenzi in modo significativo i risultati complessivi, pur rappresentando un elemento di incertezza.

Inoltre, si è scelto di mantenere per ciascun anno di analisi il medesimo set di punti di monitoraggio in termini di stazioni totali, ritenendo affidabili i file forniti dalla Regione Piemonte e risultando difficoltoso individuare i pozzi dismessi nel tempo o quelli di nuova attivazione.

3.1.2 Limiti di quantificazione e implicazioni metodologiche

Un aspetto particolarmente importante nell'analisi del dataset riguarda il limite di quantificazione (LOQ, Limit of Quantification), ossia la più bassa concentrazione di una sostanza che può essere determinata con adeguata accuratezza e precisione mediante una specifica metodologia analitica. I

valori inferiori al LOQ risultano riportati nei dati scaricati dal portale ARPA con la dicitura generale “<LOQ”, indicando che la concentrazione è presente ma non quantificabile dalla strumentazione.

Come appreso dalla Regione Piemonte, nel periodo 2000–2023 il LOQ relativo alla determinazione del triclorometano ha subito una progressiva riduzione, verosimilmente riconducibile all’evoluzione delle tecniche analitiche:

- 2000–2013: LOQ pari a 0,5 µg/L;
- 2014–2016: LOQ pari a 0,10 µg/L;
- dal 2017 in poi: LOQ pari a 0,05 µg/L.

Come appreso nel Capitolo 1, il limite normativo di riferimento per il cloroformio nelle acque sotterranee è pari a 0,15 µg/L. Ne consegue che nel periodo 2000–2013 un numero significativo di misure è stato registrato come “<0,5 µg/L”, senza possibilità di distinguere se il valore reale fosse inferiore o superiore alla soglia normativa. Pertanto, in tale intervallo temporale non è possibile classificare con certezza eventuali superamenti del limite, poiché concentrazioni effettive comprese tra 0,15 e 0,5 µg/L risultano indistinguibili dai valori inferiori.

Per quanto riguarda il trattamento dei valori inferiori al LOQ, è stata adottata una strategia differenziata in funzione del periodo considerato.

Per gli anni 2000–2013 si è scelto di non effettuare alcuna sostituzione numerica (ad esempio sfruttando il valore LOQ/2), che, come appreso dalla Regione Piemonte, è una pratica talvolta utilizzata nelle analisi ambientali per consentire elaborazioni statistiche su dati non quantificabili numericamente. Tale scelta è motivata dal fatto che una quantificazione del dato non numericamente disponibile rappresenterebbe una stima arbitraria non supportata da un effettivo dato analitico e, soprattutto, nel caso specifico avrebbe comportato un valore ($\text{LOQ}/2 = 0,25 \text{ µg/L}$) comunque superiore al limite normativo di 0,15 µg/L. Ciò avrebbe determinato una potenziale sovrastima dei superamenti, attribuendo concentrazioni superiori alla soglia normativa a campionamenti per i quali non è possibile stabilire con certezza il valore reale. I dati sono pertanto stati mantenuti nella forma originaria (<LOQ) e considerati come una categoria di dati a sé stante nelle analisi descrittive.

Per il periodo 2014–2023, invece, considerato che il LOQ (0,10 µg/L e successivamente 0,05 µg/L) risulta inferiore al limite normativo di 0,15 µg/L, i valori riportati come <LOQ sono stati assunti pari al rispettivo LOQ ai fini della classificazione in classi di concentrazione. Tale scelta, pur non rappresentando il valore reale misurato, consente di mantenere un approccio conservativo senza

alterare l'interpretazione rispetto alla soglia normativa, in quanto tali valori risultano comunque inferiori al limite di riferimento.

3.1.3 Classificazione delle concentrazioni e organizzazione dei dati

Al fine di analizzare in modo omogeneo la distribuzione delle concentrazioni nel tempo e nello spazio, i dati sono stati classificati nelle seguenti categorie:

- Non campionato
- $\leq 0,15 \mu\text{g/L}$
- $(0,15-0,5] \mu\text{g/L}$
- $(0,5-1] \mu\text{g/L}$
- $(1-5] \mu\text{g/L}$
- $(5-10] \mu\text{g/L}$
- $(10-25] \mu\text{g/L}$
- $> 25 \mu\text{g/L}$

Questa suddivisione consente di distinguere i valori inferiori e superiori al limite normativo e di evidenziare le situazioni di concentrazioni decisamente più elevate. Si fa presente che, volendo mantenere costante il set di punti di monitoraggio per tutti gli anni di analisi per una maggiore confrontabilità, all'interno della categoria "Non campionato" potrebbero confluire, in modo variabile e indistinguibile nel tempo, punti in realtà rappresentativi di pozzi o piezometri dismessi.

Per il periodo 2000–2013, in ragione del LOQ pari a $0,5 \mu\text{g/L}$, la classe $\leq 0,15 \mu\text{g/L}$ non è distinguibile dalla classe $0,15-0,5 \mu\text{g/L}$, poiché entrambe ricadono nella categoria analitica " $<0,5 \mu\text{g/L}$ ". Per tali anni è stata pertanto adottata una classe unica " $\leq 0,5 \mu\text{g/L}$ ". Considerata tuttavia la limitata confrontabilità con il periodo successivo, caratterizzato da un LOQ inferiore al limite normativo, si è scelto di concentrare le analisi successive di dettaglio prevalentemente sugli anni 2014–2023.

Per ciascun anno è stato possibile riportare il numero di campionamenti ricadenti in ogni classe di concentrazione, distinti per acquifero superficiale e profondo, al fine di fornire una sorta di "stato dei fatti" dei campionamenti e di poter basare le analisi successive sulle situazioni a maggiore criticità.

Le informazioni così organizzate sono state successivamente importate in ambiente GIS (QGIS), mantenendo una suddivisione per anno, semestre e tipologia di acquifero, assegnando poi a ciascuna classe di concentrazione una specifica colorazione.

L'integrazione tra analisi statistica e rappresentazione cartografica ha, dunque, permesso di affiancare alla valutazione quantitativa una lettura spaziale del fenomeno.

3.1.4 Strutturazione del database e criteri di analisi

Considerando l'obiettivo dell'analisi di valutare il potenziale impatto del contaminante e di identificare possibili sorgenti puntuali, si è ritenuto più significativo a livello metodologico non calcolare delle medie di concentrazione, né a livello spaziale, né a livello temporale preferendo preservare i valori effettivamente rilevati per ciascun pozzo in ciascun semestre, confrontandoli eventualmente con quelli del semestre successivo, laddove siano disponibili entrambe le misurazioni nello stesso anno.

Inoltre, come dichiarato nel Capitolo 2, l'approccio del seguente lavoro non contempla le implicazioni idrogeologiche sito-specifiche, non avendo certezza di relazioni dirette tra i punti di monitoraggio in termini di continuità idrogeologica.

Per tali motivi si è scelto di mantenere un approccio basato sulla distribuzione delle concentrazioni, organizzando i dati in una matrice strutturata per:

- punto di monitoraggio;
- anno;
- semestre (primo o secondo);
- tipologia di acquifero (superficiale o profondo);
- classe di concentrazione.

Le matrici complete, che raccolgono tutti i campionamenti e la loro classificazione, sono riportate in Appendice A (acquifero superficiale) e Appendice B (acquifero profondo).

3.2 Analisi descrittiva delle concentrazioni e dei superamenti

3.2.1 Copertura del monitoraggio

Con le scelte metodologiche descritte nel paragrafo 3.1, i dati sono stati organizzati e rappresentati cartograficamente per anno, semestre e tipologia di acquifero. Le mappe tematiche ottenute

(Appendice C) consentono di visualizzare la distribuzione spaziale dei punti campionati e la loro appartenenza alle relative classi di concentrazione.

Per quanto riguarda la copertura del monitoraggio nel periodo 2000–2023, il numero di punti effettivamente campionati risulta variabile nel tempo, sia per l’acquifero superficiale sia per quello profondo (Figura 3.2). In generale, l’acquifero profondo presenta mediamente più campionamenti rispetto a quello superficiale, mentre quest’ultimo mostra una maggiore variabilità nella copertura annuale, probabilmente a causa del maggior numero di punti di monitoraggio presenti sul territorio afferenti all’acquifero superficiale.

Si notano, poi, diversi intervalli temporali caratterizzati da una ridotta copertura della rete, con percentuali inferiori al 50% dei punti disponibili, in particolare i periodi 2008–2015, 2017–2018, 2020–2021 e l’anno 2023 (Figura 3.2). Tale riduzione può essere attribuita a modifiche nella rete di monitoraggio, aggiornamenti delle metodiche analitiche e, per il biennio 2020–2021, a una possibile contrazione delle attività di campionamento in concomitanza con l’emergenza sanitaria da COVID-19.

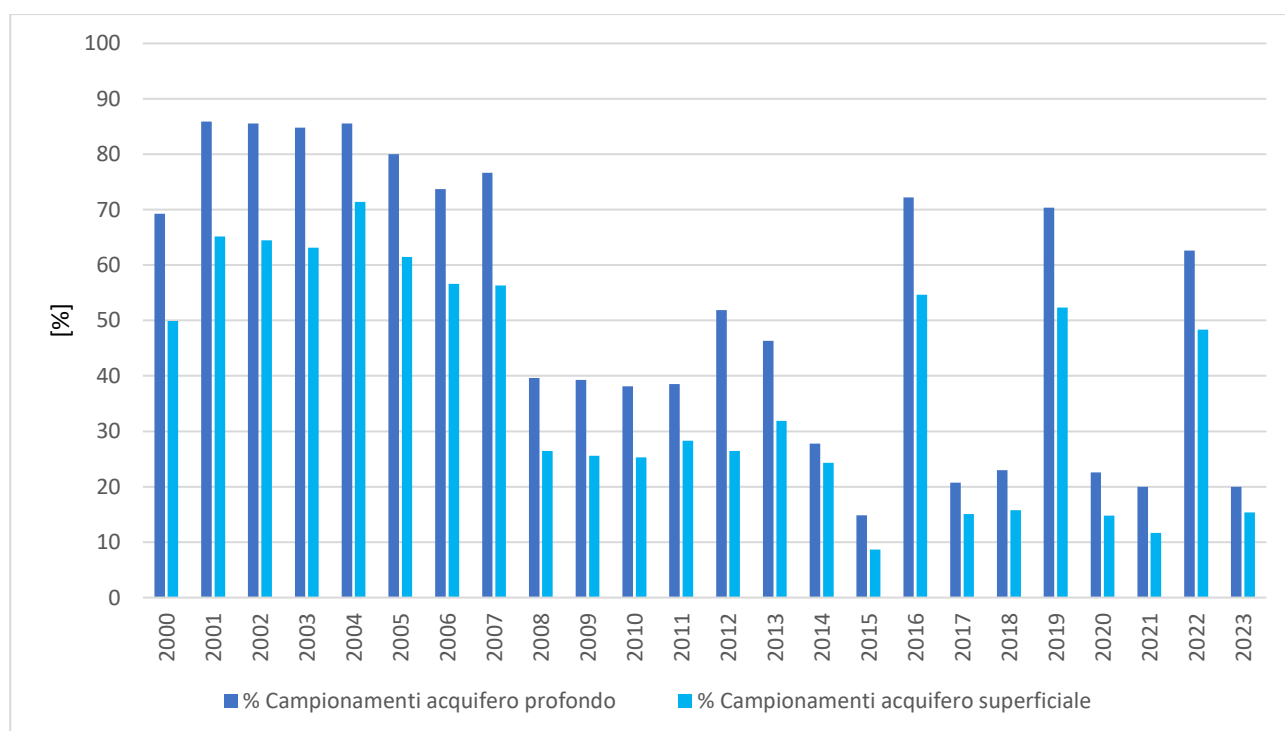


Figura 3.2 – Numero di campionamenti percentuali per anno e per tipologia di acquifero (Dati assoluti forniti da Regione Piemonte)

Le variazioni nella copertura risultano chiaramente osservabili anche nelle mappe tematiche annuali, dove negli anni sopra citati si nota una diminuzione diffusa dei punti rappresentati sul territorio regionale. Chiaramente, a livello interpretativo, anni con un numero ridotto di campionamenti possono influenzare la rappresentatività complessiva delle distribuzioni di concentrazione.

3.2.2 Distribuzione delle concentrazioni e superamenti del limite normativo

Per la valutazione dei superamenti rispetto al limite normativo di 0,15 µg/L è stato considerato esclusivamente il periodo 2014–2023, escludendo i dati relativi alle precedenti annualità per l'impossibilità di distinguere i valori inferiori e superiori al limite normativo a causa del LOQ ad esso superiore.

Le elaborazioni effettuate (Tabella 3.1) riportano, per ciascun anno e per ciascun semestre, il numero totale di campionamenti e il numero di superamenti del limite. Per quanto concerne la distribuzione dei superamenti nelle diverse classi di concentrazione, si rimanda al capitolo successivo in cui è stata effettuata una valutazione più dettagliata nell'ottica della ricerca della possibile fonte inquinante.

Tabella 3.1 – Dettaglio del numero di campionamenti e dei valori sopra e sotto soglia normativa

		Pozzi campionati		Valori sotto soglia		Valori sopra soglia	
		Semestre		Semestre		Semestre	
Anno	Acquifero	1°	2°	1°	2°	1°	2°
2014	SUPERFICIALE	171	157	168	155	3	2
	PROFONDO	75	66	71	65	4	1
2015	SUPERFICIALE	61	60	61	60	0	0
	PROFONDO	40	36	40	33	0	3
2016	SUPERFICIALE	384	371	354	362	30	9
	PROFONDO	195	181	182	169	13	12
2017	SUPERFICIALE	106	57	88	50	18	7
	PROFONDO	56	37	47	31	9	6
2018	SUPERFICIALE	111	103	105	93	6	10
	PROFONDO	62	50	51	40	11	10
2019	SUPERFICIALE	368	315	348	293	20	22
	PROFONDO	190	177	174	162	16	15
2020	SUPERFICIALE	104	89	89	79	15	10
	PROFONDO	52	1	42	0	10	1
2021	SUPERFICIALE	88	85	78	75	10	10
	PROFONDO	47	42	40	34	7	8
2022	SUPERFICIALE	329	286	319	281	10	5
	PROFONDO	162	150	155	143	7	7
2023	SUPERFICIALE	107	81	96	74	11	7
	PROFONDO	54	41	46	35	8	6

Un ulteriore elemento osservato riguarda la distribuzione semestrale dei superamenti: per entrambe le tipologie di acquifero, essi risultano mediamente più frequenti nel primo semestre rispetto al secondo (Figure 3.3 e 3.4). Si suppone che tale differenza potrebbe essere almeno in parte influenzata dal maggior numero di campionamenti generalmente effettuati nel primo semestre, che comporta una maggiore probabilità di intercettare valori superiori al limite. Come meglio verrà esplicitato nel

prossimo capitolo, non emerge una correlazione evidente con l'andamento delle precipitazioni che possa giustificare direttamente questa distribuzione stagionale.

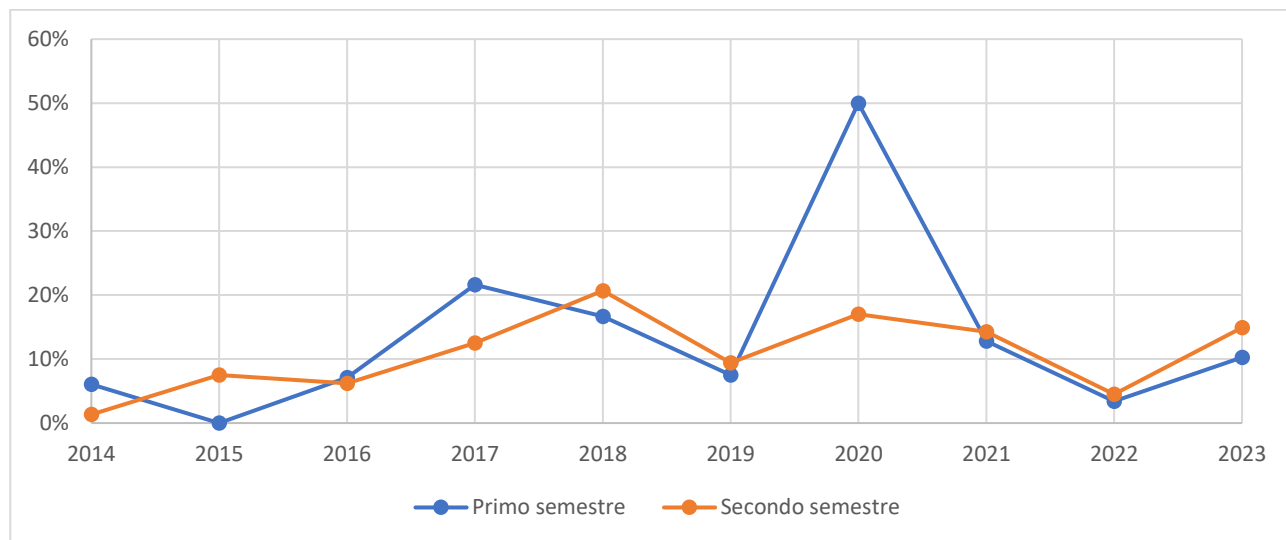


Figura 3.3 – Superamenti percentuali del limite normativo normalizzati rispetto al numero di campionamenti per acquifero profondo

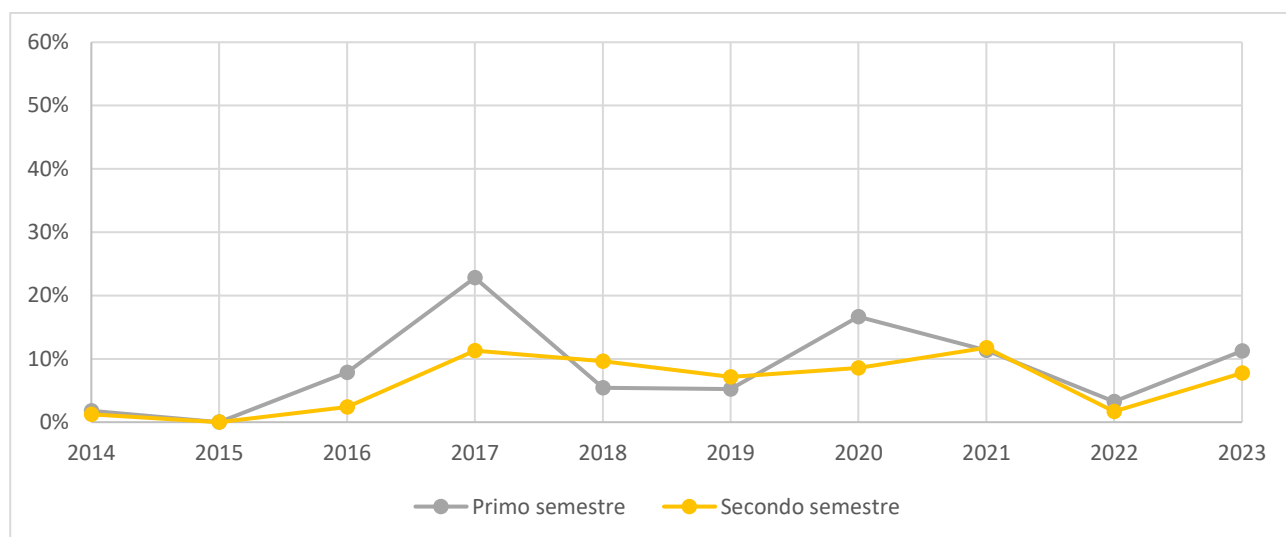


Figura 3.4 – Superamenti percentuali del limite normativo normalizzati rispetto al numero di campionamenti per acquifero superficiale

Infine, analizzando i dati su base annuale, senza distinguere tra primo e secondo semestre, è interessante notare che i superamenti della soglia normativa risultano costantemente più frequenti nell'acquifero profondo rispetto a quello superficiale nel periodo 2014-2023, considerando la frequenza normalizzata rispetto al numero di campionamenti effettuati ogni anno (Figura 3.5). Tale comportamento potrebbe essere messo in relazione con le proprietà fisico-chimiche del cloroformio, descritte nel Capitolo 1, in particolare con le sue caratteristiche di persistenza.

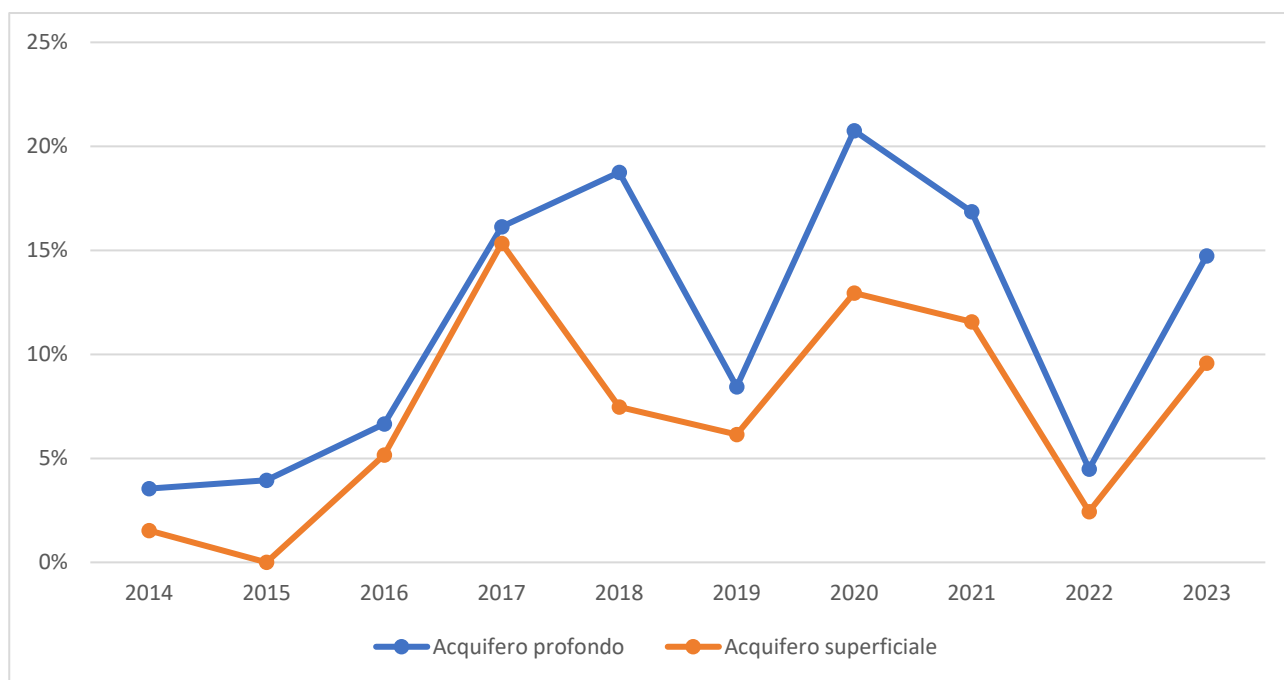


Figura 3.5 – Trend dei superamenti del limite normativo nel periodo 2014-2023 per gli acquiferi profondo e superficiale

3.2.3 Sintesi delle evidenze preliminari e impostazione delle analisi successive

Per questa prima parte di analisi descrittiva relativa al periodo 2014–2023 è possibile riepilogare le prime evidenze emerse.

Innanzitutto occorre citare le osservazioni relative alla copertura del monitoraggio che è risultata essere piuttosto variabile nel tempo, con anni caratterizzati da un numero di campionamenti significativamente inferiore rispetto ad altri. Tale aspetto, pur assumendo un certo ruolo ai fini dell'interpretazione dei dati in quanto può influenzarne la corretta lettura ad esempio in termini di percentuali di superamento del valore soglia rispetto al numero di campionamenti, rappresenta più di tutto uno spunto per i possibili miglioramenti futuri nella gestione delle campagne di monitoraggio.

In secondo luogo, è emerso che la frequenza dei superamenti del limite risulta maggiore in termini percentuali nell'acquifero profondo rispetto a quello superficiale, mettendo in risalto le caratteristiche di persistenza del cloroformio.

È stata inoltre osservata una tendenza a una maggiore incidenza dei superamenti nel primo semestre dell'anno rispetto al secondo, per entrambe le tipologie di acquifero, aspetto che verrà meglio esplicitato nel prossimo capitolo.

A partire da queste evidenze generali, il capitolo successivo approfondirà il periodo 2014–2023 con specifico riferimento al biennio 2020–2021, al fine di valutare eventuali effetti riconducibili alla fase pandemica.

Capitolo 4 – Valutazione dell’impatto del periodo COVID-19: analisi comparativa delle concentrazioni di cloroformio pre-, durante e post-pandemia

Il presente capitolo è dedicato alla valutazione dell’impatto del periodo COVID-19 sulle concentrazioni di cloroformio negli acquiferi superficiale e profondo del territorio piemontese. L’analisi è stata impostata secondo un approccio comparativo, articolato in tre fasi temporali: una fase pre-pandemica (2014–2019), assunta come riferimento per la definizione delle condizioni ordinarie del sistema; una fase pandemica (2020–2021), caratterizzata dalle restrizioni sanitarie e dalla contrazione di numerose attività antropiche; e una fase post-pandemica (2022–2023), corrispondente alla progressiva ripresa delle attività economiche e sociali.

Questa suddivisione consente di interpretare il biennio pandemico non come evento isolato, ma come parte di una dinamica temporale più ampia.

Nei paragrafi successivi verranno approfonditi la distribuzione dei superamenti, le variazioni semestrali delle concentrazioni, la localizzazione dei punti a maggiore criticità e la possibile correlazione con pressioni antropiche e fattori naturali, al fine di comprendere se il periodo pandemico abbia determinato modificazioni apprezzabili nel quadro della contaminazione da cloroformio.

4.1 Distribuzione dei superamenti e confronto tra fase pre-, durante e post-pandemica

In riferimento alla Figura 3.5, nel periodo pre-pandemico (2014–2019), entrambi gli acquiferi mostrano una certa variabilità interannuale nel numero di superamenti. L’acquifero superficiale registra il numero massimo di superamenti nel 2017, mentre l’acquifero profondo presenta valori generalmente più elevati in termini percentuali rispetto al totale dei campionamenti, confermando una maggiore frequenza di concentrazioni superiori alla soglia normativa. Tale comportamento risulta coerente con le caratteristiche fisico-chimiche del cloroformio e, in particolare, con la sua maggiore persistenza nella matrice ambientale.

Durante la fase pandemica (2020–2021) si osserva un incremento del numero di superamenti, in particolare nel 2020 per l’acquifero profondo, anno che rappresenta il massimo dell’intera serie 2014–2023 per tale comparto. Va considerato che la copertura dei campionamenti in questi due anni è

risultata limitata rispetto ad altri periodi, similmente a quanto avviene in anni come 2014, 2015, 2017, 2018 e 2023, nei quali il numero di misurazioni è relativamente basso. Nonostante la ridotta numerosità dei dati, l'aumento dei superamenti nel biennio COVID-19 risulta evidente anche in termini percentuali e non sembra riconducibile esclusivamente alla minore copertura dei campionamenti. Pur considerando l'effetto potenziale della riduzione della rete di monitoraggio, l'analisi indica infatti un incremento della frequenza dei valori superiori alla soglia rispetto alla fase pre-pandemica.

La fase post-pandemica (2022–2023) mostra un comportamento differenziato. Nel 2022, in particolare, si osserva un tasso di superamento particolarmente contenuto per entrambi gli acquiferi, nonostante un numero di campionamenti superiore rispetto agli anni immediatamente precedenti. Questo dato assume rilievo interpretativo, poiché suggerisce che l'incremento osservato nel 2020–2021 non sia stato seguito da un consolidamento della contaminazione, ma piuttosto da una successiva attenuazione. Il 2023 evidenzia un lieve incremento rispetto al 2022, pur mantenendosi entro un intervallo di variabilità comparabile a quello della fase pre-pandemica.

Parallelamente alla valutazione dei superamenti, è stata analizzata la distribuzione dei valori nelle diverse classi di concentrazione per ciascun semestre, al fine di comprendere se eventuali variazioni nel numero di superamenti fossero accompagnate da uno spostamento verso classi più elevate. Nelle Tabelle riepilogative 4.1 (acquifero superficiale) e 4.2 (acquifero profondo) si evince che, anche negli anni con maggior numero di superamenti, la maggior parte dei valori si colloca nelle classi immediatamente superiori alla soglia normativa, mentre le concentrazioni significativamente più elevate rimangono circoscritte a un numero limitato di punti.

Tabella 4.1 - Distribuzione delle concentrazioni di cloroformio nelle classi di concentrazione – Acquifero superficiale

Anno 2014			
1° Semestre			
Pozzi campionati	171		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	168		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	3	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	2
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	157		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	155		

Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	2	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	1
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.5		
Anno 2015			
1° Semestre			
Pozzi campionati	61		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	61		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	0	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	0
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	60		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	60		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	0	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	0
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.1		
Anno 2016			
1° Semestre			
Pozzi campionati	384		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	354		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	30	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	20
		(0. 5-1] ug/l	7
		(1-5] ug/l	3
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	3.2		
2° Semestre			
Pozzi campionati	371		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	362		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	9	Classe di concentrazione	Numero di valori

		(0.15-0.5] ug/l	4
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	3
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	2.5		
Anno 2017			
1° Semestre			
Pozzi campionati	106		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	88		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	18	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	9
		(0. 5-1] ug/l	4
		(1-5] ug/l	4
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	5.2		
2° Semestre			
Pozzi campionati	57		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	50		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	7	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	4
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	9.3		
Anno 2018			
1° Semestre			
Pozzi campionati	111		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	105		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	6	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	1
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	3
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	5.1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	103		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	93		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	8

		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	1
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	12		
Anno 2019			
1° Semestre			
Pozzi campionati	368		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	348		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	20	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	12
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	6
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	3.4		
2° Semestre			
Pozzi campionati	315		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	293		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	22	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	15
		(0. 5-1] ug/l	4
		(1-5] ug/l	3
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	4.6		
Anno 2020			
1° Semestre			
Pozzi campionati	104		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	89		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	15	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	9
		(0. 5-1] ug/l	4
		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.9		
2° Semestre			
Pozzi campionati	89		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	79		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	2

		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	4.7		
Anno 2021			
1° Semestre			
Pozzi campionati	88		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	78		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	5
		(0. 5-1] ug/l	4
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	7.8		
2° Semestre			
Pozzi campionati	85		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	75		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	8
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	4		
Anno 2022			
1° Semestre			
Pozzi campionati	329		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	319		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	3
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	286		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	281		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	5	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	3
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1

		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	2.2		
Anno 2023			
1° Semestre			
Pozzi campionati	107		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	96		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	11	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	3
		(0. 5-1] ug/l	5
		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	5.5		
2° Semestre			
Pozzi campionati	81		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	74		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	7	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	2
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	5
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	4.4		

Tabella 4.2 - Distribuzione delle concentrazioni di cloroformio nelle classi di concentrazione – Acquifero profondo

Anno 2014			
1° Semestre			
Pozzi campionati	75		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	71		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	4	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	2
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	66		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	65		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	1	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	0

		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.2		
Anno 2015			
1° Semestre			
Pozzi campionati	40		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	40		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	0	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	0
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	36		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	33		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	3	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	0
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	1
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	25		
Anno 2016			
1° Semestre			
Pozzi campionati	195		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	182		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	13	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	7
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1		
2° Semestre			
Pozzi campionati	181		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	169		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	12	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	9
		(0. 5-1] ug/l	1

		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.7		
Anno 2017			
1° Semestre			
Pozzi campionati	56		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	47		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	9	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	3
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.95		
2° Semestre			
Pozzi campionati	37		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	31		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	6	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	3
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.5		
Anno 2018			
1° Semestre			
Pozzi campionati	62		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	51		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	11	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	7
		(0. 5-1] ug/l	3
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.2		
2° Semestre			
Pozzi campionati	50		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	40		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	8
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1

		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.1		
Anno 2019			
1° Semestre			
Pozzi campionati	190		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	174		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	16	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	11
		(0. 5-1] ug/l	3
		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.8		
2° Semestre			
Pozzi campionati	177		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	162		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	15	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	8
		(0. 5-1] ug/l	5
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	1
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	9.4		
Anno 2020			
1° Semestre			
Pozzi campionati	52		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	42		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	10	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	2
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	4.4		
2° Semestre			
Pozzi campionati	1		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	0		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	1	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	1
		(0. 5-1] ug/l	0
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0

		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.16		
Anno 2021			
1° Semestre			
Pozzi campionati	47		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	40		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	7	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	5
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.84		
2° Semestre			
Pozzi campionati	42		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	34		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	8	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	6
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.7		
Anno 2022			
1° Semestre			
Pozzi campionati	162		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	155		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	7	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	5
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	0
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	0.91		
2° Semestre			
Pozzi campionati	150		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	143		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	7	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	5
		(0. 5-1] ug/l	1
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0

		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	2.2		
Anno 2023			
1° Semestre			
Pozzi campionati	54		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	46		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	8	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	4
		(0. 5-1] ug/l	3
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	1.2		
2° Semestre			
Pozzi campionati	41		
Valori sotto soglia (<=0.15 ug/l)	35		
Valori sopra soglia (>0.15 ug/l)	6	Classe di concentrazione	Numero di valori
		(0.15-0.5] ug/l	3
		(0. 5-1] ug/l	2
		(1-5] ug/l	1
		(5-10] ug/l	0
		(10-25] ug/l	0
		>25 ug/l	0
Valore massimo [ug/l]	2		

Questi risultati suggeriscono che le variazioni osservate nel biennio pandemico non siano riconducibili a un aumento generalizzato dell'intensità della contaminazione, ma piuttosto a dinamiche puntuali e localizzate. Per approfondire tale aspetto, nel paragrafo successivo verrà analizzata in dettaglio l'evoluzione semestrale delle concentrazioni, distinguendo tra aumenti irrilevanti, modesti e netti, al fine di individuare eventuali incrementi realmente significativi nel periodo di interesse.

4.2 Analisi semestrale delle variazioni e classificazione degli aumenti

Per approfondire le dinamiche dei superamenti e comprendere meglio le variazioni puntuali, sono state realizzate mappe semestrali (Appendice D) che rappresentano l'andamento delle concentrazioni: i punti senza variazione rispetto al semestre precedente sono indicati con una X, le diminuzioni con una freccia verde verso il basso, e gli aumenti con una freccia rossa verso l'alto.

Parallelamente, per ciascun punto di monitoraggio indicante un aumento della concentrazione di cloroformio tra un semestre e l'altro, si è proceduto con l'obiettivo di distinguere le variazioni effettive rispetto alle possibili fluttuazioni legate, ad esempio, alla sensibilità strumentale. Pertanto, gli aumenti osservati sono stati classificati in tre categorie:

- Aumenti irrilevanti, quando la variazione rispetto al primo semestre era inferiore al limite di quantificazione (0,10 µg/L fino al 2016, 0,05 µg/L dal 2017), indicando differenze potenzialmente legate alla precisione analitica più che a un reale incremento della contaminazione.
- Aumenti modesti, per variazioni comprese tra il LOQ e 0,5 µg/L, considerate comunque limitate ma sufficienti a evidenziare un incremento concreto rispetto al semestre precedente.
- Aumenti netti, per variazioni superiori a 0,5 µg/L, che indicano un incremento significativo della concentrazione e suggeriscono la possibile presenza di una pressione contaminante reale.

L'analisi ha permesso di identificare con precisione i punti in cui le concentrazioni sono effettivamente aumentate, evidenziando differenze tra acquifero superficiale e profondo. In particolare, per l'acquifero superficiale, durante il biennio COVID-19, si rilevano alcuni aumenti netti localizzati, mentre per l'acquifero profondo non sono stati osservati incrementi netti nel 2020–2021, nonostante un aumento complessivo dei superamenti. Questo risultato indica che, pur in presenza di una minore copertura dei campionamenti e di un incremento dei superamenti percentuali, l'intensità degli aumenti significativi non si concentra in nuovi punti critici durante la pandemia, ma riflette piuttosto la continuità di fenomeni preesistenti.

Le mappe semestrali ottenute per tale analisi sono anch'esse riportate in Appendice D. Inoltre, i risultati quantitativi sono riepilogati nelle Tabelle 4.3 (acquifero superficiale) e 4.4 (acquifero profondo) dalle quali è possibile evincere, in particolare, come i campionamenti del secondo semestre di ciascun anno considerato si distribuiscano nelle diverse "classi di variazione" (nessuna variazione, aumento, diminuzione) e, nel caso di aumento, quale ne sia l'entità (irrilevante, modesta, netta).

Tabella 4.2 – Variazione della concentrazione di cloroformio tra primo e secondo semestre ed entità degli aumenti – acquifero superficiale

Anno 2014		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	14	
Nessuna variazione	152	
Diminuzioni	3	
Aumenti	2	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti (Δ < LOQ*)	Modesti (Δ ≤ 0.5 ug/l)	Netti (Δ > 0.5 ug/l)
0	1	1
Anno 2015		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	1	
Nessuna variazione	60	
Diminuzioni	0	
Aumenti	0	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti (Δ < LOQ*)	Modesti (Δ ≤ 0.5 ug/l)	Netti (Δ > 0.5 ug/l)
0	0	0
Anno 2016		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	13	
Nessuna variazione	336	
Diminuzioni	29	
Aumenti	6	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti (Δ < LOQ*)	Modesti (Δ ≤ 0.5 ug/l)	Netti (Δ > 0.5 ug/l)
2	2	2
Anno 2017		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	49	
Nessuna variazione	37	
Diminuzioni	15	
Aumenti	5	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti (Δ < LOQ**)	Modesti (Δ ≤ 0.5 ug/l)	Netti (Δ > 0.5 ug/l)
0	3	2
Anno 2018		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	8	
Nessuna variazione	81	
Diminuzioni	3	
Aumenti	19	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti (Δ < LOQ**)	Modesti (Δ ≤ 0.5 ug/l)	Netti (Δ > 0.5 ug/l)

11	6	2
Anno 2019		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	53	
Nessuna variazione	274	
Diminuzioni	22	
Aumenti	19	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
9	8	2
Anno 2020		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	15	
Nessuna variazione	69	
Diminuzioni	7	
Aumenti	13	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
6	5	2
Anno 2021		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	3	
Nessuna variazione	67	
Diminuzioni	12	
Aumenti	6	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
1	5	0
Anno 2022		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	43	
Nessuna variazione	269	
Diminuzioni	11	
Aumenti	6	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
3	2	1
Anno 2023		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	26	
Nessuna variazione	68	
Diminuzioni	7	
Aumenti	6	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
3	1	2

*LOQ=0.10 ug/l

****LOQ=0.05 ug/l**

Tabella 4.3 – Variazione della concentrazione di cloroformio tra primo e secondo semestre ed entità degli aumenti – acquifero profondo

Anno 2014		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	9	
Nessuna variazione	62	
Diminuzioni	3	
Aumenti	1	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^*$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
1	0	0
Anno 2015		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	4	
Nessuna variazione	33	
Diminuzioni	0	
Aumenti	3	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^*$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
0	0	3
Anno 2016		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	14	
Nessuna variazione	163	
Diminuzioni	10	
Aumenti	8	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^*$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
4	2	2
Anno 2017		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	19	
Nessuna variazione	26	
Diminuzioni	7	
Aumenti	4	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
1	2	1
Anno 2018		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	12	
Nessuna variazione	37	
Diminuzioni	9	
Aumenti	4	
Entità degli aumenti		

Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
2	2	0
Anno 2019		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	13	
Nessuna variazione	148	
Diminuzioni	16	
Aumenti	13	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
4	7	2
Anno 2020		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	51	
Nessuna variazione	0	
Diminuzioni	1	
Aumenti	0	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
0	0	0
Anno 2021		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	5	
Nessuna variazione	27	
Diminuzioni	10	
Aumenti	5	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
1	4	0
Anno 2022		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	12	
Nessuna variazione	136	
Diminuzioni	6	
Aumenti	8	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
3	4	1
Anno 2023		
Variazione della concentrazione di cloroformio rispetto al 1° semestre		
Punti non campionati	13	
Nessuna variazione	29	
Diminuzioni	5	
Aumenti	7	
Entità degli aumenti		
Irrilevanti ($\Delta < \text{LOQ}^{**}$)	Modesti ($\Delta \leq 0.5 \text{ ug/l}$)	Netti ($\Delta > 0.5 \text{ ug/l}$)
2	3	2

*LOQ=0.10 ug/l

**LOQ=0.05 ug/l

4.3 Verifica della persistenza storica dei punti critici

Nel paragrafo precedente è emerso come, pur in presenza di un incremento percentuale dei superamenti nel biennio pandemico, l'intensità degli aumenti significativi non sembra concentrarsi in nuovi punti critici, ma piuttosto riflettere la continuità di fenomeni preesistenti.

Al fine di verificare tale aspetto, è stata condotta un'analisi cumulativa sull'intero periodo 2014–2023, con l'obiettivo di distinguere tra situazioni episodiche e criticità persistenti nel tempo.

I pozzi sono stati pertanto classificati sulla base della frequenza cumulata dei superamenti della soglia normativa nel periodo 2014–2023, distinguendo tre categorie:

- Pozzi in classe “verde”: nessun superamento nel periodo considerato (o valori sempre inferiori alla soglia, con eventuale lieve variabilità ma comunque senza superamento).
- Pozzi in classe “gialla”: superamenti sporadici, definiti come uno o due superamenti non consecutivi nell'arco temporale analizzato.
- Pozzi in classe “rossa”: superamenti frequenti, definiti come più di tre superamenti complessivi oppure almeno due superamenti consecutivi, indicativi di una presenza ricorrente o persistente di cloroformio al di sopra della soglia normativa.

Questa classificazione consente interpretare la frequenza dei superamenti in funzione della possibile natura del fenomeno: i pozzi in classe rossa come potenzialmente influenzati da pressioni stabili o semi-permanenti nel tempo, quelli in classe gialla legati, ad esempio, a eventi transitori o localizzati.

Le rimostranze grafiche di tale classificazione sono riportate in Figura 4.1.

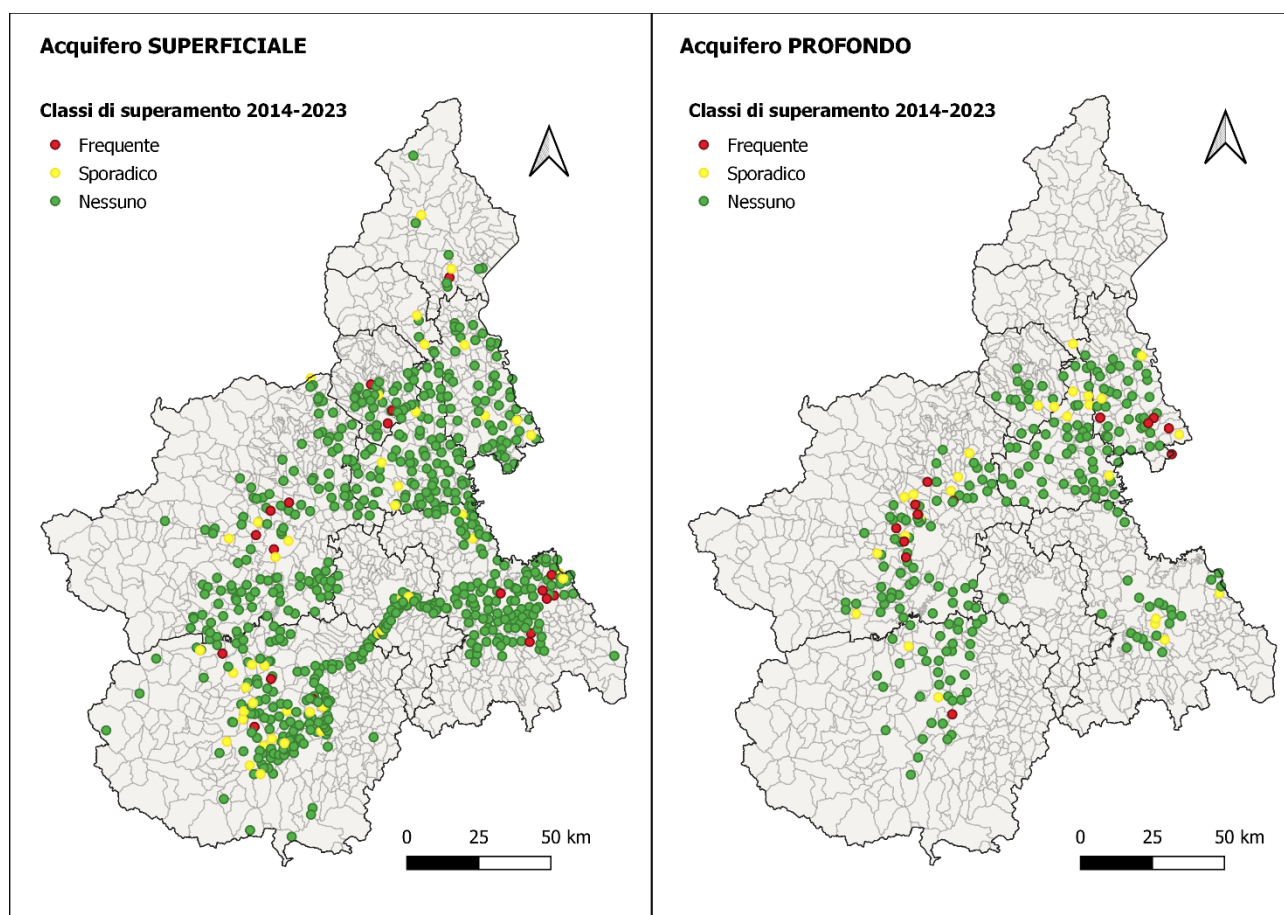


Figura 4.1 – Punti di monitoraggio distinti in classi di superamento della soglia normativa per acquiferi superficiale e profondo

L'analisi è stata quindi estesa verificando la corrispondenza tra i punti di monitoraggio classificati come “frequenti” (rossi) e:

- i pozzi che hanno registrato aumenti netti ($\Delta > 0,5 \mu\text{g/L}$) nel periodo 2019–2023;
- i pozzi con superamenti della soglia normativa nel periodo 2020–2022.

Come già dichiarato nel Capitolo 3, lo storico dei dati di concentrazione di ciascun punto di monitoraggio è apprezzabile in Appendice A per l'acquifero superficiale e in Appendice B per l'acquifero profondo.

Per quanto concerne l'acquifero superficiale sono stati individuati 19 punti in classe rossa nel periodo 2014–2023 (Tabella 4.4).

Nel dettaglio:

- Dei 7 pozzi che hanno mostrato aumenti netti nel periodo 2019–2023 (Tabella 4.5), 3 risultavano già appartenenti alla classe rossa.
- Degli 11 pozzi con superamenti registrati tra il 2020 e il 2022 (Tabella 4.6), solo 2 non erano già compresi nella classe dei superamenti frequenti.

Ne deriva che la quasi totalità dei superamenti osservati durante il periodo pandemico interessa pozzi che presentavano già una storia di superamenti ricorrenti, mentre il numero di nuovi punti critici risulta limitato.

Tabella 4.4 – Punti di monitoraggio in classe “rossa” (superamenti frequenti tra il 2014 e il 2023) per acquifero superficiale

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
127210001	Torino
109010001	Collegno
106310001	Caselle Torinese
113010001	Leinì
406100001	Centallo
414700008	Narzole
421510001	Savigliano
418000001	Revello
9605800004	Salussola
9603110001	Massazza
9600410001	Biella
605310001	Castelnuovo Scrivia
617400008	Tortona
617410002	Tortona
617400006	Tortona
611410001	Novi Ligure
613800002	Pozzolo Formigaro
600300023	Alessandria
10301900001	Casale Corte Cerro

Tabella 4.5 – Punti di monitoraggio dell’acquifero superficiale che mostrano aumenti netti della concentrazione di cloroformio tra primo e secondo semestre del periodo 2019-2023

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
404300005	Carrù
10307500002	Villadossola
404900001	Castelletto Stura
9605800004	Salussola
406100001	Centallo
215600002	Varallo
611410001	Novi Ligure

Tabella 4.6 – Punti di monitoraggio dell’acquifero superficiale con superamenti della soglia normativa della concentrazione di cloroformio nel periodo 2020-2022

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
127210001	Torino
109010001	Collegno
106310001	Caselle Torinese
605310001	Castelnuovo Scrivia

617400006	Tortona
10301900001	Casale Corte Cerro
413600003	Montanera
610900001	Morano sul Po
414700008	Narzole
9603110001	Massazza
9600410001	Biella

Per quanto riguarda l’acquifero profondo sono stati individuati 13 pozzi in classe rossa nel periodo 2014–2023 (Tabella 4.7).

L’incrocio dei dati mostra che:

- Dei 4 pozzi con aumenti netti nel periodo 2019–2023, 2 appartenevano già alla classe rossa (Tabella 4.8).
- Dei 9 pozzi con superamenti nel periodo 2020–2022, solo 1 non risultava già classificato come frequente nel periodo cumulato (Tabella 4.9).

Anche per l’acquifero profondo, pertanto, i superamenti e gli incrementi osservati a cavallo della pandemia si concentrano prevalentemente in punti già storicamente critici, con un contributo marginale di nuovi pozzi interessati.

Tabella 4.7 – Punti di monitoraggio in classe “rossa” (superamenti frequenti) per acquifero profondo

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
102400003	Beinasco
112000002	Grugliasco
118900001	Pianezza
129200005	Venaria Reale
106300006	Caselle Torinese
121800002	Rivarossa
131400002	Volpiano
401900001	Bene Vagienna
312900002	Recetto
310600019	Novara
310600025	Novara
314900004	Trecate
314600001	Tornaco

Tabella 4.8 – Punti di monitoraggio dell’acquifero profondo che mostrano aumenti netti della concentrazione di cloroformio tra primo e secondo semestre del periodo 2019-2023

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
401900001	Bene Vagienna
211600001	Roasio
213700002	Serravalle Sesia
312900002	Recetto

Tabella 4.9 – Punti di monitoraggio dell’acquifero profondo con superamenti della soglia normativa della concentrazione di cloroformio nel periodo 2020-2022

Codice del punto di monitoraggio	Comune di appartenenza
102400003	Beinasco
314900004	Trecate
118900001	Pianezza
129200005	Venaria Reale
106300006	Caselle Torinese
121800002	Rivarossa
310600025	Novara
314600001	Tornaco
601200001	Basaluzzo

In conclusione, dal confronto tra i punti critici del periodo 2019–2023 e i pozzi classificati come a superamento frequente nel periodo 2014–2023 emerge una certa continuità del fenomeno, facendo ipotizzare che le dinamiche osservate durante la pandemia non abbiano introdotto nuove pressioni, ma abbiano prevalentemente confermato le criticità delle aree già storicamente soggette a superamenti abbastanza ricorrenti.

4.4 Analisi spaziale dei punti critici e individuazione dei possibili centri di pericolo

In continuità con quanto emerso nel precedente paragrafo, l’analisi è stata approfondita a livello spaziale proprio con l’obiettivo di correlare i punti a maggiore concentrazione di cloroformio con le possibili fonti di contaminazione, compatibili a livello generale con la sua formazione (Capitolo 1) e/o correlabili al maggiore uso di solventi che ha caratterizzato il periodo pandemico.

Sono stati pertanto selezionati tutti i punti di monitoraggio che hanno evidenziato, nel periodo 2019–2023, aumenti netti di concentrazione ($\Delta > 0,5 \mu\text{g/L}$), nonché tutti i punti che hanno registrato superamenti della soglia normativa nel triennio 2020–2022. Tali punti sono stati riportati in ambiente GIS (QGIS) e sovrapposti ai dati piezometrici e alle direzioni del flusso, con anche il supporto di

ortofoto satellitari (Google Maps) e della cartografia di uso del suolo (Corine Land Cover, fonte: Geoportale Regione Piemonte).

L'analisi ha considerato, per ciascun pozzo, la presenza nell'intorno territoriale di potenziali fonti riconducibili alle categorie già descritte nel Capitolo 1, ovvero: attività industriali (lavorazione metalli, industrie chimiche, cartiere, produzioni plastiche e tessili), impianti di gestione rifiuti e depurazione, agricoltura intensiva (monocolture, risaie, foraggiere permanenti), nonché contesti urbanizzati. Per ogni punto è stata inoltre valutata la posizione delle possibili fonti rispetto alla direzione di flusso dell'acquifero, al fine di verificare la compatibilità idrogeologica delle pressioni individuate.

La collocazione spaziale di ciascun punto di monitoraggio considerato è riportata nelle Figure 4.2–4.30. Le immagini, corredate da una breve descrizione in didascalia, evidenziano le principali caratteristiche del contesto territoriale circostante rilevanti ai fini della presente analisi.

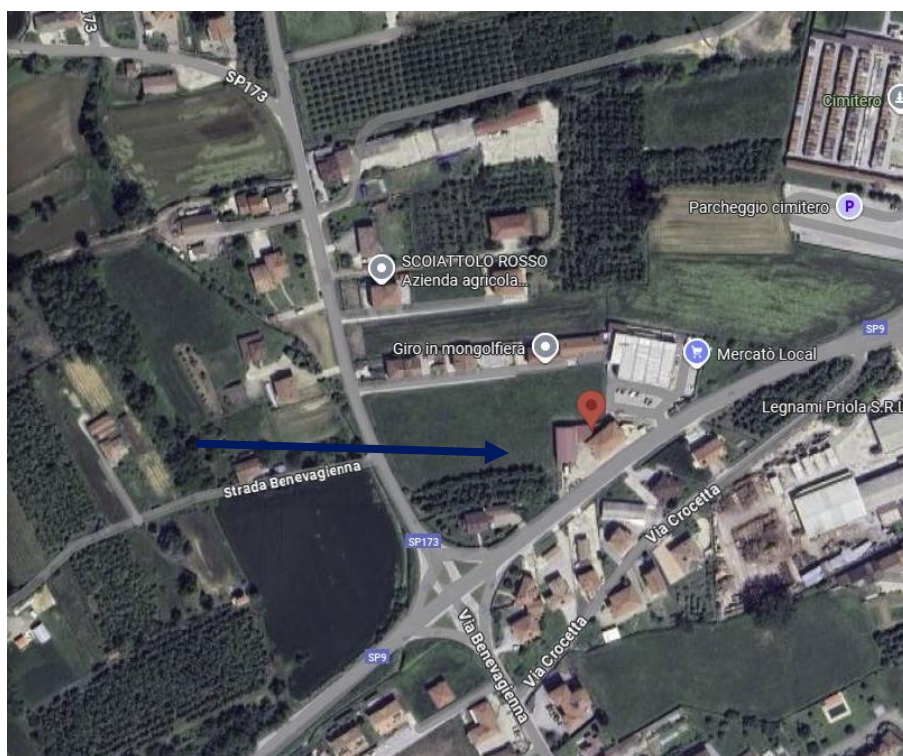


Figura 4.2 - Carrù (CN) – 404300005 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in zone residenziali ed è adiacente a prato stabile con foraggiere permanenti (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

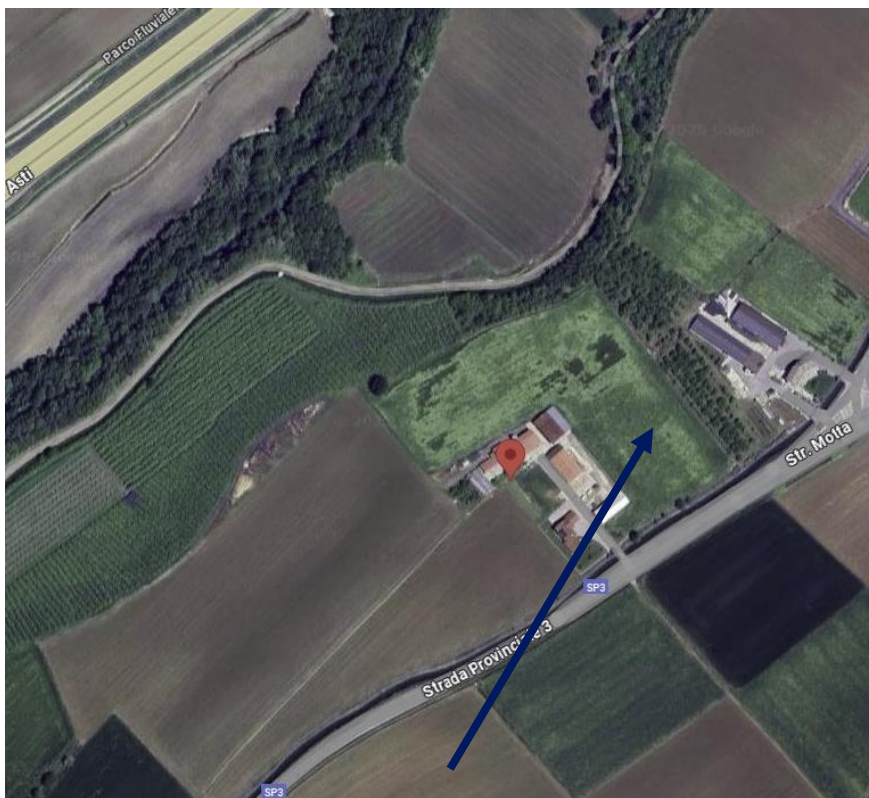


Figura 4.3 – Castelletto Stura (CN) – 404900001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in area destinata a monocolture intensive (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

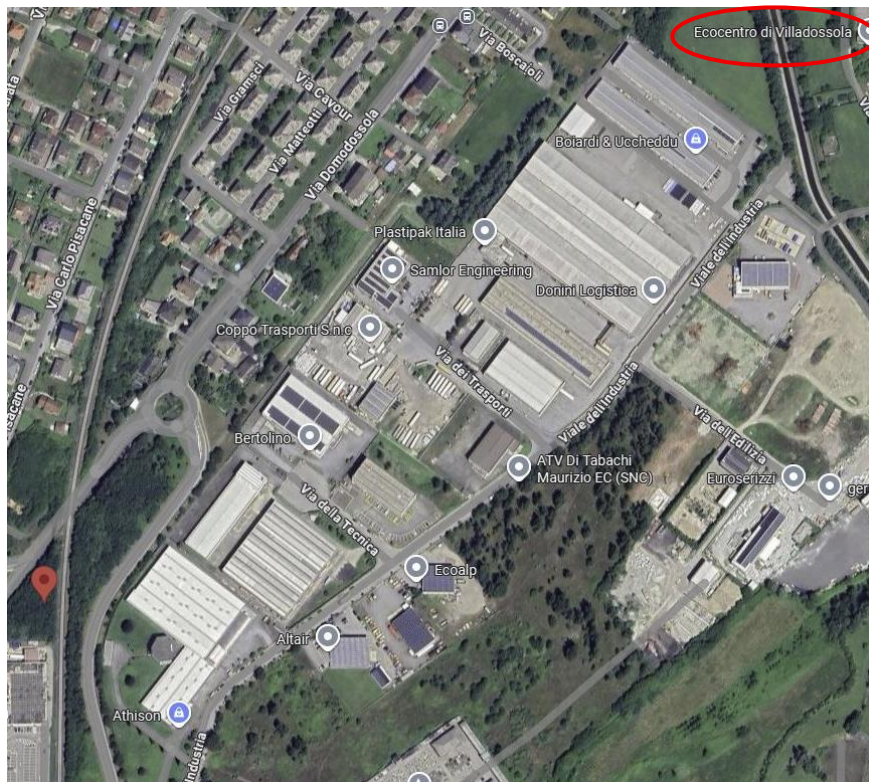


Figura 4.4 – Villadossola (VB) – 10307500002 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in area industriale, commerciale e dei servizi pubblici. Esso è adiacente ad aziende operanti nell'ambito dei trasporti e a discarica (Fonte: Google Maps). A circa 400 m si segnala sito ASCO attivo (cod. reg. 01-01879) legato a "eventi accidentali – presenza di sostanze inquinanti legata a cattiva gestione di impianti o strutture", in particolare diossine (PoliCloroDibenzoDiossine) e furani (PoliCloroDibenzoFurani).

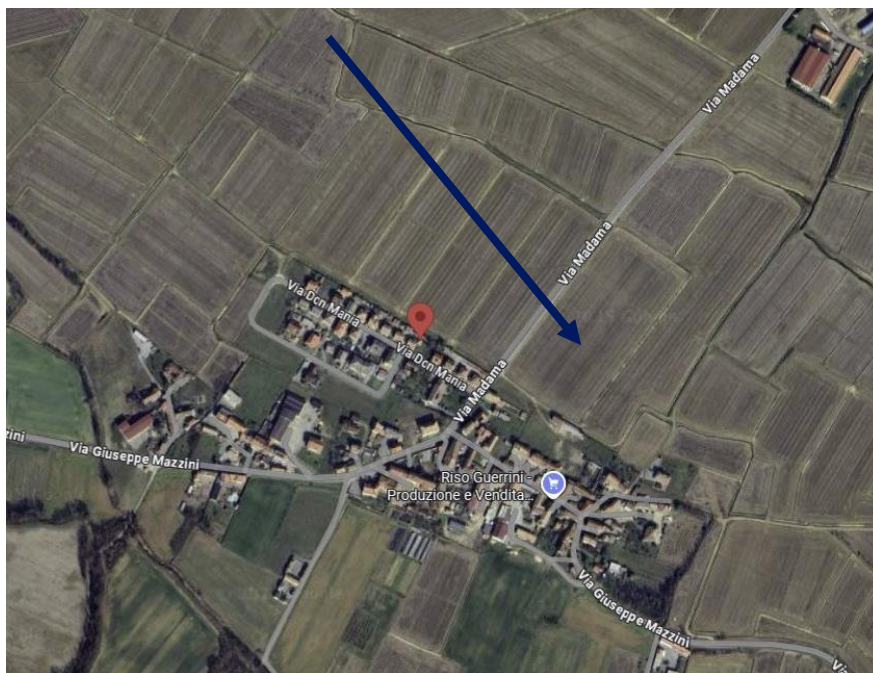


Figura 4.5 – Salussola (BI) – 9605800004 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in area adiacente a risaie (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

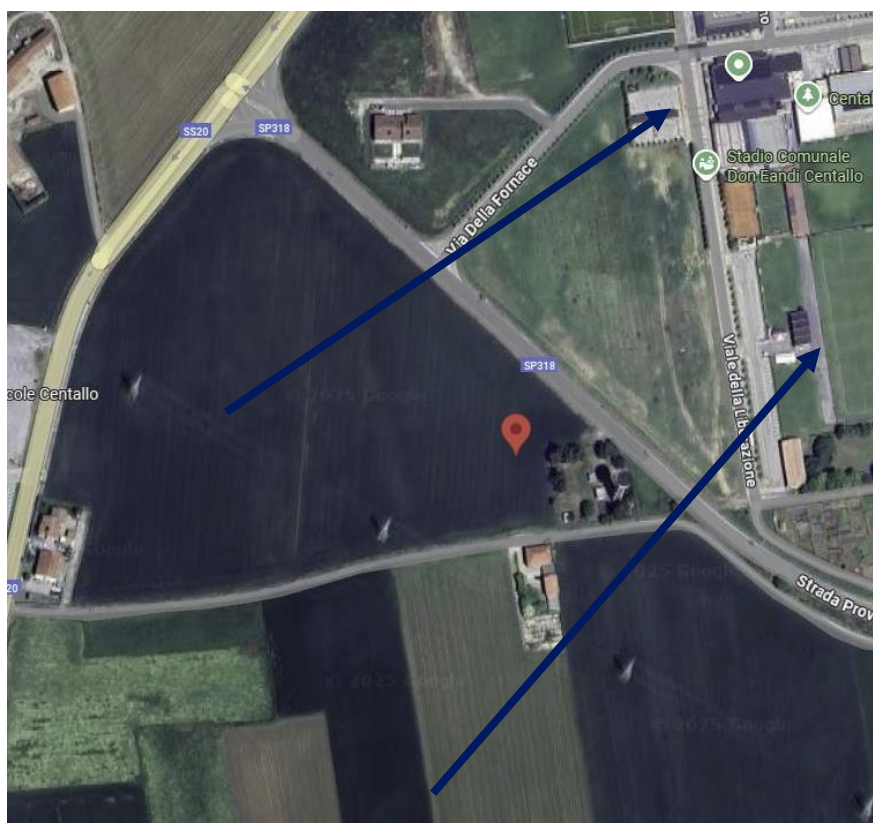


Figura 4.6 – Centallo (CN) – 406100001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in area adibita a monoculture intensive (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.7 – Varallo (VC) – 215600002 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in area destinata a insediamenti produttivi, commerciali, dei servizi pubblici e privati, delle reti e delle aree infrastrutturali. Esso è adiacente ad aziende specializzate nella lavorazione dei metalli (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

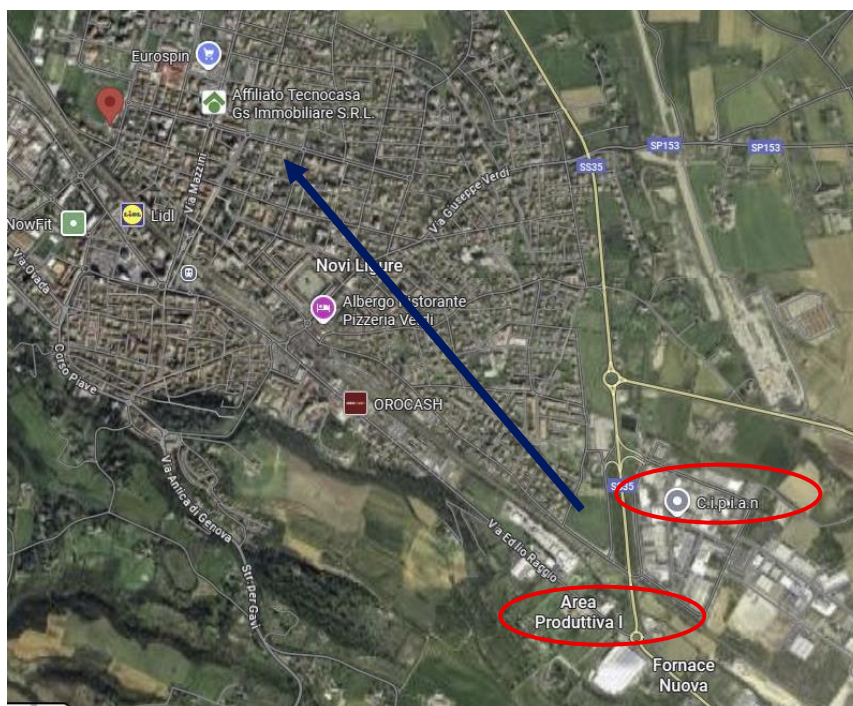


Figura 4.8 – Novi Ligure (AL) – 611410001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto fortemente urbanizzato (Fonte: Google Maps). A meno di 3 km in direzione del flusso presente area produttiva con presenza di azienda cartiera e di lavorazione acciai. Si segnala a circa 1.6 km un sito ASCO (cod. reg. 01-01507) "Presenza di sostanze inquinanti dovuta a cattiva gestione di impianti o strutture" (Alifatici alogenati, Idrocarburi, Aromatici, Composti inorganici e metalli, Alifatici clorurati, Fenoli e

clorofenoli), attualmente conclusosi con bonifica e ripristino ambientale. Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.9 – Caselle Torinese (TO) – 106310001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) è adiacente ad aziende per la produzione della carta e a un centro di raccolta. Si segnala anche la presenza di piscine pubbliche e private in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.10 – Castelnuovo Scrivia (AL) – 605310001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto urbanizzato ed è adiacente ad aree agricole (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.11 – Collegno (TO) – 109010001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) è adiacente a RSA in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

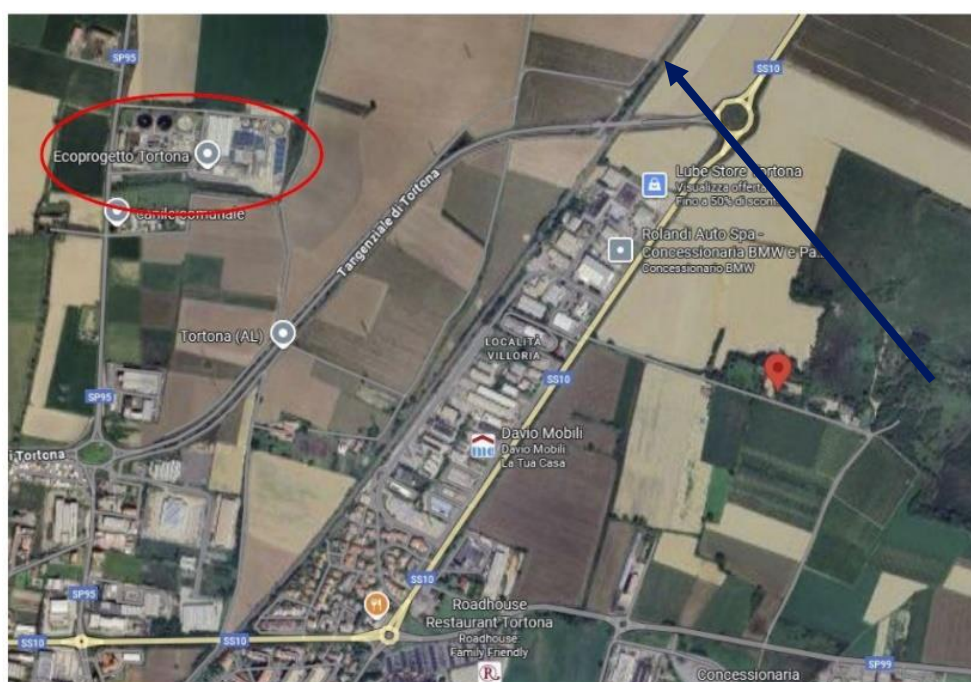


Figura 4.12 – Tortona (AL) – 617400006 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) è adiacente ad aree agricole e risulta poco distante da depuratore sebbene non in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.13 – Massazza (BI) – 9603110001(acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) è adiacente ad aree agricole e risulta poco distante da depuratore sebbene non in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.14 – Torino (TO) – 127210001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto fortemente urbanizzato. Si segnalano due poli sanitari in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

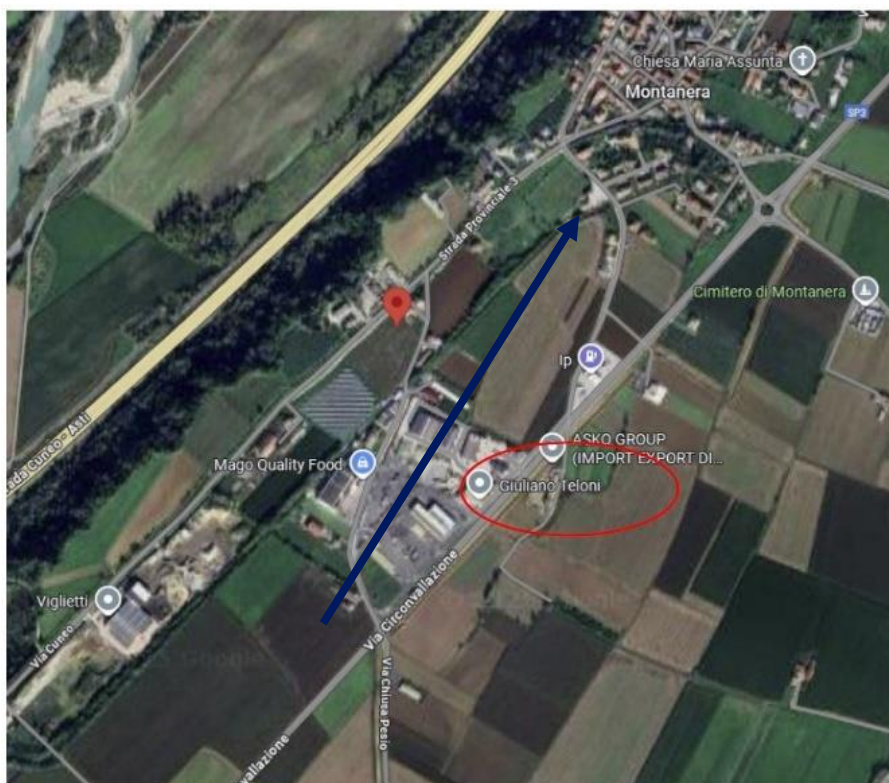


Figura 4.15 – Montanera (CN) – 413600003 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) è adiacente ad azienda specializzata nella produzione di materie plastiche (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

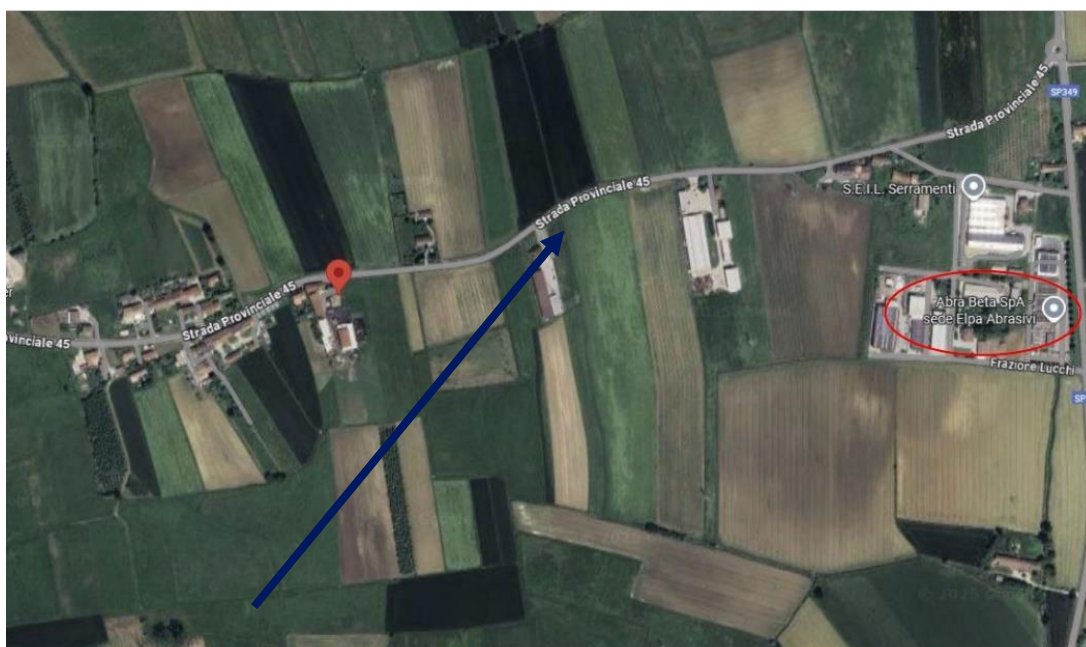


Figura 4.16 – Narzole (CN) – 414700008 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto agricolo e risulta poco distante da azienda specializzata nella produzione di utensili metallici sebbene non in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.17 – Biella (BI) – 9600410001 (acquifero superficiale). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto fortemente urbanizzato (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

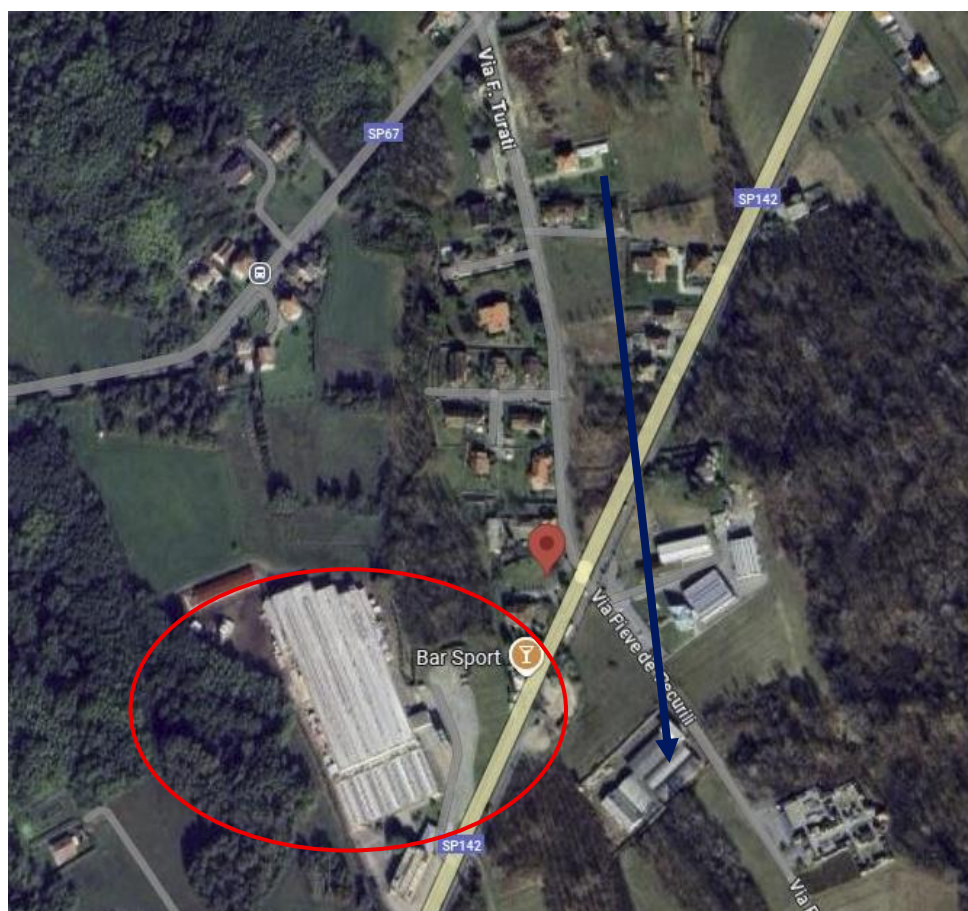


Figura 4.18 – Roasio (VC) – 211600001 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto di aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici. Esso è adiacente ad azienda specializzata nella produzione di materie plastiche (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

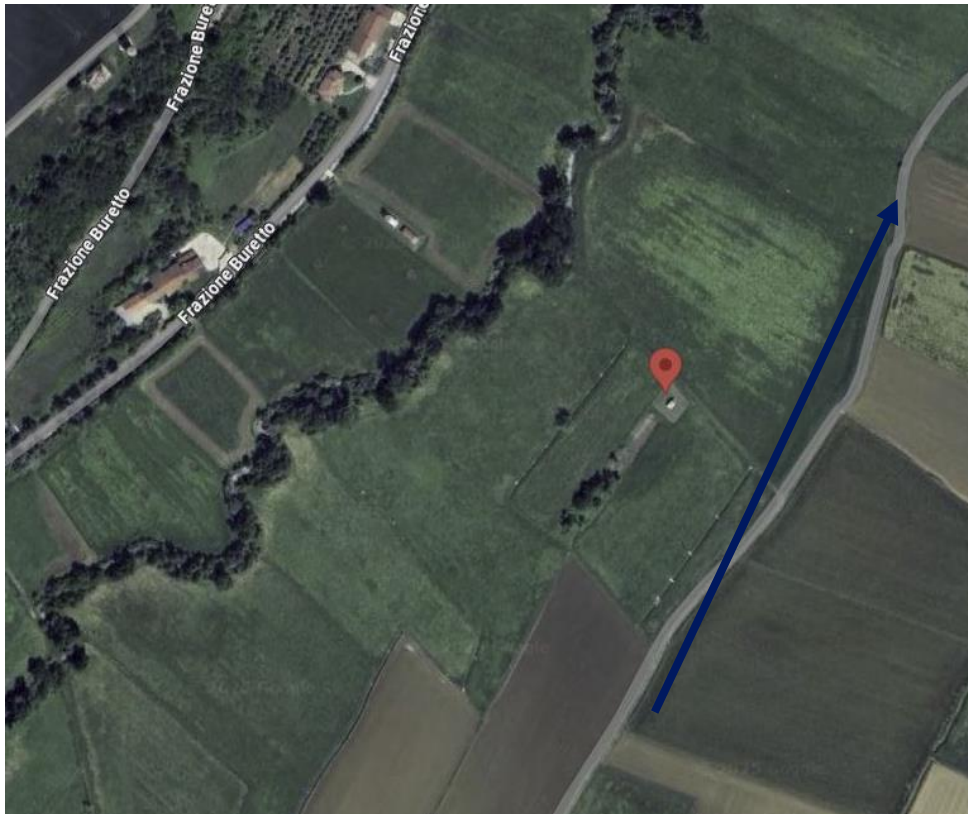


Figura 4.19 – Bene Vagienna (CN) – 401900001 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) è inserito in aree adibite a prati stabili con foraggiere permanenti (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.20 – Serravalle Sesia (VC) – 217000002 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in zone residenziali. Esso è adiacente a discarica di rifiuti urbani (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

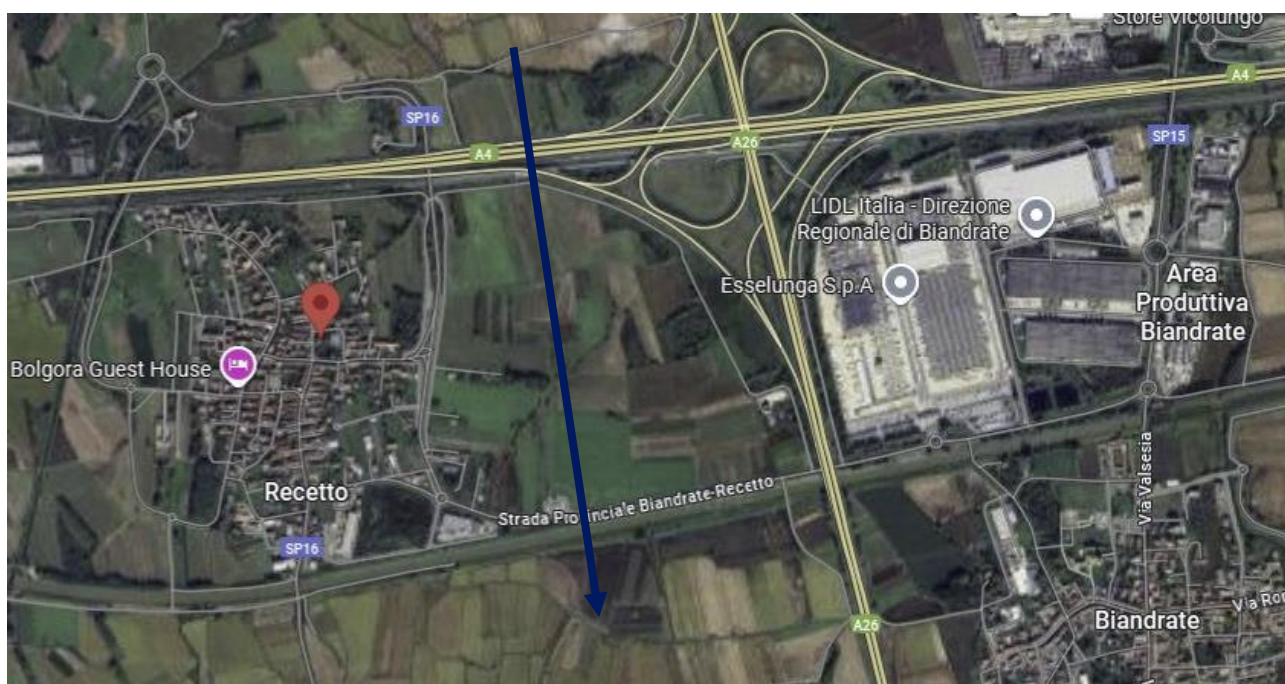


Figura 4.21 – Recetto (NO) – 312900002 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in aree industriali. Esso è circondato da aree adibite a monoculture intensive e a circa 2 km si segnala la presenza di aziende per la produzione e lavorazione di materie plastiche, sebbene non in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.22 – Caselle Torinese (TO) – 106300006 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto agricolo. Si segnala presenza di azienda per la lavorazione di materie plastiche a poca distanza e in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

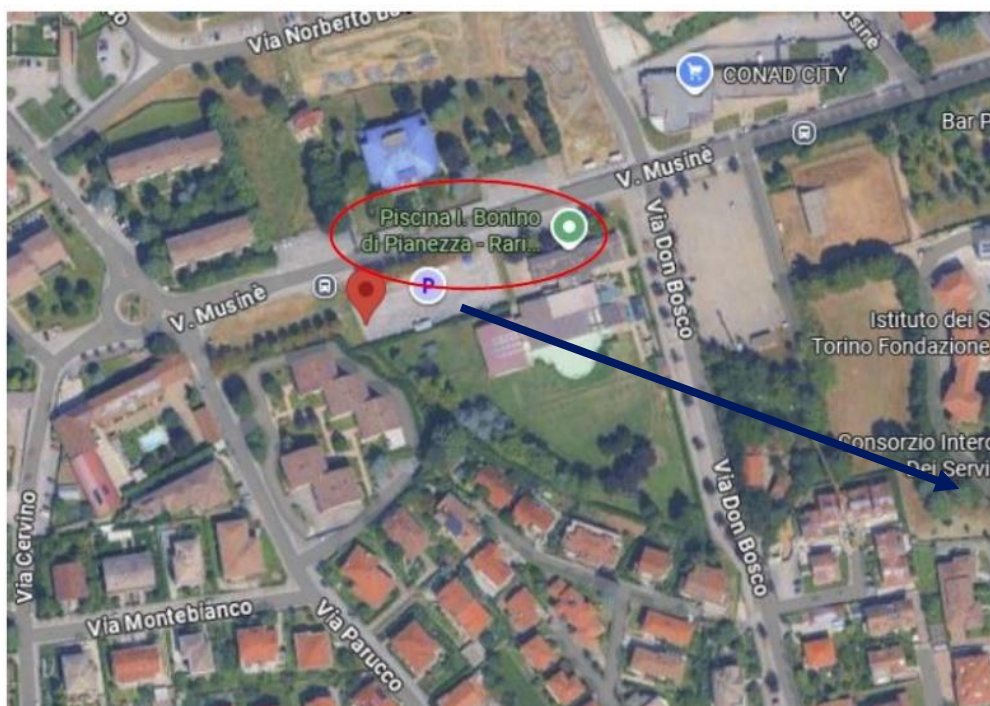


Figura 4.23 – Pianezza (TO) – 118900001 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto urbanizzato. Esso risulta adiacente a piscina comunale (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.24 – Rivarossa (TO) – 121800002 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto agricolo (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.25 – Venaria Reale (TO) – 129200005 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto agricolo (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

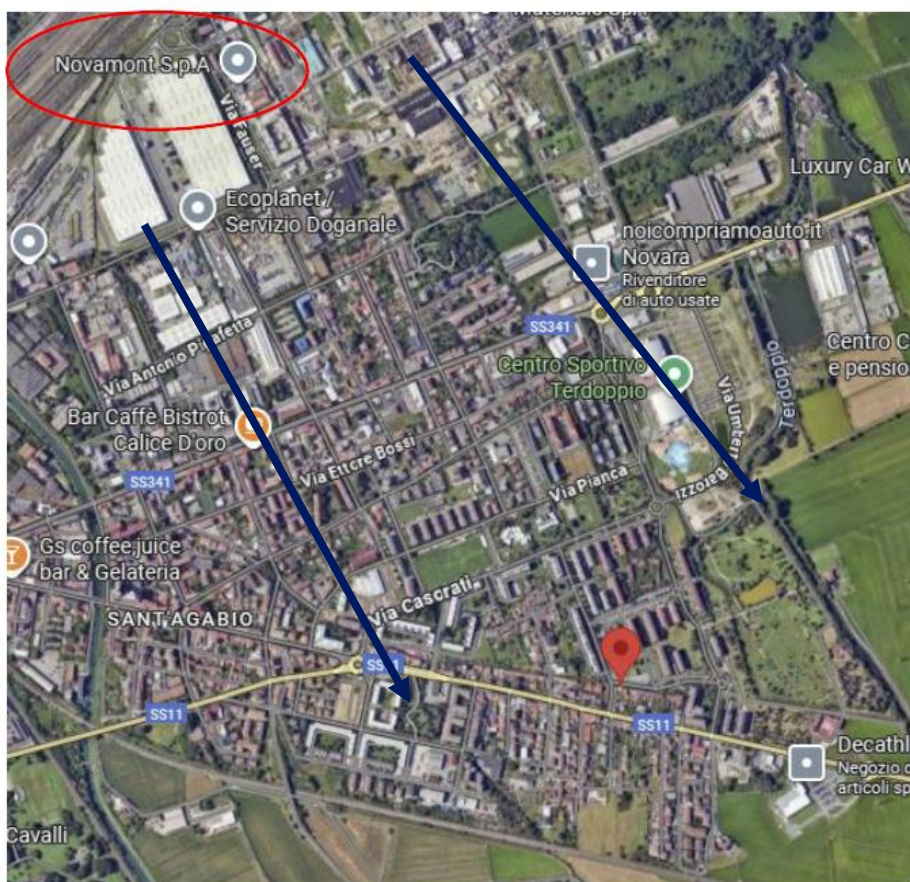


Figura 4.26 – Novara (NO) – 310600025 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto fortemente urbanizzato. Si segnala presenza di azienda chimica per la produzione di farmaci a poca distanza e in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

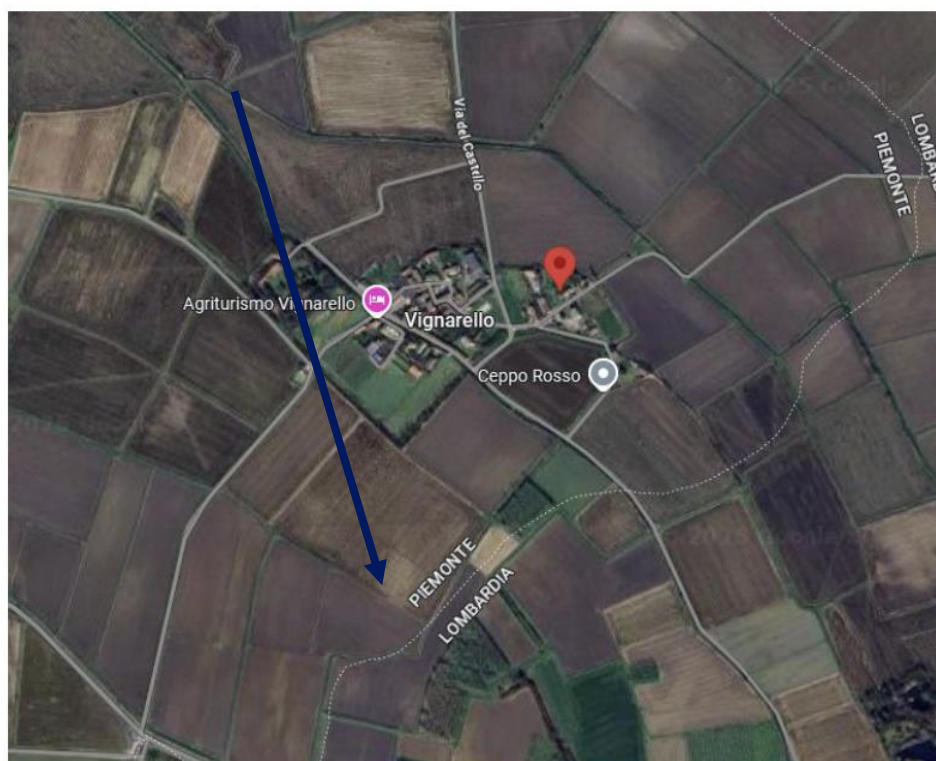


Figura 4.27 – Tornaco (NO) – 314600001 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto agricolo (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.28 – Beinasco (TO) – 102400003 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto urbanizzato. Si segnala presenza di polo ospedaliero in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.



Figura 4.29 – Trecate (NO) – 314900004 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto fortemente urbanizzato. Si segnala la presenza a poca distanza di due RSA, sebbene non in direzione del flusso (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

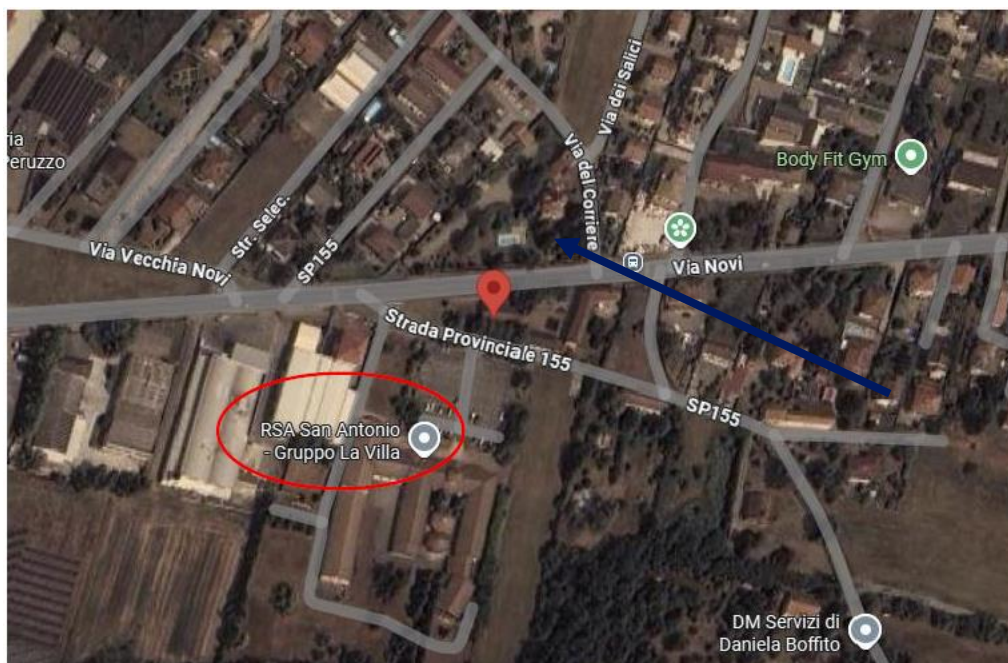


Figura 4.30 – Basaluzzo (AL) – 314900004 (acquifero profondo). Il pozzo (segnaposto in rosso) si colloca in contesto urbano e agricolo. Si segnala la presenza a poca distanza di una RSA (Fonte: Google Maps). Le frecce indicano indicativamente la direzione del flusso sotterraneo.

Un aspetto centrale dell'analisi riguarda la verifica dell'ipotesi secondo cui l'incremento delle pratiche di sanificazione durante il biennio 2020–2021, in particolare in ambito sanitario e para-sanitario, avrebbe potuto determinare un aumento del carico di composti clorurati nei reflui civili, con potenziale trasferimento alle acque sotterranee attraverso infiltrazioni da reti fognarie o perdite acquedottistiche, soprattutto nei contesti fortemente urbanizzati. Qualora tale dinamica avesse avuto un impatto significativo, ci si attenderebbe una maggiore concentrazione di aumenti netti e nuovi superamenti in prossimità di ospedali, RSA e aree ad alta densità abitativa, nonché la comparsa di criticità in punti precedentemente non interessati da superamenti ricorrenti.

Con tale obiettivo, pertanto, si è proceduto a riportare in forma tabellare (Tabelle 4.10 e 4.11) un riepilogo di quanto osservato dalle precedenti immagini che associasse a ciascun pozzo considerato la possibile fonte inquinante presente nel suo intorno. A livello operativo, dunque, è stato assegnato un valore “x” se, nell'area limitrofa al pozzo o in direzione del flusso, fossero presenti uno o più dei seguenti ambiti:

- industriale (presenza di aziende operanti nel settore delle fibre tessili, farmaceutico, metalli, vetro, carta, plastiche, oli, lacche, resine, gomme, cere, vernici);
- rifiuti (presenza di discariche, ecocentri, impianti di depurazione);
- agricolo;
- utilizzatori (piscine, poli sanitari, contesti fortemente urbanizzati).

Infine, procedendo con una somma dei valori “x” inseriti in ciascun ambito, si è proceduto a riportarli nelle Figure 4.31 e 4.32 con lo scopo di evidenziarne l'eventuale incidenza.

Guardando ai risultati ottenuti, i punti che nel periodo 2020–2022 hanno registrato aumenti netti o superamenti si collocano prevalentemente in contesti industriali e agricoli, mentre le strutture sanitarie risultano presenti solo in una quota minoritaria dei casi.

Tabella 4.10 - Riepilogo globale pozzi con aumenti netti e/o con valori sopra soglia nel periodo 2020-2022 in relazione alla loro collocazione/vicinanza a plausibili centri di pericolo – Acquifero superficiale

CODICE	COMUNE	INDUSTRIA						RIFIUTI	AGRICOLTURA	UTILIZZATORI		
		Pretrattamento/ tintura fibre tessili	Produzione di prodotti farmaceutici e fitosanitari	Lavorazione metalli	Fabbricazione vetro	Produzione pasta per carta e cartoni	Produzione grassi, oli, lacche, resine, gomme, alcaloidi, cere, vernici e plastiche	Discariche/ ecocentri/ impianti di depurazione	Preparazione e lavorazione del terreno, raccolta e prima lavorazione del prodotto colturale, lavorazioni agricole particolari	Piscine	Ospedali/ RSA	Altro (es. contesti fortemente urbanizzati)
106310001	Caselle Torinese					X		X		X		
109010001	Collegno										X	
605310001	Castelnuovo Scivia								X			
617400006	Tortona							X	X			
127210001	Torino										X	X
9603110001	Massazza							X	X			
10301900001	Casale Corte Cerro			X								
413600003	Montanera						X		X			
610900001	Morano sul Po											X
414700008	Narzole			X					X			
9600410001	Biella	X										X
404900001	Castelletto Stura								X			
9605800004	Salussola								X			
406100001	Centallo								X			
215600002	Varallo			X								
611410001	Novi Ligure			X		X						X

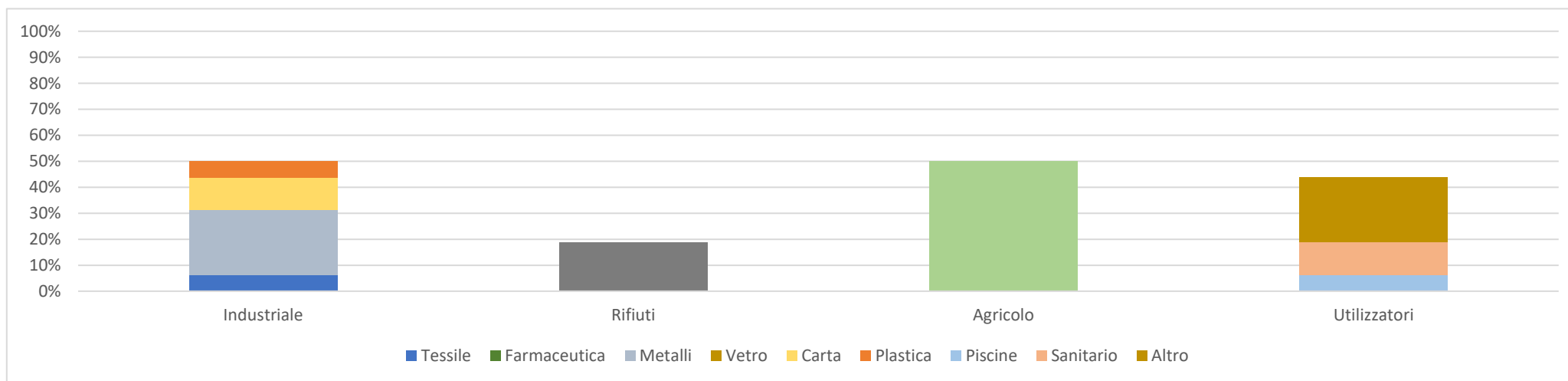


Figura 2.31 – Riepilogo dell'incidenza di ciascun ambito del plausibile centro di pericolo – Acquifero superficiale

Tabella 4.11 - Riepilogo globale pozzi con aumenti netti e/o con valori sopra soglia nel periodo 2020-2022 in relazione alla loro collocazione/vicinanza a plausibili centri di pericolo – Acquifero profondo

CODICE	COMUNE	INDUSTRIA						RIFIUTI	AGRICOLTURA	UTILIZZATORI		
		Pretrattamento/ tintura fibre tessili	Produzione di prodotti farmaceutici e fitosanitari	Lavorazione metalli	Fabbricazione vetro	Produzione pasta per carta e cartoni	Produzione grassi, oli, lacche, resine, gomme, alcaloidi, cere, vernici e plastiche	Discariche/ ecocentri/ impianti di depurazione	Preparazione e lavorazione del terreno, raccolta e prima lavorazione del prodotto colturale, lavorazioni agricole particolari	Piscine	Ospedali/ RSA	Altro (es. contesti fortemente urbanizzati)
106300006	Caselle Torinese						X		X			
118900001	Pianezza									X		X
121800002	Rivarossa								X			
129200005	Venaria Reale								X			
310600025	Novara		X									X
314600001	Tornaco								X			
102400003	Beinasco										X	X
314900004	Trecate										X	X
312900002	Basaluzzo										X	
213700002	Serravalle Sesia							X				
312900002	Recetto						X		X			
401900001	Bene Vagienna								X			

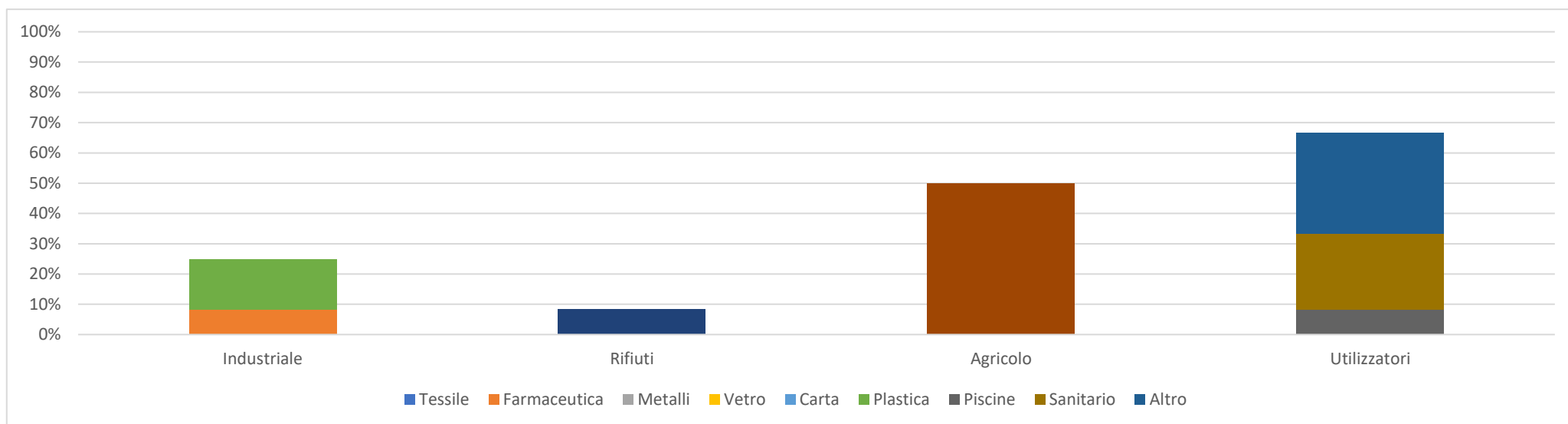


Figura 3.32 – Riepilogo dell'incidenza di ciascun ambito del plausibile centro di pericolo – Acquifero profondo

Nel complesso, la distribuzione spaziale dei punti con aumenti o superamenti nel periodo pandemico appare coerente con le pressioni storicamente note sul territorio piemontese, in particolare di natura industriale e agricola, e risulta compatibile con la continuità dei fenomeni già evidenziata dall'analisi temporale e cumulativa. Non emergono pertanto evidenze territoriali tali da suggerire l'insorgenza di nuove sorgenti significative riconducibili in modo prevalente all'intensificazione delle pratiche di sanificazione durante il COVID-19, mentre prevale un quadro di sostanziale persistenza delle pressioni pregresse.

4.5 Analisi della correlazione con le precipitazioni

Al fine di valutare il possibile contributo di processi naturali alla presenza di cloroformio nelle acque sotterranee, è stata condotta un'analisi della correlazione tra le concentrazioni rilevate in determinati punti di monitoraggio e le precipitazioni cumulate antecedenti ai campionamenti. Infatti, l'esistenza di una correlazione tra la concentrazione dell'inquinante e le precipitazioni potrebbe fornire interessanti elementi sul ruolo dei processi naturali nella sua formazione: una correlazione positiva, ad esempio, potrebbe essere indicativa del fatto che la pioggia possa determinare il trasporto del cloroformio verso l'acquifero, mentre una correlazione negativa potrebbe essere indicativa di un effetto di diluizione.

Dunque, per condurre l'analisi è stata innanzitutto assunto come riferimento il periodo compreso tra il 2019 e il 2022, in modo da includere il periodo pandemico e una sua estensione agli anni immediatamente precedenti e successivi. Come è noto dalle informazioni rese disponibili di ARPA Piemonte, tale periodo è stato anche caratterizzato da periodi più umidi e periodi relativamente siccitosi, aspetto che consente di effettuare una valutazione anche più completa sugli obiettivi dell'analisi (Figura 4.33).

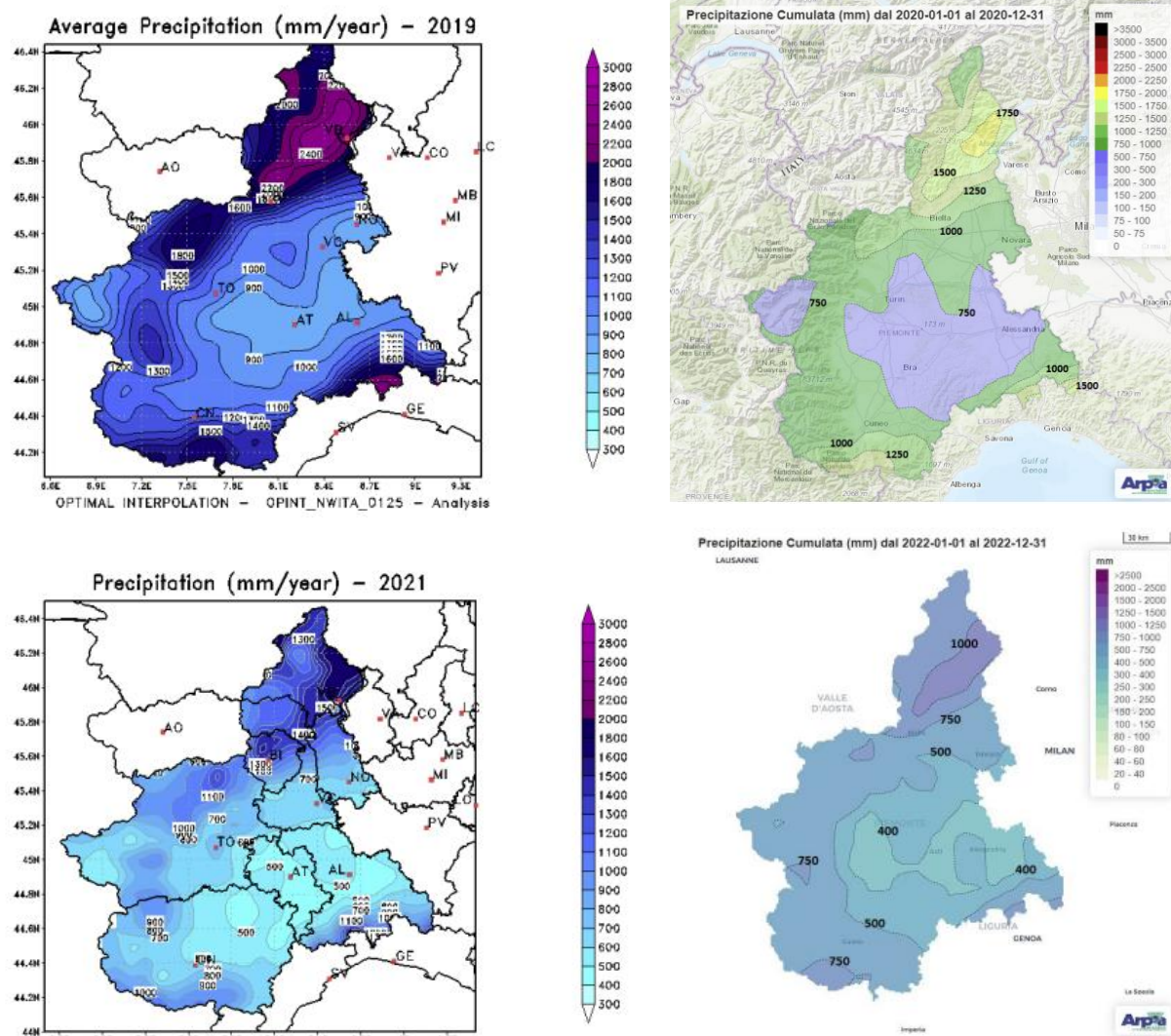


Figura 4.33 - Precipitazioni totali negli anni 2019 (in alto a sinistra), 2020 (in alto a destra), 2021 (in basso a sinistra), 2022 (in basso a destra) in Piemonte (Fonte: ARPA Piemonte)

In particolare:

- Nel 2019 “l’apporto delle precipitazioni totali annue è stato pari a 1.295 mm, con un surplus rispetto alla climatologia del 1971-2000 di 245 mm (pari al 23%) portando il 2019 ad essere il nono anno più piovoso” (Fonte: ARPA Piemonte, 2020);
- Nel 2020 “l’apporto delle precipitazioni totali annue è stato pari a 936.2 mm, con un deficit di 114.3 mm (pari all’11%) portando il 2020 ad essere il 24° anno meno piovoso a partire dal 1958” (Fonte: ARPA Piemonte, 2021);
- Nel 2021 “l’apporto delle precipitazioni totali annue è stato pari a 858.4 mm, con un deficit di 192.1 mm (pari al 18%) rispetto alla norma del trentennio 1971-2000 portando il 2021 ad essere il 16° anno meno piovoso a partire dal 1958” (Fonte: ARPA Piemonte, 2022);

- Il 2022 “è risultato il più caldo e il secondo meno piovoso dell’intera serie storica dal 1958. [...] La precipitazione cumulata è stata di 611.9 mm, con un deficit pluviometrico di 438.6 mm (pari al 42%) nei confronti della media climatica del trentennio 1971-2000” (Fonte: ARPA Piemonte, 2023).

Successivamente, sono stati scaricati dal sito ARPA Piemonte le posizioni geografiche dei 313 pluviometri distribuiti sul territorio regionale.

I campionamenti di cloroformio relativi agli anni selezionati sono stati suddivisi per semestre e per tipo di acquifero e importati in QGIS, dove sono stati analizzati spazialmente. Per ciascun periodo, sono stati identificati i campionamenti con concentrazioni superiori alla soglia normativa e tracciati buffer di 5 km attorno a tali punti, individuando così le aree di interesse. Solo i pluviometri ricadenti in queste aree sono stati considerati per l’analisi, assegnando a ciascun pozzo il pluviometro più vicino. In questo modo, nelle aree individuate, si sono compresi anche i campionamenti eventualmente con concentrazione al di sotto della soglia normativa, aspetto utile in termini comparativi.

Infine, per ciascun punto di campionamento è stata calcolata la pioggia cumulata nei 15, 30 e 60 giorni antecedenti la data di campionamento (laddove disponibile), utilizzando i dati del pluviometro assegnato, in modo da correlare la concentrazione di cloroformio con le precipitazioni antecedenti e intercettare gli eventuali effetti a breve o a più lungo termine.

I risultati, distinti per tipologia di acquifero, semestre e anno, sono stati riportati in grafici combinati concentrazione–pioggia cumulata, come mostrato nelle Figure 4.34-4.47. Si segnala che sono stati esclusi il primo semestre dell’anno 2019 (acquifero superficiale) per assenza di pluviometri intercettati nelle aree di analisi e il primo semestre dell’anno 2020 (acquifero profondo) per la presenza di un solo dato, non sufficiente per una comparazione.

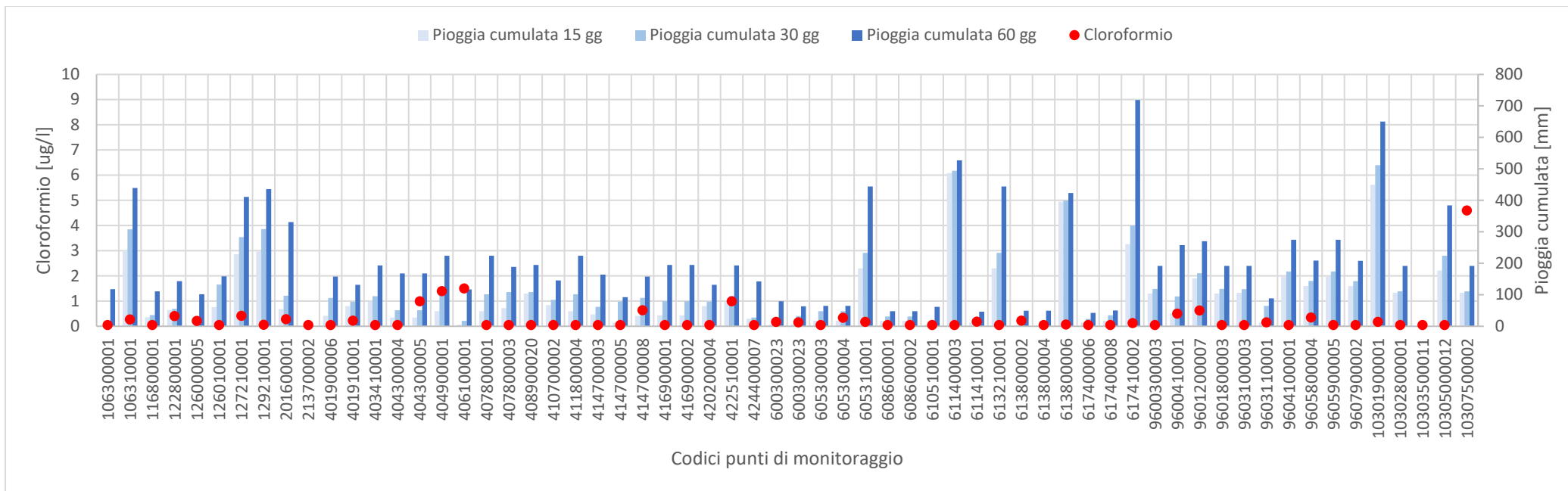


Figura 4.34 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, secondo semestre 2019

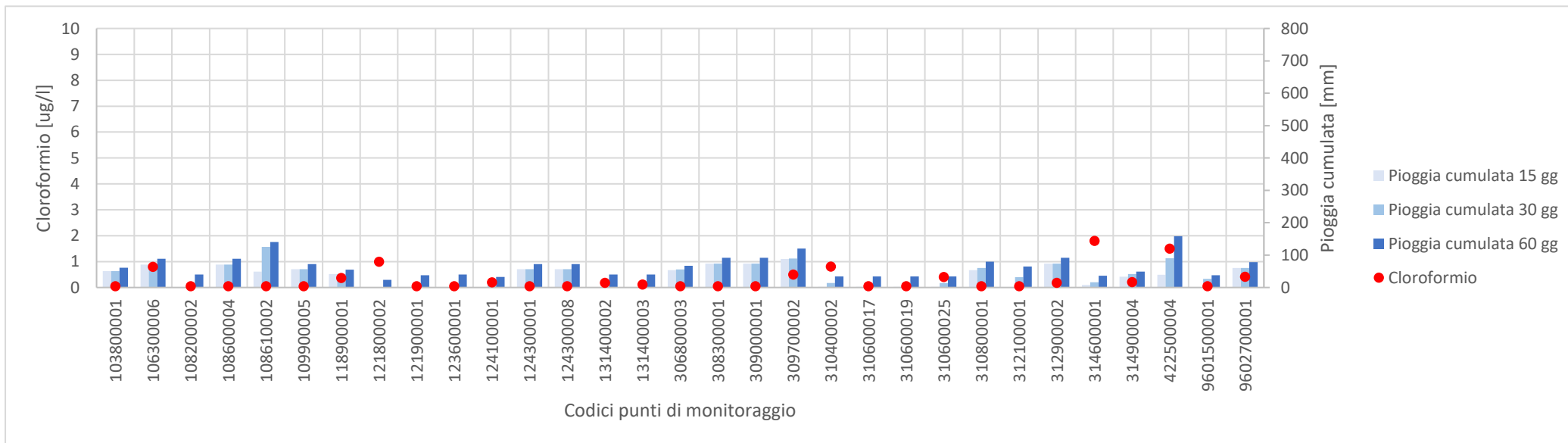


Figura 4.35 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, primo semestre 2019

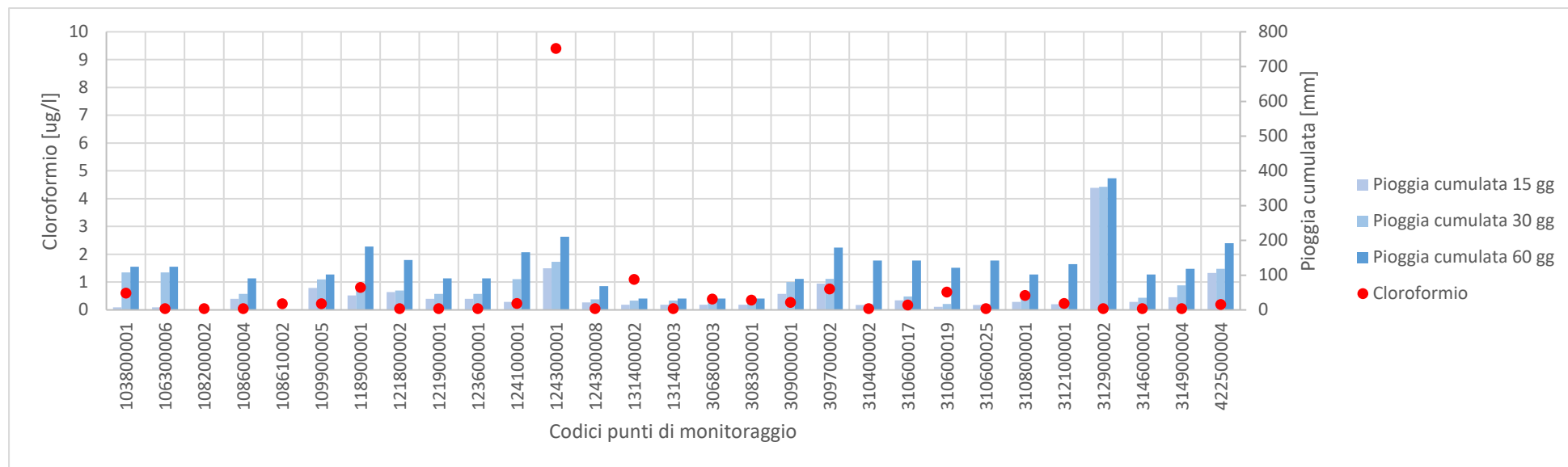


Figura 4.36 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, secondo semestre 2019

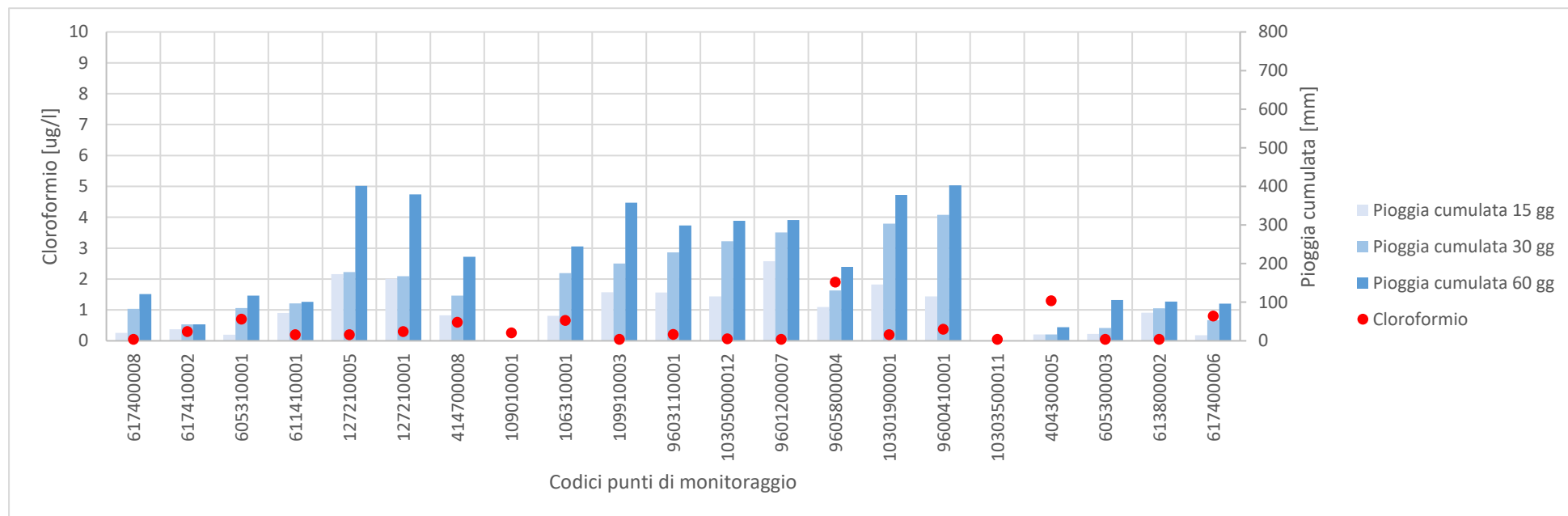


Figura 4.37 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, primo semestre 2020

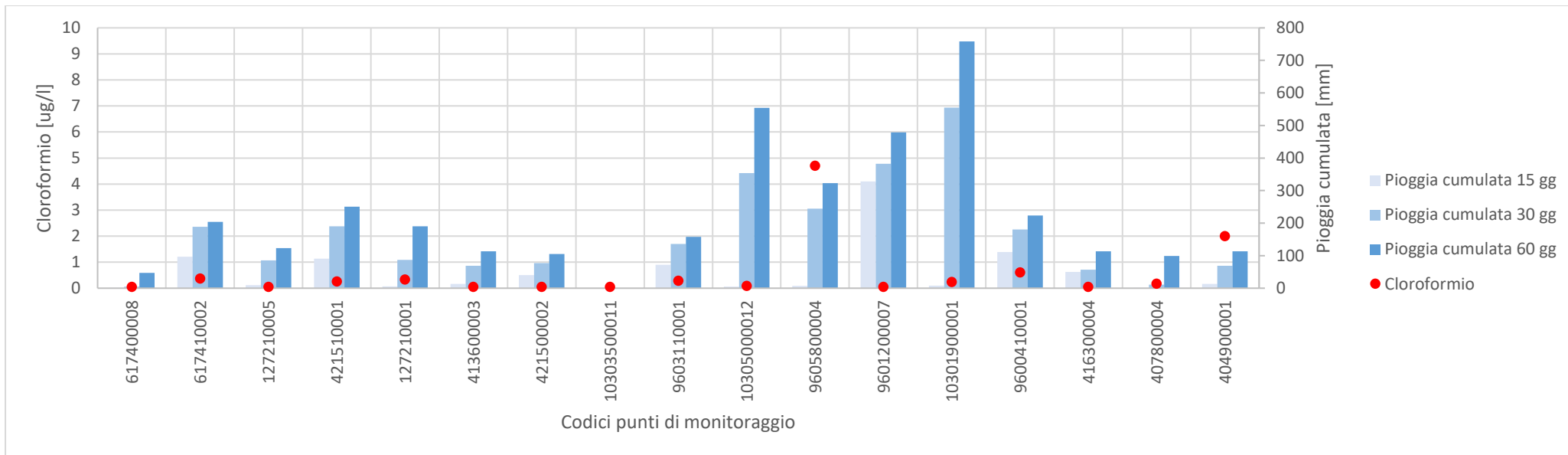


Figura 4.38 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, secondo semestre 2020

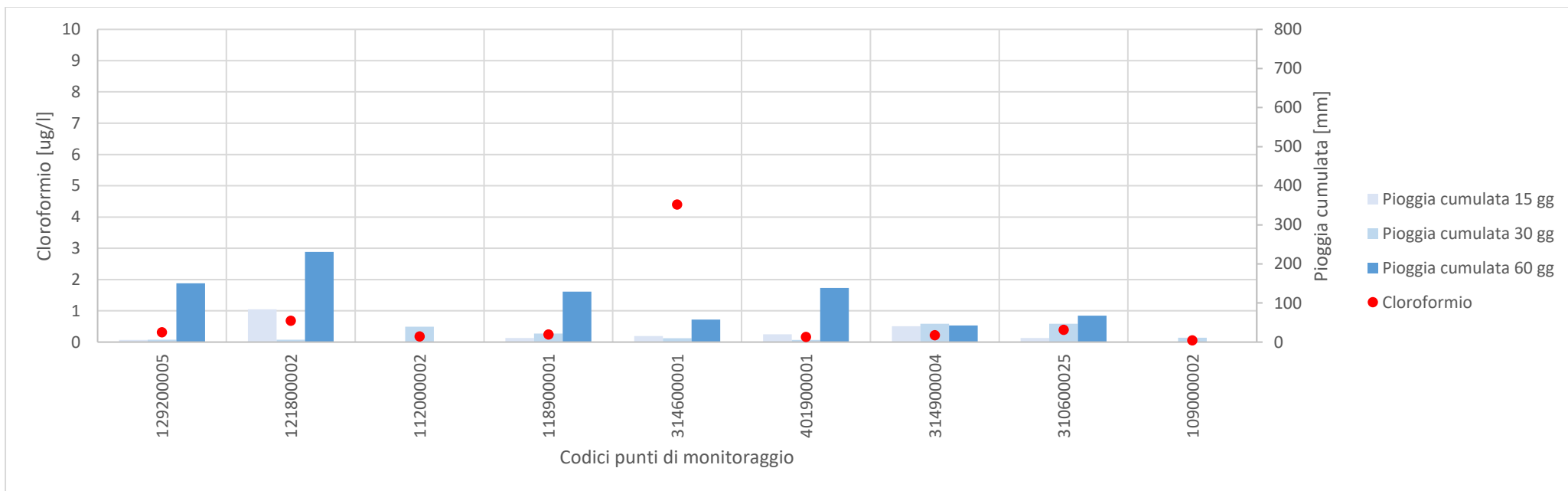


Figura 4.39 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, secondo semestre 2020

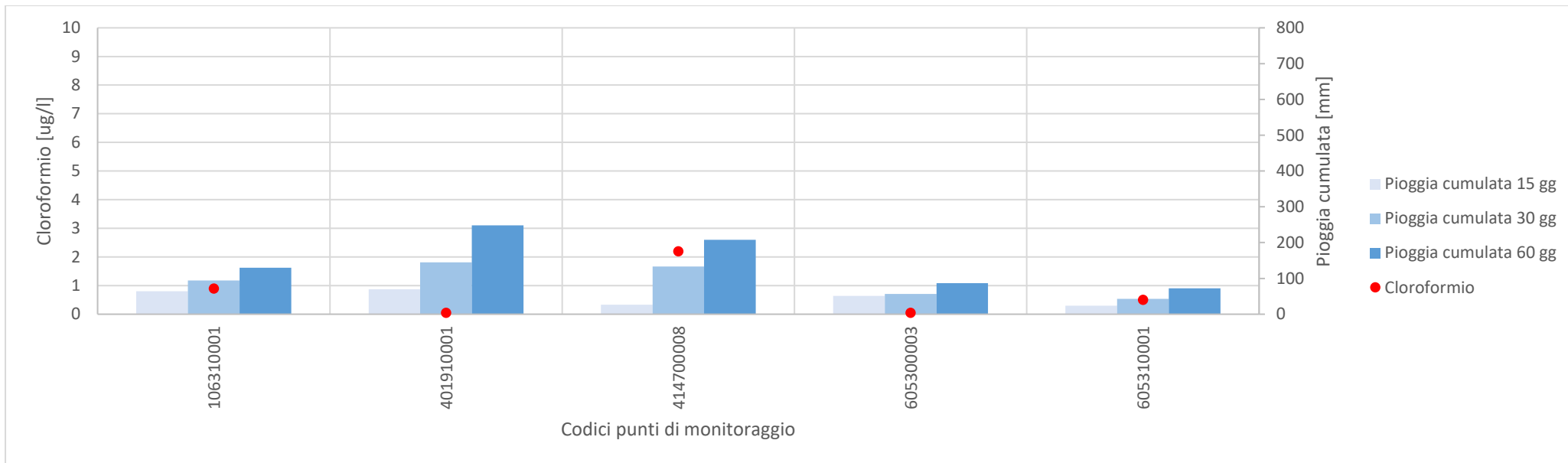


Figura 4.40 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, primo semestre 2021

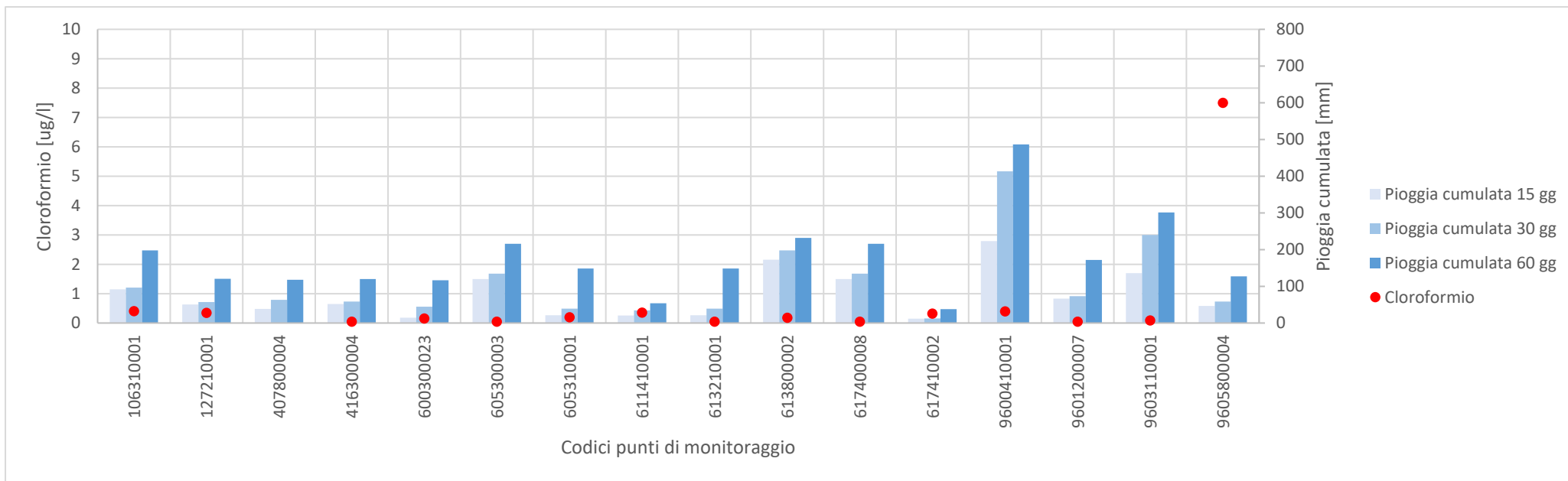


Figura 4.41 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, secondo semestre 2021

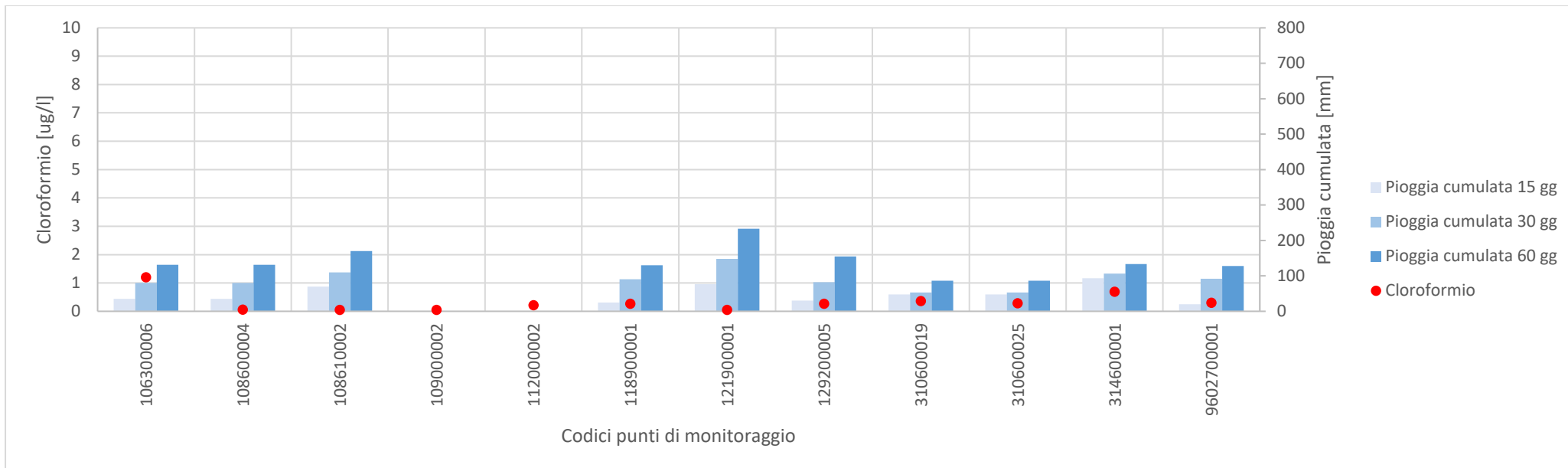


Figura 4.42 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, primo semestre 2021

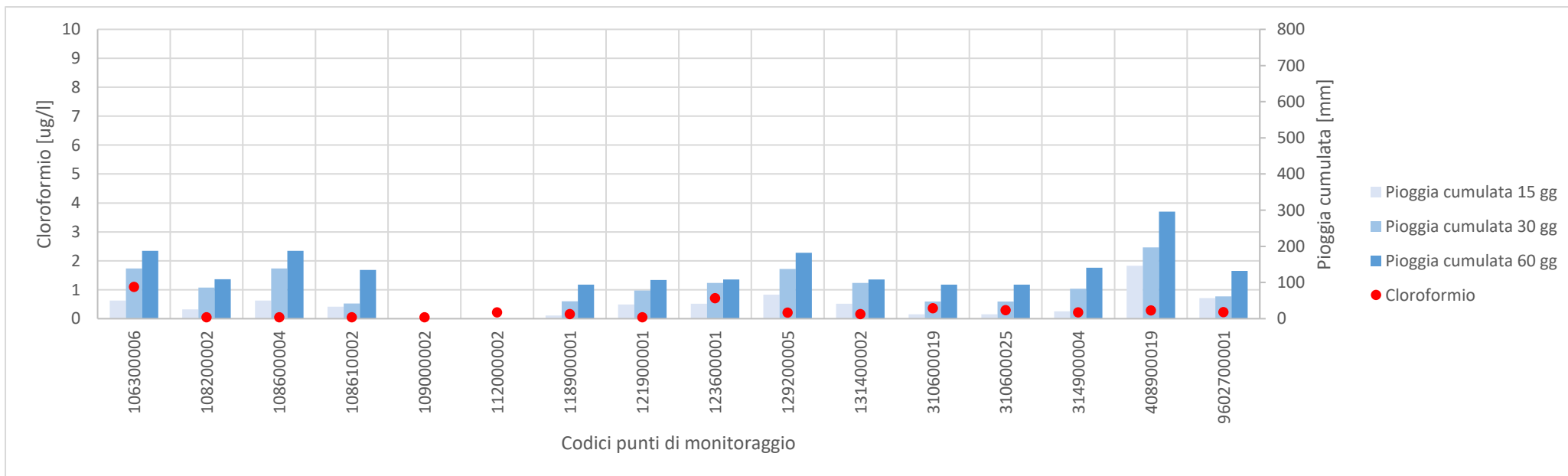


Figura 4.43 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, secondo semestre 2021

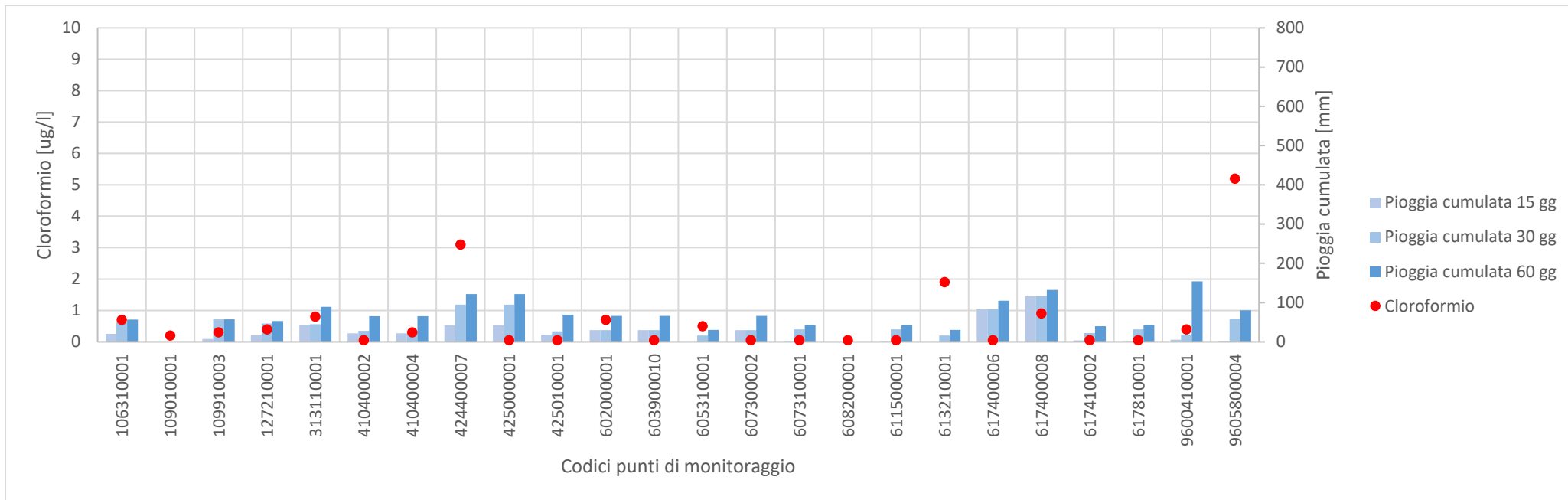


Figura 4.44 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, primo semestre 2022

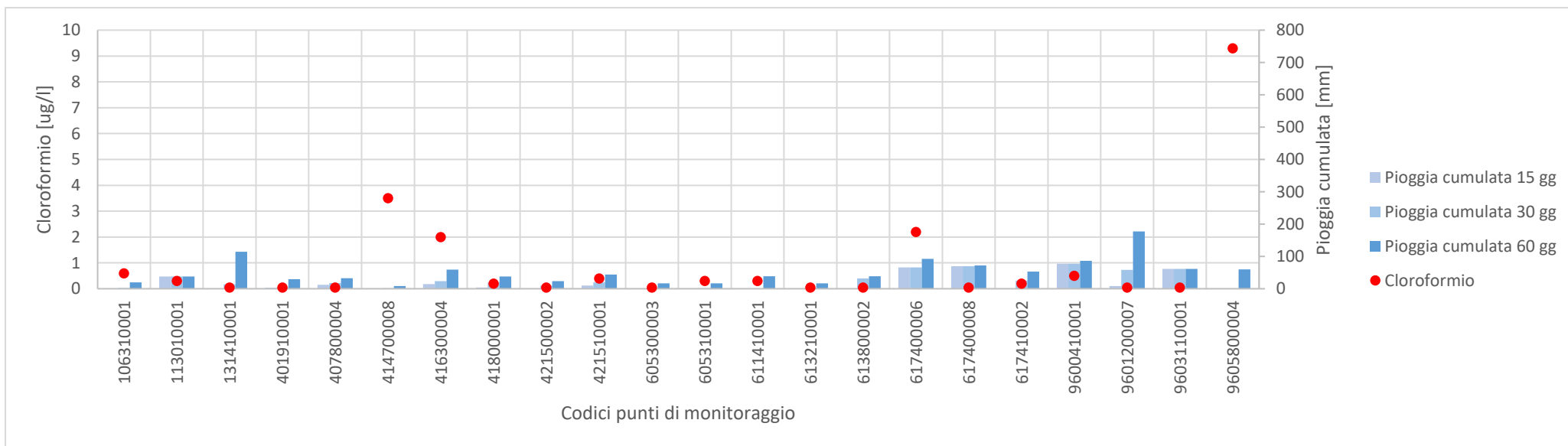


Figura 4.45 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero superficiale, secondo semestre 2022

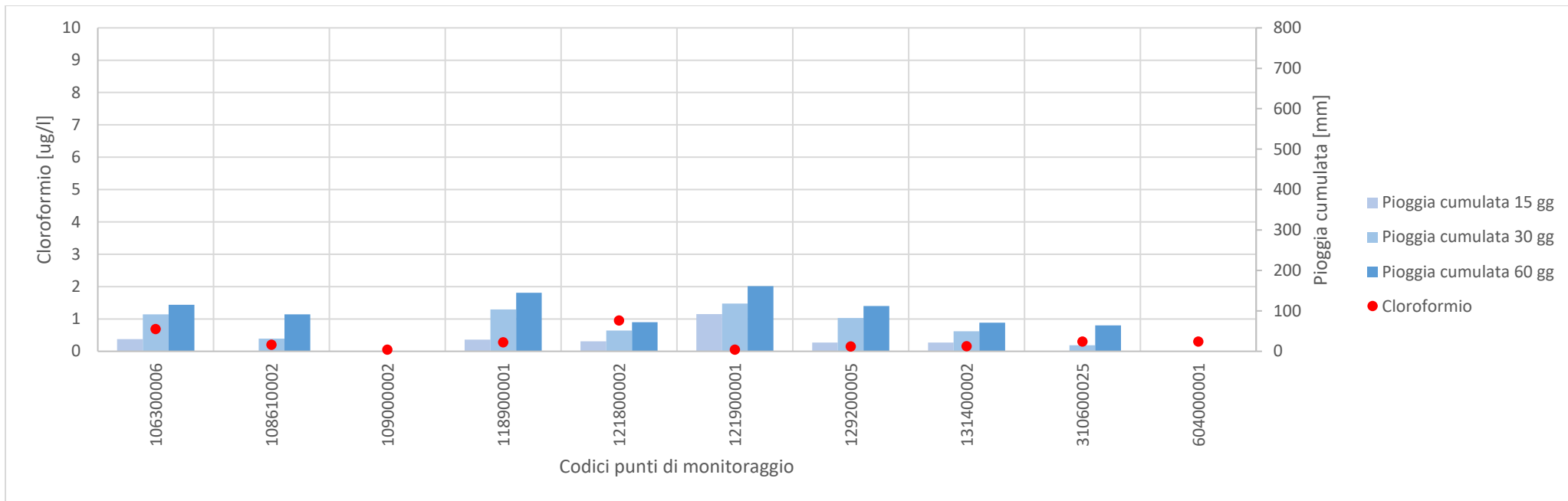


Figura 4.46 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, primo semestre 2022

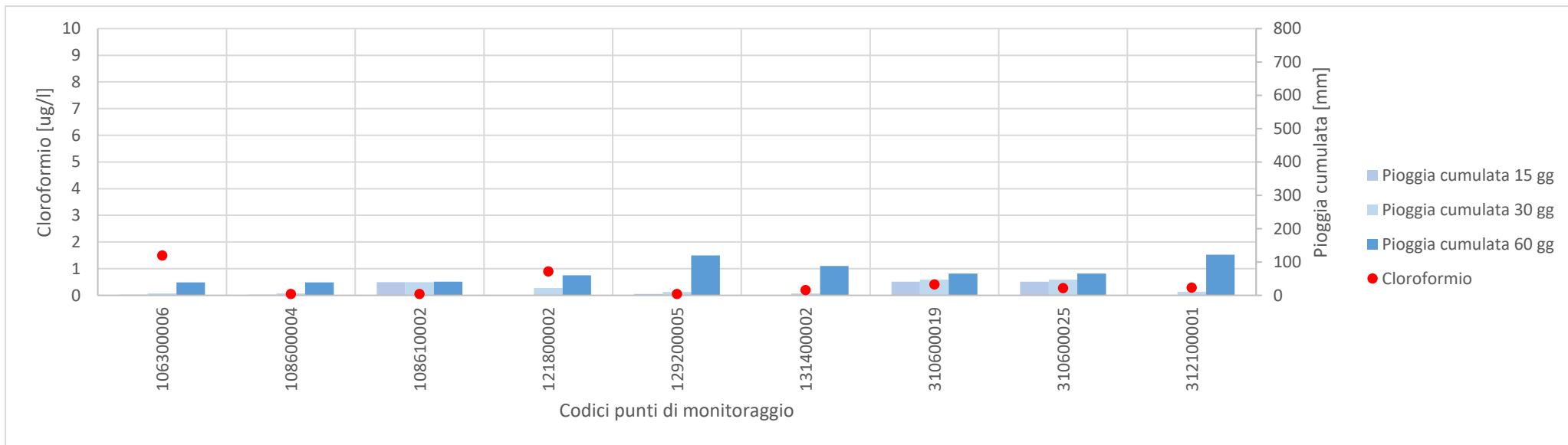


Figura 4.47 – Correlazione piogge cumulate-concentrazione cloroformio – Acquifero profondo, secondo semestre 2022

Osservando i risultati ottenuti, dal confronto tra le concentrazioni di cloroformio e le precipitazioni cumulate antecedenti ai rispettivi campionamenti non emerge una correlazione evidente né positiva né negativa, quantomeno generalizzabile a tutti i punti considerati nell'analisi. Tale risultato, tuttavia, deve essere interpretato tenendo conto dei limiti dell'analisi, basata su dati puntuali di concentrazione confrontati con precipitazioni cumulative e non su un'analisi spazio-temporale integrata, che consideri anche la risposta idrogeologica locale dell'acquifero captato dai pozzi/piezometri.

Pertanto, al fine di verificare se eventuali effetti delle precipitazioni potessero emergere in maniera più evidente nei casi di incremento significativo, l'analisi è stata ripetuta considerando esclusivamente i punti che hanno mostrato aumenti netti ($\Delta > 0,5 \mu\text{g/L}$) nel periodo 2019–2022.

Per ciascun punto:

- è stato assegnato il pluviometro più vicino (o la media dei più prossimi);
- sono state calcolate le precipitazioni cumulate a 15, 30 e 60 giorni antecedenti il campionamento;
- i risultati sono stati rappresentati mediante grafici combinati, riportando le precipitazioni cumulate a barre e l'andamento temporale delle concentrazioni di cloroformio su linea continua.

Anche in questo caso non emerge alcuna relazione generalizzabile tra eventi pluviometrici e incrementi di concentrazione (Figure 4.48-4.54).

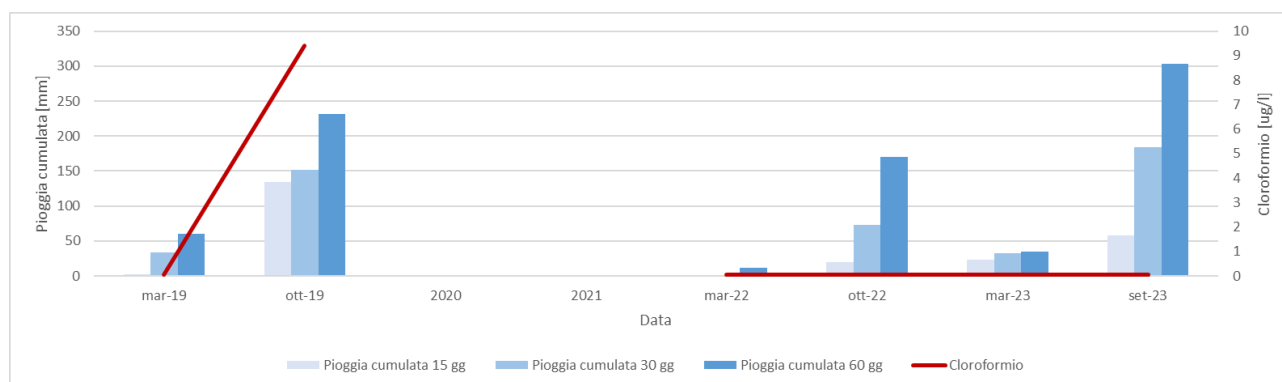


Figura 4.48 – Pozzo di Roasio (VC) per acquifero profondo (aumento netto nel 2019). Pluviometri considerati per analisi: Lozzolo (VC) e Masserano (VC)

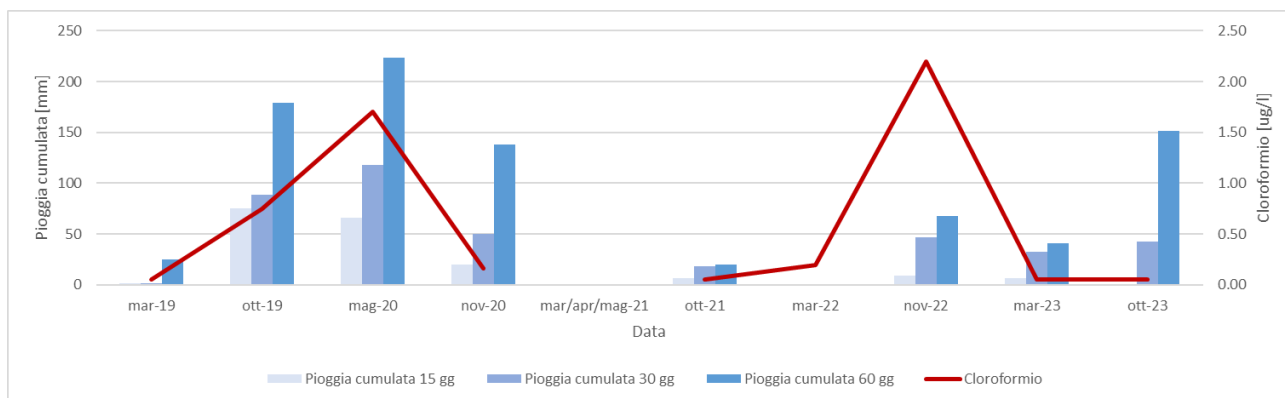


Figura 4.49 – Pozzo di Bene Vagienna (CN) per acquifero profondo (aumento netto nel 2019). Pluviometro considerato per analisi: Fossano (CN)

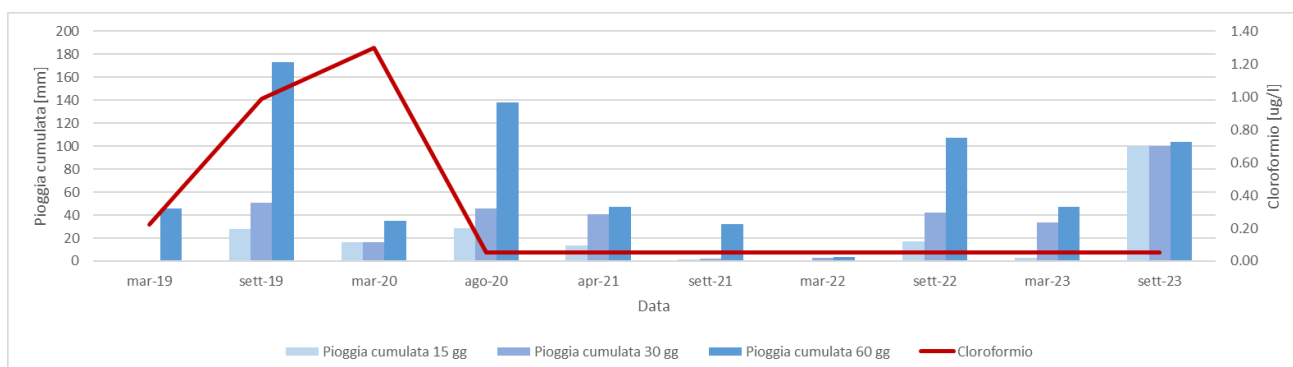


Figura 4.50 – Pozzo di Carrù (CN) per acquifero superficiale (aumento netto nel 2019). Pluviometro considerato per analisi: Carrù Pesio (CN)

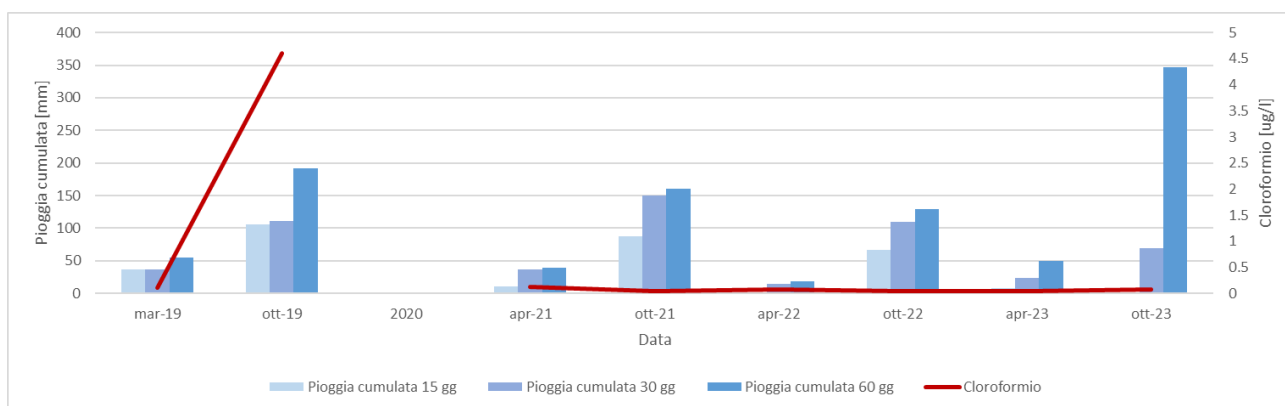


Figura 4.51 – Pozzo di Villadossola (VB) per acquifero superficiale (aumento netto nel 2019). Pluviometro considerato per analisi: Domodossola (VB)

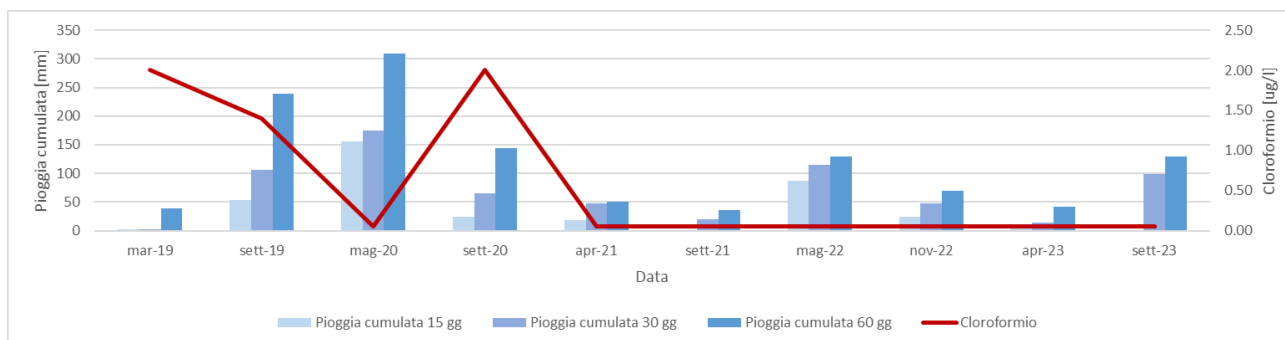


Figura 4.52 – Pozzo di Castelletto Stura (CN) per acquifero superficiale (aumento netto nel 2020). Pluviometri considerati per analisi: Cuneo Camera Commercio (CN) e Morozzo (CN)

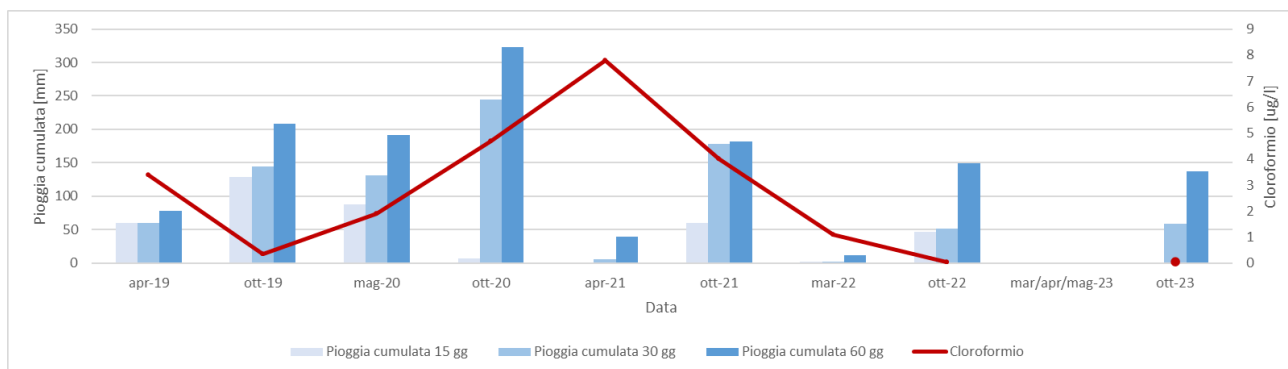


Figura 4.53 – Salussola (BI) per acquifero superficiale (aumento netto nel 2020). Pluviometro considerato per analisi: Salussola (BI)

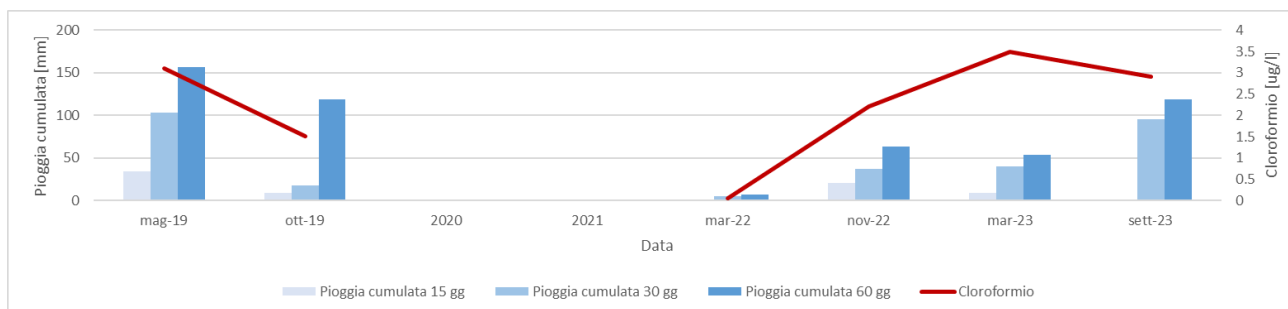


Figura 4.54 – Centallo (CN) per acquifero superficiale (aumento netto nel 2022). Pluviometri considerati per analisi: Cuneo Camera Commercio (CN), Dronero (CN) e Costigliole Saluzzo (CN)

In conclusione, l'assenza di correlazione sia nell'analisi estesa sia in quella puntuale suggerisce che, nel periodo considerato, le precipitazioni non costituiscano un fattore determinante nell'insorgenza o nell'intensificazione dei superamenti osservati.

4.6 Sintesi delle evidenze e considerazioni conclusive sul periodo COVID-19

Volendo sintetizzare ciò che emerge dall'analisi più approfondita appena descritta, è possibile innanzitutto segnalare che, dal punto di vista temporale, il periodo 2020–2021 globalmente conferma le dinamiche già presenti nella fase pre-pandemica, riconducendo gli incrementi dei superamenti a punti di monitoraggio già storicamente critici.

In secondo luogo, attraverso l'analisi semestrale delle variazioni, è stato possibile distinguere tra le lievi fluttuazioni probabilmente legate alla sensibilità strumentale e gli aumenti effettivamente significativi ($\Delta > 0,5 \mu\text{g/L}$), anche in questo caso mostrando che gli incrementi netti non si concentrano in nuove aree ma si sovrappongono principalmente a contesti già interessati da pressioni pregresse.

Ancora, l'approfondimento spaziale condotto tramite ambiente GIS e Google Maps evidenzia una prevalente presenza dei superamenti nei contesti industriali, agricoli e urbanizzati e non in punti potenzialmente correlabili con l'intensificazione delle pratiche di sanificazione durante il periodo pandemico (e.g. ospedali, RSA ecc.).

Infine, l'assenza di correlazione evidente e generalizzabile tra le concentrazioni di cloroformio rilevate, sia sopra che sotto soglia, e le precipitazioni antecedenti suggerisce che i fenomeni naturali non siano un fattore determinante nell'insorgenza o nell'intensificazione della contaminazione.

In conclusione, dunque, il periodo COVID-19 non sembra configurarsi come fattore determinante nell'innescare di nuove criticità, ma piuttosto come fase transitoria inserita in un quadro di pressioni territoriali storicamente consolidate.

I risultati ottenuti costituiscono pertanto la base per l'analisi approfondita delle aree critiche che verrà illustrata nel Capitolo 5.

Capitolo 5 – Valutazione integrata dei risultati e considerazioni conclusive

Il presente capitolo propone una lettura integrata dei risultati emersi dall'analisi condotta nei capitoli precedenti, con l'obiettivo di sintetizzare le principali evidenze in termini di distribuzione spaziale delle criticità, confrontarle con il quadro conoscitivo già disponibile a livello regionale e valutare, in via preliminare, le possibili implicazioni in termini di rischio sanitario, tenendo anche conto dei principali limiti metodologici dello studio stesso.

5.1 Individuazione delle aree maggiormente critiche

Alla luce dalle analisi condotte nei capitoli precedenti, appare opportuno sintetizzarne le principali evidenze con una duplice finalità: da un lato, identificare le situazioni di criticità pregresse e/o persistenti nel tempo; dall'altro, porre le basi per il confronto con studi e interventi già esistenti, al fine di valutare se tali aree siano già state oggetto di monitoraggio approfondito o di misure di bonifica.

In tale contesto, l'analisi integrata delle classi di superamento illustrate nel Capitolo 4, unitamente alla valutazione dello storico dei singoli punti di monitoraggio e agli incrementi netti osservati nel periodo di studio, consente di individuare alcune aree “critiche”, ossia quelle in cui la presenza di cloroformio risulta maggiormente ricorrente o caratterizzata da superamenti della concentrazione del valore limite. Tuttavia, è opportuno sottolineare che l'attribuzione delle criticità deriva dall'ubicazione amministrativa dei singoli pozzi di monitoraggio e non implica necessariamente una delimitazione spaziale dell'eventuale plume contaminante. L'analisi condotta, infatti, consente di individuare punti di ricorrenza del contaminante all'interno della rete regionale, ma non permette di definire con precisione l'estensione areale dei fenomeni osservati.

Nello specifico, per quanto concerne l'acquifero superficiale, le criticità più evidenti si concentrano nella porzione occidentale della provincia di Torino, in particolare nei comuni di Torino (settore ovest) e Caselle Torinese, dove si osservano superamenti ripetuti e, in alcuni casi, aumenti netti rispetto alle serie storiche precedenti. Ulteriori segnali di persistenza o incremento delle concentrazioni emergono nel cuneese, con particolare riferimento a Centallo, nel biellese (Salussola) e nell'alessandrino, dove i comuni di Castelnuovo Scrivia, Tortona, Novi Ligure, Pozzolo Formigaro e Alessandria presentano episodi di superamento o concentrazioni che, pur non sempre eccedendo stabilmente la soglia, mostrano una certa ricorrenza nel tempo. Anche nel Verbano si rilevano

situazioni meritevoli di attenzione nei comuni di Casale Corte Cerro e Villadossola, dove l'andamento delle concentrazioni suggerisce la presenza di fenomeni non episodici.

Per quanto riguarda l'acquifero profondo, le situazioni di maggiore rilevanza risultano concentrate principalmente nella porzione nord-occidentale della provincia di Torino, interessando i comuni di Beinasco, Grugliasco, Pianezza, Venaria Reale, Caselle Torinese e Rivarossa, dove si registrano superamenti puntuali o concentrazioni persistentemente superiori al limite normativo. Ulteriori evidenze emergono nel cuneese, in particolare a Bene Vagienna, e nel novarese, nei comuni di Recetto, Novara e Trecate.

In Figura 5.1 e 5.2 si riportano gli stralci dell'Appendice A (acquifero superficiale) e dell'Appendice B (acquifero profondo) relativi ai pozzi ubicati nei comuni sopra citati, dai quali è possibile osservare lo storico delle misurazioni nel periodo 2014–2023. L'analisi delle serie temporali evidenzia come le situazioni individuate siano caratterizzate da superamenti della concentrazione soglia, intervallati da periodi in cui i valori rientrano al di sotto di essa e, in alcuni casi, da assenze di campionamento.

Codice	COMUNE	2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
106310001	CASSELLE TORINESE	0.10	0.10	0.10	0.10	0.90	0.10	0.70	0.60	0.90	0.41	0.53	0.27	0.66	0.55	0.58	0.30	0.36	0.05	0.05	0.05
127210001	TORINO	0.10	0.50	0.10	0.10	0.70	0.10	0.40	0.05	0.05	0.35	0.37	0.42	0.30	0.33	0.85	0.25	0.17	0.24	0.30	0.47
406100001	CENTALLO	0.10				0.10	0.10					3.10	1.50					0.05	2.20	3.50	2.90
600300023	ALESSANDRIA	0.50	0.10	0.10	0.10	0.50	0.10	0.05		0.05	0.16	0.18	0.16	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.05	0.05
605310001	CASTELNUOVO SCRIVIA	1.00	0.10	0.10	0.10	1.80	0.10	0.50	0.30	0.50	0.20	0.36	0.18	0.70	0.05	0.05					
611410001	NOVI LIGURE	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	0.10	0.05	0.30	0.05	0.36	0.27	0.19	0.20	0.19	0.05	0.37	0.05	0.05	0.74	1.50
613800002	POZZOLO FORMIGARO	0.10	0.10			0.30	0.10	0.05		0.05	0.18	0.05	0.22	0.05	0.05	0.05	0.05	0.27	0.05		
617400006	TORTONA	0.10	1.50	0.10		0.10	0.10	0.05	2.20	1.60		1.90	0.05	0.80		0.42	0.05	0.05		0.05	
617400008	TORTONA	0.10	0.10	0.10	0.10	0.60	0.10	0.90	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.05	0.05
617410002	TORTONA	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	0.10	0.05	0.20	0.05	0.32	0.30	0.13	0.30	0.37	0.05	0.05	0.05	0.05	0.31	0.23
10301900001	CASALE CORTE CERRO	0.10		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.13	0.14	0.14	0.18	0.20	0.24	0.40	0.21	0.28	0.18	0.10	0.15
9605800004	SALUSSOLA			0.10	0.10	0.10	2.50	5.20	9.30	5.10	7.50	3.40	0.35	1.90	4.70	7.80	4.00	1.10	0.05	0.05	

Figura 5.1 – Stralcio di Appendice A (acquifero superficiale) con evidenza dello storico delle misurazioni dei pozzi aventi maggiori criticità

Codice	COMUNE	2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
102400003	BEINASCO	0.5	0.1	0.1	0.1	0.7	0.4	0.58	0.7	0.63	0.6	0.5	NC	0.39	NC	0.49	0.05	0.32	0.05	0.61	0.5
106300006	CASSELLE TORINESE	1.1	1.2	0.1	1	0.7	0.1	0.69	1.5	1.2	1.1	0.8	0.6	0.78	NC	0.79	0.7	0.05	0.55	0.79	0.05
112000002	GRUGLIASCO	0.1	0.1	0.1	NC	0.1	0.2	0.05	0.05	0.21	0.22	0.22	NC	0.18	NC	0.05	0.2	0.05	0.18	0.11	0.21
118900001	PIANEZZA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.52	0.31	0.28	0.05	0.27	0.16	0.37	0.22	0.24	NC	0.18	0.17	0.05	0.05	0.14	0.05
121800002	RIVAROSSA	0.1	0.1	0.1	0.7	1	0.7	0.95	0.9	NC	NC			1	0.81	0.68	NC	0.84	0.6	0.67	0.05
129200005	VENARIA REALE	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.18	0.15	0.05	0.27	0.21	0.23	NC	0.31	NC	0.05	0.3	0.35	0.05	0.42	0.05
310600025	NOVARA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.27	0.28	0.3	0.41	0.35	0.39	NC	0.41	0.33	0.29	0.34	0.05	0.32
401900001	BENE VAGIENNA	0.1	0.1	NC	NC	0.9	0.1	0.05	NC	0.05	0.05	0.05	0.75	1.7	0.16	0.05	NC	0.2	2.2	0.05	0.05
312900002	RECETTO	NC	NC	NC	NC	0.8	NC	NC	NC	NC	NC	0.18	0.05	NC	NC	0.05	NC	0.05	0.25	1.2	2
314900004	TRECATE	NC	NC	NC	NC	0.2	0.3	0.14	NC	0.07	0.22	0.21	0.27	0.22	NC	0.32	0.15	0.25	0.18	0.23	0.11

Figura 5.2 – Stralcio di Appendice B (acquifero profondo) con evidenza dello storico delle misurazioni dei pozzi aventi maggiori criticità

Inoltre, com'è noto, le ultime misurazioni disponibili risalgono al 2023; allo stato attuale (2026) non sono pertanto disponibili dati aggiornati relativi agli ultimi due anni, circostanza che non consente di definire con certezza l'evoluzione più recente delle concentrazioni. Nell'ambito del presente lavoro, tali contesti vengono pertanto considerati aree critiche in ragione della ricorrenza dei superamenti osservata nel periodo analizzato, pur nella consapevolezza della discontinuità temporale dei dati.

L'individuazione di tali aree critiche costituisce il punto di partenza per il confronto con il quadro conoscitivo già esistente a livello regionale e locale, al fine di verificare se le evidenze emerse

risultino coerenti con contaminazioni già documentate e con eventuali interventi di bonifica attivati nel tempo.

5.2 Confronto con studi esistenti

Con l'obiettivo esplicitato nel paragrafo precedente, di particolare interesse è lo “*Studio propedeutico alla definizione dei valori di fondo antropico dei solventi clorurati maggiormente presenti nelle acque sotterranee della Regione Piemonte*”, realizzato in collaborazione tra Regione Piemonte e ARPA Piemonte tra il 2017 e il 2020. La finalità principale di questo studio era individuare le aree critiche per la presenza di solventi clorurati, tra cui il cloroformio, e stimare i valori di fondo antropico derivanti da fenomeni di inquinamento diffuso, al fine di identificare strumenti e proposte per la gestione delle stesse.

Nella prima fase, lo studio ha identificato le aree con maggiore criticità e ha organizzato i dati raccolti in un database grafico-relazionale, consentendo di sviluppare una metodologia oggettiva di comparazione dei siti e una gerarchizzazione basata su diversi indicatori di priorità, come numero di pressioni antropiche, punti di campionamento, superamenti dei limiti normativi e presenza di reti di monitoraggio (ARPA Piemonte, 2020). Come è possibile evincere da Figura 5.3, riportante la classifica delle aree con presenza di inquinamento diffuso in funzione del punteggio ottenuto, i comuni con punteggi più elevati coincidono con alcune delle aree analizzate nella presente indagine, confermando che in questi contesti la contaminazione da solventi clorurati ha una componente storica consolidata.

Punteggio	Aree con presenza di inquinamento diffuso
29	Beinasco, Rivalta, Nichelino, Orbassano, Torino Lingotto e Mirafiori
29	Caselle T, Borgaro, Mappano, San Mauro, Settimo, Venaria, Torino nord
25	Biella
24	Torino: Basse di Stura, Madonna di Campagna, Barriera di Milano
23	Asti
21	Molino dei Torti - Castelnuovo Scrivia
21	Vercelli
20	Alessandria
20	Santhià
19	Novi ligure, Pozzolo Formigaro e Basaluzzo
19	Omegna, Casale Corte Cerro, Gravellona Toce
19	Quartieri di Torino: La Crocetta, San Paolo, Cenisia, San Salvario
17	Novara
12	Borgosesia

Figura 5.3 – Classifica delle aree con presenza di inquinamento diffuso in funzione del punteggio ottenuto dall'applicazione degli indicatori di priorità (Fonte: ARPA Piemonte, 2020)

Successivamente, nella seconda fase dello studio sono state organizzate delle campagne di monitoraggio ad hoc nelle aree che hanno mostrato maggiore criticità per la presenza di solventi clorurati ricorrendo a campionamenti non solo sui pozzi e piezometri della rete regionale ma anche su ulteriori punti di controllo esistenti, ad esempio di pertinenza delle discariche. Le analisi, unitamente alle informazioni relative all'assetto geologico e idrogeologico e all'identificazione delle pressioni antropiche nell'intorno dei punti attenzionati, hanno consentito di redigere delle monografie di sito con diverse finalità tra cui: circoscrivere la porzione di acquifero interessata da inquinamento diffuso da solventi clorurati, individuare la presenza di eventuali pennacchi imputabili a contaminazione puntuale e riconducibili a responsabilità certe, separare i pennacchi di contaminazione puntuale da sorgenti antropiche diffuse e ascrivibili a una "collettività differenziata" (ARPA Piemonte, 2020). Nello specifico, le monografie di sito risultano relative ai comuni di Alessandria e provincia, Molino dei Torti, Castelnuovo Scrivia, Novi Ligure, Pozzolo Formigaro, Basaluzzo, Asti, Biella e provincia, provincia di Novara, Torino, provincia del Verbano Cusio Ossola e provincia di Vercelli.

Con tali obiettivi, le analisi in ciascun sito sono state rivolte all'individuazione delle attività antropiche che utilizzano i solventi clorurati come materie prime, prodotti intermedi o sostanze accessorie durante i cicli produttivi, imputando la diffusione nelle matrici ambientali allo stoccaggio dei volumi di contaminante in forma di rifiuto non correttamente gestito. Pertanto, l'indagine è stata estesa a impianti a rischio di incidente rilevante (RIR), attività soggette a Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), scarichi generati da attività produttive, discariche autorizzate e siti in bonifica (ARPA Piemonte, 2020).

Nel complesso, il confronto tra i risultati del presente lavoro e le evidenze emerse nello studio condotto da ARPA Piemonte evidenzia una sostanziale coerenza tra le aree individuate come maggiormente critiche. Diversi dei contesti territoriali in cui l'analisi dei dati della rete regionale di monitoraggio ha evidenziato ricorrenze di cloroformio o superamenti della concentrazione limite risultano infatti coincidere con aree già oggetto di approfondimento nell'ambito dello studio sui valori di fondo antropico dei solventi clorurati. Ciò suggerisce che le anomalie riscontrate non rappresentino fenomeni isolati o recenti, ma si inseriscano piuttosto in un quadro di contaminazioni storiche già documentate a scala regionale.

In questo senso, l'analisi condotta attraverso la rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee consente di intercettare e confermare situazioni di criticità già note, contribuendo a delineare la persistenza nel tempo di tali fenomeni e a fornire un ulteriore supporto conoscitivo al loro inquadramento ambientale. Al tempo stesso, il confronto con tali studi mette in evidenza una delle

principali criticità nella gestione delle contaminazioni da solventi clorurati, ovvero la difficoltà di individuare con certezza una sorgente puntuale o un soggetto responsabile, soprattutto in contesti caratterizzati da una lunga storia di attività industriali e dalla presenza di molteplici pressioni antropiche. Tale difficoltà risulta ancora più evidente nei casi in cui le serie temporali mostrano incrementi sporadici o discontinui delle concentrazioni, come osservato in alcuni punti della rete di monitoraggio analizzati nel presente lavoro, rendendo complessa l'attribuzione del fenomeno a una specifica origine contaminante.

5.3 Interventi di bonifica e gestione delle contaminazioni

In Italia la gestione dei siti contaminati è disciplinata dal D.Lgs. 152/2006, che definisce le modalità di caratterizzazione, messa in sicurezza e bonifica dei siti nei quali le concentrazioni di contaminanti nelle diverse matrici ambientali risultino superiori alle soglie di rischio stabilite dalla normativa.

Nel contesto piemontese, la gestione dei siti contaminati è supportata dall'Anagrafe Regionale dei Siti Contaminati (ASCO), che raccoglie le informazioni relative ai procedimenti di bonifica attivi sul territorio (Figura 5.4). Una fotografia dei dati disponibili evidenzia come quasi la metà dei siti censiti (circa il 47%) ricada nel territorio della Città Metropolitana di Torino, mentre quote rilevanti sono presenti nelle province di Novara (14%) e Alessandria (13%). Percentuali più contenute si registrano nelle province di Biella e Vercelli (circa il 6%), mentre Asti, Cuneo e Verbano-Cusio-Ossola presentano ciascuna valori prossimi al 5% (Regione Piemonte, 2019).

Con riferimento allo stato dei procedimenti, circa il 35% dei siti censiti risulta non richiedere interventi di bonifica, mentre il 19% è classificato come potenzialmente contaminato ed è oggetto di verifiche. I siti con contaminazione accertata rappresentano circa il 29% del totale, mentre il 17% risulta già oggetto di interventi di bonifica conclusi, in gran parte accompagnati da certificazione di avvenuto risanamento (Regione Piemonte, 2019).

Le cause di contaminazione risultano prevalentemente riconducibili a problematiche legate alla gestione di impianti e infrastrutture industriali, che rappresentano oltre la metà dei casi registrati. Ulteriori contributi derivano dalla gestione non corretta dei rifiuti (oltre il 20%), da eventi accidentali (circa il 17%) e da sversamenti incidentali su suolo o acque (circa l'8%). In questo quadro, oltre alle contaminazioni puntuali, sul territorio regionale sono documentate anche forme di contaminazione diffusa, sia di origine naturale — come nel caso di alcuni metalli presenti nelle rocce — sia di origine antropica, legate ad esempio alle deposizioni atmosferiche, alle attività industriali e ad alcune pratiche agricole (Regione Piemonte, 2019).

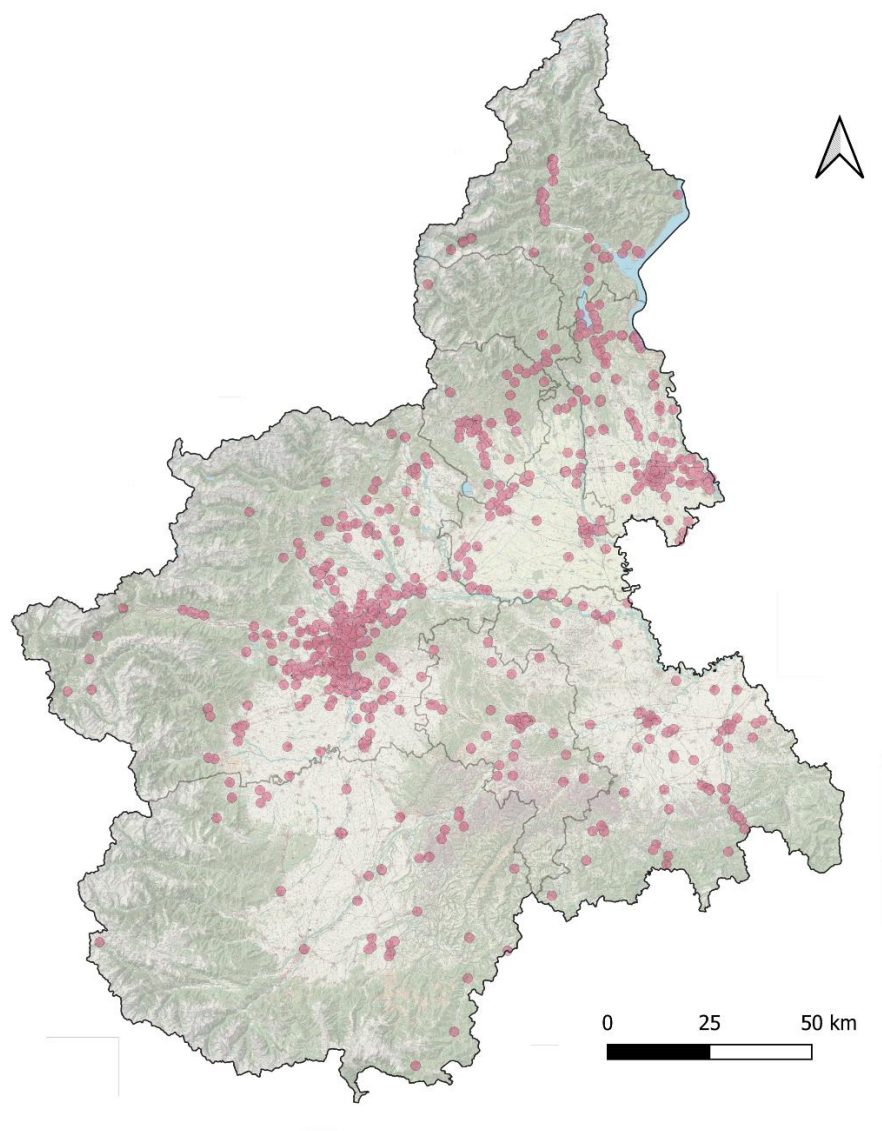


Figura 5.4 - Siti ASCO in Piemonte aggiornati al 2025 (Fonte: Geoportale Regione Piemonte)

Tra i fenomeni di contaminazione diffusa di origine antropica rientra anche la presenza di solventi clorurati nelle acque sotterranee, associata principalmente all'utilizzo di tali sostanze in ambito industriale. In questi casi, la gestione delle criticità risulta particolarmente complessa, sia per le proprietà chimico-fisiche dei contaminanti, che ne favoriscono la persistenza negli acquiferi, sia per la difficoltà di individuare con precisione le sorgenti di rilascio (ISPRA, 2014; ARPA Piemonte, 2020; D.Lgs. 152/2006)

Per questo motivo, gli interventi di risanamento sono generalmente preceduti da indagini di caratterizzazione volte alla definizione del modello concettuale del sito e alla ricostruzione dell'estensione del plume contaminante. Tra le tecniche più comunemente adottate rientrano i sistemi di *pump and treat*, basati sull'estrazione e trattamento delle acque sotterranee contaminate, nonché interventi di *air sparging* e *soil vapor extraction*, finalizzati alla rimozione dei composti volatili dal sottosuolo. In alcuni casi trovano applicazione anche approcci di *biorisanamento*, che sfruttano processi microbici naturali per la degradazione dei composti clorurati. In tale contesto, il monitoraggio ambientale riveste un ruolo fondamentale sia per la comprensione delle dinamiche di diffusione dei contaminanti sia per la verifica dell'efficacia degli eventuali interventi di bonifica (ISPRA, 2014; ARPA Piemonte, 2020; D.Lgs. 152/2006)

La rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee gestita da ARPA Piemonte rappresenta pertanto uno strumento essenziale per l'individuazione delle criticità ambientali, il supporto alle attività di gestione dei siti contaminati e l'approfondimento delle dinamiche evolutive dei fenomeni di contaminazione negli acquiferi regionali.

5.4 Stima del rischio sanitario

Il presente paragrafo si inserisce a conclusione del lavoro di tesi con l'obiettivo di valutare le possibili implicazioni sanitarie associate alla presenza di cloroformio nelle acque sotterranee del Piemonte secondo i campionamenti realizzati tra il 2014 e il 2023.

Per realizzare tale stima preliminare del rischio si assume come riferimento lo scenario per cui un individuo possa essere esposto al valore massimo di concentrazione osservato nel dataset attenzionato, che risulta pari a 25 µg/L, come da campionamento del 2015 in un punto di monitoraggio afferente all'acquifero superficiale.

Per quanto concerne gli effetti cronici, come illustrato nel Capitolo 1, l'OMS riporta che concentrazioni dell'ordine di 30 µg/L corrispondono a un livello di rischio cancerogeno relativamente basso, stimato inferiore a 1 caso su 100.000 individui esposti per tutta la vita (WHO, 2017). In questo contesto il valore massimo osservato nel dataset è inferiore al riferimento OMS, suggerendo preliminarmente che l'esposizione cronica nel contesto piemontese possa anch'esso associarsi a un rischio relativamente basso.

Per rendere quantitativamente confrontabile tale interpretazione, si è effettuata una stima dell'esposizione giornaliera, assumendo uno scenario (EPA, 2023) di soggetto esposto, ovvero un adulto di 70 kg di peso corporeo con un consumo medio di 2 L di acqua potabile al giorno. La dose

giornaliera media di cloroformio assunta per ingestione è stimata con la seguente equazione (EPA, 2023):

$$\text{Dose giornaliera (mg/kg/die)} = (C \times V) / BW$$

dove:

- C = concentrazione di cloroformio nella matrice acqua (0.025 mg/L),
- V = volume di acqua ingerito giornalmente (2 L),
- BW = peso corporeo dell'individuo (70 kg).

Sostituendo i valori osservati:

$$\text{Dose giornaliera} = (0.025 \text{ mg/L} \times 2 \text{ L}) / 70 \text{ kg} \approx 0,000714 \text{ mg/kg/die}$$

Confrontando tale dose con i valori tossicologici noti (Capitolo 1):

- Dose letale acuta negli animali: circa 630 mg/kg di peso corporeo (National Research Council, 1980), corrispondente a circa 44 g per un adulto di 70 kg. La dose stimata per l'esposizione quotidiana è quindi estremamente inferiore a questa soglia acuta;
- Dose giornaliera di riferimento orale per effetti non-cancerogeni (RfD): 0,01 mg/kg/die (EPA, 2023). La dose giornaliera stimata (0,000714 mg/kg/die) risulta circa 14 volte inferiore all'RfD, indicando che, anche secondo i criteri EPA, l'esposizione stimata non comporta un rischio apprezzabile di effetti tossici cronici non-cancerogeni.

Va sottolineato che questa valutazione considera esclusivamente l'esposizione per ingestione diretta di acqua potabile. Altri possibili percorsi, come inalazione di vapori durante l'uso domestico o consumo di alimenti irrigati con acqua contaminata, non sono stati quantificati. Inoltre, la stima si basa sul massimo valore osservato nel periodo di riferimento ma, come si è osservato, possibili picchi locali o temporanei di concentrazione possono sempre verificarsi.

In conclusione, utilizzando il massimo valore disponibile nel periodo di monitoraggio, la stima preliminare indica che, per un adulto medio, l'attuale esposizione al cloroformio nelle acque sotterranee piemontesi non comporta rischi sanitari significativi, sia secondo i criteri OMS per il rischio cancerogeno sia secondo il riferimento EPA per effetti non-cancerogeni. Tuttavia, vale la pena sottolineare l'importanza di un monitoraggio regolare, per garantire la rappresentatività dei dati e intercettare eventuali variazioni future nelle concentrazioni.

Capitolo 6 – Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha analizzato la presenza di cloroformio nelle acque sotterranee della Regione Piemonte, inizialmente considerando il periodo 2000–2023 e successivamente concentrandosi sul periodo 2014–2023, con particolare attenzione al biennio COVID-19, al fine di valutarne l’impatto nell’evoluzione temporale delle concentrazioni, giungendo a una stima del rischio sanitario e all’individuazione di eventuali criticità nella gestione e nel monitoraggio delle acque sotterranee.

L’analisi descrittiva ha evidenziato che la copertura del monitoraggio è variabile nel tempo, con anni caratterizzati da una riduzione significativa dei campionamenti, elemento che potrebbe influenzare l’interpretazione delle distribuzioni di concentrazione. La frequenza dei superamenti del limite normativo di $0,15 \mu\text{g/L}$ è risultata maggiore negli acquiferi profondi rispetto a quelli superficiali, coerentemente con le proprietà fisico-chimiche del cloroformio e, in particolare, la sua persistenza nel tempo, indicando che le criticità osservate riflettono in gran parte contaminazioni storiche consolidate piuttosto che nuovi fenomeni. L’analisi semestrale ha inoltre mostrato una maggiore incidenza dei superamenti nel primo semestre dell’anno, suggerendo la necessità di approfondire le dinamiche temporali di contaminazione nonché gli aspetti idrogeologici sito-specifici, sebbene non sia risultata significativa la correlazione con le precipitazioni.

Durante il periodo COVID-19 è stato registrato un incremento percentuale dei superamenti riconducibile principalmente a punti di monitoraggio già storicamente critici. L’approfondimento spaziale, condotto mediante GIS e valutazione delle possibili fonti in relazione alla direzione di flusso degli acquiferi, ha indicato che le criticità sono associate prevalentemente a contesti industriali, agricoli e urbanizzati, mentre non emergono evidenze di un impatto diffuso dovuto alle pratiche di sanificazione introdotte durante la pandemia. Solo a partire dal 2022 si nota un miglioramento generale della situazione, con una riduzione dei superamenti più marcata.

La stima preliminare del rischio sanitario, basata sull’esposizione al valore massimo osservato ($25 \mu\text{g/L}$) e confrontata con i limiti tossicologici noti in letteratura, ha confermato che il rischio sanitario attuale per la popolazione adulta è relativamente basso, rendendo probabilmente non prioritaria la necessità di interventi di bonifica ulteriori rispetto a quelli già messi in atto.

Lo studio presenta tuttavia alcune limitazioni. Ad esempio la mancanza di dati relativi alle perdite fognarie e acquedottistiche rende difficile interpretare alcuni picchi di concentrazione che potrebbero derivare da infiltrazioni o clorazione di acqua persa dalle reti. La difficoltà di identificare con precisione le sorgenti inquinanti complica eventuali interventi di bonifica e di prevenzione. Inoltre, il

campionamento nel tempo e nello spazio non è stato uniforme, con molti pozzi e piezometri disattivati o mancanti, e talvolta con incertezze sulla profondità dell'acquifero effettivamente monitorato, limitando la rappresentatività dei dati.

I risultati ottenuti forniscono alcuni possibili spunti sulle priorità future: mantenere un monitoraggio annuale costante e uniforme, valutare la possibilità di aggiungere punti di campionamento in aree più strategiche come ospedali o zone urbane densamente popolate, integrare dati sulle perdite idriche per meglio interpretare i picchi di concentrazione e approfondire la conoscenza delle sorgenti storiche o industriali per supportare eventuali interventi di bonifica mirati.

In conclusione, la contaminazione da cloroformio negli acquiferi piemontesi sembra essere principalmente legata a sorgenti localizzate e persistenti nel tempo piuttosto che a dinamiche naturali o a variazioni temporanee delle attività antropiche ad esempio intervenute durante il periodo pandemico.

Sebbene il rischio sanitario risulti basso, è comunque importante considerare gli aspetti ambientali e i limiti di contaminazione delle acque, garantendo un monitoraggio continuo, una conoscenza approfondita delle fonti e, se necessario, interventi mirati, al fine di tutelare sia la salute pubblica sia la qualità delle acque sotterranee nel lungo periodo.

Bibliografia

Ade P., Funari E. – *Qualità degli ambienti acquatici e implicazioni sanitarie*, 2005

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) - *Toxicological Profile for Chloroform*
- Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 1997

ARPA Piemonte - *Il clima in Piemonte – Anno 2019*, 2020

ARPA Piemonte - *Il clima in Piemonte – Anno 2020*, 2021

ARPA Piemonte - *Il clima in Piemonte – Anno 2021*, 2022

ARPA Piemonte - *Il clima in Piemonte – Anno 2022*, 2023

ARPA Piemonte - *Studio propedeutico della definizione dei valori di fondo antropico per i solventi clorurati maggiormente presenti nelle acque sotterranee della Regione Piemonte*, 2020

Biancardi, A., Calace, N., Petronio, B. M., Pietroletti, M. - *Formation of chloroform during chlorination of natural organic matter: role of humic substances* - Journal of Environmental Sciences, 2009, 21, 124–130

Bove A., Casaccio D., Destefanis E., De Luca D. A., Lasagna M., Masciocco L., Ossella L., Tonussi M. – *Assetto geoidrologico della Regione Piemonte*, 2005

Deborde, M., von Gunten, U. - *Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—Kinetics and mechanisms: A critical review* - Water Research, 2008, 42(1–2), 13–51

DECRETO LEGISLATIVO 2 febbraio 2001, n. 31 - *Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano* - GU Serie Generale n.52 del 03-03-2001 – Suppl. Ordinario n. 41

DECRETO LEGISLATIVO 3 aprile 2006, n. 152 - *Norme in materia ambientale* - GU Serie Generale n.88 del 14-04-2006 – Suppl. Ordinario n. 96

DECRETO LEGISLATIVO 16 marzo 2009, n. 30 - *Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento* - GU Serie Generale n.79 del 04-04-2009

DECRETO 8 novembre 2010, n. 260 - *Regolamento recante i criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3*

aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo - GU Serie Generale n.30 del 07-02-2011 - Suppl. Ordinario n. 31

Evlampidou I., Font-Ribera L., Rojas-Rueda D., Gracia-Lavedan E., Costet N., Pearce N., Villanueva C. M. - *Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the European Union* - Environmental Health Perspectives, 2020, 128(1), 017001

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. - *Groundwater* - Prentice Hall, 1979

Galli C.L., Corsini E., Marinovich M. – *Tossicologia*, 2007

Hoekstra E. J., de Leer E. W. B., Brinkman U. A. T. - *Natural Formation of Chloroform and Brominated Trihalomethanes in Soil* - Environmental Science & Technology, 1998, 32(23), 3724–3729

Huber, S.G. et al. - *Natural formation of chloroform in soils and groundwater* - Environmental Science & Technology, 2012, 46, 12186–12194.

Hunkeler D., Laier T., Breider F., Jacobsen O. S. - *Demonstrating a Natural Origin of Chloroform in Groundwater Using Stable Carbon Isotopes* -Environmental Science & Technology, 2012, 46(11), 6096–6101

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - *Linee guida per la caratterizzazione, analisi di rischio e bonifica dei siti contaminati*, 2014

Majone M., Petrangeli Papini M., Aulenta F., Viotti P., Leccese M., Tandoi V., Rossetti S., Cupo C. - *Biorisanamento anaerobico in situ di falde contaminate da solventi clorurati. Proposta di protocollo di indagine per la valutazione di fattibilità*, 2006

Majone M., Petrangeli Papini M., Aulenta F., Viotti P., Leccese M., Tandoi V., Rossetti S., Cupo C. - *Proposta di linea guida su “Individuazione e trattamento mediante biorisanamento anaerobico in situ di solventi clorurati in fase densa separata (DNAPL)”*, addendum al documento “Biorisanamento anaerobico in situ di falde contaminate da solventi clorurati. Proposta di protocollo di indagine per la valutazione di fattibilità”, 2006

National Research Council – *Drinking Water and Health, Vol. 2 – The Chemistry of Disinfectants in Water*, 1980

Regione Piemonte - *Idrogeologia della pianura piemontese*, 2005

Regione Piemonte, ARPA Piemonte - *Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte* – Allegati tecnici sull'assetto idrogeologico della pianura piemontese, 2021

Rook, J.J. - *Formation of haloforms during chlorination of natural waters*. Water Treatment and Examination, 1974, 23, 234–243

Vanzetti C., Gianoglio N., Sesia E. - *Studio sulla contaminazione diffusa da solventi clorurati nelle acque sotterranee*, 2016

World Health Organization - *Chloroform. Environmental Health Criteria* 163, 1984

World Health Organization - *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed., 2017

Sitografia

ARPA Piemonte - *Monitoraggio delle acque sotterranee*, Scheda informativa, 2024:

<https://www.arpa.piemonte.it/scheda-informativa/monitoraggio-acque-sotterranee>

Geoportale Regione Piemonte:

<https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/home>

Environmental Protection Agency (EPA) - *Basic Information about the Integrated Risk Information System*:

<https://www.epa.gov/iris/basic-information-about-integrated-risk-information-system>

Piattaforma WebGIS ARPA Piemonte per il monitoraggio delle acque sotterranee:

https://webgis.arpa.piemonte.it/monitoraggio_qualita_acque_mapseries/introduzionePage

Portale ARPA Piemonte per i dati meteorologici:

https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/snippets_arpa_graphs/map_meteoweb/?rete=stazione_meteorologica

Regione Piemonte – *Bonifica Aree Inquinata*, Scheda informativa, 2019

<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/amianto-bonifiche-terre-rocce-scavo/bonifica-aree-inquinata>

Regione Piemonte - *Rete di monitoraggio delle acque sotterranee*, Scheda informativa, 2022:

<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/acqua/dati-monitoraggio-delle-acque-sotterranee>

Appendice A – Storico dei campionamenti – Acquifero superficiale

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Appendice B – Storico dei campionamenti – Acquifero profondo

[illegible]

[illegible]

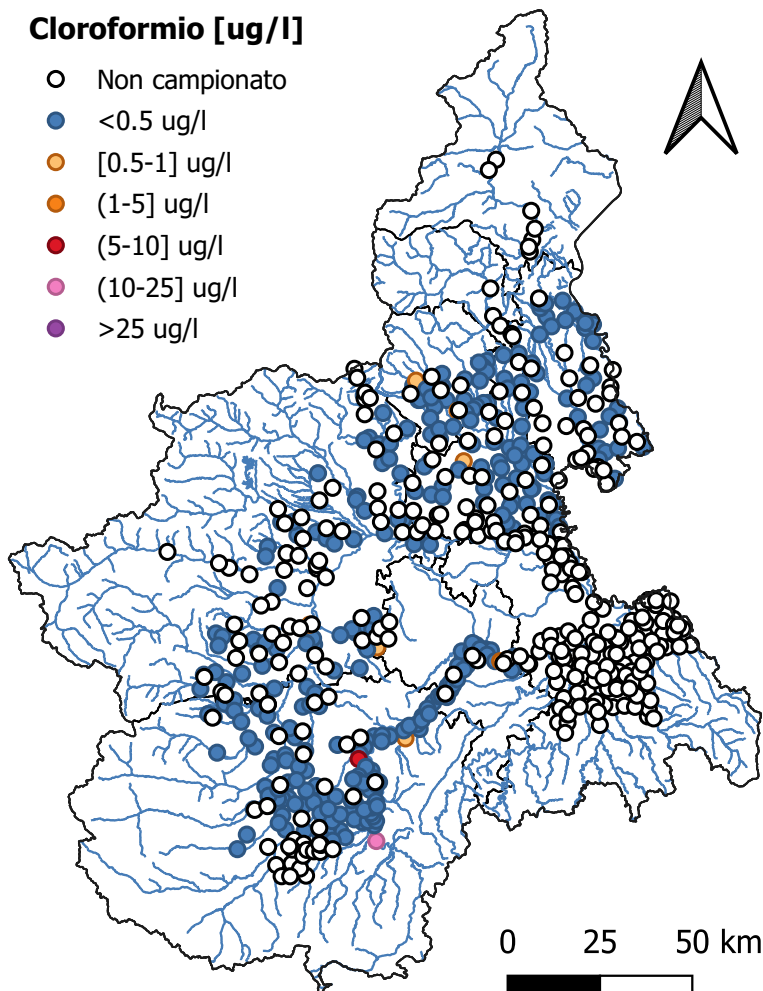
[illegible]

Appendice C – Categorizzazione delle concentrazioni di cloroformio (2000-2023)

**2000 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

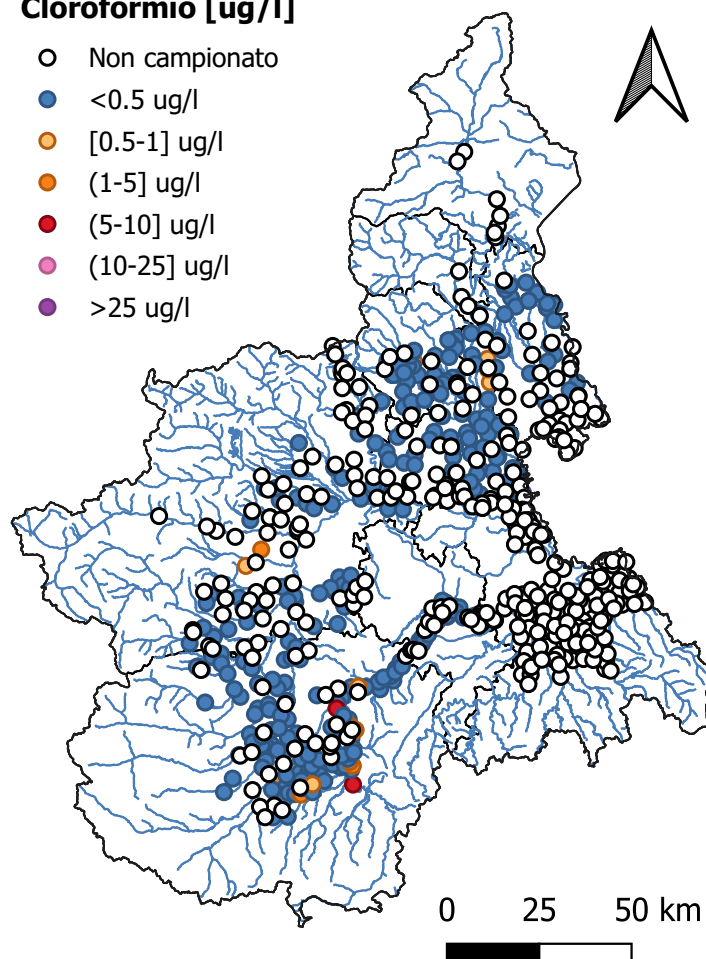
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2000 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

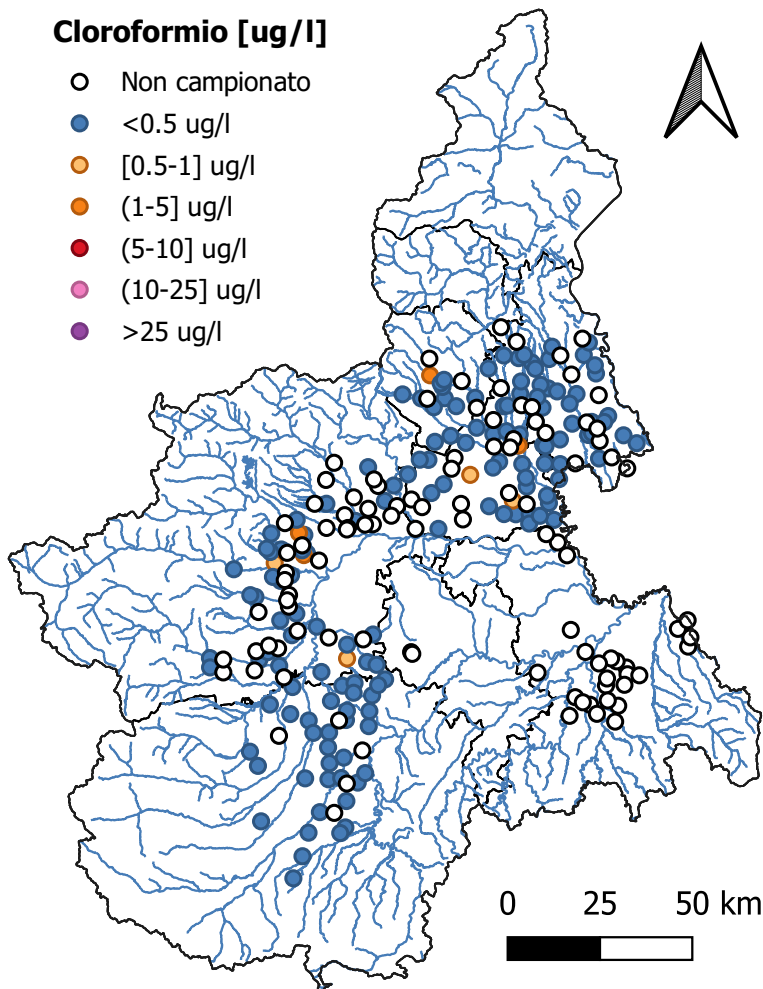
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2000 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

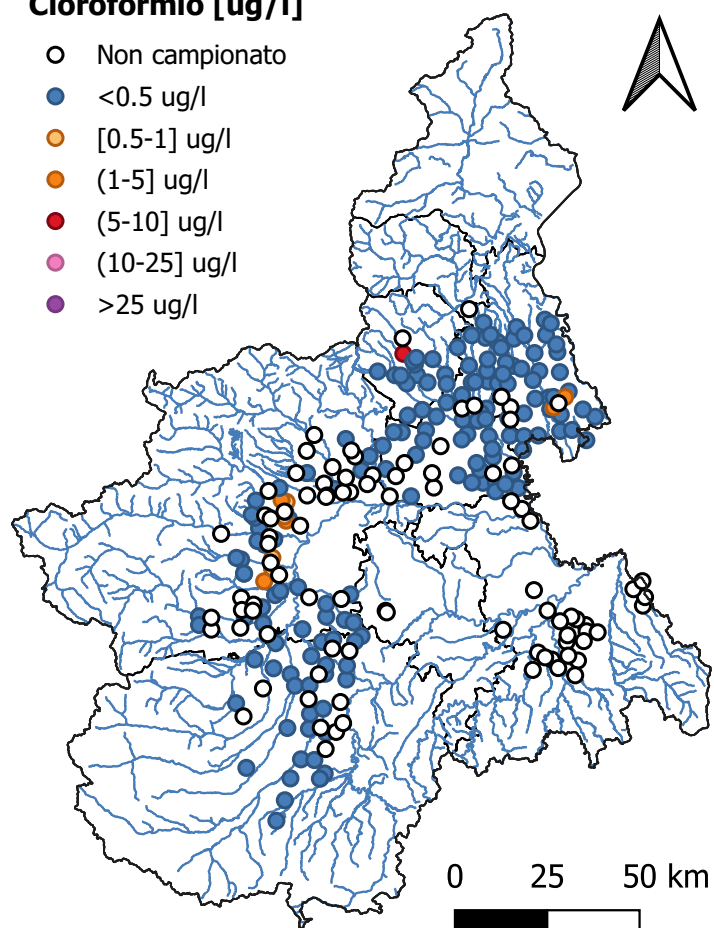
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2000 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

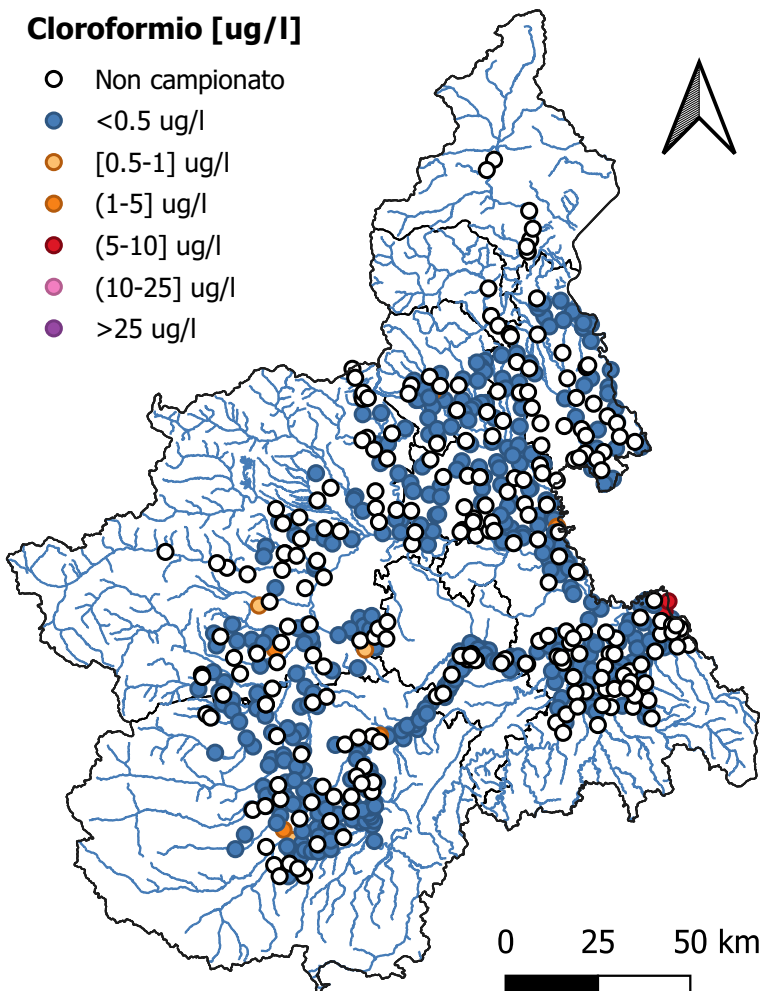
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2001 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

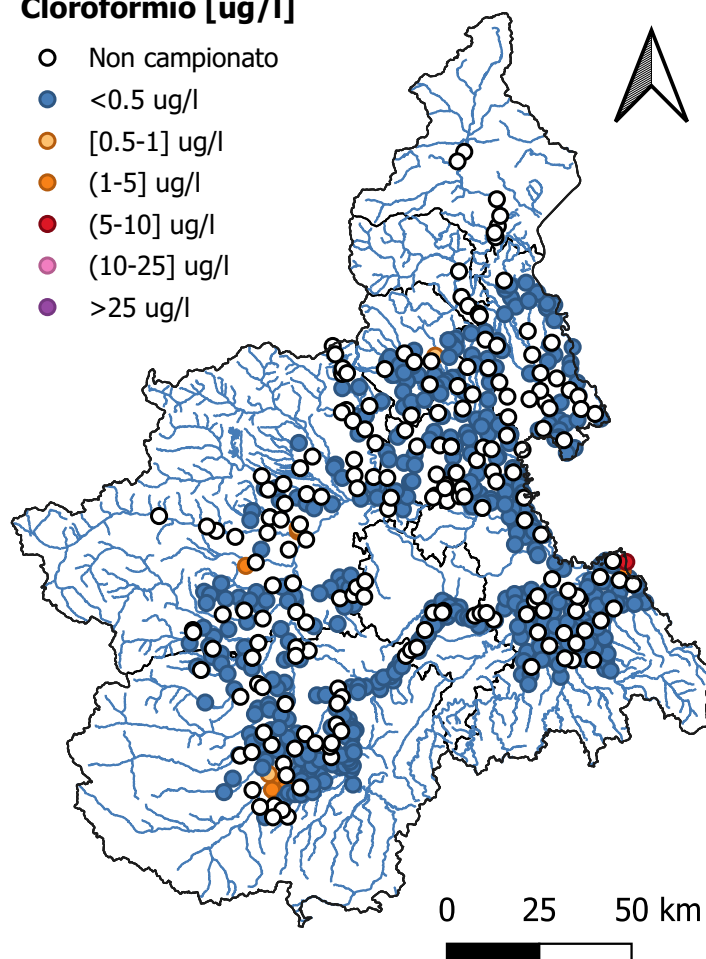
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2001 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

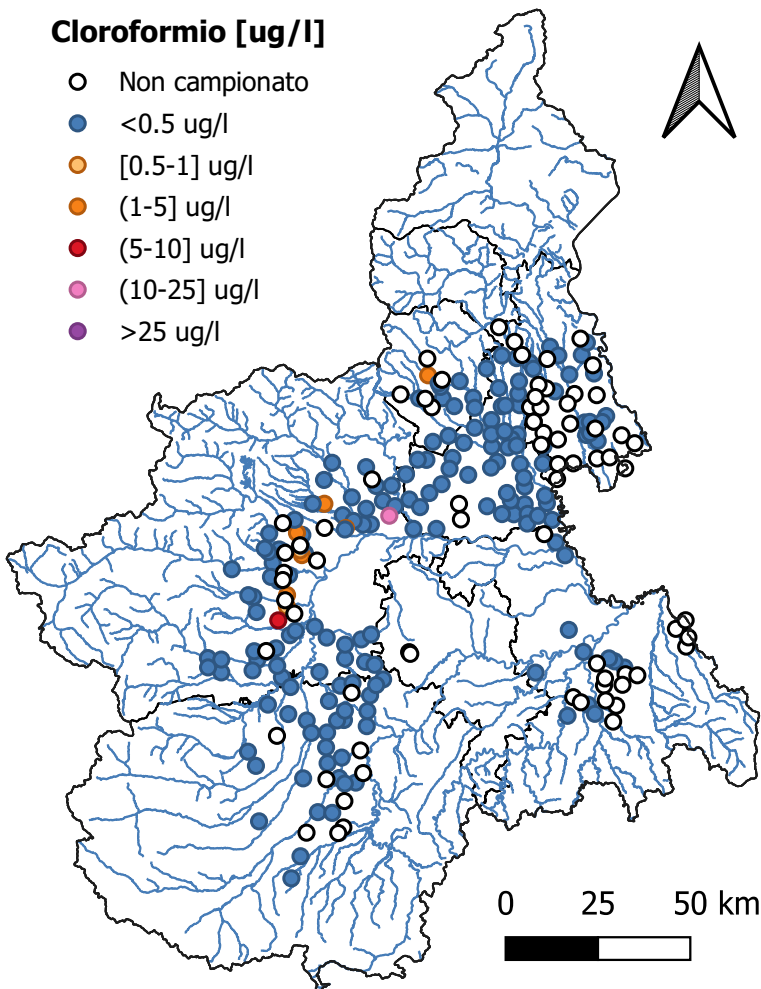
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2001 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

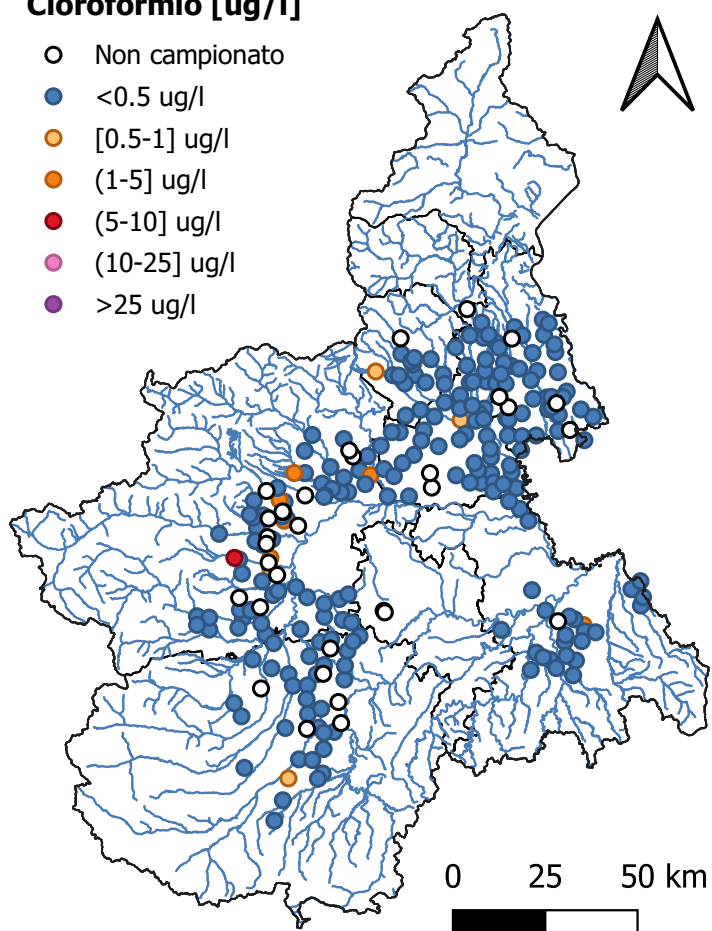
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2001 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

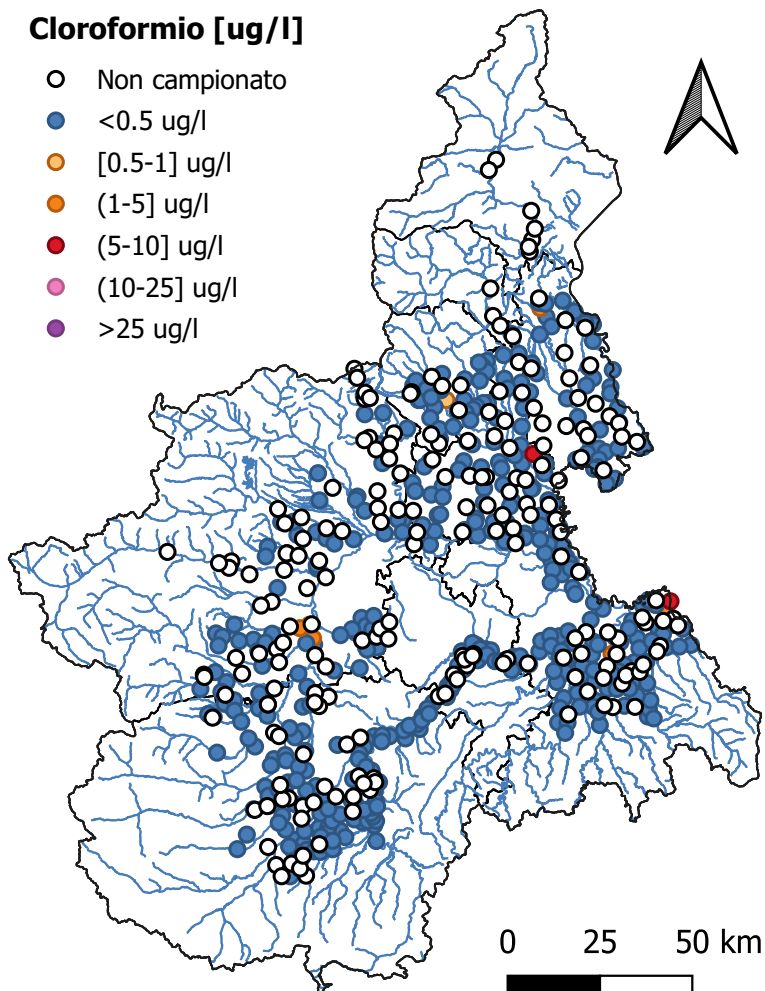
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2002 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

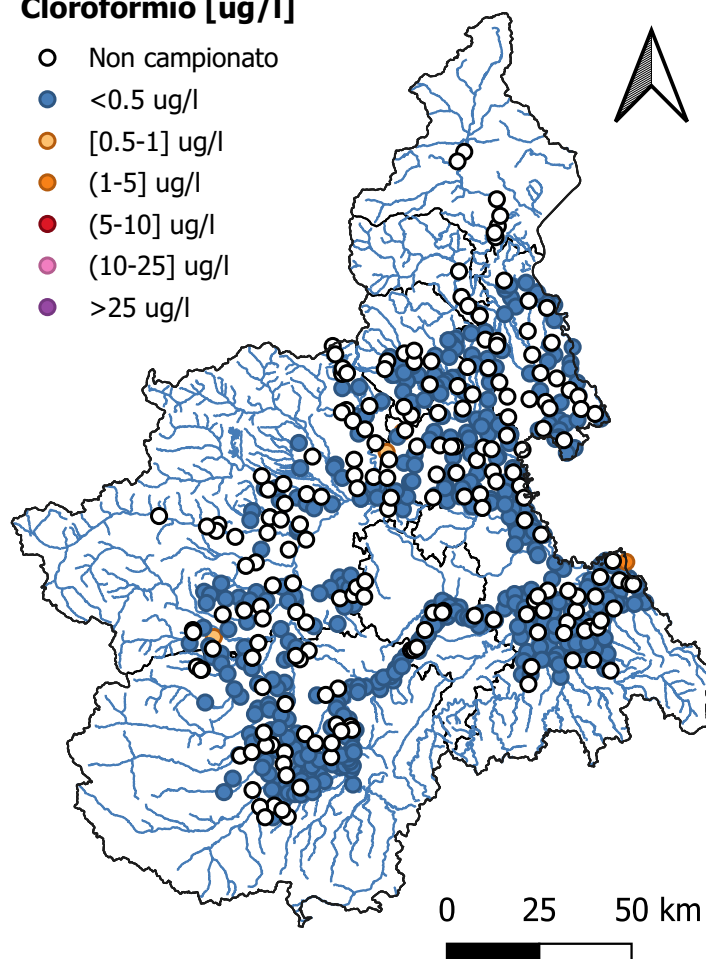
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2002 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

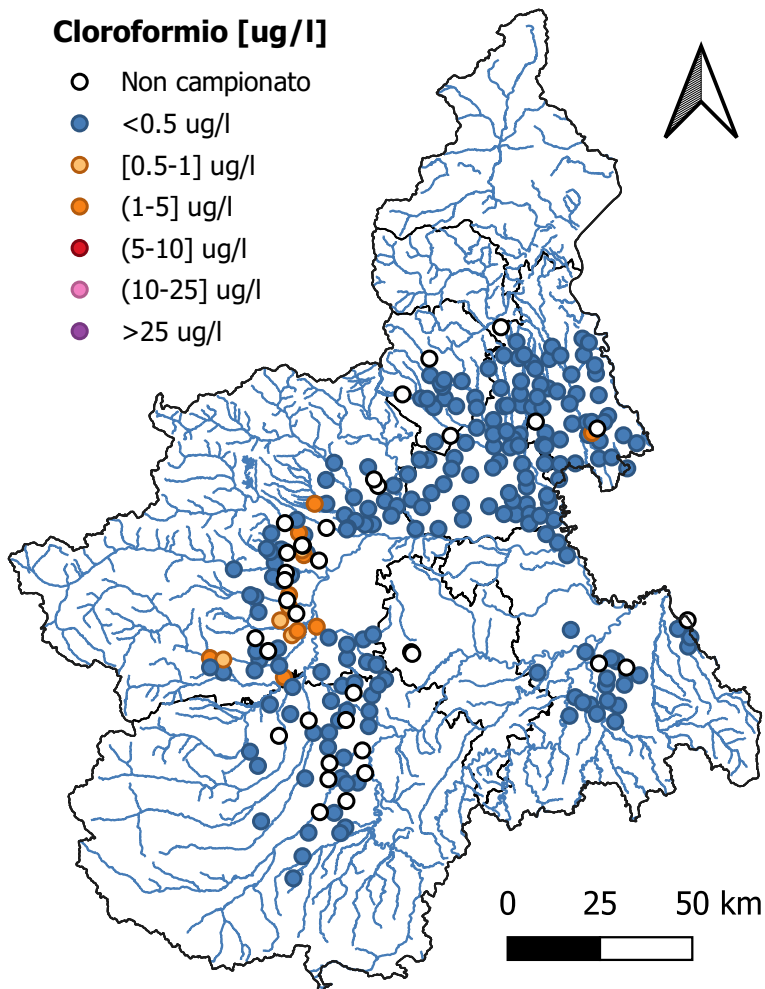
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2002 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

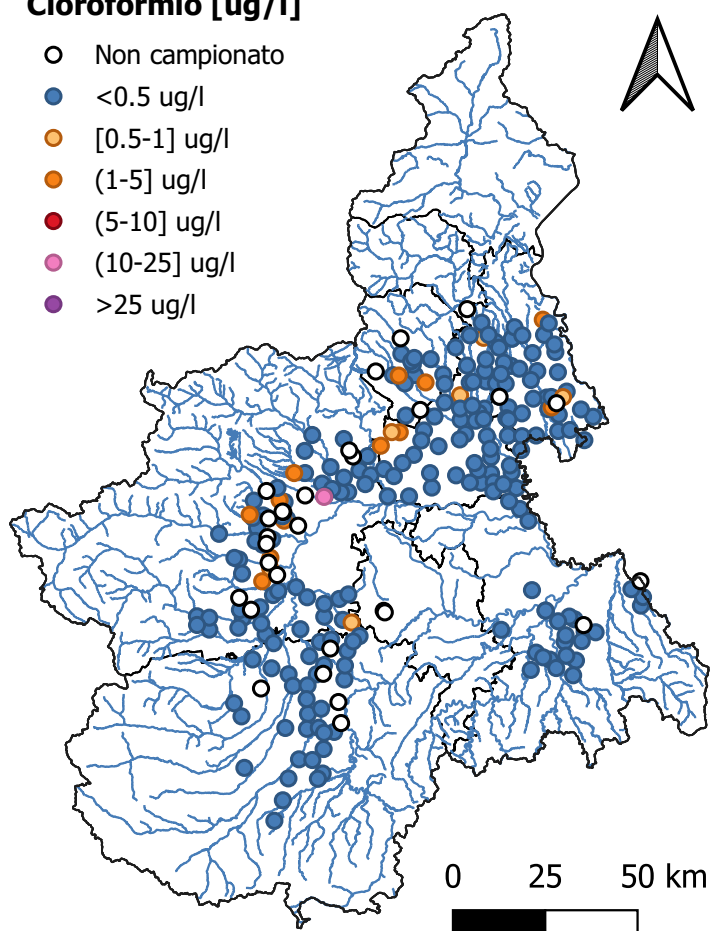
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2002 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

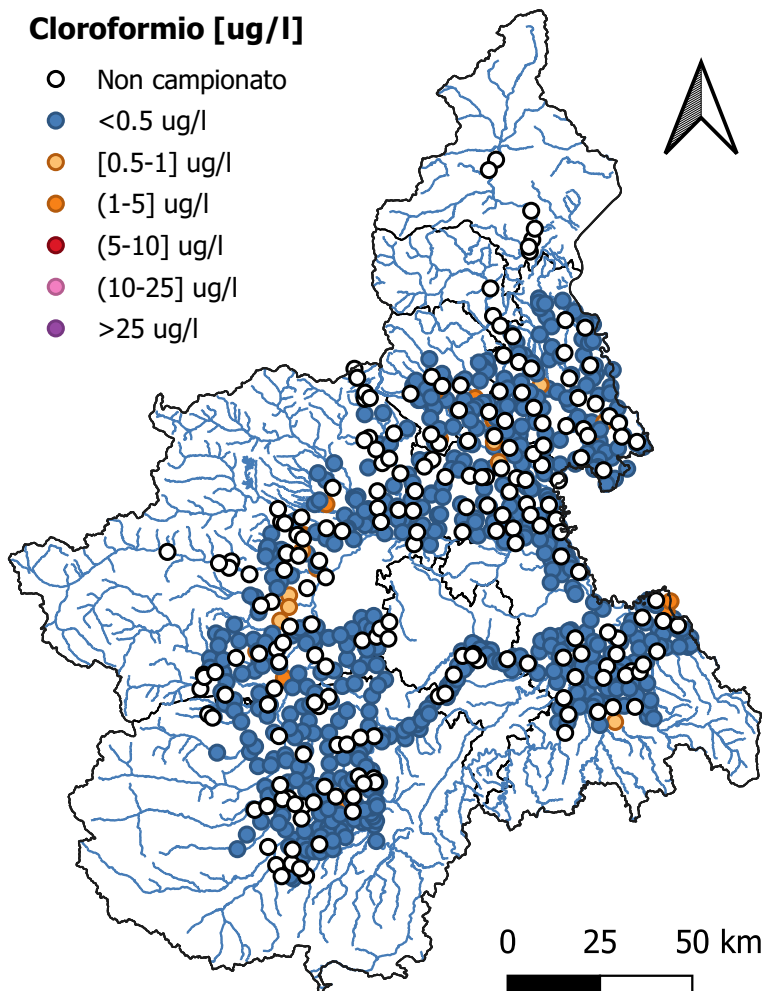
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2003 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

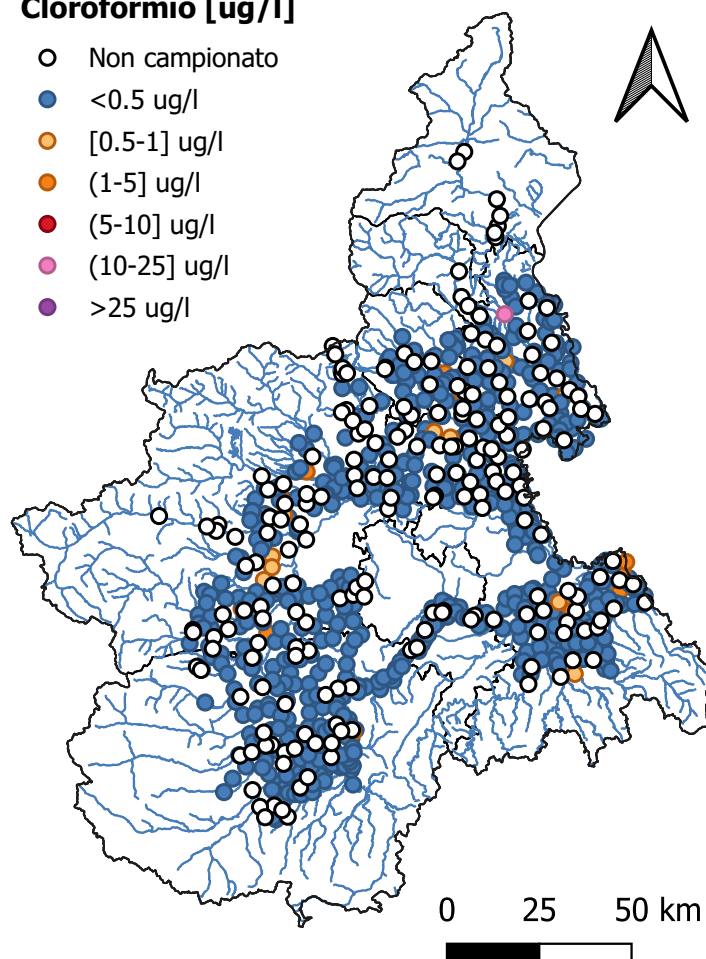
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2003 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

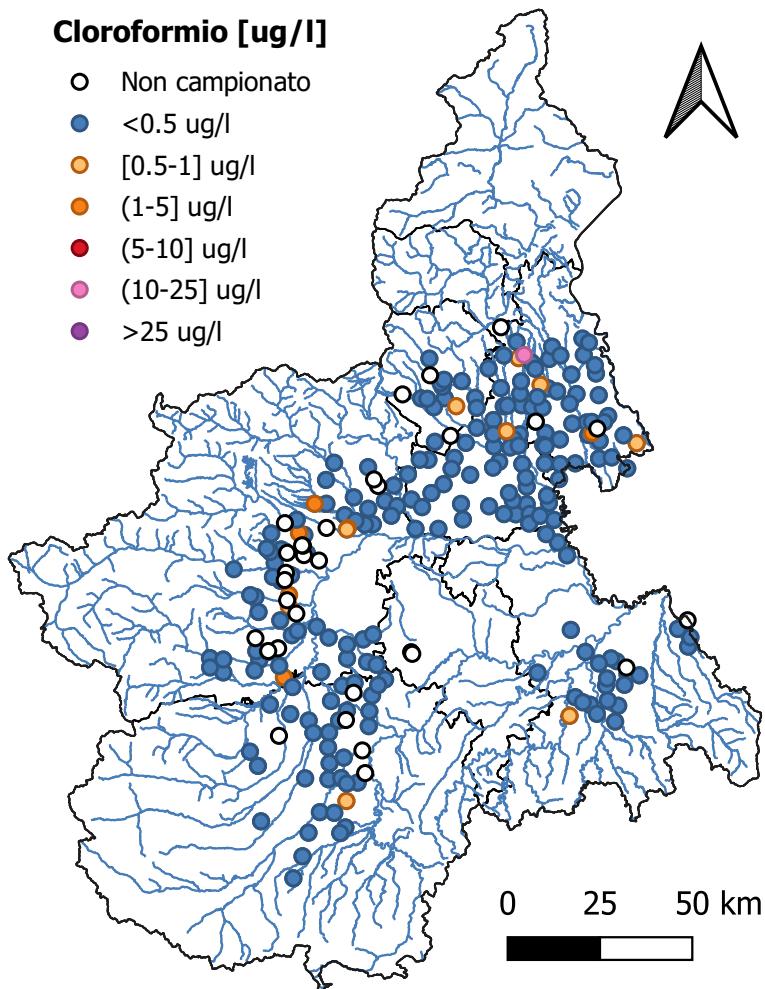
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2003 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

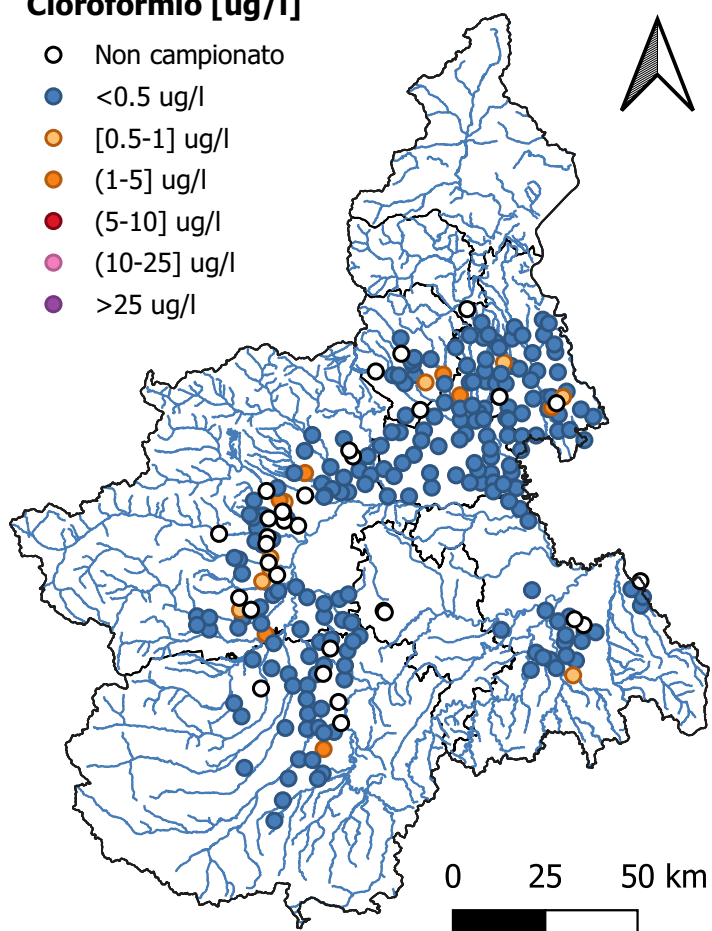
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2003 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

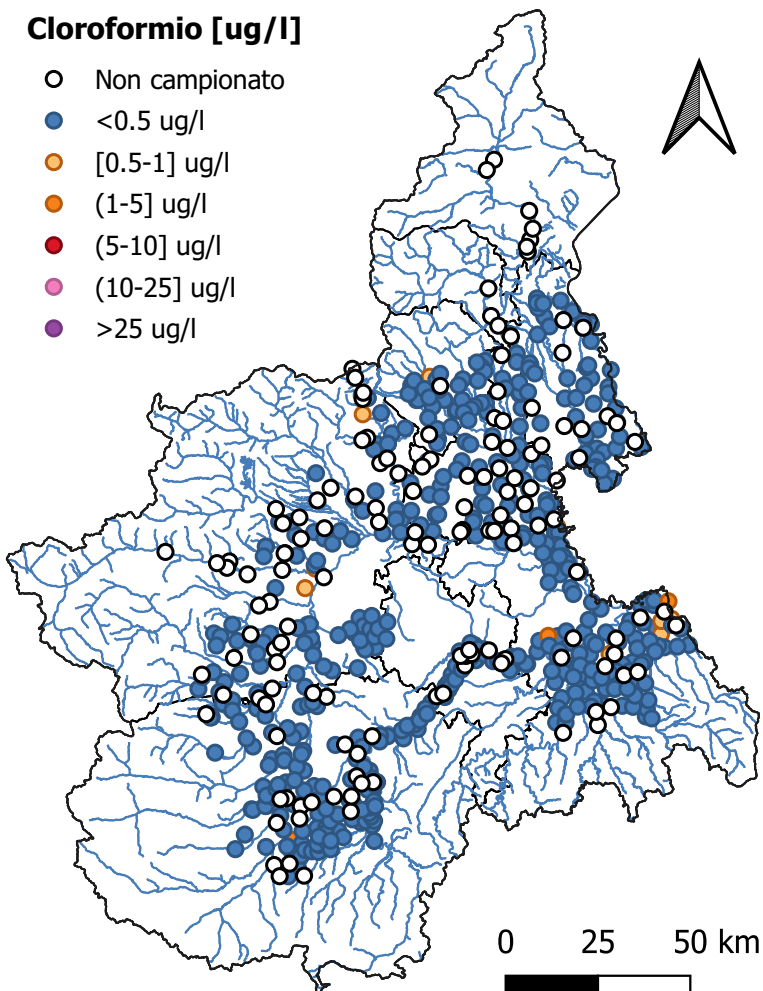
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2004 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

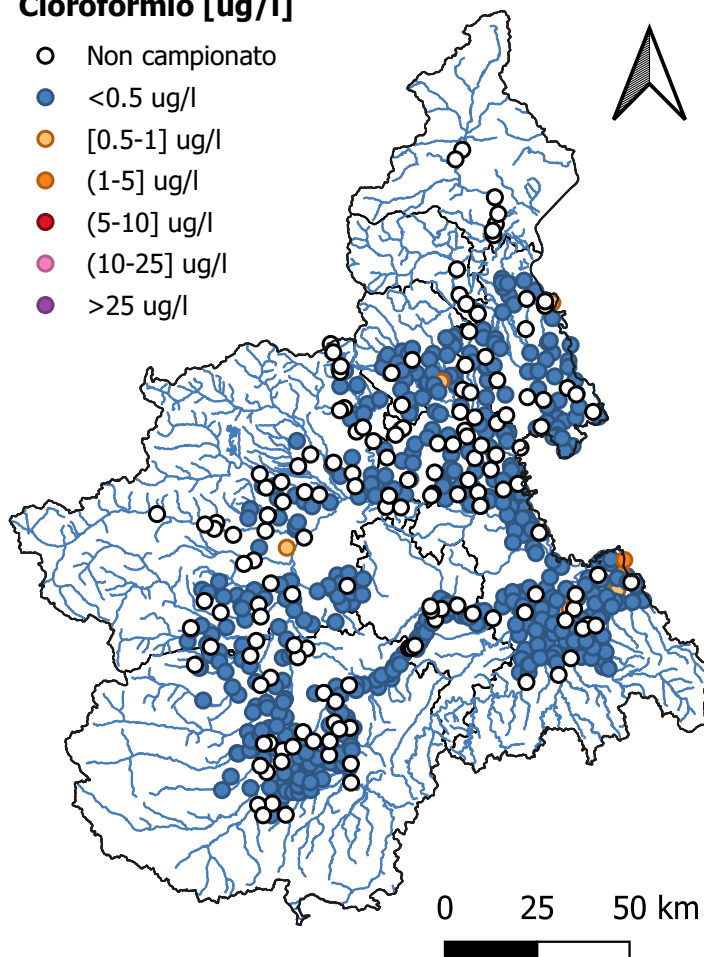
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2004 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

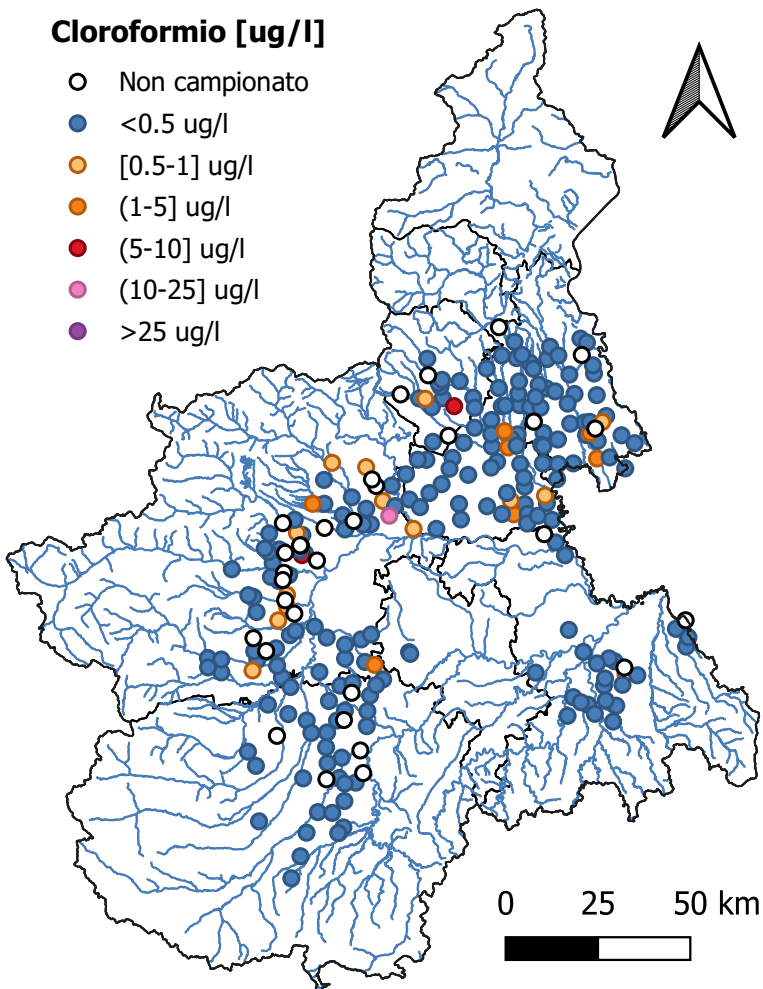
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2004 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

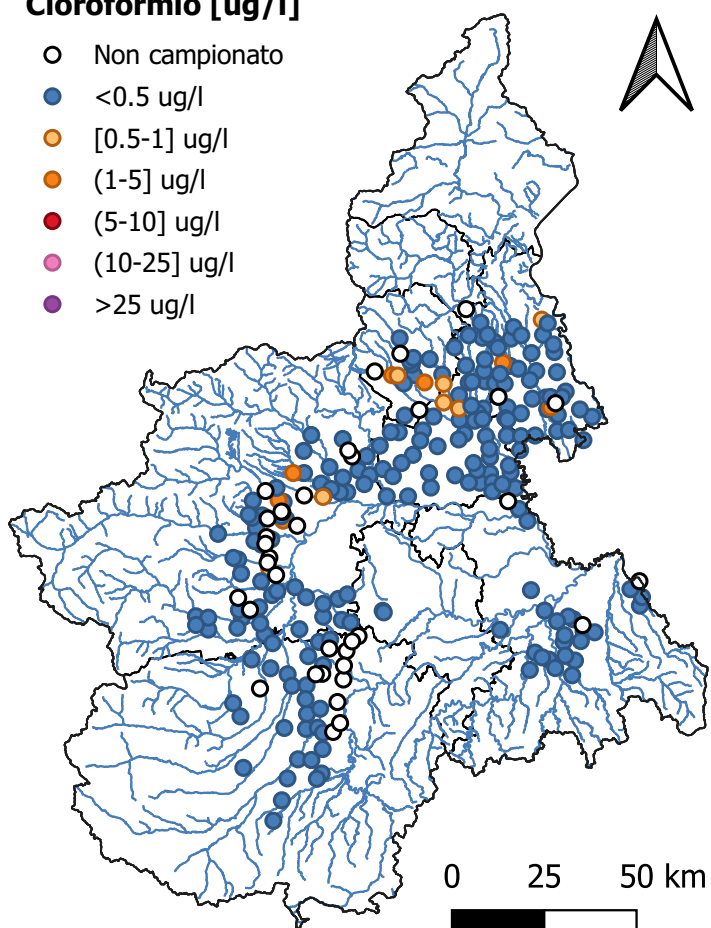
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2004 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

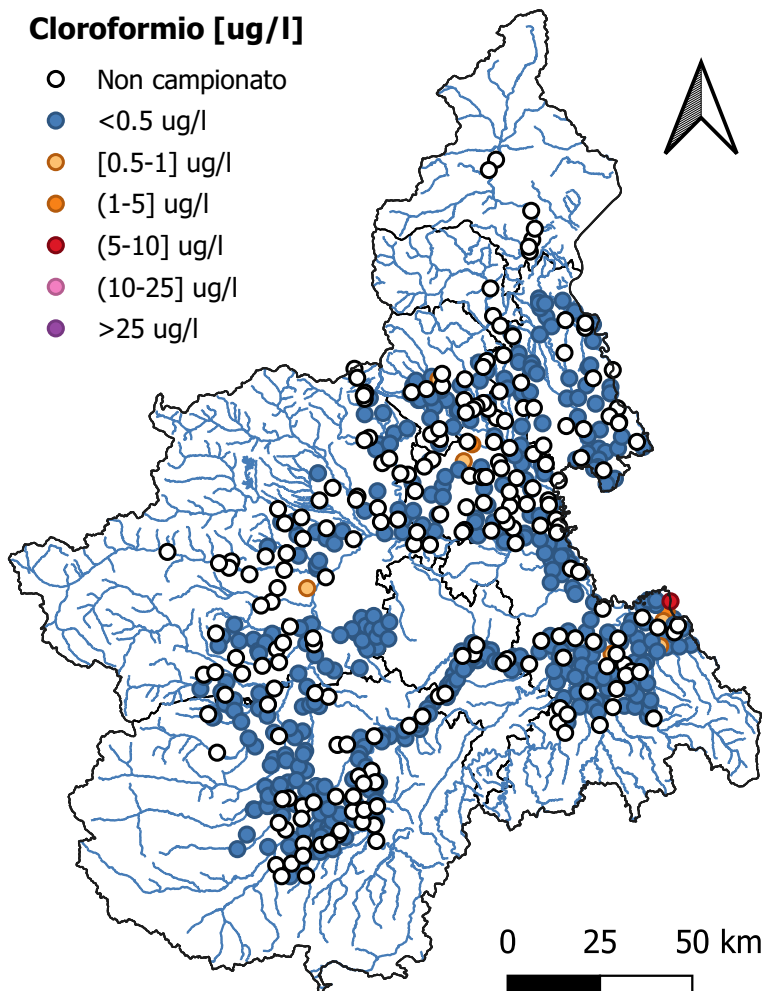
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2005 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

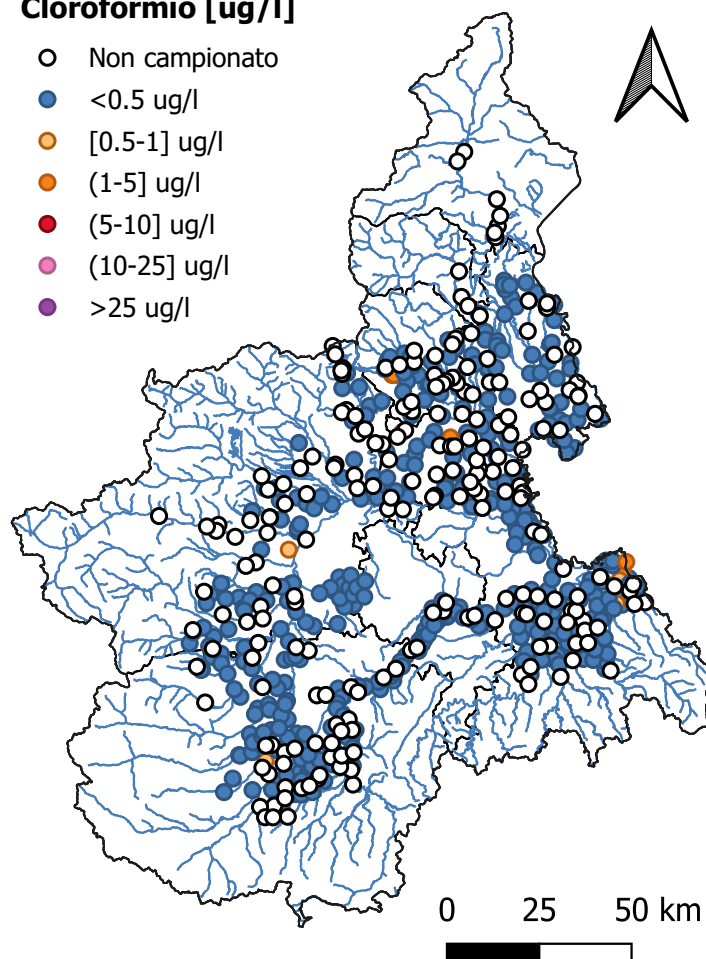
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2005 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

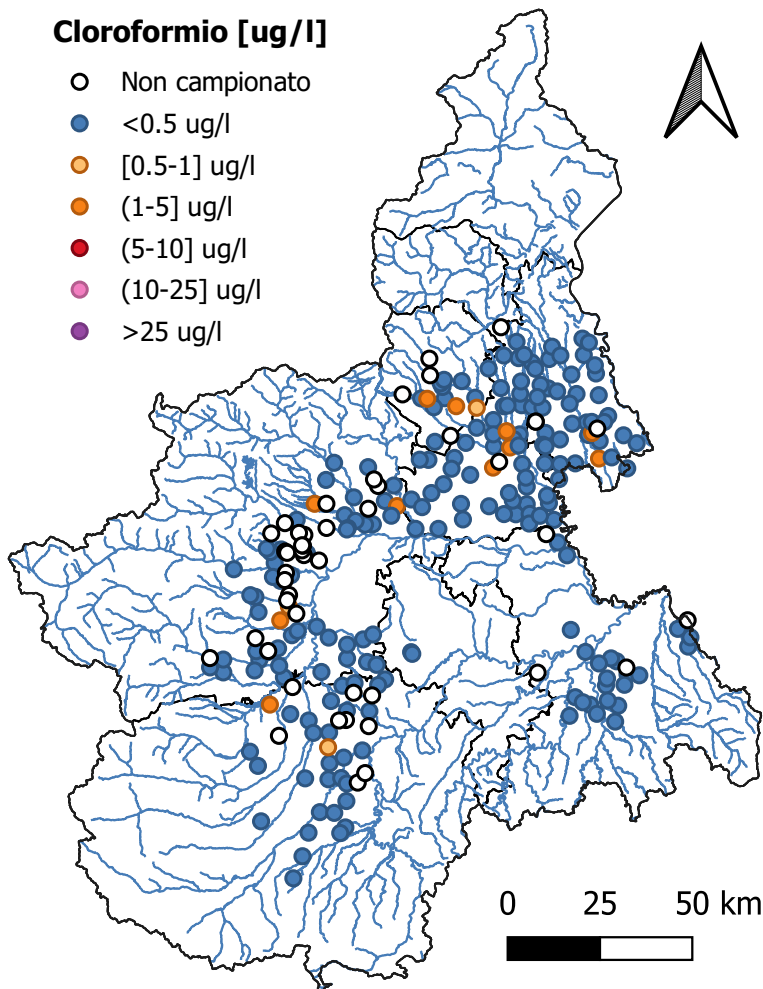
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2005 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

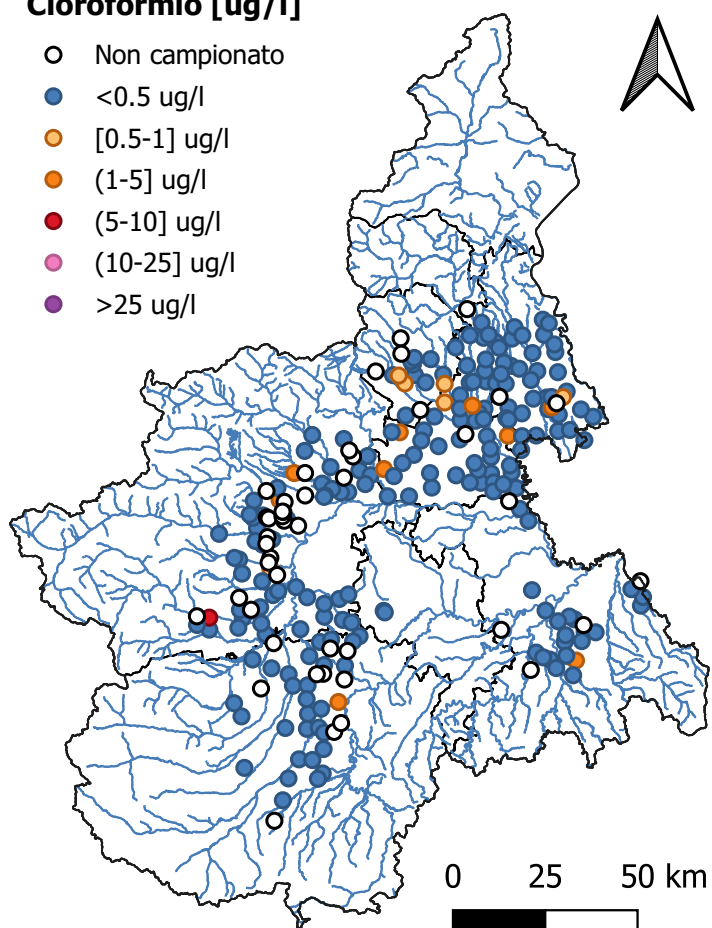
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2005 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

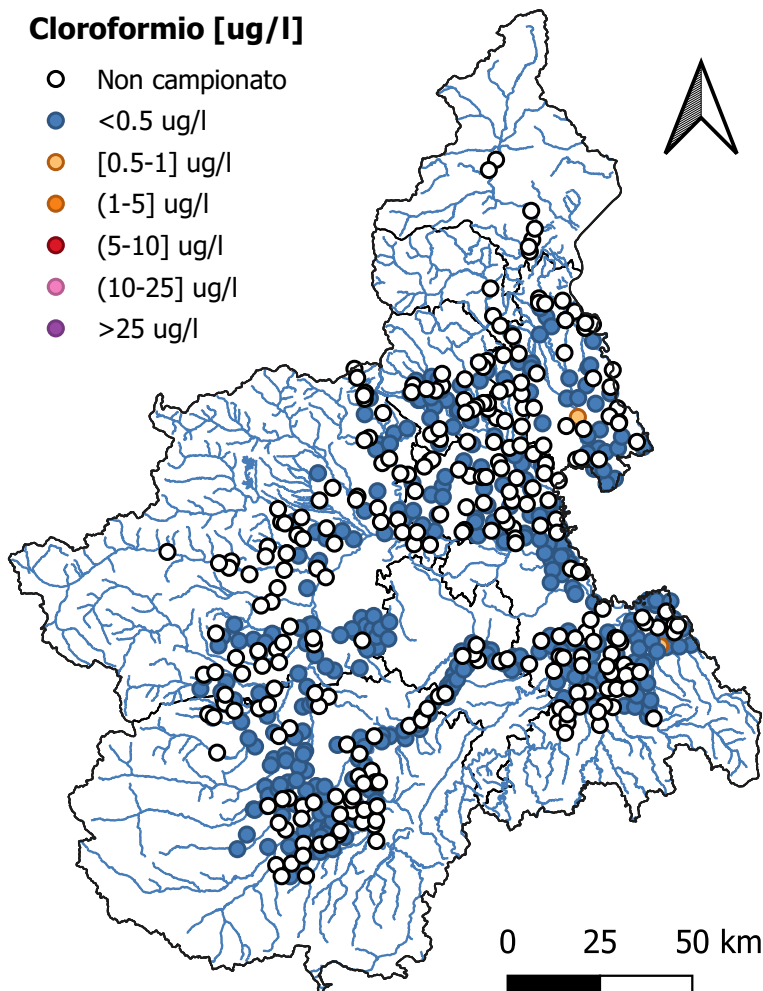
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2006 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

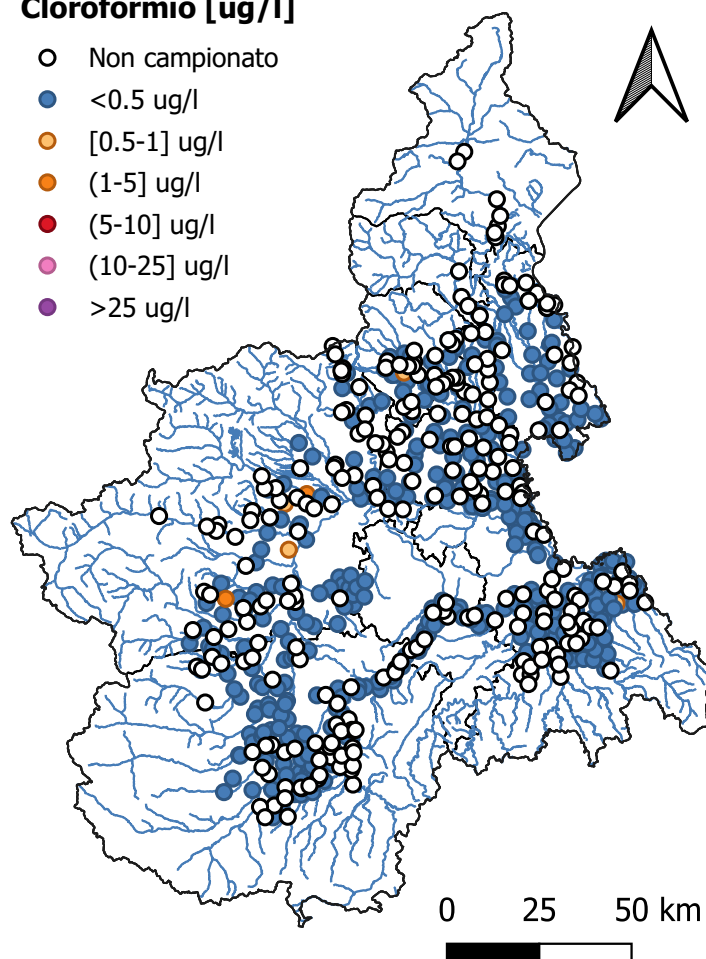
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2006 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

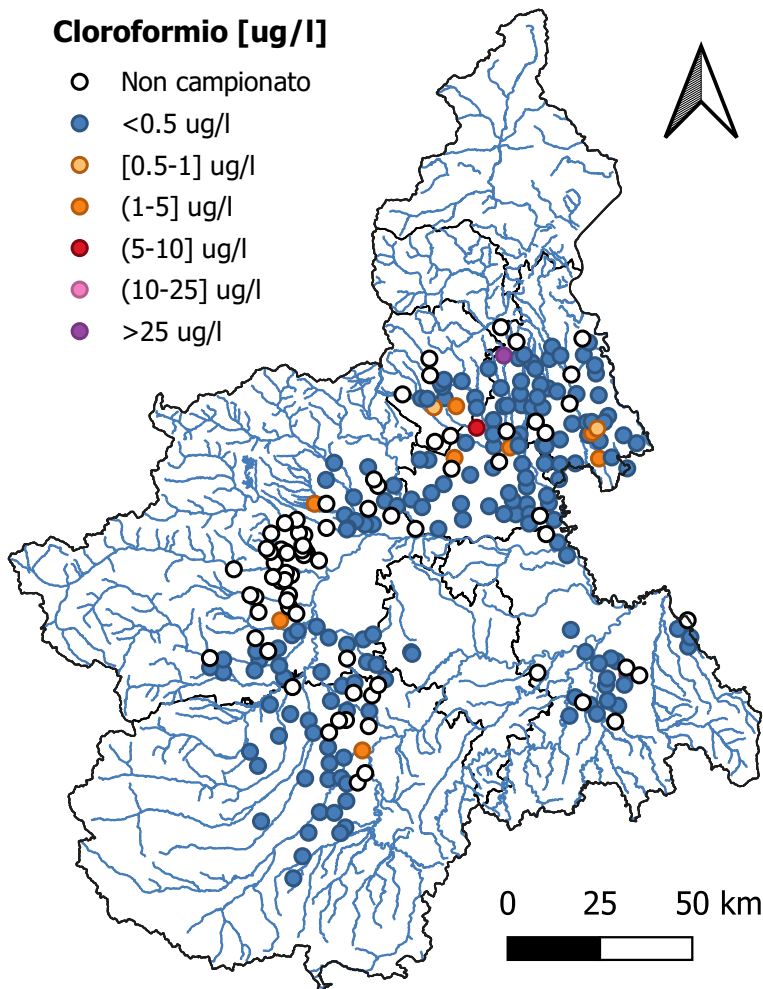
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2006 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

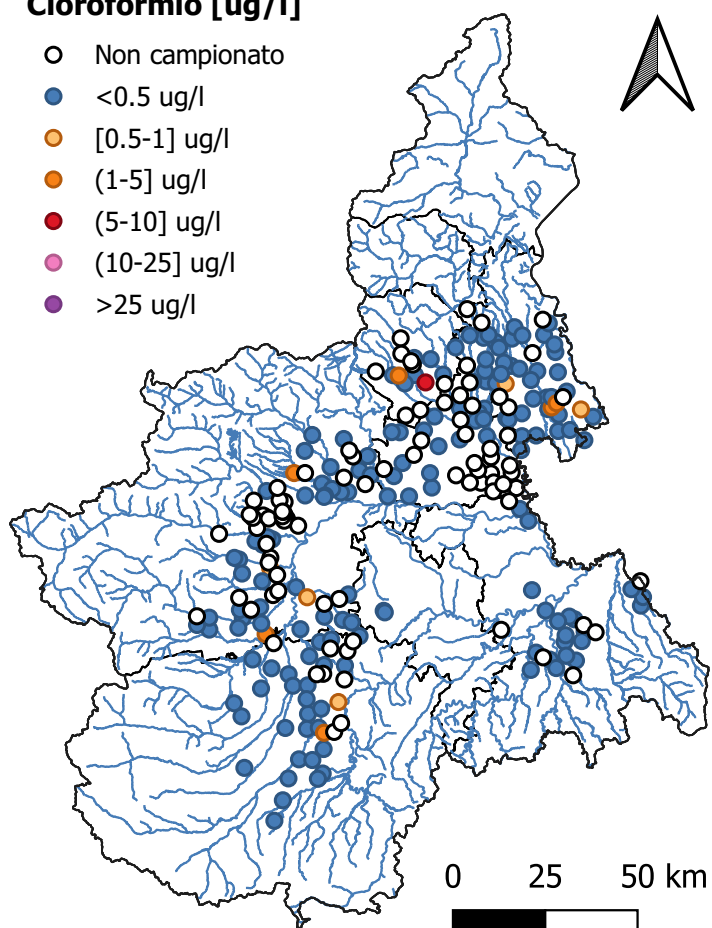
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2006 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

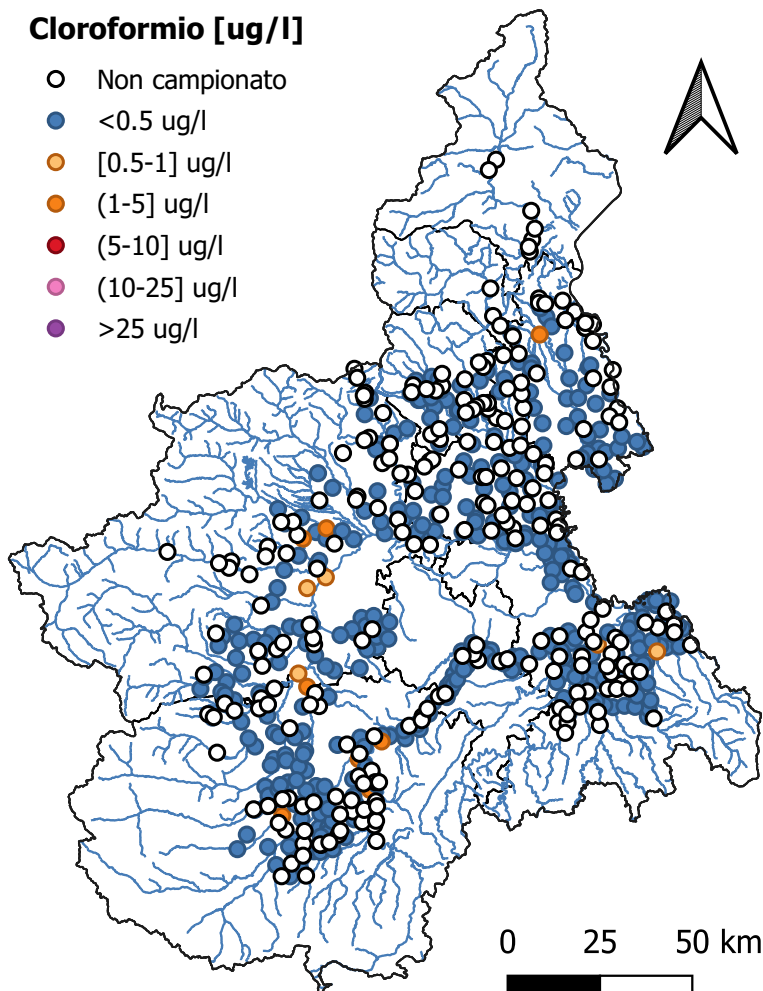
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2007 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

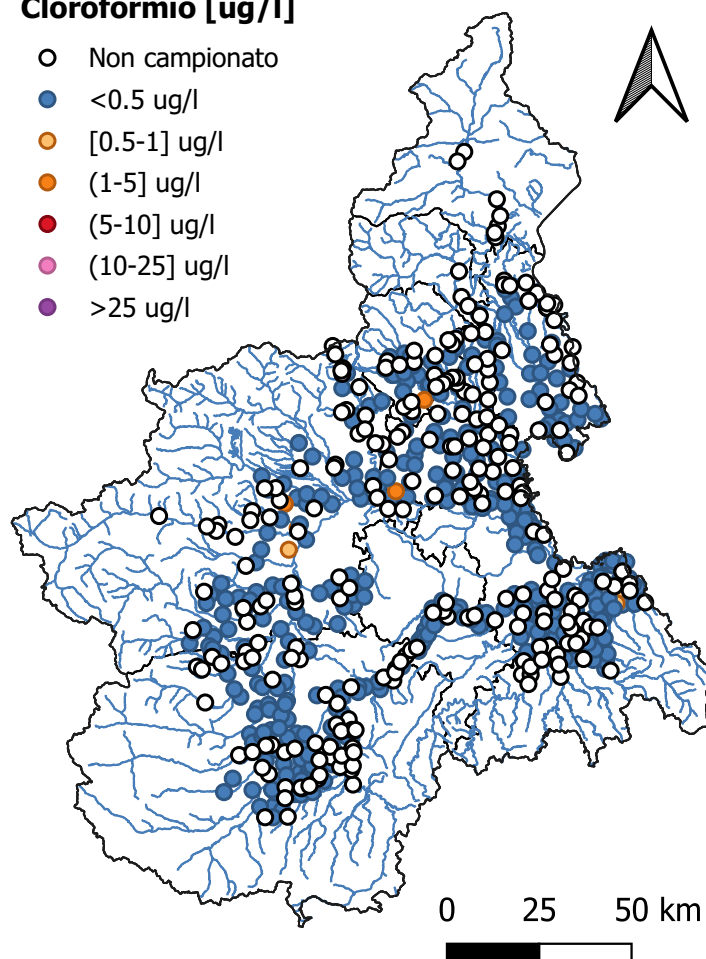
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2007 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

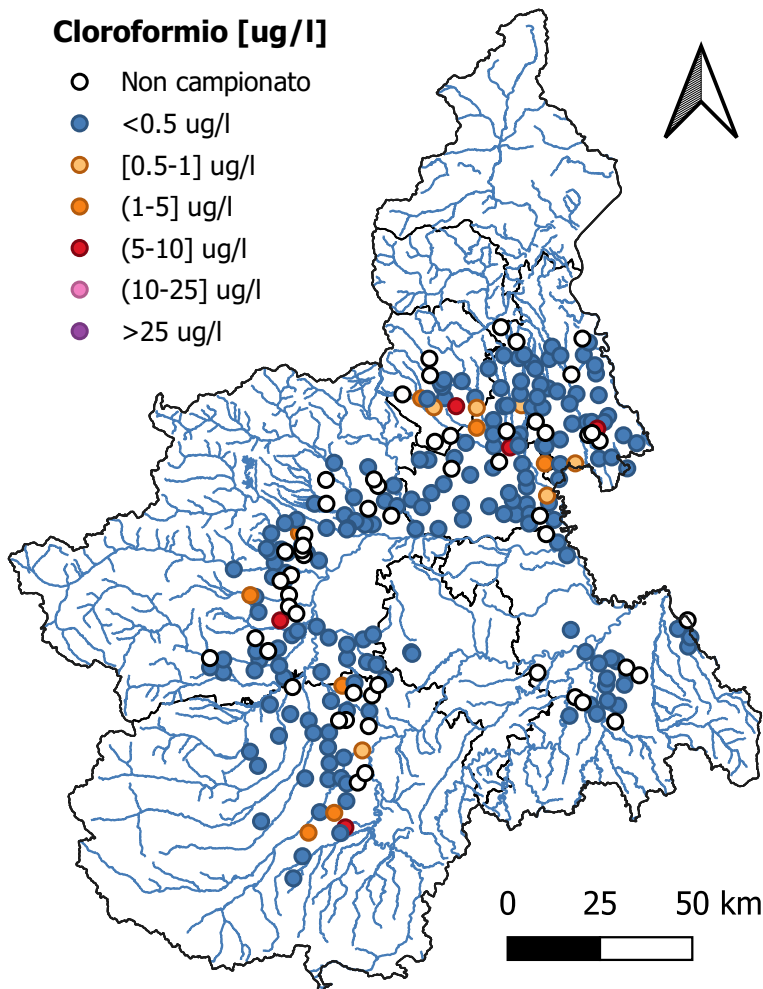
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2007 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

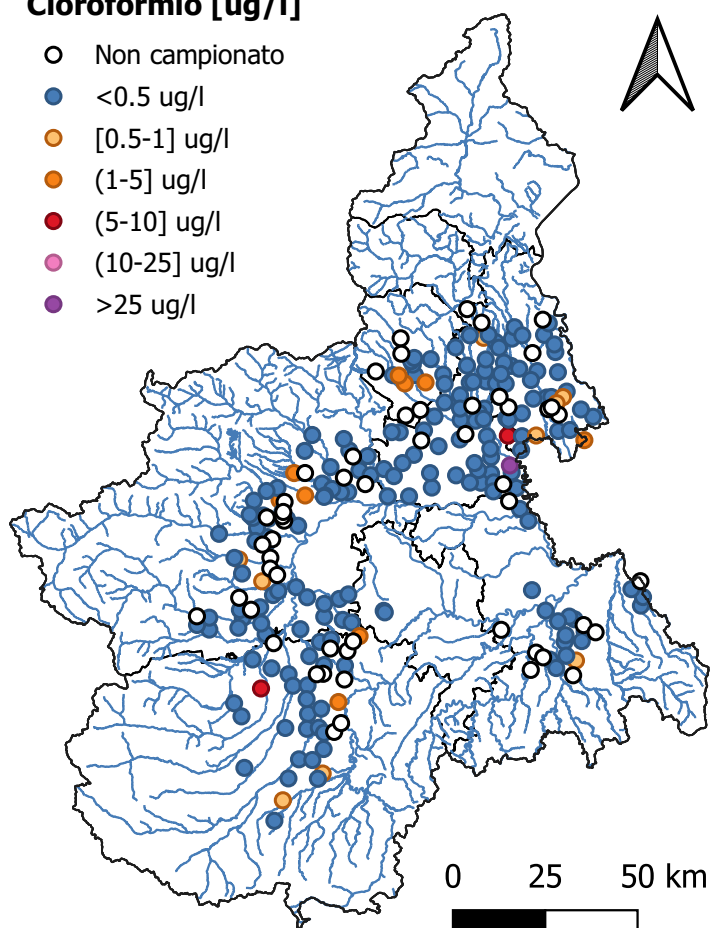
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2007 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

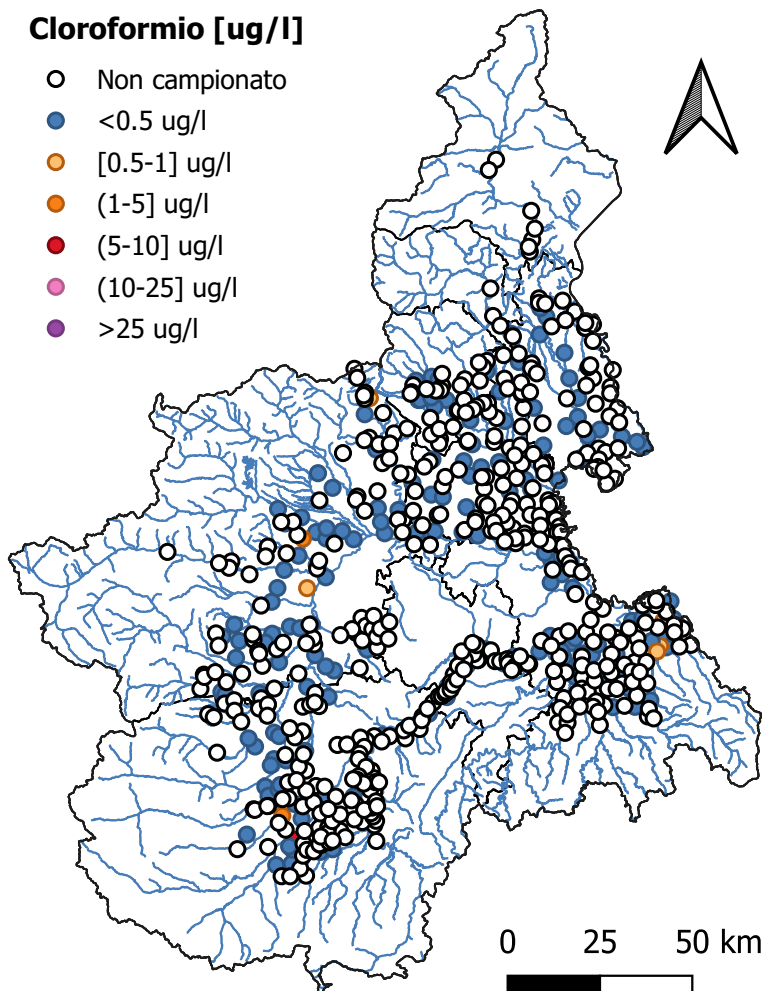
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2008 - Primo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

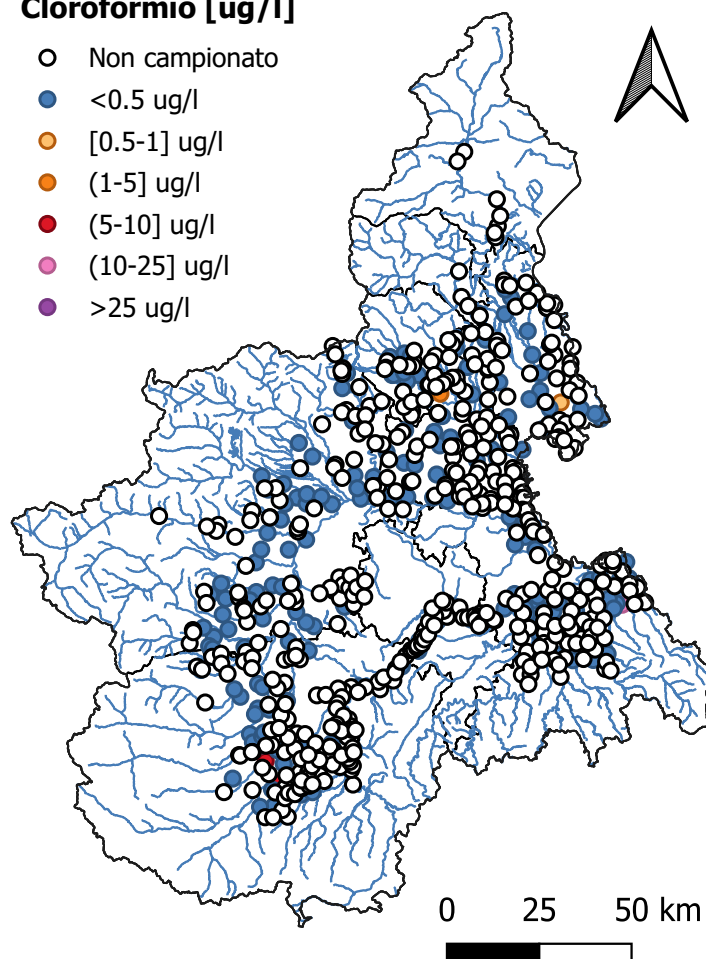
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2008 - Secondo semestre
Acquifero SUPERFICIALE**

Cloroformio [ug/l]

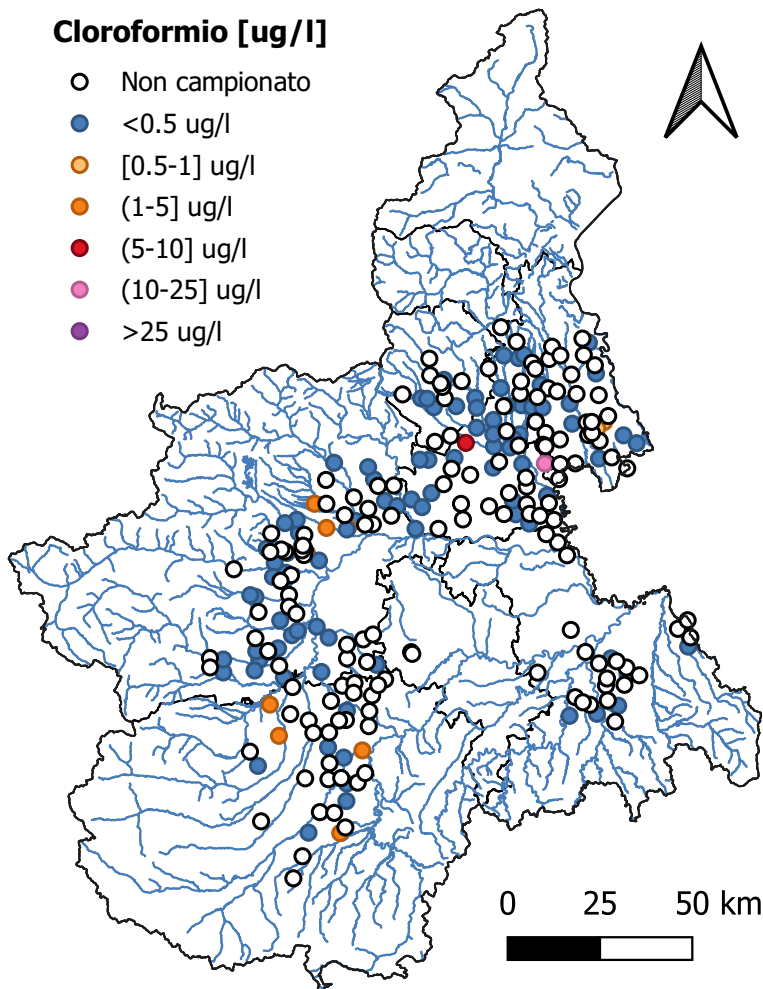
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2008 - Primo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

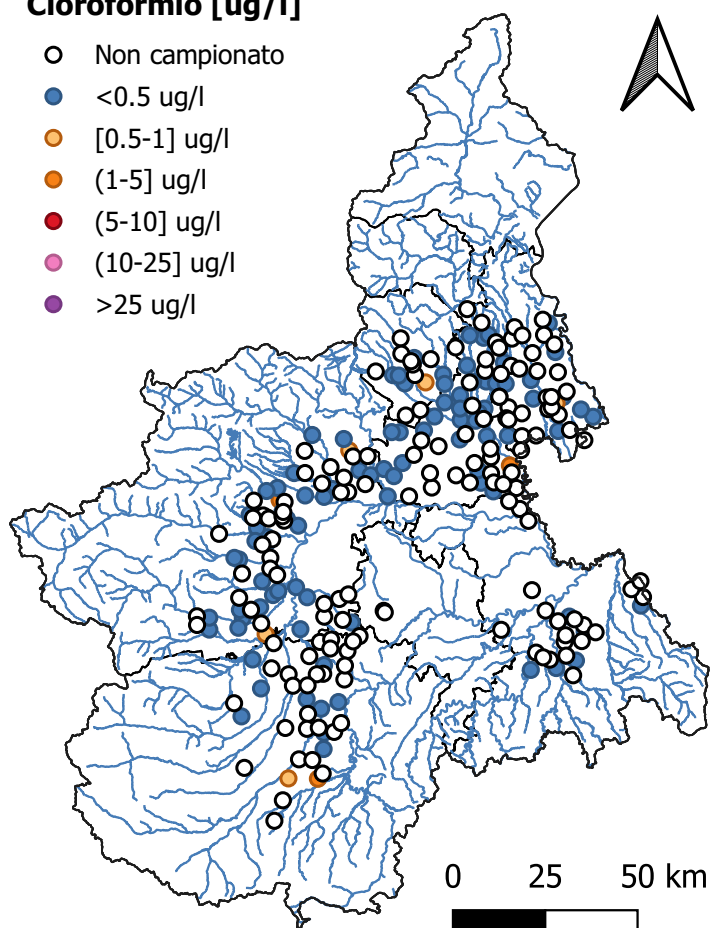
- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l



**2008 - Secondo semestre
Acquifero PROFONDO**

Cloroformio [ug/l]

- Non campionato
- <0.5 ug/l
- [0.5-1] ug/l
- (1-5] ug/l
- (5-10] ug/l
- (10-25] ug/l
- >25 ug/l

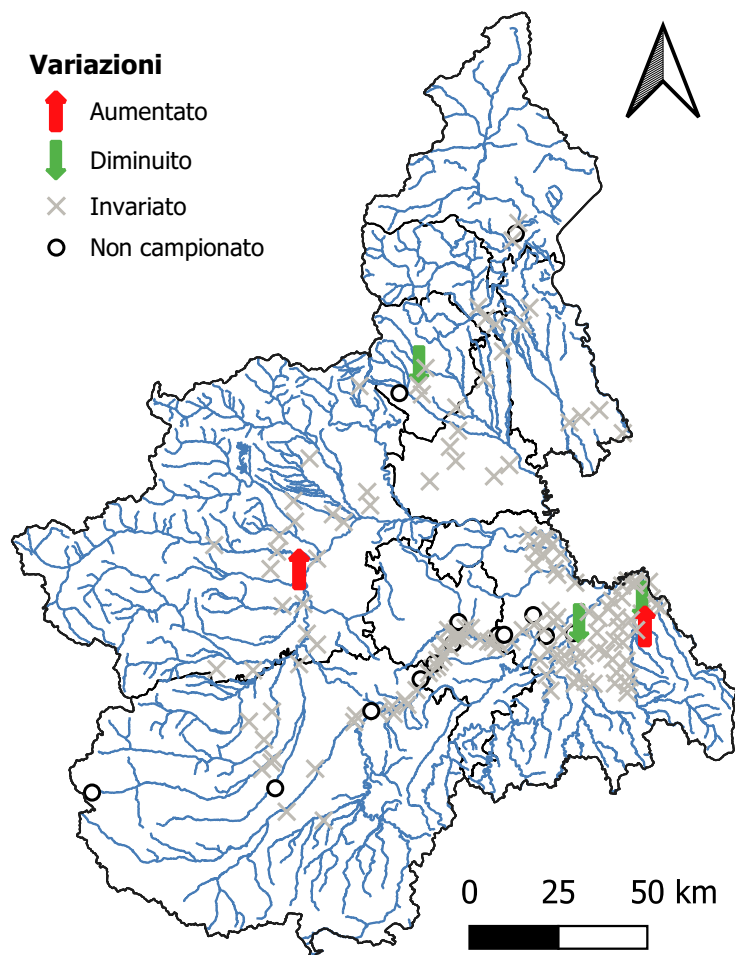


Appendice D – Variazioni delle concentrazioni di cloroformio ed entità degli aumenti (2014- 2023)

2014 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

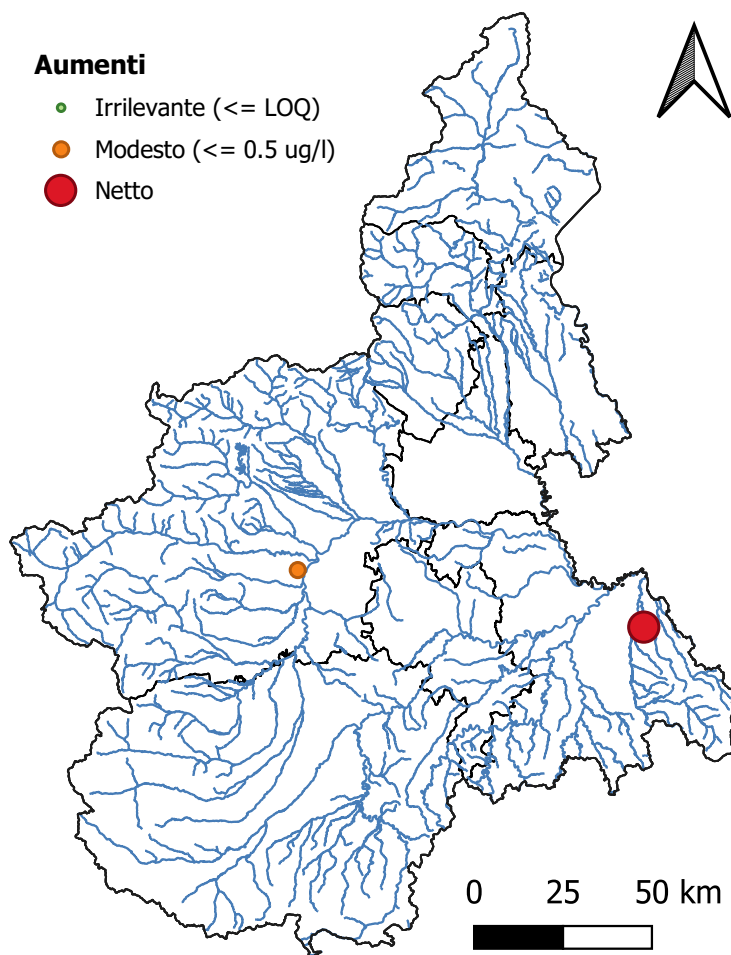
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2014 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

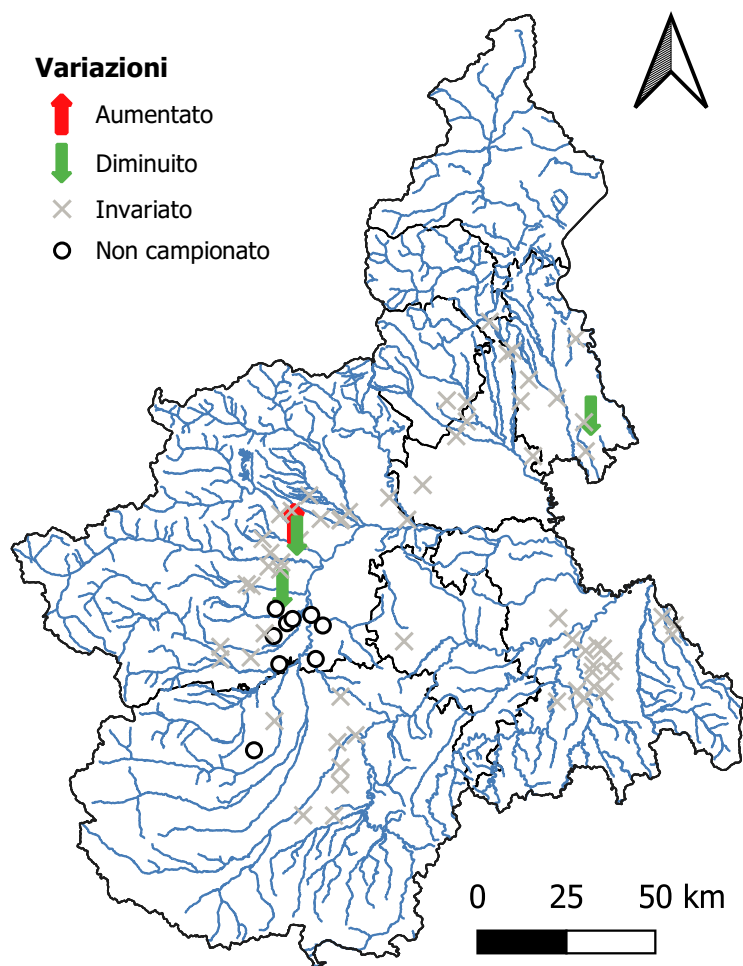
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2014 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

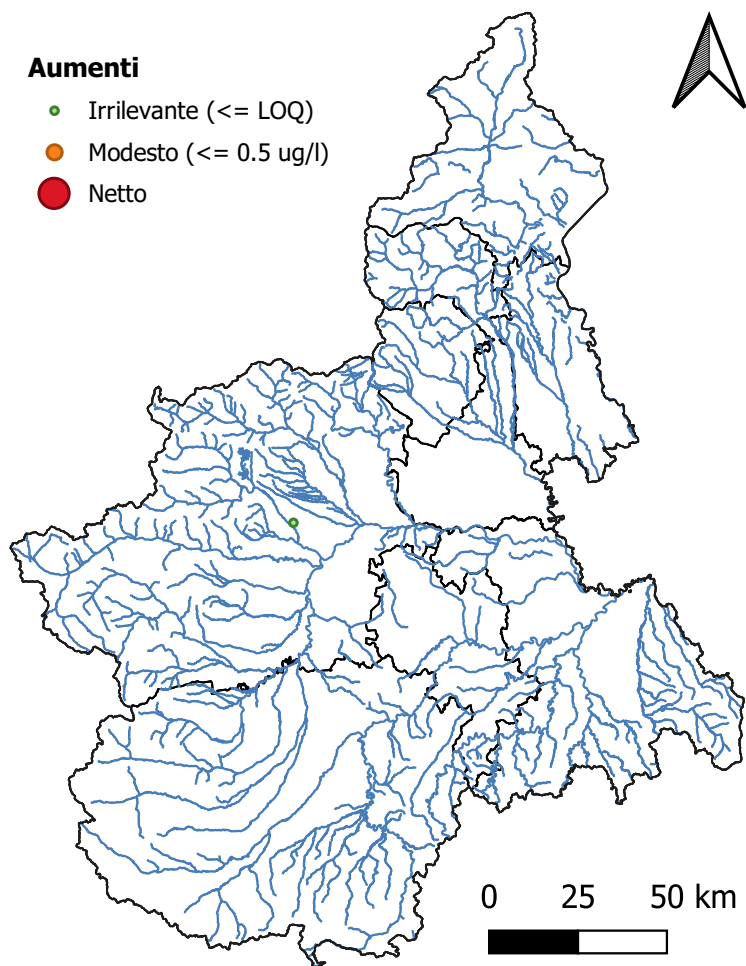
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2014 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

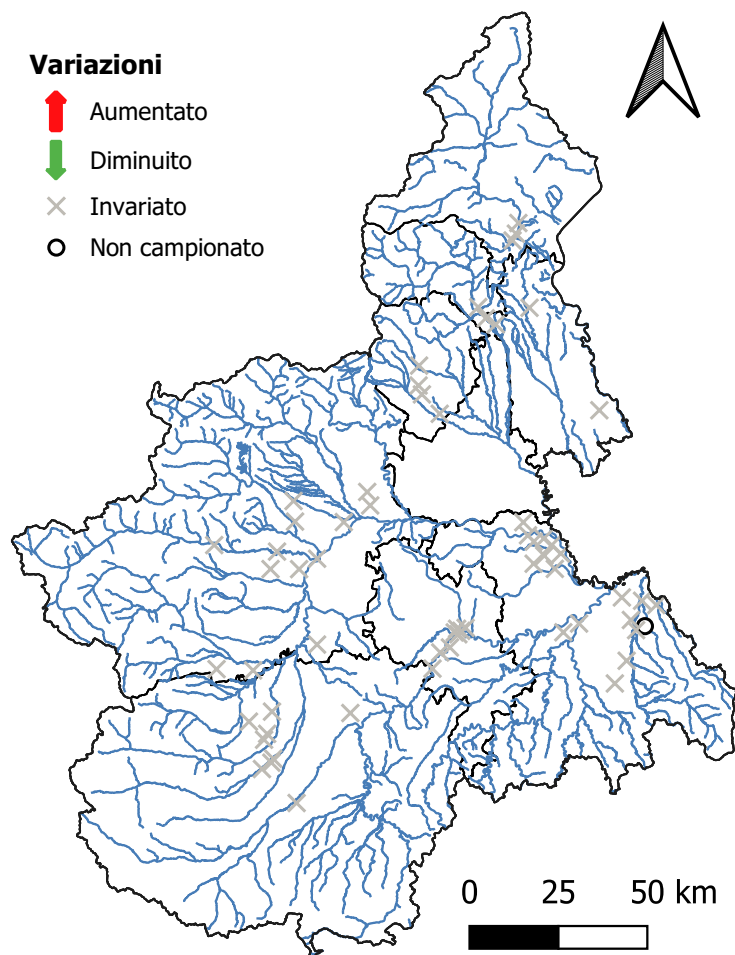
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2015 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

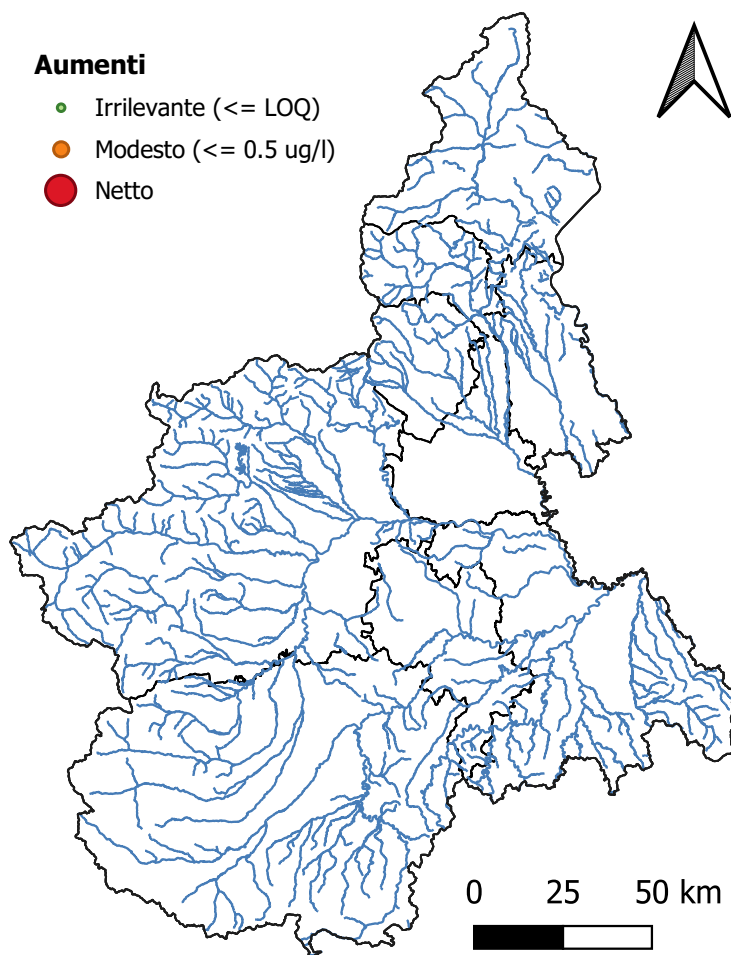
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2015 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

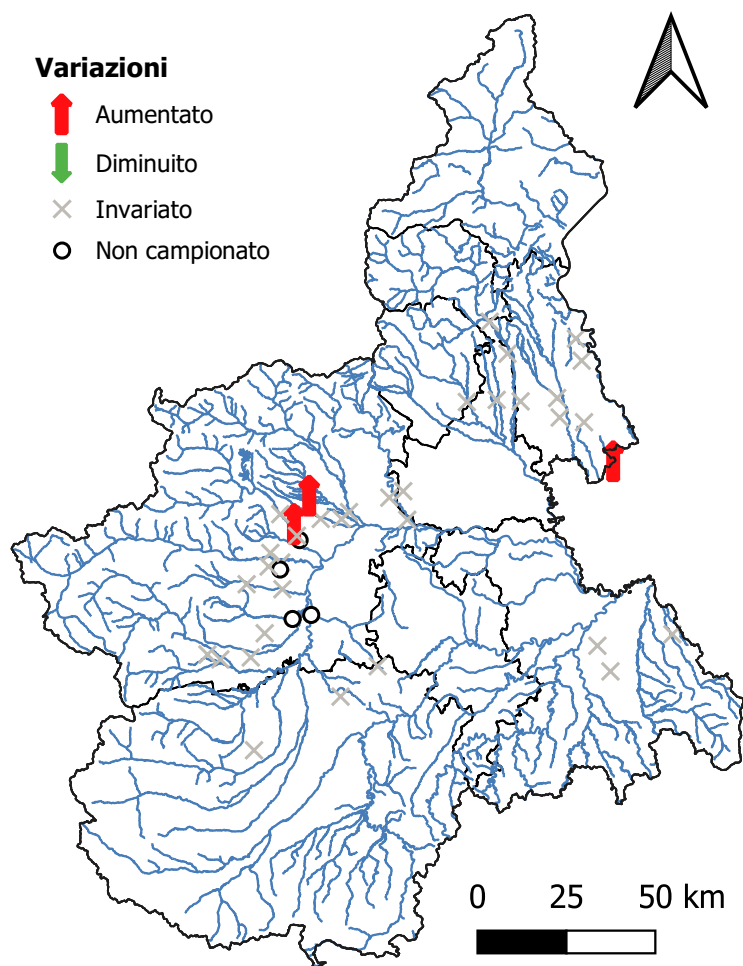
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2015 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

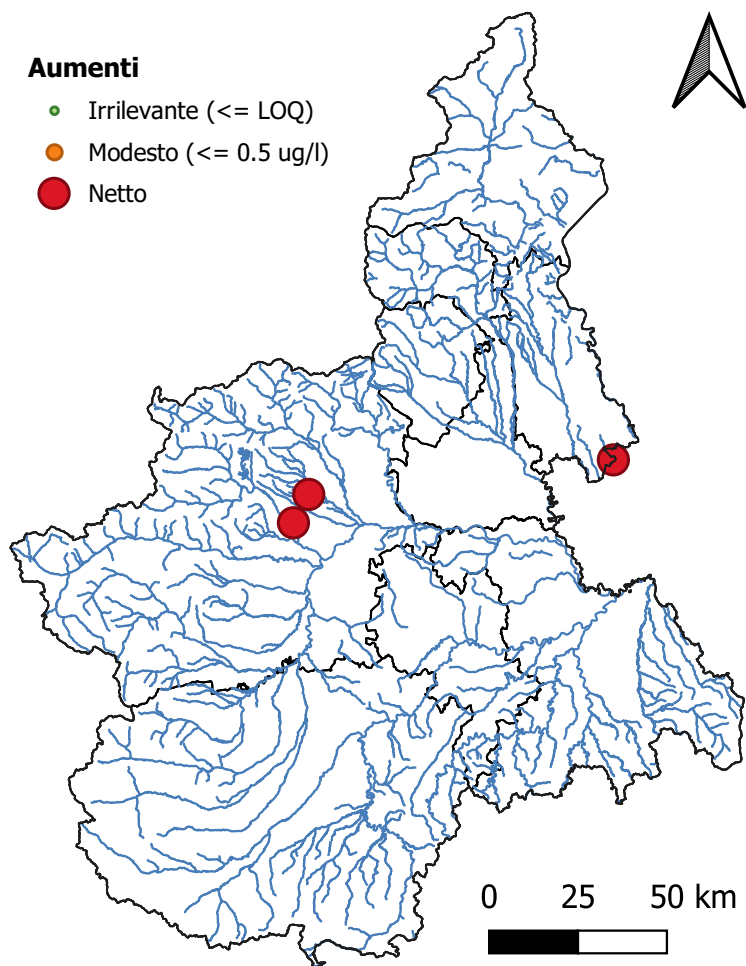
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2015 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

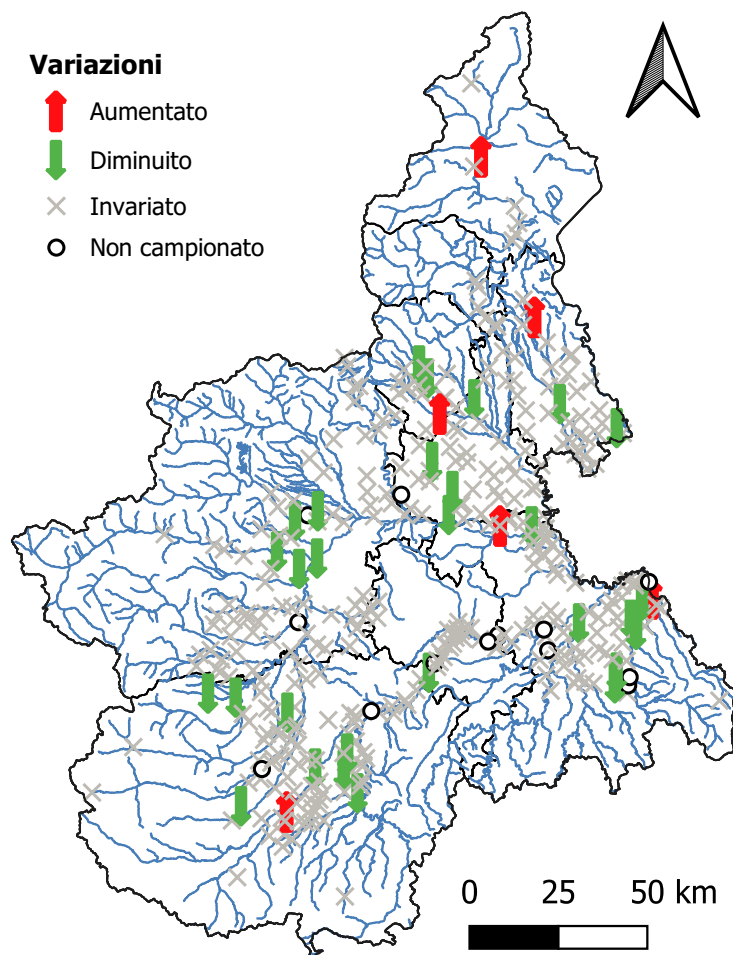
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2016 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

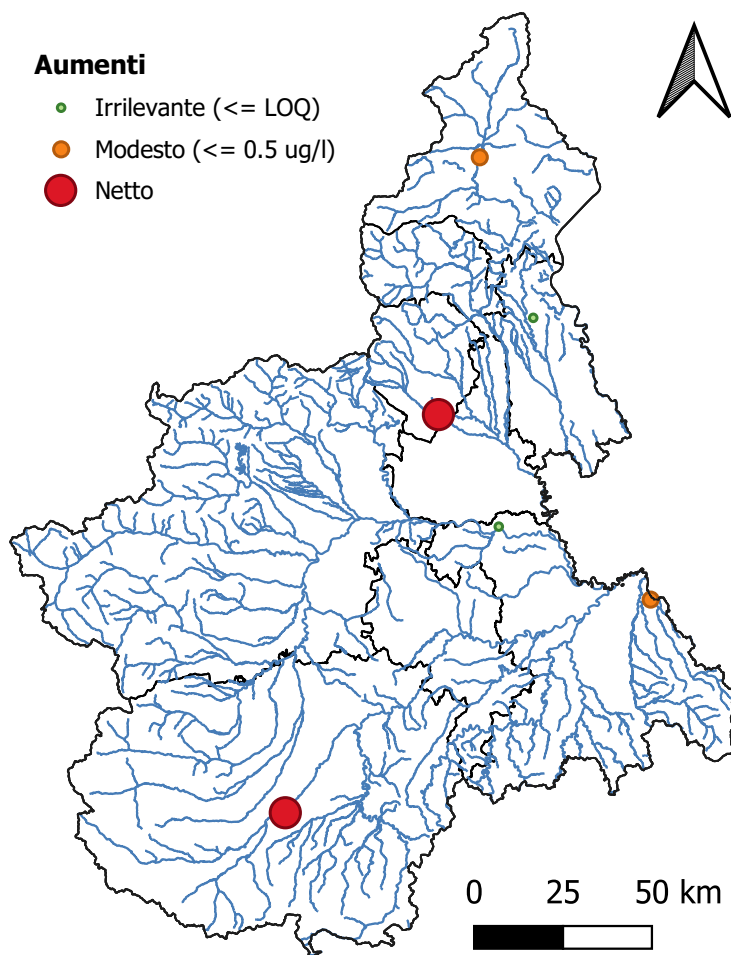
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2016 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

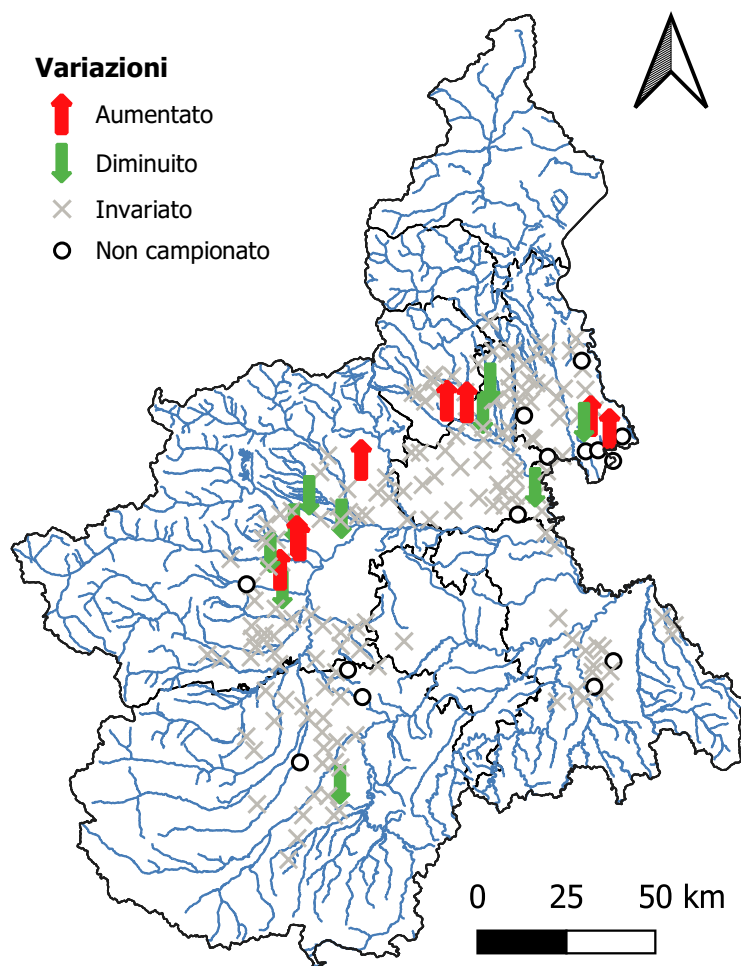
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2016 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

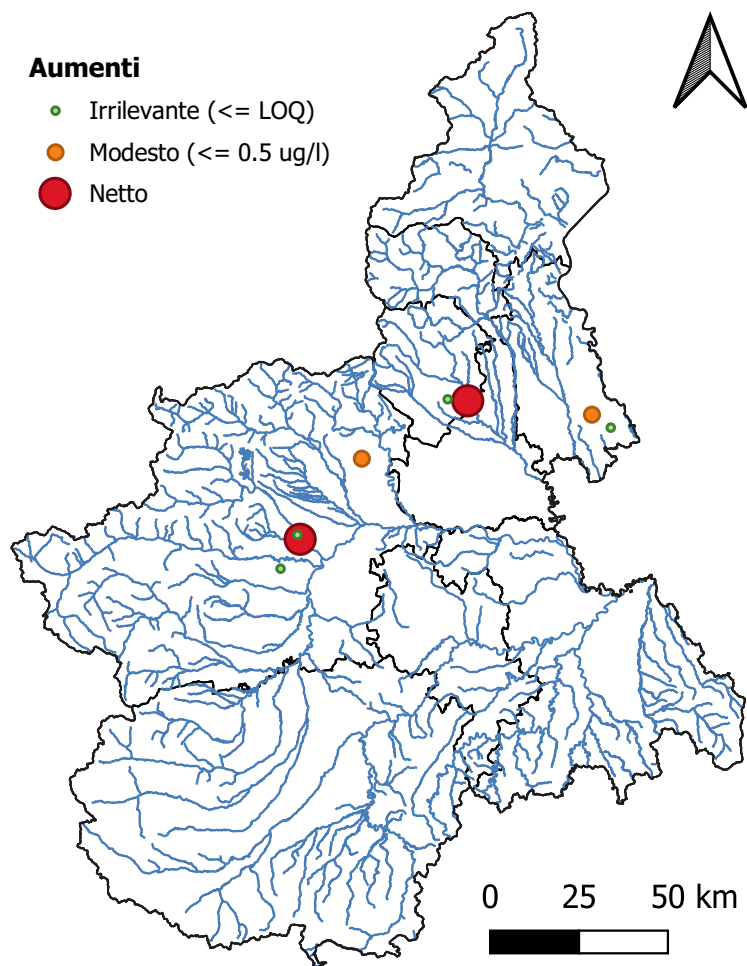
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2016 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

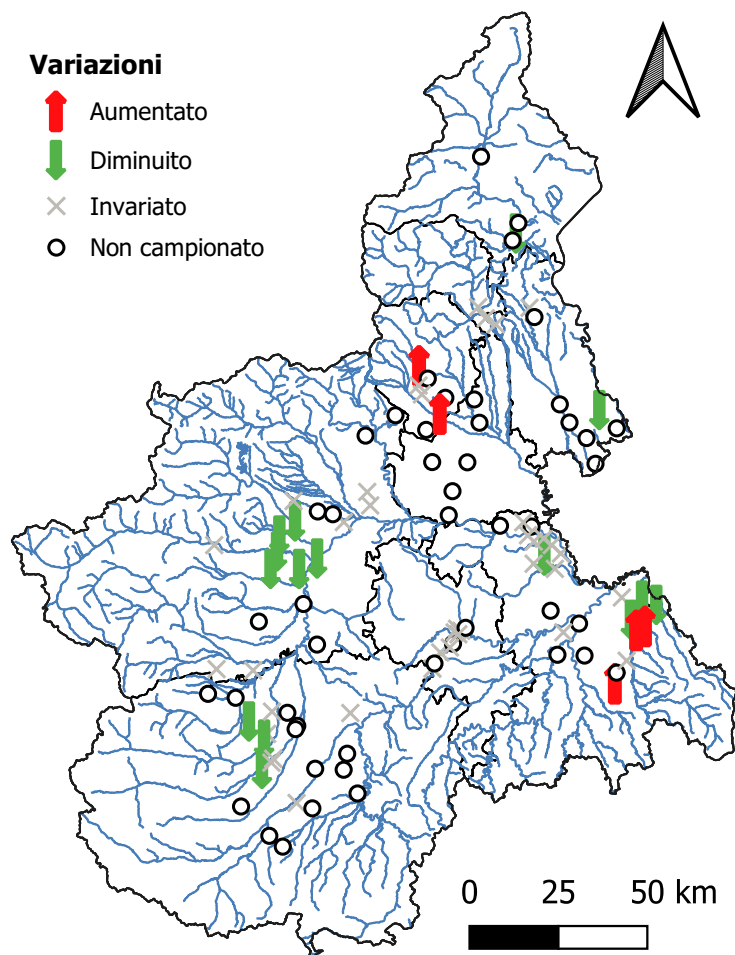
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2017 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

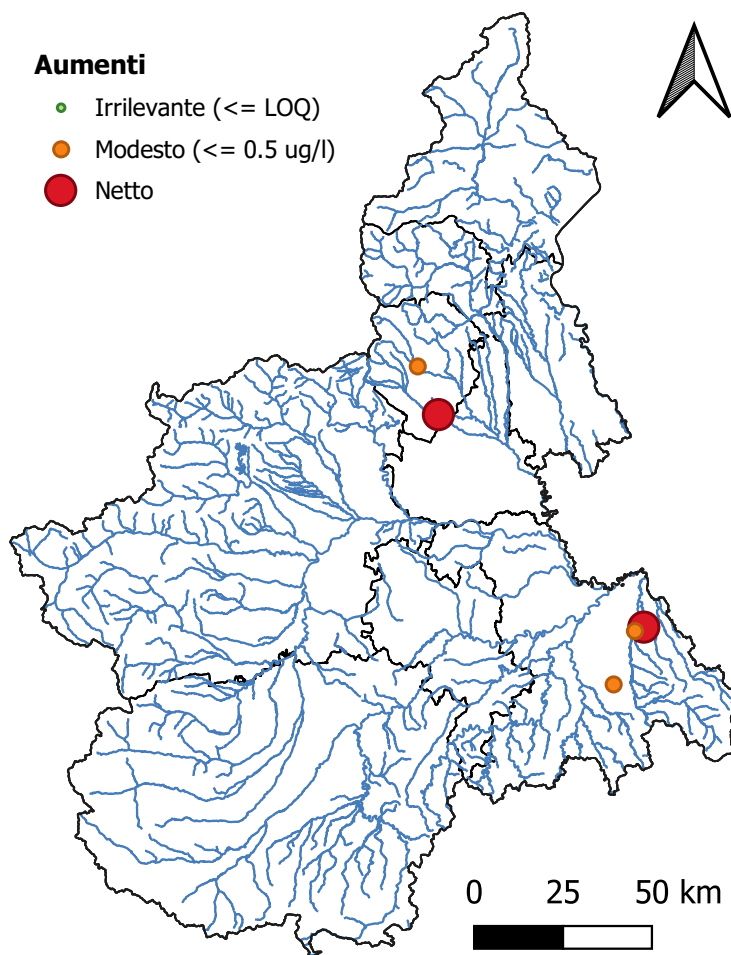
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2017 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

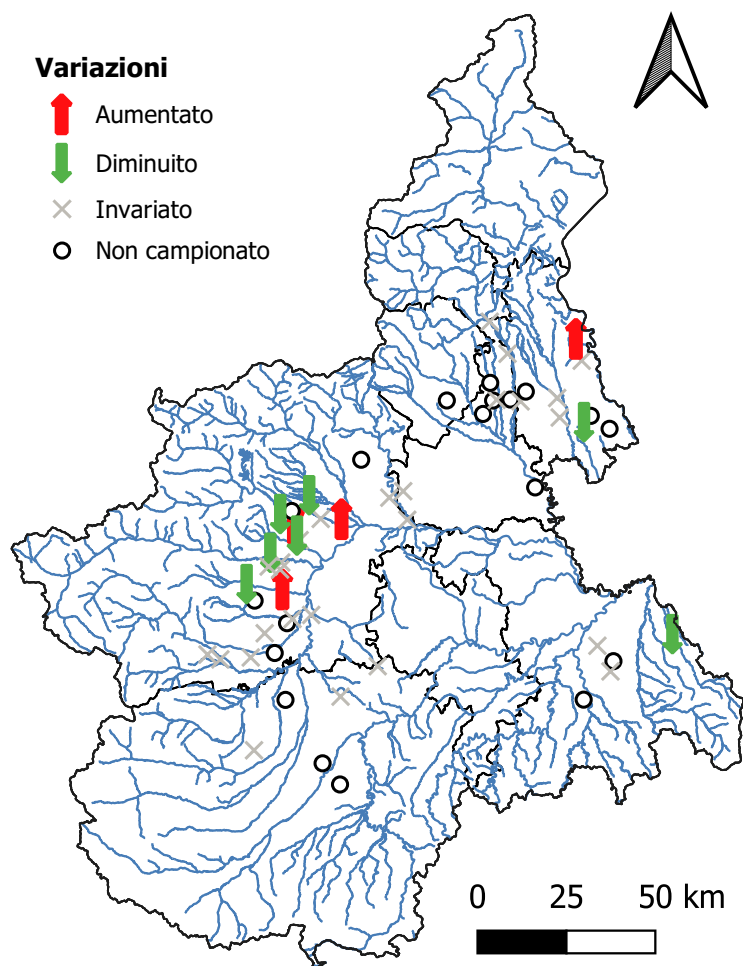
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2017 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

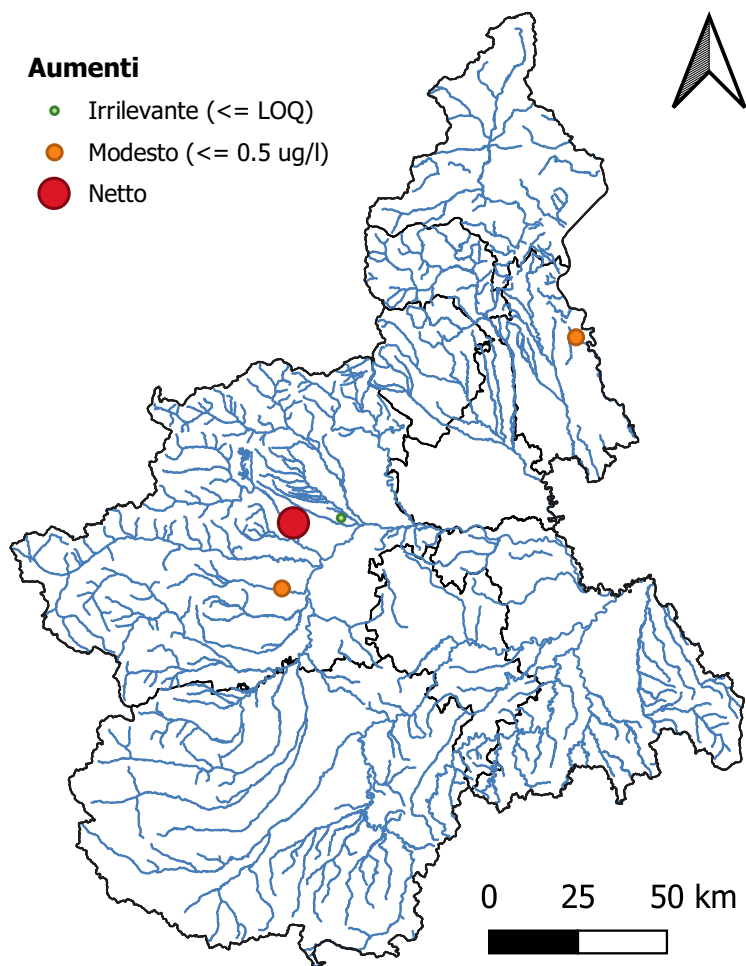
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2017 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

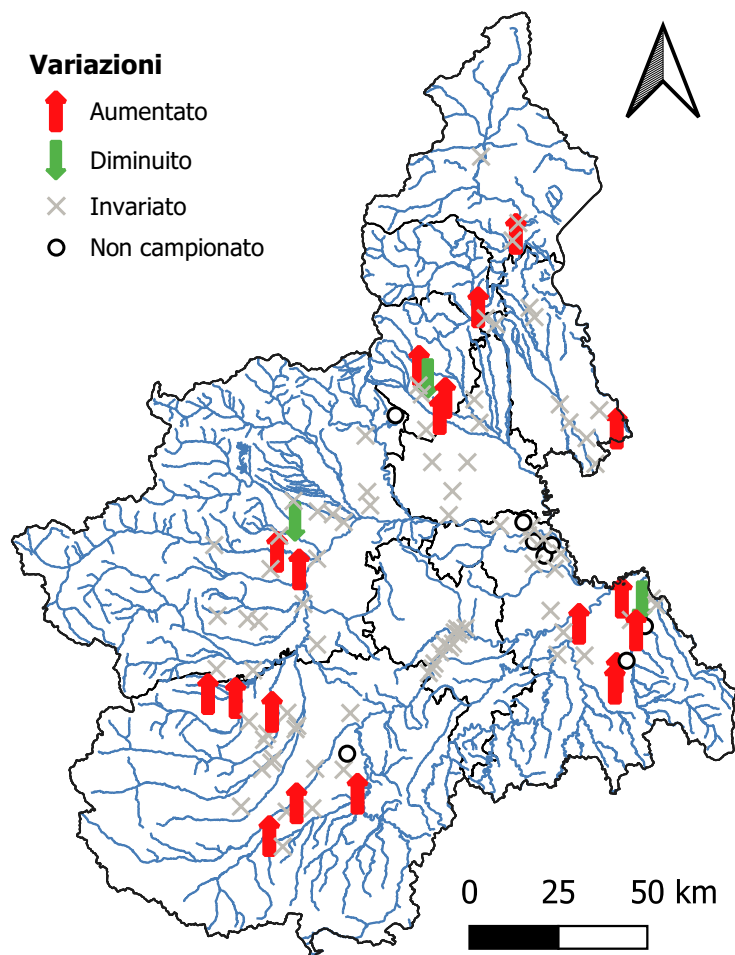
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2018 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

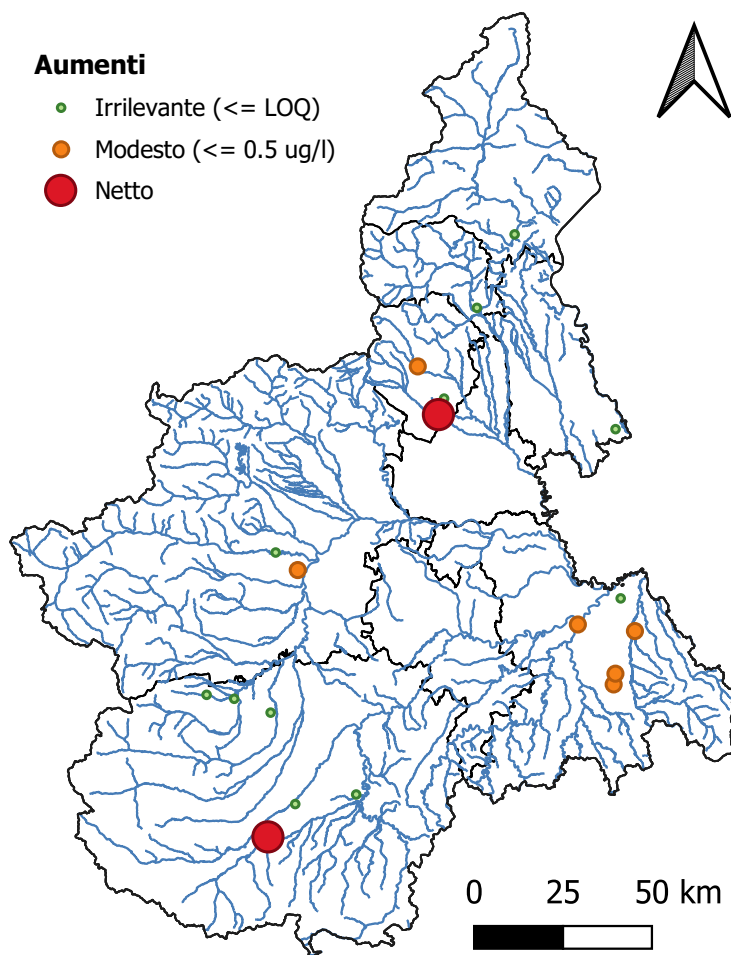
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2018 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

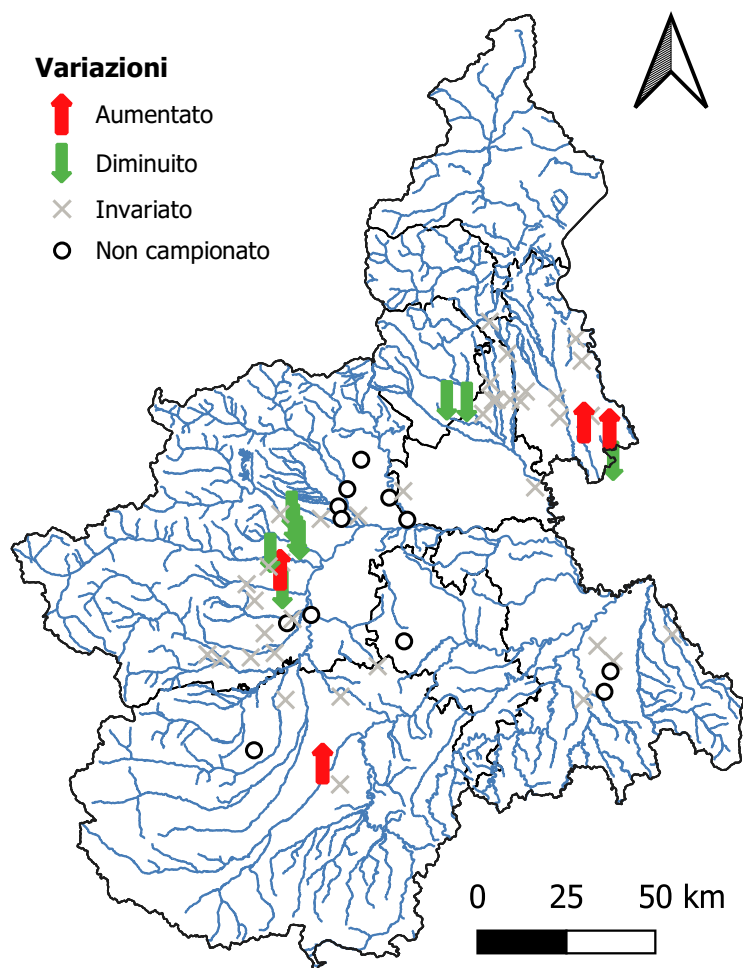
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2018 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

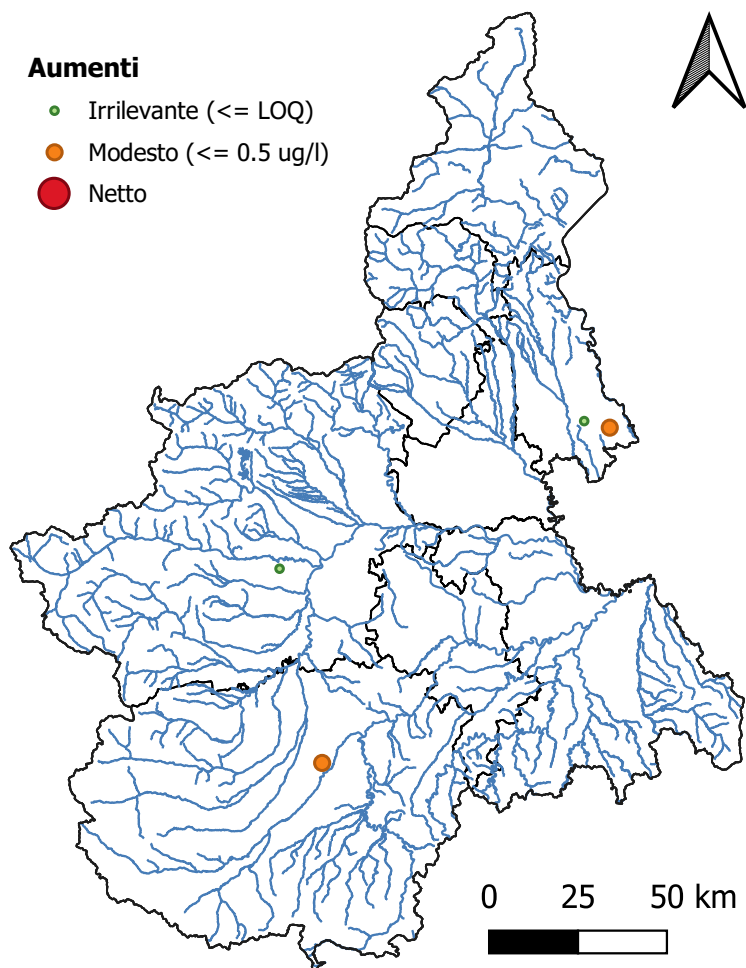
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2018 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

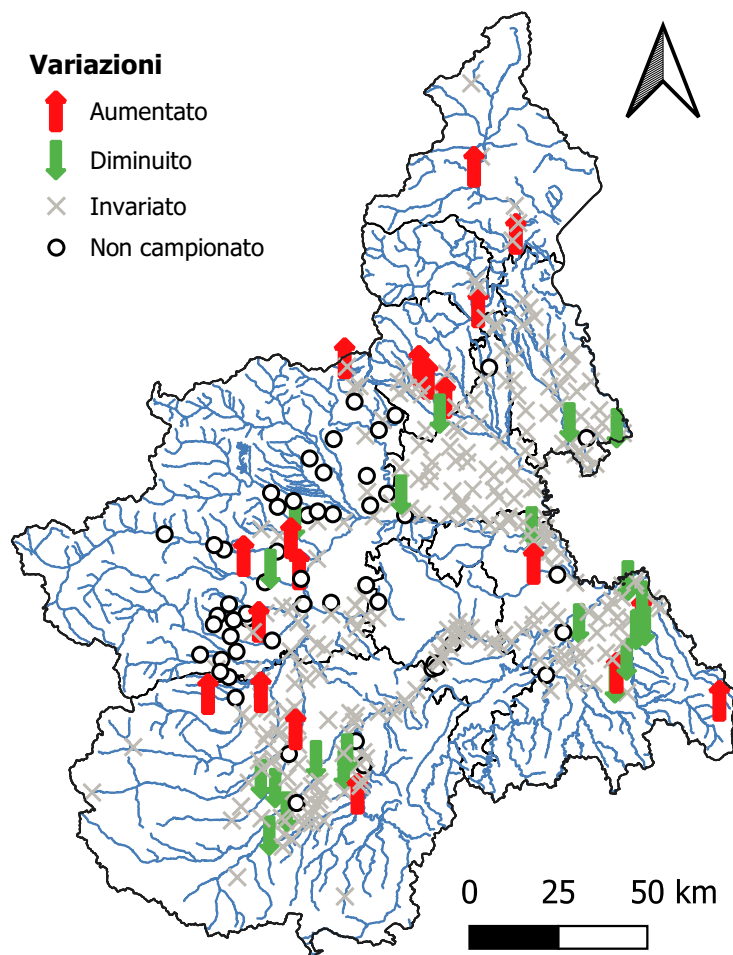
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2019 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

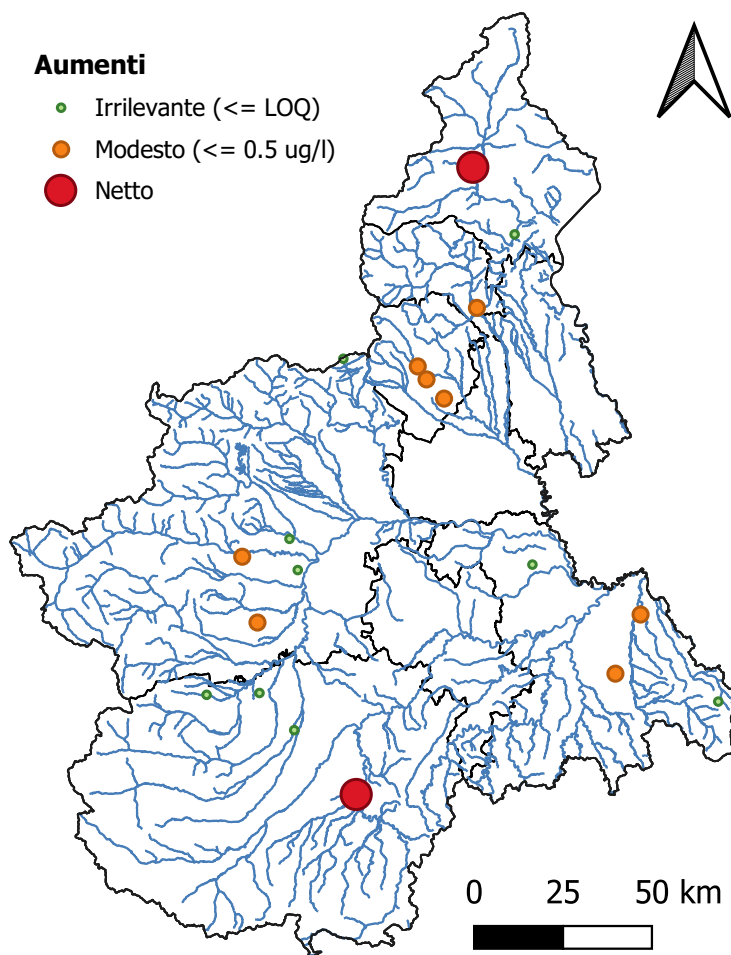
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2019 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

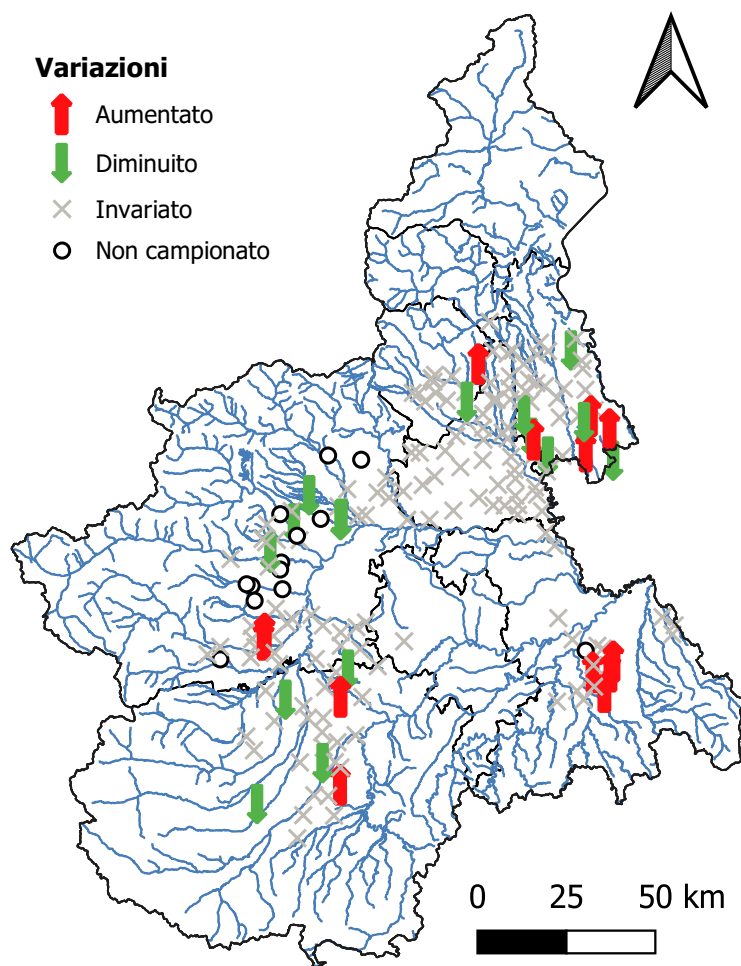
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2019 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

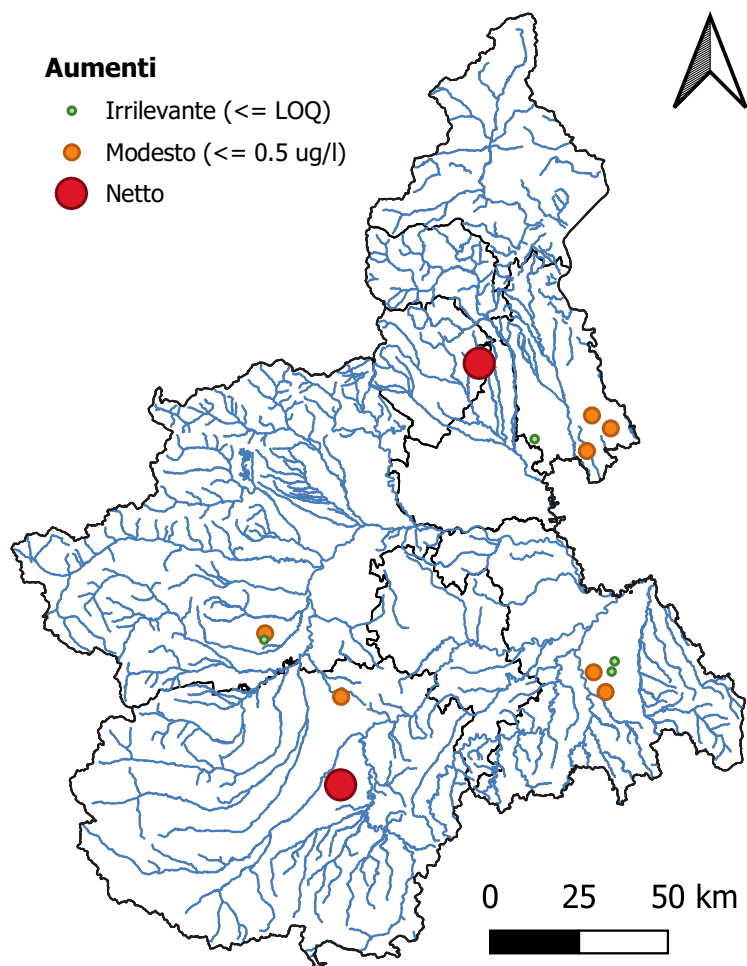
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2019 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

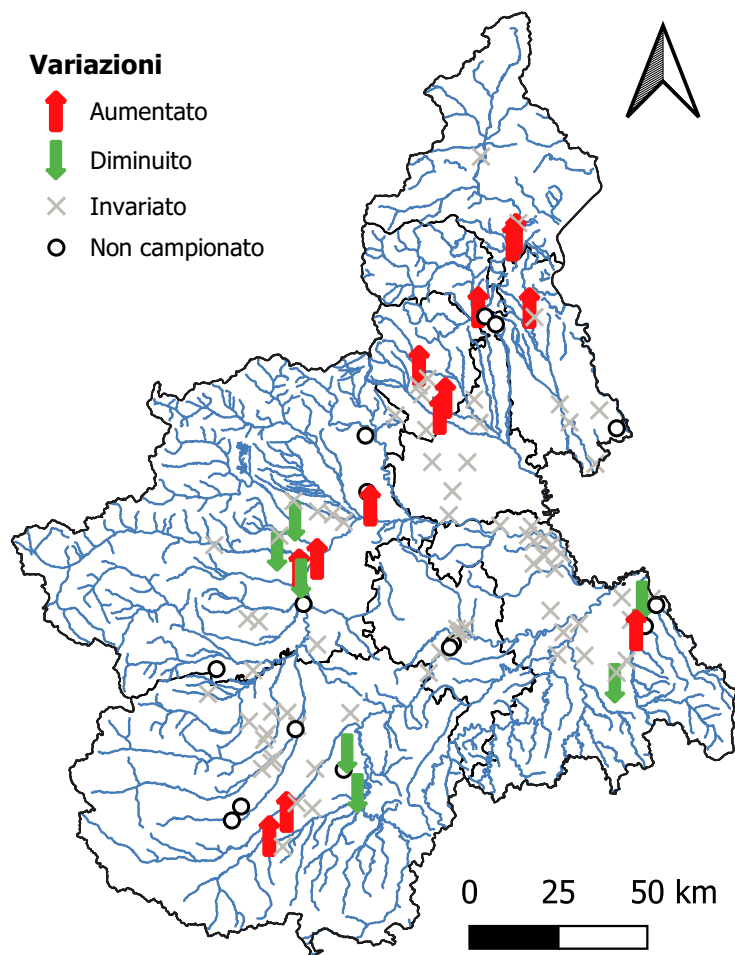
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2020 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

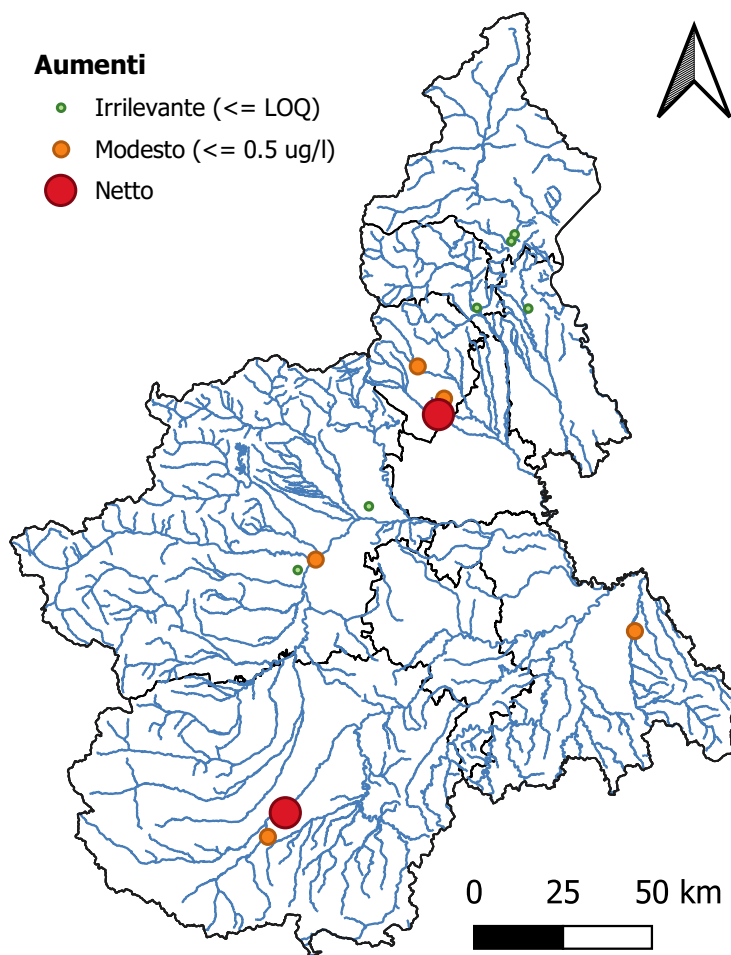
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2020 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

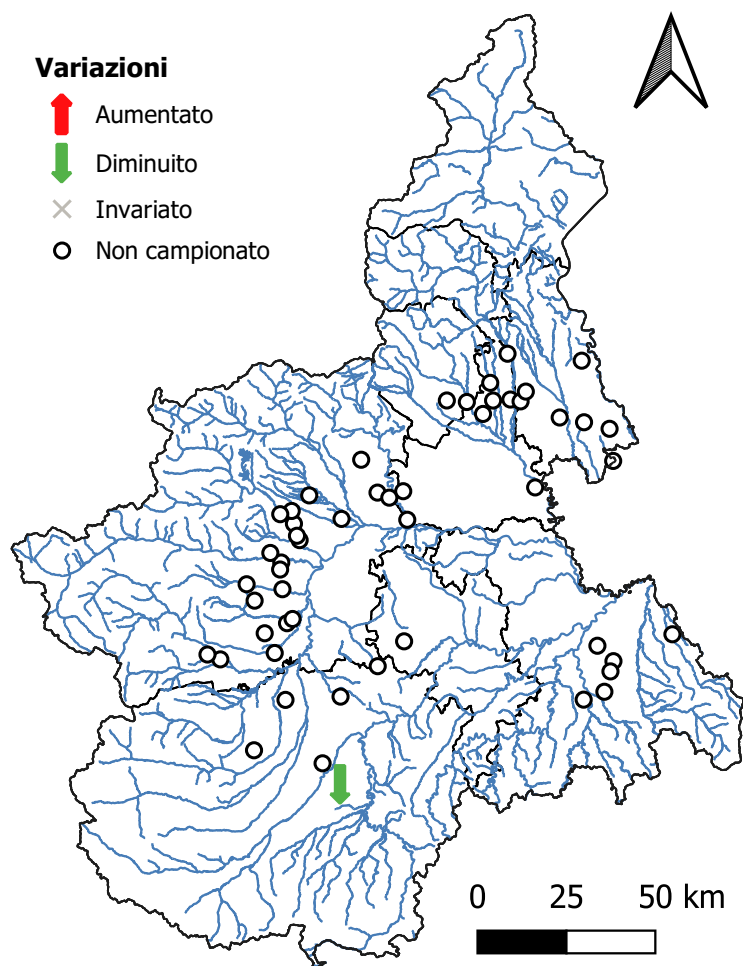
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2020 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

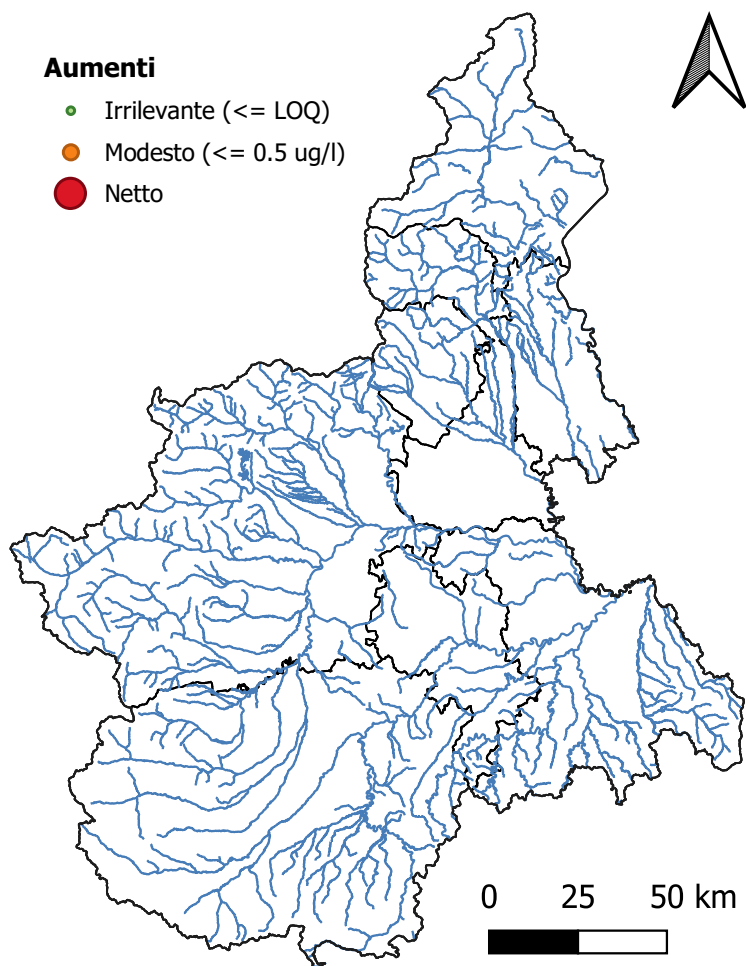
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2020 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

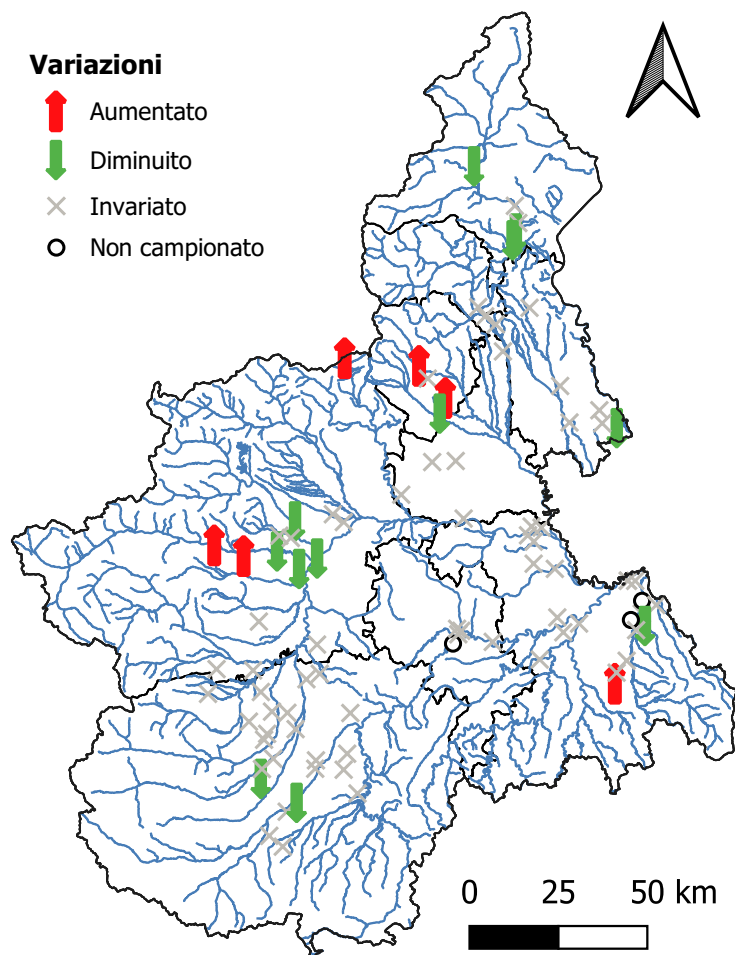
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2021 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

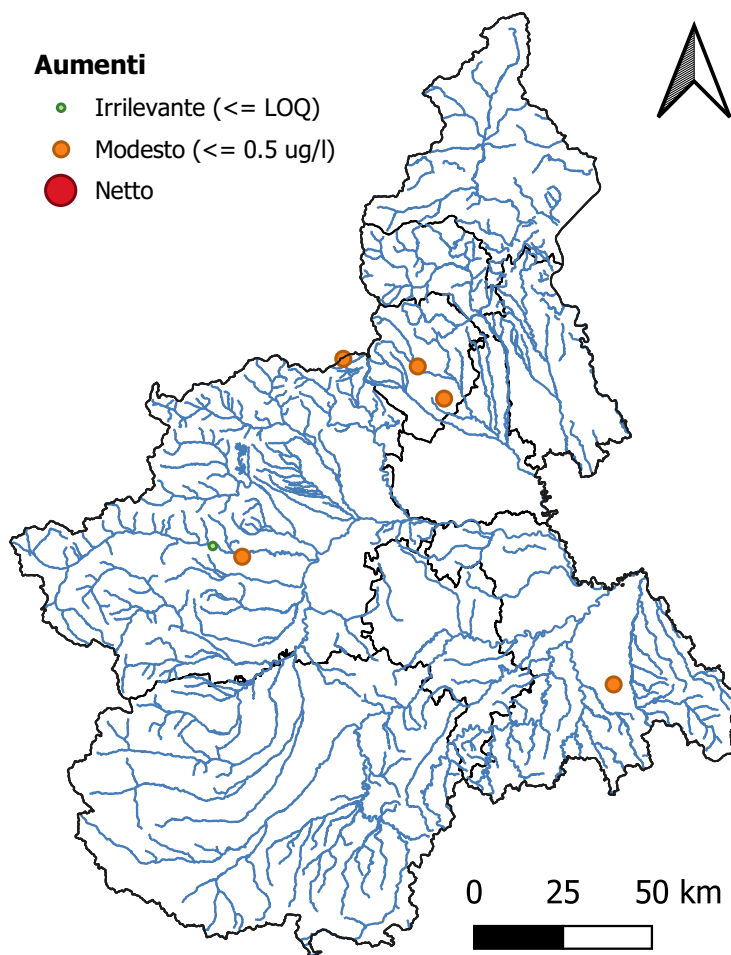
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2021 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

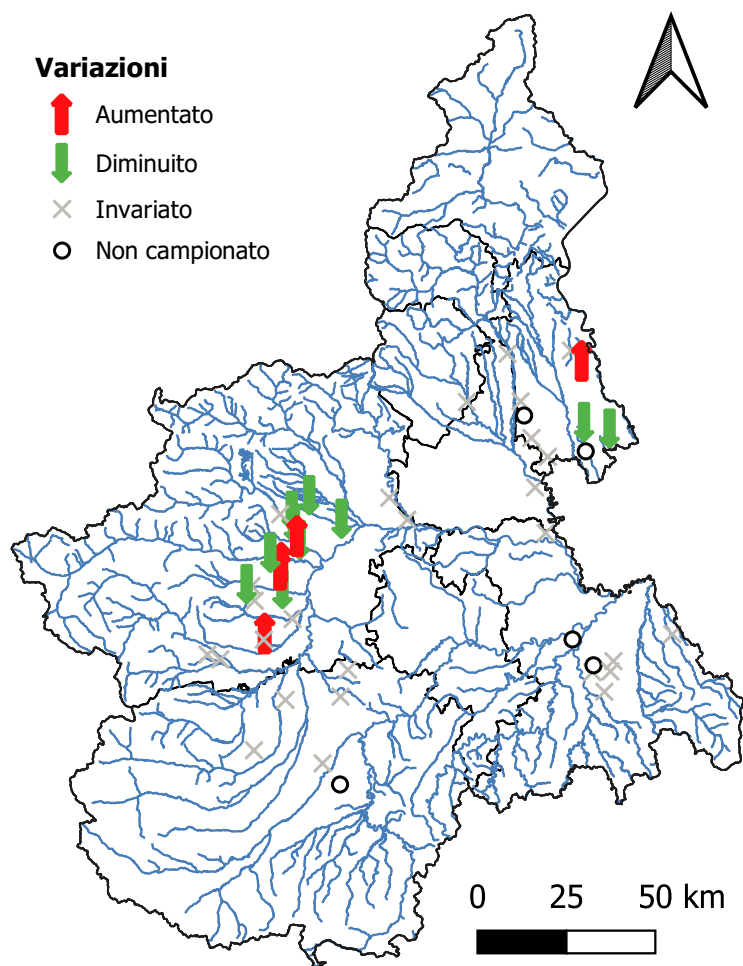
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2021 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

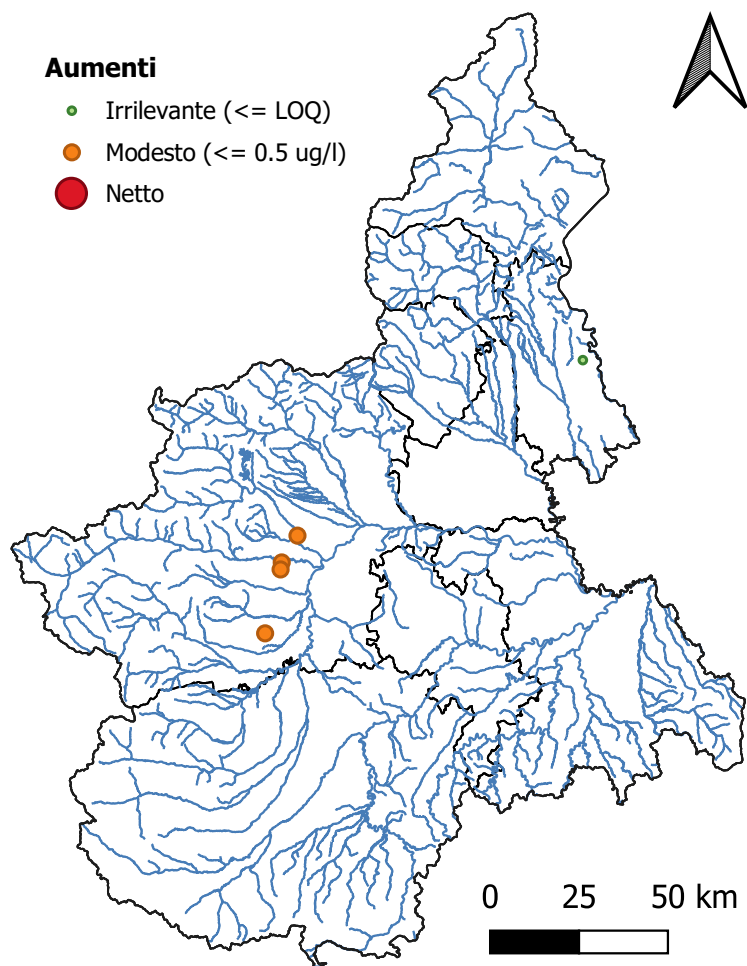
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2021 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

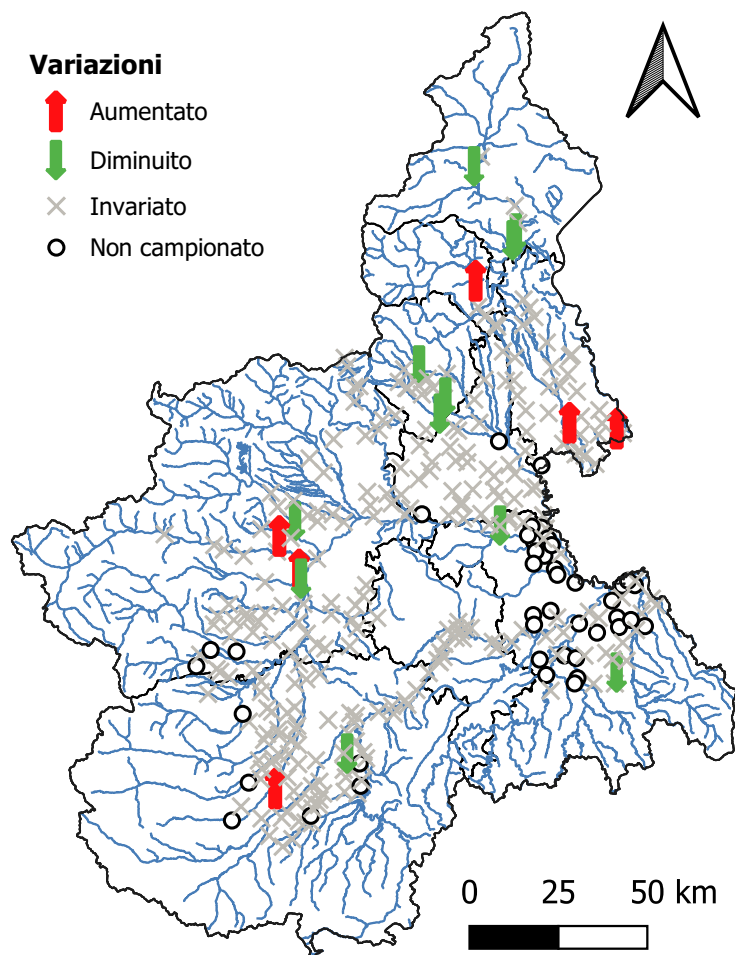
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2022 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

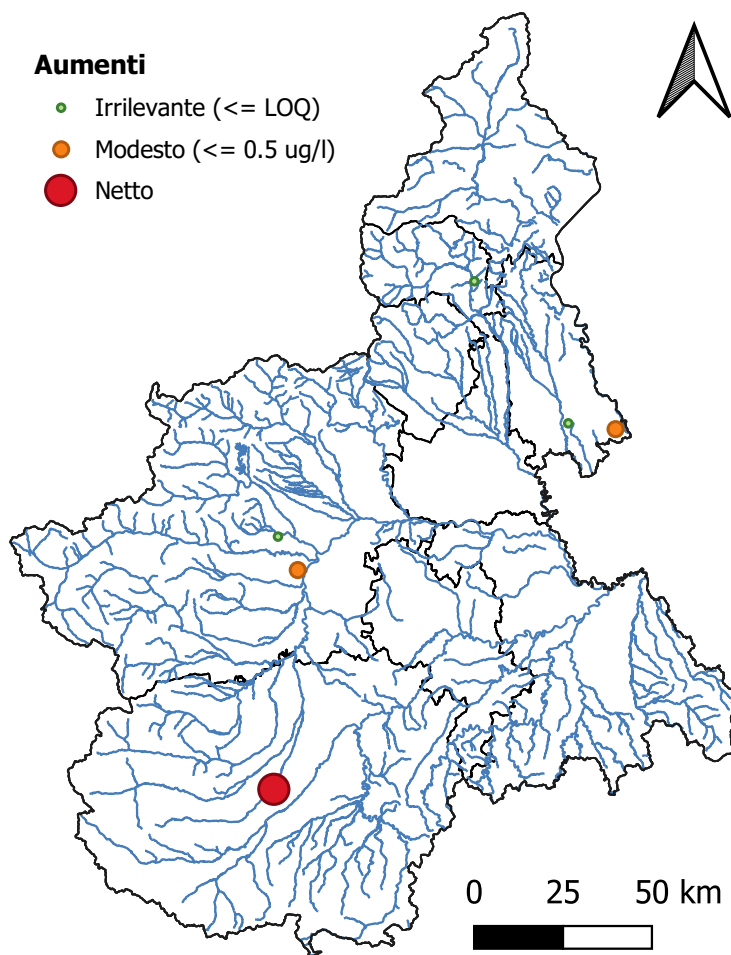
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2022 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

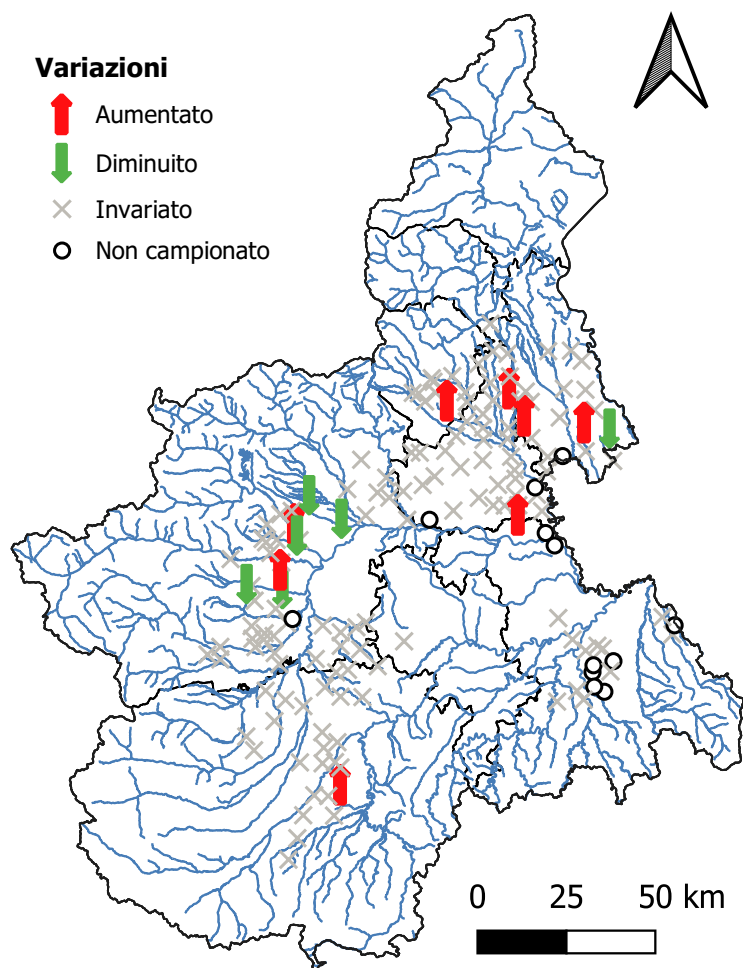
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2022 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

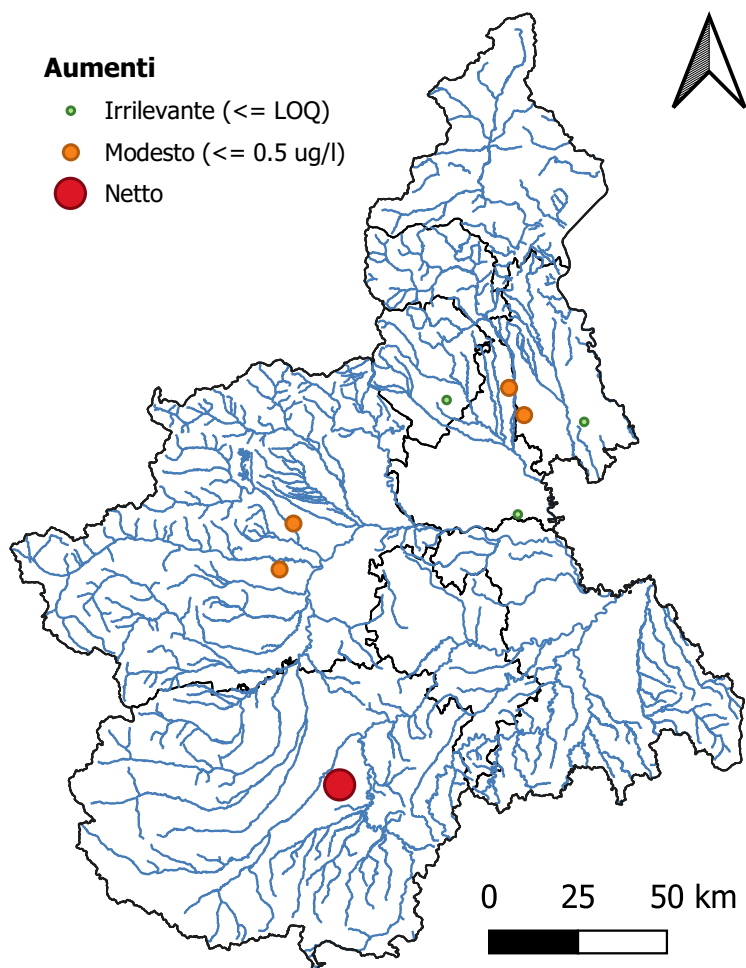
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2022 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

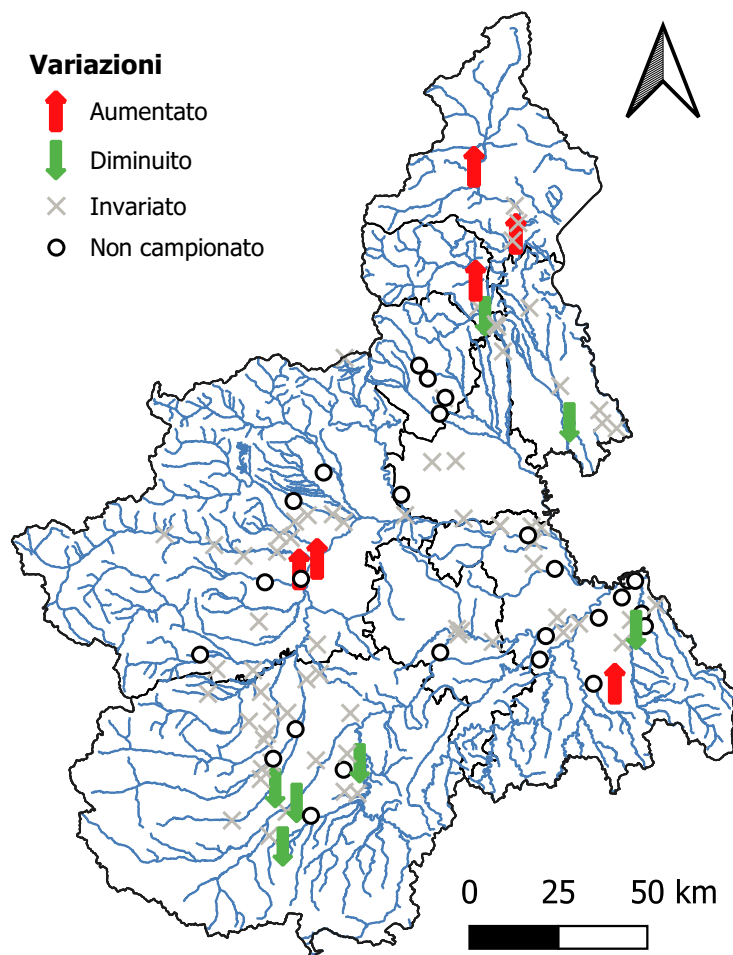
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2023 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero SUPERFICIALE

Variazioni

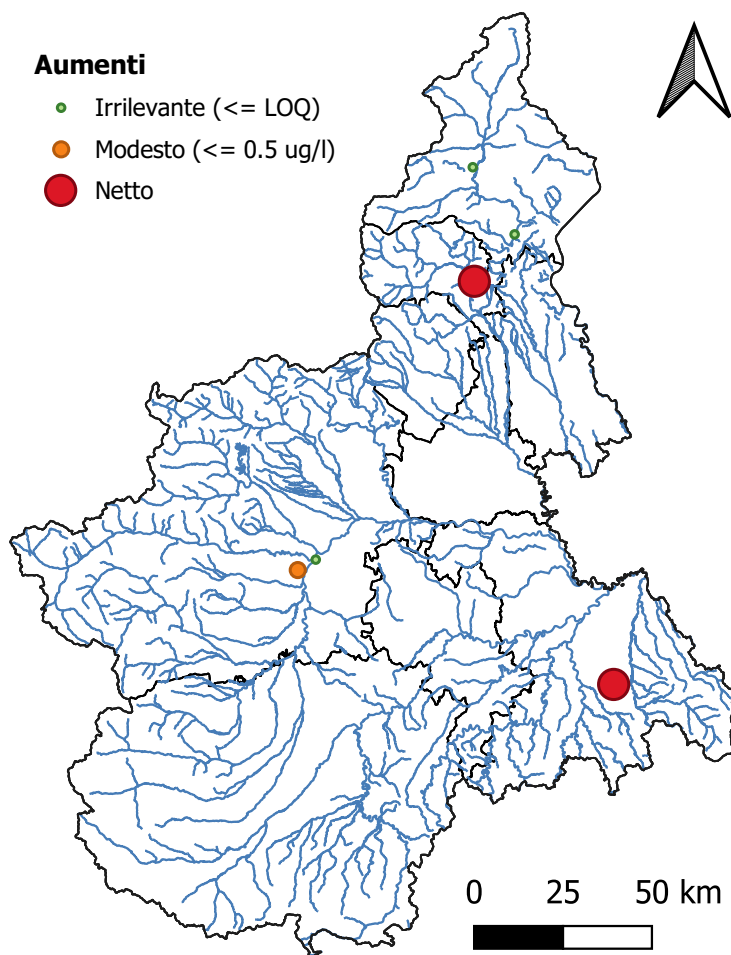
- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2023 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero SUPERFICIALE

Aumenti

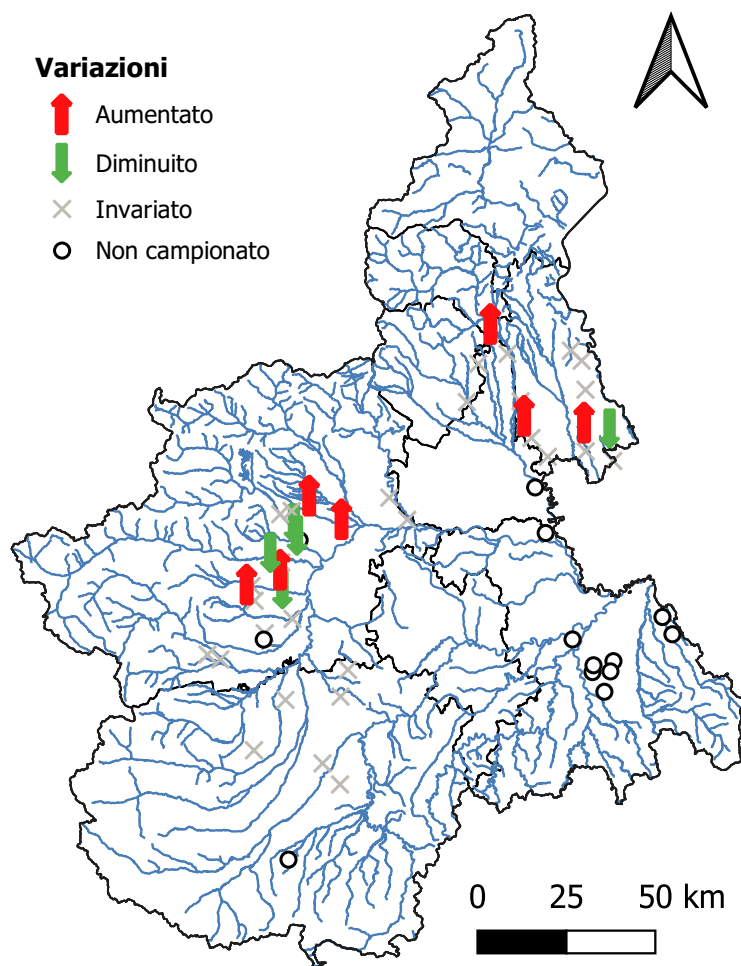
- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto



2023 - Variazioni delle concentrazioni di cloroformio rispetto al primo semestre - Acquifero PROFONDO

Variazioni

- ↑ Aumentato
- ↓ Diminuito
- × Invariato
- Non campionato



2023 - Entità dell'aumento delle concentrazioni di cloroformio - Acquifero PROFONDO

Aumenti

- Irrilevante ($\leq$ LOQ)
- Modesto (≤ 0.5 ug/l)
- Netto

