

Accordo di Collaborazione Scientifica tra

Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra

Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste

STUDIO SULLA PRESENZA DI NITRATI NELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA LOMBARDIA

TERZA CONSEGNA – RELAZIONE CONCLUSIVA

Agosto 2023

Responsabile UNIMIB del progetto:

Dott. Marco Rotiroti

Ulteriori partecipanti al team di lavoro UNIMIB:

Prof.ssa Tullia Bonomi

Dott.ssa Mariachiara Caschetto

Dott.ssa Chiara Zanotti

Dott.ssa Letizia Fumagalli

Dott. Simone Bruno

STUDIO SULLA PRESENZA DI NITRATI NELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA LOMBARDIA

INDICE

1	INTRODUZIONE	9
2	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO	11
3	WP1 - RACCOLTA INFORMAZIONI E DATI PREGRESSI.....	14
<u>3.1</u>	<u>Raccolta dei lavori scientifici e tecnico-scientifici pregressi.....</u>	<u>14</u>
<u>3.2</u>	<u>Acquisizione di dati presso enti regionali, di ricerca e gestori del servizio idrico</u>	<u>15</u>
3.2.1	Dati acquisiti da ARPA	15
3.2.2	Dati acquisiti da ANBI	17
3.2.3	Dati acquisiti da ERSAF	21
3.2.4	Dati acquisiti da UniPV.....	24
3.2.5	Dati acquisiti da Acque Bresciane S.r.l.	26
4	WP2 - ANALISI DELLE TENDENZE TEMPORALI DEI NITRATI IN FALDA... 27	
<u>4.1</u>	<u>Pre-trattamento ed esplorazione preliminare del dataset</u>	<u>27</u>
<u>4.2</u>	<u>Identificazione e gestione degli outliers</u>	<u>38</u>
<u>4.3</u>	<u>Trend analysis.....</u>	<u>45</u>
4.3.1	Pozzi con serie di 16 anni	46
4.3.2	Pozzi con serie di almeno 10 anni	51
<u>4.4</u>	<u>Confronto tra andamenti temporali ottenuti tramite trend analysis su lungo periodo e differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati (breve periodo)</u>	<u>54</u>
<u>4.5</u>	<u>Identificazione di inversioni di tendenza.....</u>	<u>57</u>
<u>4.6</u>	<u>Cluster analysis temporale</u>	<u>59</u>
4.6.1	Pozzi con serie di 16 anni	59

4.6.1.1	Il cluster con andamento in crescita: focus sui pozzi del cluster F	68
4.6.2	Pozzi con serie di almeno 10 anni	74
<u>4.7</u>	<u>Confronto tra andamenti temporali ottenuti tramite cluster analysis su lungo periodo e differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati (breve periodo)</u>	<u>81</u>
<u>4.8</u>	<u>Considerazioni generali sui risultati ottenuti nel WP2</u>	<u>84</u>
5	WP3 - PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE DI UN PIANO SPERIMENTALE DI CAMPIONAMENTO ED ANALISI	89
<u>5.1</u>	<u>Progettazione della rete di monitoraggio</u>	<u>89</u>
<u>5.2</u>	<u>Prima campagna di monitoraggio delle falde (marzo 2022)</u>	<u>95</u>
<u>5.3</u>	<u>Prima campagna di monitoraggio delle acque superficiali (giugno 2022)</u>	<u>101</u>
<u>5.4</u>	<u>Seconda campagna di monitoraggio delle falde e delle acque superficiali (settembre 2022)</u>	<u>103</u>
6	WP4 - SVILUPPO DEL MODELLO CONCETTUALE FINALE	110
<u>6.1</u>	<u>Realizzazione di sezioni idrogeologiche lungo i transetti monitorati</u>	<u>110</u>
<u>6.2</u>	<u>Tracciamento delle voci principali di ricarica</u>	<u>111</u>
6.2.1	Tracciamento dell'origine dell'acqua sotterranea	112
6.2.2	Tracciamento della salinità della falda	122
6.2.3	Tracciamento della ricarica della falda	136
<u>6.3</u>	<u>Determinazione dell'età della falda</u>	<u>143</u>
6.3.1	Il calcolo dell'età apparente	144
6.3.2	Descrizione dei risultati delle età stimate	152
6.3.3	Valutazione dei processi di mixing	176
<u>6.4</u>	<u>Relazioni tra età, ricarica e concentrazioni di nitrato in falda</u>	<u>185</u>

6.5	<u>Elaborazione dei dati pluviometrici ed irrigui</u>	<u>191</u>
6.5.1	Dati pluviometrici	191
6.5.2	Dati irrigui	201
6.6	<u>Relazioni tra andamenti temporali di nitrato e età della falda, voci di ricarica e carichi azotati agricoli</u>	<u>207</u>
7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	226
8	BIBLIOGRAFIA.....	235

ALLEGATI

- I Analisi delle tendenze temporali dei nitrati**
- II Outliers da range interquartile**
- III Sezioni idrogeologiche**

I. Lista delle Figure

Figura 1.1 Diagramma di Gantt del progetto-----	10
Figura 2.1 Mappa degli spessori dell'idrostruttura superficiale (ISS) e del livello piezometrico (Regione Lombardia, 2017)-----	13
Figura 3.1 Localizzazione dei pozzi della rete ARPA rappresentati in funzione del monitoraggio quantitativo, qualitativo e quali-quantitativo -----	16
Figura 3.2 Rappresentazione degli strati informativi territoriali creati da ANBI Lombardia ed estratti dalla banca dati CeDATer -----	18
Figura 3.3 Localizzazione dei punti di monitoraggio delle portate erogate a scopo irriguo-----	19
Figura 3.4 Distribuzione delle stazioni meteorologiche sul territorio lombardo per la misura di dati di temperatura e precipitazione -----	22
Figura 3.5 Ubicazione dei pozzi della rete di monitoraggio del progetto Integron, Università di Pavia	24
Figura 4.1 Distribuzione spaziale dei 115 pozzi con serie di concentrazione di nitrato lunga 16 anni, suddivisi per facies idrochimica -----	34
Figura 4.2 Ubicazione dei 48 punti aggiuntivi con serie di concentrazione di nitrato di almeno 10 anni e dei 115 punti con serie di 16 anni -----	36
Figura 4.3 Esempi di andamento temporale delle concentrazioni dei nitrati in funzione dei periodi di acquisizione di ARPA (andamento temporale del dato "tal quale") -----	38
Figura 4.4 Andamento del dato temporale di nitrato "tal quale" per il pozzo PO0200280R0056. Con le crocette rosse sono indicati i veri outliers, eliminati dal dataset-----	42
Figura 4.5 Valutazione delle anomalie nell'andamento di concentrazione riscontrate nel pozzo PO0170600UC013 -----	43
Figura 4.6 Rappresentazione unificata delle serie storiche di nitrato per le due colonne del pozzo registrate da Acque Bresciane e la serie temporale archiviata da ARPA e frutto di un campionamento indifferenziato delle due colonne -----	44
Figura 4.7 Serie storica della concentrazione di nitrato considerata per le fasi successive del presente lavoro in riferimento al pozzo PO0170600UC013 -----	44
Figura 4.8 Esempi di rappresentazione grafica delle tendenze temporali di nitrati in 2 pozzi selezionati; linea rossa = linea di tendenza significativa (secondo il test di Mann-Kendall) con pendenza ed intercetta calcolati tramite Sen's slope estimator; linee nere tratteggiate = medie dei valori annuali sui quadrienni 2008-2011, 2012-2015 e 2016-2019 -----	46
Figura 4.9 Mappa dei trend di concentrazione dei nitrati in falda per i 114 pozzi con serie di 16 anni	50

Figura 4.10 Mappa dei trend di concentrazione dei nitrati in falda per i 49 pozzi con serie di almeno 10 anni -----	53
Figura 4.11 Mappa delle tendenze dei nitrati in falda per i 114 pozzi con serie di 16 anni tramite il calcolo del delta tra le medie degli ultimi due quadrienni (2012-2015 e 2016-2019) -----	56
Figura 4.12 Schema di confronto tra le tendenze di nitrato tramite il test di Mann- Kendall e il delta calcolato sui due quadrienni più recenti per i 114 pozzi della serie dei 16 anni-----	57
Figura 4.13 Rappresentazione dei cluster come andamento su scala temporale della concentrazione del nitrato a media sottratta -----	60
Figura 4.14 Caratterizzazione dei sei cluster più popolosi con l'attribuzione di un andamento tipico (stazionarietà, crescita, decrescita o inversione di tendenza) -----	64
Figura 4.15(a) Spazializzazione dei risultati della cluster analysis temporale elaborata su 67 pozzi. (b) Box-plot delle latitudini dei pozzi facenti parte a ciascun cluster-----	66
Figura 4.16 Andamento delle concentrazioni tal quali di nitrato (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti; la colorazione è funzione dell'ubicazione (provincia) 67	
Figura 4.17 Serie temporali di concentrazione di nitrato "tal quale" dei sei pozzi che compongono il cluster F-----	71
Figura 4.18 Ubicazione dei sei pozzi che compongono il cluster F, con indicazione della relativa concentrazione media annuale di nitrato in soluzione-----	72
Figura 4.19 Rappresentazione dei cluster come andamento su scala temporale della concentrazione del nitrato a media sottratta -----	76
Figura 4.20(a) Spazializzazione dei risultati della cluster analysis temporale elaborata su 44 pozzi. (b) Box-plot delle latitudini dei pozzi facenti parte a ciascun cluster-----	80
Figura 4.21 Andamento delle concentrazioni tal quali di nitrato (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti; la colorazione è funzione dell'ubicazione (provincia) 81	
Figura 4.22 Confronto tra gli andamenti caratterizzanti i cluster ottenuti dall'analisi sui 16 anni e gli andamenti di nitrato in base alla differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati; in grigio sono evidenziati i due quadrienni adiacenti considerati -----	83
Figura 4.23 Schema riepilogativo rispetto alla valutazione comparativa tra i risultati della cluster analysis e il delta tra le medie di quadrienni adiacenti ai sensi della Direttiva Nitrati per i 67 pozzi della serie dei 16 anni -----	84
Figura 4.24 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni; in arancio sono indicate le ZVN -----	86

Figura 4.25 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni con l'aggiunta degli andamenti caratteristici dei cluster 2, 3 e 4, ottenuti dall'analisi sulle serie di almeno 10 anni, considerabili come sovrapponibili ai cluster ottenuti dall'analisi sui 16 anni; in arancio sono indicate le ZVN -----	87
Figura 4.26 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni e da quella sui 10 anni; in arancio sono indicate le ZVN -----	88
Figura 5.1 Mappa relativa alla localizzazione dei 65 pozzi della rete di monitoraggio-----	94
Figura 5.2 Ubicazione dei punti del monitoraggio sperimentale e dei punti di monitoraggio delle fonti di acqua irrigua; per le corrispondenze delle etichette dei corpi idrici superficiali, fare riferimento alla Tabella 5.4 -----	102
Figura 5.3 Mappa relativa alla localizzazione dei 64 pozzi della rete di monitoraggio, con etichette sui pozzi e punti di acque superficiali che sono stati campionati per la seconda campagna di monitoraggio di settembre 2022 -----	104
Figura 6.1 Legenda delle sezioni stratigrafiche (riportate in Allegato III) -----	111
Figura 6.2 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i 75 campioni considerati. Per l'ubicazione dei punti campionati della rete di monitoraggio fare riferimento a Figura 5.1-----	114
Figura 6.3 Classi di deuterio per i 64 pozzi della rete di monitoraggio -----	115
Figura 6.4 Box-plot per i valori di deuterio in funzione dell'ubicazione del punto di misura in area irrigua o non irrigua-----	116
Figura 6.5 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 4 transetti della sotto-area Ticino-Adda. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 -----	117
Figura 6.6 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Adda- Oglio. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 -----	119
Figura 6.7 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 3 transetti della sotto-area Oglio- Mella. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 -----	120
Figura 6.8 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Mella- Chiese. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 -----	121
Figura 6.9 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano il transetto della sotto-area Chiese- Mincio. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 -----	122

Figura 6.10 Classi di Cl/Br (mass ratio). I dati rappresentati fanno riferimento alla campagna di marzo 2022. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2 ----- 126

Figura 6.11 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio). Per i dati puntuali fare riferimento a Tabella 6.2, Tabella 5.2, Tabella 5.5 e Tabella 5.6. Per l'ubicazione dei punti campionati della rete di monitoraggio fare riferimento a Figura 5.1 ----- 127

Figura 6.12 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 4 transetti della sotto-area Ticino-Adda. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 ----- 129

Figura 6.13 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Adda-Oglio. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 ----- 131

Figura 6.14 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 3 transetti della sotto-area Oglio-Mella. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 ----- 132

Figura 6.15 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Mella-Chiese. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 ----- 134

Figura 6.16 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano il transetto della sotto-area Chiese-Mincio. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1 ----- 135

Figura 6.17 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per tutti i campioni considerati. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2 ----- 137

Figura 6.18 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Ticino-Adda. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale ----- 138

Figura 6.19 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Adda-Oglio. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale ----- 139

Figura 6.20 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Oglio-Mella. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale. La retta tratteggiata nera indica il modello di mescolamento tra piogge locali e torrente Gandovere, rappresentativo del fenomeno "surface mountain-front recharge" (Cap. 6.2.1) ----- 140

Figura 6.21 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Mella-Chiese. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale ----- 141

Figura 6.22 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Chiese-Mincio. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale ----- 142

Figura 6.23 Evoluzione temporale delle concentrazioni ^3H e $^3\text{He}_{\text{tri}}$, normalizzate a ^3H ($t = 0$) e il rapporto ----- 145

Figura 6.24 Le componenti dei gas nobili in soluzione in acqua di falda, espresse in percentuale rispetto la composizione all'equilibrio. Modificato da Kipfer et al., 2002 ----- 146

Figura 6.25 Schermata della macro Excel di PaleoTemp_2.0 (Pinti & Van Drom, 2004), che mostra i parametri d'ingresso per il calcolo di Q e V (Tabella 6.3; Tabella 6.4) ----- 149

Figura 6.26 Schermata dei dati di input della macro Excel di Solubility (Pinti, 1995) utilizzata per ricavare le componenti all'equilibrio dei gas nobili d'interesse (composizioni elementari ed isotopiche) ----- 150

Figura 6.27 Curva di distribuzione per le età apparenti stimante in 57 campioni della rete di monitoraggio ----- 153

Figura 6.28 Mappa delle età apparenti stimate e rappresentate 8 classi. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 6.4 ----- 159

Figura 6.29 Box-plot delle classi di età rappresentate in Figura 6.28, in funzione della Latitudine. Per i dati puntuali di età, fare riferimento alla Tabella 6.4 ----- 160

Figura 6.30 Scatterplot delle mediane per ogni classe di età (Figura 6.28) rispetto la latitudine ----- 160

Figura 6.31 Box-plot delle età apparenti (anni) rappresentate in Figura 6.28, in funzione dell'ubicazione del pozzo in area irrigua o non irrigua. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 6.4 ----- 162

Figura 6.32 Sezioni T1.1 e T1.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato 164

Figura 6.33 Sezioni T2.1 e T2.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato 167

Figura 6.34 Sezioni T3 e T4 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato ----- 169

Figura 6.35 Sezioni T5 e T6 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato -----	171
Figura 6.36 Sezioni T7, T8 e T9 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato	173
Figura 6.37 Sezioni T10, T11 e T12.1 e T12.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato-----	175
Figura 6.38 Diagramma di Craig con indicazione dei diversi end-member ASW, ASW+TRI e TERR e possibili linee di mixing -----	177
Figura 6.39 Il diagramma di Craig, con indicazione dei diversi end-member ASW, ASW+TRI e TERR. I pozzi della rete interessati dal secondo campionamento di settembre 2022, sono rappresentati senza riempimento colore-----	179
Figura 6.40 Contenuto iniziale di trizio ($^3\text{H}+^3\text{He}_{\text{tri}}$) delle acque campionate (indicate con il cerchio nero) confrontato con $^3\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ di precipitazione come registrato presso la stazione GNIP di Vienna, Austria (https://www.iaea.org/services/networks/gnip). In tratteggiato una possibile linea di mixing che vede acqua recente del 2022 per circa l'80%, che è stata "diluata" da una frazione di acqua pre-bomb, quindi molto povera in ^3H ed $^3\text{He}_{\text{tri}}$ -----	182
Figura 6.41 Scatterplot età vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli riferiscono all'ubicazione del pozzo in area irrigua o meno. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2 e alla Tabella 6.4 -----	187
Figura 6.42 Box-plot delle età secondo classi di $\delta^2\text{H}$. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2 e alla Tabella 6.4 -----	187
Figura 6.43 Scatterplot delle concentrazioni medie di nitrato vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli riferiscono all'ubicazione del pozzo in area irrigua o meno -----	189
Figura 6.44 Box-plot delle concentrazioni medie di nitrato secondo classi di $\delta^2\text{H}$ -----	189
Figura 6.45 Box-plot delle concentrazioni medie di nitrato secondo classi di $\delta^2\text{H}$ - focus sull'effetto dell'intensità dell'irrigazione -----	190
Figura 6.46 Scatterplot delle concentrazioni medie di nitrato vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli si riferiscono alle classi d'età presentate in Figura 6.28 -----	191
Figura 6.47 Numero di stazioni meteo che presentano un gap informativo maggiore ai 30 giorni su ogni anno di misura nella finestra d'acquisizione 2005-2020. La linea arancione indica la finestra temporale (2013-2020) presa in considerazione per il presente studio -----	193
Figura 6.48 Mappa delle stazioni meteo con indicazione delle due stazioni 1205 e 1228, di Molteno (LC) e Goito (MN), escluse dalla trattazione -----	195
Figura 6.49 Interpolazione spaziale dei dati medi delle precipitazioni cumulate annue (mm) e rappresentazione della rete di monitoraggio-----	196
Figura 6.50 Classi di precipitazione (mm, valore medio sulle cumulate annue 2013-2020) -----	200

Figura 6.51 Istogramma dei volumi irrigui per le due stagioni irrigue 2021 e 2022 per i 34 misuratori CeDATER (Figura 3.3). Le etichette rappresentano la diminuzione percentuale dei volumi misurata per il 2022. Il misuratore con codice f00013 non presenta il monitoraggio della portata per il 2021 -----	206
Figura 6.52 Mappa dei volumi di acqua distribuiti su territorio irriguo (m^3/ha) per l'anno 2021, rappresentata su scala colori per ogni pozzo della rete di monitoraggio sperimentale. I dati fanno riferimento alla Tabella 6.7 -----	207
Figura 6.53 Profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione delle classi di età della falda-----	208
Figura 6.54 Box-plot di età della falda in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster -----	209
Figura 6.55 profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione della precipitazione cumulata annuale media sul periodo 2013-2020 -----	210
Figura 6.56 Box-plot di precipitazione cumulata annuale media sul periodo 2013-2020 in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster -----	210
Figura 6.57 Profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) nei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione del volume irriguo distribuito per ettaro durante la stagione irrigua 2021 -----	211
Figura 6.58 Box-plot di volume irriguo in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster -----	212
Figura 6.59 Profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione dell'ubicazione in zona vulnerabile (ZVN) o non vulnerabile (ZnVN) ai nitrati -----	213
Figura 6.60 Istogramma con i conteggi dei pozzi in ZVN e ZnVN per ciascun cluster -----	213
Figura 6.61 Profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione del carico azotato di origine agricola espresso come $kg\ N/ha/anno$ -----	214
Figura 6.62 I box-plot di carico azotato in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster -----	215
Figura 6.63 Profili temporali di nitrato a media sottratta organizzati in classi di età con l'indicazione degli andamenti di nitrato per cluster e appartenenza o meno dei pozzi a territorio irriguo -----	221
Figura 6.64 Profili temporali di nitrato a media sottratta organizzati in classi di età con l'indicazione degli andamenti di nitrato per cluster e appartenenza dei pozzi a territorio ZnVN o ZVN -----	222
Figura 6.65 Profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione della precipitazione cumulata annua media (sul periodo 2013-2020) -----	223
Figura 6.66 Profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione del volume di acqua irrigua utilizzato nella stagione 2021 -----	224

Figura 6.67 Profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione carico azotato di origine agricola (anno 2021) ----- 225

1-----INTRODUZIONE

L'accordo di collaborazione scientifica tra l'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste (ERSAF) e il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra (DISAT) dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca, avviato a settembre 2021 e della durata di due anni, ha l'obiettivo di valutare le relazioni tra l'età delle acque sotterranee e le tendenze temporali delle concentrazioni di nitrato nelle falde della pianura lombarda. L'intento è quello di fornire un supporto concettuale alla gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee lombarde. I risultati attesi di questo progetto sono principalmente due:

- I. un modello concettuale sui tempi di rinnovamento delle risorse idriche sotterranee dell'alta pianura lombarda, in relazione alle interazioni con le acque superficiali e di irrigazione;
- II. un modello concettuale sull'evoluzione temporale della contaminazione da nitrati nelle falde, capace di valutare il ritardo temporale tra azioni di mitigazione intraprese ed effetti migliorativi riscontrabili nelle falde.

Le fasi di lavoro del progetto sono organizzate nei seguenti work packages (WPs):

- WP1 – Raccolta informazioni e dati pregressi – questa fase ha previsto la raccolta sia di lavori pregressi su tematiche utili alle finalità progettuali e sia di dati, di varia natura, necessari allo sviluppo del progetto stesso.
- WP2 – Analisi delle tendenze temporali dei nitrati in falda – questa fase ha previsto l'identificazione ed interpretazione degli andamenti temporali delle concentrazioni di nitrato in falda su lungo periodo (in funzione dei dati disponibili).
- WP3 – Progettazione ed esecuzione di un piano sperimentale di campionamento ed analisi – in questa fase è stata sviluppata la costruzione di una rete di monitoraggio e l'esecuzione di due campagne di monitoraggio, la prima in periodo non irriguo (marzo 2022) e la seconda in periodo tardo irriguo (settembre 2022), per l'analisi di traccianti utili alla stima dell'età della falda (^3H o $\text{T}/^3\text{He}$) e all'identificazione delle voci di ricarica all'acquifero ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ in acqua e concentrazioni di Cl, B e Br).

- WP4 – Sviluppo del modello concettuale finale – in questa fase si è elaborata una sintesi delle elaborazioni effettuate nelle fasi precedenti con l'obiettivo di implementare un modello concettuale capace di soddisfare gli obiettivi progettuali.

Il presente documento descrive i risultati delle attività svolte secondo la strutturazione temporale del progetto riportata nel diagramma di Gantt di Figura 1.1, nel quale sono riportate anche le tempistiche delle consegne dei prodotti finali (novembre 2021, luglio 2022 e agosto 2023).

Fasi	Descrizione	Mesi																										
		Set 21	Ott 21	Nov 21	Dic 21	Gen 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	Mag 22	Giu 22	Lug 22	Ago 22	Set 22	Ott 22	Nov 22	Dic 22	Gen 23	Feb 23	Mar 23	Apr 23	Mag 23	Giu 23	Lug 23	Ago 23			
WP1	Raccolta dati pregressi																											
WP2	Analisi tendenze temporali																											
WP3	Campionamento ed analisi																											
WP4	Modello concettuale																											
	Consegna Prodotti			1°									2°														3°	

Figura 1.1 Diagramma di Gantt del progetto

2-----INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

L'intero sistema acquifero alluvionale della Pianura Padana comprende sedimenti pleistocenici, disposti prevalentemente da O a E, ricoperti, in corrispondenza delle valli fluviali, da sedimenti fluviali olocenici (Garzanti et al., 2011; Marchetti, 2002).

Secondo la classificazione riportata nel lavoro di Regione Lombardia e ENI-AGIP (Carcano & Piccin, 2002), in relazione alla suddivisione degli acquiferi derivante dalla ricostruzione di un modello geologico della pianura a scala regionale attraverso l'interpretazione di dati sismici e stratigrafici, sono riconosciuti 4 gruppi acquiferi principali:

- Gruppo Acquifero A (Olocene-Pleistocene Medio), corrispondente all'unità ghiaioso-sabbiosa;
- Gruppo Acquifero B (Pleistocene Medio), corrispondente all'insieme delle unità sabbioso-ghiaiosa e a conglomerati e arenarie;
- Gruppo Acquifero C (Pleistocene Medio), corrispondente alla parte superiore dell'unità sabbioso-argillosa;
- Gruppo Acquifero D (Pleistocene Inferiore), corrispondente alla restante parte dell'unità sabbioso-argillosa.

Successivamente, nel Programma di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) approvato da Regione Lombardia con D.G.R. n. 6990 del 31/7/2017, sono state identificate tre principali Idrostrutture Sotterranee (Superficiale, Intermedia e Profonda) nel complesso idrogeologico dei Depositi Quaternari nelle aree di pianura:

- ISS (Idrostruttura Sotterranea Superficiale), sede dell'acquifero libero, comprendente il Gruppo Acquifero A e B nei settori di alta pianura Lombarda, e la porzione superiore del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A1) nella media e bassa pianura;
- ISI (Idrostruttura Sotterranea Intermedia), sede di acquiferi da semiconfinati a confinati, comprendente la porzione profonda del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A2) e il Gruppo Acquifero B presente nella media e bassa pianura;

- ISP (Idrostruttura Sotterranea Profonda), sede di acquiferi confinati comprendente il Gruppo Acquifero C nei settori di alta e media pianura, conosciuto tramite indagini dirette e captato.

L'ISS, oggetto del presente studio, è costituito da uno o più corpi acquiferi caratterizzati da permeabilità da media ad alta, liberi o localmente semiconfinati dove il flusso idrico sotterraneo segue generalmente una direzione nord-sud (Figura 2.1). La Figura 2.1 riporta anche la carta degli spessori dell'ISS, ottenuti per differenza tra la superficie topografica e la base dell'idrostruttura, con spessori minimi (20-30 m) in alcuni settori della bassa pianura (alla confluenza tra Po e Ticino, nel basso cremonese e nel medio bresciano) e massimi, superiori anche ai 100 m in alta pianura. L'ISS risulta maggiormente vulnerabile da un punto di vista sia quantitativo che qualitativo, quindi maggiormente esposto alla contaminazione da nitrati, dal momento che localmente risulta in diretta comunicazione con la superficie topografica e con i corsi d'acqua superficiali. L'ISS in alcune aree può trovarsi in contatto idraulico con le altre idrostrutture ISI e ISP, con le quali può quindi ricevere e/o donare acqua e specie disciolte in essa.

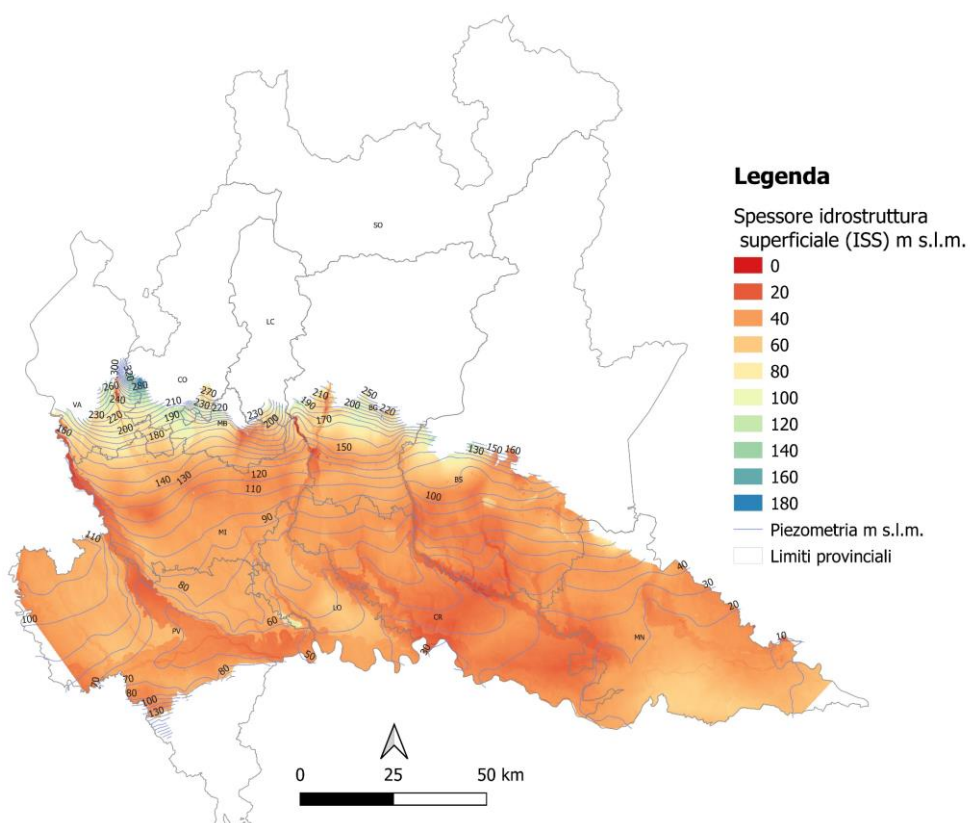


Figura 2.1 Mappa degli spessori dell'idrostruttura superficiale (ISS) e del livello piezometrico (Regione Lombardia, 2017)

3-----WP1 - RACCOLTA INFORMAZIONI E DATI PREGRESSI

Questa fase di lavoro si è composta essenzialmente in due parti:

- raccolta dei lavori scientifici e tecnico-scientifici pregressi in materia di acque sotterranee e di contaminazione da nitrati che hanno riguardato il territorio della pianura lombarda;
- acquisizione di dati presso Enti regionali, di ricerca e gestori del servizio idrico.

3.1 Raccolta dei lavori scientifici e tecnico-scientifici pregressi

La raccolta bibliografica ha interessato tre tematiche principali: (1) dinamica delle concentrazioni di nitrato nelle falde lombarde, (2) datazione delle falde lombarde e (3) identificazione delle voci principali di ricarica degli acquiferi lombardi.

Il quadro della problematica dei nitrati nelle falde dell'alta pianura lombarda è ben definito in letteratura, di seguito si riportano alcuni lavori significativi.

Il lavoro di Sacchi et al. (2013) ha provveduto a identificare per l'area della pianura lombarda (a) le sorgenti principali di azoto, (b) i principali processi di trasformazione dei composti azotati, con particolare attenzione ai processi di attenuazione dei nitrati e (c) le aree di maggiore accumulo dei nitrati nelle falde. L'identificazione delle sorgenti principali dei nitrati nelle acque è stata successivamente sviluppata e implementata a scala di bacino padano nel lavoro di Martinelli et al. (2018). Il tema dell'evoluzione temporale delle concentrazioni di nitrati nelle falde regionali è stato affrontato nel lavoro di Musacchio et al. (2020), sull'intervallo 2006-2016, evidenziando la presenza di diverse tendenze temporali (crescita, diminuzione e stazionarietà) in funzione del tipo di acquifero (idrostruttura superficiale e intermedia/profonda) e condizioni sito-specifiche. Infine, nell'ambito dello studio per conto di Regione Lombardia sulla valutazione dei valori di fondo per le acque sotterranee (Zanotti et al., 2022) è stata effettuata una caratterizzazione idrochimica di tutti i punti di monitoraggio della rete regionale ARPA, in particolare è stata realizzata una zonazione delle caratteristiche redox delle acque sotterranee regionali, fondamentale per definire le aree soggette, e potenzialmente soggette, alla contaminazione da nitrati (facies ossidate) e quelle in

cui la contaminazione da nitrati è contrastata/sfavorita dal processo di attenuazione naturale degli stessi, ovvero la denitrificazione (facies ridotte).

Tra gli studi precedenti volti alla datazione delle falde in Lombardia si segnala il progetto INTEGRON (P.I. Prof.ssa Elisa Sacchi, Università degli Studi di Pavia), che ha portato ad una prima stima delle età delle falde lungo alcuni transetti idrogeologici ubicati nell'alta pianura lombarda, tramite l'utilizzo di traccianti antropogenici (CFCs e SF₆) e isotopici (³H/³He) (Musacchio et al. 2020). Questo studio ha fatto emergere l'impossibilità dell'utilizzo dei traccianti antropogenici nella pianura lombarda per presenza di contaminazioni diffuse degli stessi in falda, aprendo la strada all'utilizzo dei soli traccianti isotopici (³H/³He).

Studi precedenti hanno verificato l'importanza del tipo di ricarica all'acquifero nella dinamica della contaminazione da nitrati. In particolare, sono emersi due elementi del bilancio idrico capaci di avere un ruolo fondamentale nella contaminazione da nitrati: a) l'interazione tra acque superficiali e sotterranee (Rotiroti et al., 2019; Balestrini et al., 2021; Musacchio et al., 2021) e b) l'irrigazione agricola (Rotiroti et al. 2019).

3.2 Acquisizione di dati presso enti regionali, di ricerca e gestori del servizio idrico

Per la seconda parte, l'acquisizione dati è stata effettuata presso gli Enti regionali (1) ARPA, (2) ANBI, (3) ERSAF, presso (4) il Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Pavia (UniPV) e (5) presso l'Ente Gestore del servizio idrico integrato Acque Bresciane S.r.l. I dettagli su numero e tipologia di dati acquisiti sono riportati nei paragrafi sottostanti.

3.2.1 Dati acquisiti da ARPA

ARPA Lombardia ha condiviso la seguente tipologia di dati:

- dati del monitoraggio qualitativo regionale su una finestra temporale di 16 anni, dal 2006 al 2021,
- dati del monitoraggio quantitativo regionale su una finestra temporale di 15 anni, dal 2006 al 2020,

- anagrafica e stratigrafie dei punti della rete di monitoraggio.

Le informazioni anagrafiche hanno riguardato un numero di punti pari a 671; le informazioni stratigrafiche hanno riguardato 841 punti di monitoraggio. Tra le informazioni anagrafiche associate a ciascun punto, quelle di particolare interesse sono, oltre alle caratteristiche costruttive (numero e profondità filtri), la rete di monitoraggio di appartenenza (qualitativa, quantitativa o quali-quantitativa), la data di inizio e fine del monitoraggio, la quota di riferimento per la misura piezometrica, il corpo idrico sotterraneo captato. La Figura 3.1 mostra la distribuzione dei 671 punti suddivisi per tipologia di monitoraggio.

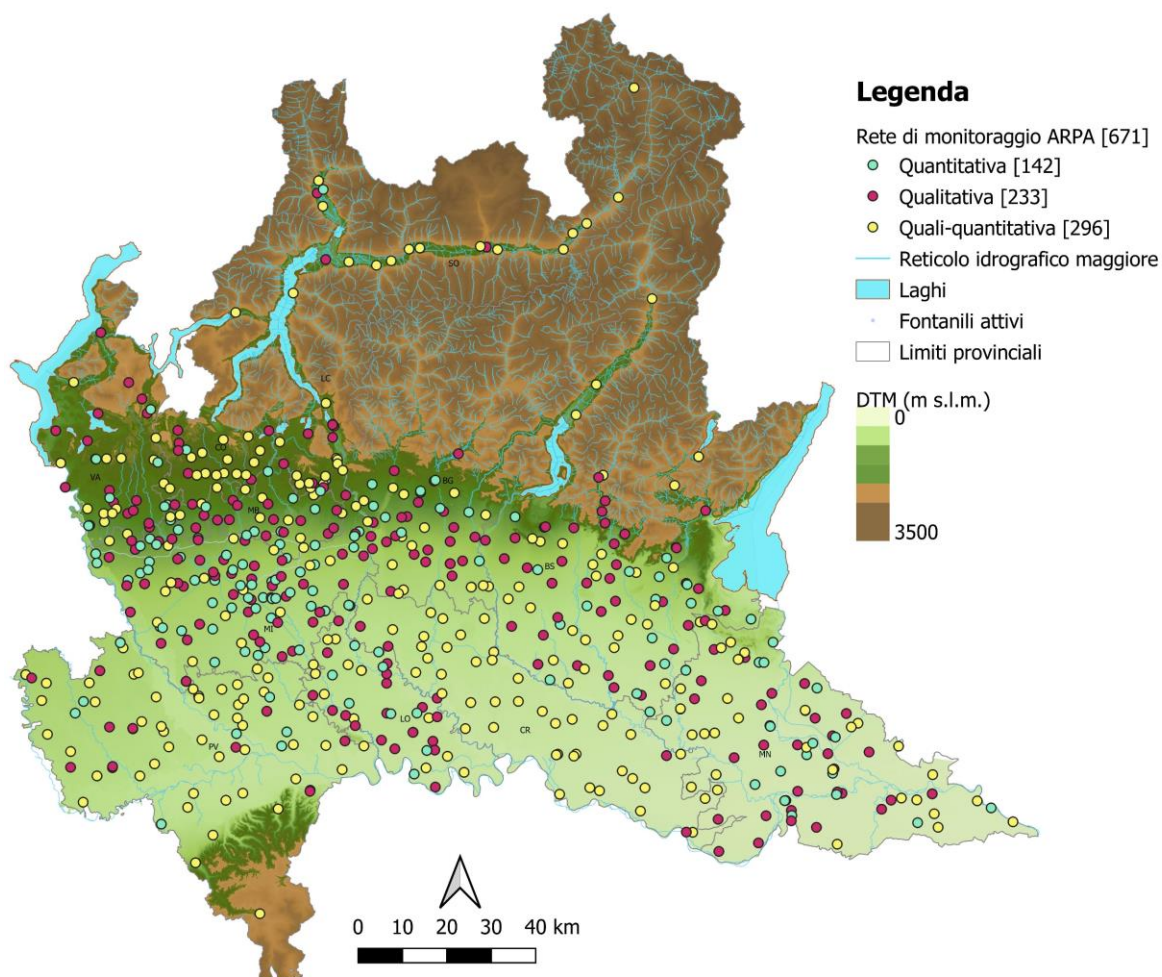


Figura 3.1 Localizzazione dei pozzi della rete ARPA rappresentati in funzione del monitoraggio quantitativo, qualitativo e quali-quantitativo

In merito alla condivisione dei dati qualitativi, questi sono stati ricevuti suddivisi in tre diverse finestre temporali, dal 2006 al 2008, dal 2009 al 2015 e dal 2016 al 2021 e hanno riguardato tutti i parametri monitorati da ARPA. La Tabella 3.1 Numero di pozzi monitorati, di parametri monitorati e di campioni raccolti per ogni finestra temporale riporta, per ciascuna finestra temporale, la numerosità dei pozzi, dei parametri monitorati e dei campioni raccolti. La variazione del numero dei pozzi monitorati tra le diverse finestre temporali è dovuta alle attività di aggiornamento della rete di monitoraggio intraprese negli anni, dove alcuni pozzi sono stati dismessi, alcuni sostituiti ed altri ancora implementati nella rete.

Tabella 3.1 Numero di pozzi monitorati, di parametri monitorati e di campioni raccolti per ogni finestra temporale

Finestra temporale	# pozzi monitorati	#parametri monitorati	# campioni raccolti
2006-2008	418	250	60753
2009-2015	603	234	478215
2016-2021	515	333	706363

Per quanto riguarda i dati quantitativi, questi fanno riferimento sia a misure manuali in condizioni statiche che a misure in continuo tramite sonda. Le misure manuali di piezometria statica sono state effettuate per 423 pozzi dal 2006 al 2020, per un totale di 40077 misure. Per ogni pozzo si registra una media di 9 misure all'anno; i pozzi con un numero di misure annue maggiore di 10 rappresenta il 42% dei pozzi totali a disposizione. Le misure con sonda in continuo fanno riferimento a 46 pozzi, effettuate con cadenza oraria e coprono il biennio 2018-2020.

3.2.2 Dati acquisiti da ANBI

La ricezione dei dati forniti da ANBI Lombardia ha visto due momenti di condivisione principali: uno relativo alla comprensione e definizione delle fonti irrigue che interessano le aree destinate al monitoraggio sperimentale del progetto ed uno riguardante la ricezione delle informazioni sui volumi irrigui misurati come descrittori delle stagioni irrigue 2021 e 2022.

In dettaglio, ANBI ha condiviso un'estrazione di dati ed informazioni provenienti dalla banca dati CeDATer (Centro Dati Acqua e Territorio Rurale) relativamente alle aree soggette al monitoraggio del presente progetto (Cap. 5.1). I dati sono stati condivisi sottoforma di strati informativi territoriali (Figura 3.2) che presentano le seguenti informazioni principali: nomi e areali dei distretti e/o comizi irrigui, metodo irriguo, fonte d'acqua irrigua, identificativo dei misuratori di riferimento per quantificare i volumi irrigui come anche le informazioni relative alla superficie agricola e quella irrigata (ha).

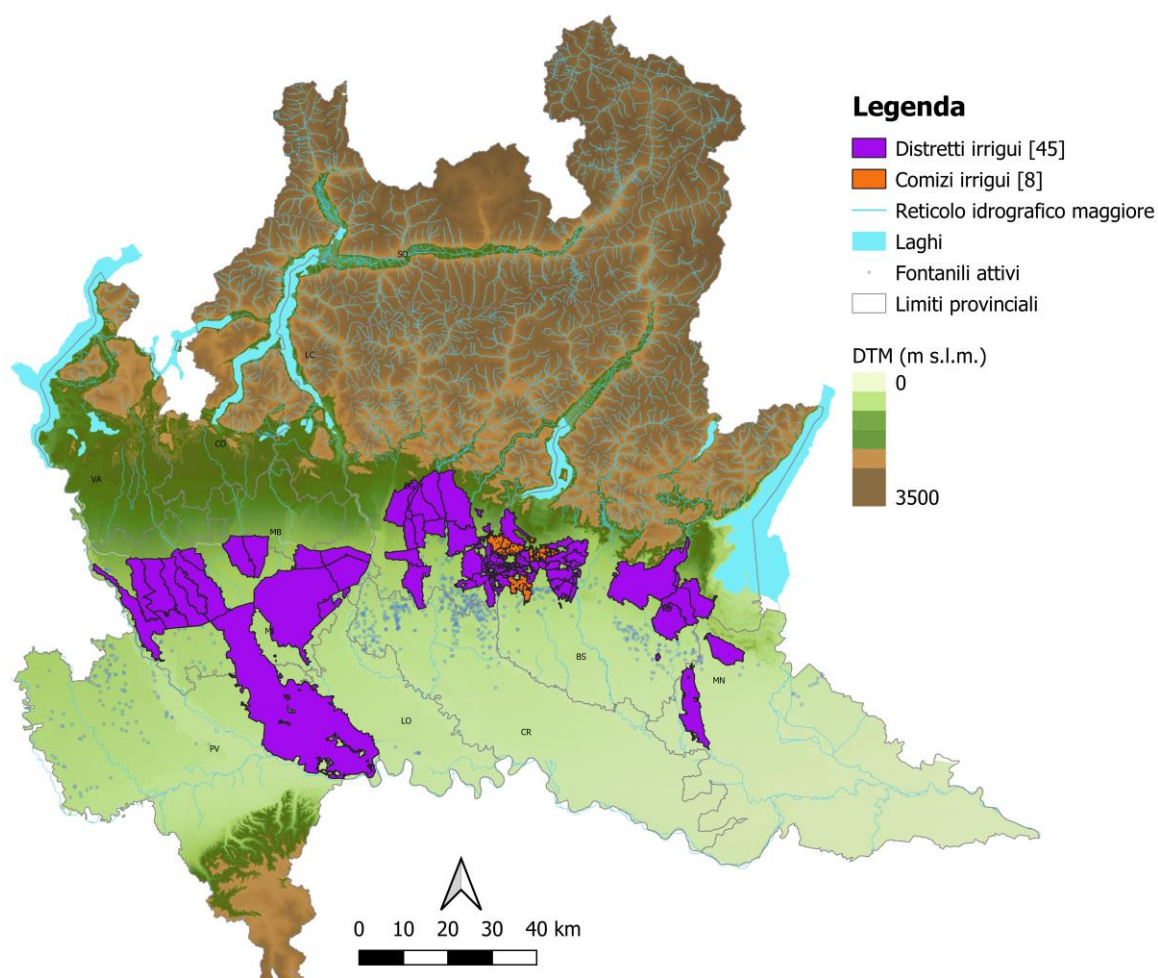


Figura 3.2 Rappresentazione degli strati informativi territoriali creati da ANBI Lombardia ed estratti dalla banca dati CeDATer

Le informazioni sui volumi irrigui relativi alle stagioni 2021 e 2022 hanno riguardato nel dettaglio:

- n. 34 file .csv che corrispondono ai singoli misuratori con le serie giornaliere di portata (m^3/s) di acqua misurata e distribuita a scopo irriguo per le stagioni irrigue 2021 e 2022 (1 aprile - 30 settembre) e, laddove disponibili, per l'intero anno solare (Figura 3.3);
- uno shapefile con la localizzazione dei punti di monitoraggio e la loro codifica utilizzata a livello regionale che riporta le seguenti informazioni: oltre al codice del misuratore, sono disponibili la relativa descrizione (nome del corso idrico/canale/roggia monitorata), l'origine della serie di dati (i.e. consorzio di bonifica) e, laddove disponibili, eventuali informazioni in merito all'adduttore e al ricettore del tratto idrico misurato (Figura 3.3; Tabella 3.2).

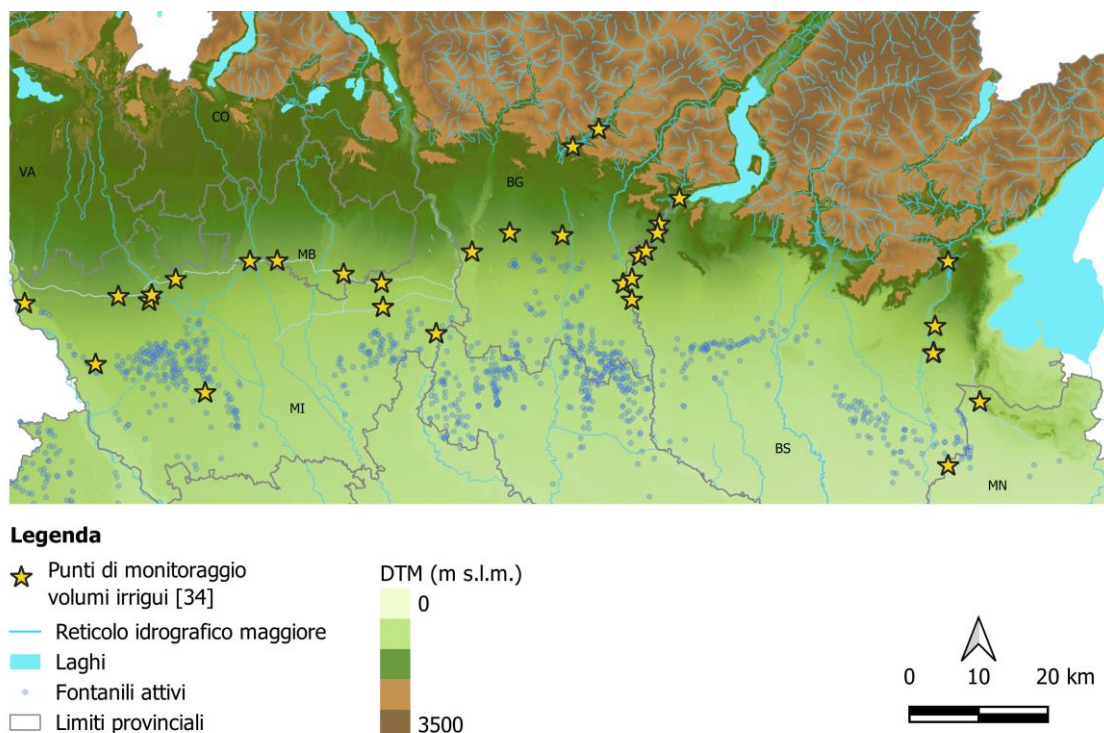


Figura 3.3 Localizzazione dei punti di monitoraggio delle portate erogate a scopo irriguo

Tabella 3.2 Elenco dei codici dei misuratori con relative informazioni a corredo

#	ID	cod_misur	Coordinata X	Coordinata Y	Descrizione	# misure 2021	# misure2022	Fonte dati
1	10	f00010	610378.41	5038722.18	Consegna Roggia Lonata	183	183	Consorzio Di Bonifica Chiese
2	13	f00013	610187.69	5034914.17	Consegna Roggia Calcinata (con Vaso Marina)	n.d.	346	Consorzio Di Bonifica Chiese
3	16	m00016	561770.62	5067189.32	Roggia Serio	365	365	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
4	17	m00017	561772.36	5067186.32	Roggia Morlana	365	365	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
5	18	m00018	543468.43	5049462.02	Roggia Moschetta	365	357	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
6	20	m00020	558032.49	5064633.37	Roggia Borgogna di Villa di Serio	365	365	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
7	29	m00029	570561.96	5053496.82	Franciacorta Sollevamento	365	365	Consorzio Dell'oglio
8	32	m00032	567629.05	5048860.79	Roggia Sale	365	365	Consorzio Dell'oglio
9	33	m00033	565299.86	5044863.99	Roggia Donna	365	365	Consorzio Dell'oglio
10	34	m00034	573441.11	5057197.85	Roggia Fusia	365	365	Consorzio Dell'oglio
11	36	m00036	570271.97	5052149.94	Roggia Vetra	365	365	Consorzio Dell'oglio
12	37	m00037	568629.78	5049593.55	Roggia Castrina	365	365	Consorzio Dell'oglio
13	41	m00041	566576.24	5045557.96	Roggia Castellana	365	364	Consorzio Dell'oglio
14	42	m00042	566571.64	5042499.83	Roggia Antegnata	365	365	Consorzio Dell'oglio
15	59	m00059	612271.48	5048078.73	Canale Naviglio Grande Bresciano	365	365	Consorzio Chiese lià°
16	86	m00086	556515.25	5051838.14	Canale Adda Serio - Consegna a Roggia Ugnana	365	365	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
17	97	m00097	548928.53	5052211.49	Consegna Coda Morlana, Coda Corleonesca	365	365	Consorzio Di Bonifica Della Media Pianura Bergamasca
18	969	m00969	610116.74	5034802.89	Roggia Montichiara	365	365	Consorzio Di Bonifica Chiese
19	1085	m01088	492342.82	5043030.36	Corbetta	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
20	1087	m01089	496773.22	5042395.09	Arluno Vittuone	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
21	1086	m01090	496794.24	5042398.11	Bareggio	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
22	1088	m01091	497177.41	5043232.36	Valle Olona Settimo	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
23	1109	m01092	500646.96	5045493.35	Rho	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
24	1090	m01095	511367.53	5048114.05	Valle Seveso	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
25	1093	m01096	515305.53	5048168	Nova	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
26	1091	m01099	524899.23	5046252.19	Cernusco	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
27	1106	m01100	530384.6	5044970.44	Gorgonzola	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
28	1102	m01101	478809.6	5042020.3	Grande1	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
29	1098	m01102	489056.96	5033213.77	Grande2	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
30	1094	m01106	504895.47	5029116.02	Grande4	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
31	1104	m01109	530587.51	5041474	Martesana 2	183	183	Consorzio Di Bonifica Est Ticino Villoresi
32	1113	m01113	538286.1	5037667.64	Derivatore Cattaneo Settala	183	183	Consorzio Di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana
33	1141	m01141	612280.16	5018577.2	Consegna Gambini	183	183	Consorzio Di Bonifica Garda Chiese
34	1160	m01160	616867.82	5027796.5	Canale Arnò - Stima prelievo uso irriguo	153	183	Consorzio Di Bonifica Garda Chiese

n.d.: non disponibile

3.2.3 Dati acquisiti da ERSAF

ERSAF ha reso disponibili due tipologie di informazioni che riguardano tutto il territorio regionale. In una prima fase sono stati resi disponibili i dati misurati da 76 sensori dedicati al monitoraggio delle precipitazioni e delle temperature atmosferiche, distribuiti su 39 stazioni meteorologiche ubicate come in Figura 3.4 Distribuzione delle stazioni meteorologiche sul territorio lombardo per la misura di dati di temperatura e precipitazione, i cui dettagli sulla loro ubicazione sono presentati in Tabella 3.3. I dati, con cadenza giornaliera, sono relativi ad una finestra temporale compresa tra il 2005 e il 2020.

In una seconda fase sono stati resi disponibili i dati relativi ai carichi azotati di natura agricola, nello specifico, sono stati condivisi i seguenti tipi di dati relativi agli anni 2021 e 2022: (i) dati di carico azotato (kg/ha) per tutti i comuni della Lombardia (1506 comuni), con l'indicazione di attribuzione di Zona Vulnerabile ai Nitrati (ZVN) o di Zona non Vulnerabile ai Nitrati (ZnVN); (ii) dati riguardanti l'ammissibilità per ogni comune alla distribuzione dei fanghi per uso agronomico sui terreni situati in comuni in cui il carico di azoto non supera il limite fissato dalla Direttiva Nitrati e dalla norma regionale di settore (170 kgN/ha/anno per le ZVN; 340 kg N/ha/anno per le ZnVN).

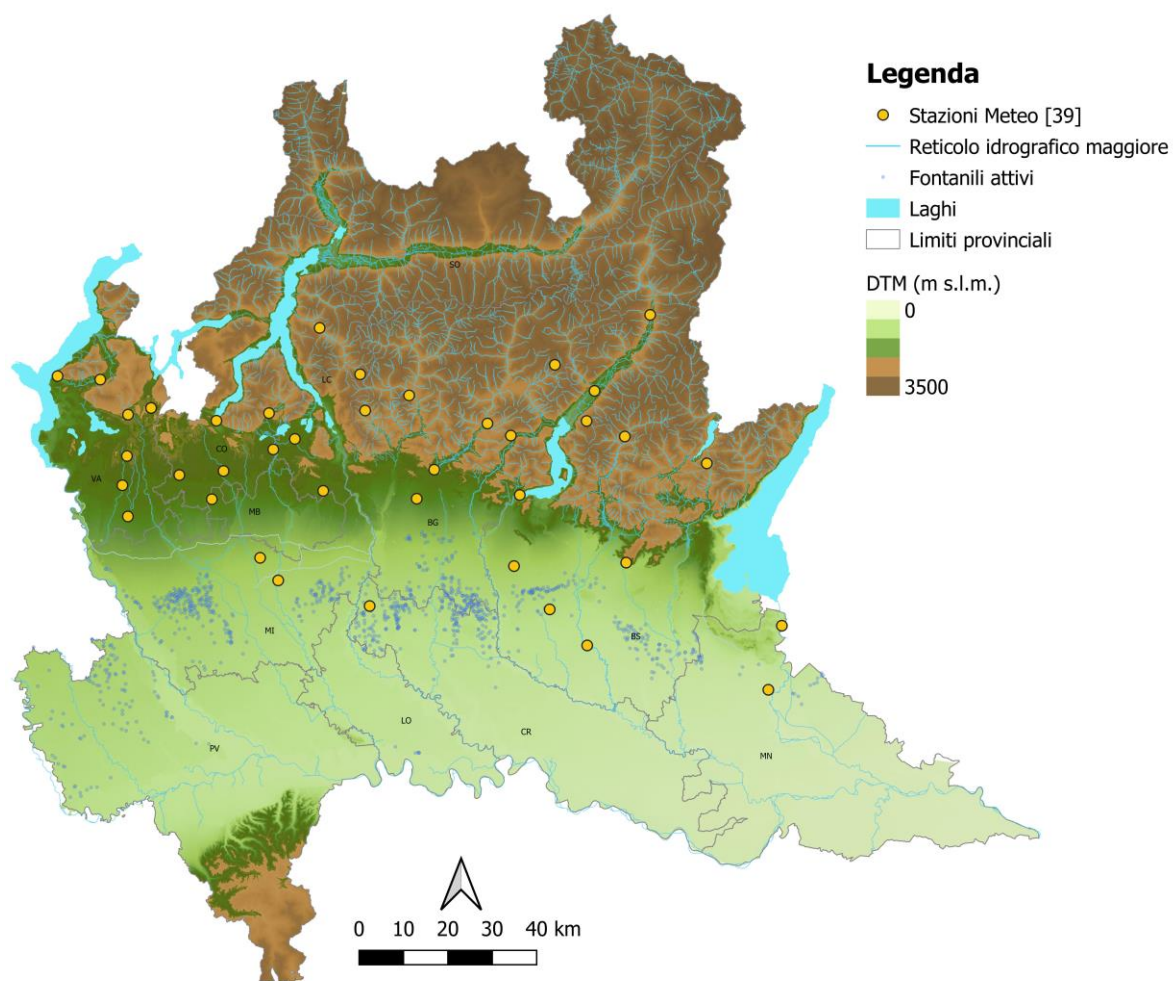


Figura 3.4 Distribuzione delle stazioni meteorologiche sul territorio lombardo per la misura di dati di temperatura e precipitazione

Tabella 3.3 Elenco dei 39 sensori meteo distribuiti sul territorio regionale

ID sensore	ID stazione	UTM_Nord	UTM_Est	Quota m slm	Attributo	Comune	Provincia
8152	885	5076955	491501	383		ARCISATE	VA
2441	132	5056541	551321	211	v.Stezzano	BERGAMO	BG
8161	889	5063070	555269	311		TORRE BOLDONE	BG
8172	877	5070534	598195	572	ponte Zigole	BOVEGNO	BS
2417	130	5042175	598502	149	ITAS Pastori	BRESCIA	BS
8219	897	5052553	486271	242	v.Rossini	BUSTO ARSIZIO	VA
8199	865	5062780	507811	244	Asnago	CANTU'	CO
2408	129	5097875	603903	362	v.Briscioli	CAPO DI PONTE	BS
8122	867	5075784	518046	427	v. 4 novembre	CASLINO D'ERBA	CO
9113	1221	5073453	567252	502	Campo Sportivo	CASNIGO	BG
9092	1212	5086648	582441	1180		CASTIONE DELLA PRESOLANA	BG
9091	1211	5066146	486058	379		CASTRONNO	VA
9116	1206	5059567	485026	274	v. Cantalupa	CAVARIA CON PREMEZZO	VA
8230	900	5041392	573236	140		CHIARI	BS
4065	147	5043257	516051	142	Parco Nord	CINISELLO BALSAMO	MI
8165	870	5074080	506207	200	viale Geno	COMO	CO
9105	1224	5094947	529451	456		CORTENOVA	LC
2465	134	5031659	581271	93	Bargnano	CORZANO	BS
8150	884	5083338	480047	294		CUVEGLIO	VA
4049	145	5080789	591371	222		DARFO BOARIO TERME	BS
9114	1228	5013581	630514	30		GOITO	MN
8197	911	5067627	519009	273		LAMBRUGO	CO
8587	998	5084109	470426	207	p.zza Matteotti	LAVENO - MOMBELLO	VA
9115	1233	5061867	497850	296		LURAGO MARINONE	CO
8208	910	5023553	589720	60	v.Dante	MANERBIO	BS
2006	100	5038171	520120	120	Lambrate	MILANO	MI
8211	903	5056428	505172	247		MISINTO	MB
2152	111	5084512	538583	1234	Moggio	CASSINA VALSASSINA	LC
9106	1205	5069985	523872	278	Cimitero	MOLTENO	LC
8224	873	5027985	633560	62	Monzambano	PONTI SUL MINCIO	MN
9110	1234	5058312	530261	234		OSNAGO	LC
8169	820	5074016	589582	842		PISOONE	BS
9090	1210	5070741	572525	486		RANZANICO	BG
2502	137	5032417	540720	102	Ist. Spallanzani	RIVOLTA D'ADDA	CR
9123	1209	5076380	539709	674		ROTA D'IMAGNA	BG
2278	119	5079768	549604	622	Cornalita	SAN GIOVANNI BIANCO	BG
8135	874	5057377	574538	197	v. Roma	SARNICO	BG
8103	851	5064493	616659	1147	Cavacca	TREVISIO BRESCIANO	BS
8228	907	5075452	486300	416	v.Appiani	VARESE	VA

3.2.4 Dati acquisiti da UniPV

UniPV ha condiviso i dati sperimentali, non ancora pubblicati, ottenuti da un progetto scientifico pregresso, il progetto INTEGRON (INTEgration of GROundwater processes in Nutrient budgets for a basin-oriented remediation strategy), finanziato da Fondazione Cariplo. Questo è stato possibile grazie alla collaborazione in essere nel presente progetto con la Prof.ssa Elisa Sacchi, che è stata anche responsabile scientifico del progetto INTEGRON. La condivisione di questi dati ha riguardato principalmente le misure di T e ^3He ed anche quelle degli isotopi stabili dell'acqua ^2H -e ^{18}O -H₂O effettuate a marzo 2018 su una rete di 20 punti (19 pozzi e 1 fontanile). Le caratteristiche principali di questi punti sono riportate in Tabella 3.4 e la loro ubicazione è mostrata in Figura 3.5. I pozzi presentano una profondità che varia da un minimo di 14 m (pozzo di Antegnate; ANT), fino a ad un massimo di 120 m (pozzo di Caravaggio; CAR), che ha fatto parte della rete ARPA dal 2007 al 2014. Per quanto riguarda il numero di filtri, 12 pozzi presentano un unico filtro, mentre i restanti 7 sono caratterizzati da un numero variabile tra 2 e 5 filtri.

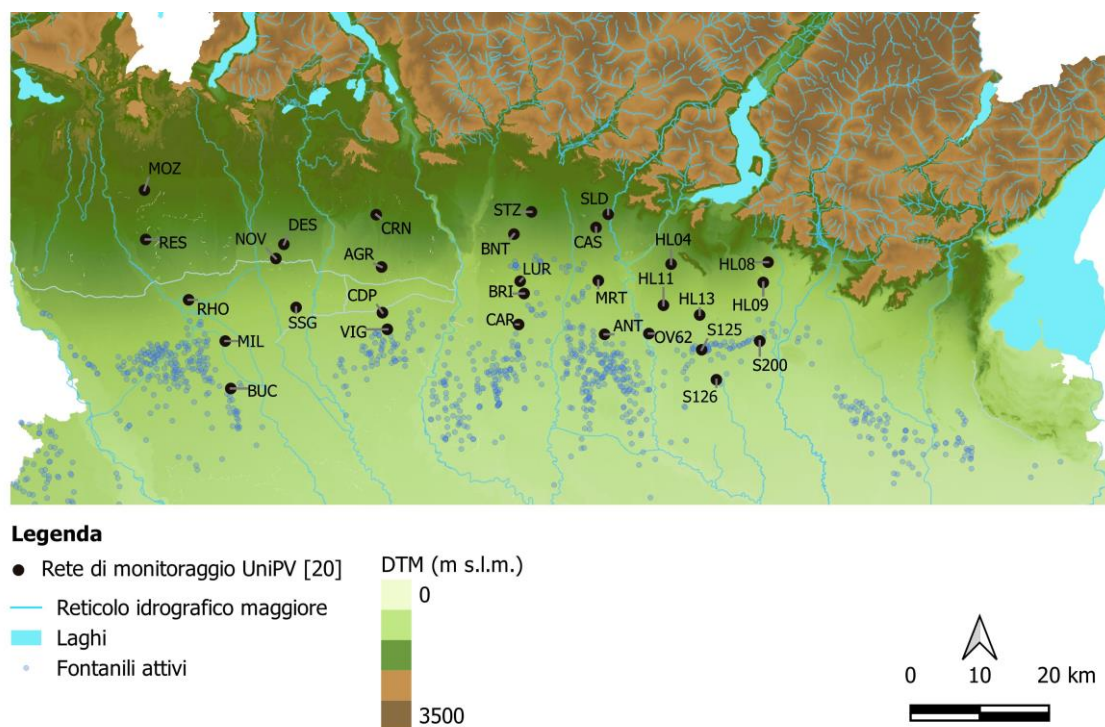


Figura 3.5 Ubicazione dei pozzi della rete di monitoraggio del progetto Integrone, Università di Pavia

Tabella 3.4 Elenco dei punti del monitoraggio UniPV con indicazione dei relativi dati costruttivi dei pozzi

#	Codice progetto	Codice UniPV	Codice ARPA	Comune	Provincia	COORD_EST	COORD_NORD	Tipologia	Profondità (m)	FILTRI_N (m)	FILTRI_TOP (m)	FILTRI_BOT (m)
1	T4C	AGR	n.d.	Agrate Brianza	MB	530244	5047427	Pozzo	83.2	5	25.38	81
2	T6H	ANT	n.d.	Antegnate	BG	562464	5037700	Pozzo	14	1	12	14
3	T5C	BNT	n.d.	Levate	BG	549371	5052184	Pozzo	55	2	32	53
4	T5F	BRI	PO0160400U0001	Brignano Gera D'adda	BG	550831	5043595	Pozzo	40	1	29.35	38.14
5	T1E	BUC	PO0150360U0002	Buccinasco	MI	508448	5029865	Pozzo	75	1	67.5	73.5
6	T5H	CAR	PO0160530U0002	Caravaggio	BG	550048	5039116	Pozzo	120	2	44	86
7	T6B	CAS	n.d.	Calcinante	BG	561235	5053148	Pozzo	35	n.d.	n.d.	n.d.
8	T4E	CDP	n.d.	Cassina De Pecchi	MI	530364	5040826	Pozzo	120	2	37.5	69.5
9	T4B	CRN	n.d.	Carnate	MB	529470	5054991	Pozzo	90	2	32.5	37
10	T8A	HL04	n.d.	Cologne	BS	572081	5047850	Pozzo	90	1	50	84
11	T9C	HL09	n.d.	Castegnato	BS	585398	5045187	Pozzo	80	1	65	80
12	T7A	HL11	n.d.	Chiari	BS	570974	5041899	Pozzo	50	1	37	43
13	T8B	HL13	n.d.	Castrezzato	BS	576212	5040497	Pozzo	24	1	20	24
14	T6F	MRT	n.d.	Martinengo	BG	561560	5045457	Pozzo	42	1	33	38
15	T7B	OV62	n.d.	Rudiano	BS	568874	5037803	Pozzo	73.4	1	40	66
16	T2F	RES	n.d.	Rescaldina	MI	496153	5051408	Pozzo	81.7	1	38	78
17	T2H	RHO	PO015182NR0018	Rho	MI	502359	5042684	Pozzo	100	2	40	67
18	T9E	S200	n.d.	Lograto	BS	584895	5036719	Sorgente	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
19	T5B	STZ	PO0162070R0001	Stezzano	BG	551901	5055400	Pozzo	84	3	54	81
20	T4F	VIG	n.d.	Vignate	MI	531071	5038419	Pozzo	96	1	46.5	55.5

n.d.: non disponibile

3.2.5 Dati acquisiti da Acque Bresciane S.r.l.

Con l'intento di acquisire una copertura di dati più ampia, sia spazialmente che temporalmente, rispetto a quelli disponibili dalla rete di monitoraggio ARPA, particolarmente nella zona di alta e media pianura bresciana tra i fiumi Oglio e Mella, è stata fatta richiesta all'ente gestore Acque Bresciane S.r.l. di condivisione dei dati di archivio. Come riportato in Tabella 3.5, l'ente gestore ha fornito dati di concentrazione di nitrato su quattro pozzi che rispondono per localizzazione e dati costruttivi alle esigenze del presente progetto; tra questi, il pozzo ubicato a Comezzano-Cizzago rientra nella rete di monitoraggio quali-quantitativa ARPA (ID ARPA PO0170600UC013).

Tabella 3.5 Informazioni e dati costruttivi per i quattro pozzi con relativa indicazione della copertura temporale dei dati di concentrazione della molecola del nitrato

#	Codice PROGETTO	PV	Comune	Prof. (m)	Filtri n	Filtri_top (m)	Filtri_bot (m)	Inizio serie	Fine serie
1	T8C*	BS	Comezzano-Cizzago	56	1	40	52	2009-05-13	2022-10-07
2	T9B	BS	Castegnato	87	1	57	87	2009-01-13	2022-11-17
3	T9D	BS	Azzano Mella	60	1	55.5	60	2009-05-20	2022-02-16
4	T9F	BS	Azzano Mella	28.5	2	19	28.5	2009-05-20	2022-02-16

*questi dati si riferiscono alla colonna A del pozzo

4-----WP2 - ANALISI DELLE TENDENZE TEMPORALI DEI NITRATI IN FALDA

Il WP2 si è focalizzato sull'analisi degli andamenti temporali su lungo periodo delle concentrazioni di nitrato in falda, estratte dal database qualitativo di ARPA (Cap. 3.2.1), ed è stato svolto tramite le seguenti fasi procedurali:

- pre-trattamento ed esplorazione preliminare del dataset;
- identificazione e gestione degli outliers;
- trend analysis;
- identificazione di inversioni di tendenza;
- cluster analysis temporale.

4.1 Pre-trattamento ed esplorazione preliminare del dataset

La prima operazione è stata quella di estrarre dai 3 database ARPA, caratterizzati da finestre temporali distinte (Cap. 3.2.1), i dati relativi alle sole concentrazioni di nitrato ed unirli in un unico file di lavoro con intervallo temporale 2006-2021. Il numero totale di pozzi aventi analisi di nitrato nel periodo 2006-2021 è risultato pari a 642. Il numero di campioni per pozzo varia da un minimo di 1 ad un massimo di 45, con media e mediana entrambe pari a 21. Il numero di campioni totali per anno è riportato in Tabella 4.1, con un valore complessivo sul periodo 2006-2021 di 13272 campioni.

Tabella 4.1 Numerosità dei campioni relativi alle misure della concentrazione di nitrato suddivisi per anno di monitoraggio

Anno	# campioni	Anno	# campioni
2006	576	2015	1194
2007	597	2016	961
2008	634	2017	1118
2009	748	2018	1175
2010	741	2019	885
2011	799	2020	460
2012	942	2021	474
2013	929	Tot	13272
2014	1039		

Il passo successivo è stato quello di procedere alla gestione dei campioni analizzati al di sotto del limite di quantificazione (LOQ). I campioni con concentrazione $<LOQ$ sono risultati essere 3773, che corrisponde al 28.4% dei campioni totali. Nel periodo considerato (2006-2021) il valore numerico del LOQ è variato da un minimo di 0.01 mg/L ad un massimo di 2.5 mg/L. I valori di LOQ più frequentemente utilizzati sono stati 0.5 mg/L (utilizzato nel 62% dei casi), 0.25 mg/L (13%) e 1 mg/L (6%). Il metodo di gestione dei campioni $<LOQ$ scelto nel presente lavoro è quello della sostituzione con $LOQ/2$ (US EPA, 2006). Per evitare la creazione di variabilità fittizia nel dataset, è stato scelto di utilizzare un unico valore di LOQ nella procedura di sostituzione (Zanotti et al., 2022); nello specifico, il valore scelto è stato 0.5 mg/L, il più frequentemente utilizzato. L'operazione di sostituzione ha portato così a convertire i campioni con misura $<LOQ$ con il valore numerico di 0.25 mg/L.

A questo punto è stata effettuata una selezione all'interno del dataset di lavoro in funzione delle caratteristiche idrogeologiche, nello specifico, in funzione dell'idrostruttura captata dai pozzi di monitoraggio: sono stati selezionati, ed utilizzati nelle successive elaborazioni, solo i pozzi captanti l'idrostruttura superficiale (ISS) (Regione Lombardia, 2016). Il motivo di questa scelta nasce dalla necessità di focalizzarsi, ed ottimizzare le risorse disponibili, sugli acquiferi più superficiali in quanto più vulnerabili agli impatti umani provenienti dalla superficie. Altro aspetto a supporto della selezione dei punti relativi al solo ISS è che il tempo di residenza atteso per le falde ospitate in questi acquiferi è inferiore agli 80 anni, che è il limite di età "registrabile" usando la tecnica $^3H/^3He$ (Clark, 2015). La Tabella 4.2 mostra la ripartizione della numerosità dei pozzi in funzione sia dell'idrostruttura che della provincia di appartenenza.

In estrema sintesi, vediamo come sui 642 pozzi monitorati totali, 258 (pari al 40%) captano l'ISS. L'ISS risulta quindi l'idrostruttura avente il maggior numero di punti di monitoraggio. Da notare il numero di 108 pozzi che non presentano l'attribuzione ad una idrostruttura. Il motivo di ciò è la cessazione, per questi pozzi, del monitoraggio prima del 2015, anno in cui è stata effettuata la classificazione dei corpi idrici sotterranei e delle idrostrutture (Regione Lombardia, 2017). I 258 pozzi captanti l'ISS

sono stati classificati in base alle 3 facies idrochimiche (ossidata, ridotta e salina) definite nel lavoro di Zanotti et al. (2022).

La Tabella 4.3 riporta la classificazione per facies idrochimica (e per provincia) dei 258 pozzi captanti l'ISS. Da notare la prevalenza di punti nella facies ossidata (139, pari al 54%) e un numero di pozzi non classificati (9 punti). Questi ultimi sono pozzi che hanno (1) o cessato il monitoraggio prima del 2014, anno di inizio del dataset utilizzato nel lavoro di Zanotti et al. (2022), (2) o iniziato il monitoraggio dopo il 2017, anno di fine del dataset utilizzato nel lavoro sopracitato. Unica eccezione, il pozzo PO012123NU2007 di Somma Lombardo, per il quale lo studio di Zanotti et al. (2022) ha suggerito il cambio di classificazione da ISS ad acquifero locale, non riportando una classificazione di facies idrochimica per questo punto perché questa classificazione è stata fatta solo per i punti ricadenti in idrostrutture definite, ovvero ISS, ISI, ISP e ISF (Idrostruttura Sotterranea di Fondovalle).

Tabella 4.2 Numero di pozzi relativi alle idrostrutture ISS, ISI e ISP suddivisi per province

Provincia	Numero di pozzi per ogni IS					Totale per provincia
	ISS	ISI	ISP	Altro	n.d.	
BG	30	7	3	1	5	46
BS	21	26	3	18	18	86
CO	11		4	11	6	32
CR	22	24	2		5	53
LC	6			18	5	29
LO	24	8		1	4	37
MB	13		5	1	5	24
MI	39	26	19		28	112
MN	41	30		1	18	90
PV	37	22	7	2	6	74
SO				17	3	20
VA	14		8	12	5	39
Totale	258	143	51	82	108	642

n.d.: non disponibile

Tabella 4.3 Numero di pozzi ricadenti nell'ISS e per i quali abbiamo informazione della facies idrochimica

Provincia	Numero di pozzi per facies idrochimica				
	Ossidata	Ridotta	Salina	n.d.	
BG	28			2	
BS	14	5		2	
CO	11				
CR	5	17			
LC	5			1	
LO	5	18	1		
MB	13				
MI	33	2		4	
MN	8	24	5	4	
PV	4	28	3	2	
VA	13			1	
Totale	139	94	9	16	258

n.d.: non determinato

All'interno dei 258 pozzi captanti l'ISS è stato selezionato un sottoinsieme di pozzi caratterizzati da una lunghezza della serie di concentrazione di nitrato pari o prossima al periodo di riferimento 2006-2021 (periodo più lungo disponibile dai dati acquisiti, Cap. 3.2.1), allo scopo di ottenere un dataset quanto più funzionale all'analisi degli andamenti temporali su lungo periodo. I criteri di selezione sono stati, in prima battuta, di possedere almeno un valore annuo di nitrato tra il 2006 e il 2021 e, in seconda battuta, di avere un numero di anni con valore di nitrato mancante minore o uguale a 3, e comunque per anni non consecutivi. Il risultato di questa selezione è stato l'identificazione di un numero pari a 115 pozzi. L'elenco di questi pozzi è riportato in Tabella 4.4, che specifica anche la numerosità del campione per ciascun anno.

Tabella 4.4 Elenco dei pozzi con serie di concentrazione di nitrato lunga 16 anni (2006-2021) con il conteggio delle misure per anno

#	ID punto	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale
1	PO0200170R0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	12	6	2	1	1	45
2	PO0160870R0001	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	12	6	2	1	1	43
3	PO0200180R0037	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	42
4	PO0151080U0002	1	7	6	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	40
5	PO0160400U0001	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	40
6	PO0161400R0001	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	40
7	PO012050NU0004	2	7	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	38
8	PO0152060U0004	2	8	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	37
9	PO0180880U0001	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	34
10	PO012002NU0008	1	2	4	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	33
11	PO0150020U0014	1	6	1	2	2	2	2	2	2	3	1	2	3	2	1	1	33
12	PO0180500U0002	1	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	33
13	PO015019NR0037	1	3	1	1	2	1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
14	PO0180690U0002	1	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	33
15	PO0181140U0002	1	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	33
16	PO0200450R0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	2	33
17	PO012067NU0012	1	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
18	PO0121180U0005	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
19	PO0152210U0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
20	PO018047NR0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
21	PO019033NRA001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
22	PO019077NRA001	2	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
23	PO0200030R0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
24	PO020030NU0002	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
25	PO0200330R0002	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
26	PO0200550R0002	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
27	PO020061NR0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
28	PO0200660R0003	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
29	PO0161010R0001	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	3	2	1	1	28
30	PO0970480U0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
31	PO0970610U0001	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
32	PO0161290R0001	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
33	PO098004NR0044	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
34	PO012026NU0023	2	3	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
35	PO0131690U0001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
36	PO015012NR0072	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
37	PO015027NR0045	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
38	PO015062NR0026	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
39	PO015175NR0150	2	2	1	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
40	PO015201NR0013	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
41	PO0161540R0001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
42	PO019035NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31

#	ID punto	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale
43	PO019040NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
44	PO019047NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
45	PO0181770U0020	1	2	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
46	PO019021NRA001	1	1	2	2	2	2	2	1	2	3	2	2	3	2	1	1	29
47	PO019049NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
48	PO019070NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
49	PO019071NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
50	PO019091NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
51	PO019103NRA001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
52	PO0200240R0001	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
53	PO0200280R0056	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
54	PO020032NR0001	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
55	PO0200570R0001	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
56	PO0970200U0003	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
57	PO0120700R1085	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
58	PO015059NR0135	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
59	PO015146NR0699	1	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
60	PO015146NR1105	1	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
61	PO015189NR0143	2	2	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
62	PO015194NR0015	2	2	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
63	PO015210NR0022	1	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
64	PO0161130R0001	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
65	PO0161220R0519	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
66	PO018065NRG001	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	30
67	PO0181550U0001	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
68	PO019094NU0944	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
69	PO020066NU0004	1	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
70	PO0120750R2020	1		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
71	PO012090NU2009	1		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
72	PO0161570R3380	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	38
73	PO0130280U0009	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
74	PO0151660U0001	1	8	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3		1	1	34
75	PO0131590U0001	2		3	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	2	1	2	33
76	PO015146NR2600		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	29
77	PO012123NU2007	1		4	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	2	32
78	PO019036NUA001	2		3	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3	2	1	1	32
79	PO0160240R0273	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
80	PO0160960U0001	2		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
81	PO0161150R0118	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	1	1	27
82	PO0161170R0112	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
83	PO0161330R0158		1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	1	1	28
84	PO012026NU3021		2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
85	PO0161770U0001	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
86	PO0162070R0001		1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29

#	ID punto	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale
87	PO012136NU0001		3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
88	PO018164NR0001	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	1		29
89	PO0130230U0003	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
90	PO013029NU0003	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
91	PO0130460U0001	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
92	PO013064NU0002	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
93	PO0131000U0002	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
94	PO0131330U0009	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
95	PO0160750U0002	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
96	PO018062NRD002	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
97	PO098006NR0030	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
98	PO098012NR0011	2		2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	30
99	PO098014NR0011	2		2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
100	PO098017NR0063	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
101	PO0980180U0001	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
102	PO098028NR0021	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
103	PO0980310U0014	1		2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	27
104	PO098042NR0008	1		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
105	PO098050NR0053	1		1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	3	2	1	1	26
106	PO098056NR0115	2		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
107	PO0980610U0001	2		1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	29
108	PO0180470U0001	1		2	2	2	2	2	2		3	2	1	2	1	1	1	24
109	PO018068NRP001	1	1		2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	1		25
110	PO0151400R0048	1		1	1		1	2	2	2	3	2	2	3	2		1	23
111	PO0180930U0006	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	33
112	PO0181220U0001	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	34
113	PO0200270R0053	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	32
114	PO0200420R0001	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	31
115	PO0200540R0001	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	3	1	1	32

L'ubicazione dei pozzi con serie di 16 anni e la loro classificazione per facies idrochimica è riportata in Figura 4.1. Su questo gruppo di pozzi, si è reso necessario un ulteriore controllo di qualità del dato, relativamente alla presenza ed eliminazione di valori di concentrazione pari a zero (valori nulli). In Tabella 4.5 sono riportati i valori nulli identificati ed eliminati dal dataset.

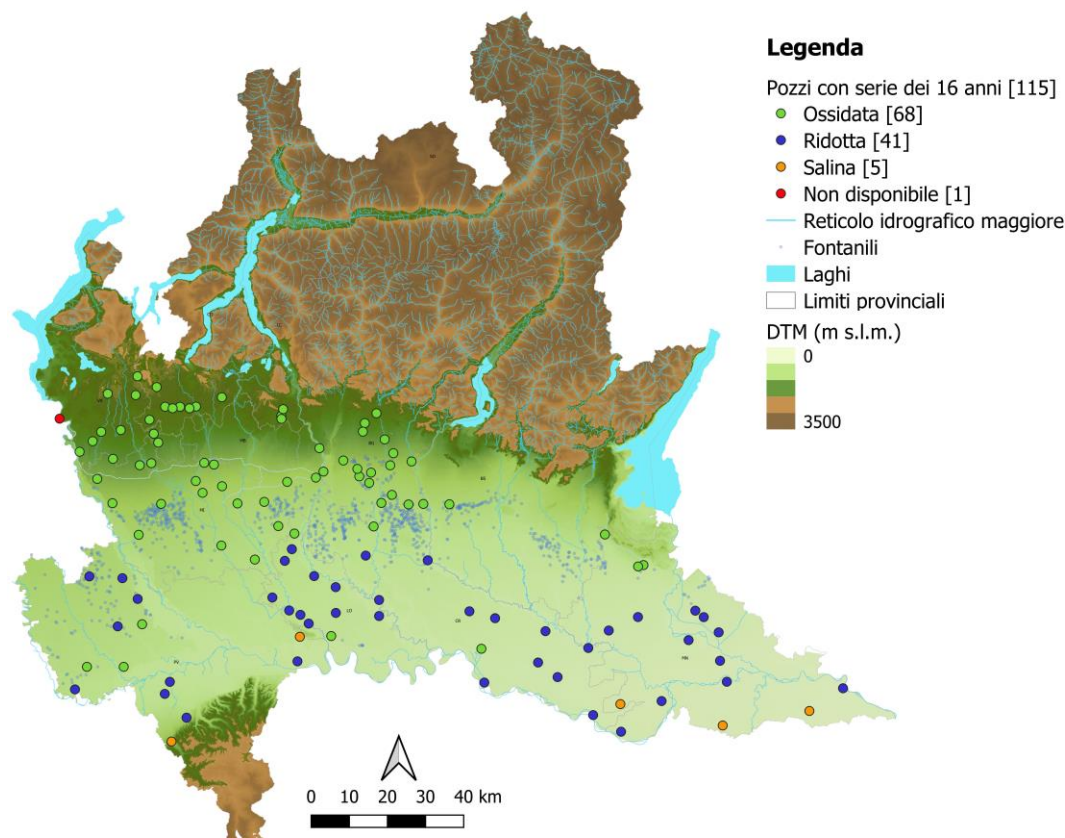


Figura 4.1 Distribuzione spaziale dei 115 pozzi con serie di concentrazione di nitrato lunga 16 anni, suddivisi per facies idrochimica

Tabella 4.5 Campioni per i quali sono stati individuati valori di misura pari a zero (nulli) ed esclusi dal dataset di lavoro

ANNO	PROVINCIA	COMUNE	CODICE_PUNTO	COORD_EST	COORD_NORD	SOSTANZA	VALORE mg/L
2017	LC	Verderio	PO097088NR0002	535566	5056994	Nitrati	0
2014	LC	Osnago	PO0970610U0001	530551	5058742	Nitrati	0
2014	MI	Bernate Ticino	PO015019NR0037	486234	5036651	Nitrati	0
2014	PV	Cassolnovo	PO0180350U0002	485404	5022621	Nitrati	0
2014	PV	Palestro	PO0181070U0003	464819	5015860	Nitrati	0
2014	PV	Rivanazzano	PO0181220U0001	501728	4974258	Nitrati	0

Dalla distribuzione dei 115 pozzi con concentrazione di nitrato su 16 anni (2006-2021), rappresentata in Figura 4.1, emerge una carenza importante di punti nelle province di Brescia e Monza-Brianza. Per riuscire ad identificare anche in queste aree dei punti utili ad effettuare il campionamento funzionale al presente progetto (Cap. 5), e dal momento che la selezione dei punti di monitoraggio è basata anche sulla presenza di una serie storica di nitrato su lungo periodo, sono stati selezionati ulteriori punti di monitoraggio ARPA con un criterio sulla lunghezza temporale della serie di nitrati meno restrittivo: possedere una serie continua di dati almeno sugli ultimi 10 anni (2012-2021). Questa selezione ha portato all'identificazione di 48 pozzi aggiuntivi; la loro ubicazione non limitata alle sole province di Brescia e Monza-Brianza, insieme ai 115 pozzi con serie di 16 anni, è riportata in Figura 4.2. In Tabella 4.6 è riportato l'elenco dei 48 punti aggiuntivi con serie di almeno 10 anni, con anche la numerosità del campione per ciascun anno.

In Figura 4.3 sono riportati degli esempi di andamento temporale per pozzo in funzione dei periodi di acquisizione (campagne di monitoraggio) effettuati da ARPA, che rappresenta quindi l'andamento del dato "tal quale"; questo tipo di grafico per tutti i pozzi considerati è riportato nell'Allegato I alla presente relazione. Dall'analisi della Tabella 4.6 e della Figura 4.3 emerge chiaramente la presenza di un passo temporale di campionamento molto variabile all'interno del periodo di riferimento 2006-2021. Per questo motivo, nelle successive elaborazioni (trend analysis, cluster analysis, ecc.), tutte le serie storiche sono state riportate ad un passo costante, tramite l'elaborazione di medie annuali, in accordo anche con le "Linee guida per la valutazione delle tendenze ascendenti e d'inversione degli inquinanti nelle acque sotterranee" (DM 6 luglio 2016; Menichetti & Romano, 2017).

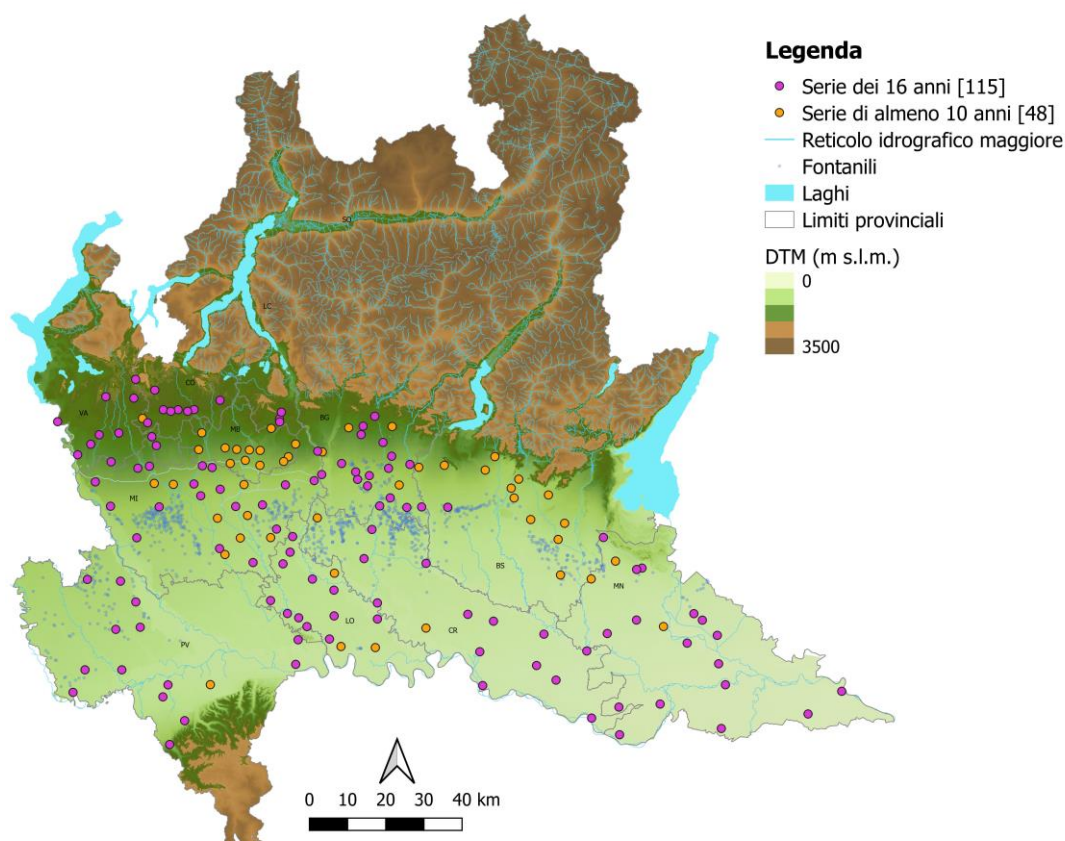


Figura 4.2 Ubicazione dei 48 punti aggiuntivi con serie di concentrazione di nitrato di almeno 10 anni e dei 115 punti con serie di 16 anni

Tabella 4.6 Pozzi aggiuntivi con serie di concentrazione di nitrato lunga almeno sugli ultimi 10 anni (2012-2021) con il conteggio delle misure per anno

#	ID punto	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale
1	PO0131310U0001		1					3	2	2	3	2	2	3	2	1	2	23
2	PO015081NR0044						1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	21
3	PO0151460U1638					2	1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	23
4	PO015154NR0013					1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	23
5	PO015159NR0012						1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	21
6	PO015182NR0018		3			1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	26
7	PO015192NR0212		1	1				1		2	3	2	2	3	2	1	1	19
8	PO0152050R0052				2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	26
9	PO015222NR0015						1	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	21
10	PO016042NU0001							2	1	2	3	2	1	2	2	1	1	17
11	PO0160510R0161			1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	27
12	PO0160830R0001			1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	27
13	PO016123NU0001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
14	PO0170290RC490	1					2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	23
15	PO0170290UB135				2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	26

#	ID punto	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Totale
16	PO017029NR0001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
17	PO017029NU0001							2	2	2	3	1	1	3	1	1	1	17
18	PO0170340RC481	2			2	2	2	2	2	2	2	2	12	6	2	1	1	40
19	PO0170400RC511	2			2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
20	PO0170590UC609	2			2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	2	29
21	PO0170600UC013	2			2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
22	PO0170860UC579	2			2	2	2	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	38
23	PO017113NRD106						2	2	2	2	3	2	12	6	2	1	1	35
24	PO0171140UC023	2			2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	28
25	PO0171500UC557	2			2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	2	29
26	PO0171630UC032				2	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	25
27	PO0181150U0006		1	1			2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	24
28	PO019051NRA001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
29	PO019084NRA002					1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	23
30	PO0200150R0001							2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	19
31	PO0200340R0001	1		1			1	2	2	2	3	2	12	3	2	1	1	33
32	PO0200510R0001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
33	PO0970440U0002							1	2	2	3	2	2	3	2	1	1	19
34	PO098019NR0307			1	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	27
35	PO098024NR0040							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
36	PO0980530U0003							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
37	PO108004NR0031							3	2	2	3	2	2	3	2	1	1	21
38	PO108005NU0002							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
39	PO108017NR0055							3	2	2	2	2	2	3	2	1	1	20
40	PO1080210U0002							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
41	PO108023NU0003							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
42	PO108027NR0020			1				2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	21
43	PO1080280U0004							2	2	2	2	1	2	3	2	1	1	18
44	PO1080310U0001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
45	PO108033NR0142							2	1	2	3	2	2	3	2		1	18
46	PO108033NU0120				2			3	2	2	3	2	2	3	2	1	1	23
47	PO108034NU0036							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20
48	PO108036NU0001							2	2	2	3	2	2	3	2	1	1	20

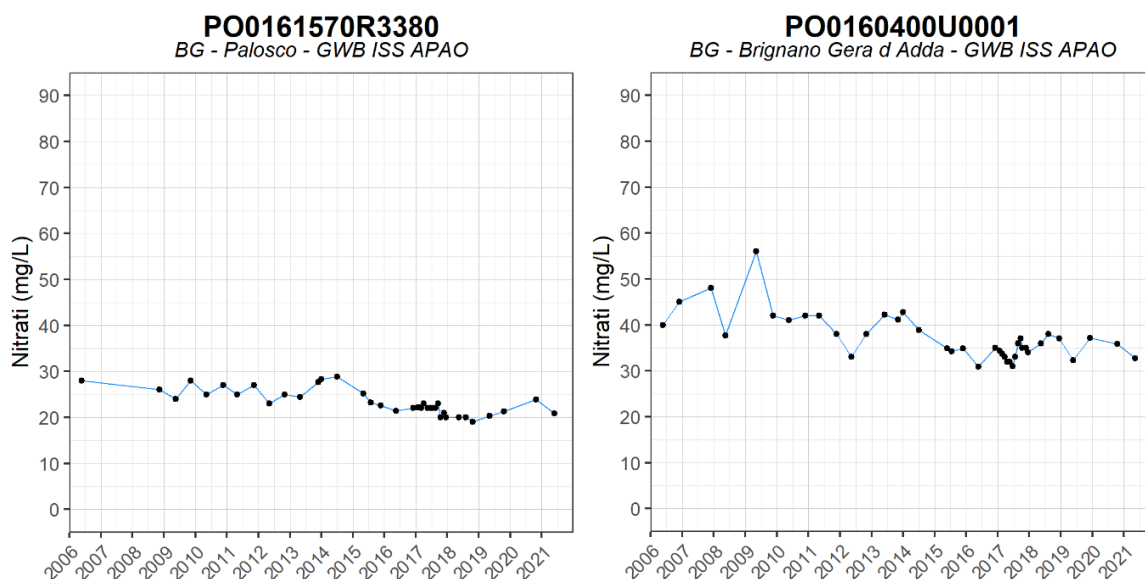


Figura 4.3 Esempi di andamento temporale delle concentrazioni dei nitrati in funzione dei periodi di acquisizione di ARPA (andamento temporale del dato "tal quale")

4.2 Identificazione e gestione degli outliers

Sia per i 115 pozzi con serie di 16 anni che per i 48 pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni, prima di calcolare la media annuale, è stata fatta un'analisi di identificazione e gestione degli outliers al fine di evitare distorsioni nel calcolo della media, parametro sensibile alla presenza di valori estremi. Il metodo per l'identificazione degli outliers è stato quello del range interquartile (Parrone et al., 2019), che definisce un campione ([c]) come outlier superiore secondo l'equazione:

$$[c] > 75\text{perc} + 1.5 \times (75\text{perc} - 25\text{perc})$$

e come outlier inferiore secondo l'equazione:

$$[c] < 25\text{perc} - 1.5 \times (75\text{perc} - 25\text{perc}).$$

L'analisi ha portato all'identificazione, nelle 115 serie con lunghezza di 16 anni, di un numero totale di 118 outliers superiori e 62 outliers inferiori. In maniera analoga, per le 48 serie di almeno 10 anni, sono stati individuati 20 outliers superiori e 29 outliers inferiori. L'Allegato II riporta l'identificazione completa degli outliers sui pozzi considerati con serie di 16 anni e di almeno 10 anni.

Per le successive fasi di lavoro è stata determinante la classificazione degli outliers ottenuti in veri (dovuti a errori e quindi da eliminare dal dataset) o falsi (dovuti a particolari condizioni del sistema, ma non ad errori, e quindi da mantenere nel dataset). Questa classificazione è stata svolta in collaborazione con ARPA Lombardia in funzione di informazioni specifiche, fornite da ARPA stessa, sui pozzi che hanno presentato outliers. La Tabella 4.7 e la Tabella 4.8 riportano rispettivamente l'elenco dei pozzi interessati da eliminazione degli outliers veri per la serie di 16 anni e quella di almeno 10 anni. In rari casi, in aggiunta all'eliminazione degli outliers veri indentificati tramite il metodo del range interquartile, sono stati eliminati altri outliers veri identificati tramite il metodo grafico. L'Allegato I riporta, nei grafici delle serie tal quale, l'indicazione di tutti gli outliers veri eliminati (punti siglati da una crocetta rossa).

Per la serie di 16 anni (Tabella 4.7), l'intervento ha interessato 19 pozzi sui 115 analizzati, eliminando un totale di 51 outliers. Per la serie di almeno 10 anni invece si riporta l'individuazione ed eliminazione di 38 veri outliers in 17 pozzi sui 48 esaminati (Tabella 4.8).

Tabella 4.7 Dettaglio sulla valutazione degli outliers veri per i pozzi con serie di 16 anni

#	Codice ARPA	PV	Comune	Outliers da range interquartile			Outliers veri da range interquartile			Outliers veri da metodo grafico			Outliers veri TOTALI
				Inferiori	Superiori	Totali	Inferiori	Superiori	Totali	Inferiori	Superiori	Totali	
1	PO0161010R0001	BG	Fontanella	4		4	4		4				4
2	PO0161170R0112	BG	Grassobbio		1	1		1	1				1
3	PO0161290R0001	BG	Lurano	2	1	3	2		2				2
4	PO013029NU0003	CO	Brenna	1	1	2	1		1				1
5	PO013064NU0002	CO	Cermenate	1		1	1		1				1
6	PO0980610U0001	LO	Zelo Buon Persico	1		1	1		1				1
7	PO0150020U0014	MI	Abbategrasso	3		3	3		3				3
8	PO015012NR0072	MI	Bareggio		1	1		1	1				1
9	PO015027NR0045	MI	Bollate	1		1	1		1				1
10	PO015062NR0026	MI	Castano Primo							2		2	2
11	PO015194NR0015	MI	San Giorgio su Legnano	6	1	7	5		5				5
12	PO015201NR0013	MI	San Vittore Olona	1	1	2	1		1				1
13	PO0200180R0037	MN	Cavriana	1	2	3	1	1	2				2
14	PO0200280R0056	MN	Guidizzolo		1	1		1	1		7	7	8
15	PO018065NRG001	PV	Frascarolo		1	1		1	1				1
16	PO012026NU3021	VA	Busto Arsizio	5	1	6	5		5				5
17	PO012050NU0004	VA	Cislago	8		8	8		8				8
18	PO0120700R1085	VA	Gallarate	1	1	2	1	1	2				2
19	PO0121180U0005	VA	Samarate	2		2	2		2				2
SOMMATORIA													51

Tabella 4.8 Dettaglio sulla valutazione degli outliers veri per i pozzi con serie di almeno 10 anni

#	Codice ARPA	PV	Comune	Outliers da range interquartile			Outliers veri da range interquartile			Outliers veri da metodo grafico			Outliers veri TOTALI
				Inferiori	Superiori	Totali	Inferiori	Superiori	Totali	Inferiori	Superiori	Totali	
1	PO0160830R0001	BG	Cortenuova	1			1		1				1
2	PO0170290UB135	BS	Brescia		4	4				1		1	1
3	PO0170340RC481	BS	Calvisano	2		2	2		2				2
4	PO0170400RC511	BS	Castegnato	1		1	1		1				1
5	PO0170600UC013	BS	Comezzano-Cizzago							12		12	12
6	PO0170860UC579	BS	Isorella	4	1	5		1	1				1
7	PO0171500UC557	BS	Pontoglio	1	1	2	1		1				1
8	PO0171630UC032	BS	Rodengo - Saiano	1		1	1		1	1		1	2
9	PO019051NRA001	CR	Grumello Cremonese ed Uniti	1		1	1		1				1
10	PO0970440U0002	LC	Lomagna	1		1	1		1				1
11	PO098019NR0307	LO	Codogno	2		2	2		2				2
12	PO1080280U0004	MB	Lissone	1		1	1		1	3		3	4
13	PO108033NU0120	MB	Monza		1	1		1	1				1
14	PO108036NU0001	MB	Ornago	2		2	2		2				2
15	PO015154NR0013	MI	Nerviano	3		3	3		3				3
16	PO015182NR0018	MI	Rho	3		3	2		2				2
17	PO0200510R0001	MN	Rodigo	1		1	1		1				1
SOMMATORIA													38

Di seguito sono discusse le casistiche particolari di due pozzi per i quali è stato eliminato un importante numero di outliers tramite il metodo grafico. I pozzi in questione sono PO0200280R0056 di Guidizzolo (MN) e PO0170600UC013 di Comezzano-Cizzago (BS). Per il pozzo di Guidizzolo (Figura 4.4) sono stati eliminati tutti i dati fino alla seconda metà del 2011 in quanto questi dati sono stati considerati affetti da uno sfasamento sistematico, probabilmente generato dalla modifica del punto di prelievo. Questo intervento ha comportato l'accorciamento della serie di dati, facendo così uscire il pozzo PO0200280R0056 dall'insieme dei pozzi con serie di 16 anni, che passa quindi da 115 a 114 pozzi, per farlo rientrare nel gruppo di pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni, che passa quindi da 48 a 49 pozzi.

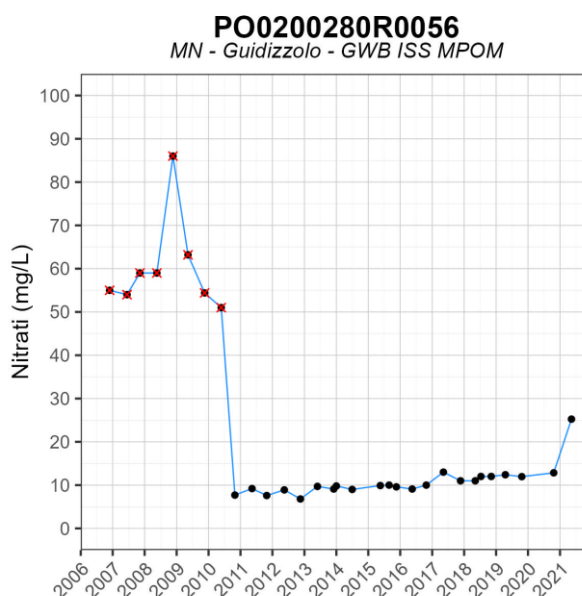


Figura 4.4 Andamento del dato temporale di nitrato “tal quale” per il pozzo PO0200280R0056. Con le crocette rosse sono indicati i veri outliers, eliminati dal dataset

Il PO0170600UC013 di Comezzano-Cizzago (BS), che è anche uno dei 4 pozzi per i quali sono stati acquisiti i dati direttamente dall'ente gestore Acque Bresciane S.r.l. (Cap. 3.2.5), ha presentato un andamento fortemente oscillatorio a partire dalla seconda metà del 2015 (Figura 4.5), di difficile interpretazione.

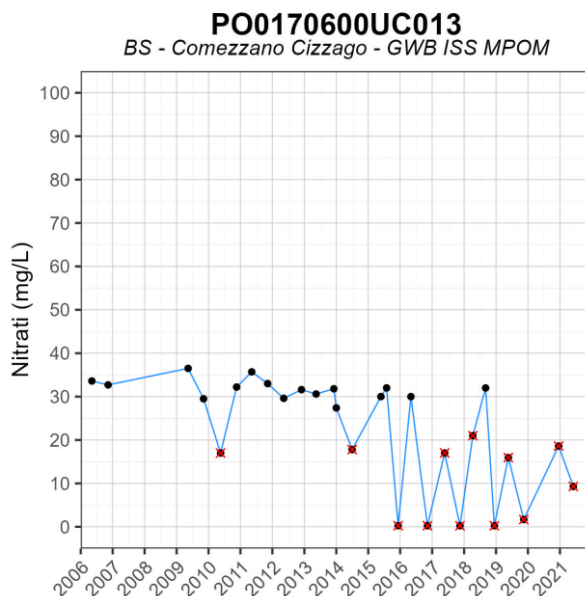


Figura 4.5 Valutazione delle anomalie nell'andamento di concentrazione riscontrate nel pozzo PO0170600UC013

Dal confronto dei dati stratigrafici/costruttivi e delle concentrazioni di nitrato fornite da ARPA e da Acque Bresciane S.r.l. è emersa un'incongruenza sulle concentrazioni di nitrato dovuta al fatto che il pozzo in questione è costituito da 2 colonne, la prima (colonna Bruschi A) captante l'ISS e la seconda (colonna Bruschi B) l'ISI. Il profilo anomalo di Figura 4.6 è stato quindi interpretato come il frutto di un campionamento indifferenziato sulle due colonne. Ai fini di questo studio, è stato quindi deciso di ricavare una serie di concentrazione di nitrato associabile all'ISS, combinando i dati di Acque Bresciane sulla colonna Bruschi A con quelli di ARPA >25 mg/L, ritenuti rappresentativi della colonna captante l'ISS (Figura 4.6). La Figura 4.7 rappresenta la serie finale considerata per questo pozzo nelle fasi successive del presente studio.

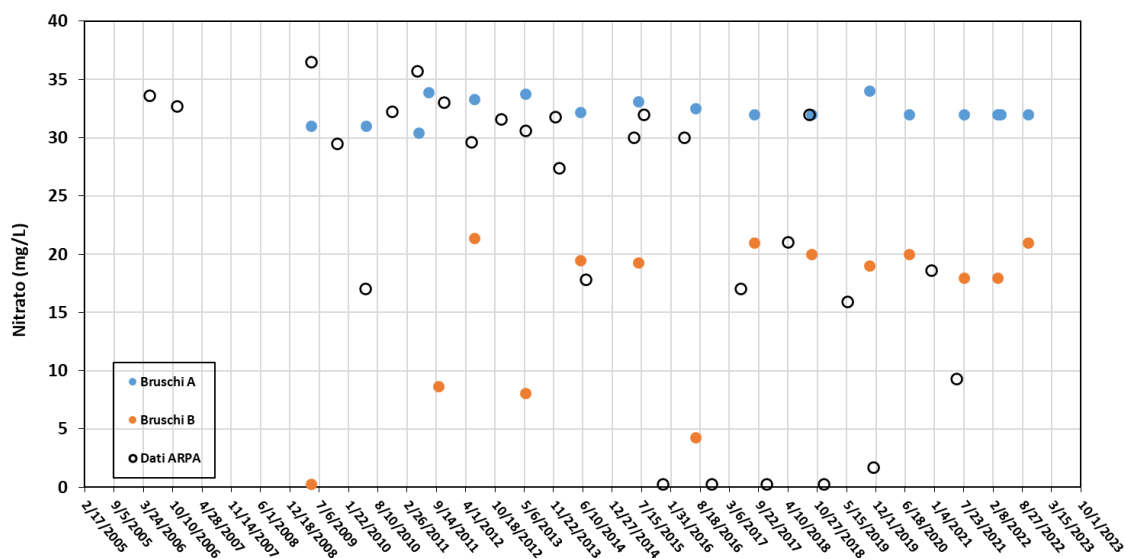


Figura 4.6 Rappresentazione unificata delle serie storiche di nitrato per le due colonne del pozzo registrate da Acque Bresciane e la serie temporale archiviata da ARPA e frutto di un campionamento indifferenziato delle due colonne

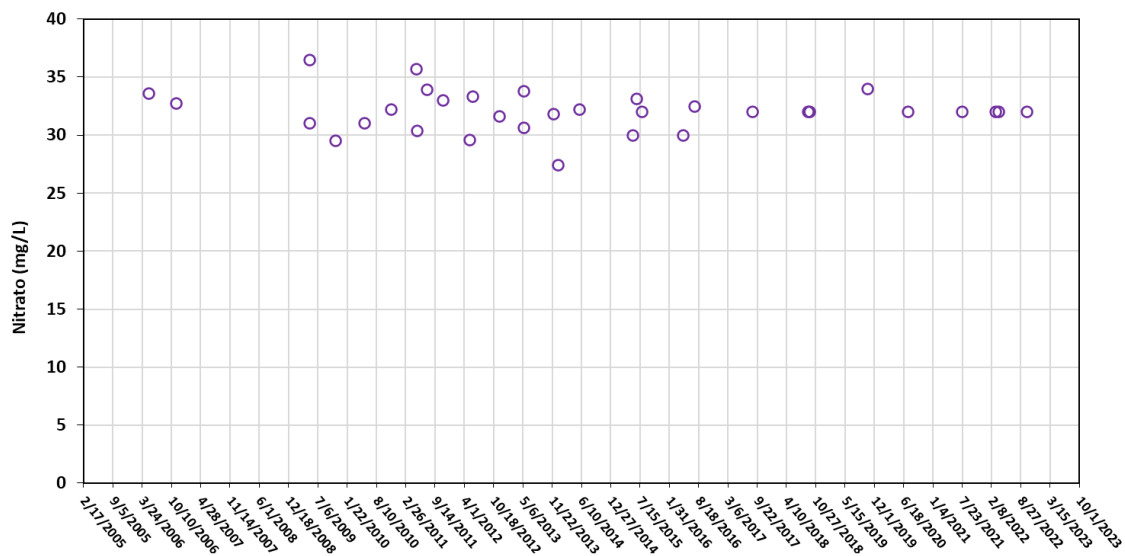


Figura 4.7 Serie storica della concentrazione di nitrato considerata per le fasi successive del presente lavoro in riferimento al pozzo PO0170600UC013

4.3 Trend analysis

L'analisi dell'andamento temporale (trend analysis) delle concentrazioni medie annue di nitrato in falda (epurate da outliers veri) è stata effettuata sia per i 114 pozzi con serie di 16 anni (2006-2021), sia sui 49 pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni (2012-2021). È stato eseguito il test di Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), test non parametrico e robusto rispetto alla presenza di outliers e che identifica la presenza di trend significativi monotoni, indipendentemente dal senso crescente o decrescente. Inoltre, è stato applicato il Sen's Slope estimator (Sen, 1968), un metodo per la stima della pendenza, anche questo non parametrico e robusto rispetto alla presenza di outliers. Per quanto riguarda i soli 49 pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni, che in alcuni casi presentano interi anni consecutivi senza valori (Tabella 4.6), è necessario specificare che sia il test Mann-Kendall che il metodo del Sen's slope estimator prevederebbero l'esclusione dei dati mancanti; questo però può falsare l'analisi nel momento in cui si riscontrano dati mancanti su più anni consecutivi poiché si andrebbe a considerare come consecutivi dati che sono originariamente anche molto distanti nel tempo. Per evitare in questa fase l'impiego di metodi di riempimento dei dati mancanti, che introducono sempre un'ulteriore incertezza, si è preferito escludere quei singoli dati che fossero distanti più di due anni dalla serie continua di dati (casistica riscontrabile nei 49 pozzi con serie di almeno 10 anni). Ad esempio, il pozzo PO0170290RC490 presenta un dato misurato nel 2006, poi 4 anni privi di dati e infine una serie completa di dati dal 2011 al 2021. Per evitare quindi di riempire artificialmente i 4 anni mancanti, o di considerare il dato del 2006 come adiacente al dato del 2011, si è optato per l'esclusione del dato del 2006 ed è stata considerata la sola serie completa dal 2011 al 2021.

La Figura 4.8 riporta degli esempi esplicativi di rappresentazione grafica dei risultati di questa elaborazione. Questi grafici presentano degli elementi comuni di seguito descritti:

- una linea di tendenza che mostra la pendenza calcolata tramite il Sen's slope estimator; per analogia, anche l'intercetta della retta è stata calcolata con il metodo applicato al calcolo della pendenza con il metodo del Sen's slope

(Frollini et al., 2021). Questa linea è rappresentata con il colore rosso se il trend è risultato significativo al test di Mann-Kendall con un livello di significatività al 95%, in grigio invece laddove il trend risulti non significativo;

- le medie dei valori annuali sui quadrienni di riferimento per la valutazione dell'andamento dei nitrati ai sensi della Direttiva Nitrati (DIR 91/676/CEE), ovvero 2008-2011, 2012-2015 e 2016-2019, con linee tratteggiate di colore nero.

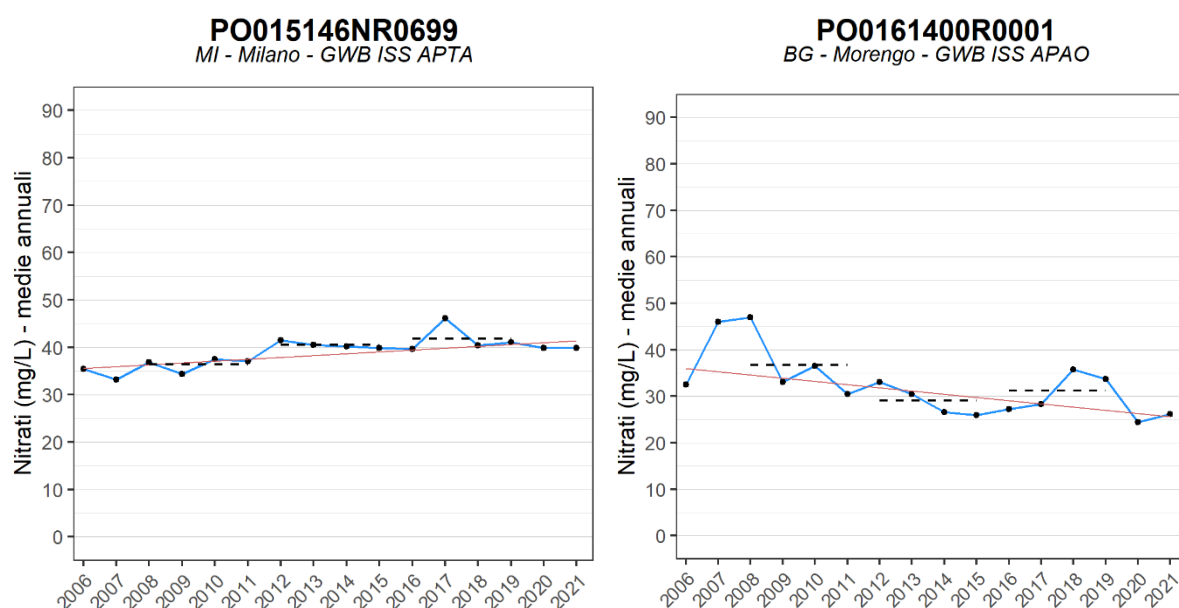


Figura 4.8 Esempi di rappresentazione grafica delle tendenze temporali di nitrati in 2 pozzi selezionati; linea rossa = linea di tendenza significativa (secondo il test di Mann-Kendall) con pendenza ed intercetta calcolati tramite Sen's slope estimator; linee nere tratteggiate = medie dei valori annuali sui quadrienni 2008-2011, 2012-2015 e 2016-2019

4.3.1 Pozzi con serie di 16 anni

Nel loro complesso, i trend ottenuti per i 114 pozzi con serie di 16 anni sono riassunti in Tabella 4.9 e mappati in Figura 4.9 Mappa dei trend di concentrazione dei nitrati in falda per i 114 pozzi con serie di 16 anni, mentre i grafici per ciascun pozzo sono riportati nell'Allegato I – parte A.

Le tendenze di nitrato identificate su 16 anni indicano 12 pozzi (10.5%) con trend crescente significativo, 36 pozzi (31.6%) con trend decrescente significativo e 66 pozzi (57.9%) con andamento stazionario (trend non significativo). Per 8 pozzi di

quest'ultima classe (andamento stazionario) risulta importante specificare la costante presenza di concentrazioni inferiori al LOQ. La Tabella 4.10 riporta la suddivisione in classi di concentrazione di nitrato, per ciascun tipo di andamento temporale individuato, utilizzando come riferimento la media dell'anno 2021 (anno più recente disponibile). Un aspetto importante da evidenziare è che per la classe di andamento stazionario, il 56% dei pozzi analizzati ($n = 37$) presenta una concentrazione di nitrato inferiore a 10 mg/L. La soglia di concentrazione di nitrato pari a 10 mg/L è stata considerata nel lavoro di Hinsby et al. (2008), basato sul progetto di ricerca Europeo BRIDGE (Background Criteria for the Identification of Groundwater Thresholds), come riferimento per l'identificazione di acque sotterranee caratterizzate da condizioni naturali, quindi prive di impatto antropico rilevante. I pozzi con andamento stazionario e concentrazioni inferiori a 10 mg/L potranno quindi difficilmente mutare verso un andamento decrescente, in quanto hanno probabilmente già raggiunto il minimo di concentrazioni possibile, che riflette il valore di fondo naturale di nitrato. Se considerassimo una soglia di 20 mg/L di nitrato, concentrazione ragionevolmente assumibile come minimo valore di fondo antropico per un'area così impattata come l'alta pianura lombarda, la percentuale di pozzi con andamento stazionario salirebbe al 70% ($n = 46$; Tabella 4.10). Questo vorrebbe dire che per il 70% dei pozzi identificati con andamento stazionario, il cambiamento verso un andamento decrescente sarebbe altamente improbabile, indipendentemente dalle azioni migliorative intraprese per la diminuzione dei carichi di azoto.

Occorre specificare, infine, che l'analisi delle tendenze tramite il test di Mann-Kendall è quanto più rappresentativa quanto più l'andamento temporale risulti essere monotono (i.e., costantemente crescente o decrescente), caratteristica che si riscontra raramente nei punti considerati (si veda l'Allegato I- parte A). È più frequente invece riscontrare andamenti non monotoni, come visibile, a titolo di esempio, nei casi dei pozzi PO015146NR0699 di Milano e PO0161400R0001 di Morengo (Figura 4.8). Il primo presenta un trend in crescita sui 16 anni ma è evidente una stazionarietà delle concentrazioni negli ultimi 5-7 anni, il secondo presenta un trend in decrescita sui 16 anni ma anche qui è evidente una stazionarietà negli ultimi anni, con addirittura un aumento della media quadriennale tra il periodo 2012-2015 e quello 2016-2019.

Tutte queste evidenze indicano come, per una comprensione della dinamica temporale delle concentrazioni di nitrato in falda della pianura lombarda, siano necessari strumenti elaborativi in grado di superare il vincolo dell'andamento monotono, condizione soddisfatta di rado nelle serie di dati prese in esame.

Tabella 4.9 Elenco dei 114 pozzi della serie di 16 anni con indicazione del trend di concentrazione del nitrato

#	Codice ARPA	PV	Comune	COORD EST	COORD NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test
1	PO012002NU0008	VA	Albizzate	485002	5065315	Decrescente S.
2	PO012026NU0023	VA	Busto Arsizio	486453	5052880	Decrescente S.
3	PO012026NU3021	VA	Busto Arsizio	486383	5048270	Decrescente S.
4	PO012050NU0004	VA	Cislago	497073	5054860	Stazionario
5	PO012067NU0012	VA	Fagnano Olona	488413	5055820	Stazionario
6	PO0120700R1085	VA	Gallarate	483292	5055355	Stazionario
7	PO0120750R2020	VA	Gerenzano	498243	5052530	Stazionario
8	PO012090NU2009	VA	Lonate Pozzolo	477623	5050127	Stazionario
9	PO0121180U0005	VA	Samarate	481042	5052887	Decrescente S.
10	PO012123NU2007	VA	Somma Lombardo	472384	5058790	Stazionario
11	PO012136NU0001	VA	Venegono Inferiore	492344	5064960	Stazionario
12	PO0130230U0003	CO	Binago	492805	5069886	Stazionario
13	PO0130280U0009	CO	Bregnano	503950	5061917	Decrescente S.
14	PO013029NU0003	CO	Brenna	514917	5064395	Decrescente S.
15	PO0130460U0001	CO	Carimate	508142	5061966	Stazionario
16	PO013064NU0002	CO	Cermenate	506428	5061507	Decrescente S.
17	PO0131000U0002	CO	Fenegrò	500053	5061924	Decrescente S.
18	PO0131330U0009	CO	Lomazzo	502017	5061511	Decrescente S.
19	PO0131590U0001	CO	Mozzate	495957	5058515	Stazionario
20	PO0131690U0001	CO	Oltrona di San Mamette	497832	5067057	Decrescente S.
21	PO0150020U0014	MI	Abbiategrasso	493116	5028379	Crescente S.
22	PO015012NR0072	MI	Bareggio	498995	5036486	Crescente S.
23	PO015019NR0037	MI	Bernate Ticino	486234	5036651	Stazionario
24	PO015027NR0045	MI	Bollate	508090	5042473	Stazionario
25	PO015059NR0135	MI	Cassano d Adda	539584	5043353	Stazionario
26	PO015062NR0026	MI	Castano Primo	482247	5043025	Stazionario
27	PO0151080U0002	MI	Gorgonzola	532049	5042247	Stazionario
28	PO0151400R0048	MI	Melegnano	523570	5021898	Stazionario
29	PO015146NR0699	MI	Milano	514971	5041096	Crescente S.
30	PO015146NR1105	MI	Milano	509865	5039379	Decrescente S.
31	PO015146NR2600	MI	Milano	519023	5036590	Stazionario
32	PO0151660U0001	MI	Paderno Dugnano	512851	5046778	Decrescente S.
33	PO015175NR0150	MI	Pioltello	526038	5036998	Stazionario
34	PO015189NR0143	MI	Rozzano	514795	5025566	Crescente S.
35	PO015194NR0015	MI	San Giorgio su Legnano	493394	5046599	Decrescente S.
36	PO015201NR0013	MI	San Vittore Olona	496431	5047129	Decrescente S.
37	PO0152060U0004	MI	Senago	510294	5047238	Crescente S.
38	PO015210NR0022	MI	Settala	529722	5030665	Crescente S.
39	PO0152210U0001	MI	Trezzo sull Adda	540511	5051067	Stazionario
40	PO0160240R0273	BG	Bergamo	552407	5057621	Stazionario
41	PO0160400U0001	BG	Brignano Gera d Adda	550962	5043677	Decrescente S.
42	PO0160750U0002	BG	Ciserano	546779	5047838	Decrescente S.
43	PO0160870R0001	BG	Covo	559508	5038835	Crescente S.
44	PO0160960U0001	BG	Fara Gera d Adda	541563	5044939	Decrescente S.
45	PO0161010R0001	BG	Fontanella	563868	5036331	Decrescente S.
46	PO0161130R0001	BG	Ghisalba	559894	5049743	Decrescente S.
47	PO0161150R0118	BG	Gorle	555466	5060205	Decrescente S.

#	Codice ARPA	PV	Comune	COORD EST	COORD NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test
48	PO0161170R0112	BG	Grassobbio	557613	5053360	Stazionario
49	PO0161220R0519	BG	Isso	556753	5036727	Decrescente S.
50	PO0161290R0001	BG	Lurano	550460	5045643	Decrescente S.
51	PO0161330R0158	BG	Martinengo	559068	5046574	Decrescente S.
52	PO0161400R0001	BG	Morengo	554043	5044672	Decrescente S.
53	PO0161540R0001	BG	Pagazzano	553557	5041981	Decrescente S.
54	PO0161570R3380	BG	Palosco	564666	5047586	Decrescente S.
55	PO0161770U0001	BG	Pumenengo	567748	5036468	Stazionario
56	PO0162070R0001	BG	Stezzano	551903	5055400	Crescente S.
57	PO0180470U0001	PV	Cervesina	501288	4989873	Stazionario
58	PO018047NR0001	PV	Cervesina	499957	4986727	Stazionario
59	PO0180500U0002	PV	Cilavegna	480174	5017487	Stazionario
60	PO018062NRD002	PV	Ferrera Erbognone	489193	4993809	Crescente S.
61	PO018065NRG001	PV	Frascarolo	476409	4987902	Stazionario
62	PO018068NRP001	PV	Gambolò	492857	5011583	Stazionario
63	PO0180690U0002	PV	Garlasco	494013	5004960	Stazionario
64	PO0180880U0001	PV	Mede	479549	4993807	Crescente S.
65	PO0180930U0006	PV	Miradolo Terme	535374	5001676	Stazionario
66	PO0181140U0002	PV	Pieve Porto Morone	534746	4995245	Stazionario
67	PO0181220U0001	PV	Rivanazzano	501728	4974258	Stazionario
68	PO0181550U0001	PV	Torrazza Coste	505656	4980492	Stazionario
69	PO018164NR0001	PV	Tromello	487613	5004406	Stazionario
70	PO0181770U0020	PV	Vigevano	488853	5017022	Stazionario
71	PO019021NRA001	CR	Casalmaggiore	612274	4981169	Stazionario
72	PO019033NRA001	CR	Corte de Frati	586564	5006546	Stazionario
73	PO019035NRA001	CR	Crema	552645	5022933	Decrescente S.
74	PO019036NUA001	CR	Cremona	582978	4998541	Crescente S.
75	PO019040NRA001	CR	Derovere	597838	4994940	Stazionario
76	PO019047NRA001	CR	Genivolta	568902	5021693	Stazionario
77	PO019049NRA001	CR	Gombito	556148	5011319	Decrescente S.
78	PO019070NRA001	CR	Pessina Cremonese	599778	5003151	Stazionario
79	PO019071NRA001	CR	Piadena Drizzona	611002	4998742	Stazionario
80	PO019077NRA001	CR	Pozzaglio ed Uniti	579839	5008345	Stazionario
81	PO019091NRA001	CR	San Martino del Lago	602954	4991122	Stazionario
82	PO019094NU0944	CR	Sergnano	554722	5030569	Crescente S.
83	PO019103NRA001	CR	Stagno Lombardo	583736	4989691	Stazionario
84	PO0200030R0001	MN	Bagnolo San Vito	645547	4995394	Stazionario
85	PO0200170R0001	MN	Castiglione delle Stiviere	615368	5028467	Stazionario
86	PO0200180R0037	MN	Cavriana	625471	5020450	Decrescente S.
87	PO0200240R0001	MN	Gazoldo degli Ippoliti	624030	5006846	Stazionario
88	PO0200270R0053	MN	Gonzaga	646253	4978449	Decrescente S.
89	PO020030NU0002	MN	Mantova	637302	5000803	Stazionario
90	PO020032NR0001	MN	Mariana Mantovana	616370	5003316	Stazionario
91	PO0200330R0002	MN	Marmirolo	639065	5008516	Stazionario
92	PO0200420R0001	MN	Poggio Rusco	668975	4982250	Stazionario
93	PO0200450R0001	MN	Porto Mantovano	641282	5006819	Stazionario
94	PO0200540R0001	MN	Sabbioneta	619421	4984050	Stazionario
95	PO0200550R0002	MN	San Benedetto Po	647325	4989901	Stazionario
96	PO0200570R0001	MN	Snn Giorgio di Mantova	645198	5002840	Stazionario
97	PO020061NR0001	MN	Sermide	677797	4988196	Stazionario
98	PO0200660R0003	MN	Viadana	619600	4976821	Stazionario
99	PO020066NU0004	MN	Viadana	630221	4984849	Stazionario
100	PO0970200U0003	LC	Cernusco Lombardone	530490	5059489	Decrescente S.
101	PO0970480U0001	LC	Merate	530989	5061279	Decrescente S.
102	PO0970610U0001	LC	Osnago	530551	5058742	Decrescente S.
103	PO098004NR0044	LO	Borghetto Lodigiano	537694	5005133	Stazionario
104	PO098006NR0030	LO	Brembio	544811	5007927	Stazionario
105	PO098012NR0011	LO	Caselle Lurani	528164	5011963	Stazionario
106	PO098014NR0011	LO	Castiglione d Adda	556152	5007112	Stazionario
107	PO098017NR0063	LO	Cavenago d Adda	544769	5014676	Decrescente S.

#	Codice ARPA	PV	Comune	COORD EST	COORD NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test
108	PO0980180U0001	LO	Cervignano d Adda	533273	5024618	Stazionario
109	PO098028NR0021	LO	Graffignana	535533	5007428	Stazionario
110	PO0980310U0014	LO	Lodi	539120	5017574	Decrescente S.
111	PO098042NR0008	LO	Orio Litta	543605	5001875	Stazionario
112	PO098050NR0053	LO	Sant Angelo Lodigiano	532578	5008556	Stazionario
113	PO098056NR0115	LO	Tavazzano con Villavesco	531423	5021560	Stazionario
114	PO0980610U0001	LO	Zelo Buon Persico	533952	5028705	Decrescente S.

S. Significativo

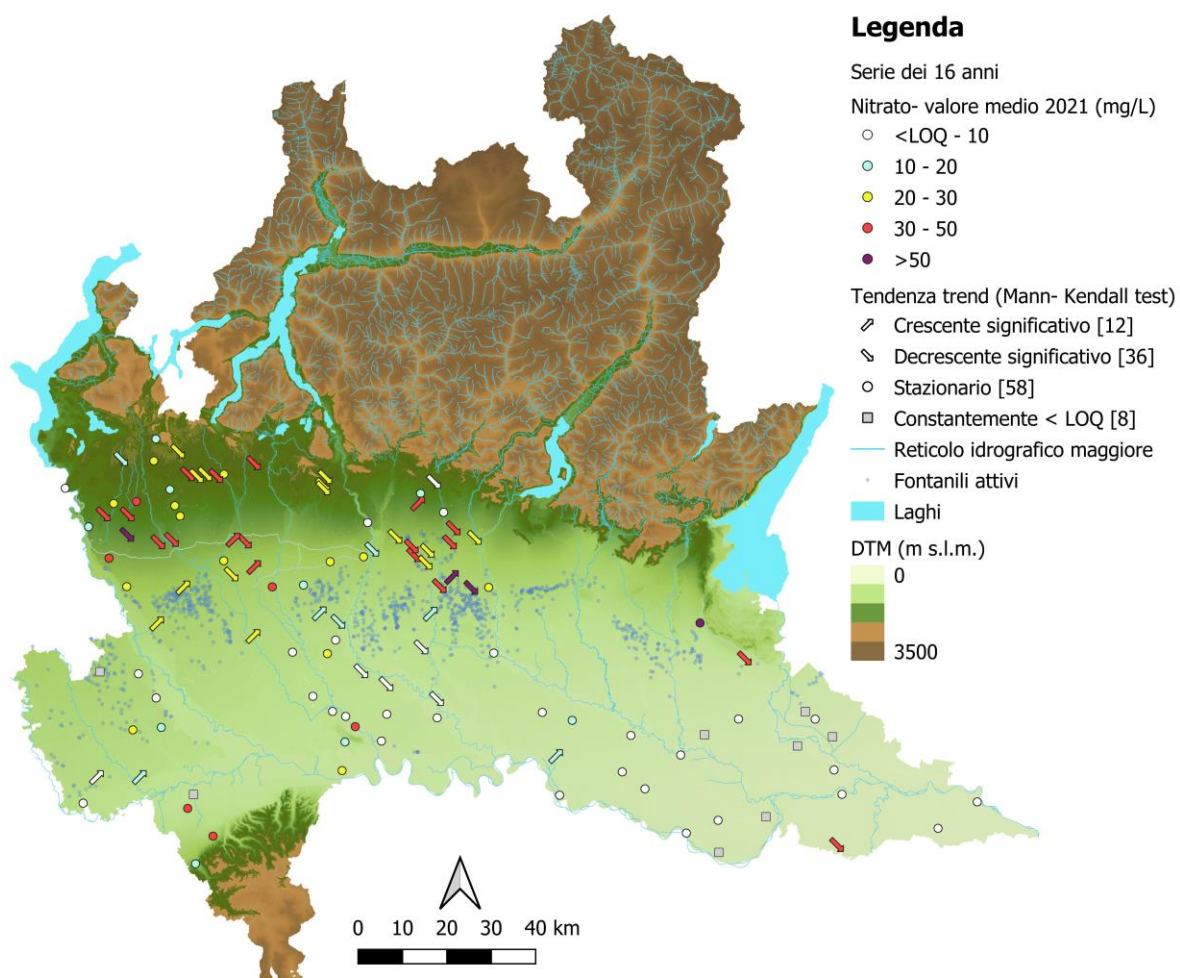


Figura 4.9 Mappa dei trend di concentrazione dei nitrati in falda per i 114 pozzi con serie di 16 anni

Tabella 4.10 Classi di concentrazione di nitrato (valori medi per l'anno 2021) per ciascun tipo di andamento temporale individuato. I colori delle celle fanno riferimento alla scala di colore della Figura 4.9

<i>Crescente significativo</i>			<i>Decrescente significativo</i>			<i>Stazionario</i>		
Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%	Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%	Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%
<LOQ-10	1	8	<LOQ-10	5	14	<LOQ-10	37	56
10- 20	4	33	10- 20	3	8	10- 20	9	14
20- 30	3	25	20- 30	11	31	20- 30	13	20
30- 50	3	25	30- 50	15	42	30- 50	6	9
>50	1	8	>50	2	6	>50	1	2
Totale	12		Totale	36		Totale	66	

4.3.2 Pozzi con serie di almeno 10 anni

I trend ottenuti per i 49 pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni sono riportati in Tabella 4.11 e mappati in Figura 4.10. L'Allegato I - Parte B contiene i grafici elaborati per ciascun pozzo. I risultati evidenziano la presenza di un trend crescente significativo per 3 pozzi (6.1%), un trend decrescente significativo per 16 pozzi (32.7%) e un andamento stazionario (trend non significativo) per 30 pozzi (61.2%). Queste proporzioni tra i vari tipi di andamento ottenuti sulle serie di almeno 10 anni sono in linea con quelle ottenute sulle serie di 16 anni (10.5% crescente, 31.6% decrescente e 57.9% stazionario). In Tabella 4.11 sono riportate le classi di concentrazioni, in base ai valori medi dell'anno 2021, per gli andamenti ottenuti. Per la classe di andamento stazionario, 14 pozzi, pari al 47% di questa classe, presentano concentrazioni di nitrato inferiore a 20 mg/L.

Tabella 4.11 Elenco dei 49 pozzi con serie di almeno 10 anni con indicazione del trend di concentrazione del nitrato

#	Codice ARPA	Provincia	Comune	COORD_EST	COORD_NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test
1	PO0181150U0006	PV	Pinarolo Po	512380	4989928	Stazionario
2	PO098019NR0307	LO	Codogno	555617	4999635	Decrescente S.
3	PO0980530U0003	LO	Senna Lodigiana	546615	4999911	Stazionario
4	PO019051NRA001	CR	Grumello Cremonese ed Uniti	568876	5004743	Stazionario
5	PO0200510R0001	MN	Rodigo	631099	5005144	Stazionario
6	PO0200150R0001	MN	Castel Goffredo	612166	5017617	Stazionario
7	PO0170860UC579	BS	Isorella	604118	5018644	Stazionario
8	PO098024NR0040	LO	Corte Palasio	544899	5019115	Crescente S.
9	PO0200280R0056	MN	Guidizzolo	624064	5020093	Crescente S.
10	PO0200340R0001	MN	Medole	618524	5022275	Stazionario
11	PO015159NR0012	MI	Opera	516220	5024004	Decrescente S.
12	PO0170340RC481	BS	Calvisano	603498	5027951	Stazionario
13	PO015192NR0212	MI	San Donato Milanese	520235	5028325	Stazionario
14	PO015222NR0015	MI	Tribiano	528183	5028430	Stazionario
15	PO017113NRD106	BS	Montichiari	605200	5032183	Stazionario
16	PO0171140UC023	BS	Montirone	596315	5033160	Crescente S.
17	PO0151460U1638	MI	Milano	514248	5033514	Decrescente S.
18	PO019084NRA002	CR	Rivolta d'Adda	540419	5033590	Stazionario
19	PO0152050R0052	MI	Segrate	522133	5034224	Stazionario
20	PO0170600UC013	BS	Comezzano-Cizzago	574582	5036376	Stazionario
21	PO017029NR0001	BS	Brescia	591971	5038818	Stazionario
22	PO0170290RC490	BS	Brescia	600963	5039596	Stazionario
23	PO0170290UB135	BS	Brescia	591217	5041379	Stazionario
24	PO0160830R0001	BG	Cortenuova	561871	5042210	Stazionario
25	PO015081NR0044	MI	Cologno Monzese	521218	5042320	Stazionario
26	PO015182NR0018	MI	Rho	502700	5042369	Stazionario
27	PO015154NR0013	MI	Nerviano	497698	5042622	Decrescente S.
28	PO017029NU0001	BS	Brescia	593181	5043740	Stazionario
29	PO0170400RC511	BS	Castegnato	584404	5046117	Stazionario
30	PO0171500UC557	BS	Pontoglio	566999	5046842	Stazionario
31	PO1080210U0002	MB	Concorezzo	525376	5047357	Stazionario
32	PO0170590UC609	BS	Cologne	573688	5047365	Stazionario
33	PO108034NU0036	MB	Muggiò	517603	5047860	Decrescente S.
34	PO108017NR0055	MB	Cavenago di Brianza	531593	5048360	Decrescente S.
35	PO108033NU0120	MB	Monza	521556	5048668	Stazionario
36	PO108036NU0001	MB	Ornago	532830	5049602	Decrescente S.
37	PO0171630UC032	BS	Rodengo – Saiano	586929	5049639	Decrescente S.
38	PO0160510R0161	BG	Capriate San Gervasio	541717	5050871	Decrescente S.
39	PO108004NR0031	MB	Arcore	525421	5051267	Decrescente S.
40	PO108033NR0142	MB	Monza	522621	5051383	Stazionario
41	PO108027NR0020	MB	Limbrate	509330	5051480	Stazionario
42	PO1080280U0004	MB	Lissone	519297	5051532	Decrescente S.

#	Codice ARPA	Provincia	Comune	COORD_EST	COORD_NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test
43	PO108023NU0003	MB	Desio	516261	5051920	Decrescente S.
44	PO1080310U0001	MB	Mezzago	534712	5052931	Decrescente S.
45	PO108005NU0002	MB	Barlassina	510155	5055878	DeCrescente S.
46	PO0970440U0002	LC	Lomagna	528339	5057036	Decrescente S.
47	PO016123NU0001	BG	Lallio	548636	5057202	Decrescente S.
48	PO016042NU0001	BG	Brusaporto	560015	5057521	Stazionario
49	PO0131310U0001	CO	Locate Varesino	494595	5059657	Stazionario

S. Significativo

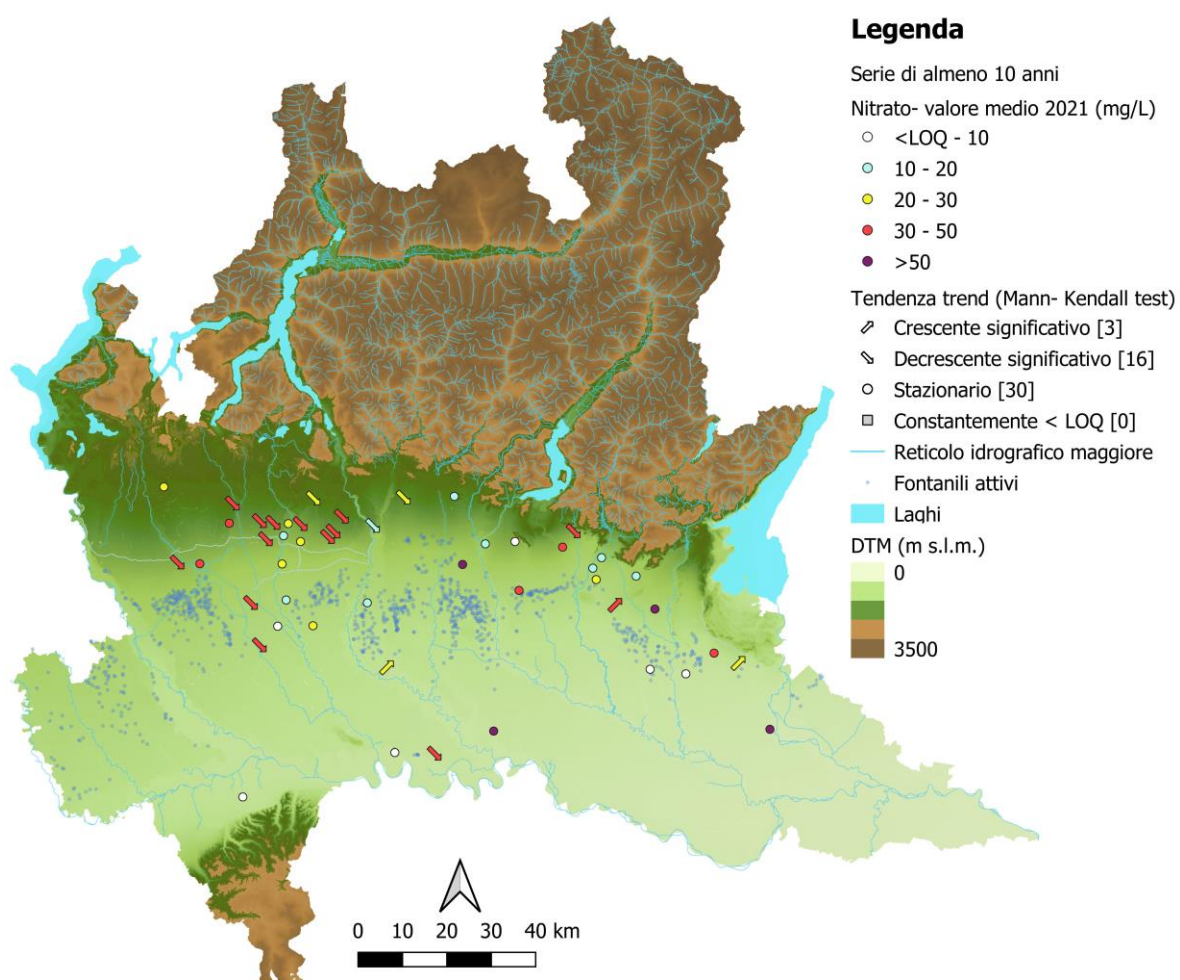


Figura 4.10 Mappa dei trend di concentrazione dei nitrati in falda per i 49 pozzi con serie di almeno 10 anni

Tabella 4.12 Classi di concentrazione di nitrato (valori medi per l'anno 2021) per ciascun tipo di andamento temporale individuato. I colori delle celle fanno riferimento alla scala di colore della Figura 4.10

<i>Crescente significativo</i>			<i>Decrescente significativo</i>			<i>Stazionario</i>		
Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%	Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%	Classe NO ₃ (mg/L)	# Pozzi	%
<LOQ-10			<LOQ-10			<LOQ-10	6	20
10- 20			10- 20	1	6	10- 20	8	27
20- 30	2	67	20- 30	2	13	20- 30	6	20
30- 50	1	33	30- 50	13	81	30- 50	5	17
>50			>50			>50	5	17
Totale	3		Totale	16		Totale	30	

4.4 Confronto tra andamenti temporali ottenuti tramite trend analysis su lungo periodo e differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati (breve periodo)

Uno degli obiettivi del presente lavoro è quello di valutare l'andamento temporale dei nitrati in falda su lungo periodo, che, in funzione dei dati raccolti, è risultato pari a 16 anni. Un aspetto di sicuro interesse è quello del confronto tra le tendenze temporali ottenute sul lungo periodo di 16 anni e quelle ottenute secondo le prescrizioni della Direttiva Nitrati (91/676/CEE), che prevede il confronto delle medie di nitrato ottenute su 2 quadrienni adiacenti, considerando quindi un periodo totale di 8 anni, più breve del precedente (esattamente la sua metà). È stato quindi effettuato il confronto delle tendenze temporali di nitrato calcolate sui 114 pozzi con serie di 16 anni tramite:

- trend analysis secondo il test Mann-Kendall sul periodo di 16 anni (2006-2021; Figura 4.9),
- differenza (delta) tra le medie di concentrazione di nitrato calcolate rispettivamente sui quadrienni adiacenti 2012-2015 e 2016-2019, quindi per un periodo totale d'indagine di 8 anni (2012-2019; Figura 4.11).

Le tendenze su 8 anni secondo la variazione sui quadrienni sono state identificate secondo i seguenti criteri, in accordo alla Direttiva Nitrati:

- trend crescente significativo, se la media di concentrazione di nitrato del quadriennio successivo è maggiore di almeno 1 mg/L rispetto a quella del quadriennio precedente,

- trend decrescente significativo, se la media di concentrazione di nitrato del quadriennio successivo è minore di almeno 1 mg/L rispetto a quella del quadriennio precedente,
- trend stazionario, se la differenza tra le medie dei due quadrienni è inferiore a 1 mg/L.

Il calcolo di queste tendenze su 8 anni (Figura 4.11) ha portato a identificare 24 pozzi (21.1%) con andamento crescente significativo, 44 pozzi (38.6%) con andamento decrescente significativo e 46 pozzi (40.4%) con andamento stazionario.

Il confronto dei risultati ottenuti dalla trend analysis su 16 anni (Cap. 4.3.1) con quelli dalla differenza tra quadrienni (8 anni) fa emergere una diminuzione dei trend crescenti significativi (10.5% su 16 anni contro 21.1% su 8 anni). Al contempo, i trend decrescenti significativi sono diminuiti (31.6% su 16 anni contro 38.6% su 8 anni) e quelli stazionari aumentati (57.9% su 16 anni contro 40.4% su 8 anni). Un confronto più oggettivo dei risultati ottenuti tra i due periodi (e metodi) considerati è schematizzato in Figura 4.12. È possibile notare come per 66 dei 114 pozzi considerati (57.9%) l'andamento temporale ottenuto sui due periodi sia lo stesso, mentre per 48 pozzi (42.1%) l'andamento temporale ottenuto sia diverso. Andando a dettagliare queste differenze negli andamenti ottenuti (Figura 4.12), sono stati distinti i casi in cui l'andamento ottenuto sui 16 anni (trend analysis) faccia emergere un quadro migliorativo della situazione (i.e., minore contaminazione in falda da nitrati) rispetto a quanto ottenuto sugli 8 anni (delta quadrienni); queste casistiche sono evidenziate in verde nello schema di Figura 4.12. Al contrario, le differenze che fanno emergere un quadro peggiorativo sui 16 anni rispetto a quello ottenuto sugli 8 anni sono evidenziate in rosso nello schema di Figura 4.12. La sintesi di queste differenze ottenute indica che per il 22.0% dei punti totali l'andamento temporale calcolato sui 16 anni ha fatto emergere un quadro migliorativo del problema dei nitrati in falda rispetto all'andamento calcolato sugli 8 anni, mentre per il 20.2% la situazione è esattamente opposta. Il bilancio totale indica quindi una differenza netta del quadro informativo ottenuto dai due metodi applicati per solo il 2% dei pozzi indagati. In altre parole, il confronto indica che l'analisi su 16 anni (tramite trend analysis) e quella su 8 anni (delta quadrienni) hanno fornito sostanzialmente lo stesso quadro informativo globale sull'evoluzione dei

nitrati in falda. Questo non significa che valutare l'andamento temporale del nitrato sul lungo periodo sia ridondante poiché fornisce lo stesso risultato di una valutazione su breve periodo, ma piuttosto mette ancora a nudo i limiti del test di Mann-Kendall su serie non monotone (come discusso al Cap. 4.3). Infatti, utilizzando gli stessi orizzonti temporali (16 vs 8 anni) vedremo successivamente come la tecnica della cluster analysis faccia emergere un quadro informativo differente sul lungo periodo rispetto a quello sul breve periodo (Cap. 4.6).

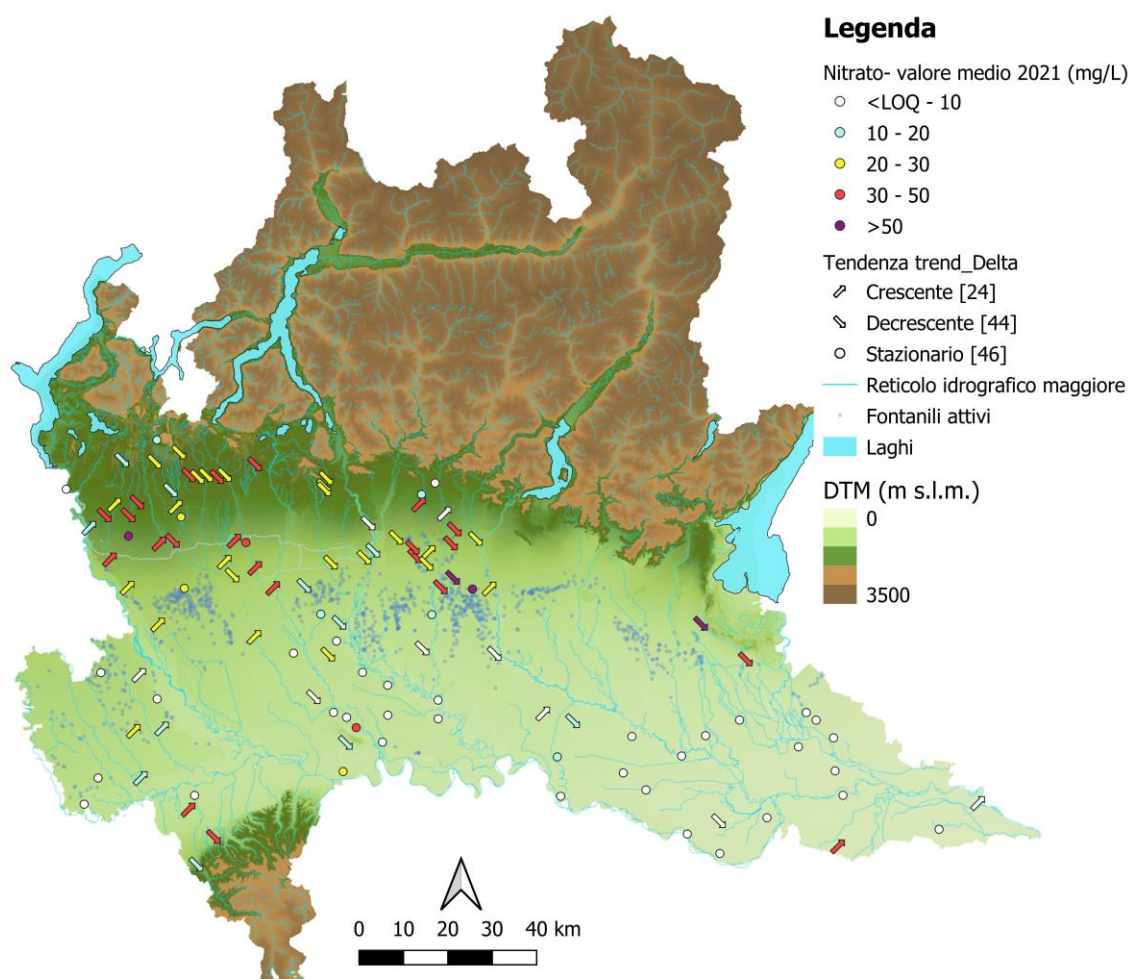


Figura 4.11 Mappa delle tendenze dei nitrati in falda per i 114 pozzi con serie di 16 anni tramite il calcolo del delta tra le medie degli ultimi due quadrienni (2012-2015 e 2016-2019)

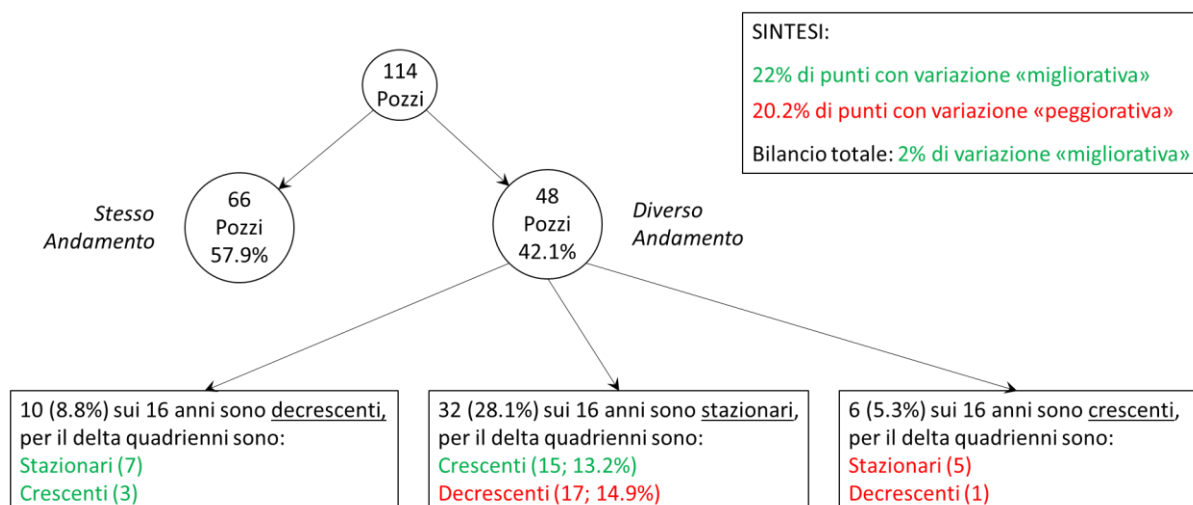


Figura 4.12 Schema di confronto tra le tendenze di nitrato tramite il test di Mann- Kendall e il delta calcolato sui due quadrienni più recenti per i 114 pozzi della serie dei 16 anni

4.5 Identificazione di inversioni di tendenza

Come primo passo nel superamento dei limiti del test di Mann-Kendall, al fine di caratterizzare andamenti di tipo non-monotono è stata effettuata un'analisi per l'identificazione di eventuali punti di flesso della serie storica che segnino il passaggio da una fase iniziale crescente ad una seconda fase decrescente. L'analisi di questa inversione di tendenza è stata effettuata secondo il metodo proposto da Frollini et al. (2021) modificato per raggiungere una maggiore precisione rispetto al dataset oggetto di studio: il test applicato consiste nel suddividere iterativamente la serie storica in una sottoserie iniziale ed una finale, allungando ad ogni iterazione la sottoserie iniziale e accorciando quella finale. Per ciascuna iterazione viene calcolato il Sen's slope e viene applicato il test di Mann-Kendall ad entrambe le sottoserie. Le iterazioni si fermano quando il test riscontra una sottoserie iniziale con pendenza crescente, non necessariamente significativa, e una sottoserie finale significativamente decrescente. All'interno del presente lavoro, si è riscontrata una maggiore precisione dei risultati del test inserendo un ulteriore vincolo per l'arresto delle iterazioni che impone che il punto di flesso debba essere in corrispondenza di un valore di concentrazione superiore all'80° percentile dei valori dell'intera serie storica.

Questo test per l'identificazione di un'inversione di tendenza è stato applicato esclusivamente alle serie di 16 anni, ritenendo quelle di almeno 10 anni troppo corte per l'ottenimento di risultati significativi. Tra i 114 pozzi con serie di 16 anni, il punto di

flesso è stato identificato per 29 pozzi (25%). La Tabella 4.13 riporta l'elenco di questi pozzi, con l'indicazione dell'anno in cui è registrato il flesso, mentre nell'Allegato I – parte A sono riportati i grafici con l'indicazione della presenza di inversione di tendenza. In questi grafici, l'eventuale presenza di un punto di flesso è indicata con una linea verticale tratteggiata arancione; quando è presente il punto di flesso, sono rappresentate con linea tratteggiata arancione le tendenze crescenti prima del flesso e decrescenti dopo il flesso.

Il risultato ottenuto della presenza di flesso per 29 pozzi (circa un quarto dei pozzi investigati) conferma la necessità di utilizzo di una tecnica di analisi degli andamenti temporali capace di implementare la casistica di inversione di tendenza (come la cluster analysis discussa nel capitolo successivo).

Tabella 4.13 Elenco dei 29 pozzi della serie dei 16 anni con indicazione del trend di nitrato e della presenza di un flesso nella serie storica

#	Codice ARPA	PV	Comune	COORD EST	COORD NORD	Trend nitrato secondo Mann Kendall test	Presenza di Flesso	Anno Flesso
1	PO012002NU0008	VA	Albizzate	485002	5065315	Decrescente S.	SI	2009
2	PO012026NU0023	VA	Busto Arsizio	486453	5052880	Decrescente S.	SI	2011
3	PO012067NU0012	VA	Fagnano Olona	488413	5055820	Stazionario	SI	2010
4	PO012090NU2009	VA	Lonate Pozzolo	477623	5050127	Stazionario	SI	2016
5	PO0130230U0003	CO	Binago	492805	5069886	Stazionario	SI	2011
6	PO013029NU0003	CO	Brenna	514917	5064395	Decrescente S.	SI	2009
7	PO0130460U0001	CO	Carimate	508142	5061966	Stazionario	SI	2012
8	PO0131330U0009	CO	Lomazzo	502017	5061511	Decrescente S.	SI	2010
9	PO0150020U0014	MI	Abbiategrasso	493116	5028379	Crescente S.	SI	2017
10	PO015059NR0135	MI	Cassano d Adda	539584	5043353	Stazionario	SI	2014
11	PO0151400R0048	MI	Melegnano	523570	5021898	Stazionario	SI	2015
12	PO015146NR1105	MI	Milano	509865	5039379	Decrescente S.	SI	2010
13	PO0151660U0001	MI	Paderno Dugnano	512851	5046778	Decrescente S.	SI	2009
14	PO015194NR0015	MI	San Giorgio su Legnano	493394	5046599	Decrescente S.	SI	2009
15	PO015201NR0013	MI	San Vittore Olona	496431	5047129	Decrescente S.	SI	2009
16	PO015210NR0022	MI	Settala	529722	5030665	Crescente S.	SI	2014
17	PO0160400U0001	BG	Brignano Gera d Adda	550962	5043677	Decrescente S.	SI	2009
18	PO0160750U0002	BG	Ciserano	546779	5047838	Decrescente S.	SI	2009
19	PO0160870R0001	BG	Covo	559508	5038835	Crescente S.	SI	2013
20	PO0160960U0001	BG	Fara Gera d Adda	541563	5044939	Decrescente S.	SI	2011
21	PO0161130R0001	BG	Ghisalba	559894	5049743	Decrescente S.	SI	2009
22	PO0161220R0519	BG	Isso	556753	5036727	Decrescente S.	SI	2010
23	PO0161290R0001	BG	Lurano	550460	5045643	Decrescente S.	SI	2009
24	PO0181140U0002	PV	Pieve Porto Morone	534746	4995245	Stazionario	SI	2014
25	PO019077NRA001	CR	Pozzaglio ed Uniti	579839	5008345	Stazionario	SI	2016

26	PO0200180R0037	MN	Cavriana	625471	5020450	Decrescente S.	SI	2009
27	PO0970200U0003	LC	Cernusco Lombardone	530490	5059489	Decrescente S.	SI	2009
28	PO0970480U0001	LC	Merate	530989	5061279	Decrescente S.	SI	2009
29	PO0980180U0001	LO	Cervignano d Adda	533273	5024618	Stazionario	SI	2011

4.6 Cluster analysis temporale

La presenza di andamenti temporali non monotoni ha reso necessaria l'adozione di tecniche statistiche più avanzate del test di Mann-Kendall e del Sen's slope estimator per caratterizzare la loro evoluzione temporale. La tecnica statistica scelta è stata quella della cluster analysis temporale, che permette di identificare gruppi di pozzi caratterizzati da andamento temporale simile (Giorgino et al., 2009).

Si è scelto di applicare la cluster analysis solo su quei pozzi con facies ossidata, condizione che permette la migrazione del nitrato in falda per soli processi conservativi (senza degradazione). Sono stati quindi esclusi i pozzi con facies ridotta e salina, per i quali i processi non conservativi di denitrificazione potrebbero governare l'andamento temporale delle concentrazioni di nitrato in falda, generando quindi un andamento esclusivamente dipendente dall'intensità di denitrificazione.

La cluster analysis è stata effettuata sui dati a media sottratta, ovvero sottraendo ad ogni valore annuale la media di tutta la serie storica del singolo pozzo. Questo passaggio ha avuto l'obiettivo di individuare gruppi di pozzi con comportamento analogo nel tempo, indipendentemente dai valori assoluti di concentrazione. È stato utilizzato il metodo gerarchico di Ward, basato sulla distanza euclidea al quadrato come misura della similarità tra campioni. Poiché la cluster analysis richiede in input una matrice continua di valori, eventuali dati mancanti nelle serie di concentrazioni dei punti sono stati colmati calcolando la media tra i due valori adiacenti.

4.6.1 Pozzi con serie di 16 anni

All'interno del dataset relativo ai 114 pozzi con serie di 16 anni, i pozzi con facies ossidata sono risultati pari a 67. La cluster analysis temporale ha avuto quindi una matrice di input costituita da 67 punti e un'unica variabile per 16 anni d'informazione (concentrazione di nitrato a media sottratta).

La cluster analysis effettuata ha portato all'ottenimento di 10 cluster (A÷J; Figura 4.13), di cui i primi 6 (A÷F) contengono l'88% dei pozzi considerati, rappresentando così gli andamenti più diffusi a scala regionale. Gli ultimi 4 cluster (G÷J) sono costituiti invece da piccoli raggruppamenti o pozzi singoli (singleton), determinati da processi a scala locale o pozzo-specifici. Difatti, le attività di epurazione del dataset iniziale dei veri outliers (Cap 4.2) ha permesso di ottenere un numero limitato di singleton, circoscritti ai soli punti governati da fattori pozzo-specifici.



Figura 4.13 Rappresentazione dei cluster come andamento su scala temporale della concentrazione del nitrato a media sottratta

Il dettaglio dei cluster ottenuti per ciascun punto è riportato in Tabella 4.14, insieme ai risultati ottenuti dal test per la presenza di flesso, dalla trend analysis e dalla differenza dei quadrienni della Direttiva Nitrati. Per ottenere una descrizione più oggettiva

possibile dei cluster ottenuti, ciascun cluster è stato classificato in funzione dei seguenti criteri:

1. se almeno il 40% dei punti appartenenti ad un cluster ha presentato un flesso, individuato secondo il test modificato da Frollini et al. (2021), il cluster è stato caratterizzato dalla presenza di un'inversione di tendenza dei nitrati;
2. in caso contrario (presenza di flesso per meno del 40% dei punti), il cluster è stato caratterizzato dall'andamento ottenuto dalla trend analysis (test di Mann-Kendall) che è risultato più frequente (crescente, decrescente o stazionario).

Tabella 4.14 Tabella riassuntiva delle analisi svolte per i 67 pozzi della serie dei 16 anni sui quali è stata svolta la cluster analysis; la tipologia di trend tramite differenza di due quadrienni fa riferimento agli ultimi due quadrienni (2012-2015 e 2016-2019)

#	Codice ARPA	PV	COMUNE	Appartenenza Cluster	Trend secondo Mann Kendall test	Presenza di Flesso nella Serie	Anno Flesso	Trend secondo Differenza tra Quadrienni	Andamento derivato da Cluster Analysis
1	PO0160240R0273	BG	Bergamo	A	Stazionario	NO		Stazionario	Stazionario
2	PO0160960U0001	BG	Fara Gera d'Adda	A	Decrescente	SI	2011	Decrescente	Stazionario
3	PO0161150R0118	BG	Gorle	A	Decrescente	NO		Stazionario	Stazionario
4	PO0161170R0112	BG	Grassobbio	A	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
5	PO0130230U0003	CO	Binago	A	Stazionario	SI	2011	Stazionario	Stazionario
6	PO098042NR0008	LO	Orio Litta	A	Stazionario	NO		Stazionario	Stazionario
7	PO015027NR0045	MI	Bollate	A	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
8	PO0180690U0002	PV	Garlasco	A	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
9	PO0120700R1085	VA	Gallarate	A	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
10	PO012136NU0001	VA	Venegono Inferiore	A	Stazionario	NO		Decrescente	Stazionario
11	PO0161570R3380	BG	Palosco	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
12	PO0160750U0002	BG	Ciserano	B	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
13	PO0130280U0009	CO	Bregnano	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
14	PO013064NU0002	CO	Cermenate	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
15	PO0131330U0009	CO	Lomazzo	B	Decrescente	SI	2010	Decrescente	Inversione
16	PO012002NU0008	VA	Albizzate	B	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
17	PO0131000U0002	CO	Fenegrò	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
18	PO012026NU0023	VA	Busto Arsizio	B	Decrescente	SI	2011	Decrescente	Inversione
19	PO0131690U0001	CO	Oltrona di San Mamette	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
20	PO012067NU0012	VA	Fagnano Olona	B	Stazionario	SI	2010	Decrescente	Inversione
21	PO0980610U0001	LO	Zelo Buon Persico	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
22	PO015146NR1105	MI	Milano	B	Decrescente	SI	2010	Decrescente	Inversione
23	PO0152210U0001	MI	Trezzo sull'Adda	B	Stazionario	NO		Decrescente	Inversione
24	PO0121180U0005	VA	Samarate	B	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
25	PO0161010R0001	BG	Fontanella	C	Decrescente	NO		Stazionario	Inversione
26	PO0161220R0519	BG	Isso	C	Decrescente	SI	2010	Decrescente	Inversione

#	Codice ARPA	PV	COMUNE	Appartenenza Cluster	Trend secondo Mann Kendall test	Presenza di Flesso nella Serie	Anno Flesso	Trend secondo Differenza tra Quadrienni	Andamento derivato da Cluster Analysis
27	PO0161330R0158	BG	Martinengo	C	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
28	PO0160400U0001	BG	Brignano Gera d'Adda	C	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
29	PO0970480U0001	LC	Merate	C	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
30	PO0151660U0001	MI	Paderno Dugnano	C	Decrescente	SI	2009	Stazionario	Inversione
31	PO015201NR0013	MI	San Vittore Olona	C	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
32	PO0200180R0037	MN	Cavriana	C	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
33	PO015194NR0015	MI	San Giorgio su Legnano	C	Decrescente	SI	2009	Crescente	Inversione
34	PO012026NU3021	VA	Busto Arsizio	C	Decrescente	NO		Stazionario	Inversione
35	PO0120750R2020	VA	Gerenzano	C	Stazionario	NO		Stazionario	Inversione
36	PO0161130R0001	BG	Ghisalba	D	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
37	PO013029NU0003	CO	Brenna	D	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
38	PO0970200U0003	LC	Cernusco Lombardone	D	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Inversione
39	PO0970610U0001	LC	Osnago	D	Decrescente	NO		Decrescente	Inversione
40	PO0161770U0001	BG	Pumenengo	E	Stazionario	NO		Crescente	Inversione
41	PO0131590U0001	CO	Mozzate	E	Stazionario	NO		Decrescente	Inversione
42	PO019094NU0944	CR	Sergnano	E	Crescente	NO		Stazionario	Inversione
43	PO015059NR0135	MI	Cassano d'Adda	E	Stazionario	SI	2014	Decrescente	Inversione
44	PO0151080U0002	MI	Gorgonzola	E	Stazionario	NO		Decrescente	Inversione
45	PO0160870R0001	BG	Covo	E	Crescente	SI	2013	Decrescente	Inversione
46	PO015175NR0150	MI	Pioltello	E	Stazionario	NO		Decrescente	Inversione
47	PO015210NR0022	MI	Settala	E	Crescente	SI	2014	Stazionario	Inversione
48	PO0130460U0001	CO	Carimate	E	Stazionario	SI	2012	Decrescente	Inversione
49	PO0180880U0001	PV	Mede	E	Crescente	NO		Stazionario	Inversione
50	PO0151400R0048	MI	Melegnano	E	Stazionario	SI	2015	Stazionario	Inversione
51	PO015146NR0699	MI	Milano	E	Crescente	NO		Crescente	Inversione
52	PO012090NU2009	VA	Lonate Pozzolo	E	Stazionario	SI	2016	Crescente	Inversione
53	PO012050NU0004	VA	Cislago	E	Stazionario	NO		Crescente	Inversione
54	PO0162070R0001	BG	Stezzano	F	Crescente	NO		Crescente	Crescente
55	PO019036NUA001	CR	Cremona	F	Crescente	NO		Stazionario	Crescente
56	PO015012NR0072	MI	Bareggio	F	Crescente	NO		Stazionario	Crescente
57	PO015189NR0143	MI	Rozzano	F	Crescente	NO		Crescente	Crescente
58	PO0152060U0004	MI	Senago	F	Crescente	NO		Crescente	Crescente
59	PO018062NRD002	PV	Ferrera Erbognone	F	Crescente	NO		Crescente	Crescente
60	PO0150020U0014	MI	Abbiategrosso	G	Crescente	SI	2017	Crescente	Stazionario
61	PO015062NR0026	MI	Castano Primo	G	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
62	PO015146NR2600	MI	Milano	G	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
63	PO0161290R0001	BG	Lurano	H	Decrescente	SI	2009	Decrescente	Decrescente
64	PO0161400R0001	BG	Morengo	H	Decrescente	NO		Crescente	Decrescente
65	PO0161540R0001	BG	Pagazzano	H	Decrescente	NO		Decrescente	Decrescente
66	PO015019NR0037	MI	Bernate Ticino	I	Stazionario	NO		Crescente	Stazionario
67	PO0200170R0001	MN	Castiglione delle Stiviere	J	Stazionario	NO		Decrescente	Stazionario

In funzione di questi criteri, i 6 cluster più popolosi (A÷F) possono essere descritti nella seguente maniera (Figura 4.14):

- il cluster A (10 pozzi) presenta una stabilità di valori nel tempo, con un'oscillazione totale compresa entro 10 mg/L; considerando che il flesso è stato identificato solo per il 20% dei punti, il cluster A è caratterizzabile dalla presenza di un andamento stazionario (70% dei punti);
- il cluster B (14 pozzi) presenta dei massimi nei primi anni della serie storica (2006-2010), una successiva decrescita monotona ed una stabilizzazione in prossimità degli anni 2018-2021; il cluster B è caratterizzabile dalla presenza di un'inversione di tendenza (43% dei punti con presenza di flesso) identificabile nell'anno 2011;
- il cluster C (11 pozzi) presenta dei massimi negli anni 2006-2009, una successiva decrescita monotona ed una stabilizzazione negli anni 2015-2021; anche questo cluster è caratterizzabile dalla presenza di un'inversione di tendenza (64% dei punti con presenza di flesso) identificabile nell'anno 2010;
- il cluster D (4 pozzi) ha un andamento simile al cluster C ma presenta una maggiore variazione totale, compresa entro 30 mg/L (mentre quella del cluster C è compresa entro 15-20 mg/L); il cluster D è caratterizzabile dalla presenza di un'inversione di tendenza (75% dei punti con presenza di flesso) identificabile nell'anno 2010;
- il cluster E (14 pozzi) è caratterizzato da un andamento temporale che presenta una fase crescente fino al 2015 e una seconda fase decrescente fino al 2021; il cluster E è caratterizzabile dalla presenza di un'inversione di tendenza (43% dei punti con presenza di flesso) identificabile nell'anno 2015;
- il cluster F infine comprende 6 pozzi con tendenza in crescita che arriva a relativa stabilizzazione negli ultimi 3-4 anni (2018-2021); il cluster F non contiene pozzi che presentano flesso ed è caratterizzabile dalla presenza di un andamento crescente (100% dei punti).

Per quanto riguarda i 4 cluster meno popolosi (G÷J) si osserva che (Figura 4.13):

- il cluster G è composto da 3 pozzi che presentano un andamento stazionario oscillatorio, con i minimi tra gli anni 2013 e il 2015;
- il cluster H, composto da 3 pozzi, presenta un picco negli anni 2007-2008 seguito da una decrescita e successiva stabilizzazione a partire dal 2014-2015, con valori massimi negli anni 2007-2008 e una forte escursione, di circa 30 mg/L;
- il cluster I, singleton, contiene il pozzo PO015019NR0037 di Bernate Ticino (MI), caratterizzato da due minimi negli anni 2009 e 2014; questi valori non sono stati classificati come veri outliers (quindi non sono stati eliminati) in assenza di informazioni specifiche aggiuntive;
- il cluster J, singleton, contiene il punto PO0200170R0001 di Castiglione delle Stiviere (MN) che è un piezometro superficiale (filtri tra 18 e 28 m di profondità); il suo andamento oscillatorio potrebbe essere dovuto a condizioni sito-specifiche o a variazioni nelle modalità di campionamento.

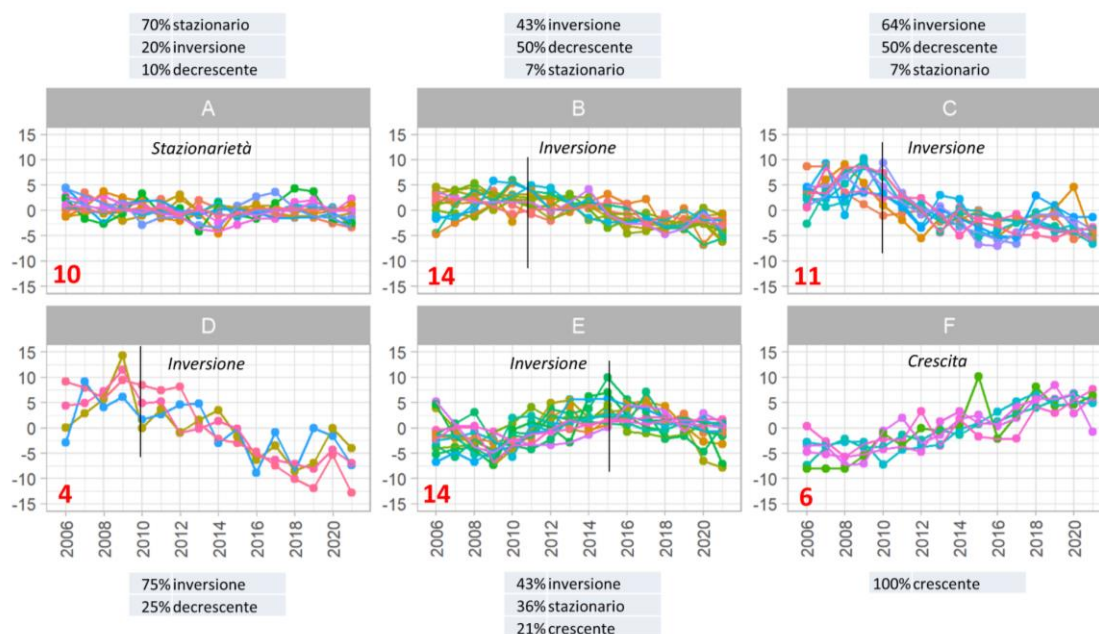


Figura 4.14 Caratterizzazione dei sei cluster più popolosi con l'attribuzione di un andamento tipico (stazionarietà, crescita, decrescita o inversione di tendenza)

La Figura 4.15(a) mostra l'ubicazione dei punti classificati in base ai cluster ottenuti. È possibile notare una distribuzione non casuale dei cluster nello spazio. Nello specifico, è evidente come la maggior parte dei punti ricadenti nei cluster A e B sia localizzata nelle aree pedemontane e di alta pianura, mentre la maggior parte dei punti del cluster E sia ubicata nella media pianura, in prossimità della fascia dei fontanili. Un quadro più oggettivo di questa situazione è fornito dalla Figura 4.15(b), che riporta il grafico box-plot dei valori di latitudine per i diversi cluster. Emerge come i cluster A e B, insieme anche ai cluster C e D, siano caratterizzati da latitudini maggiori, a differenza dei cluster E e F, che presentano latitudini minori. In generale è possibile quindi affermare che le zone pedemontane e di alta pianura, a monte idrogeologico, siano caratterizzate da andamenti stazionari o con inversione di tendenza sugli anni 2010-2011, mentre le zone di media pianura, a valle idrogeologico, presentino andamenti crescenti o con inversione sull'anno 2015 (quindi successiva rispetto ai pozzi sopracitati). Per quanto riguarda i 4 cluster meno popolosi, si segnala l'ubicazione ravvicinata dei 3 pozzi che compongono il cluster H, localizzati nella media pianura bergamasca, tra i fiumi Adda e Serio.

La Figura 4.16 rappresenta l'andamento delle concentrazioni tal quali di nitrato (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti; la colorazione è funzione dell'ubicazione (provincia). Possiamo vedere come i pozzi del cluster A, caratterizzato da stazionarietà, abbiano concentrazioni sempre inferiori a 40 mg/L. Per il cluster B, che presenta inversione di tendenza al 2011, le concentrazioni sono generalmente comprese tra 20 e 50 mg/L, ad eccezione del pozzo ubicato in provincia di Milano con valori <20 mg/L. Per i cluster C e D, che presentano inversione di tendenza al 2010, le concentrazioni sono generalmente più alte dei cluster precedenti, con valori compresi tra 20 e 70 mg/L. Il cluster E, caratterizzato da inversione al 2015, presenta una maggiore variabilità di concentrazioni, comprese tra <LOQ fino a circa 60 mg/L. Anche per il cluster F, con andamento in crescita, è presente una buona variabilità (si veda il Cap. 4.6.1.1 per maggiori dettagli) con concentrazioni comunque inferiori a 50 mg/L. Per quanto riguarda i cluster G e H, i pozzi che li compongono, oltre ad essere caratterizzati da un andamento temporale simile, presentano anche concentrazioni simili.

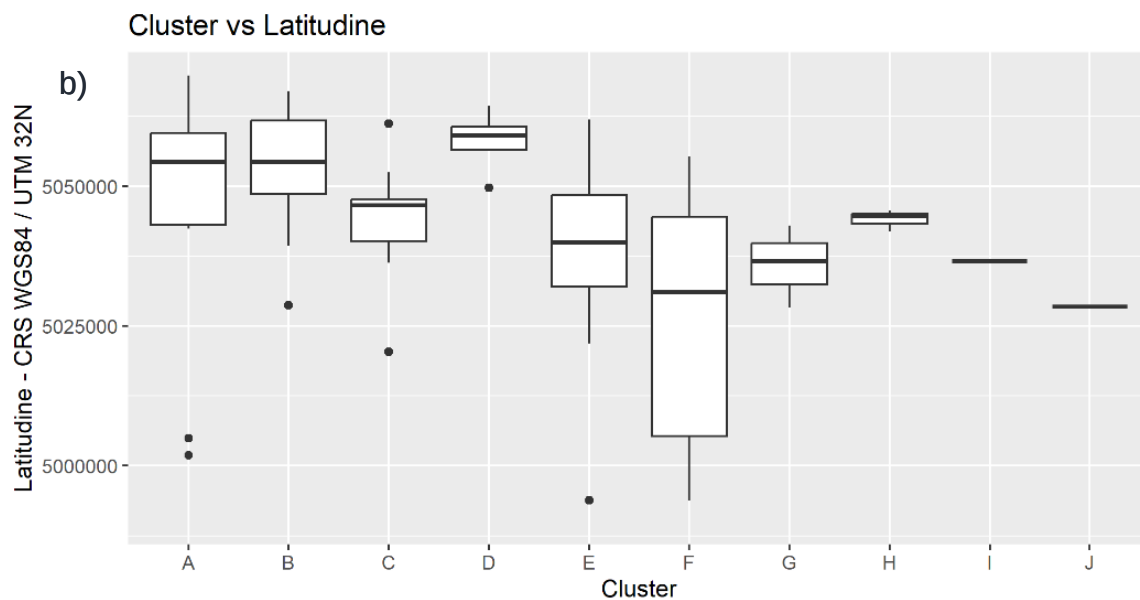
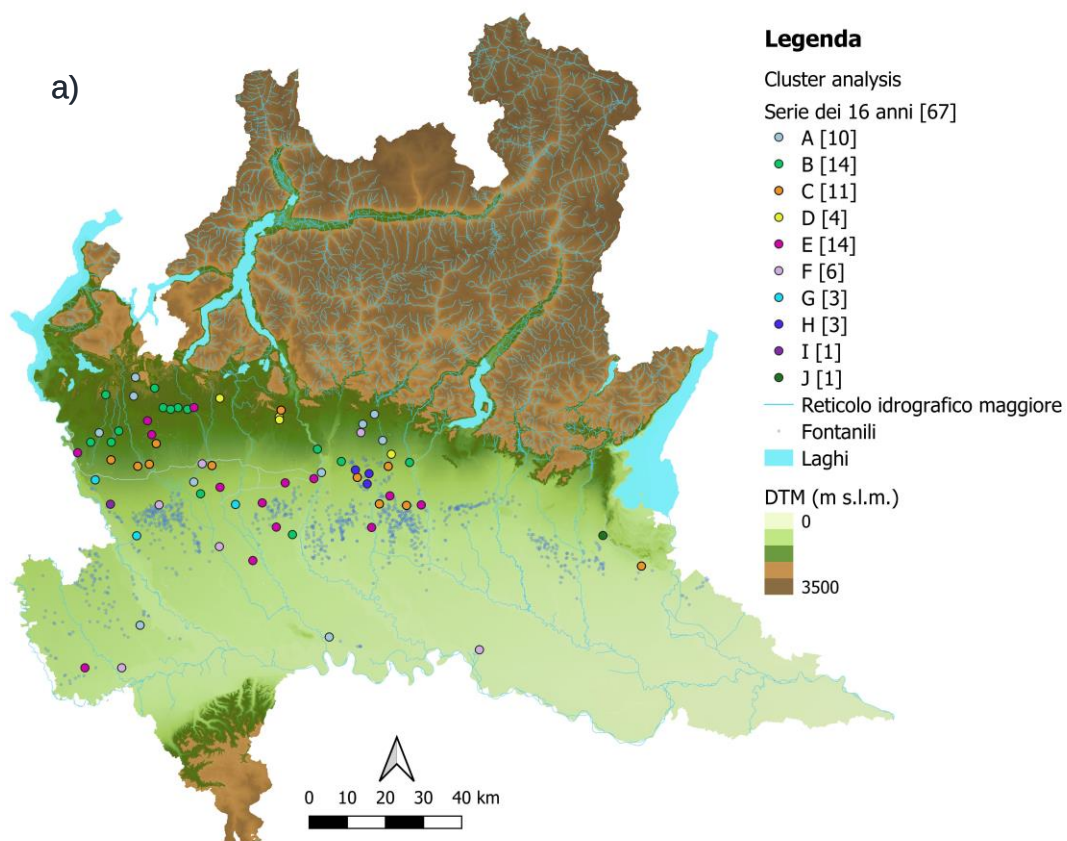


Figura 4.15(a) Spazializzazione dei risultati della cluster analysis temporale elaborata su 67 pozzi. (b) Box-plot delle latitudini dei pozzi facenti parte a ciascun cluster

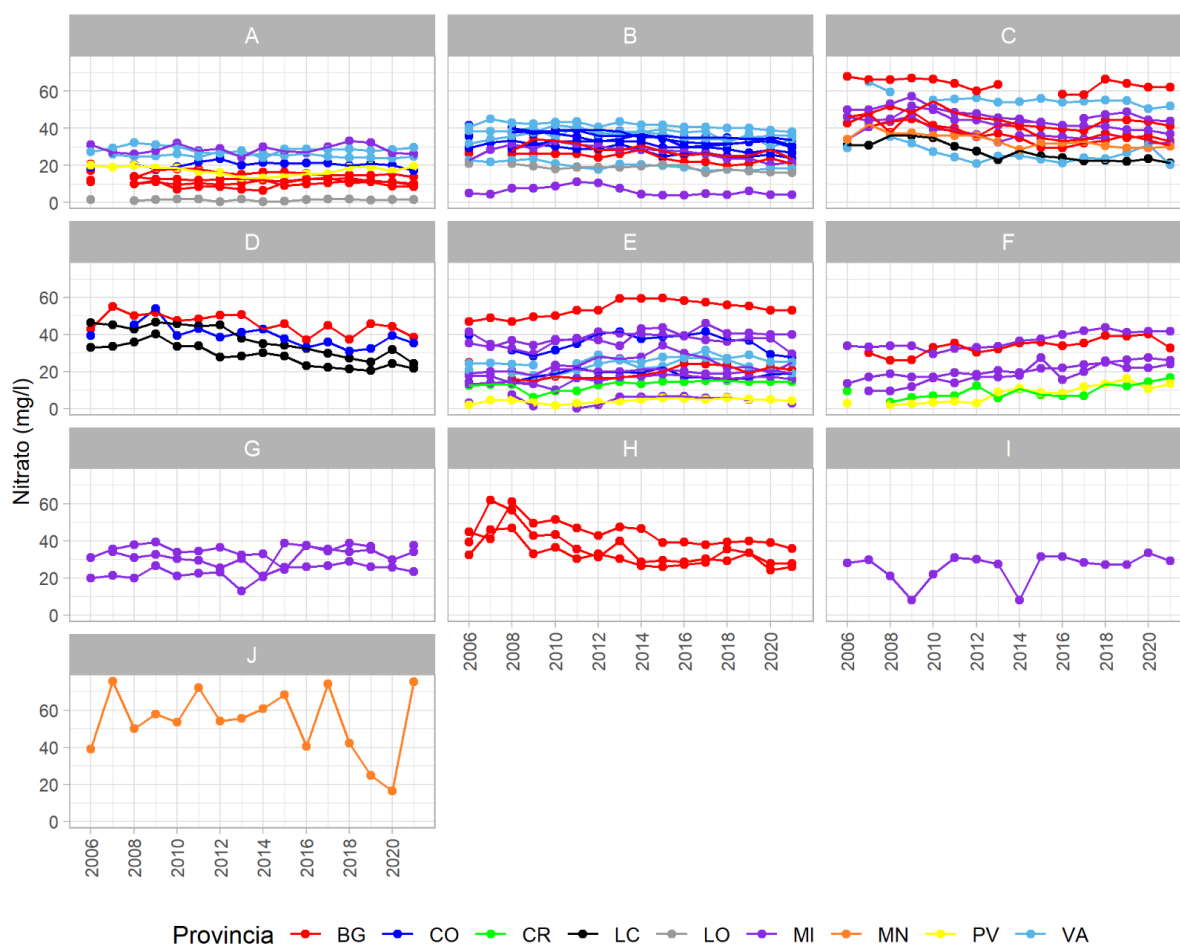


Figura 4.16 Andamento delle concentrazioni tal quali di nitrato (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti; la colorazione è funzione dell'ubicazione (provincia)

4.6.1.1 Il cluster con andamento in crescita: focus sui pozzi del cluster F

Questo paragrafo nasce dalla necessità di investigare i fattori che possono aver inciso sull'ottenimento di una tendenza di nitrato in crescita negli ultimi 16 anni per i pozzi del cluster F (Cap. 4.6.1). Questo cluster raggruppa 6 dei 67 pozzi investigati (il 9% sul totale), le loro caratteristiche principali sono riportate in Tabella 4.15. In Figura 4.17 sono rappresentate le serie temporali di concentrazione di nitrato di questi 6 pozzi che compongono il cluster F, mentre in Figura 4.18 è riportata la loro ubicazione. Le concentrazioni di nitrato risultano essere maggiori, ma mai sopra il limite di legge, per i pozzi posti più a nord, in alta pianura, con una diminuzione graduale fino ad arrivare in bassa pianura dove le concentrazioni rilevate sono inferiori a 20 mg/L (Figura 4.18). Come già indicato precedentemente, tutti i punti monitorati ricadono nell'idrostruttura superficiale (ISS), captando acqua con facies ossidata (Cap. 4.1), anche nei 2 punti di bassa pianura (che generalmente presenta condizioni riducenti). In questo contesto, le variabili che possono avere un ruolo nel determinare la concentrazione di nitrato e la sua tendenza nel tempo possono essere riassunte nell'elenco che segue:

- I. le condizioni di tipo idrogeologico, a scala regionale o più locale che condizionano il flusso e il trasporto del nitrato in falda,
- II. i dati costruttivi del pozzo, tra cui la profondità dello stesso e il posizionamento dei filtri,
- III. le attività umane che insistono sul territorio nelle vicinanze del pozzo.

Le condizioni idrogeologiche sembrano sicuramente influenzare i valori di concentrazione di questi 6 pozzi, in quanto si riscontrano concentrazioni maggiori per i pozzi posti in alta pianura, che ospita un acquifero più permeabile e quindi più vulnerabile agli input antropici provenienti dalla superficie, mentre le concentrazioni minori si riscontrano in bassa pianura, caratterizzata da acquiferi con minore permeabilità e generalmente soggetta a condizioni riducenti che favoriscono l'abbattimento naturale dei nitrati per denitrificazione. Il fatto che si registrino concentrazioni significative di nitrato in bassa pianura implica che questi punti siano ubicati in corrispondenza di zone caratterizzate, localmente, da una maggiore permeabilità e quindi vulnerabilità. Questo fenomeno si esaurisce comunque su una

scala spaziale locale, essendo la bassa pianura, come detto sopra, caratterizzata generalmente da acquiferi con minore permeabilità e in condizioni riducenti.

I dati costruttivi sono un aspetto importante, specialmente per i due punti di bassa pianura (PO019036NUA001 in provincia di Cremona e il PO018062NRD002 in provincia di Pavia; Tabella 4.15). È infatti possibile notare come questi siano entrambi caratterizzati da un tratto filtrante molto superficiale (da 1-2 a 15 m dal piano campagna) che probabilmente permette, localmente, il mantenimento di condizioni più ossidanti e quindi di concentrazioni di nitrato significative.

Le attività umane in prossimità dei punti del cluster F sembrano aver giocato un ruolo fondamentale nella determinazione della tendenza in crescita riscontrata. Di seguito sono riportate delle informazioni specifiche, fornite da ARPA, sulle attività svolte in prossimità dei pozzi in questione. Il punto PO0162070R0001 di Stezzano si trova in prossimità di un'attività di floricoltura, con probabile uso di fertilizzanti azotati. Il punto PO019036NUA001 è un piezometro ubicato nel territorio urbano di Cremona che filtra l'acquifero più superficiale, caratterizzato da importanti impatti di origine umana (Rotiroti et al., 2017). Il punto PO015012NR0072 di Bareggio è un pozzo superficiale (profondità di 11.5 m) ubicato in prossimità di una coltivazione domestica di ortaggi, con probabile uso di fertilizzanti azotati. Per i rimanenti 3 punti (PO018062NRD002 di Ferrera Erbognone, PO015189NR0143 di Rozzano e PO0152060U0004 di Senago) non è stato possibile ottenere informazioni di dettaglio sulle attività in essere in prossimità degli stessi.

Infine, a tal proposito, risulta utile anticipare le elaborazioni svolte nella sezione 6.3 relative alla determinazione dell'età della falda. Tra i 6 pozzi del cluster F, 2 sono stati selezionati per le analisi di datazione. Si tratta dei pozzi PO0162070R0001 di Stezzano (BG), identificato nel monitoraggio del presente progetto con il codice T5B (Cap. 5.1), e PO0152060U0004 di Senago (MI), con il codice T3D (Figura 4.17, Figura 4.18 e Tabella 4.15). In entrambi i casi, le età apparenti sono superiori al valore medio stimato di 37 anni per la falda dell'ISS in alta e media pianura lombarda: il punto PO0162070R0001 di Stezzano presenta un'età apparente di 48 ± 8 anni mentre il pozzo PO0152060U0004 di Senago 46 ± 5 anni (Tabella 6.4). Ciò suggerisce dei tempi di funzionamento del sistema idrogeologico più lenti rispetto alla media riscontrata

nell'area di studio, segnalando la concreta possibilità di riscontrare un ritardo nella risposta a misure di mitigazione intraprese per migliorare l'impatto dei nitrati in falda. A fronte delle età calcolate su questi pozzi, in funzione delle assunzioni discusse nel Cap. 6.6, è possibile ipotizzare un tempo di risposta ragionevole per questi due pozzi compreso tra 12 e 25 anni (tra il 30% e il 50% dell'età). Considerando ad esempio il pozzo di Senago, ubicato in ZVN (istituite nel 2006), eventuali effetti benefici delle ZVN dovrebbero manifestarsi in falda non prima di un periodo compreso tra gli anni 2018 e 2031. In altre parole, il trend di crescita riscontrato nel pozzo di Senago potrebbe non essere un esempio di inefficacia delle ZVN ma bensì il frutto dei lunghi tempi di risposta della falda, che comporterebbero di non vedere ancora ad oggi gli effetti benefici delle azioni migliorative intraprese nel 2006 (ZVN).

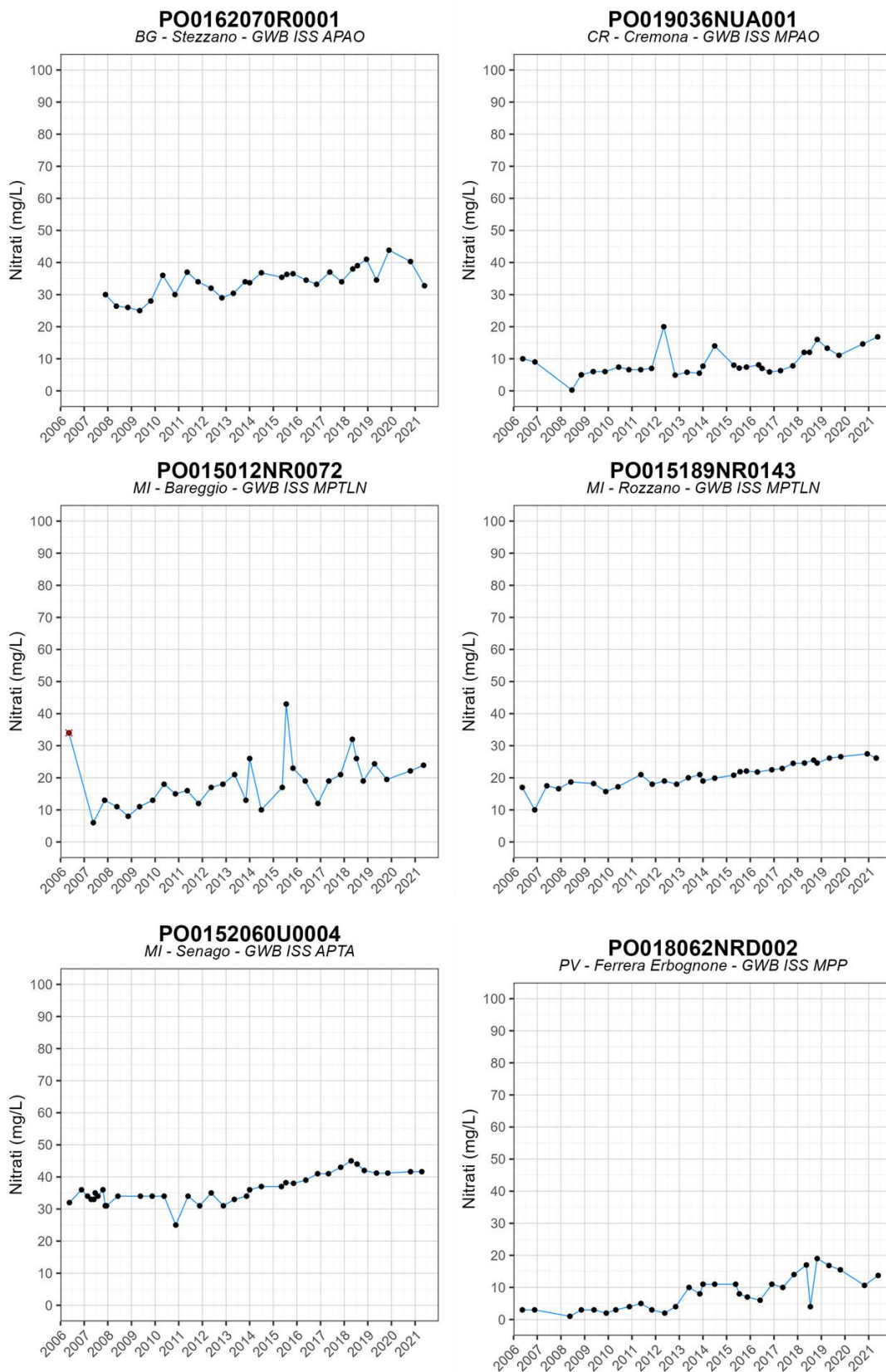


Figura 4.17 Serie temporali di concentrazione di nitrato "tal quale" dei sei pozzi che compongono il cluster F

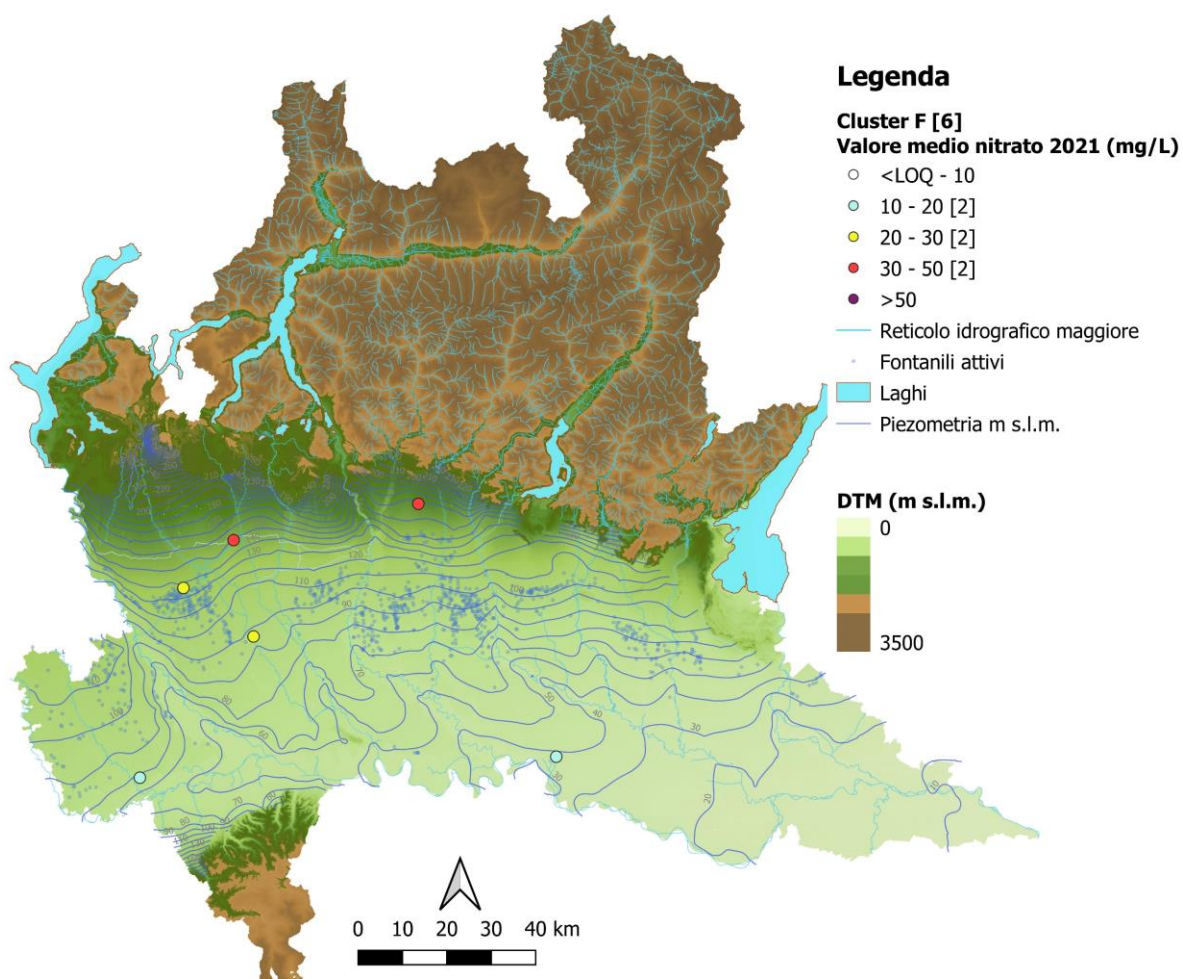


Figura 4.18 Ubicazione dei sei pozzi che compongono il cluster F, con indicazione della relativa concentrazione media annuale di nitrato in soluzione

Tabella 4.15 Informazioni costruttive dei 6 pozzi che costituiscono il cluster F. Per la rete 3 la soggiacenza fa riferimento alla media dell'ultimo anno di dati disponibili misurati da ARPA, mentre per la rete 2 è stata elaborata la differenza il DTM e il livello piezometrico

Codice ARPA	PV	Comune	Profondità (m)	Soggiacenza (m)	# Filtri	Top filtri (m)	Bottom filtri (m)	Uso	Tipo	Ricadente in ZVN
PO0162070R0001	BG	Stezzano	84	46.1	3	54	81	Irriguo	Pozzo	NO
PO019036NUA001	CR	Cremona	20	6.8	1	2	15	Monitoraggio	Piezom.	SI
PO015012NR0072	MI	Bareggio	11.5	2.5	n.d.	n.d.	n.d.	Irriguo	Pozzo	SI
PO015189NR0143	MI	Rozzano	51	4.8	1	32	47	Irriguo	Pozzo	NO
PO0152060U0004	MI	Senago	104	21.1	2	41.29	64.11	Potabile	Pozzo	SI
PO018062NRD002	PV	Ferrera Erbognone	20	7.4	1	1	15	n.d.	Pozzo	NO

4.6.2 Pozzi con serie di almeno 10 anni

Dei 49 pozzi aggiuntivi con serie di almeno 10 anni, 44 pozzi sono stati classificati con facies ossidata e sono perciò rientrati nel dataset di input di questa cluster analysis temporale, formato quindi da una matrice di 44 punti e un'unica variabile (concentrazione di nitrato a media sottratta) per 10 anni (dal 2012 al 2021).

Il risultato della cluster analysis è stato l'ottenimento di 10 clusters (1÷10, Figura 4.19). I primi 4 cluster (1÷4) sono i più popolosi, contenendo l'84% dei pozzi considerati; i rimanenti 6 cluster (5÷10) formano singleton, ad eccezione del cluster 5 costituito da 2 pozzi.

La classificazione di ciascun pozzo in funzione del cluster ottenuto è riportata in Tabella 4.16. L'ubicazione dei punti di ciascun cluster e il box-plot con le latitudini di ubicazione sono riportati in Figura 4.20. La descrizione di ciascuno dei 4 cluster più popolosi ottenuti è riportata di seguito:

- il cluster 1 è costituito da 6 pozzi; il suo andamento è caratterizzato da una diminuzione di concentrazione tra gli anni 2012 e 2018, seguita poi da un aumento; i pozzi che compongono questo cluster sono ubicati nelle zone pedemontane e di alta pianura; confrontando questo cluster con quelli ottenuti dalla cluster analysis su 16 anni, non emerge nessun parallelismo; in altre parole, il profilo del cluster 1 non è riscontrabile, dal 2012 in poi, in nessun cluster ottenuto sui 16 anni;
- il cluster 2 è il più popoloso, formato da 17 pozzi; il suo andamento è sovrapponibile, dal 2012, a quello del cluster E ottenuto dall'analisi sui 16 anni, che presenta un'inversione di tendenza intorno all'anno 2015; per quanto riguarda l'ubicazione, le latitudini dei pozzi del cluster 2 sono lievemente maggiori rispetto a quelle del cluster E, collocando i pozzi del cluster 1 più nell'alta che nella media pianura;
- il cluster 3 è formato da 4 pozzi; il suo andamento è sovrapponibile a quello del cluster D ottenuto dall'analisi dei 16 anni, caratterizzato, dal 2012, da una diminuzione seguita da una stabilizzazione negli ultimi anni; per quanto

riguarda l'ubicazione, i pozzi del cluster 3 sono in linea con le latitudini dei pozzi del cluster D;

- il cluster 4 è formato da 10 pozzi; il suo andamento è caratterizzato da un aumento di concentrazioni, rendendosi così associabile al cluster F dell'analisi sui 16 anni; unica differenza è che l'aumento di concentrazioni presente nel cluster 4 è più blando rispetto a quello evidenziato nel cluster F; per quanto riguarda l'ubicazione, i pozzi del cluster 4 hanno latitudini più basse rispetto agli altri cluster ottenuti sui 10 anni, caratterizzandosi quindi come pozzi della media pianura, in analogia a quanto emerso per il cluster F.

Per quanto riguarda i 6 cluster meno popolosi (5÷10), questi sono determinati da processi a scala locale o pozzo-specifici.

La Tabella 4.16 riporta anche la classificazione di ciascun cluster secondo un andamento temporale caratterizzante. Questo andamento caratterizzante, in mancanza dell'applicazione del test per l'identificazione dei flessi per le serie di 10 anni (Cap. 4.5), è stato identificato in maniera più semplice rispetto a quanto fatto per i cluster dei pozzi con serie di 16 anni (Cap. 4.6.1). I criteri adottati sono stati i seguenti:

- per i cluster sovrapponibili a quelli ottenuti dall'analisi sui 16 anni (cluster 2, 3 e 4) è stato attribuito l'andamento caratterizzante dei cluster ottenuti sui 16 anni (quindi l'andamento, rispettivamente, dei cluster E, D e F);
- per il cluster 1, è stato attribuito un andamento caratterizzante in maniera qualitativa, in funzione delle caratteristiche degli andamenti che compongono questo cluster; nello specifico, quindi, è stata attribuita un'inversione di tendenza "crescente", definita da una decrescita seguita da una crescita;
- per i cluster 5-10, l'andamento caratterizzante è stato identificato in funzione del risultato del test di Mann-Kendall, ad eccezione del cluster 6 per il quale è stato attribuita in maniera qualitativa l'inversione di tendenza crescente.

La Figura 4.21 rappresenta l'andamento delle concentrazioni tal quali (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti e con colorazione in funzione della provincia di appartenenza. I pozzi del cluster 1 hanno generalmente concentrazioni inferiori a 30 mg/L, ad eccezione dei punti in provincia

di Monza-Brianza e Bergamo, quest'ultimo con valori superiori al limite di 50 mg/L. Il cluster 2 invece presenta concentrazioni più variabili che passano da pochi mg/L fino a valori >50 mg/L; i pozzi con concentrazioni maggiori sono ubicati nelle province di Monza-Brianza e Milano. Il profilo del cluster 2 è in linea con quello del cluster E sui 16 anni. Anche il cluster 3 presenta un profilo analogo a quello del cluster sui 16 anni associato, il cluster D, caratterizzato da concentrazioni generalmente comprese tra 20 e 65 mg/L. Il cluster 4 è abbastanza variabile, ma comunque contenuto sotto valori di 40 mg/L; i pozzi con concentrazioni maggiori sono ubicati in provincia di Brescia.



Figura 4.19 Rappresentazione dei cluster come andamento su scala temporale della concentrazione del nitrato a media sottratta

In sintesi, possiamo affermare che, in generale, i risultati della cluster analysis sui pozzi aggiuntivi con serie di 10 anni vanno a confermare il quadro conoscitivo emerso dalla cluster effettuata sui pozzi con serie di 16 anni. Le uniche differenze significative ottenute dalle 2 cluster analysis sono le seguenti:

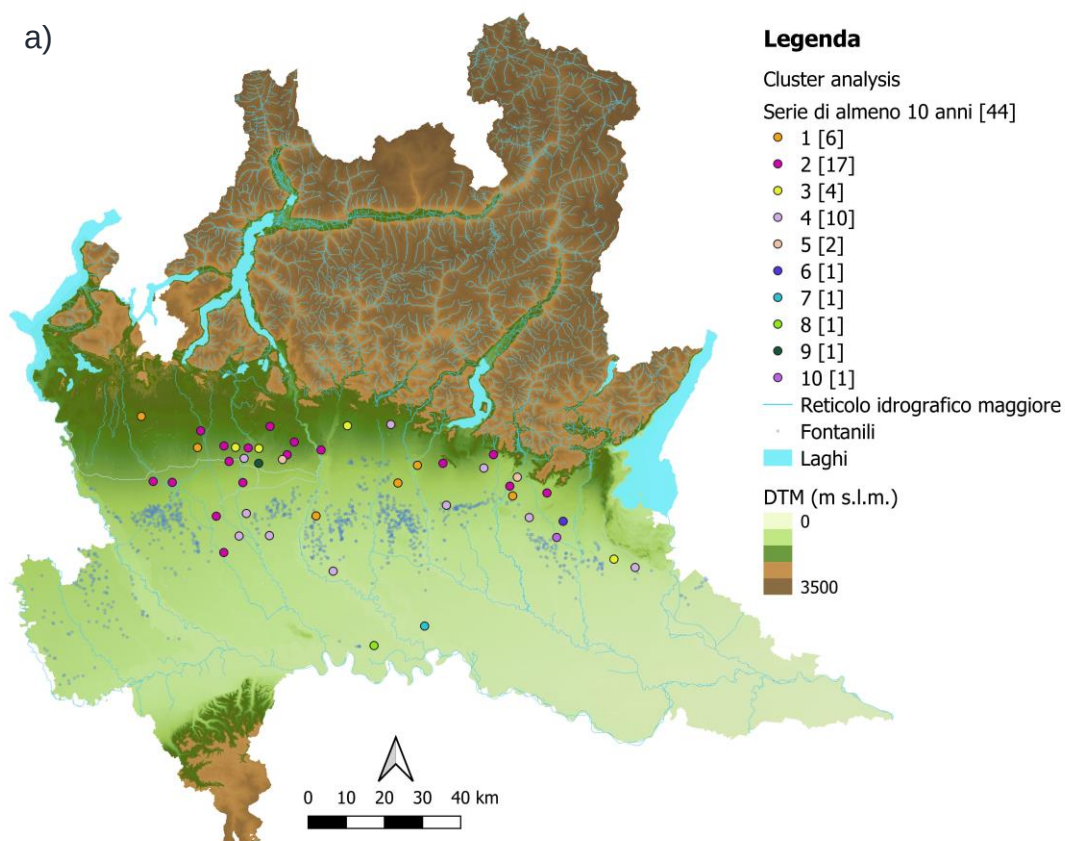
- il cluster 1, ottenuto dall'analisi sui 10 anni, presenta un profilo temporale che non è stato riscontrato nei pozzi con serie di 16 anni; l'ubicazione dei pozzi di questo cluster, associabile alla zona pedemontana/di alta pianura, fa emergere quindi la presenza di andamenti caratterizzati da aumento di nitrato negli ultimi anni in queste zone, elemento che non era emerso dalla cluster analysis sui pozzi con 16 anni; sui pozzi di questo cluster, di numero comunque ridotto (6), potrebbe essere utile effettuare ulteriori approfondimenti per comprendere le cause di questo andamento peculiare;
- l'ubicazione dei pozzi del cluster 2, caratterizzato da un andamento in linea con quello del cluster E sui 16 anni (inversione con flesso intorno al 2015), è risultata a maggiori latitudini rispetto a quella dei pozzi del cluster E, spostando il baricentro di questo andamento temporale, rispetto a quanto emerso dall'analisi sui 16 anni, più verso l'alta pianura;
- il cluster 4, con andamento in crescita, presenta un aumento di concentrazioni negli ultimi anni che è più blando rispetto all'aumento identificato dal cluster F, identificato nell'analisi sui 16 anni.

Tabella 4.16 Elenco dei 44 pozzi della serie di almeno 10 anni con indicazione del cluster di appartenenza e l'andamento derivato dall'interpretazione della cluster analysis

#	Codice ARPA	PV	COMUNE	COORD EST	COORD NORD	Appartenenza Cluster	Trend secondo Mann Kendall test	Trend secondo Differenza tra Quadrienni	Andamento derivato da Cluster Analysis
1	PO019084NRA002	CR	Rivolta d'Adda	540419	5033590	1	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
2	PO0171500UC557	BS	Pontoglio	566999	5046842	1	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
3	PO0131310U0001	CO	Locate Varesino	494595	5059657	1	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
4	PO108027NR0020	MB	Limbrate	509330	5051480	1	Stazionario	Stazionario	Inversione (crescente)
5	PO0160830R0001	BG	Cortenuova	561871	5042210	1	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
6	PO017029NR0001	BS	Brescia	591971	5038818	1	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
7	PO0171630UC032	BS	Rodengo - Saiano	586929	5049639	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
8	PO015182NR0018	MI	Rho	502700	5042369	2	Stazionario	Stazionario	Inversione (decrescente)
9	PO108036NU0001	MB	Ornago	532830	5049602	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
10	PO015159NR0012	MI	Opera	516220	5024004	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
11	PO015154NR0013	MI	Nerviano	497698	5042622	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
12	PO108034NU0036	MB	Muggiò	517603	5047860	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
13	PO108033NR0142	MB	Monza	522621	5051383	2	Stazionario	Stazionario	Inversione (decrescente)
14	PO0151460U1638	MI	Milano	514248	5033514	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
15	PO1080310U0001	MB	Mezzago	534712	5052931	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
16	PO0970440U0002	LC	Lomagna	528339	5057036	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
17	PO108023NU0003	MB	Desio	516261	5051920	2	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
18	PO015081NR0044	MI	Cologno Monzese	521218	5042320	2	Stazionario	Decrescente	Inversione (decrescente)
19	PO0170590UC609	BS	Cologne	573688	5047365	2	Stazionario	Stazionario	Inversione (decrescente)
20	PO0160510R0161	BG	Capriate San Gervasio	541717	5050871	2	Decrescente S.	Stazionario	Inversione (decrescente)
21	PO0170290RC490	BS	Brescia	600963	5039596	2	Stazionario	Decrescente	Inversione (decrescente)
22	PO0170290UB135	BS	Brescia	591217	5041379	2	Stazionario	Decrescente	Inversione (decrescente)
23	PO108005NU0002	MB	Barlassina	510155	5055878	2	DeCrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
24	PO0200340R0001	MN	Medole	618524	5022275	3	Stazionario	Decrescente	Inversione (decrescente)
25	PO1080280U0004	MB	Lissone	519297	5051532	3	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)

#	Codice ARPA	PV	COMUNE	COORD EST	COORD NORD	Appartenenza Cluster	Trend secondo Mann Kendall test	Trend secondo Differenza tra Quadrienni	Andamento derivato da Cluster Analysis
26	PO016123NU0001	BG	Lallio	548636	5057202	3	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
27	PO108004NR0031	MB	Arcore	525421	5051267	3	Decrescente S.	Decrescente	Inversione (decrescente)
28	PO015222NR0015	MI	Tribiano	528183	5028430	4	Stazionario	Stazionario	Crescente
29	PO0152050R0052	MI	Segrate	522133	5034224	4	Stazionario	Stazionario	Crescente
30	PO015192NR0212	MI	San Donato Milanese	520235	5028325	4	Stazionario	Stazionario	Crescente
31	PO108033NU0120	MB	Monza	521556	5048668	4	Stazionario	Crescente	Crescente
32	PO0171140UC023	BS	Montirone	596315	5033160	4	Crescente S.	Crescente	Crescente
33	PO0200280R0056	MN	Guidizzolo	624064	5020093	4	Crescente S.	Crescente	Crescente
34	PO098024NR0040	LO	Corte Palasio	544899	5019115	4	Crescente S.	Stazionario	Crescente
35	PO0170600UC013	BS	Comezzano- Cizzago	574582	5036376	4	Stazionario	Stazionario	Crescente
36	PO0170400RC511	BS	Castegnato	584404	5046117	4	Stazionario	Crescente	Crescente
37	PO016042NU0001	BG	Brusaporto	560015	5057521	4	Stazionario	Crescente	Crescente
38	PO108017NR0055	MB	Cavenago di Brianza	531593	5048360	5	Decrescente S.	Stazionario	Decrescente
39	PO017029NU0001	BS	Brescia	593181	5043740	5	Stazionario	Stazionario	Stazionario
40	PO017113NRD106	BS	Montichiari	605200	5032183	6	Stazionario	Decrescente	Inversione (crescente)
41	PO019051NRA001	CR	Grumello Cremonese ed Uniti	568876	5004743	7	Stazionario	Crescente	Stazionario
42	PO098019NR0307	LO	Codogno	555617	4999635	8	Decrescente S.	Decrescente	Decrescente
43	PO1080210U0002	MB	Concorezzo	525376	5047357	9	Stazionario	Decrescente	Stazionario
44	PO0170340RC481	BS	Calvisano	603498	5027951	10	Stazionario	Stazionario	Stazionario

a)



b)

Cluster vs Latitudine

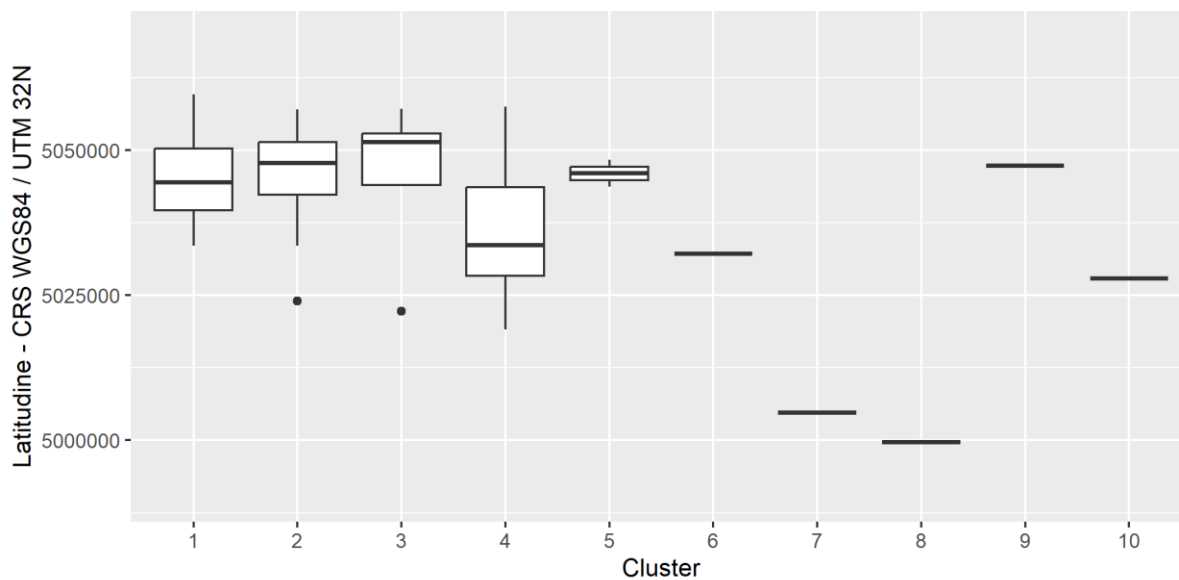


Figura 4.20(a) Spazializzazione dei risultati della cluster analysis temporale elaborata su 44 pozzi. (b) Box-plot delle latitudini dei pozzi facenti parte a ciascun cluster

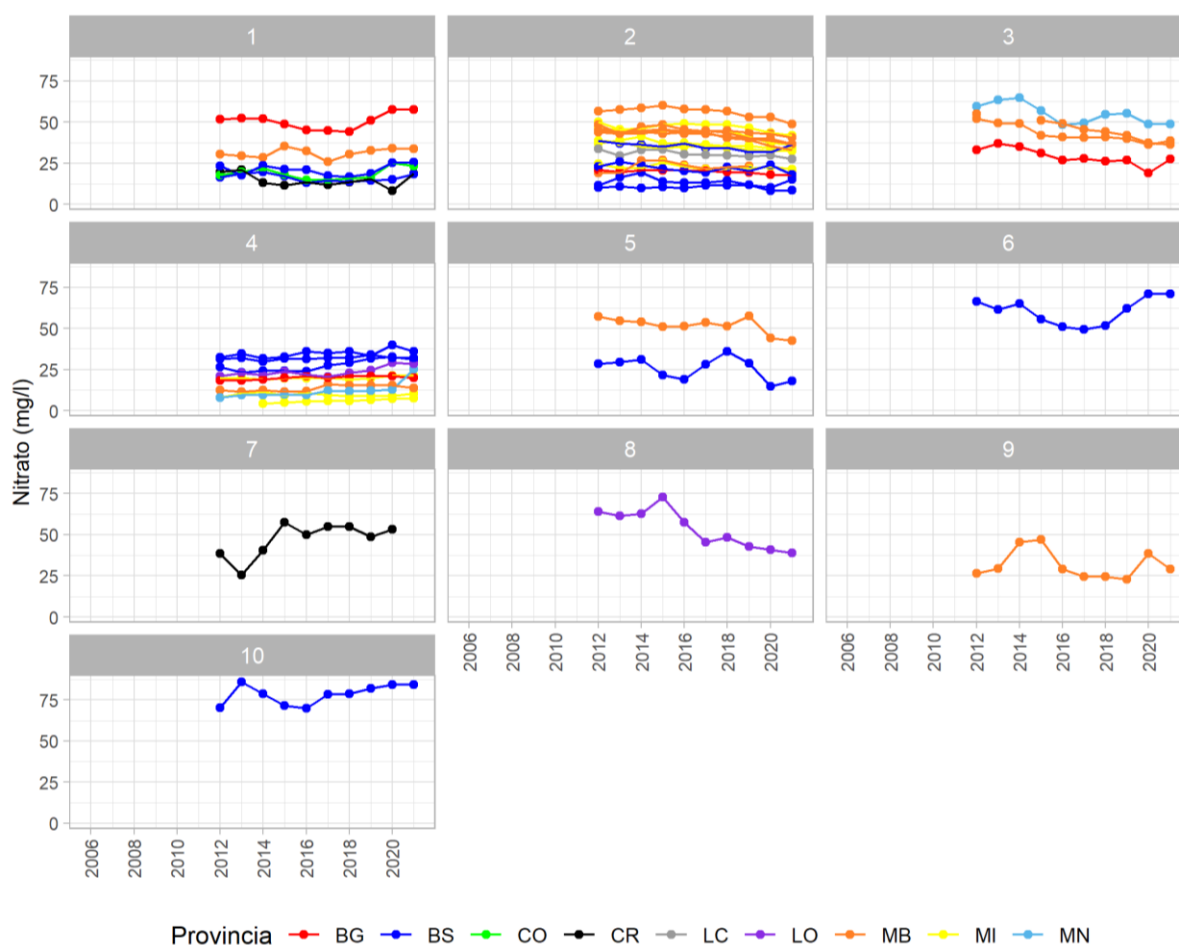


Figura 4.21 Andamento delle concentrazioni tal quali di nitrato (quindi senza sottrazione della media) secondo la suddivisione nei 10 cluster ottenuti; la colorazione è funzione dell'ubicazione (provincia)

4.7 Confronto tra andamenti temporali ottenuti tramite cluster analysis su lungo periodo e differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati (breve periodo)

Similmente al Cap. 4.4, questa parte riporta il confronto degli andamenti temporali di nitrato calcolati su lungo periodo (16 anni) contro quelli ottenuti su breve periodo (8 anni). In questo caso però, gli andamenti su lungo periodo sono stati ottenuti tramite cluster analysis, mentre nel Cap. 4.4 erano stati calcolati con trend analysis. Considerando che la cluster analysis è stata applicata a 67 pozzi (Cap. 4.6.1), è stato quindi svolto il confronto degli andamenti temporali ottenuti su questi 67 pozzi tramite:

- cluster analysis temporale sul periodo di 16 anni (2006-2021; Tabella 4.14),
- differenza (delta) tra le medie di concentrazione di nitrato calcolate, secondo la Direttiva Nitrati, rispettivamente sui quadrienni adiacenti 2012-2015 e

2016-2019, quindi per un periodo totale d'indagine di 8 anni (2012-2019; Tabella 4.14).

I risultati di questo confronto sono rappresentati in Figura 4.22 e schematizzati in Figura 4.23. Risulta importante sottolineare che vengono confrontati due tecniche che producono un numero differente di risultati possibili; infatti, tramite cluster analysis sono state attribuite 4 classi possibili di andamento (crescente, decrescente, stazionario e inversione di tendenza) mentre tramite differenza tra quadrienni sono attribuibili 3 classi di andamento (crescente, decrescente, stazionario). Questo aspetto è all'origine dell'aver ottenuto dalle due tecniche solo 10 pozzi (14.9%) con stesso andamento temporale. Sui 57 pozzi (85.1%) che hanno ottenuto un andamento diverso è stata fatta un'analisi di dettaglio, in analogia al Cap. 4.4, che ha portato a distinguere i casi in cui l'andamento ottenuto sui 16 anni con cluster analysis faccia emergere un quadro migliorativo sull'evoluzione temporale di nitrato in falda rispetto a quanto ottenuto sugli 8 anni tramite la differenza tra quadrienni. In questo confronto, la presenza di inversione di tendenza identificata nei 16 anni è stata considerata come un descrittore di miglioramento della situazione rispetto all'identificazione di una stazionarietà sugli 8 anni, in quanto l'analisi su lungo periodo fa emergere in questo caso che la recente stazionarietà (sugli 8 anni) è avvenuta successivamente ad un'inversione di tendenza, osservabile solo su lungo periodo (16 anni). In quest'ottica, la presenza di inversione sui 16 anni è stata considerata allo stesso livello (migliorativo della situazione) della presenza di trend in decrescita sugli 8 anni. La sintesi dei risultati ottenuti dal confronto indica che per il 33.0% dei punti totali l'andamento temporale calcolato sui 16 anni ha fatto emergere un quadro migliorativo del problema dei nitrati in falda rispetto all'andamento calcolato sugli 8 anni, mentre solo per il 7.5% la situazione è esattamente opposta. Il bilancio netto totale indica quindi che per il 26% (quindi circa un quarto dei punti) l'andamento temporale calcolato sui 16 anni ha fatto emergere un quadro migliorativo del problema dei nitrati rispetto all'analisi svolta su 8 anni. Questo risultato dimostra come il fatto di considerare un tempo più lungo nella valutazione dell'evoluzione temporale di nitrato in falda, accompagnato dall'utilizzo di appropriate tecniche che possano dare il giusto peso alle inversioni di tendenza (es., identificazione del punto di flesso, cluster analysis), possa mettere in

luce un quadro migliorativo della situazione che non emergerebbe dall'analisi su un orizzonte temporale più breve.

La necessità di considerare tempi più lunghi di 8 anni per l'analisi dell'evoluzione temporale dei nitrati in falda è dimostrata dai risultati della datazione delle falde che, come discusso al Cap. 6.3, ha evidenziato un tempo medio di residenza della falda per l'ISS di alta pianura di circa 37 ± 6 anni. Con questi tempi di funzionamento del sistema idrogeologico, l'utilizzo di una finestra temporale corta (8 anni) potrebbe non far emergere un quadro migliorativo di fatto esistente, ma non percepibile a causa della risoluzione temporale troppo breve rispetto ai tempi di risposta dei pozzi alle azioni migliorative intraprese.

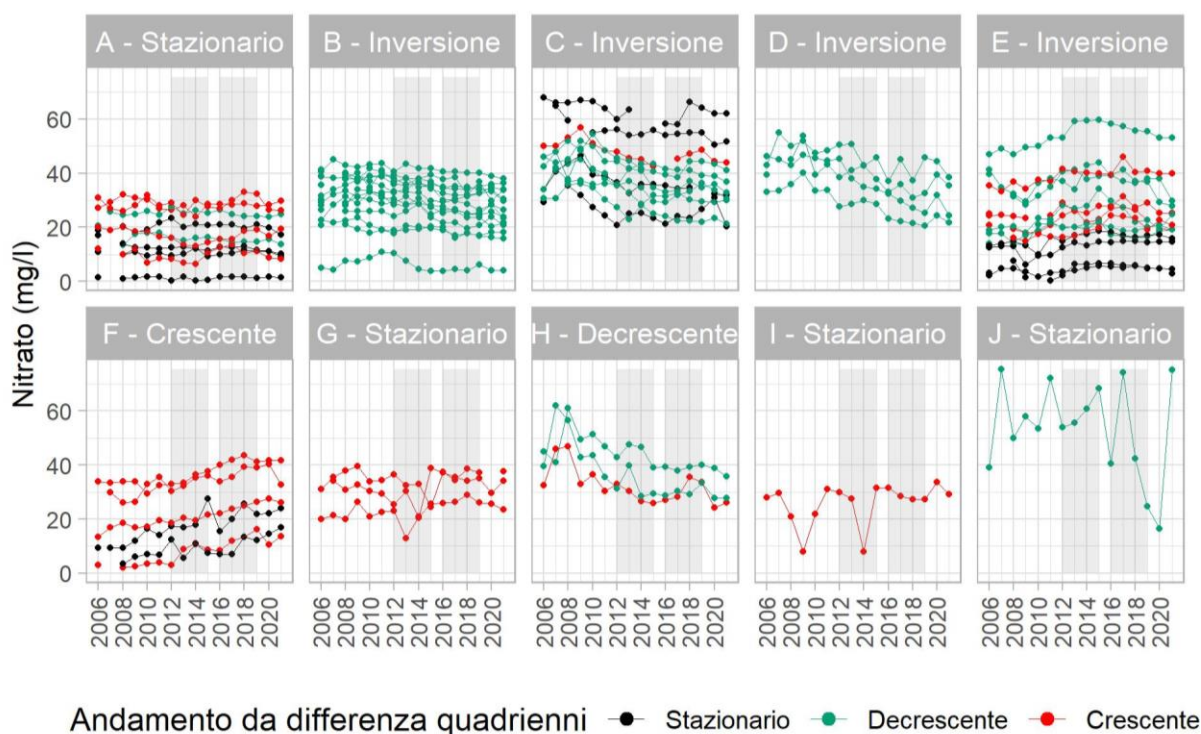


Figura 4.22 Confronto tra gli andamenti caratterizzanti i cluster ottenuti dall'analisi sui 16 anni e gli andamenti di nitrato in base alla differenza tra quadrienni secondo la Direttiva Nitrati; in grigio sono evidenziati i due quadrienni adiacenti considerati

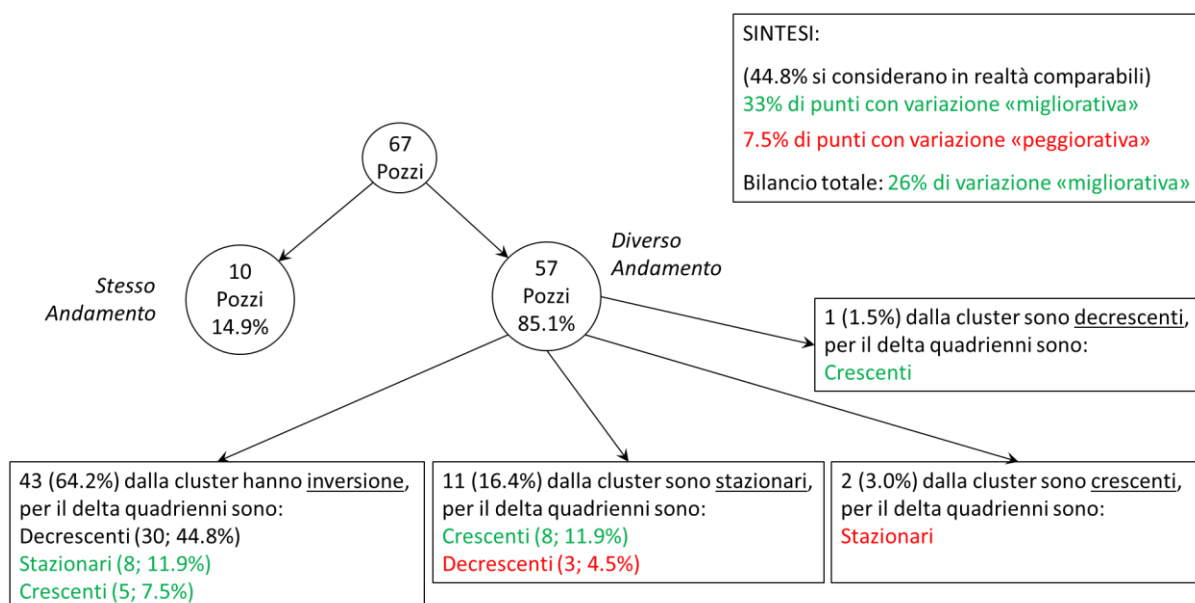


Figura 4.23 Schema riepilogativo rispetto alla valutazione comparativa tra i risultati della cluster analysis e il delta tra le medie di quadrienni adiacenti ai sensi della Direttiva Nitrati per i 67 pozzi della serie dei 16 anni

4.8 Considerazioni generali sui risultati ottenuti nel WP2

In generale, sulla base delle elaborazioni volte alla comprensione dell'andamento temporale del nitrato in falda in alta e media pianura lombarda, e al tentativo di discretizzare gli andamenti caratteristici per l'area di studio, è possibile fornire i seguenti punti di sintesi:

- in funzione dei tempi di funzionamento del sistema idrogeologico, stimati mediamente nel Cap. 6.3 a 37 anni, risulta necessario indagare la dinamica del nitrato in falda su una finestra temporale lunga, corrispondente ad almeno 15-20 anni; elaborazioni svolte su tempi più brevi, ad esempio gli 8 anni considerati nel confronto tra quadrienni della Direttiva Nitrati, potrebbero non far emergere un miglioramento dello stato qualitativo della falda di fatto esistente nel corpo idrico sotterraneo;
- oltre alla rilevanza della lunghezza della finestra temporale d'indagine, è emersa anche l'importanza della tecnica scelta per l'analisi degli andamenti temporali di nitrato: il metodo comunemente utilizzato della trend analysis tramite il test di Mann-Kendall non restituisce risultati informativi quando le serie di dati non sono monotone; in presenza di andamenti non-monotoni è

necessario utilizzare tecniche di elaborazione che contemplino la possibilità di rilevare delle inversioni di tendenza, come ad esempio tecniche di identificazione del punto di flesso o cluster analysis temporale;

- l'unione di (a) periodi di indagine lunghi e (b) tecniche di elaborazione capaci di rilevare le inversioni di tendenza emerge quindi come il solo approccio efficace nel riuscire a far emergere miglioramenti della contaminazione da nitrato effettivamente realizzati nei corpi idrici sotterranei.

Come sintesi dei risultati ottenuti sulla caratterizzazione degli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo (16 anni), viene riportata in Figura 4.24 una mappa che rappresenta gli andamenti caratterizzanti ciascun cluster ottenuto (Tabella 4.14). Come ulteriore sintesi, cercando di colmare la lacuna informativa nelle zone prive di pozzi con serie di nitrato su lungo periodo (16 anni), viene riportata in Figura 4.25 la mappa degli andamenti caratterizzanti i cluster ottenuti dall'analisi su 16 anni con l'aggiunta degli andamenti di quei cluster, ottenuti dall'analisi sulle serie di almeno 10 anni, considerabili come sovrapponibili ai cluster ottenuti sui 16 anni (cluster 2, 3 e 4; Cap. 4.6.2). Infine, come ultimo elemento di sintesi, viene riportata in Figura 4.26 la mappa degli andamenti caratteristici dei cluster ottenuti sia dall'analisi sui 16 anni che da quella sui 10 anni. Anche se non considerabile come informazione caratterizzante un lungo periodo (per la presenza di serie lunghe "solo" 10 anni non sovrapponibili come andamento a quelle di 16 anni), questa mappa fornisce un quadro completo a livello spaziale su tutta l'alta pianura lombarda.

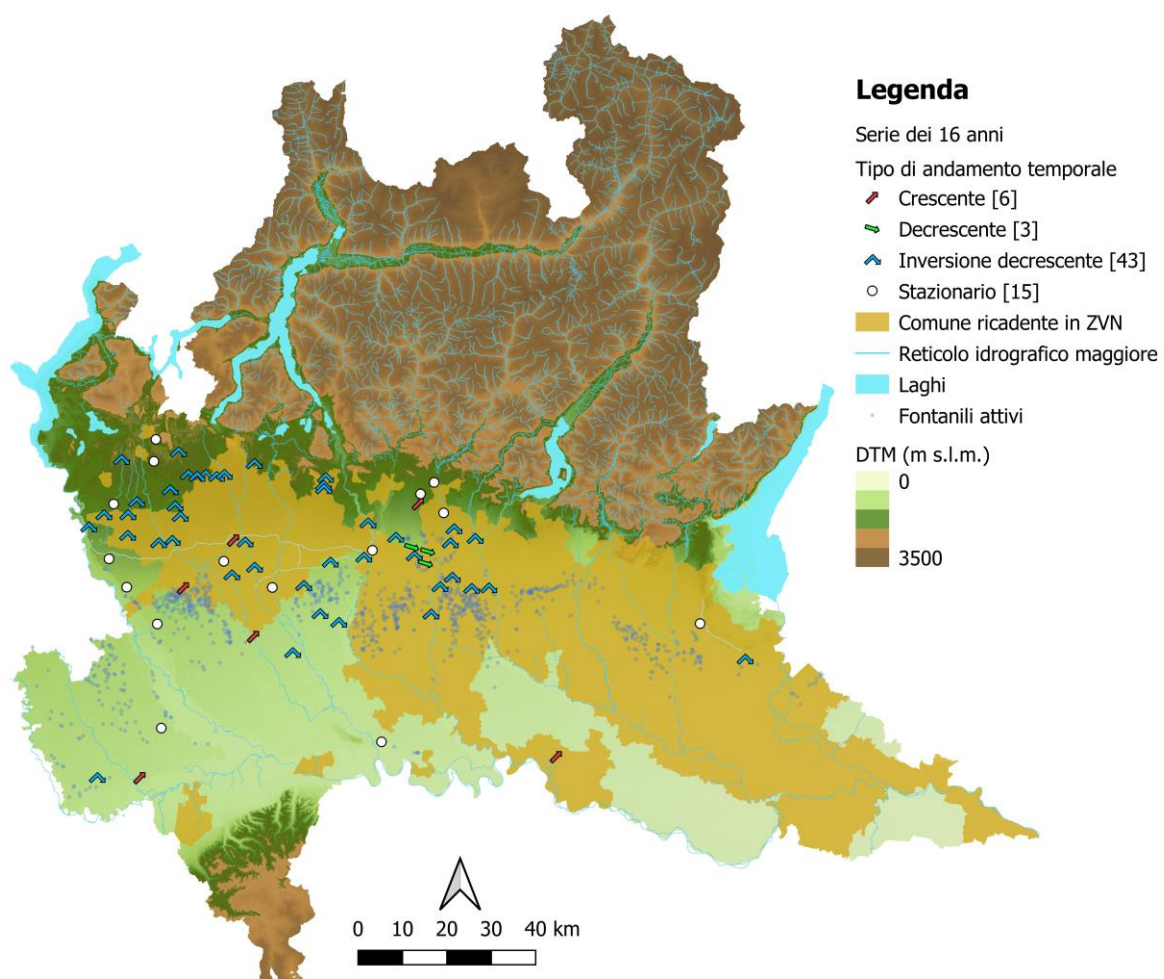


Figura 4.24 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni; in arancio sono indicate le ZVN

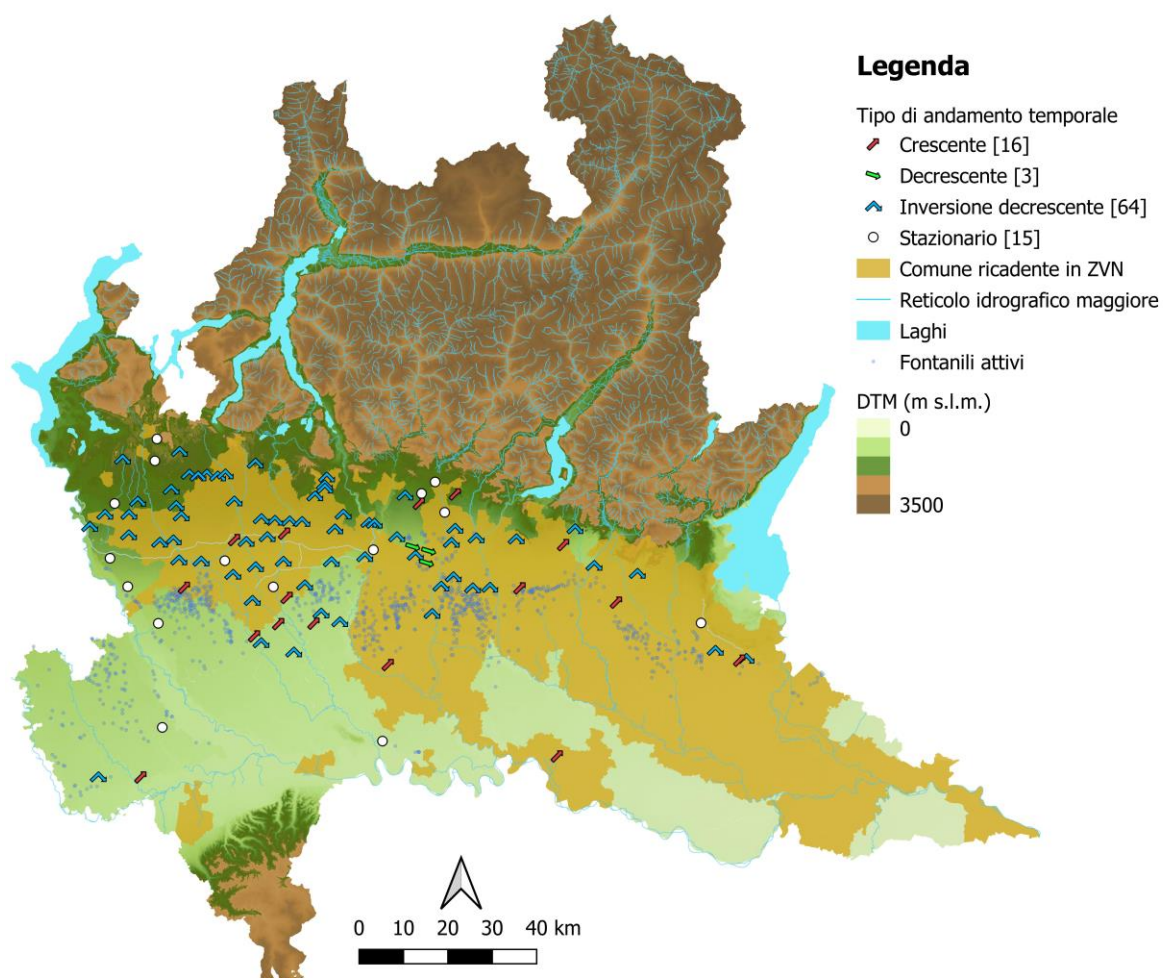


Figura 4.25 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni con l'aggiunta degli andamenti caratteristici dei cluster 2, 3 e 4, ottenuti dall'analisi sulle serie di almeno 10 anni, considerabili come sovrapponibili ai cluster ottenuti dall'analisi sui 16 anni; in arancio sono indicate le ZVN

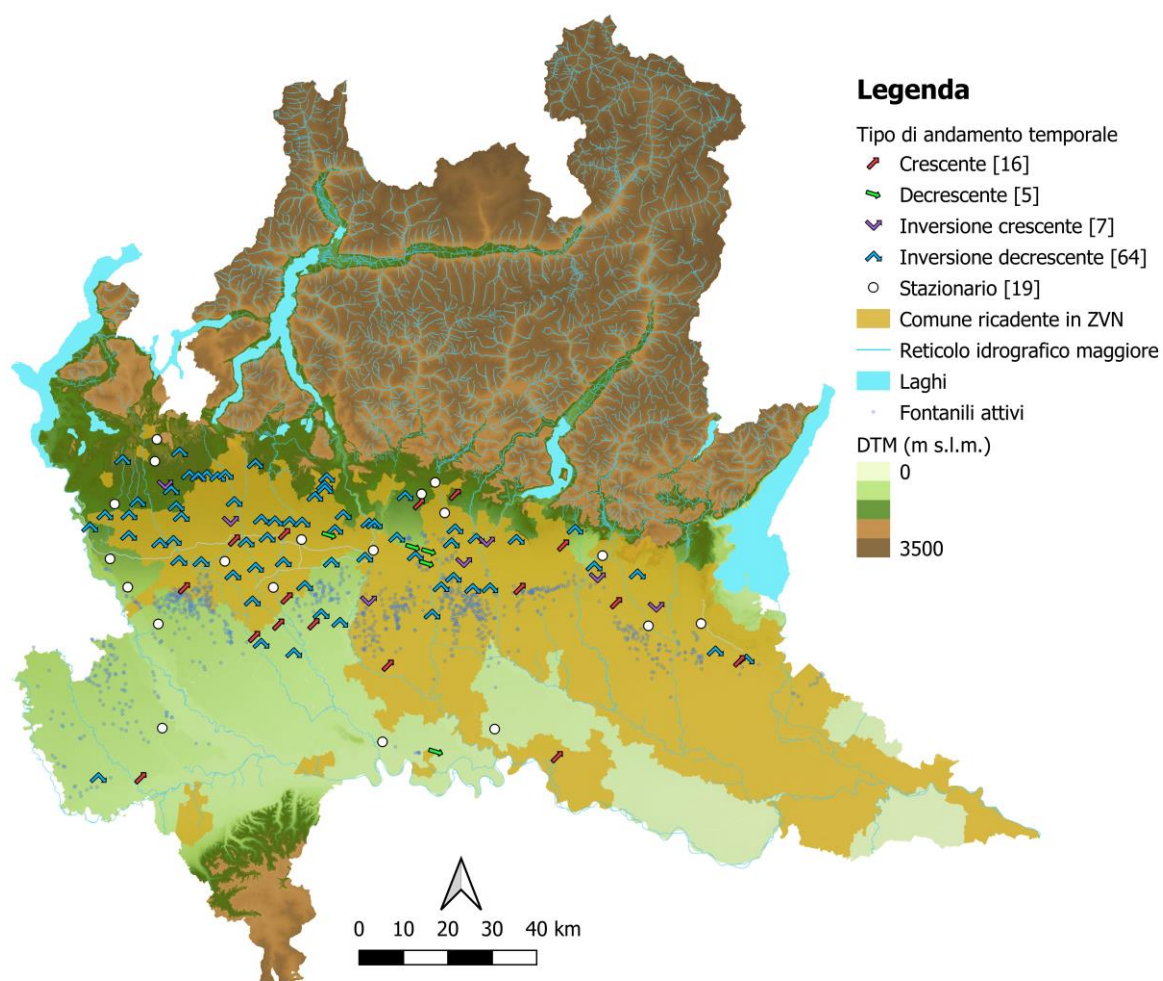


Figura 4.26 Andamenti temporali caratteristici derivati dalla cluster analysis sui 16 anni e da quella sui 10 anni; in arancio sono indicate le ZVN

5-----WP3 - PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE DI UN PIANO SPERIMENTALE DI CAMPIONAMENTO ED ANALISI

Le attività svolte all'interno di questo WP sono state:

- progettazione della rete di monitoraggio;
- esecuzione della prima campagna di monitoraggio delle falde (marzo 2022);
- esecuzione della prima campagna di monitoraggio delle acque superficiali (giugno 2022);
- esecuzione della seconda campagna di monitoraggio delle falde e delle acque superficiali (settembre 2022).

5.1 Progettazione della rete di monitoraggio

La progettazione della rete di monitoraggio è stata impostata per ottimizzare l'interpretabilità dei parametri di interesse, che nel presente progetto sono costituiti da $^3\text{H}/^3\text{He}$, come traccianti delle età delle falde, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ in acqua e Cl, Br e B, come traccianti della ricarica agli acquiferi (Cap. 1).

Nella definizione di un'adeguata rete di monitoraggio funzionale ai campionamenti per le analisi di ^3H e ^3He e successiva modellazione dei dati di età è stato necessario seguire i seguenti criteri:

- prediligere i pozzi mono-filtro, o in caso di pozzi con filtri multipli, questi devono captare dallo stesso acquifero;
- è necessario che il campionamento, a seguito di una fase adeguata di spurgo del pozzo, si possa effettuare con un flusso più basso possibile, in modo da evitare turbolenze che favoriscano il degassamento;
- è necessario che il campione d'acqua sia prelevato senza contatto con l'atmosfera; questo è un elemento cruciale che può determinare un degassamento del campione o una contaminazione con i gas atmosferici, entrambi fenomeni che possono inficiare anche di molto la restituzione del dato analitico;
- è necessario evitare che siano presenti cisterne di accumulo di acqua a monte del punto di prelievo.

Inoltre, l'interpretabilità dei dati analitici è ottimizzabile considerando punti di monitoraggio allineati lungo transetti sulle direzioni principali di flusso idrico sotterraneo: per questo motivo, la rete di monitoraggio funzionale al presente studio è stata impostata secondo transetti. In funzione del budget disponibile nel presente progetto, il numero di punti componente la rete di monitoraggio è stato fissato pari a 45. Questi 45 punti sono stati selezionati tra i punti di monitoraggio ARPA (con minime eccezioni, Tabella 5.1) al fine di realizzare transetti con le seguenti caratteristiche:

- coprire tutti i corpi idrici sotterranei superficiali dell'alta pianura lombarda;
- integrare i punti già campionati in marzo 2018 da UniPV (Cap. 3.2.4);
- inglobare nella rete di monitoraggio il maggior numero possibile di pozzi aventi serie storica di concentrazione di nitrato con lunghezza di 16 anni (2006-2021) e facenti parte dei cluster più popolosi risultati dalla cluster analysis temporale (Cap.4.6); in mancanza di pozzi con serie di 16 anni, la scelta ricade preferibilmente tra i 49 punti aggiuntivi con serie di almeno 10 anni;
- soddisfare le caratteristiche costruttive/impiantistiche dei pozzi citate nell'elenco precedente.

Le caratteristiche dei 45 punti di monitoraggio individuati sono riportate in Tabella 5.1. Questi 45 punti sono stati organizzati in 12 transetti, che inglobano anche i 20 punti ereditati da UniPV, per un totale quindi di 65 punti di monitoraggio. La Figura 5.1 mostra l'ubicazione dei 65 punti di monitoraggio. Di questi punti di monitoraggio, i dati sulle serie storiche di nitrato per 31 pozzi (Tabella 5.1) rientrano tra le elaborazioni svolte nel WP2 per i pozzi con serie dei 16 anni, mentre per 21 punti rientrano nel raggruppamento della serie di almeno 10 anni (Cap. 4; Tabella 5.1). Per i restanti 13 punti, non è stato possibile effettuare le analisi delle tendenze temporali in falda a causa di una lunghezza della serie storica di nitrato inferiore a 10 anni; questi punti sono stati comunque inglobati nel monitoraggio per un criterio spaziale, ovvero al fine di completare i transetti identificati.

Tabella 5.1 Caratteristiche costruttive dei pozzi della rete di monitoraggio con indicazione dell'appartenenza al cluster (Cap.4.6) e dell'eventuale campionamento nella seconda campagna di settembre 2022

#	Codice progetto	Codice ARPA	Codice UniPV	Comune	PV	# Filtri	Filtri_TOP (m)	Filtri_BOT (m)	Idrostruttura Captata	Lunghezza Serie	Appartenenza Cluster	Campagne di monitoraggio
1	T1A	PO012002NU0008		Albizzate	VA	1	18	28.5	ISS	16 anni	B	x1
2	T1B	PO012026NU0023		Busto Arsizio	VA	2	69.5	83	ISS-ISP	16 anni	B	x1
3	T1C	PO015194NR0015		San Giorgio su Legnano	MI	1	35	55	ISS	16 anni	C	x1
4	T1D	PO0150020U0014		Abbiategrosso	MI	1	67	94	ISI	16 anni	G	x2
5	T1E	PO0150360U0002	BUC	Buccinasco	MI	1	67.5	73.5	ISS	Altro	n.d.	x1
6	T2A	PO0130230U0003		Binago	CO	1	20.5	29.5	ISS	16 anni	A	x1
7	T2B	PO012136NU0001		Venegono Inferiore	VA	1	81	105	ISS-ISI	16 anni	A	x1
8	T2C	PO0131590U0001		Mozzate	CO	2	40	98	ISS-ISP	16 anni	E	x1
9	T2D	PO012050NU0004		Cislago	VA	2	69	108	ISS-ISP	16 anni	E	x1
10	T2E	PO0120750R2020		Gerenzano	VA	1	33.5	59	ISS	16 anni	C	x1
11	T2F		RES	Rescaldina	MI	1	38	78	ISS	Altro	n.d.	x1
12	T2G	PO015201NR0013		San Vittore Olona	MI	1	30	50	ISS	16 anni	C	x1
13	T2H	PO015182NR0018	RHO	Rho	MI	2	40	67	ISS	almeno 10 anni	2	x1
14	T3A	PO013064NU0002		Cermenate	CO	1	98.3	102.3	ISS	16 anni	B	x1
15	T3B	PO108005NU0002		Barlassina	MB	2	55.4	73.8	ISS	almeno 10 anni	2	x1
16	T3C	PO108027NR0020		Limbate	MB	1	46.9	52.1	ISS	almeno 10 anni	1	x2
17	T3D	PO0152060U0004		Senago	MI	2	41.3	64.1	ISS-ISP	16 anni	F	x1
18	T3E	PO0151660U0001		Paderno Dugnano	MI	1	39	63	ISS-ISP	16 anni	C	x1
19	T3F	PO015146NR0699		Milano	MI	1	21.6	27.6	ISS	16 anni	E	x1
20	T4A	PO0970200U0003		Cernusco Lombardone	LC	1	37	43	ISS	16 anni	D	x1
21	T4B		CRN	Carnate	MB	2	32.5	37	ISS	Altro	n.d.	x1
22	T4C		AGR	Agrate Brianza	MB	5	25.4	81	ISS	Altro	n.d.	x1
23	T4D	PO0151080U0002		Gorgonzola	MI	1	33.1	46.6	ISS-ISI	16 anni	E	x1
24	T4E		CDP	Cassina De Pecchi	MI	2	37.5	69.5	ISS	Altro	n.d.	x1
25	T4F		VIG	Vignate	MI	1	46.5	55.5	ISS	Altro	n.d.	x1
26	T4G	PO015175NR0150		Pioltello	MI	1	13.2	50	ISS-ISI	16 anni	E	x1
27	T4H	PO015210NR0022		Settala	MI	2	18	38.5	ISS	16 anni	E	x2
28	T5A	PO0161150R0118		Gorle	BG	1	56	68	ISS	16 anni	A	x1

#	Codice progetto	Codice ARPA	Codice UniPV	Comune	PV	# Filtri	Filtri_TOP (m)	Filtri_BOT (m)	Idrostruttura Captata	Lunghezza Serie	Appartenenza Cluster	Campagne di monitoraggio
29	T5B	PO0162070R0001	STZ	Stezzano	BG	3	54	81	ISS	16 anni	F	x1
30	T5C		BNT	Levate	BG	2	32	53	ISS	Altro	n.d.	x1
31	T5D	PO0161290R0001		Lurano	BG	1	25	30	ISS	16 anni	H	X2
32	T5E	PO0161400R0001		Morengo	BG	1	17	32	ISS	16 anni	H	x1
33	T5F	PO0160400U0001	BRI	Brignano Gera D'adda	BG	1	29.4	38.1	ISS	16 anni	C	x1
34	T5G	PO0161540R0001		Pagazzano	BG	2	21	42	ISS	16 anni	H	x1
35	T5H	PO0160530U0002	CAR	Caravaggio	BG	2	44	86	ISS	Altro	n.d.	x1
36	T6A	PO016042NU0001		Brusaporto	BG	1	39	69		almeno 10 anni	4	x1
37	T6B		CAS	Calcinante	BG	n.d.	n.d.	n.d.	ISS	Altro	n.d.	x1
38	T6C	PO0161130R0001		Ghisalba	BG	1	18	25	ISS	16 anni	D	x2
39	T6D	PO0161570R3380		Palosco	BG	1	35	44		16 anni	B	x1
40	T6E	PO0161330R0158		Martinengo	BG	n.d.	n.d.	n.d.	ISS	16 anni	C	x1
41	T6F		MRT	Martinengo	BG	1	33	38	ISS	Altro	n.d.	x1
42	T6G	PO0160870R0001		Covo	BG	1	20	25	ISS	16 anni	E	x1
43	T6H		ANT	Antegnate	BG	1	12	14	ISS	Altro	n.d.	x1
44	T6I	PO0161220R0519		Isso	BG	n.d.	n.d.	n.d.	ISS	16 anni	C	x1
45	T7A		HL11	Chiari	BS	1	37	43	ISS	Altro	n.d.	x1
46	T7B		OV62	Rudiano	BS	1	40	66	ISS	Altro	n.d.	x1
47	T7C	PO0161770U0001		Pumenengo	BG	1	42	54	ISI	16 anni	E	x2
48	T8A		HL04	Cologne	BS	1	50	84	ISS	Altro	n.d.	x1
49	T8B		HL13	Castrezzato	BS	1	20	24	ISS	Altro	n.d.	x1
50	T8C	PO0170600UC013		Comezzano-Cizzago	BS	1	24	36	ISS-ISI	almeno 10 anni	4	x2
51	T9A	PO0171630UC032		Rodengo - Saiano	BS	3	77	111	ISS-ISI	almeno 10 anni	2	x1
52	T9B			Castegnato	BS	1	57	87	ISI	Altro	n.d.	x1
53	T9C		HL09	Castegnato	BS	1	65	80	ISS	Altro	n.d.	x1
54	T9D			Azzano Mella	BS	1	55.5	60	ISI	Altro	n.d.	x1
55	T9E		S200	Lograto	BS	n.d.	n.d.	n.d.	ISS	Altro	n.d.	x1
56	T9F			Azzano Mella	BS	2	19	28.5	ISS	Altro	n.d.	x1
57	T10A	PO0170290RC490		Brescia	BS	1	17	34	ISS	almeno 10 anni	2	x1
58	T10B	PO0171140UC023		Montirone	BS	1	22.3	31.3	ISS	almeno 10 anni	4	x2
59	T11A	PO017113NRD106		Montichiari	BS	1	29.8	41.8	ISS	almeno 10 anni	6	x2

#	Codice progetto	Codice ARPA	Codice UniPV	Comune	PV	# Filtri	Filtri_TOP (m)	Filtri_BOT (m)	Idrostruttura Captata	Lunghezza Serie	Appartenenza Cluster	Campagne di monitoraggio
60	T11B	PO0170340RC481		Calvisano	BS	1	4	10	ISS	almeno 10 anni	10	x1
61	T11C	PO0170860UC579		Isorella	BS	1	42	47	ISI	almeno 10 anni	n.d.	x1
62	T12A	PO0200170R0001		Castiglione delle Stiviere	MN	1	18	28	ISS	16 anni	J	x1
63	T12B	PO020034NU0002		Medole	MN	1	27	39	ISS	Altro	n.d.	x1
64	T12C	PO0200280R0056		Guidizzolo	MN	1	44	54	ISS-ISI	almeno 10 anni	4	x2
65	T12D	PO0200150R0001		Castel Goffredo	MN	1	32	36	ISS	almeno 10 anni	n.d.	x1

n.d.: non determinato

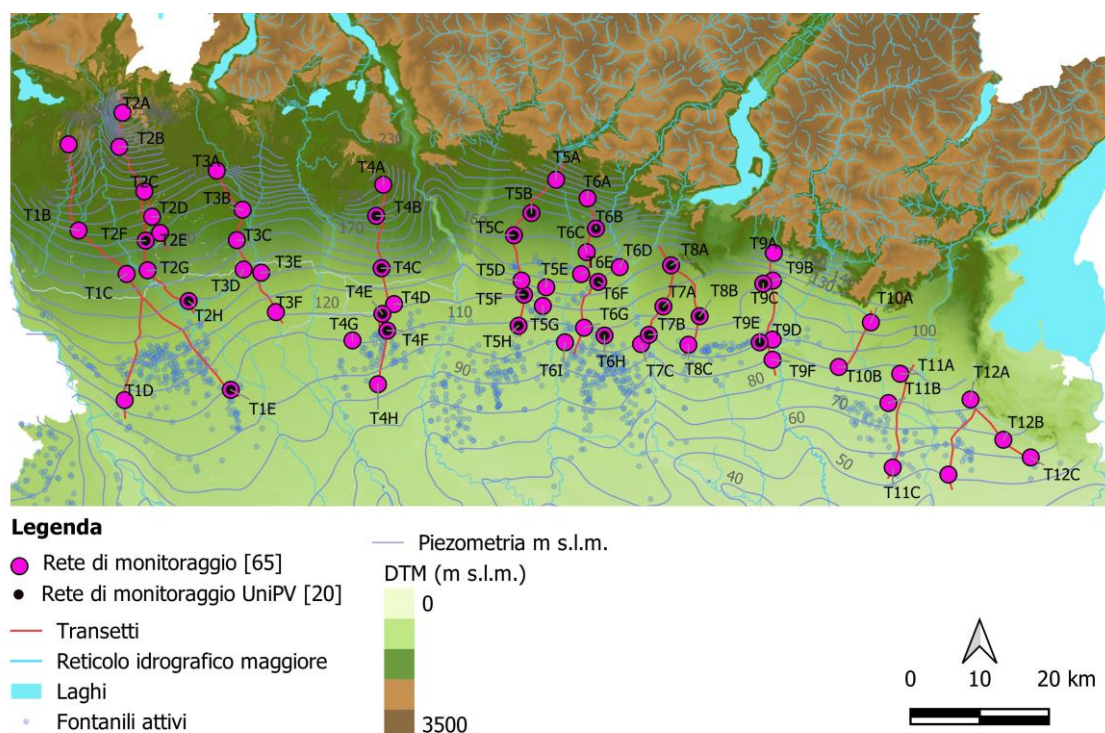


Figura 5.1 Mappa relativa alla localizzazione dei 65 pozzi della rete di monitoraggio

Per ogni punto di campionamento della rete di monitoraggio sperimentale sono state prelevate aliquote d'acqua specifiche per le seguenti tipologie di analisi:

- $^3\text{H}/^3\text{He}$ per la datazione delle falde,
- $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ per tracciare le sorgenti di ricarica alla falda,
- Cl, B e Br per tracciare le sorgenti di ricarica alla falda.

Il campionamento è stato effettuato solo a seguito dello spurgo del pozzo. La condizione di spurgo è stata verificata tramite stabilizzazione dei parametri chimico-fisici misurati in continuo in campo con sonde specifiche. I parametri chimico-fisici misurati, sono stati: temperatura, pH, conduttività elettrica e ossigeno disciolto.

I campioni prelevati, sono stati conservati e successivamente spediti ai diversi laboratori incaricati e qui di seguito elencati:

- ISO4 S.n.c. di Torino, per l'analisi di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ in acqua,
- Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (LNGS-INFN) di Assergi (AQ), per l'analisi di Cl, B e Br;

- Smart Gas Sciences LLC presso il Mendenhall Laboratory della Ohio State University di Columbus, Ohio, USA, per l'analisi di ^3H e ^3He .

5.2 Prima campagna di monitoraggio delle falde (marzo 2022)

La campagna è stata eseguita nell'arco temporale compreso tra il 14/03/2022 e il 04/04/2022. Sono stati campionati 44 pozzi sui 45 individuati in quanto per il pozzo PO0120750R2020, con codice progetto T2E (Figura 5.1), di Gerenzano (VA) è stata verificata la non idoneità al campionamento per ^3H e ^3He poiché l'impiantistica del pozzo non garantiva l'isolamento tra l'acqua estratta dal pozzo e l'ambiente atmosferico.

I parametri misurati in campo, le concentrazioni dei traccianti chimici e i valori isotopici della molecola d'acqua analizzati sono riportati in Tabella 5.2, i relativi punti di campionamento solo illustrati in Figura 5.1. La temperatura dell'acqua campionata varia da un minimo di 10.3°C (T6C) ad un massimo di 17.5°C (T4D) con un valore medio di 14.7°C, mentre i valori di pH oscillano tra i 6.1 (T2A) fino a 8.0 in (T2D; Tabella 5.2; Figura 5.1). Un'ampia variabilità è stata registrata per la conducibilità elettrica: valori molto bassi con minimi nell'intorno dei 200/290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ si rinvencono in corrispondenza del transetto 2 (T2A, T2C e T2D; Tabella 5.2; Figura 5.1) mentre valori tra gli 800/880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ caratterizzano alcuni campioni prelevati nella pianura medio-orientale (T6I, T9F, T11A, T11B e T12A; Tabella 5.2; Figura 5.1); il valore medio si attesta sui 625 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Come da attese, le falde dell'alta e media pianura lombarda risultano ben ossigenate, con un massimo di 10.6 mg/L nel punto T2C; i valori minimi sono stati registrati alla transizione con la bassa pianura e raggiungono 1.2 mg/L (T9F) e 0.0 mg/L (T12D; Tabella 5.2; Figura 5.1).

Le concentrazioni dei traccianti chimici sono risultate essere tutte sopra i rispettivi limiti di rilevabilità (1 $\mu\text{g}/\text{L}$ per B e Br; 0.5 mg/L per Cl). Il valore medio di B per l'area di studio è di 30 $\mu\text{g}/\text{L}$, con valori minimi per il T2C (3.6 $\mu\text{g}/\text{L}$) e il T2D (3.8 $\mu\text{g}/\text{L}$) e valori massimi in corrispondenza di T11A (192.5 $\mu\text{g}/\text{L}$) e T11B (111.1 $\mu\text{g}/\text{L}$). Questo parametro verrà utilizzato assieme all'informazione derivante dall'elio triziogenico ai fini della datazione delle falde (Cap. 6.3).

Per quanto riguarda il Cl registriamo un valore medio di 20.5 mg/L, con valori minimi sempre per il T2D (3.5 mg/L) e il T2C (4.6 mg/L) e valori massimi per il T1A (39.7 mg/L) e il T6I (39.4 mg/L; Tabella 5.2; Figura 5.1). Il Br ha un valore medio di 72.7 µg/L e varia da un minimo di 17.2 µg/L (T2C) e 17.6 µg/L (T11C) ad un massimo di 289.9 µg/L in corrispondenza del T6E (Tabella 5.2; Figura 5.1).

Descrivendo i risultati ottenuti per gli isotopi stabili dell'acqua (Tabella 5.2; Figura 5.1), $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ (‰), vediamo come per $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ registriamo un valore medio di -8.39‰, con un massimo di -7.62‰ (T9A) ed un minimo di -9.39‰ (T11C); per $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$, il valore medio è di -54.5‰, con un valore massimo di -47.9‰ (T1A) ed un minimo di -61.8‰ (T11C; Tabella 5.2; Figura 5.1).

Il trizio, l'isotopo non stabile della molecola d'acqua, è risultato misurabile sopra al limite di rivelabilità (0.2 U.T.) per tutti i campioni della rete di monitoraggio sperimentale (Tabella 5.2; Figura 5.1). Valori vicino al limite di rivelabilità sono stati riscontrati nel T1A (0.9 U.T.) e nel T4A (0.5 U.T.), mentre le concentrazioni più alte riguardano il T4D (4.7 U.T.) ed il T11C (5.0 U.T.). Quale termine di confronto si sottolinea che la concentrazione di trizio nelle precipitazioni attuali è di 5-6 U.T. (Giustini et al., 2016), e rappresenta il valore di input moderno di trizio alla ricarica della falda. Questo parametro verrà utilizzato assieme all'informazione derivante dall'elio triziogenico ai fini della datazione delle falde (Cap. 6.3).

Tabella 5.2 Parametri chimico-fisici ed analitici relativi alla prima campagna di monitoraggio per i 44 pozzi della rete sperimentale

#	Codice Progetto	Data	Parametri misurati in campo					Concentrazione traccianti chimici				Isotopi molecola d'acqua		
			Quota m s.l.m.	Temp (°C)	pH	EC (µS/cm)	O2 (mg/L)	B (µg/L)	Cl (mg/L)	Br (µg/L)	Cl/Br mass ratio	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	T (U.T.)
1	T1A	25/3/2022	315.46	13.1	7.3	582	5.41	22.6	39.73	33.6	1180.8	-7.67	-47.5	0.9
2	T1B	25/3/2022	232.42	12.9	7.6	654	9.53	10.7	23.13	39.0	592.3	-7.87	-51.4	2.9
3	T1C	22/3/2022	196.09	16.2	7.2	729	8.52	55.5	36.23	34.0	1065.8	-7.84	-51.3	3.1
4	T1D	23/3/2022	121.62	14.1	7.5	492	5.91	5.5	9.72	18.5	524.6	-9.01	-59.5	3.7
5	T2A	4/4/2022	373.26	13.1	6.1	249	8.47	8.8	16.88	30.4	555.3	-8.37	-53.8	3.5
6	T2B	25/3/2022	323.34	12.9	7.2	448	7.18	6.0	10.27	33.2	309.0	-8.15	-52.6	1.5
7	T2C	22/3/2022	261.64	11.5	7.7	284	10.61	3.6	4.62	17.2	268.4	-8.05	-51.1	1.7

#	Codice Progetto	Data	Parametri misurati in campo					Concentrazione traccianti chimici				Isotopi molecola d'acqua		
			Quota m s.l.m.	Temp (°C)	pH	EC (μS/cm)	O2 (mg/L)	B (μg/L)	Cl (mg/L)	Br (μg/L)	Cl/Br mass ratio	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)	T (U.T.)
8	T2D	25/3/2022	235.00	12.7	8.0	207	10.27	3.8	3.46	19.7	175.7	-8.24	-53.3	2.2
9	T2G	22/3/2022	189.61	13.9	7.6	737	8.44	45.7	22.55	49.4	456.6	-8.02	-50.4	1.7
10	T3A	22/3/2022	304.20	12.7	7.6	570	8.66	23.2	27.51	40.0	687.4	-8.01	-51.0	3.7
11	T3B	16/3/2022	226.68	13.1	7.4	652	8.87	42.1	29.72	45.5	653.5	-7.88	-50.9	3.7
12	T3C	16/3/2022	211.69	13.7	7.4	606	8.40	17.2	33.71	169.0	199.5	-7.87	-50.2	3.0
13	T3D	23/3/2022	170.56	13.7	7.5	578	9.38	32.8	26.79	119.6	224.0	-7.98	-51.0	2.7
14	T3E	23/3/2022	166.09	14.6	7.3	696	7.16	71.9	31.43	48.7	645.5	-8.03	-50.9	3.7
15	T3F	23/3/2022	137.41	15.3	7.3	664	8.66	34.1	34.43	52.3	658.1	-8.05	-51.6	4.0
16	T4A	16/3/2022	249.76	13.6	7.2	636	5.94	30.0	14.10	25.0	563.1	-7.75	-49.2	0.5
17	T4D	23/3/2022	134.57	17.5	7.4	563	9.09	13.3	12.69	18.7	680.5	-8.62	-55.5	4.7
18	T4G	16/3/2022	116.24	16.9	7.3	580	7.66	34.5	17.32	25.0	694.1	-8.89	-59.0	3.1
19	T4H	16/3/2022	97.56	16.2	7.2	558	4.26	27.4	13.78	24.0	573.6	-8.91	-60.4	2.7
20	T5A	14/3/2022	261.03	13.0	7.4	463	7.26	15.4	20.14	200.0	100.7	-9.11	-59.0	3.2
21	T5D	14/3/2022	142.31	15.0	7.0	666	8.11	46.3	19.12	86.1	221.9	-8.70	-56.7	3.1
22	T5E	18/3/2022	135.13	13.3	7.2	595	7.42	27.8	19.38	159.9	121.2	-8.81	-57.3	3.8
23	T5G	14/3/2022	122.95	14.5	7.1	612	6.85	27.9	18.63	145.8	127.8	-8.81	-57.4	2.4
24	T6A	18/3/2022	229.87	14.7	7.0	703	5.28	6.1	7.62	20.9	363.9	-7.81	-50.8	2.5
25	T6C	18/3/2022	172.20	10.3	7.2	736	7.87	15.3	24.60	214.3	114.8	-8.43	-54.1	2.5
26	T6D	18/3/2022	149.43	14.9	7.3	600	4.79	44.6	22.18	138.7	159.9	-7.64	-49.7	3.2
27	T6E	18/3/2022	148.37	14.8	7.2	646	4.27	25.6	32.42	289.9	111.8	-8.77	-56.6	3.1
28	T6G	14/3/2022	112.74	14.0	7.1	719	6.75	9.5	25.51	143.2	178.1	-8.48	-54.8	2.1
29	T6I	14/3/2022	104.83	15.5	7.0	846	4.92	30.3	39.43	286.8	137.5	-8.53	-55.9	3.1
30	T7C	29/3/2022	109.86	15.9	7.4	497	5.98	22.7	9.54	23.7	402.4	-8.95	-60.6	2.6
31	T8C	29/3/2022	108.82	15.4	7.3	543	7.80	13.5	10.72	21.9	488.9	-8.79	-59.5	2.0
32	T9A	30/3/2022	171.44	14.5	7.1	720	8.40	24.7	26.11	34.3	760.9	-7.62	-49.6	3.6
33	T9B	29/3/2022	138.99	15.1	7.1	730	8.00	18.7	22.72	40.2	565.1	-7.92	-51.7	3.0
34	T9D	29/3/2022	101.35	14.8	7.4	614	6.96	14.5	26.29	39.4	666.8	-8.66	-57.3	3.2
35	T9F	29/3/2022	93.52	16.6	7.1	795	1.21	28.4	24.77	53.9	459.4	-8.29	-54.6	2.7
36	T10A	30/3/2022	135.40	15.0	7.3	611	8.00	25.6	13.07	18.7	699.5	-8.85	-56.9	3.1
37	T10B	30/3/2022	100.35	14.9	7.3	591	7.61	21.4	10.07	20.0	504.6	-8.97	-58.8	4.0
38	T11A	30/3/2022	110.88	15.2	7.1	877	3.48	192.5	20.33	171.9	118.3	-8.78	-57.0	2.1
39	T11B	30/3/2022	84.57	15.4	7.1	798	6.79	111.1	18.12	82.1	220.7	-8.76	-57.0	3.6
40	T11C	30/3/2022	55.36	13.7	7.5	523	3.05	15.9	6.49	17.6	368.1	-9.39	-61.8	5.0
41	T12A	31/3/2022	105.43	16.7	7.1	840	7.61	26.4	31.79	46.5	683.1	-8.24	-54.1	3.3
42	T12B	31/3/2022	84.30	16.3	7.1	782	7.01	17.0	15.68	38.2	410.5	-7.95	-52.3	3.0
43	T12C	31/3/2022	65.59	14.8	7.2	761	5.08	21.5	15.18	34.8	436.0	-8.79	-56.7	2.1
44	T12D	31/3/2022	53.27	15.2	7.3	743	0	26.4	14.52	27.2	533.0	-9.04	-58.7	3.3

In Tabella 5.3, vengono riportate le concentrazioni elementari ed isotopiche dei principali gas nobili disciolti in acqua di falda, espresse in cm³STP/g (con STP che sta per Standard Temperature and Pressure), relative alle acque campionate (Figura 5.1).

Ognuno di questi elementi riportati in tabella sarà poi utile per il metodo della datazione riportato nella sezione 6.3.1, mentre in questa sezione vengono descritte le relative abbondanze in soluzione come anche la distribuzione di questi valori sul territorio. Si osserva come l' ^3He presenti un valore medio misurato di $1.69\text{E}^{-13} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ mentre l' ^4He , con un valore medio di $1.03\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, risulta essere molto più abbondante, quasi il doppio, rispetto all'isotopo più leggero. In generale, sia per l' ^3He che per l' ^4He si osservano concentrazioni maggiori nei 5 transetti occidentali della rete sperimentale, concentrazioni che localmente diminuiscono procedendo verso est (Tabella 5.3). Il valore minimo di ^3He con $6.37\text{E}^{-14} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ si riscontra in corrispondenza di T6I mentre il valore massimo è misurato in T2C ($1.32\text{E}^{-12} \text{ cm}^3\text{STP/g}$) (Tabella 5.3). Per quanto riguarda l' ^4He , il valore minimo si registra per il pozzo T9D ($4.52\text{E}^{-08} \text{ cm}^3\text{STP/g}$), mentre il valore massimo di 8.21E^{-07} caratterizza la composizione isotopica del T2C (Tabella 5.3). Il Ne sia concentrazione elementare ed isotopica (^{20}Ne) presenta la stessa magnitudo dell' $^4\text{He}_{\text{tot}}$, con un valore medio di $2.98\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ ($2.70\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ per il ^{20}Ne), il valore minimo è registrato in T9F ($1.38\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$; 1.26E^{-07} per il ^{20}Ne) mentre il valore massimo in T2C è di $1.48\text{E}^{-06} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ (1.34E^{-06} per il ^{20}Ne ; Tabella 5.3, Figura 5.1). Similmente, sia il kripton che lo xenon sono presenti nelle acque di falda con concentrazioni medie di 9.06E^{-08} e $1.81\text{E}^{-09} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, rispettivamente (Tabella 5.3). L'argon invece, rappresenta il gas disciolto più abbondante tra quelli citati: la sua concentrazione media elementare è di $4.22\text{E}^{-04} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, mentre il rapporto medio tra i due isotopi $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ è di 296.49 (Tabella 5.3).

Tabella 5.3 Concentrazione elementare ed isotopica dei principali gas nobili per la prima campagna di monitoraggio

#	Codice Progetto	Data	Concentrazione elementare ed isotopica dei gas nobili															
			³ He (cm ³ STP/g)	±	⁴ He (cm ³ STP/g)	±	Ne (cm ³ STP/g)	±	²⁰ Ne (cm ³ STP/g)	±	Ar (cm ³ STP/g)	±	Kr (cm ³ STP/g)	±	Xe (cm ³ STP/g)	±	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar (cm ³ STP/g)	±
1	T1A	25/3/2022	1.45E-13	4.34E-15	1.20E-07	2.39E-09	3.00E-07	6.00E-09	2.72E-07	5.43E-09	4.49E-04	8.99E-06	1.04E-07	2.07E-09	1.68E-08	3.35E-10	295.8	1.5
2	T1B	25/3/2022	1.36E-13	4.08E-15	9.88E-08	1.98E-09	3.73E-07	7.45E-09	3.37E-07	6.75E-09	2.92E-04	5.84E-06	5.15E-08	1.03E-09	6.82E-09	1.36E-10	296.2	1.5
3	T1C	22/3/2022	1.43E-13	4.28E-15	9.21E-08	1.84E-09	2.91E-07	5.82E-09	2.63E-07	5.26E-09	3.65E-04	7.31E-06	7.59E-08	1.52E-09	1.12E-08	2.23E-10	295.8	1.5
4	T1D	23/3/2022	2.49E-13	7.48E-15	7.84E-08	1.57E-09	3.05E-07	6.11E-09	2.76E-07	5.53E-09	4.39E-04	8.78E-06	9.56E-08	1.91E-09	1.45E-08	2.90E-10	295.7	1.5
5	T2A	4/4/2022	1.32E-13	3.96E-15	7.87E-08	1.57E-09	2.13E-07	4.26E-09	1.93E-07	3.86E-09	3.24E-04	6.47E-06	7.51E-08	1.50E-09	1.25E-08	2.50E-10	297.9	1.5
6	T2B	25/3/2022	2.82E-13	8.46E-15	9.11E-08	1.82E-09	2.78E-07	5.55E-09	2.51E-07	5.02E-09	4.65E-04	9.29E-06	1.08E-07	2.17E-09	1.72E-08	3.43E-10	295.8	1.5
7	T2C	22/3/2022	1.32E-12	3.95E-14	8.21E-07	1.64E-08	1.48E-06	2.96E-08	1.34E-06	2.68E-08	2.54E-03	5.08E-05	4.90E-07	9.80E-09	7.20E-08	1.44E-09	295.8	1.5
8	T2D	25/3/2022	4.29E-13	1.29E-14	2.64E-07	5.27E-09	5.98E-07	1.20E-08	5.43E-07	1.09E-08	4.60E-04	9.20E-06	1.04E-07	2.07E-09	1.61E-08	3.22E-10	296.0	1.5
9	T2G	22/3/2022	1.88E-13	5.63E-15	8.06E-08	1.61E-09	2.73E-07	5.46E-09	2.47E-07	4.94E-09	4.46E-04	8.91E-06	1.05E-07	2.09E-09	1.66E-08	3.32E-10	296.4	1.5
10	T3A	22/3/2022	1.60E-13	4.81E-15	8.09E-08	1.62E-09	2.66E-07	5.33E-09	2.41E-07	4.82E-09	3.53E-04	7.05E-06	9.02E-08	1.80E-09	1.41E-08	2.83E-10	296.7	1.5
11	T3B	16/3/2022	1.86E-13	5.57E-15	1.21E-07	2.42E-09	3.37E-07	6.74E-09	3.05E-07	6.10E-09	4.21E-04	8.41E-06	8.40E-08	1.68E-09	1.31E-08	2.61E-10	295.8	1.5
12	T3C	16/3/2022	1.92E-13	5.77E-15	1.15E-07	2.29E-09	3.79E-07	7.57E-09	3.43E-07	6.85E-09	4.92E-04	9.83E-06	1.05E-07	2.10E-09	1.57E-08	3.15E-10	295.6	1.5
13	T3D	23/3/2022	2.00E-13	6.00E-15	1.08E-07	2.17E-09	3.17E-07	6.33E-09	2.87E-07	5.73E-09	3.13E-04	6.26E-06	5.79E-08	1.16E-09	7.98E-09	1.60E-10	296.2	1.5
14	T3E	23/3/2022	1.56E-13	4.68E-15	9.55E-08	1.91E-09	3.01E-07	6.02E-09	2.73E-07	5.45E-09	3.50E-04	7.00E-06	8.64E-08	1.73E-09	1.33E-08	2.66E-10	297.5	1.5
15	T3F	23/3/2022	1.22E-13	3.67E-15	8.12E-08	1.62E-09	3.01E-07	6.03E-09	2.73E-07	5.46E-09	3.69E-04	7.38E-06	7.48E-08	1.50E-09	9.62E-09	1.92E-10	297.5	1.5
16	T4A	16/3/2022	1.16E-13	3.47E-15	9.05E-08	1.81E-09	2.39E-07	4.79E-09	2.17E-07	4.33E-09	3.88E-04	7.76E-06	7.80E-08	1.56E-09	1.12E-08	2.25E-10	297.8	1.5
17	T4D	23/3/2022	1.27E-13	3.82E-15	9.13E-08	1.83E-09	2.73E-07	5.45E-09	2.47E-07	4.94E-09	3.16E-04	6.32E-06	6.64E-08	1.33E-09	1.01E-08	2.02E-10	295.7	1.5
18	T4G	16/3/2022	1.09E-13	3.27E-15	7.77E-08	1.55E-09	2.56E-07	5.11E-09	2.31E-07	4.63E-09	3.55E-04	7.10E-06	9.25E-08	1.85E-09	1.51E-08	3.03E-10	299.9	1.5
19	T4H	16/3/2022	1.60E-13	4.80E-15	1.10E-07	2.19E-09	4.00E-07	8.00E-09	3.62E-07	7.24E-09	4.09E-04	8.19E-06	1.09E-07	2.18E-09	1.74E-08	3.48E-10	297.3	1.5
20	T5A	14/3/2022	1.03E-13	3.08E-15	8.10E-08	1.62E-09	2.58E-07	5.17E-09	2.34E-07	4.67E-09	3.99E-04	7.98E-06	7.90E-08	1.58E-09	1.15E-08	2.30E-10	295.9	1.5
21	T5D	14/3/2022	1.23E-13	3.68E-15	9.02E-08	1.80E-09	2.77E-07	5.54E-09	2.50E-07	5.01E-09	3.48E-04	6.96E-06	8.81E-08	1.76E-09	1.38E-08	2.77E-10	296.5	1.5
22	T5E	18/3/2022	1.43E-13	4.29E-15	9.32E-08	1.86E-09	3.03E-07	6.05E-09	2.74E-07	5.48E-09	3.54E-04	7.09E-06	7.43E-08	1.49E-09	1.11E-08	2.22E-10	296.4	1.5
23	T5G	14/3/2022	1.53E-13	4.59E-15	1.08E-07	2.15E-09	2.86E-07	5.72E-09	2.59E-07	5.18E-09	4.92E-04	9.84E-06	1.11E-07	2.21E-09	1.66E-08	3.33E-10	295.8	1.5
24	T6A	18/3/2022	1.62E-13	4.87E-15	7.54E-08	1.51E-09	2.62E-07	5.24E-09	2.37E-07	4.74E-09	3.43E-04	6.86E-06	6.64E-08	1.33E-09	9.17E-09	1.83E-10	295.7	1.5
25	T6C	18/3/2022	1.15E-13	3.44E-15	7.41E-08	1.48E-09	2.67E-07	5.35E-09	2.42E-07	4.84E-09	3.94E-04	7.89E-06	8.99E-08	1.80E-09	1.42E-08	2.85E-10	296.4	1.5

#	Codice Progetto	Data	Concentrazione elementare ed isotopica dei gas nobili															
			³ He (cm ³ STP/g)	±	⁴ He (cm ³ STP/g)	±	Ne (cm ³ STP/g)	±	²⁰ Ne (cm ³ STP/g)	±	Ar (cm ³ STP/g)	±	Kr (cm ³ STP/g)	±	Xe (cm ³ STP/g)	±	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar (cm ³ STP/g)	±
26	T6D	18/3/2022	7.89E-14	2.37E-15	5.91E-08	1.18E-09	2.40E-07	4.81E-09	2.18E-07	4.35E-09	4.00E-04	8.00E-06	8.95E-08	1.79E-09	1.28E-08	2.56E-10	297.9	1.5
27	T6E	18/3/2022	9.34E-14	2.80E-15	6.41E-08	1.28E-09	2.73E-07	5.47E-09	2.47E-07	4.95E-09	3.75E-04	7.49E-06	8.01E-08	1.60E-09	1.21E-08	2.42E-10	295.5	1.5
28	T6G	14/3/2022	1.12E-13	3.36E-15	5.84E-08	1.17E-09	1.93E-07	3.87E-09	1.75E-07	3.50E-09	3.59E-04	7.18E-06	9.07E-08	1.81E-09	1.43E-08	2.87E-10	296.9	1.5
29	T6I	14/3/2022	6.37E-14	1.91E-15	4.71E-08	9.42E-10	1.73E-07	3.45E-09	1.56E-07	3.12E-09	3.56E-04	7.12E-06	8.90E-08	1.78E-09	1.47E-08	2.94E-10	297.9	1.5
30	T7C	29/3/2022	8.19E-14	2.46E-15	5.05E-08	1.01E-09	1.77E-07	3.54E-09	1.60E-07	3.20E-09	2.82E-04	5.64E-06	6.06E-08	1.21E-09	8.52E-09	1.70E-10	297.4	1.5
31	T8C	29/3/2022	9.37E-14	2.81E-15	5.94E-08	1.19E-09	2.24E-07	4.48E-09	2.03E-07	4.06E-09	3.11E-04	6.21E-06	6.73E-08	1.35E-09	1.05E-08	2.09E-10	297.7	1.5
32	T9A	30/3/2022	9.96E-14	2.99E-15	7.55E-08	1.51E-09	3.07E-07	6.13E-09	2.77E-07	5.55E-09	3.81E-04	7.62E-06	8.26E-08	1.65E-09	1.28E-08	2.57E-10	295.6	1.5
33	T9B	29/3/2022	1.07E-13	3.22E-15	5.66E-08	1.13E-09	1.92E-07	3.84E-09	1.74E-07	3.47E-09	3.18E-04	6.37E-06	6.81E-08	1.36E-09	1.03E-08	2.06E-10	297.2	1.5
34	T9D	29/3/2022	1.04E-13	3.13E-15	4.52E-08	9.04E-10	1.80E-07	3.59E-09	1.63E-07	3.25E-09	2.93E-04	5.86E-06	6.55E-08	1.31E-09	9.85E-09	1.97E-10	296.1	1.5
35	T9F	29/3/2022	6.76E-14	2.03E-15	5.30E-08	1.06E-09	1.39E-07	2.78E-09	1.26E-07	2.52E-09	4.56E-04	9.12E-06	9.45E-08	1.89E-09	1.39E-08	2.77E-10	295.6	1.5
36	T10A	30/3/2022	1.52E-13	4.57E-15	1.05E-07	2.10E-09	3.02E-07	6.04E-09	2.73E-07	5.47E-09	4.17E-04	8.35E-06	8.28E-08	1.66E-09	1.20E-08	2.41E-10	295.9	1.5
37	T10B	30/3/2022	1.25E-13	3.76E-15	8.25E-08	1.65E-09	2.74E-07	5.48E-09	2.48E-07	4.96E-09	3.70E-04	7.41E-06	9.44E-08	1.89E-09	1.53E-08	3.06E-10	296.6	1.5
38	T11A	30/3/2022	9.96E-14	2.99E-15	7.13E-08	1.43E-09	2.52E-07	5.03E-09	2.28E-07	4.55E-09	3.50E-04	7.01E-06	6.89E-08	1.38E-09	9.57E-09	1.91E-10	295.9	1.5
39	T11B	30/3/2022	8.88E-14	2.66E-15	6.12E-08	1.22E-09	1.87E-07	3.74E-09	1.69E-07	3.38E-09	3.16E-04	6.32E-06	4.46E-08	8.92E-10	5.20E-09	1.04E-10	295.6	1.5
40	T11C	30/3/2022	2.32E-13	6.95E-15	9.76E-08	1.95E-09	3.18E-07	6.36E-09	2.88E-07	5.75E-09	3.55E-04	7.11E-06	5.68E-08	1.14E-09	7.11E-09	1.42E-10	296.0	1.5
41	T12A	31/3/2022	1.51E-13	4.54E-15	1.12E-07	2.24E-09	2.94E-07	5.88E-09	2.66E-07	5.32E-09	3.47E-04	6.95E-06	6.79E-08	1.36E-09	9.61E-09	1.92E-10	296.1	1.5
42	T12B	31/3/2022	9.74E-14	2.92E-15	6.28E-08	1.26E-09	2.03E-07	4.06E-09	1.84E-07	3.67E-09	3.12E-04	6.24E-06	6.56E-08	1.31E-09	9.24E-09	1.85E-10	296.6	1.5
43	T12C	31/3/2022	1.07E-13	3.20E-15	7.43E-08	1.49E-09	1.81E-07	3.61E-09	1.64E-07	3.27E-09	3.43E-04	6.87E-06	7.82E-08	1.56E-09	1.23E-08	2.46E-10	296.2	1.5
44	T12D	31/3/2022	1.32E-13	3.97E-15	7.01E-08	1.40E-09	1.72E-07	3.45E-09	1.56E-07	3.12E-09	3.35E-04	6.70E-06	7.87E-08	1.57E-09	1.20E-08	2.39E-10	297.0	1.5

5.3 Prima campagna di monitoraggio delle acque superficiali (giugno 2022)

Per la valutazione della ricarica agli acquiferi di alta pianura da eccesso di irrigazione agricola, è stato svolto un campionamento di acque superficiali su corpi idrici utilizzati come fonti di acqua irrigua. Sono stati selezionati 8 punti. La loro scelta è stata effettuata in collaborazione con ANBI, in modo tale da coprire le fonti principali di acqua irrigua utilizzata in prossimità dei punti di monitoraggio di falda utilizzati nel presente lavoro. Unica eccezione è stata il punto relativo al torrente Gandovere (R1), che non costituisce una fonte irrigua, ma bensì un esempio di corso d'acqua proveniente dalle zone montane che può avere un ruolo importante nella ricarica della falda pedemontana (Rotiroti et al. 2019). Diversamente dagli altri corsi d'acqua, per il Gandovere è stato considerato un campione preventivamente campionato nel mese di marzo; nel mese di giugno 2022 il Gandovere è risultato asciutto nel punto di campionamento selezionato. In Tabella 5.4 sono riportate le caratteristiche principali dei punti selezionati mentre la loro ubicazione è rappresentata in Figura 5.2. Il campionamento effettuato a giugno 2022 è stato poi ripetuto negli stessi punti a settembre 2022 (Cap. 5.4). I campioni di acqua superficiale sono stati prelevati per le analisi di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ in acqua e Cl, Br e B. Risulta importante specificare che il Fiume Oglio, che costituisce la fonte di acqua irrigua per una vasta area del territorio regionale, non è stato monitorato nel presente studio in quanto già ben caratterizzato in termini di $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, Cl, Br e B dallo studio precedente di Rotiroti et al. (2019).

Tabella 5.4 Elenco e specifiche per i punti di monitoraggio delle fonti di acqua irrigua

Codice progetto	Corpo Idrico	COORD_EST	COORD_NORD	Provincia	Comune
R1	Torrente Gandovere	586893	5049438	BS	Saiano
R11	Canale Villoresi	538868	5044823	MI	Masate
R12	Naviglio Martesana	519090	5039809	MI	Cologno Monzese
R13	Fiume Adda	534968	5059308	LC	Robbiate
R14	Fiume Brembo	546946	5060979	BG	Ponte San Pietro
R15	Fiume Serio	563660	5070172	BG	Cene
R16	Fiume Chiese	614079	5050673	BS	Gavardo
R17	Canale Arnò	617701	5026438	MN	Cavriana

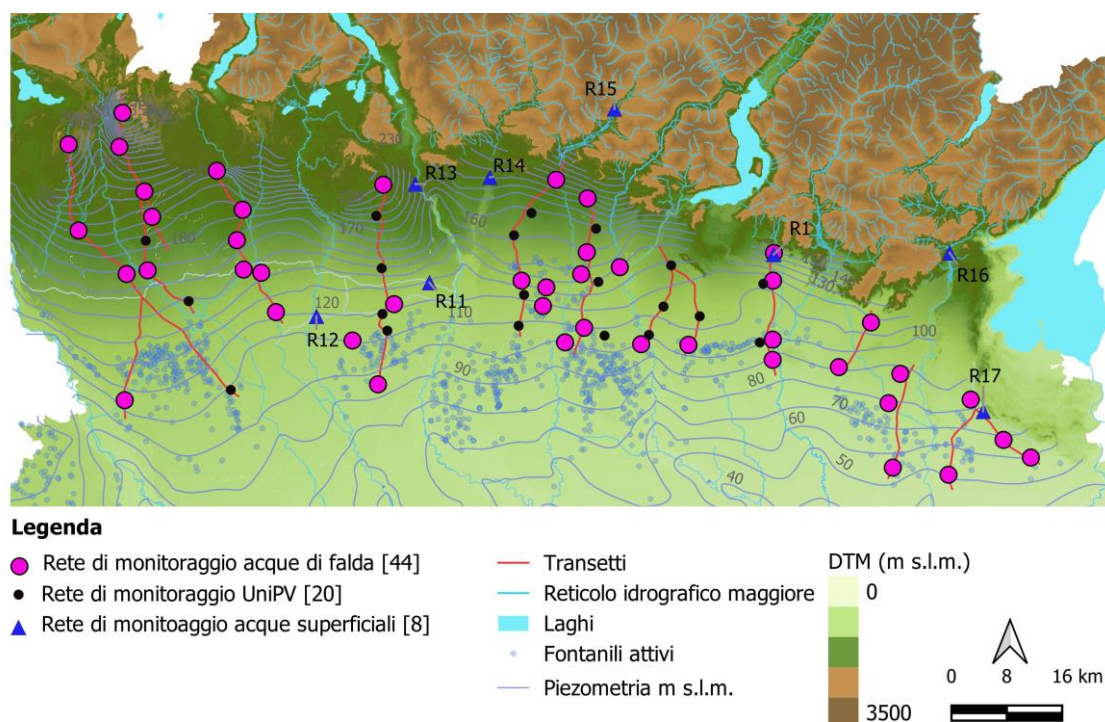


Figura 5.2 Ubicazione dei punti del monitoraggio sperimentale e dei punti di monitoraggio delle fonti di acqua irrigua; per le corrispondenze delle etichette dei corpi idrici superficiali, fare riferimento alla Tabella 5.4

I parametri misurati in campo, le concentrazioni dei traccianti chimici e gli isotopi stabili della molecola d'acqua sono riportati in Tabella 5.5, l'ubicazione dei punti campionati è illustrata in Figura 5.2. Le temperature dei corpi idrici superficiali campionati oscillano tra i 12.4 e i 26.8 °C misurate rispettivamente in corrispondenza di R1 (Torrente Gandovere) e R11 (Canale Villoresi; Tabella 5.5). Il valore medio per il pH è di 8.2, con valore più basso di 7.7 per R12 (Naviglio Martesana) e più alto di 9.0 per R1 (Tabella 5.5).

Tabella 5.5 Parametri, analiti e dati isotopici misurati e/o analizzati per la prima campagna di monitoraggio

#	Codice Progetto	Data	Parametri misurati in campo				Concentrazione traccianti chimici				Isotopi molecola d'acqua	
			Temp (°C)	pH	EC (uS/cm)	O ₂ (mg/L)	B (µg/L)	Cl (mg/L)	Br (µg/L)	Cl/Br mass ratio	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
1	R1	31/03/2022	12.4	9.0	303	16.23	219.35	16.54	13.35	1238.43	-7.00	-47.8
2	R11	27/06/2022	26.8	8.1	167	7.76	7.80	4.14	11.14	371.42	-8.75	-59.5
3	R12	27/06/2022	23.4	7.7	204	7.33	12.07	4.08	7.64	533.96	-9.66	-66.3
4	R13	27/06/2022	24.2	8.4	192	8.81	10.17	3.61	7.35	490.34	-9.67	-66.6
5	R14	27/06/2022	19.0	8.0	288	9.17	10.01	4.80	7.48	642.14	-9.07	-58.1
6	R15	27/06/2022	16.8	8.2	267	9.99	11.13	19.02	478.07	39.79	-9.70	-62.5
7	R16	27/06/2022	21.0	8.5	263	9.07	15.01	3.36	6.81	493.02	-9.46	-62.1
8	R17	27/06/2022	21.8	8.2	317	9.78	17.77	6.37	11.82	539.27	-9.33	-62.5

Il range di conducibilità elettrica misurato varia da 167.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (R11; Canale Villoresi) a 317.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (R17, Canale Arnò; Tabella 5.5). mentre si registrano valori di ossigeno disciolti tra un minimo di 7.3 mg/L (R12) ed un massimo misurato di 12.4 mg/L per R1.

Anche nel caso dei corpi idrici superficiali, le concentrazioni dei traccianti chimici sono superiori ai rispettivi limiti di rilevabilità. Il B varia da 7.8 $\mu\text{g}/\text{L}$ (R11) fino a 219.4 $\mu\text{g}/\text{L}$ (R1), mentre il Br varia da un valore minimo di 6.8 $\mu\text{g}/\text{L}$ (R16) ad un massimo di 478.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ che caratterizza le acque di R15 (Fiume Serio). Per quanto riguarda il Cl si registra un valore medio di 7.7 mg/L con un valore minimo 3.4 mg/L rilevato in R16 (Fiume Chiese) ed un valore massimo di 19.0 mg/L riscontrato in R15 (Fiume Serio, Tabella 5.5; Figura 5.2).

I risultati ottenuti per gli isotopi stabili mostrano una variabilità significativa tra le acque campionate: per l' $\delta^{18}\text{O}$ il valore più arricchito, misurato in R1, è di -7.0‰ mentre il più impoverito di -9.7‰, caratterizza le acque di R13 (Fiume Adda); per il segnale del $\delta^2\text{H}$ si confermano gli estremi arricchiti ed impoveriti del dataset: il campione R1 risulta essere il più arricchito con un valore di -47.8‰ mentre l'R13 il più impoverito con -66.6‰ (Tabella 5.5; Figura 5.2).

5.4 Seconda campagna di monitoraggio delle falde e delle acque superficiali (settembre 2022)

La seconda campagna di monitoraggio è stata effettuata nella finestra temporale compresa tra il 27/09/2022 e il 03/10/2022, in periodo tardo irriguo. Sono stati campionati 11 pozzi, uno per ogni transetto di lavoro a meno del transetto 9, in quanto per esso sono maggiormente disponibili dati da letteratura. La selezione è stata effettuata in funzione dei dati costruttivi del pozzo e dell'ubicazione, in modo da massimizzare la possibilità di riscontrare in falda gli effetti di una ricarica da parte delle pratiche irrigue; sono anche stati selezionati punti di campionamento ubicati in zona non irrigua, i pozzi T2B e T3C, i cui campioni, non influenzati da irrigazione, potessero fungere da "bianco". Congiuntamente, sono stati campionati gli 8 punti sulle acque superficiali. In Figura 5.3 sono rappresentati in mappa i punti investigati per la seconda campagna di monitoraggio, mentre in Tabella 5.6 vengono riportati i parametri misurati in campo ed i risultati analitici relativi ai traccianti chimici e agli isotopi stabili dell'acqua.

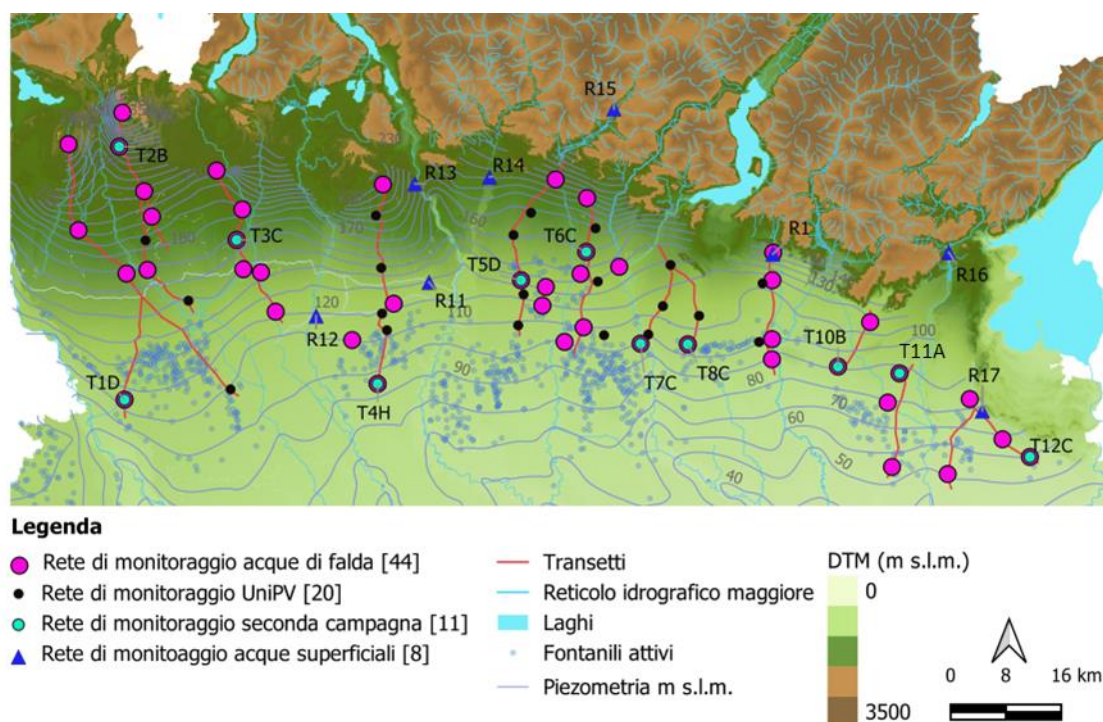


Figura 5.3 Mappa relativa alla localizzazione dei 64 pozzi della rete di monitoraggio, con etichette sui pozzi e punti di acque superficiali che sono stati campionati per la seconda campagna di monitoraggio di settembre 2022

In generale il quadro chimico-fisico dei campioni di settembre (Tabella 5.6) non è variato in maniera sostanziale da quello dei corrispondenti campioni della precedente campagna di marzo (Tabella 5.2), quindi di seguito vengono commentate le situazioni che presentano una variazione significativa per i parametri misurati ed analizzati.

Si premette che i valori rilevati in corrispondenza dei campioni di bianco (T2B e T3C) mostrano, rispetto ai rispettivi valori di marzo, variazioni trascurabili relativamente ai parametri misurati in campo e assai ridotte per quanto riguarda gli elementi in traccia e gli isotopi dell'acqua, confermando la rilevanza dell'effetto irriguo sulle variazioni osservate nei rimanenti campioni.

Tabella 5.6 Parametri chimico-fisici ed analitici relativi alla seconda campagna di monitoraggio per i 11 pozzi della rete sperimentale e per gli 8 punti di acque superficiali campionate. La desinenza “.S” sta per settembre

#	Codice Progetto	Data	Parametri misurati in campo					Concentrazione traccianti chimici				Isotopi molecola d'acqua	
			Quota m s.l.m.	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	O ₂ (mg/L)	B (μg/L)	Cl (ppm)	Br (μg/L)	Cl/Br mass ratio	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)
1	T1D.S	28/09/22	121.6	14.2	7.7	485	5.94	5.24	10.91	20.73	526.36	-8.9	-58.5
2	T2B.S	28/09/22	323.3	12.9	7.4	444	7.18	5.48	11.85	35.86	330.55	-8.1	-52.5
3	T3C.S	28/09/22	211.7	13.7	7.6	608	8.75	20.91	40.10	223.49	179.43	-7.7	-50.2
4	T4H.S	29/09/22	97.6	17.0	7.5	554	3.80	27.80	15.04	26.57	565.86	-8.9	-59.9
5	T5D.S	3/10/22	142.3	15.9	7.4	669	8.40	43.10	22.47	94.88	236.77	-8.3	-55.2
6	T6C.S	29/09/22	172.2	16.4	7.4	697	8.79	15.62	23.76	196.99	120.63	-8.4	-55.5
7	T7C.S	3/10/22	109.9	16.3	7.5	490	5.91	21.08	10.06	23.44	429.31	-8.9	-60.9
8	T8C.S	3/10/22	108.8	15.5	7.5	535	8.15	15.66	11.37	22.79	498.95	-8.7	-59.6
9	T10B.S	27/09/22	100.3	15.2	7.6	574	8.22	25.18	11.66	21.52	541.96	-8.8	-57.6
10	T11A.S	27/09/22	110.9	15.4	7.4	834	2.47	279.10	21.36	243.63	87.66	-8.8	-57.9
11	T12C.S	27/09/22	65.6	15.5	7.7	433	6.88	13.05	6.08	22.36	272.15	-9.3	-62.9
12	R1.S	3/10/22	168.02	16.2	8.3	534	8.52	24.34	23.00	20.09	1145.28	-7.4	-47.8
13	R11.S	29/09/22	150.8	18.3	8.4	179	9.18	7.10	4.43	10.61	417.09	-8.8	-59.1
14	R12.S	29/09/22	131.0	20.2	8.2	178	9.60	6.84	4.96	11.98	413.89	-8.8	-58.7
15	R13.S	29/09/22	197.5	20.1	8.7	196	8.16	10.48	4.02	7.91	507.46	-9.7	-65.8
16	R14.S	3/10/22	209.9	14.5	9.0	325	12.58	10.34	5.71	8.24	693.05	-9.0	-56.3
17	R15.S	3/10/22	364.11	13.3	8.5	326	10.84	13.32	22.90	586.15	39.07	-9.0	-56.7
18	R16.S	27/09/22	203.59	16.9	8.6	291	9.67	16.16	4.66	9.73	479.18	-9.1	-60.4
19	R17.S	27/09/22	101.97	19.1	9.0	372	14.42	20.48	15.84	15.49	1022.66	-8.8	-59.2

Per quanto riguarda la temperatura, difatti solo il T6C presenta in incremento significativo, passando da 10.3 ai 16.4°C (Tabella 5.6) mentre, sempre in questo pozzo, la falda mostra un decremento nel valore di conducibilità elettrica (da 736 a 697 μS/cm; Tabella 5.6 e Tabella 5.2). Ulteriori variazioni in termini di conducibilità elettrica riguardano i punti T10B, T11A e T12C dove in tutti i casi si osserva una diminuzione dei soluti disciolti per la campagna di settembre (Tabella 5.6 e Tabella 5.2). I dati relativi al T12C, in particolare, mostrano un forte decremento registrando un valore a settembre di 433 μS/cm rispetto ai 761 μS/cm misurato a marzo; sempre per questo pozzo, si osserva un sostanziale aumento nel contenuto di ossigeno disciolto da 5.08 mg/L (marzo) a 6.88 mg/L (settembre), non riscontrato sui restanti pozzi (Tabella 5.6 e Tabella 5.2). Per lo stesso parametro, si segnala il dato misurato a settembre nel T11A (2.47 mg/L; Tabella 5.6) che risulta minore rispetto al dato di ossigeno disciolto di marzo (3.48 mg/L; Tabella 5.2).

Per quanto riguarda i traccianti chimici, per il Br e per il B variazioni si riscontrano per il T11A, con un incremento (da 171.9 a 243.6 μg/L per Br e da 192 a 279 μg/L per B)

(Tabella 5.6 e Tabella 5.2) mentre nel caso del CI differenze maggiori di 1 mg/L tra marzo e settembre si osservano per il T3C (da 33.7 mg/L a 40.1 mg/L) e il T5D (da 19.1 a 22.5 mg/L); diversamente per il T12C si osserva un forte decremento tra marzo e settembre che va da 15.2 a 6.1 mg/L (Tabella 5.2 e Tabella 5.6).

Nella segnalazione di possibili variazioni stagionali nei segnali isotopici delle acque di falda campionate è stata utilizzata la soglia della sensibilità della misura: variazioni significative sono state considerate per valori maggiori di $\pm 0.2\text{‰}$ per $\delta^{18}\text{O}$ e $\pm 1\text{‰}$ per il $\delta^2\text{H}$. Su 11 campioni di falda, riscontriamo una variazione della composizione isotopica solo in 4 campioni. Il T5D come il T10B presentano un leggero arricchimento rispetto al dato di marzo, mentre per il T6C rinveniamo un impoverimento solo per il dato di $\delta^2\text{H}$ (Tabella 5.6 e Tabella 5.2). Da segnalare il comportamento del T12D: si è registrato un impoverimento importante dei segnali isotopici rispetto alla precedente campagna di marzo; l' $\delta^{18}\text{O}$ passa da -8.8‰ (marzo) a -9.3‰ (settembre) e il $\delta^2\text{H}$ varia da -56.7‰ a -62.9‰ (Tabella 5.6 e Tabella 5.2).

Per ciò che concerne i corpi idrici superficiali vediamo come le temperature oscillino tra i 13.3 e i 20.2°C misurate rispettivamente in corrispondenza di R15 e R12 (Fiume Serio e Naviglio Martesana; Tabella 5.6; Figura 5.2). Tutti i punti campionati risentono di un abbassamento dei valori di temperatura, a meno del Gandovere (R1), per il quale si registra un incremento (da 12.4 a 16.4 °C; Tabella 5.5 e Tabella 5.6). Il valore medio per il pH è di 8.6 (8.2 per giugno 2022), con valore più basso misurato di 8.2 per l'R12 (Naviglio Martesana) e il più alto di 9.0 per l'R17 (Canale Arnò; Tabella 5.5 e Tabella 5.6). La conducibilità elettrica presenta un valore medio di 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con il minimo di 178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ riscontrato in R12 ed il massimo di 534 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in R1, unico caso che presenta un notevole incremento rispetto alla campagna precedente (303 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Tabella 5.5 e Tabella 5.6). Per l'ossigeno disciolto si osserva un generale aumento di concentrazione, a meno che per il torrente Gandovere (R1) dove si registra una diminuzione a 8.5 mg/L rispetto a 16.2 mg/L della campagna precedente (Tabella 5.5 e Tabella 5.6). Il valore medio per l'ossigeno disciolto è di 10.7 mg/L, con minimo di 4 mg/L misurato in R13 (Fiume Adda) e massimo di 14.4 mg/L misurato in R15 (Tabella 5.5 e Tabella 5.6).

Le concentrazioni dei traccianti chimici sono pressoché stabili rispetto alla campagna precedente (Tabella 5.5 e Tabella 5.6). Eccezioni in questo senso riguardano l'R1 la cui concentrazione di B diminuisce notevolmente da 219.4 µg/L (marzo) a 24.3 µg/L (settembre), mentre il resto dei campioni rimangono relativamente stabili. Per quanto riguarda il Cl, osserviamo lievi incrementi rispetto alla campagna precedente per i campioni R1 (23 mg/L a settembre rispetto a 16.5 mg/L di marzo) e R15 (22.9 mg/L a settembre rispetto a 19 mg/L di giugno), mentre un valore più che raddoppiato rispetto alla campagna precedente caratterizza l'R17 con 15.8 mg/L a settembre rispetto a 6.4 mg/L a giugno (Tabella 5.5 e Tabella 5.6).

Le acque superficiali, a confronto con le acque di falda, sono generalmente più soggette a variazioni di tipo stagionale nel loro segnale isotopico. In Tabella 5.6 osserviamo come gli estremi del dataset a disposizione rimangano invariati rispetto alla precedente campagna: R1 rappresenta il campione più arricchito sia per l' $\delta^{18}\text{O}$ (-7.4‰) che per il $\delta^2\text{H}$ con un segnale di -47.8‰, mentre R13 rimane essere il più impoverito con segnali di -9.7‰ e -65.8‰ per l' $\delta^{18}\text{O}$ e il $\delta^2\text{H}$, rispettivamente. Confrontando i dati di questa campagna più recente con quella di giugno (Tabella 5.5 e Tabella 5.6) importanti variazioni nella composizione isotopica sono osservati per il Naviglio Martesana (R12), il cui dato di settembre risulta arricchito, specialmente per l' $\delta^2\text{H}$ (da -66.3‰ di giugno a -58.7‰ di settembre); similmente il Fiume Serio (R15), con un arricchimento sempre per l' $\delta^2\text{H}$ da -62.5 (giugno) a -56.74‰ (settembre) ed il Canale Arnò caratterizzato da una variazione in $\delta^2\text{H}$ da -62.5 a -59.2‰. Questo comportamento anche se meno evidente si osserva per il Fiume Adda (R13) ed il Fiume Brembo (R14). Unico esempio di impoverimento registrato per le acque superficiali è il Gandovere (R1), osservando un leggero impoverimento in $\delta^{18}\text{O}$, da -7.0‰ (marzo) a -7.4‰ (settembre), mentre per il deuterio si osserva una stabilità nel segnale isotopico.

Rispetto alla Tabella 5.2 per questa seconda campagna è mancante il dato di trizio per i pozzi, non per una lacuna in fase di campionamento, ma piuttosto per via dei lunghi tempi analitici che non hanno permesso di ricevere i risultati entro agosto 2023. Vedremo, nella sezione dedicata alla datazione (Cap. 6.3) che per gli 11 pozzi di questa seconda campagna non sarà possibile discutere i dati di datazione, appunto

per mancanza del trizio, dato imprescindibile per la derivazione dell'età apparente della falda con il metodo selezionato. Di seguito, in Tabella 5.7 osserviamo lo spettro delle concentrazioni elementari ed isotopiche dei principali gas nobili disciolti in falda. L' ^3He presenta un valore minimo di $9.12\text{E}^{-14} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ (T5D) mentre un massimo in corrispondenza di T12C con $4.25\text{E}^{-13} \text{ cm}^3\text{STP/g}$. Anche per l' ^4He , il valore minimo si registra per il pozzo T5D ($6.73\text{E}^{-08} \text{ cm}^3\text{STP/g}$) mentre il valore massimo è osservato in T7C ($1.83\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$). Con simile magnitudo, il Ne presenta concentrazioni elementari ed isotopiche maggiori fino a 5.95E^{-07} per il T7C ($5.38\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ per il ^{20}Ne), mentre il suo minimo viene misurato in T10B ($2.31\text{E}^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$; 2.09E^{-07} per il ^{20}Ne). L'argon oscilla tra 2.30E^{-04} e $3.06 \text{ cm}^3\text{STP/g}$ (T10B e T5D, rispettivamente), mentre il rapporto medio tra i due isotopi $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ è di 296.06 (Tabella 5.7; Figura 5.3). Infine, per quanto riguarda il Kr, T8C ($6.49\text{E}^{-08} \text{ cm}^3\text{STP/g}$) presenta il valore minimo mentre il T7C ($4.37\text{E}^{-08} \text{ cm}^3\text{STP/g}$) quello massimo; infine, lo Xe varia da $4.50\text{E}^{-09} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ in T7C, fino a $1.00\text{E}^{-00} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ in T12C

Tabella 5.7 Concentrazione elementare ed isotopica dei principali gas nobili per la seconda campagna di monitoraggio

#	Codice Progetto	Data	Concentrazione elementare ed isotopica dei gas nobili															
			³ He (cm ³ STP/g)	±	⁴ He (cm ³ STP/g)	±	Ne (cm ³ STP/g)	±	²⁰ Ne (cm ³ STP/g)	±	Ar (cm ³ STP/g)	±	Kr (cm ³ STP/g)	±	Xe (cm ³ STP/g)	±	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	±
1	T1D.S	28/09/22	2.76E-13	5.52E-15	9.16E-08	1.83E-09	2.87E-07	5.74E-09	2.60E-07	5.19E-09	2.49E-04	4.99E-06	5.45E-08	1.09E-09	8.92E-09	1.78E-10	296.3	1.5
2	T2B.S	28/09/22	2.42E-13	4.85E-15	8.13E-08	1.63E-09	2.53E-07	5.05E-09	2.29E-07	4.57E-09	2.43E-04	4.86E-06	5.41E-08	1.08E-09	8.61E-09	1.72E-10	295.8	1.5
3	T3C.S	28/09/22	1.66E-13	3.32E-15	1.07E-07	2.13E-09	3.29E-07	6.58E-09	2.98E-07	5.96E-09	2.64E-04	5.28E-06	5.43E-08	1.09E-09	8.43E-09	1.69E-10	295.8	1.5
4	T4H.S	29/09/22	1.47E-13	2.95E-15	8.97E-08	1.79E-09	2.74E-07	5.49E-09	2.48E-07	4.97E-09	2.47E-04	4.94E-06	5.04E-08	1.01E-09	7.48E-09	1.50E-10	296.2	1.5
5	T5D.S	3/10/2022	9.12E-14	1.82E-15	6.73E-08	1.35E-09	2.74E-07	5.48E-09	2.48E-07	4.95E-09	3.06E-04	6.11E-06	6.49E-08	1.30E-09	9.52E-09	1.90E-10	295.7	1.5
6	T6C.S	29/09/22	1.95E-13	3.90E-15	1.27E-07	2.55E-09	3.75E-07	7.51E-09	3.40E-07	6.79E-09	2.53E-04	5.05E-06	5.50E-08	1.10E-09	8.64E-09	1.73E-10	297.1	1.5
7	T7C.S	3/10/2022	2.90E-13	5.80E-15	1.83E-07	3.67E-09	5.95E-07	1.19E-08	5.38E-07	1.08E-08	2.79E-04	5.58E-06	4.37E-08	8.74E-10	4.50E-09	8.99E-11	295.9	1.5
8	T8C.S	3/10/2022	1.32E-13	2.64E-15	7.95E-08	1.59E-09	3.02E-07	6.05E-09	2.74E-07	5.47E-09	2.92E-04	5.83E-06	5.81E-08	1.16E-09	8.32E-09	1.66E-10	295.9	1.5
9	T10B.S	27/09/22	1.10E-13	2.20E-15	7.23E-08	1.45E-09	2.31E-07	4.61E-09	2.09E-07	4.17E-09	2.30E-04	4.61E-06	5.10E-08	1.02E-09	8.45E-09	1.69E-10	295.9	1.5
10	T11A.S	27/09/22	1.40E-13	2.80E-15	9.07E-08	1.81E-09	2.69E-07	5.38E-09	2.44E-07	4.87E-09	2.50E-04	5.01E-06	5.45E-08	1.09E-09	8.30E-09	1.66E-10	296.1	1.5
11	T12C.S	27/09/22	4.25E-13	8.51E-15	1.12E-07	2.24E-09	3.37E-07	6.74E-09	3.05E-07	6.10E-09	2.87E-04	5.75E-06	6.21E-08	1.24E-09	1.00E-08	2.01E-10	296.0	1.5

6-----WP4 - SVILUPPO DEL MODELLO CONCETTUALE FINALE

Le attività svolte all'interno di questo WP hanno riguardato:

- realizzazione di sezioni idrogeologiche lungo i transetti monitorati;
- tracciamento delle voci principali di ricarica;
- determinazione dell'età della falda;
- unione delle varie interpretazioni per la sintesi dei modelli concettuali finali.

6.1 Realizzazione di sezioni idrogeologiche lungo i transetti monitorati

Per la realizzazione delle sezioni idrogeologiche lungo i 12 transetti monitorati (Figura 5.1) sono state interpretate le informazioni costruttive e litostratigrafiche dei pozzi della rete di monitoraggio di ARPA congiuntamente alle stratigrafie archiviate nel database TANGRAM (Bonomi et al., 2014). Oltre ai pozzi della rete di monitoraggio (Tabella 5.1) sono state elaborate le stratigrafie di 192 pozzi, i cui dati sono stati estratti da TANGRAM, con profondità comprese mediamente tra 20 e 300 m. Le 12 sezioni idrogeologiche realizzate sono riportate nell'Allegato III. Di seguito vengono brevemente descritte le informazioni che sono contenute in queste sezioni, riassunte dall'esempio di legenda riportato in Figura 6.1.

Per ogni sezione sono indicate le diverse unità litostratigrafiche e geologiche, la base del Gruppo Acquifero A e quella dell'ISS, la piezometria (maggio 2014, da Geoportale della Lombardia) e l'ubicazione dei corsi d'acqua maggiori. Sono inoltre riportati i nomi dei comuni attraversati da ogni transetto monitorato, codice progetto di ogni pozzo della rete di monitoraggio sperimentale (Cap 5.1) ed anche la profondità dei filtri per ciascun pozzo della rete.

Le caratteristiche litostratigrafiche sono state rappresentate utilizzando due tipi di classificazione. La prima, di maggiore dettaglio (10 unità), è stata utilizzata per rappresentare le stratigrafie di ciascun pozzo considerato; queste unità sono state rappresentate con colori distintivi in funzione di valori tipici di conducibilità idraulica: blu e ciano rappresentano le ghiaie e le sabbie (maggiormente conduttive), mentre giallo, ocra e marrone rappresentano i limi e le argille (a minore conducibilità). La

seconda classificazione, di minore dettaglio (4 unità), è stata utilizzata per rappresentare l'interpolazione (manuale) effettuata al fine di connettere i diversi livelli principali individuati su ciascuna stratigrafia dei pozzi considerati; queste unità sono state rappresentate in toni di grigio, passando dal bianco delle ghiaie al grigio scuro dei limi e delle argille.

Le sezioni idrogeologiche realizzate sono servite da strumento trasversale per la comprensione delle caratteristiche idrogeologiche, chimiche ed isotopiche della rete di monitoraggio sperimentale.

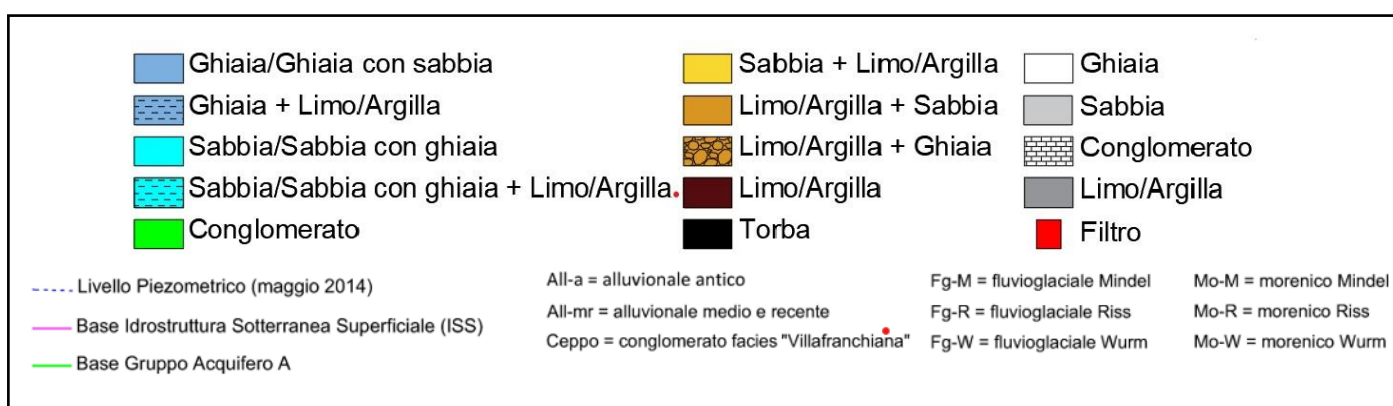


Figura 6.1 Legenda delle sezioni stratigrafiche (riportate in Allegato III)

6.2 Tracciamento delle voci principali di ricarica

L'obiettivo di questa parte di costruzione del modello concettuale è quello di identificare quali siano le principali voci di ricarica dell'acquifero superficiale (ISS) nelle zone di alta e media pianura lombarda. L'identificazione delle voci di ricarica è importante sia perché permette una maggiore comprensione del funzionamento del sistema idrogeologico e sia perché costituisce un fondamentale supporto informativo all'interpretazione dei risultati della datazione delle falde.

Il tracciamento della ricarica è stato effettuato in tre fasi, ciascuna legata ad un particolare componente che costituisce la "soluzione" falda. Le falde, infatti, dal punto di vista chimico, possono essere definite come soluzioni acquose, composte dall'insieme del solvente (acqua) e dei soluti (salinità, intesa come sommatoria di tutti

i soluti disciolti in falda). Le tre fasi sopracitate hanno previsto il tracciamento dell'origine:

1. dell'acqua (solvente della soluzione falda), tramite gli isotopi stabili dell'acqua ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$);
2. della salinità (soluti della soluzione falda), tramite i traccianti chimici conservativi Cl e Cl/Br;
3. della falda (soluzione), tramite la combinazione di traccianti di solvente ($\delta^2\text{H}$) e di soluti (Cl/Br).

6.2.1 Tracciamento dell'origine dell'acqua sotterranea

Per il tracciamento della provenienza delle molecole d'acqua contenute nella falda, sono stati utilizzati i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ misurati sui campioni di falda prelevati nel monitoraggio dedicato al presente progetto (44 campioni di marzo 2022 e 11 campioni di settembre 2022), con l'aggiunta dei dati acquisiti da UniPV (20 campioni di marzo 2018); il totale dei campioni di falda considerati è quindi pari a 75. Oltre ai campioni di falda, sono stati considerati anche i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ misurati in campioni di acque superficiali (laghi, fiumi, canali) e piogge. Per i campioni di acque superficiali, sono stati considerati sia i dati acquisiti dal monitoraggio dedicato al progetto (8 punti campionati sia a giugno che a settembre 2022) e sia dati di letteratura (Rotiroti et al., 2019). In particolare per quest'ultimi, i dati sono relativi a 3 punti sul Fiume Oglio, 1 punto sul lago d'Iseo e 1 punto sul Fiume Cherio, campionati a giugno e settembre 2016 (Tabella 6.1). Per le piogge sono stati utilizzati solo dati di letteratura (Longinelli e Selmo, 2003; Giustini et al., 2016; Rotiroti et al., 2019), costituiti da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ calcolati come media pesata sul quantitativo di pioggia caduta, per un periodo continuo di almeno 2 anni, per 6 punti ubicati nell'alta pianura (Tabella 6.1); in aggiunta, è stato considerato un intervallo tipico per le precipitazioni dell'alta pianura lombarda derivato dalla mappa di $\delta^{18}\text{O}$ nelle piogge elaborata da Giustini et al. (2016), compreso tra -8 e -7 ‰ (che per $\delta^2\text{H}$, utilizzando la retta meteorica locale del Nord Italia elaborata da Longinelli e Selmo (2003), corrisponde all'intervallo tra -52.3 e -44.6 ‰).

Tabella 6.1 Valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ di letteratura utilizzati nel presente lavoro

Tipo	Corpo Idrico	ID Punto	Luogo	Data Campione	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Fonte
Acqua superficiale	Lago d'Iseo	L130	Sarnico	giu-16	-9.48	-65.0	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Lago d'Iseo	L130	Sarnico	set-16	-9.48	-64.5	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R106	Palazzolo sull'Oglio	giu-16	-9.52	-65.0	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R106	Palazzolo sull'Oglio	set-16	-9.60	-65.1	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R107	Pontoglio	giu-16	-9.50	-64.5	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R107	Pontoglio	set-16	-9.44	-64.6	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R110	Calcio	giu-16	-9.51	-64.5	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Oglio	R110	Calcio	set-16	-9.50	-64.2	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Cherio	R105	Palosco	giu-16	-8.01	-53.5	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	Fiume Cherio	R105	Palosco	set-16	-9.09	-61.1	Rotiroti et al. 2019
Pioggie	-	P151	Rodengo	nov-15 - dic-17	-7.80	-51.2	Rotiroti et al. 2019
Pioggie	-	P152	Alfianello	nov-15 - dic-17	-7.86	-50.9	Rotiroti et al. 2019
Pioggie	-	-	Sarnico	feb-92 - gen-99	-7.70	-50.0	Longinelli and Selmo, 2003
Pioggie	-	-	Bellinzago	gen-95 - dic-00	-7.70	-49.0	Longinelli and Selmo, 2003
Pioggie	-	-	Milano	mar-99 - feb-01	-7.13	-44.0	Longinelli and Selmo, 2003
Pioggie	-	-	Verona	gen-95 - dic-97	-7.65	-51.0	Longinelli and Selmo, 2003

La Figura 6.2 rappresenta lo scatterplot $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ di tutti i dati considerati. Come primo aspetto, possiamo vedere come le piogge locali (i.e., di alta pianura) e le acque superficiali vadano a coprire zone del grafico ben precise e distanti tra loro. Nello specifico, le piogge locali sono caratterizzate da un segnale più arricchito (i.e., valori di δ maggiori), comprese nel segnale tipico sopracitato di Giustini et al. (2016) per le piogge di alta pianura. Le acque superficiali sono invece caratterizzate da un segnale più impoverito (i.e., valori di δ minori), con valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ compresi rispettivamente tra -9.7 e -8.7 e tra -67 e -56‰. Il motivo di questo segnale più impoverito è legato al fatto che questi corpi idrici superficiali nascono tutti in territorio alpino, dove le precipitazioni, che li alimentano, hanno un segnale più impoverito (a causa della maggiore latitudine e longitudine). Fanno sola eccezione le acque del Torrente Gandovere e del Fiume Cherio (solo per uno dei due campioni), che presentano un segnale più arricchito, dovuto alla minore altitudine e latitudine dei propri bacini imbriferi.

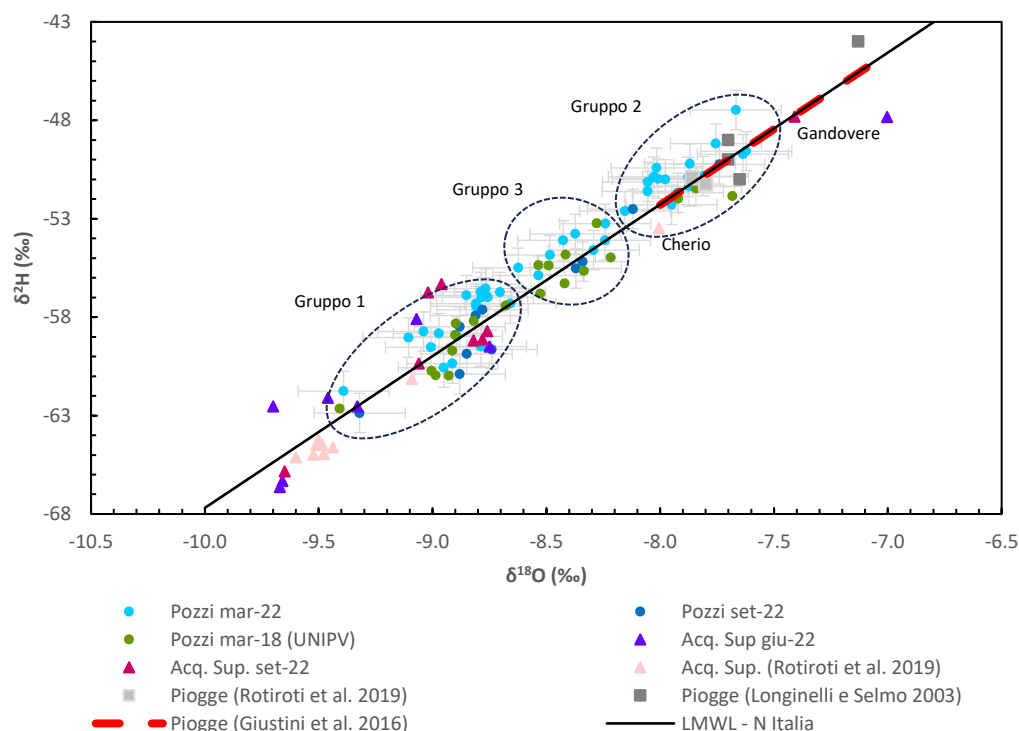


Figura 6.2 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i 75 campioni considerati. Per l'ubicazione dei punti campionati della rete di monitoraggio fare riferimento a Figura 5.1

È possibile notare come il segnale isotopico della falda di alta pianura sia compreso all'interno degli estremi identificati: piogge locali e acque superficiali. Nello specifico, possono essere identificati 3 raggruppamenti di campioni di falda (Figura 6.2). Il Gruppo 1, il più numeroso (34 pozzi su 75), ha un segnale isotopico sovrapponibile a quello delle acque superficiali; il gruppo 2 (23 pozzi su 75) ha un segnale simile a quello delle piogge locali; infine, il gruppo 3 (18 pozzi su 75) presenta un segnale intermedio rispetto ai due gruppi precedenti. È possibile affermare quindi che per il gruppo 1 l'origine della falda sia ascrivibile principalmente all'infiltrazione delle acque superficiali nel sottosuolo, per il gruppo 2 all'infiltrazione delle piogge locali (di pianura) e per il gruppo 3 ad una combinazione di acque superficiali e piogge locali. Considerando che il gruppo 1 è quello più numeroso, è possibile affermare che le acque superficiali costituiscono, in generale, la più importate alimentazione per la falda. L'infiltrazione delle acque superficiali nel sottosuolo potrebbe avvenire principalmente per 2 motivi: (1) la perdita di acqua dal letto dei fiumi, nei loro tratti alimentanti o (2) l'infiltrazione dell'eccesso di irrigazione agricola (alimentata, in alta

pianura lombarda, principalmente da acque superficiali), combinata con la perdita di acqua irrigua direttamente dai canali irrigui (per quei canali non cementati sul fondo). In Figura 6.3 è rappresentata la distribuzione spaziale dei valori di $\delta^2\text{H}$; questi sono stati utilizzati come rappresentativi dell'intero segnale isotopico stabile dell'acqua, in quanto $\delta^2\text{H}$ è meno influenzato rispetto a $\delta^{18}\text{O}$ dal frazionamento al non-equilibrio che caratterizza i processi di evaporazione. La distribuzione di $\delta^2\text{H}$ nei 64 pozzi monitorati nel mese di marzo (44 pozzi riferiti a marzo 2022 e 20 a marzo 2018) ci indica che l'alimentazione della falda ad opera delle acque superficiali avviene principalmente per il secondo motivo (infiltrazione di acque di irrigazione), in quanto si riscontra una corrispondenza tra zone non irrigate (in giallo in Figura 6.3) e segnali isotopici più arricchiti e tra zone irrigate (tutte le aree al di fuori dei poligoni in giallo in Figura 6.3) e segnali isotopici più impoveriti (tipici delle acque superficiali). Questa distinzione dei segnali isotopici tra pozzi ubicati in zone irrigue (più impoveriti) e zone non irrigue (più arricchiti) è ben evidente nel box-plot di Figura 6.4. Questo dimostra il ruolo fondamentale dell'irrigazione agricola, effettuata in alta pianura principalmente con acque superficiali, nel contribuire all'infiltrazione di acqua nel sottosuolo.

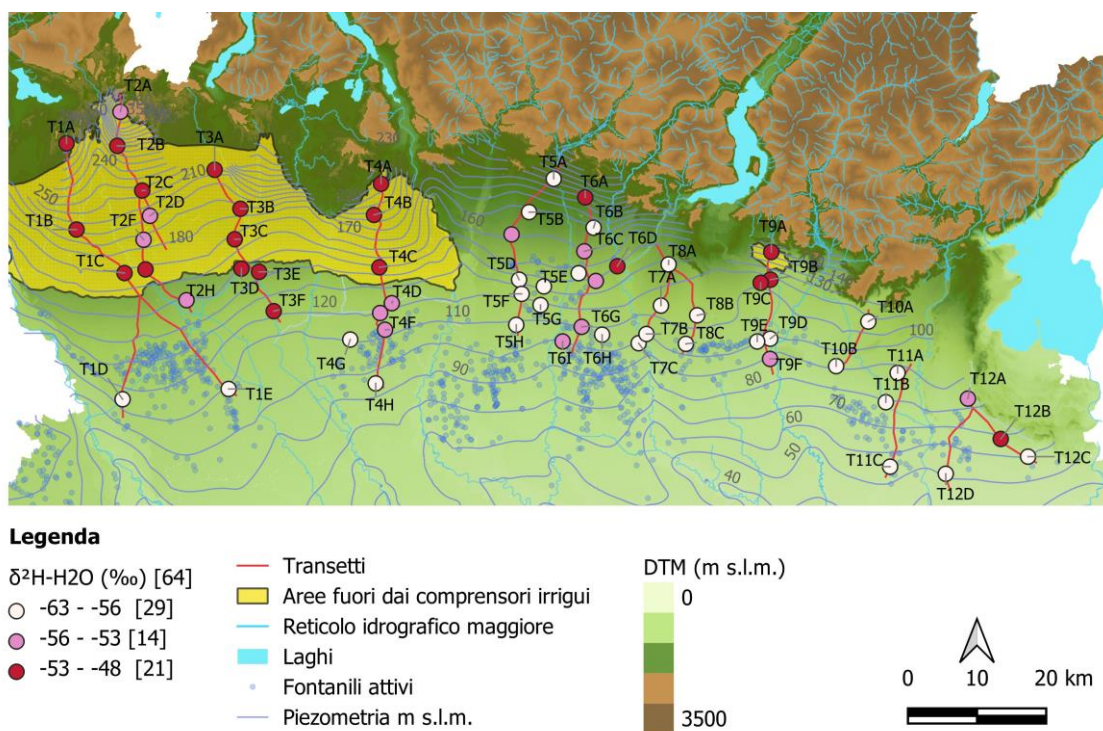


Figura 6.3 Classi di deuterio per i 64 pozzi della rete di monitoraggio

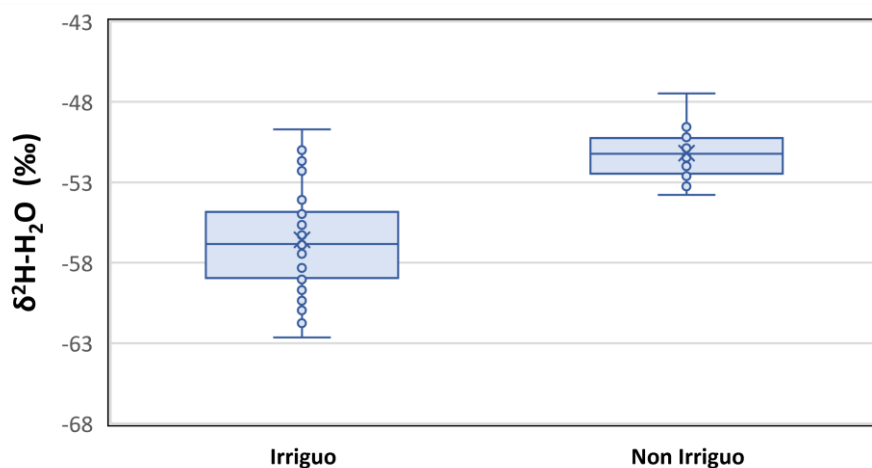


Figura 6.4 Box-plot per i valori di deuterio in funzione dell'ubicazione del punto di misura in area irrigua o non irrigua

Di seguito vengono discussi i risultati relativi ad una suddivisione in 5 sotto-aree: Ticino-Adda, Adda-Oglio, Oglio-Mella, Mella-Chiese e Chiese-Mincio.

La sotto-area Ticino-Adda contiene 4 transetti (T1÷4); il grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ per questa zona è riportato in Figura 6.5. Questa sotto-area presenta la caratteristica peculiare di essere, per la sua maggior estensione, non soggetta ad irrigazione agricola. Nello specifico, l'area non irrigata è quella a nord del Canale Villoresi (Figura 6.3), mentre a sud di questo canale si applica l'irrigazione utilizzando l'acqua dello stesso Canale Villoresi (alimentato dal Fiume Ticino) e del naviglio Martesana (alimentato dal Fiume Adda). Dalla Figura 6.5 emerge come la maggior parte dei pozzi presenti un segnale isotopico in accordo con il segnale tipico delle precipitazioni locali; questi pozzi sono tutti, ad eccezione del pozzo T3F, ubicati a nord o in prossimità del Canale Villoresi (Figura 6.3). Questi due elementi ci indicano che nell'area non irrigata la falda è principalmente alimentata dall'infiltrazione delle precipitazioni locali. Quattro pozzi (T1D, T1E, T4G e T4H) sono invece caratterizzati da un segnale impoverito, molto vicino a quello dei canali Villoresi e Martesana (per quest'ultimo, solo il campione di settembre); questi pozzi sono anche quelli ubicati più a sud, nel cuore della zona irrigata. L'interpretazione è quindi che per questi 4 pozzi la falda sia alimentata principalmente dall'infiltrazione dell'acqua irrigua. Sono presenti anche 7 pozzi con un segnale intermedio tra acque superficiali e piogge locali (Figura 6.3 e Figura 6.5). Per

i 4 pozzi ubicati subito a sud del Canale Villoresi (T2H, T4D, T4E e T4F), questo segnale intermedio è interpretabile come un'alimentazione combinata tra le precipitazioni locali, che caratterizzano la falda proveniente da monte idrogeologico, e l'acqua di irrigazione che si infiltra verticalmente. Per i 3 pozzi ubicati nella zona non irrigua (T2A, T2D e T2F), il segnale intermedio potrebbe essere generato dalla combinazione dell'infiltrazione delle precipitazioni locali e dalla perdita di acqua dal letto di corsi d'acqua superficiali (fiumi alimentanti), come ad esempio i torrenti Bozzente e La Valascia che scorrono in prossimità dei punti T2D e T2F. Per il pozzo T2A, un'altra spiegazione potrebbe essere legata al fatto che questo punto è quello ubicato più a nord di tutti, in un'area prossima a quella montana. Qui le precipitazioni presentano un segnale più impoverito rispetto a quelle di pianura, portando quindi ad interpretare il segnale più impoverito del T2A come indicazione di un'alimentazione dovuta principalmente alle piogge.

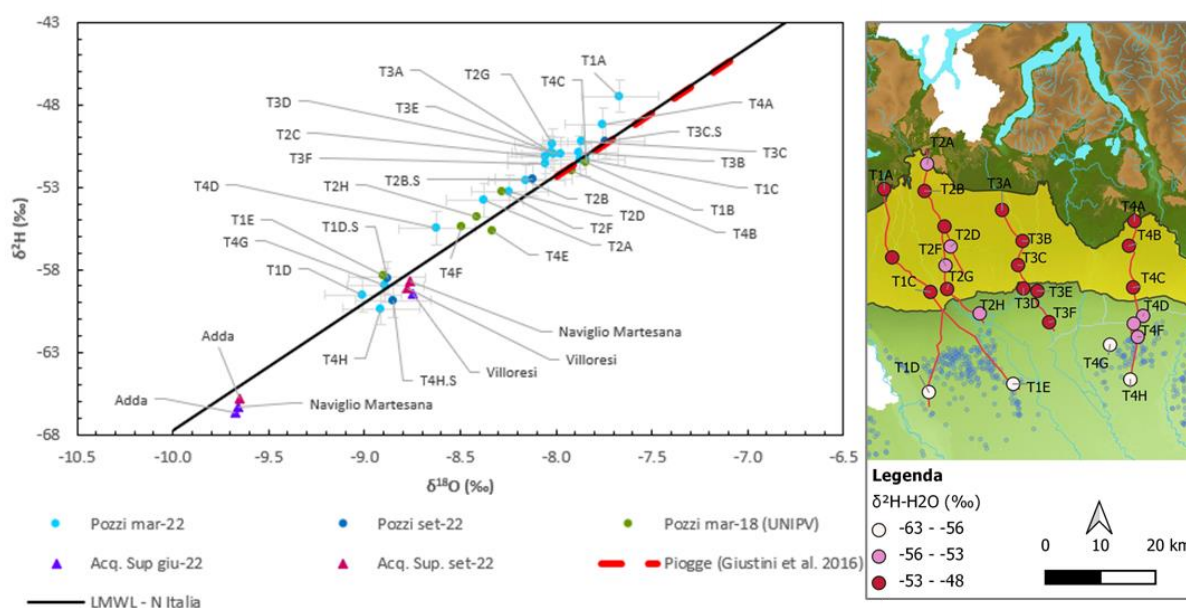


Figura 6.5 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 4 transesti della sotto-area Ticino-Adda. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

La sotto-area Adda-Oglio contiene 2 transesti (T5-6); il grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ per questa zona e la distribuzione di $\delta^2\text{H}$ per i pozzi campionati in marzo (2018 e 2022) sono rappresentati in Figura 6.6. La totalità di questa sotto-area è soggetta ad irrigazione agricola. C'è un solo pozzo (T6A) caratterizzato dal segnale tipico delle precipitazioni

locali e quindi principalmente alimentato da esse. Il pozzo T6D, ubicato in prossimità del Fiume Cherio, anch'esso con segnale arricchito, viene interpretato come principalmente alimentato dal Fiume Cherio stesso, in quanto caratterizzato da un segnale arricchito (come discusso sopra). Emerge la presenza di un gruppo di 8 pozzi con un segnale tipico delle acque superficiali (Figura 6.6), in particolare dei fiumi Serio e Brembo, principalmente utilizzati come fonti di acqua di irrigazione in questa zona. L'interpretazione è quindi che per questo gruppo di pozzi, l'alimentazione principale della falda sia dovuta all'infiltrazione delle acque di irrigazione. Unica eccezione potrebbe essere il pozzo T5A, ubicato a circa 600 m di distanza dal Fiume Serio, che potrebbe essere alimentato anche dalla perdita diretta di acqua dall'alveo del fiume. Infine, 7 pozzi formano un gruppo con segnale intermedio tra acque superficiali e piogge locali (Figura 6.6). Per questi pozzi l'interpretazione è di un mescolamento tra l'acqua più arricchita proveniente da monte idrogeologico (principalmente alimentata dalle piogge locali) o da porzioni più profonde dell'acquifero (acque più vecchie) con acque più impoverite infiltrate dalla superficie come eccesso irriguo. Tra i pozzi campionati sia a marzo che a settembre 2022, emerge la differenza di segnale isotopico riscontrata nel pozzo T5D, più impoverito in marzo e più arricchito in settembre (Figura 6.6). L'arricchimento relativo in settembre 2022 potrebbe essere collegato alla siccità estiva occorsa, che ha reso necessario un maggiore uso di pozzi irrigui, spostando così il segnale dell'acqua di irrigazione verso valori più arricchiti, in linea con il segnale isotopico medio della falda.

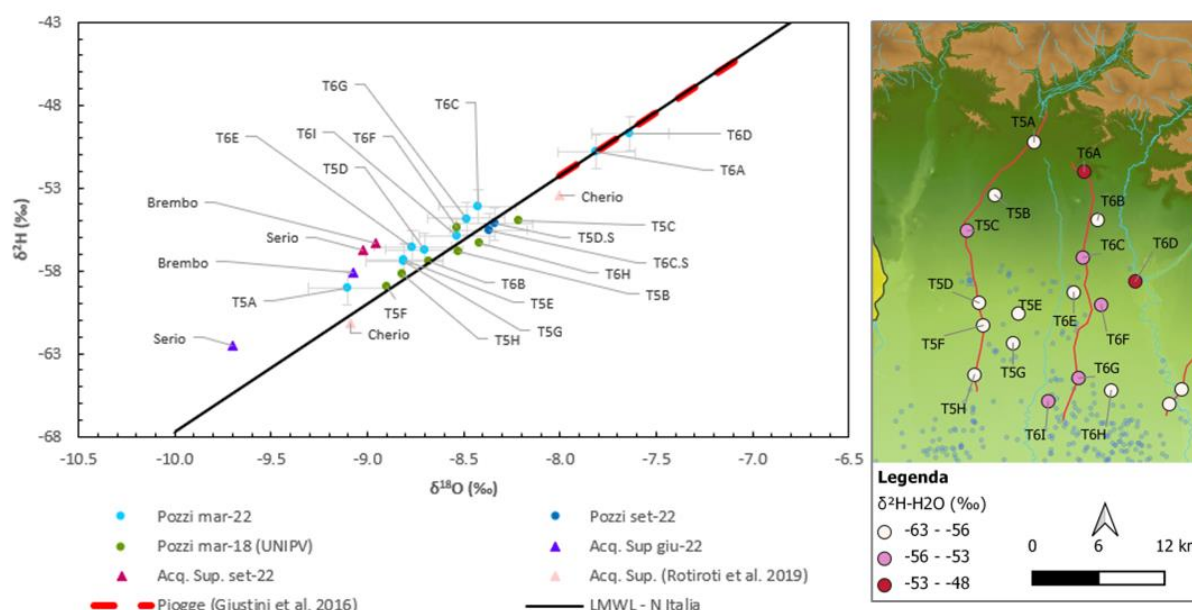


Figura 6.6 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Adda- Oglio. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

La sotto-area Oglio-Mella contiene 3 transetti (T7÷9); il grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ per questa zona e la distribuzione di $\delta^2\text{H}$ per i pozzi campionati in marzo (2018 e 2022) è riportata in Figura 6.7. La totalità di questa sotto-area è soggetta ad irrigazione agricola ad eccezione della zona pedemontana compresa tra la cerchia morenica dell'Iseo e il Fiume Mella (all'incirca tra i comuni di Passirano, Rodengo-Saiano e Gussago), dove l'irrigazione non viene praticata o, nel caso, fatta utilizzando pozzi irrigui. Proprio in questa zona pedemontana si trovano gli unici 3 pozzi che presentano un segnale più arricchito (T9A, T9B e T9C; Figura 6.6). Per questi punti, più che alle precipitazioni locali di pianura, l'alimentazione sembra principalmente dovuta alla cosiddetta "surface mountain-front recharge" (Markovich et al., 2019). Questa è definita come l'infiltrazione in pianura di acqua dei torrenti che provengono dalle zone collinari/prealpine e che hanno raccolto le piogge cadute in queste aree, dopo ruscellamento superficiale. Questo tipo di alimentazione è caratterizzata da un segnale isotopico arricchito dovuto al frazionamento per evaporazione (Rotiroti et al., 2019, 2023). Un torrente capace di alimentare la falda con questo meccanismo è il Gandovere; questo è confermato dal suo segnale isotopico che indica un frazionamento per evaporazione (spostamento del segnale a destra rispetto alla retta

meteorica; Figura 6.6). Dalla parte opposta, con il segnale tipico delle acque superficiali (Fiume Oglio), troviamo un folto gruppo composto da 8 pozzi (Figura 6.6). Considerando che il fiume Oglio alimenta la quasi totalità dei canali irrigui in questa sotto-area, il segnale impoverito per questi pozzi è interpretato come alimentazione principale dovuta all'infiltrazione delle acque irrigue (Rotiroti et al., 2019). Un solo pozzo (T9F) presenta un segnale intermedio (Figura 6.6); questo punto è ubicato a valle della fascia dei fontanili (Figura 6.6) dove viene utilizzata acqua dei fontanili e dei pozzi irrigui (relativamente più arricchita), in aggiunta all'acqua di Oglio, come acqua di irrigazione. Il segnale intermedio del pozzo T9F viene quindi interpretato, anche in questo caso, come indicazione di un'alimentazione principale dovuta all'infiltrazione dell'eccesso irriguo.

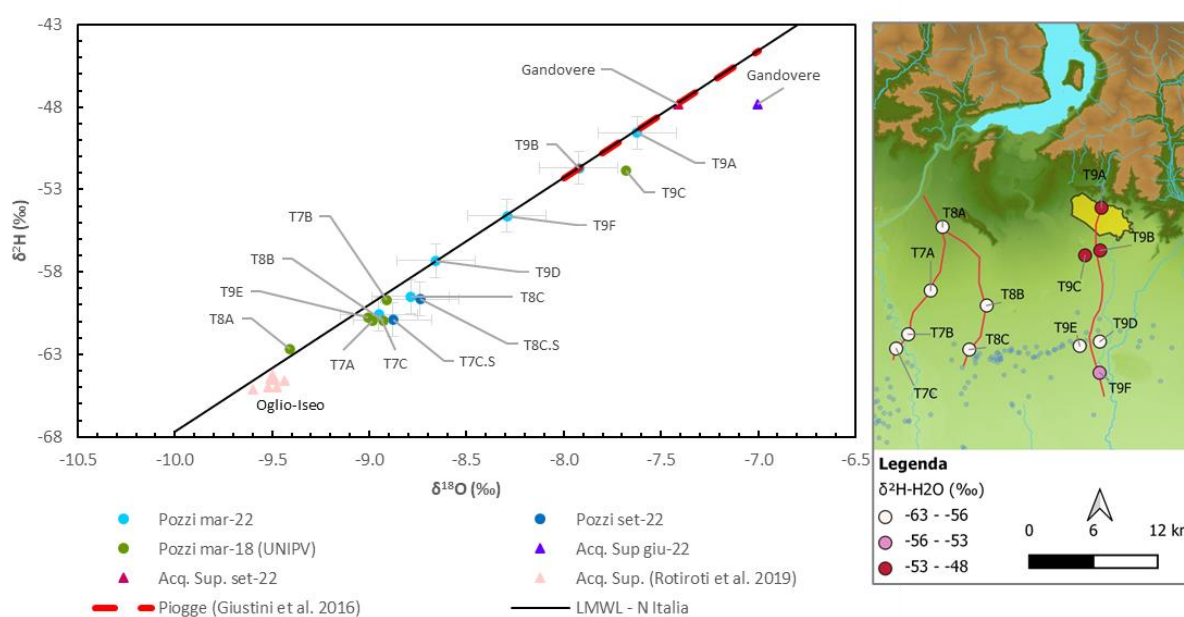


Figura 6.7 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 3 transetti della sotto-area Oglio- Mella. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

La sotto-area Mella-Chiese contiene 2 transetti (T10-11); il grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ per questa zona e la distribuzione di $\delta^2\text{H}$ per i pozzi campionati in marzo (2018 e 2022) è riportata in Figura 6.8. La stragrande maggioranza di questa sotto-area è soggetta ad irrigazione agricola. Per questi due transetti, la totalità dei 5 pozzi considerati presenta un segnale prossimo a quello del fiume Chiese, principale sorgente di acqua irrigua

nella zona. L'interpretazione è quindi che questi pozzi siano principalmente alimentati dall'infiltrazione dell'acqua di irrigazione.

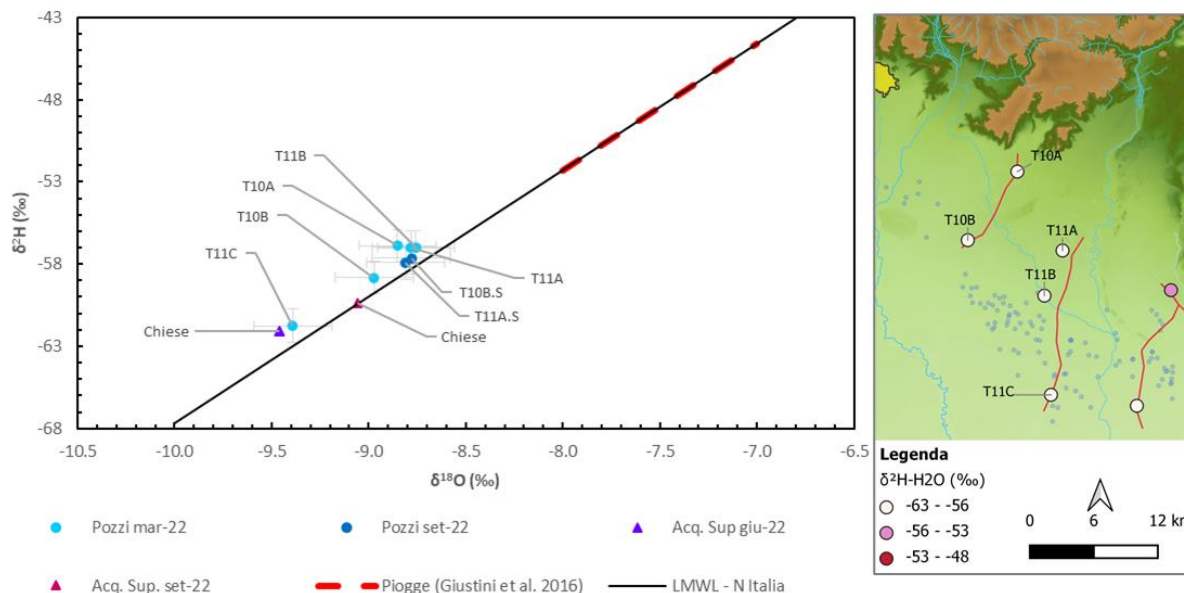


Figura 6.8 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Mella- Chiese. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

La sotto-area Chiese-Mincio contiene 1 transetto (T12); il grafico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ per questa zona e la distribuzione di $\delta^2\text{H}$ per i pozzi campionati in marzo (2018 e 2022) è riportata in Figura 6.9. La maggior parte di questa sotto-area è soggetta ad irrigazione agricola. Ritroviamo un pozzo (T12B), ubicato subito a valle delle colline moreniche dell'Alto Mantovano (Figura 6.9), che presenta un segnale isotopico arricchito, indicando un'alimentazione principale dovuta alle precipitazioni locali. Un pozzo (T12A) presenta un segnale intermedio interpretabile come alimentazione composita tra precipitazione locale ed eccesso irriguo. Infine, due pozzi (T12C e T12D) presentano un segnale impoverito, prossimo a quello delle acque superficiali utilizzate come fonte di irrigazione nella zona (Canale Arnò), indicando quindi un'alimentazione dominante da infiltrazione di acqua irrigua. Si segnala un comportamento anomalo del campione di settembre 2022 del pozzo T12C (campione T12C.S) che risulta molto impoverito rispetto al campione prelevato nello stesso periodo dal Canale Arnò.

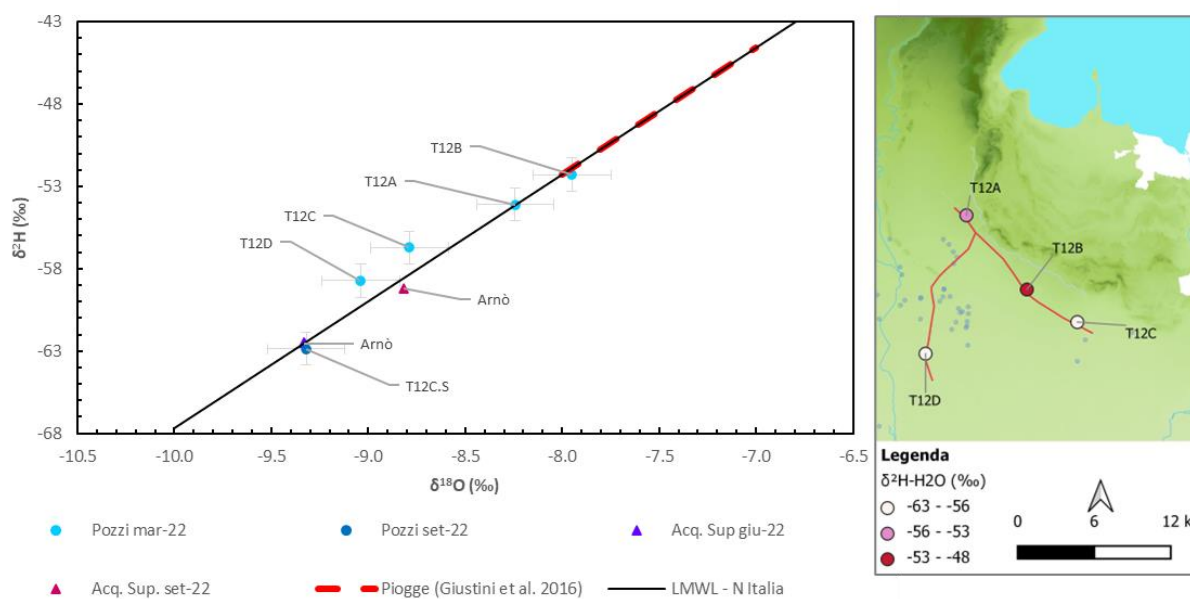


Figura 6.9 Scatterplot degli isotopi stabili dell'acqua per i campioni che caratterizzano il transetto della sotto-area Chiasso- Mincio. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

6.2.2 Tracciamento della salinità della falda

Per l'individuazione dell'origine della salinità della falda, intesa come sommatoria di tutti i soluti disciolti, sono stati utilizzati i traccianti chimici Cl e Cl/Br (Alcalá & Custodio, 2008; Davis et al., 2004; Katz et al., 2011; McArthur et al., 2012; Vengosh & Pankratov, 1998). Come campioni di falda sono stati considerati i 55 raccolti nelle campagne sperimentali del presente studio (44 campioni a marzo e 11 a settembre 2022). I valori di Cl e Cl/Br in questi campioni di falda sono stati confrontati con valori misurati in campioni di acque superficiali e piogge e in campioni di liquidi ad alta salinità, sia di origine naturale (acqua di mare) che antropica (reflui domestici e liquami zootecnici). Per i campioni di acque superficiali, sono stati considerati sia i dati acquisiti dal monitoraggio dedicato al presente progetto (8 punti campionati sia a giugno che a settembre 2022) sia dati di letteratura (Rotiroti et al., 2019), ovvero i 5 punti monitorati sul sistema Iseo-Oglio a giugno e settembre 2016 (Tabella 6.2). Per le piogge sono stati utilizzati solo dati di letteratura (Rotiroti et al., 2017; 2019) relativi a 3 punti ubicati

nella pianura lombarda (Rodengo, Alfianello e Cremona; Tabella 6.2). Per i reflui domestici sono stati considerati 18 valori acquisiti dalla letteratura e riferiti, nello specifico, a fosse settiche e fognature urbane (compreso un campione di reflui in ingresso al depuratore di Cremona; Tabella 6.2). Per i liquami zootecnici, sono stati considerati 2 campioni, uno di liquame bovino e l'altro di liquame suino, forniti nel 2016 dal CRPA (Centro Ricerche Produzioni Animali) di Reggio Emilia ed analizzati per Cl e Br nel laboratorio della University College London dal Prof. J. McArthur.

Tabella 6.2 Riferimenti da letteratura relativi ai dati sui i traccianti chimici Cl e Cl/Br utilizzati nel presente progetto

Tipo	ID Punto	Corpo Idrico	Luogo	Data Campione	Cl (mg/L)	Cl/Br (mass ratio)	Fonte
Acqua superficiale	L130	Lago d'Iseo	Sarnico	Giugno-16	3.1	522	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	L130	Lago d'Iseo	Sarnico	Sett-16	3.1	425	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R106	Fiume Oglio	Palazzolo sull'Oglio	Giugno-16	4.6	697	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R106	Fiume Oglio	Palazzolo sull'Oglio	Sett-16	5.1	769	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R107	Fiume Oglio	Pontoglio	Giugno-16	5.2	485	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R107	Fiume Oglio	Pontoglio	Sett-16	5.4	434	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R110	Fiume Oglio	Calcio	Giugno-16	5.2	501	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R110	Fiume Oglio	Calcio	Sett-16	6.5	621	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R105	Fiume Cherio	Palosco	Giugno-16	11.9	179	Rotiroti et al. 2019
Acqua superficiale	R105	Fiume Cherio	Palosco	Sett-16	17.6	330	Rotiroti et al. 2019
Piogge	P151	-	Rodengo	Nov-15 - Nov-16	0.8	119	Rotiroti et al. 2019
Piogge	P152	-	Alfianello	Nov-15 - Nov-16	1.4	204	Rotiroti et al. 2019
Piogge	-	-	Cremona	14-28 Luglio-14	1.3	213	Rotiroti et al. 2017
Acqua marina	-	-	-	-	19000	292	Hem et al. 1992
Liquame suino	-	-	Pianura Padana	2016	555	427	Dati non pubblicati
Liquame bovino	-	-	Pianura Padana	2016	1036	740	Dati non pubblicati
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	36	679	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	145	1510	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	174	2122	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	204	1907	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	238	1951	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	82	719	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	129	1142	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	71	2536	McArthur et al. 2012

Tipo	ID Punto	Corpo Idrico	Luogo	Data Campione	Cl (mg/L)	Cl/Br (mass ratio)	Fonte
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	88	1492	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	108	2000	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	India	-	111	1820	McArthur et al. 2012
Fosse settiche domestiche	-	-	USA	-	91	769	Panno et al. 2006
Fosse settiche domestiche	-	-	USA	-	35	694	Katz et al. 2010
Fosse settiche domestiche	-	-	Cina	-	91	769	Li et al. 2019
Reflui fognari domestici	-	-	Israele	-	260	410	Vengosh & Pankratov 1998
Reflui fognari domestici	-	-	Israele	-	396	873	Vengosh & Pankratov 1998
Reflui fognari domestici	-	-	Bangladesh	-	300	1500	Hoque et al. 2014
Reflui fognari domestici	-	-	Cremona	2014	98	981	Rotiroti et al. 2017
MEDIA reflui domestici	-	-	-	-	148	1601	-

Nella Figura 6.10 è mostrata la distribuzione nello spazio dei valori di Cl/Br nei pozzi monitorati. Emerge chiaramente come i punti dei transetti T5 e T6 siano caratterizzati valori più bassi di Cl/Br. Nella Figura 6.11 è riportato lo scatterplot Cl vs Cl/Br di tutti i campioni considerati; nello specifico, per i reflui domestici è stata graficata solo la media dei 18 valori considerati. La Figura 6.11 riporta anche le linee di mescolamento (Clark, 2015) tra un estremo composizionale (end-member) di acqua diluita (i.e., a bassa salinità), costituito dal campione di pioggia con valori più bassi (campione di Rodengo; P151), e tre estremi composizionali di liquidi ad alta salinità, quali acqua di mare, reflui domestici e liquami suini. Per i liquami zootecnici, è stato scelto di utilizzare solo quello suino nella linea di mescolamento, in quanto il lavoro precedente di Martinelli et al. (2018) ha evidenziato un ruolo preponderante del liquame suino rispetto a quello bovino nel contribuire all'inquinamento da nitrati nelle falde della Pianura Padana. Le etichette con valori percentuali sulle rette di mescolamento piogge-liquami zootecnici e piogge-reflui domestici indicano il contributo di questi liquidi antropici alla salinità totale del campione. L'area del grafico compresa tra queste due rette di mescolamento può essere considerata come indicatrice di un'origine combinata di salinità tra una sorgente naturale (meteorica) e sorgenti antropiche di

diversa natura (attività urbane e/o agricole) che possono essere raggruppate con il termine di “uso del suolo”.

Un primo aspetto che emerge dal grafico di Figura 6.11 è che le acque superficiali si trovano ben allineate alla retta di mescolamento piogge-reflui domestici, con l'unica eccezione del fiume Serio (e in maniera minore del Fiume Cherio), che presenta i valori di Cl/Br più bassi di tutto il dataset. L'allineamento delle acque superficiali a questa retta indica che l'origine della salinità delle acque superficiali è dovuta al contributo congiunto delle piogge e dei reflui domestici (con un contributo massimo intorno al 15%). È necessario specificare che il tracciante Cl/Br non è in grado di discriminare tra reflui depurati e non depurati, in quanto il sistema di depurazione a “fanghi attivi”, utilizzato per le acque reflue civili, non è in grado di agire sulle concentrazioni degli alogeni, come Cl e Br, mantenendo quindi il loro rapporto inalterato. Ad ogni modo, l'allineamento delle acque superficiali alla retta piogge-reflui è un risultato in linea con le aspettative, in quanto è noto che la maggior parte dei reflui civili, trattati o meno, vengano scaricati nei corpi idrici superficiali, contribuendo quindi ad una porzione significativa della loro salinità. Un risultato meno atteso è invece quello del fiume Serio; il suo basso valore di Cl/Br, che indica un maggiore contenuto di Br rispetto agli altri campioni, potrebbe essere generato da un maggior contenuto, rispetto agli altri fiumi, di sostanza organica che, degradandosi, è in grado di rilasciare Br (McArthur et al. 2012). In alternativa, la causa potrebbe essere legata alla presenza nel Serio di scarichi contenenti sostanze a base di bromuri, come ad esempio i prodotti per la disinfezione (Winid, 2015).

Il lavoro precedente di Rotiroti et al. (2017) sul tracciamento dell'origine della salinità delle falde nell'area specifica della città di Cremona ha fatto emergere come la salinità delle falde superficiali sia generata dal contributo combinato dei corpi idrici superficiali e dei reflui civili. Questo risultato viene confermato dai dati del presente studio, poiché la maggior parte dei campioni di falda (gruppo 1 in Figura 6.11) indica una salinità dovuta al contributo combinato tra acque superficiali ed uso del suolo (agricolo e/o civile). Un insieme ristretto di punti (gruppo 2 in Figura 6.11) si trova invece in prossimità della retta di mescolamento piogge-acqua marina; l'allineamento a questa retta indica un'origine prettamente naturale della salinità, di tipo meteorico. Infatti le

piogge hanno tipicamente un valore di Cl/Br dominato dagli aerosol marini, che riflette quindi il Cl/Br delle acque di mare, con un lieve trend di diminuzione di Cl/Br all'aumentare della distanza dalla costa (Davis et al., 2001).

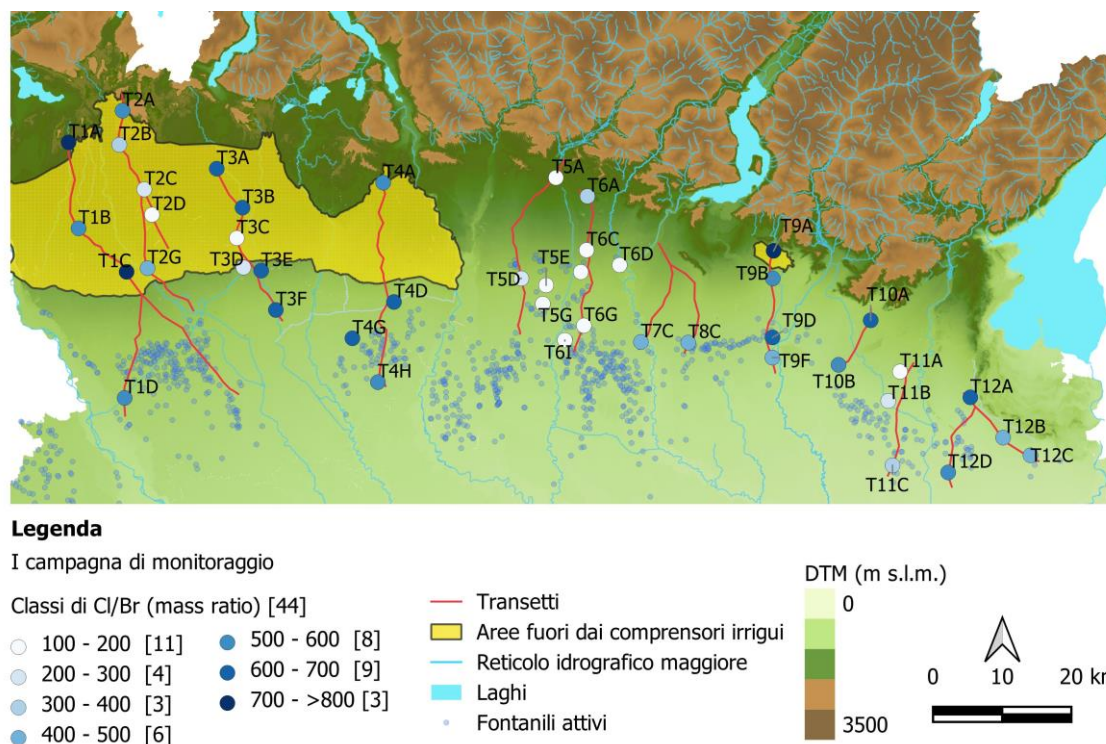


Figura 6.10 Classi di Cl/Br (mass ratio). I dati rappresentati fanno riferimento alla campagna di marzo 2022. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2

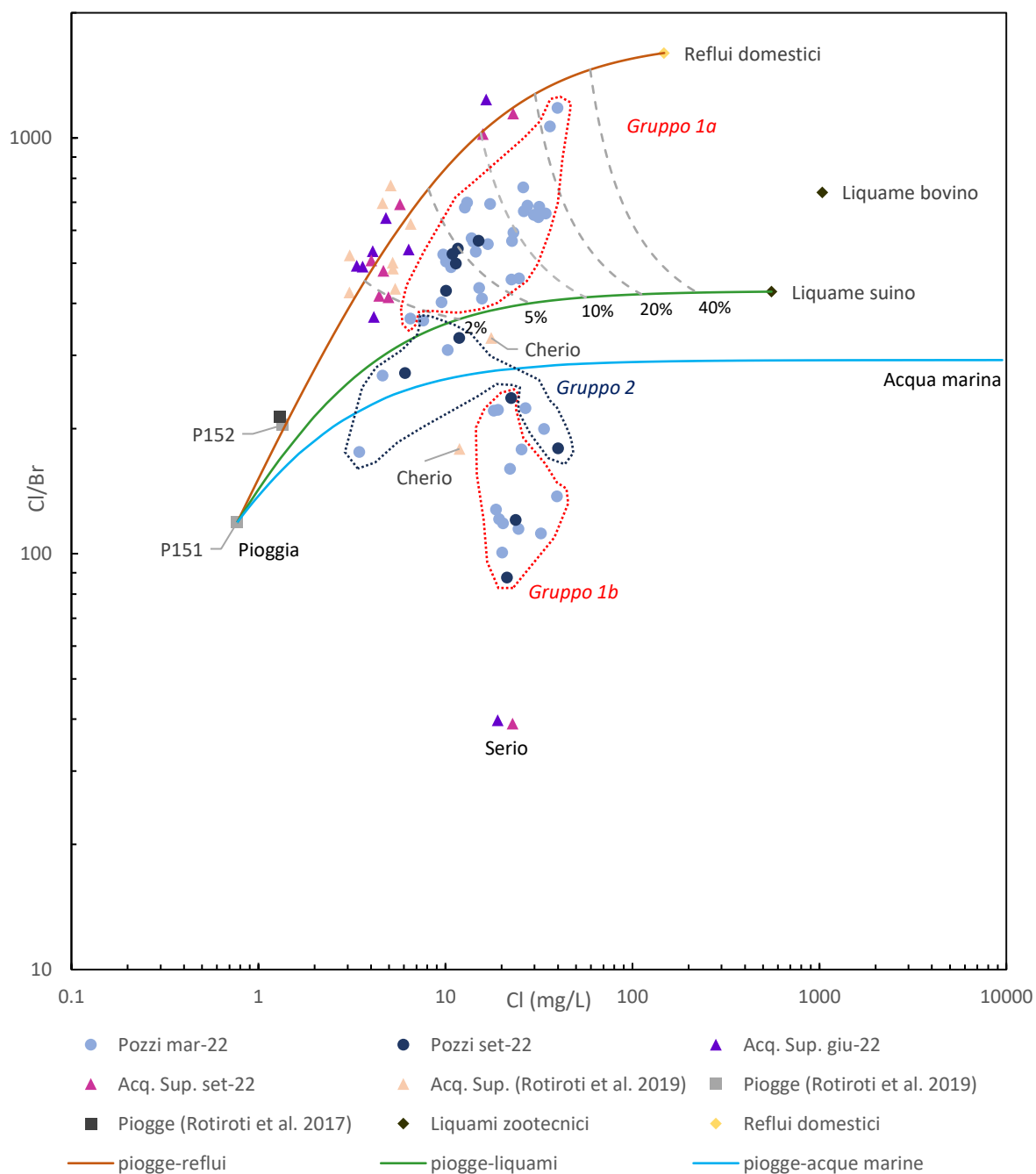


Figura 6.11 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio). Per i dati puntuali fare riferimento a Tabella 6.2, Tabella 5.2, Tabella 5.5 e Tabella 5.7. Per l'ubicazione dei punti campionati della rete di monitoraggio fare riferimento a Figura 5.1

Di seguito vengono discussi i risultati relativi alle 5 sotto-aree considerate: Ticino-Adda, Adda-Oglio, Oglio-Mella, Mella-Chiese e Chiese-Mincio.

Per la sotto-area Ticino-Adda, che contiene i 4 transetti T1÷4, il grafico CI su Cl/Br è riportato in Figura 6.12. Oltre alla retta di mescolamento piogge-acqua di mare, riportata anche in Figura 6.11, sono rappresentate le rette di mescolamento acque superficiali-reflui domestici e acque superficiali-liquami zootecnici, in accordo con quanto discusso precedentemente di un'origine di salinità delle falde principalmente dovuta alla combinazione tra acque superficiali ed uso del suolo. Come end-member di acque superficiali, è stata utilizzata la media dei campioni di fiumi e canali raccolti all'interno di questa sotto-area (Adda, Villoresi e Martesana). Dal grafico emerge chiaramente la presenza di due gruppi di pozzi. Il primo (più numeroso, composto da 14 pozzi) che ricade tra le rette di mescolamento delle acque superficiali con liquami e reflui, indicando quindi un'origine della salinità come combinazione tra acque superficiali e uso del suolo civile/agricolo. Il contributo di salinità derivante dall'uso del suolo si attesta fino ad un massimo di 20-30%, riscontrabile per i pozzi T1A e T1C e riferibile al contributo prevalente di reflui domestici. Gli altri pozzi di questo primo gruppo presentano un contributo di salinità dall'uso del suolo che si attesta tra il 2 e il 15%. Il secondo gruppo, composto da 5 pozzi (T2B, T2C, T2D, T3C e T3D) ricade in prossimità della retta piogge-acque marine, indicando una salinità prettamente di tipo meteorico. Questo risultato è in linea con i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ che indicano per questi 5 pozzi un'alimentazione dovuta principalmente all'infiltrazione delle precipitazioni locali, con valori leggermente più impoveriti solo per il punto T2D.

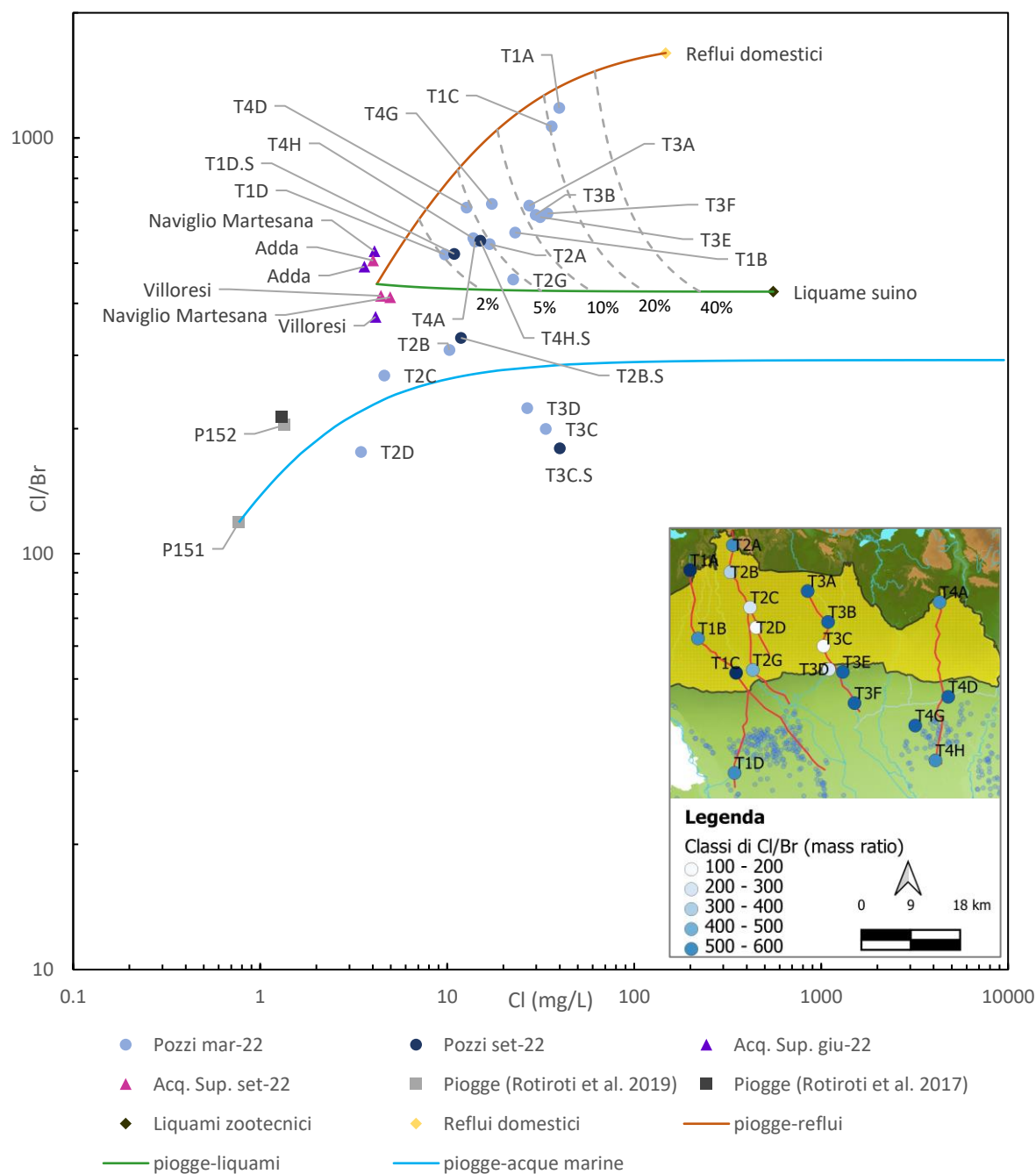


Figura 6.12 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 4 transesti della sotto-area Ticino-Adda. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

Per la sotto-area Adda-Oglio, che contiene i 2 transetti T5-6, il grafico Cl su Cl/Br è riportato in Figura 6.13. Il grafico di Figura 6.13 è dominato dalla particolarità dei valori del Fiume Serio, con Cl/Br più bassi rispetto alle altre acque superficiali, che sposta il baricentro dei pozzi di questa sotto-area verso valori di Cl/Br più bassi rispetto a tutti quelli delle altre sotto-aree. Nello specifico, i pozzi dei transetti T5 e T6 si distribuiscono tra i valori del Serio e del Brembo, che costituiscono le principali fonti di acqua di irrigazione in questa zona, con uno spostamento verso la destra del grafico in funzione del contributo di salinità generato dall'uso del suolo; nel grafico sono state riportate le linee di mescolamento considerando solo il Serio come end-member di acque superficiali, in quanto la posizione dei pozzi nel grafico (in prossimità dei valori del Serio, considerando la scala logaritmica) ci indica un contributo dominante del Serio rispetto al Brembo. Dalle rette di mescolamento tra Serio e uso del suolo si possono evincere delle percentuali di contributo dell'uso del suolo alla salinità della falda generalmente tra il 5% e il 10%. Un discorso a parte è necessario per il pozzo T6A che si posiziona in prossimità della retta piogge-acque marine, in linea con il suo segnale isotopico più arricchito tipico dell'alimentazione da piogge locali (Cap. 6.2.1.), confermando così un'origine prettamente meteorica della sua salinità. Anche per il T6D viene confermato quanto emerso dagli isotopi stabili dell'acqua, ovvero la presenza di valori prossimi a quelli del Fiume Cherio, che domina quindi sia alimentazione che salinità di questo punto.

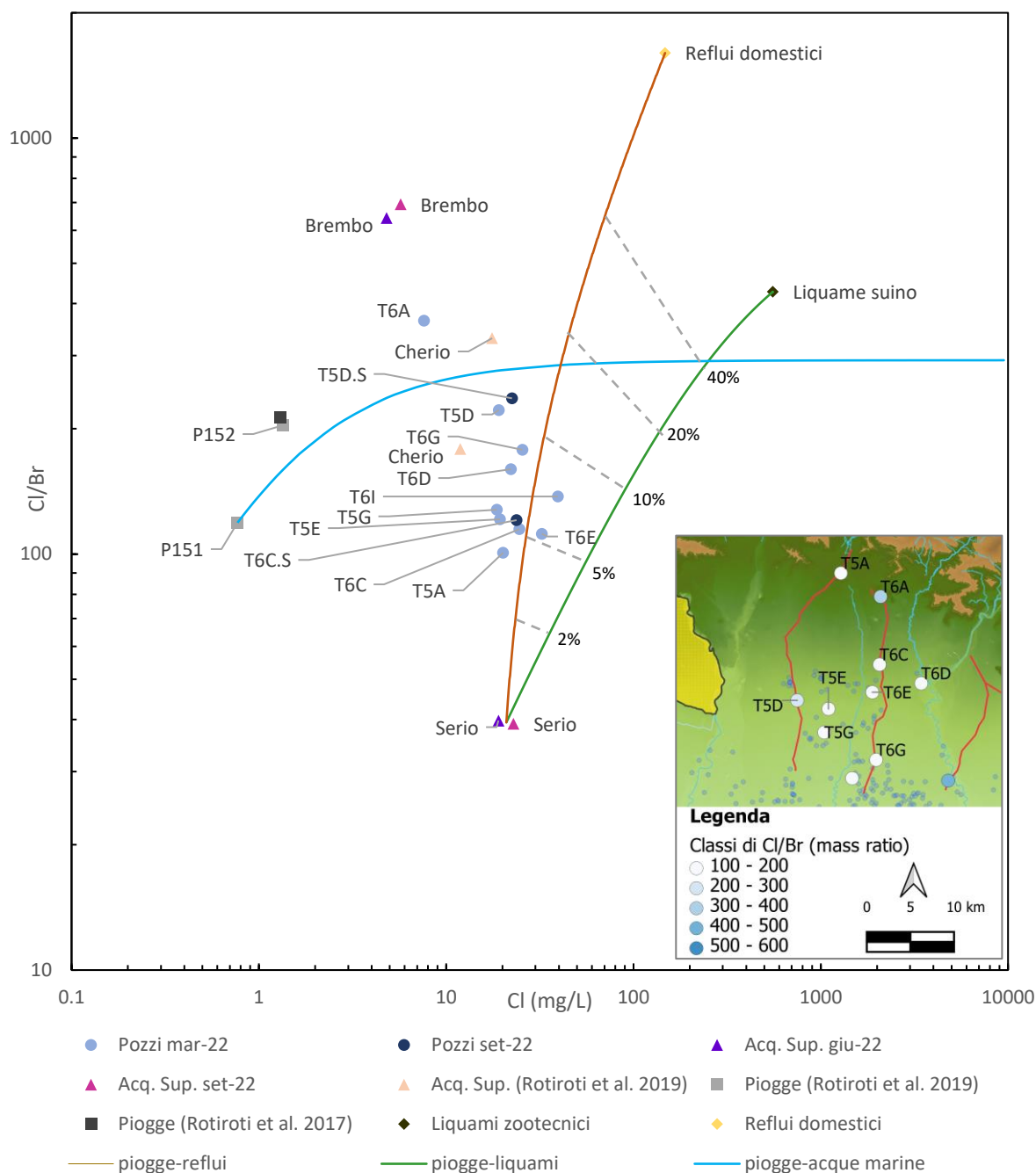


Figura 6.13 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Adda-Oglio. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

Per la sotto-area Oglio-Mella, che contiene i 3 transetti T7÷9, il grafico Cl su Cl/Br è riportato in Figura 6.14. In questa sotto-area, come end-member di acque superficiali è stata considerata la media dei valori di letteratura (Rotiroti et al., 2019) riferiti al Fiume Oglio e al Lago d'Iseo. Tutti i pozzi di questa sotto-area ricadono nella porzione

di grafico all'interno delle rette di mescolamento tra acque superficiali e uso del suolo; anche il pozzo T7C può essere assimilato a questa porzione del grafico, considerando la variabilità presente nei dati di Oglio e Iseo. Le percentuali di salinità della falda derivanti dall'uso del suolo sono variabili nell'area: da valori <2% per T7C e T8C si arriva a circa il 10% per T9A.

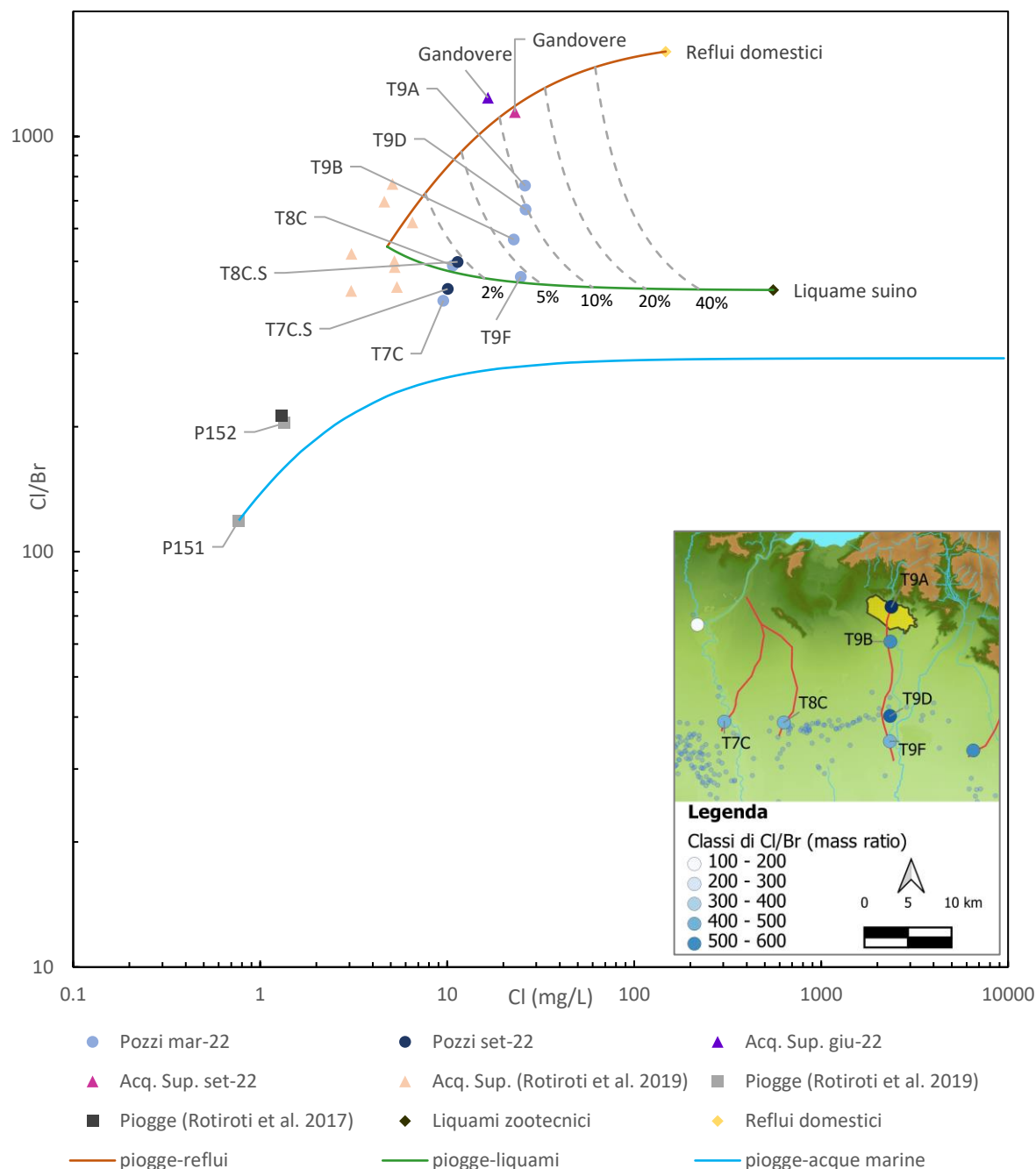


Figura 6.14 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 3 transesti della sotto-area Oglio-Mella. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

Per la sotto-area Mella-Chiese, che contiene i 2 transetti T10-11, il grafico Cl su Cl/Br è riportato in Figura 6.15. Come end-member di acque superficiali è stata considerata la media tra i due campioni prelevati sul Fiume Chiese. Per quanto riguarda il transetto T10, i due pozzi che lo compongono ricadono entrambi nella porzione definita dal mescolamento tra acque superficiali e uso del suolo, con il contributo di quest'ultimo alla salinità della falda tra il 2% e il 5%. Per quanto riguarda il T11, la situazione non è chiaramente interpretabile. I punti del T11 si allineano verso un valore basso di Cl/Br, in analogia a quanto visto per il Serio (Figura 6.11). Sembra quindi che esista un end-member di acqua superficiale (con bassi valori di Cl/Br) non indentificato in questo studio. Questo end-member potrebbe essere costituito sempre da acqua del fiume Chiese ma su un tratto più a valle rispetto a dove è stato campionato in questo studio (Gavardo, BS), rappresentativo delle acque di irrigazione utilizzate nella zona che attraversa il transetto T11. Questo ipotetico cambio di Cl/Br del Chiese verso valle potrebbe essere generato da uno scarico, ubicato a valle del punto campionato in questo studio, caratterizzato da maggiori concentrazioni di Br e in grado così di abbassare il Cl/Br del fiume. I valori di Cl/Br del Chiese sembrano invece rappresentativi delle acque di irrigazione utilizzate nell'area attraversata dal T10; infatti, il punto campionato sul Chiese in questo studio (Gavardo) è ubicato poco più a monte della derivazione del Naviglio Grande Bresciano, che è la sorgente di acqua irrigua nella zona del T10.

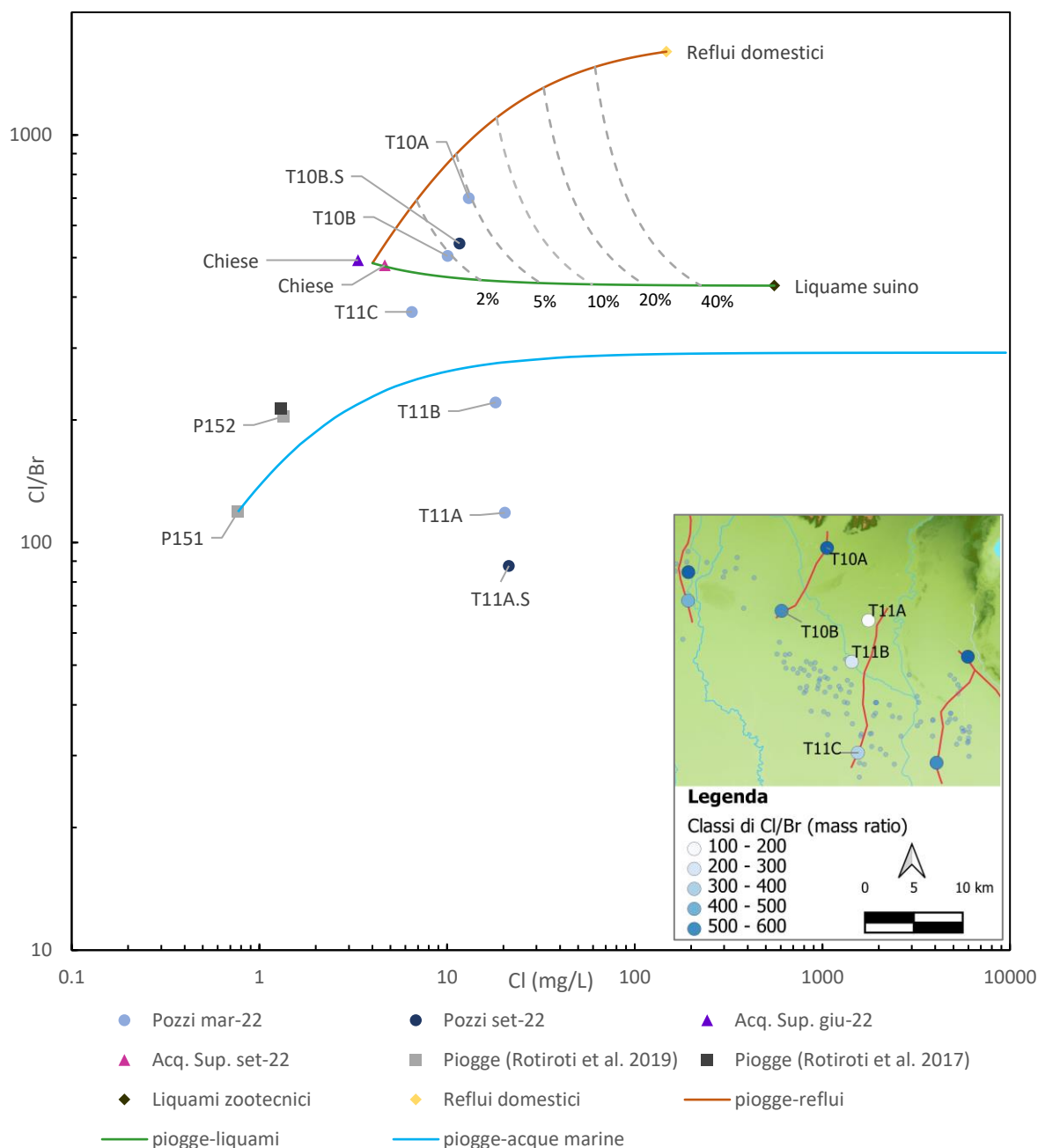


Figura 6.15 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano i 2 transetti della sotto-area Mella-Chiese. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

Per la sotto-area Chiese-Mincio, che contiene il transetto T12, il grafico Cl su Cl/Br è riportato in Figura 6.16. Come end-member di acque superficiali è stata considerata la media tra i due campioni prelevati dal Canale Arnò, principale fonte irrigua della zona. Considerando le variazioni stagionali nei valori del Canale Arnò, possiamo

considerare tutti i campioni di falda di questa sotto-area come ricadenti nella zona di mescolamento tra acque superficiali e uso del suolo. Unica eccezione è il campione prelevato a settembre nel pozzo T12C (T12C.S) che ha dimostrato un comportamento anomalo anche per i risultati degli isotopi stabili dell'acqua.

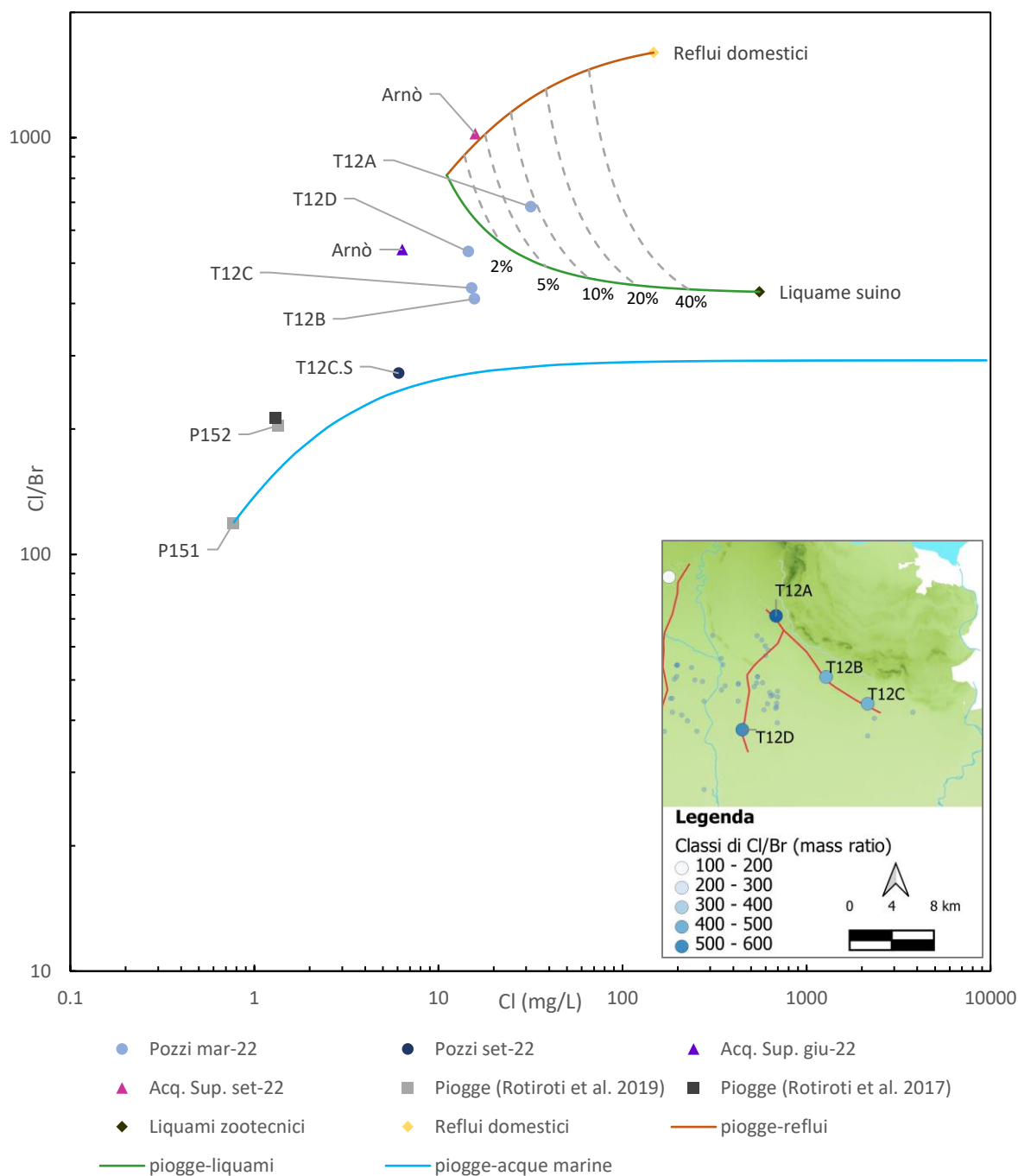


Figura 6.16 Scatterplot Cl vs Cl/Br (mass ratio) per i campioni che caratterizzano il transetto della sotto-area Chiese-Mincio. Nel box in basso a sinistra l'andamento di Cl/Br nello spazio per la sotto-area d'interesse, da Figura 6.10. Per l'ubicazione dei punti campionati nella rete di monitoraggio totale fare riferimento a Figura 5.1

6.2.3 Tracciamento della ricarica della falda

Il tracciamento della ricarica della falda dell'ISS di alta e media pianura lombarda è stato fatto combinando un tracciante di solvente ($\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$) e uno di soluti (Cl/Br). Come campioni di falda sono stati considerati solo i 55 raccolti nelle campagne sperimentali del presente studio (44 campioni a marzo e 11 a settembre 2022) in quanto nei 20 campioni acquisiti da UniPV non è stato misurato il Cl/Br. Oltre ai campioni di falda, sono stati considerati valori di $\delta^2\text{H}$ e Cl/Br per campioni di pioggia (2 campioni da Rotiroti et al., (2019); stazioni di Rodengo e Alfianello con ID rispettivamente di P151 e P152) e campioni di acque superficiali (gli 8 punti campionati a giugno e settembre 2022 nel presente studio e i 5 punti campionati a giugno e settembre 2016 da Rotiroti et al. (2019), già presentati nei Cap. 6.2.1 e 6.2.2). In Figura 6.17 è riportato lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br di tutti i campioni considerati; da segnalare il box tratteggiato in rosso che identifica un range composizionale tipico per le piogge, impostato per $\delta^2\text{H}$ sull'intervallo derivato da Giustini et al., 2016 (-52.3/-44.6 ‰), come descritto nel Cap. 6.2.1, e per Cl/Br dal valore minimo di 119, corrispondente al punto P151, e dal valore massimo di 269, riportato da Ladouche et al. (2009) per una stazione ubicata in Francia. I campioni di falda sono indicati con una scala di colore che rappresenta il grado di impatto sulla salinità esercitato dall'uso del suolo, derivato dai grafici riportati nel Cap. 6.2.2. Dal grafico possiamo vedere come, in generale, i campioni di falda si posizionino tra i valori estremi di acque superficiali e piogge locali, che costituiscono quindi degli end-members; in altre parole, la Figura 6.17 dimostra come la ricarica della falda sia generata dalle due voci principali (a) acque superficiali, come eccesso irriguo (Cap. 6.2.1), e (b) piogge locali. I dettagli vengono discussi di seguito descrivendo i grafici relativi alle singole sotto-aree Ticino-Adda, Adda-Oglio, Oglio Mella, Mella-Chiese e Chiese-Mincio (da Figura 6.18 a Figura 6.22). In questi grafici sono riportate anche le rette di mescolamento tra l'end-member di pioggia locale (media dei campioni P151 e P152) e l'end-member di acque superficiali, variabile per le diverse sotto-aree e calcolato come media dei campioni di acque superficiali più significativi per ciascuna sotto-area (in analogia a quanto fatto nel Cap. 6.2.2); in queste rette di mescolamento sono riportate le percentuali di ricarica

generata dalle acque superficiali (eccesso irriguo) sulla ricarica totale (la percentuale complementare è quindi relativa al contributo delle piogge locali alla ricarica).

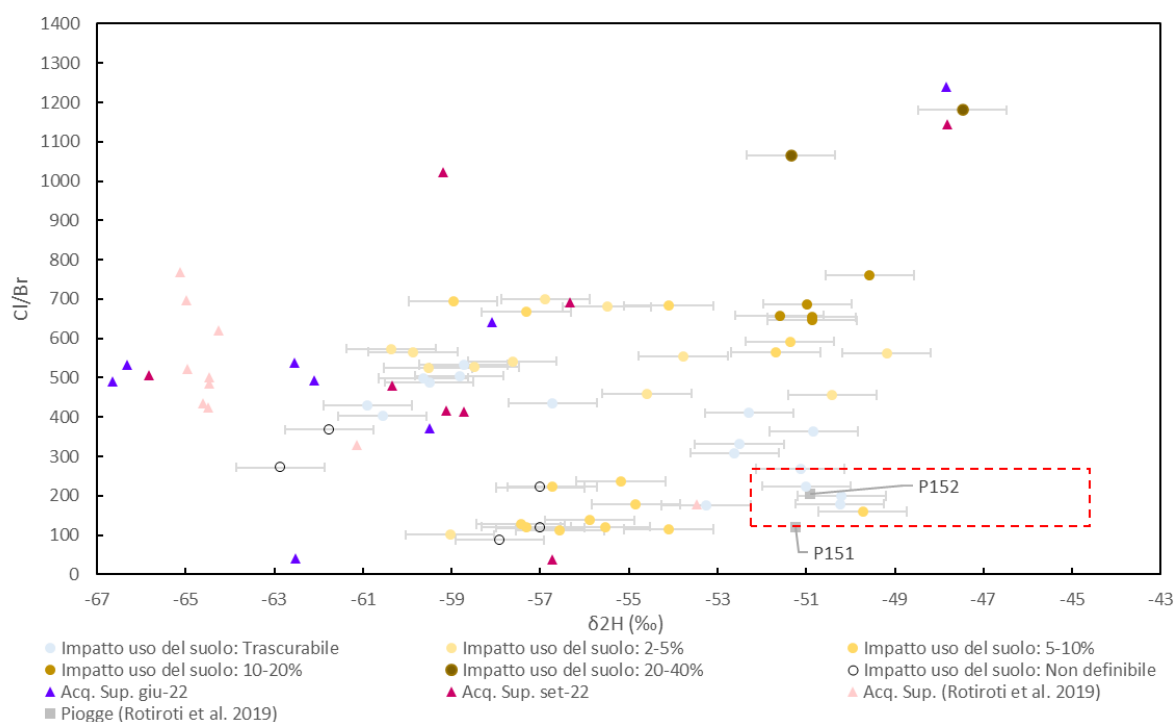


Figura 6.17 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per tutti i campioni considerati. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2

La Figura 6.18 rappresenta lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Ticino-Adda che comprende i 4 transetti T1÷T4. Come end-member di acque superficiali è stata utilizzata la media dei campioni di fiumi e canali raccolti all'interno di questa sotto-area (Adda, Villoresi e Martesana). Dal grafico si nota subito un gruppo di 3 pozzi (T1D, T4G e T4H) per i quali è attribuibile una ricarica da eccesso irriguo intorno al 75%; questi pozzi sono quelli ubicati più a valle idrogeologico, nel cuore delle aree irrigate, rendendo così coerente il risultato ottenuto. Da segnalare anche il pozzo T4D, sempre ubicato in area irrigua, ma più a monte idrogeologico, per il quale è identificabile una ricarica da eccesso irriguo inferiore, intorno al 30-40%. Per tutti gli altri pozzi la ricarica da acque superficiali è inferiore al 25%, indicando così una ricarica prevalente da precipitazioni locali (>75%). Questo risultato è coerente con l'ubicazione di questi punti in aree non irrigate; fanno eccezione solo i pozzi T3D e T3E, ma comunque ubicati subito a valle dell'area non-irrigua, e il pozzo T3F, ubicato nel comune di Milano, quindi

in una zona non propriamente irrigua. Da notare infine come il gruppo di pozzi con ricarica da piogge >75% abbia una buona variabilità in termini di Cl/Br, indicando un diverso grado di impatto dell'uso del suolo sulla loro salinità. Per il gruppo di 5 pozzi formato da T2B, T2C, T2D, T3C e T3D la ricarica principale da piogge è accompagnata da un impatto trascurabile dell'uso del suolo, mentre per la coppia di punti T1C e T1A, la ricarica principale da piogge è accompagnata da un impatto significativo dell'uso del suolo, generato probabilmente da reflui civili (Cap. 6.2.2).

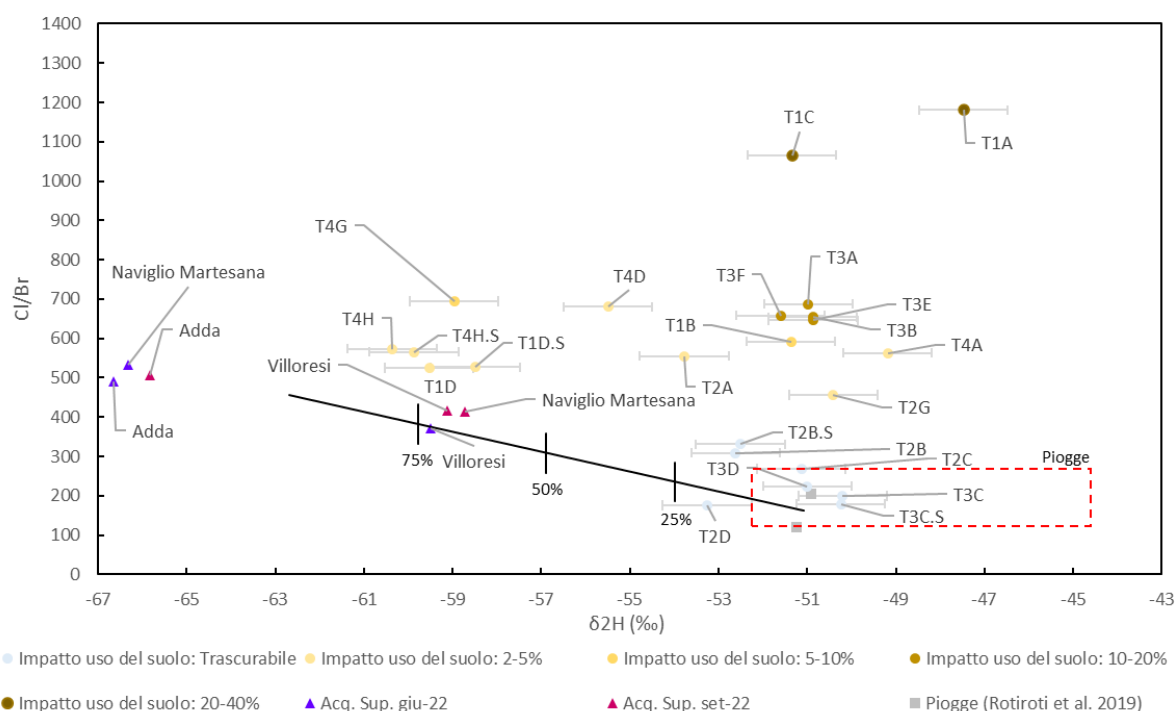


Figura 6.18 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Ticino-Adda. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale

La Figura 6.19 rappresenta lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Adda-Oglio che comprende i 2 transeetti T5 e T6. Come end-member di acque superficiali è stata utilizzata la media dei campioni del solo fiume Serio, in quanto, come visto anche nella Figura 6.13, la posizione dei pozzi nel grafico indica un contributo dominante del Serio rispetto al Brembo. La quasi totalità dei pozzi si allinea sulla retta di mescolamento acque superficiali-piogge, con percentuali di ricarica da acque superficiali >25% e, per la maggior parte, comprese tra il 50% e il 75%. Essendo questa sotto-area ubicata in

zona irrigua, questo ci indica come l'eccesso irriguo sia la voce di ricarica prioritaria per questi pozzi, con massimi intorno a 80-90%, come nel caso del pozzo T5A. Uniche eccezioni sono il pozzo T6A, per il quale è considerabile una ricarica da piogge locali prossima al 100%, e il pozzo T6D, interpretato come ricaricato principalmente dal fiume Cherio. Per quest'ultima interpretazione, anche se i campioni del Cherio del 2016 (Rotiroti et al., 2019) non plottano in prossimità del punto T6D, possiamo considerare un'alimentazione dominante del Cherio per questo pozzo in quanto è ragionevole pensare che per l'anno 2022, periodo di campionamento del T6D ed anno caratterizzato da forte siccità, il segnale del fiume Cherio si sia, di fatto, spostato più a destra nel grafico (rispetto al segnale del 2016) a causa della maggiore evaporazione (che produce arricchimento e quindi valori maggiori di $\delta^2\text{H}$).

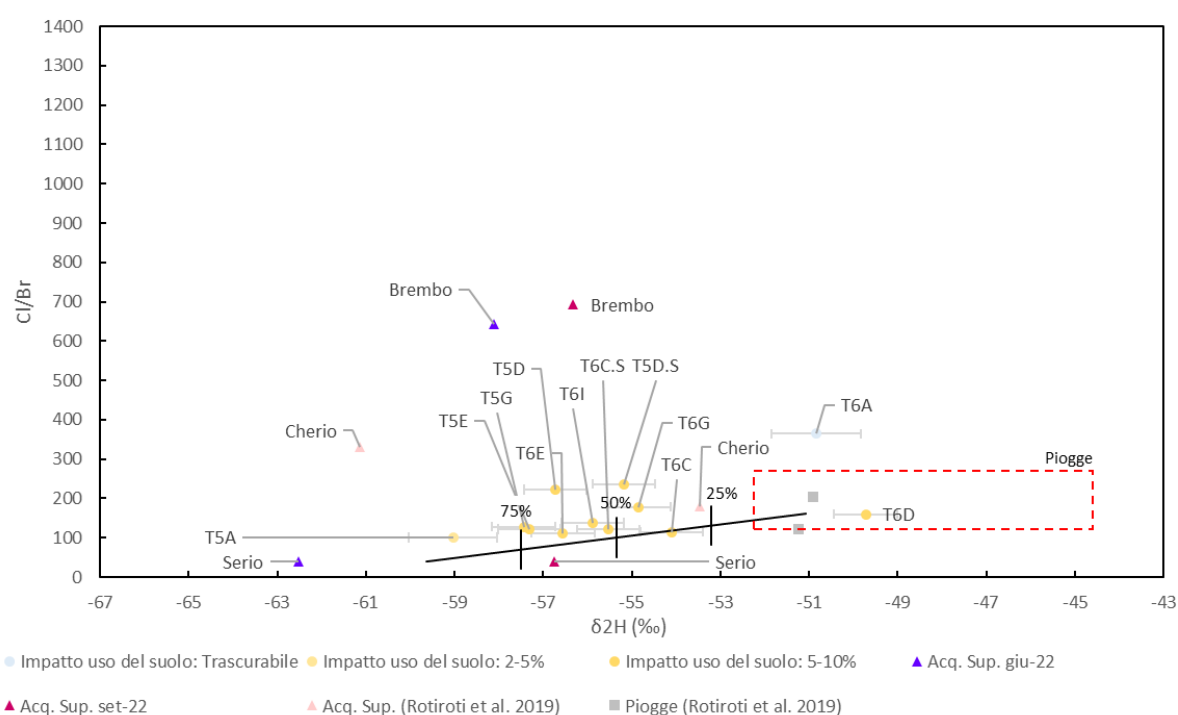


Figura 6.19 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Adda-Oglio. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale

La Figura 6.20 rappresenta lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Oglio-Mella che comprende i 3 transetti T7÷T9. Come end-member di acque superficiali è stata considerata la media dei valori di letteratura (Rotiroti et al., 2019) riferiti al fiume Oglio

e al lago d'Iseo. Anche in questa sotto-area, che comprende per la sua quasi totalità aree irrigue, vediamo come ci sia un gruppo di pozzi (T7C, T8C e T9D) per i quali è attribuibile una ricarica da eccesso irriguo molto intensa, compresa tra il 50% e il 75%. Per il pozzo T9F la percentuale di ricarica da eccesso irriguo si attesta intorno al 25%; ricordando che queste percentuali di eccesso irriguo contemplano solo l'irrigazione originata da acque superficiali (che è comunque la fonte principale a scala regionale), la minore percentuale per il pozzo T9F è in linea con il fatto che nell'area in cui è ubicato (fascia dei fontanili) viene utilizzata per irrigare anche acqua dei fontanili e dei pozzi irrigui, in aggiunta all'acqua di Oglio. Gli ultimi due pozzi della sotto-area, T9A e T9B (ubicati in zona pedemontana), hanno un comportamento peculiare in quanto si allineano verso la retta di mescolamento (tratteggiata in nero) tra le piogge locali e il Torrente Gandovere, considerabile come end-member del meccanismo di ricarica "surface mountain-front recharge" (Cap. 6.2.1). Per i pozzi T9A e T9B è possibile quindi considerare una ricarica principale dovuta alla combinazione dell'infiltrazione di piogge locali e del meccanismo di "surface mountain-front recharge".

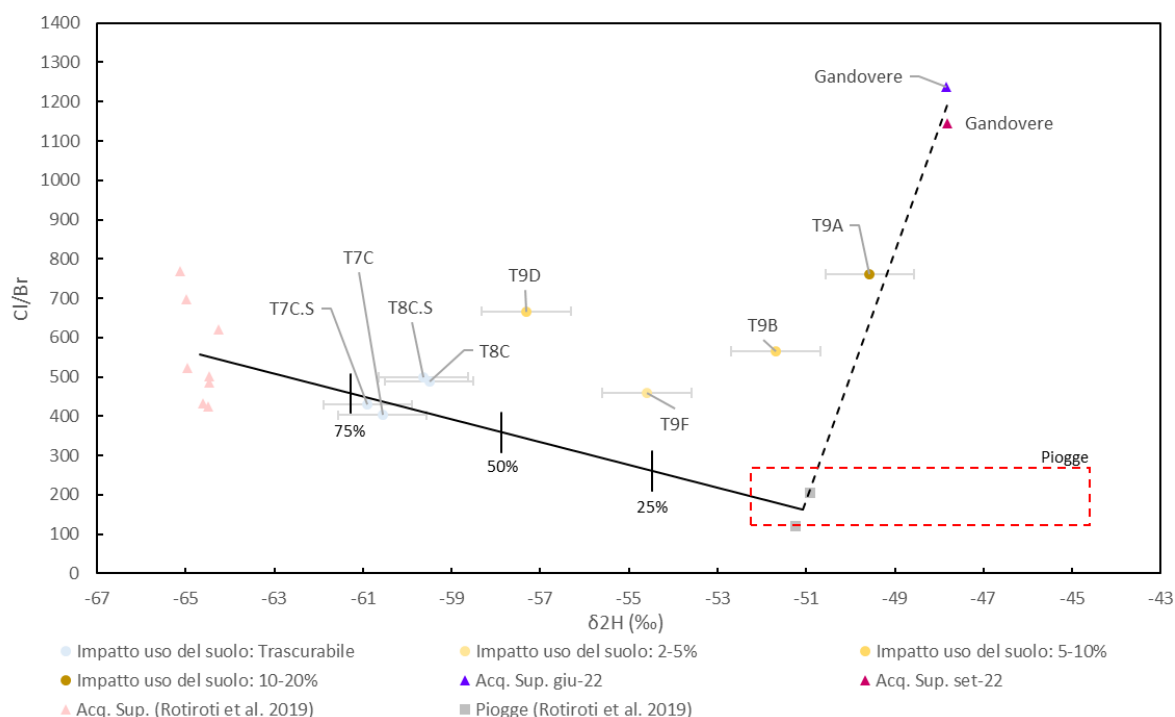


Figura 6.20 Scatterplot δ^2H vs Cl/Br per la sotto-area Oglio-Mella. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale. La retta tratteggiata nera indica il modello di mescolamento tra piogge locali e torrente Gandovere, rappresentativo del fenomeno "surface mountain-front recharge" (Cap. 6.2.1)

La Figura 6.21 rappresenta lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Mella-Chiese che comprende i 2 transetti T10 e T11. Come end-member di acque superficiali è stata utilizzata la media dei campioni del Fiume Chiese. Anche in questo caso possiamo vedere i pozzi plottare in un'area del grafico che indica una ricarica prevalente da eccesso irriguo, con percentuali comprese tra il 50% e il 75%, con un picco prossimo al 100% per il pozzo T11C. Risulta importante ribadire, come discusso nel Cap. 6.2.2, che per i punti del transetto T11, che plottano tutti sotto la retta di mescolamento, l'end-member di riferimento per le acque superficiali potrebbe essere ragionevolmente caratterizzato da valori più bassi di Cl/Br rispetto ai campioni di fiume Chiese raccolti nel presente studio.

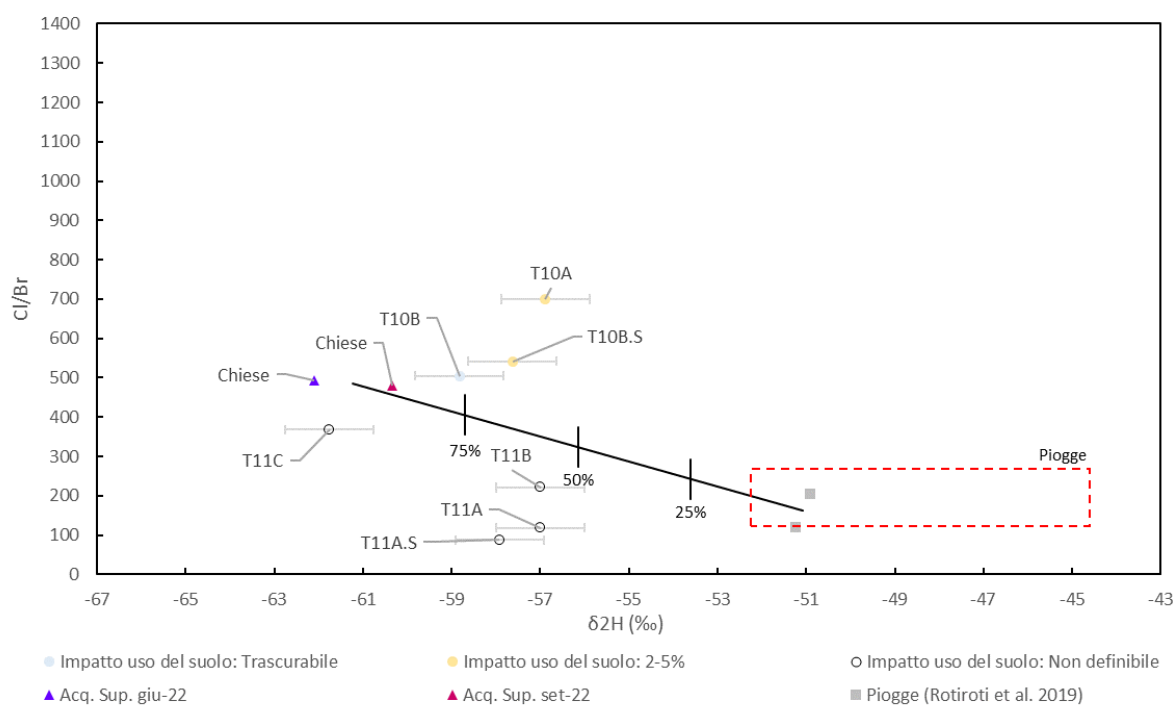


Figura 6.21 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Mella-Chiese. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale

La Figura 6.22 rappresenta lo scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Chiese-Mincio che comprende il transetto T12. Come end-member di acque superficiali è stata utilizzata la media dei campioni del Canale Arnò. Per 2 pozzi (T12C e T12D) è attribuibile una principale ricarica da eccesso irriguo, con percentuale tra il 50% e il

75%, mentre per il pozzo T12A si può considerare una ricarica composita tra eccesso irriguo e piogge locali, con percentuali della prima voce tra il 25% e il 50%. Infine, il pozzo T12B risulta ricaricato principalmente dalle piogge locali, con percentuale di queste >75%. Anche in questa trattazione, così come fatto nei Cap. 6.2.1 e 6.2.2, si segnala il comportamento anomalo del campione di settembre 2022 del pozzo T12C (campione T12C.S).

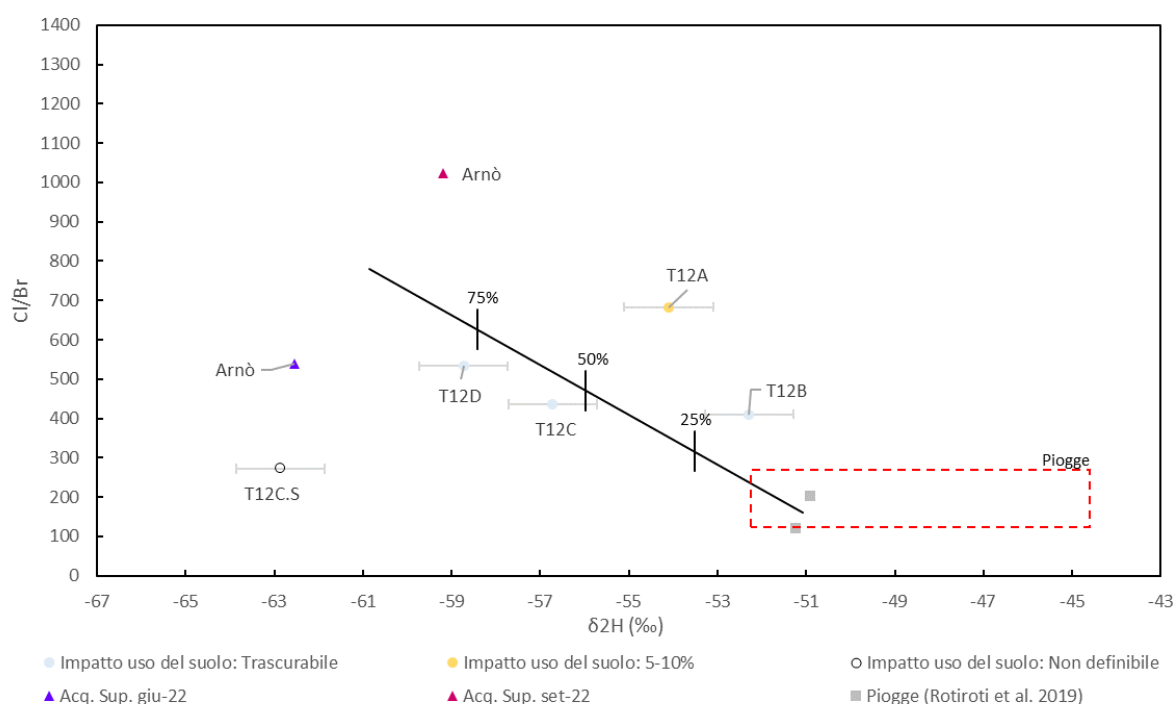


Figura 6.22 Scatterplot $\delta^2\text{H}$ vs Cl/Br per la sotto-area Chiese-Mincio. I campioni di falda sono rappresentati in scala di colore secondo l'impatto da uso del suolo derivato dal Cap. 6.2.2. La retta nera indica il modello di mescolamento tra acque superficiali e piogge locali; le percentuali indicano il contributo delle acque superficiali alla ricarica totale

In sintesi, i dati sul tracciamento delle voci di ricarica indicano come l'eccesso irriguo (relativo alle acque irrigue alimentate da corsi d'acqua superficiali) sia la prima voce di ricarica delle falde (dell'ISS di alta pianura) nelle zone irrigate, che caratterizzano la maggior parte di questa porzione di pianura. Il contributo percentuale della ricarica da eccesso irriguo si attesta, nella quasi totalità dei pozzi ubicati in aree irrigate, tra il 50% e il 75% della ricarica totale. Nelle aree non irrigate, quasi esclusivamente ubicate tra i fiumi Ticino e Adda e a nord del Canale Villoresi, la principale voce di ricarica è costituita dall'infiltrazione delle precipitazioni locali.

6.3 Determinazione dell'età della falda

La stima delle età delle acque sotterranee, o meglio dei tempi medi di residenza, è di difficile quantificazione nella maggior parte delle falde per via dei parametri multipli ed altamente variabili che le governano, quali ad esempio (i) le componenti alla ricarica, (ii) le caratteristiche geologiche, (iii) le geometrie degli acquiferi e (iv) le direzioni di flusso.

A tal fine, è noto come l'utilizzo della distribuzione dei traccianti isotopici in falda possa rappresentare un valido strumento per quantificare l'età. Gli stessi, inoltre, possono fornire informazioni utili sulla miscelazione di acque con tempi di residenza diversi.

Traccianti quali gli isotopi dei gas nobili, dal momento che sono inerti e stabili, sono adatti inoltre a discretizzare le diverse tipologie di sorgente di acqua. Gli isotopi dell'elio (^3He e ^4He) sono stati ampiamente utilizzati per tracciare fonti d'acqua in una diversità di contesti geologici, da acque sotterranee poco profonde (ad esempio, Duckett, et al; 2020), a bacini salmastri (Ma et al., 2009). Questo perché l'elio, così come gli altri gas nobili (Ne, Ar, Kr e Xe), è chimicamente inerte e pertanto la sua firma isotopica, non venendo modificata dall'interazione acqua-roccia, permette di riflettere le fonti fluide originarie in cui si è disciolto.

I gas nobili possiedono caratteristiche uniche che non sono presenti nei classici traccianti usati in idrologia, come ad esempio la stretta dipendenza dalla temperatura delle loro solubilità nelle acque sotterranee. Dovuto proprio a questa caratteristica, i gas nobili di origine atmosferica in ingresso in falda presentano una concentrazione che riflette la temperatura ambiente al momento della ricarica (equilibrio secondo la legge di Henry, Mazor et al., 1972). La loro natura inerte garantisce la conservazione della concentrazione iniziale, che è definita come ASW (Air Saturated Water), consentendo anche ricostruzioni paleoclimatiche, in particolar modo grazie ai gas nobili più pesanti (Ar, Kr, Xe), essendo estremamente sensibili alle variazioni di temperatura (Seltzer et al., 2021).

Al fine della datazione delle acque sotterranee non può non essere citato anche l'isotopo instabile dell'idrogeno nella molecola d'acqua, il trizio (rappresentato dal simbolo T o ^3H), ampiamente utilizzato ai fini della datazione delle acque sotterranee. Ad oggi, tuttavia, i suoi valori, che hanno visto un picco intorno agli anni '60 a seguito

dei test nucleari, sono in graduale diminuzione verso i valori di fondo naturale, al punto da non permettere il suo utilizzo per tali fini in maniera indipendente. Questo limite può essere colmato sfruttando il prodotto del suo decadimento, che è appunto l'elio(III) (Lucas e Unterweger, 2000). Quest'ultimo ha infatti il vantaggio di essere indipendente dalla concentrazione iniziale di trizio, ovvero la sua concentrazione al momento dell'infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo. Se si misura per uno stesso campione la quantità di ^3H e di ^3He prodotto dal decadimento del trizio, il cosiddetto elio triziogenico ($^3\text{He}_{\text{tri}}$), l'età apparente $^3\text{H}/^3\text{He}$ (t) può essere calcolata utilizzando l'Eq (1) di seguito riportata:

$$t = (12.32 / \ln(2)) * \ln(1 + (^3\text{He}_{\text{tri}} / ^3\text{H})) \quad \text{Eq. (1)}$$

dove 12.32 corrisponde al tempo di dimezzamento del trizio.

L'equazione (1) quindi restituisce l'informazione più propriamente definita età apparente del campione, intesa come la risultante dei contributi delle diverse parcelle d'acqua che compongono il campione e che con tutta probabilità avranno concentrazioni di gas disciolti diversi e quindi età intrinseche diverse. Con il concetto di età apparente, dunque, si fa riferimento alla media non nota di tutte le diverse età delle parcelle di acqua che costituiscono un campione (Suckow, 2014). Va da sé che per campioni con maggiori variabilità, come ad esempio un pozzo multi-filtro che rappresenta un'acqua proveniente da diversi acquiferi, ci si aspetti inevitabilmente un maggiore errore associato all'interpretazione.

6.3.1 Il calcolo dell'età apparente

Il metodo della datazione presentata in questo documento si basa sulla misura del ^3H in soluzione e sulla derivazione del suo prodotto figlio, l' $^3\text{He}_{\text{tri}}$. Nella comprensione ed interpretabilità di questi dati, tuttavia, è necessario considerare la dinamica dei gas atmosferici disciolti: finché l'acqua può essere in contatto con l'aria, come ad esempio nel non saturo, il prodotto figlio del decadimento ($^3\text{He}_{\text{tri}}$) può continuamente fuggire dalla fase liquida, degassando verso il comparto atmosferico. Non appena invece una

particella d'acqua viene isolata dallo scambio gassoso con l'atmosfera, ovvero entra nella zona satura, ecco che si verifica la dinamica mostrata in Figura 6.23. Dal momento in cui al decadimento di ^3H è accompagnato un corrispondente aumento di $^3\text{He}_{\text{tri}}$ allora sarà possibile iniziare il conteggio dell'età della particella d'acqua considerata, in quanto il rapporto $^3\text{H}/^3\text{He}_{\text{tri}}$ è funzione unica del tempo trascorso dall'isolamento atmosferico.

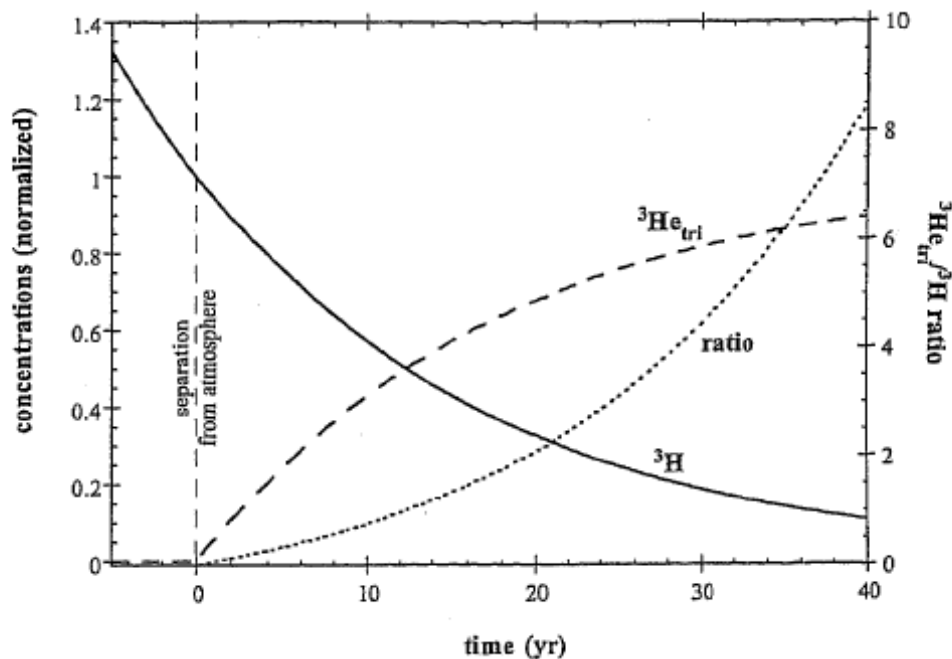


Figura 6.23 Evoluzione temporale delle concentrazioni ^3H e $^3\text{He}_{\text{tri}}$, normalizzate a ^3H ($t = 0$) e il rapporto $^3\text{He}_{\text{tri}}/^3\text{H}$ in una particella d'acqua; da Kipfer et al., 2002

Nelle datazioni effettuate con la tecnica $^3\text{H}/^3\text{He}_{\text{tri}}$, l'aspetto critico è quello di derivare la concentrazione di $^3\text{He}_{\text{tri}}$ a partire dalla concentrazione di elio(III) che si misura nel campione, il cosiddetto elio(III) totale ($^3\text{He}_{\text{tot}}$). Questo perché l' $^3\text{He}_{\text{tri}}$ è solo una parte di tutto l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ presente in un campione d'acqua, così come definito dall'Eq. (2).

Proprio per questo, per stimare l' $^3\text{He}_{\text{tri}}$ è necessario sottrarre all' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ misurato le altre componenti che lo costituiscono. Queste altre componenti di elio(III) sono l' $^3\text{He}_{\text{eq}}$, l' $^3\text{He}_{\text{ea}}$ e l' $^3\text{He}_{\text{rad}}$ (Eq. 2).

$$^3\text{He}_{\text{tri}} = ^3\text{He}_{\text{tot}} - (^3\text{He}_{\text{eq}} + ^3\text{He}_{\text{ea}} + ^3\text{He}_{\text{rad}}) \quad \text{Eq. (2)}$$

Per l' $^3\text{He}_{\text{eq}}$ si intende la porzione di elio disciolto che deriva dall'equilibrio di solubilità con l'atmosfera; la sua concentrazione è funzione della pressione parziale del gas ^3He in atmosfera (legge di Henry). L' $^3\text{He}_{\text{ea}}$ è la porzione di elio che può derivare da una concentrazione di gas in eccesso rispetto alla concentrazione di equilibrio di solubilità con l'atmosfera. Questa componente, nota come "componente d'aria in eccesso", è generata da bolle d'aria che si possono formare per cause idrodinamiche in ingresso alla zona satura oppure a seguito di contaminazione del campione (Heaton e Vogel, 1981). Infatti, durante il campionamento è possibile che, pur prestando la massima attenzione, alcune bolle di aria rimangano intrappolate nell'aliquota prelevata. Infine, l' $^3\text{He}_{\text{rad}}$ (o anche talvolta riportato come $^3\text{He}_{\text{terr}}$) è l'elio radiogenico prodotto dal decadimento di U e Th nella crosta terrestre-ed è calcolato per differenza: $^3\text{He}_{\text{rad}} = ^3\text{He}_{\text{tot}} - (^3\text{He}_{\text{eq}} + ^3\text{He}_{\text{ea}} + ^3\text{He}_{\text{tri}})$. Quanto appena descritto, è valido anche per l' ^4He , per il quale non esiste alcuna componente triziogenica, come per i gas nobili stabili più abbondanti le cui componenti sono solo di natura atmosferica (Figura 6.24).

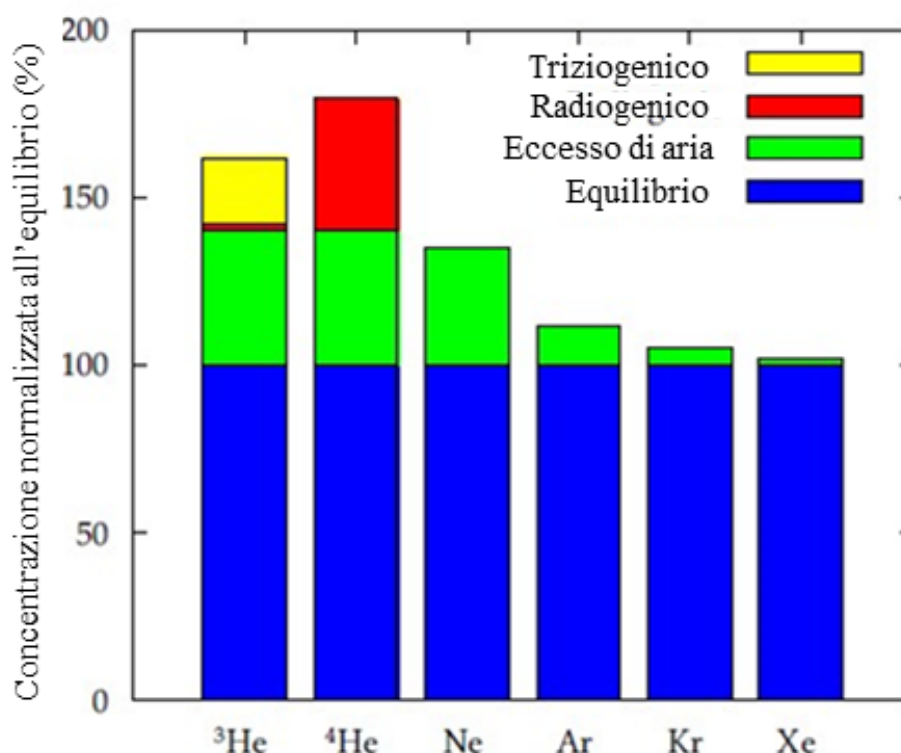


Figura 6.24 Le componenti dei gas nobili in soluzione in acqua di falda, espresse in percentuale rispetto la composizione all'equilibrio. Modificato da Kipfer et al., 2002

Relativamente all'Eq. (2), utile è la possibilità di descrivere le variabili che la caratterizzano come funzione dell'isotopo più abbondante dell'elio, l' ^4He , assieme al neon (^{20}Ne). Quest'ultimo, oltre ad essere molto stabile viene utilizzato in quanto è accertato che l'unica sua origine sia quella derivante dalla produzione in atmosfera (Figura 6.24). Questo approccio, basato sull'isotopo dell'He più abbondante in atmosfera (^4He) e sulla maggiore stabilità del ^{20}Ne rispetto all' ^3He , permette una maggiore accuratezza nella derivazione dell' $^3\text{He}_{\text{tri}}$.

Difatti, l' $^3\text{He}_{\text{tri}}$ che deriva dal decadimento del trizio può essere definito secondo diversi metodi disponibili in letteratura, riportando in questo paragrafo quello di Schlosser et al., 1989 secondo la seguente equazione (Eq. 3):

$$^3\text{He}_{\text{tri}} = ^4\text{He}_{\text{tot}} \cdot (R_{\text{tot}} - R_{\text{terr}}) - ^4\text{He}_{\text{eq}} \cdot (R_{\text{eq}} - R_{\text{terr}}) - \left(\frac{^4\text{He}}{^{20}\text{Ne}} \right)_{\text{ea}} \cdot (^{20}\text{Ne}_{\text{tot}} - ^{20}\text{Ne}_{\text{eq}}) \cdot (R_{\text{ea}} - R_{\text{terr}}) \quad \text{Eq. (3)}$$

dove le componenti di $^4\text{He}_{\text{tot}}$ e di $^{20}\text{Ne}_{\text{tot}}$ sono variabili misurate nel campione, mentre $^4\text{He}_{\text{eq}}$ e $^{20}\text{Ne}_{\text{eq}}$, descritte successivamente in questo paragrafo, vengono derivate secondo Smith and Kennedy (1983). Con R invece si fa riferimento al rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$, quindi ad esempio, con R_{tot} si intende il rapporto tra ^3He e ^4He misurati. Altre variabili dell'Eq. (3) vengono invece assunte come note e definite come segue:

- R_{ea} è il rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ per la componente “eccesso di aria” e si assume che sia uguale al rapporto atmosferico $R_{\text{ea}} = R_{\text{atm}} = 1.386 \cdot 10^{-6}$ (Lupton, 1983);
- R_{terr} (o R_{rad}) corrisponde al rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ dalla produzione crostale di ^3He e ^4He integrato nel tempo, con valori solitamente nel range di $0.02 - 0.03 \cdot R_{\text{a}}$ (Andrews e Lee, 1979);
- R_{eq} è il rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ in condizioni ASW (Air Saturated Water) ed è uguale a $\alpha \cdot R_{\text{atm}}$ ($1.36 \cdot 10^{-6}$), dove per α consideriamo il fattore di frazionamento di 0.983 (Benson e Krause, 1980);
- il rapporto $(^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{ea}}$ per la componente “eccesso di aria” viene ipotizzato sia uguale al rapporto atmosferico e pari a 0.3185 (Ozima & Podosek, 1983).

Nella derivazione dell' $^3\text{He}_{\text{tri}}$, inoltre, le variabili dei gas nobili (^3He , ^4He) presentate in Eq. (3) devono essere corrette da eventuali processi che possono fare variare le loro

concentrazioni effettive nel campione. Si tratta di processi di natura fisica come (i) la diminuzione della pressione atmosferica in funzione della quota di campionamento, (ii) l'eccesso di aria (Q) e/o (iii) il degassamento (VGWV) rispetto alle concentrazioni atmosferiche che eventualmente possono interessare il campione.

Per tali motivi l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ come anche l' $^4\text{He}_{\text{tot}}$ devono essere corretti in funzione dell'altitudine del punto di campionamento (altitude corrected, ac), correzione più propriamente definita in termini di diminuzione della pressione atmosferica per metro di altezza, secondo l'Eq. (4):

$$^4\text{He}_{\text{tot (ac)}} = ^4\text{He}_{\text{tot}} * (1 + (0.000149 * h)) \quad \text{Eq. (4)}$$

dove h sta per la quota del punto di monitoraggio (m s.l.m.), mentre 0.000149 è il gradiente barico verticale (h/Pa).

Si ricorda che in Eq. (4) viene riportato l'esempio per $^4\text{He}_{\text{tot}}$ ma questo passaggio, come anche i successivi, sono necessari anche per l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$.

Una volta corretti sia l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ che l' $^4\text{He}_{\text{tot}}$ in funzione dell'altitudine, sarà necessario considerare l' $^3\text{He}_{\text{tot (ac)}}$ e $^4\text{He}_{\text{tot (ac)}}$, per derivare l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ e l' $^4\text{He}_{\text{tot}}$ definitivo (final, f), cioè epurando la concentrazione di elio totale misurata da eventuali processi di eccesso di aria (Q) e/o degassamento (VGWV). L'equazione che descrive questo passaggio è definita come segue:

$$^4\text{He}_{\text{tot (f)}} = ^4\text{He}_{\text{tot (ac)}} - ((Q/1000) * (X_{\text{He}})) + ((VGWV/1000) * (X_{\text{He}})) \quad \text{Eq. (5)}$$

dove, X_{He} rappresenta la frazione molare di He in atmosfera, pari a $5.24 * 10^{-6}$ e il membro dell'equazione $((Q/1000) * (X_{\text{He}}))$ equivale di fatto all' $^4\text{He}_{\text{ea}}$.

Nell'Eq. (5) compaiono due variabili non note, Q e VGWV, che fanno riferimento rispettivamente all'eccesso di aria (Q) ed al degassamento (VGWV) come precedentemente anticipato. Le particelle di aria (quindi di natura atmosferica), possono dissolversi in acqua durante la ricarica provocando un aumento della concentrazione totale di gas nobili, o piuttosto possono fuggire la fase in soluzione tramite degassamento. Il processo definito "eccesso d'aria", Q, è spesso il risultato di variazioni del livello della falda freatica nella zona insatura dell'acquifero, o ancora il risultato di una contaminazione del campione durante le attività di campo, rappresentando ancora materiale di ricerca tra gli esperti del settore (Heaton e Vogel,

1981). Similmente, sempre variazioni di livello della tavola d'acqua o contaminazioni del campione prelevato in campo, possono essere al contrario cause di degassamento, VGVW, comportando una diminuzione della concentrazione di gas disciolti in soluzione.

La determinazione di queste due variabili è possibile tramite l'analisi delle concentrazioni elementari di altri gas nobili quali Ne, Ar, Kr, Ne e il rapporto isotopico $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, unite ai parametri sito specifici misurati in campo come TDS, quota di campionamento e temperatura dell'acqua. Per tali fini è stato utilizzato il programma PaleoTemp_2.0, scritto in Mathematica ed usufruibile tramite macro Excel (Pinti & Van Drom, 2004; Figura 6.25). Il programma utilizza le equazioni di solubilità di Smith e Kennedy (1983), basate sul database di solubilità IUPAC (1979) tenendo conto dell'effetto degli elementi ionici Na^+ e Cl^- sulla solubilità del gas nobile ed applicando il modello UA (Unfractionated Air; Stute e Schlosser, 1993) attraverso una regressione inversa non lineare (Ballentine e Hall, 1999).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	NaCl (g/l)	0.5		0.01						
3	Altitude (m)	65.59								
4	Water sampling temperature (°C)	15.5								
5		Concentration	1σ		Uncorrected	Corrected	1σ			
6	Ne (cm ³ •STP/cc _{H2O})	3.37E-07	6.74E-09		-23.4	32.7	3.8			
7	Ar (cm ³ •STP/cc _{H2O})	2.87E-04	5.75E-06		25.4	53.1	5.9			
8	Kr (cm ³ •STP/cc _{H2O})	6.21E-08	1.24E-09		25.8	35.1	3.3			
9	Xe (cm ³ •STP/cc _{H2O})	1.00E-08	2.01E-10		18.8	21.5	1.9			
10	Ar40/Ar36	296.0	1.5							
11					PaleoTemp					
12	Paleotemperature (°C)	27.9	1.5							
13	Q (cm ³ •STP/l _{H2O}) (excess air)	8.9								
14	VGVW (cm ³ /l _{H2O}) (degassed)	0								
15										
16										
17										

Figura 6.25 Schermata della macro Excel di PaleoTemp_2.0 (Pinti & Van Drom, 2004), che mostra i parametri d'ingresso per il calcolo di Q e V (Tabella 6.3; Tabella 6.4)

Tutti questi passaggi relativi alla separazione delle componenti atmosferiche per il calcolo dell'He totale definitivo ($^3\text{He}_{\text{tot (f)}}$ e $^4\text{He}_{\text{tot (f)}}$) sono indispensabili per ottenere concentrazioni che possono essere utilizzate per il calcolo dell'età dell'acqua e, più generale, anche per la stima delle temperature di ricarica o altre condizioni, come ad esempio fenomeni di mixing riconducibili al momento della ricarica.

A questo punto dell'elaborazione, le variabili che ancora rappresentano delle incognite nell'Eq. (3) sono le componenti all'equilibrio di solubilità di He e Ne, nello specifico $^4\text{He}_{\text{eq}}$ e $^{20}\text{Ne}_{\text{eq}}$. Queste componenti possono essere ricavate conoscendo i valori di solubilità dei singoli gas nobili alle condizioni di temperatura e salinità specifiche per il punto monitorato. La solubilità di un gas in soluzione può variare infatti in funzione della presenza e concentrazione di elettroliti disciolti nell'acqua (Long and McDevit, 1952; Clever and Olanda, 1968). Per i fini esplicitati in questo paragrafo, proprio a partire dai dati di salinità e temperatura misurati nelle acque di falda al momento del campionamento (Cap. 5) è stato possibile ricavare le solubilità dei gas di interesse seguendo la teoria descritta sopra e servendoci dell'interfaccia Excel di un programma scritto in Mathematica, denominato Solubility (Pinti, 1995; Figura 6.26).

SOLUBILITY 4.7 : a program to calculate solubility data of noble gases and other species in crustal fluids[®]
by Daniele L. Pinti, www.geotop.ca

Gas species	Temperature water (°C)	Salinity water (g/L)
Helium (He)	13.9	0.5
Neon (Ne)	13.9	0.5
Argon (Ar)	13.9	0.5
Krypton (Kr)	13.9	0.5
Xenon (Xe)	13.9	0.5

Insert value only in the first row; the others will be automatically filled
If you wish to calculate solubility data for different temperature and salinities, modify consequently each row

Figura 6.26 Schermata dei dati di input della macro Excel di Solubility (Pinti, 1995) utilizzata per ricavare le componenti all'equilibrio dei gas nobili d'interesse (composizioni elementari ed isotopiche)

A questo punto della trattazione, tutte le variabili che descrivono l'Eq. (3) sono state derivate, permettendo il calcolo dell' $^3\text{He}_{\text{tri}}$ espresso come $\text{cm}^3\text{STP}/\text{H}_2\text{O}$ che dovrà essere convertito in unità trizio (U.T.; $\text{cm}^3\text{STP g}^{-1} = 4.019 \cdot 10^{14}$ U.T.) per renderlo utilizzabile per la stima dell'età apparente così come definita dall'equazione dall'Eq (1).

Non per minore importanza, come step finale del trattamento dei dati chimici ed isotopici riportati in questa sezione, è necessario ricavare tutte le componenti che definiscono sia l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ che l' $^4\text{He}_{\text{tot}}$ che, anche se non direttamente utili per il calcolo dell'età (Eq. (1)), sono determinanti per la comprensione di eventuali processi di mixing che caratterizzano il campione in esame (vedi Cap. 6.3.3). La Tabella 6.3 e la Tabella 6.4 riportano i risultati delle componenti di elio in soluzione calcolate (He_{eq} , He_{ea} , He_{rad}) mentre la Tabella 5.2 presenta il contenuto di trizio misurato (^3H in U.T., corretto dell'intervallo di tempo tra le analisi di $^3\text{He}_{\text{tri}}$ e ^3H), necessarie per il calcolo delle età apparenti $^3\text{H}/^3\text{He}$.

Per coerenza di trattazione è necessario sottolineare come volendo esplicitare l'Eq. (2), utilizzata a scopo descrittivo e non per la diretta derivazione dell' $^3\text{He}_{\text{tri}}$, bisogna fare attenzione a non correggere i dati di He secondo la variabile Q più di una volta: se la componente di eccesso d'aria viene di fatto espressa dall' $^3\text{He}_{\text{ea}}$, allora l' $^3\text{He}_{\text{tot}}$ deve essere corretto solamente per eventuali processi di degassaggio VGVW, quindi $^3\text{He}_{\text{tot}} (f_{\text{nea}}) = ^3\text{He}_{\text{tot(ac)}} - (\text{VGVW}/1000) * (X_{\text{He}})$.

In conclusione di questo paragrafo, che riporta la descrizione degli step fondamentali per la stima dell'età apparente per le acque di falda, è necessario specificare che al dato di età apparente debba essere associato, come comprensibile, un valore di incertezza, come indicato in Tabella 6.4; il valore di incertezza è stato calcolato come errore propagato, tenendo conto di tutte le incertezze analitiche per ogni variabile riportata in Eq. (3). Inoltre, è importante tenere presente che l'errore associato nella derivazione dell' $^3\text{He}_{\text{tri}}$, e quindi quello associato all'età apparente, deve ritenersi sempre come sottostimato quando si vuole definire il modello concettuale di distribuzione delle età apparenti: bisogna sempre considerare che i valori ricavati fanno riferimento ad una miscela di particelle di acqua con origine differente, ciascuna caratterizzata da una specifica quantità e composizione di gas disciolti. Nel nostro caso, come precedentemente menzionato, è possibile osservare dalle sezioni idrogeologiche presentate nel paragrafo 6.1 (e nell'Allegato III) come sia stata determinante la selezione dei punti di monitoraggio ai fini di questa indagine isotopica, andando a valutare i dati costruttivi di ogni singolo pozzo. Nella selezione effettuata, pur avendo favorito quanto possibile i pozzi mono-filtro, spesso sono stati comunque

considerati pozzi filtranti porzioni variabili dell'ISS, a volte localizzabili nella zona di transizione con l'ISI. In questo contesto, si fa riferimento anche all'informazione isotopica ereditata dai 20 punti monitorati da UNIPV (Figura 5.1), dove i pozzi non sempre hanno risposto ai criteri ottimali per la datazione tramite questo medesimo approccio (Tabella 5.1).

6.3.2 Descrizione dei risultati delle età stimate

Su un set di dati derivante da 64 campioni (44 pozzi campionati nel marzo del 2022 e 20 campionati nel marzo 2018 da UniPV), il dato di età apparente è stato ottenuto per 57 punti di monitoraggio (Tabella 6.3; Tabella 6.4; Figura 6.27). Per 7 campioni (4 campioni della rete sperimentale e 3 campioni della rete UniPV) non è stato possibile stimare il dato di età a causa, molto probabilmente, di una sovrastima del contenuto di trizio al momento della procedura analitica o, in alternativa, a problemi nella fase di prelievo o conservazione del campione. Questi 7 campioni sono quelli raccolti nei pozzi T1B, T2H, T4B, T6D, T6E, T9A e T9C (Tabella 6.3; Tabella 6.4).

Le falde campionate per l'alta e la media pianura lombarda risultano avere un'età apparente media di 37 ± 9 anni (mediana di 35 anni) con una distribuzione che segue un andamento simile ad una curva normale (Figura 6.27). Il valore massimo di età stimato è di 94 ± 8 anni (T2C) mentre il valore minimo è registrato per il pozzo T4E con 9 ± 3 anni (Tabella 6.4). In generale, età apparenti inferiori o uguali ai 20 anni, sono state riscontrate solo per 4 campioni sui 57 analizzati (7%), mentre nel restante 93% dei casi le età stimate variano dai 20 ai 94 anni (Tabella 6.4; Figura 6.27).

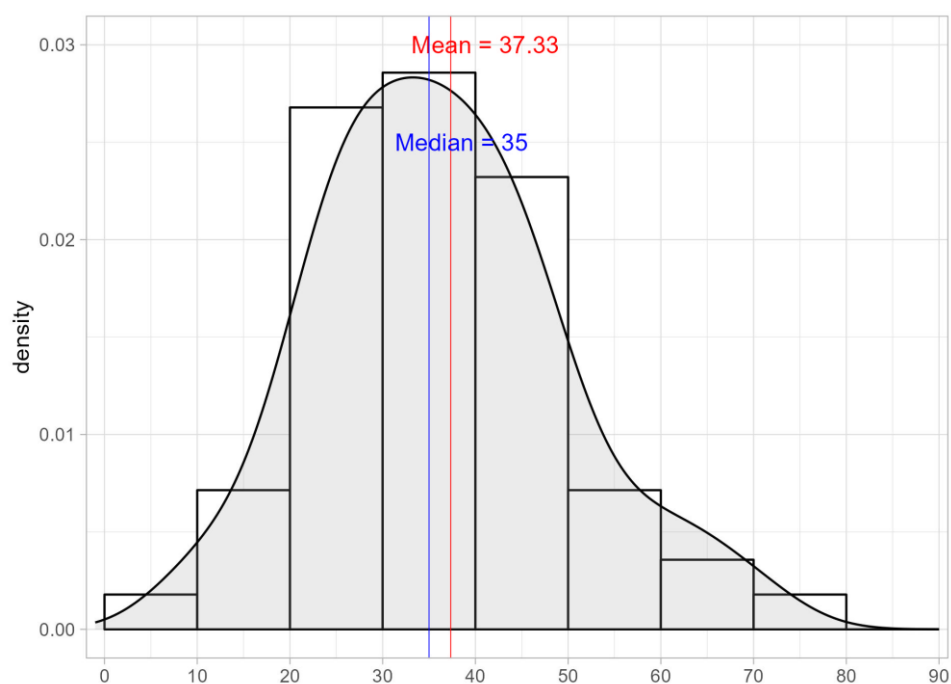


Figura 6.27 Curva di distribuzione per le età apparenti stimante in 57 campioni della rete di monitoraggio

Tabella 6.3 Presentazione dei dati di Q e VGWW e dei dati isotopici derivati per l'³He

#	ID	Q	VGWW	³ He _{tot} (ac)	±	³ He _{tot} (f)	±	³ He _{eq}	³ He _{ea}	±	³ He _{tri}	³ He _{rad}	³ He _{tri}
		(cm ³ *STP/lH ₂ O)	(cm ³ /lH ₂ O)	(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)			(cm ³ STP/g)	(cm ³ STP/g)	U.T.
1	T1A	5.4	-	1.52E-13	4.55E-15	1.52E-13	4.55E-15	6.51E-14	3.92E-14	7.83E-16	4.76E-14	-2.53E-16	19.15
2	T1B	11.7	-	1.41E-13	4.22E-15	1.41E-13	4.22E-15	6.51E-14	8.49E-14	1.70E-15	-7.54E-15	-1.85E-15	-3.03
3	T1C	5.9	-	1.47E-13	4.40E-15	1.47E-13	4.40E-15	6.45E-14	4.28E-14	8.56E-16	4.07E-14	-1.13E-15	16.35
4	T1D	5.8	-	2.54E-13	7.62E-15	2.54E-13	7.62E-15	6.49E-14	4.21E-14	8.41E-16	1.48E-13	-1.45E-15	59.65
5	T2A	1.1	-	1.39E-13	4.18E-15	1.39E-13	4.18E-15	6.51E-14	7.98E-15	1.60E-16	6.70E-14	-7.25E-16	26.92
6	T2B	3.9	-	2.96E-13	8.87E-15	2.96E-13	8.87E-15	6.51E-14	2.83E-14	5.66E-16	2.03E-13	-7.21E-16	81.59
7	T2C	62.3	-	1.37E-12	4.10E-14	1.37E-12	4.10E-14	6.54E-14	4.52E-13	9.04E-15	8.38E-13	1.22E-14	336.86
8	T2D	23.2	-	4.44E-13	1.33E-14	4.44E-13	1.33E-14	6.52E-14	1.68E-13	3.37E-15	2.09E-13	1.45E-15	83.97
9	T2G	3.6	-	1.93E-13	5.79E-15	1.93E-13	5.79E-15	6.49E-14	2.61E-14	5.22E-16	1.03E-13	-1.14E-15	41.49
10	T3A	4.2	-	1.68E-13	5.03E-15	1.68E-13	5.03E-15	6.52E-14	3.05E-14	6.09E-16	7.32E-14	-1.19E-15	29.42
11	T3B	8.3	-	1.92E-13	5.76E-15	1.92E-13	5.76E-15	6.51E-14	6.02E-14	1.20E-15	6.73E-14	-6.64E-16	27.03
12	T3C	9.9	-	1.98E-13	5.95E-15	1.98E-13	5.95E-15	6.50E-14	7.18E-14	1.44E-15	6.27E-14	-1.08E-15	25.20
13	T3D	8.1	-	2.05E-13	6.15E-15	2.05E-13	6.15E-15	6.50E-14	5.87E-14	1.17E-15	8.23E-14	-9.99E-16	33.08
14	T3E	6.2	-	1.60E-13	4.80E-15	1.60E-13	4.80E-15	6.48E-14	4.50E-14	8.99E-16	5.13E-14	-1.10E-15	20.62
15	T3F	6.6	-	1.25E-13	3.75E-15	1.25E-13	3.75E-15	6.47E-14	4.79E-14	9.57E-16	1.40E-14	-1.59E-15	5.63
16	T4A	2.8	-	1.20E-13	3.60E-15	1.20E-13	3.60E-15	6.50E-14	2.03E-14	4.06E-16	3.55E-14	-7.46E-16	14.25
17	T4D	5.1	-	1.30E-13	3.90E-15	1.30E-13	3.90E-15	6.43E-14	3.70E-14	7.40E-16	2.98E-14	-1.03E-15	11.97
18	T4G	3.1	-	1.11E-13	3.33E-15	1.11E-13	3.33E-15	6.44E-14	2.25E-14	4.50E-16	2.52E-14	-1.14E-15	10.11
19	T4H	10.9	-	1.62E-13	4.87E-15	1.62E-13	4.87E-15	6.45E-14	7.90E-14	1.58E-15	2.01E-14	-1.39E-15	8.08
20	T5A	3.9	-	1.07E-13	3.20E-15	1.07E-13	3.20E-15	6.51E-14	2.83E-14	5.66E-16	1.46E-14	-1.17E-15	5.86
21	T5D	4.6	-	1.25E-13	3.76E-15	1.25E-13	3.76E-15	6.47E-14	3.34E-14	6.67E-16	2.83E-14	-1.04E-15	11.36
22	T5E	6.6	-	1.46E-13	4.37E-15	1.46E-13	4.37E-15	6.50E-14	4.79E-14	9.57E-16	3.41E-14	-1.27E-15	13.72
23	T5G	4.0	-	1.56E-13	4.67E-15	1.56E-13	4.67E-15	6.48E-14	2.90E-14	5.80E-16	6.24E-14	-4.51E-16	25.08
24	T6A	4.7	-	1.68E-13	5.03E-15	1.68E-13	5.03E-15	6.48E-14	3.41E-14	6.82E-16	7.03E-14	-1.42E-15	28.27
25	T6C	3.9	-	1.17E-13	3.52E-15	1.17E-13	3.52E-15	6.57E-14	2.83E-14	5.66E-16	2.50E-14	-1.49E-15	10.05
26	T6D	2.4	-	8.06E-14	2.42E-15	8.06E-14	2.42E-15	6.47E-14	1.74E-14	3.48E-16	1.11E-16	-1.62E-15	0.04

#	ID	Q	VGWV	$^3\text{He}_{\text{tot (ac)}}$	$\pm$	$^3\text{He}_{\text{tot (f)}}$	$\pm$	$^3\text{He}_{\text{eq}}$	$^3\text{He}_{\text{ea}}$	$\pm$	$^3\text{He}_{\text{tri}}$	$^3\text{He}_{\text{rad}}$	$^3\text{He}_{\text{tri}}$
		(cm ³ *STP//H ₂ O)	(cm ³ //H ₂ O)	(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)	(cm ³ STP/g)	(cm ³ STP/g)			(cm ³ STP/g)	(cm ³ STP/g)	U.T.
27	T6E	4.6	-	9.55E-14	2.86E-15	9.55E-14	2.86E-15	6.47E-14	3.34E-14	6.67E-16	-8.32E-16	-1.80E-15	-0.33
28	T6G	-	1.1	1.14E-13	3.42E-15	1.22E-13	3.66E-15	6.49E-14	0.00E+00	0.00E+00	5.82E-14	-1.14E-15	23.39
29	T6I	-	3.5	6.47E-14	1.94E-15	9.00E-14	2.70E-15	6.46E-14	0.00E+00	0.00E+00	2.65E-14	-1.12E-15	10.63
30	T7C	-	0.4	8.32E-14	2.50E-15	8.58E-14	2.57E-15	6.46E-14	0.00E+00	0.00E+00	2.27E-14	-1.42E-15	9.11
31	T8C	2.2	-	9.53E-14	2.86E-15	9.53E-14	2.86E-15	6.46E-14	1.60E-14	3.20E-16	1.62E-14	-1.55E-15	6.50
32	T9A	6.5	-	1.02E-13	3.06E-15	1.02E-13	3.06E-15	6.48E-14	4.71E-14	9.43E-16	-8.07E-15	-1.75E-15	-3.24
33	T9B	0.3	-	1.10E-13	3.29E-15	1.10E-13	3.29E-15	6.47E-14	2.18E-15	4.35E-17	4.42E-14	-1.35E-15	17.75
34	T9D	-	0.5	1.06E-13	3.18E-15	1.10E-13	3.29E-15	6.47E-14	0.00E+00	0.00E+00	4.64E-14	-1.57E-15	18.66
35	T9F	-	-	6.85E-14	2.06E-15	6.85E-14	2.06E-15	6.44E-14	0.00E+00	0.00E+00	5.53E-15	-1.46E-15	2.22
36	T10A	6.1	-	1.56E-13	4.67E-15	1.56E-13	4.67E-15	6.47E-14	4.42E-14	8.85E-16	4.75E-14	-8.25E-16	19.07
37	T10B	4.0	-	1.27E-13	3.81E-15	1.27E-13	3.81E-15	6.47E-14	2.90E-14	5.80E-16	3.46E-14	-1.18E-15	13.89
38	T11A	3.8	-	1.01E-13	3.04E-15	1.01E-13	3.04E-15	6.47E-14	2.76E-14	5.51E-16	1.05E-14	-1.51E-15	4.24
39	T11B	0.8	-	8.99E-14	2.70E-15	8.99E-14	2.70E-15	6.46E-14	5.80E-15	1.16E-16	2.09E-14	-1.35E-15	8.38
40	T11C	7.9	-	2.34E-13	7.01E-15	2.34E-13	7.01E-15	6.46E-14	5.73E-14	1.15E-15	1.13E-13	-9.61E-16	45.23
41	T12A	6.3	-	1.54E-13	4.61E-15	1.54E-13	4.61E-15	6.44E-14	4.54E-14	9.09E-16	4.44E-14	-6.77E-16	17.85
42	T12B	1.1	-	9.86E-14	2.96E-15	9.86E-14	2.96E-15	6.45E-14	7.98E-15	1.60E-16	2.75E-14	-1.34E-15	11.03
43	T12C	-	1.1	1.08E-13	3.24E-15	1.16E-13	3.48E-15	6.47E-14	0.00E+00	0.00E+00	5.19E-14	-6.96E-16	20.86
44	T12D	-	1.7	1.33E-13	4.00E-15	1.45E-13	4.36E-15	6.47E-14	0.00E+00	0.00E+00	8.15E-14	-7.12E-16	32.76

Tabella 6.4 Presentazione dei dati isotopici derivati per ^4He e ^{20}Ne compresi i dati di età apparente

#	ID	$^4\text{He}_{\text{tot (ac)}}$ (cm ³ STP/g)	±	$^4\text{He}_{\text{tot (f)}}$ (cm ³ STP/g)	±	$^4\text{He}_{\text{eq}}$ (cm ³ STP/g)	±	$^4\text{He}_{\text{ea}}$ (cm ³ STP/g)	±	$^4\text{He}_{\text{rad}}$ (cm ³ STP/g)	$^{20}\text{Ne}_{\text{eq}}$ (cm ³ STP/g)	±	Età apparente anni	±
1	T1A	1.25E-07	2.50E-09	1.25E-07	2.50E-09	4.66E-08	9.32E-10	2.83E-08	9.60E-10	1.50E-08	1.82E-07	3.64E-09	54	14
2	T1B	1.02E-07	2.05E-09	1.02E-07	2.05E-09	4.66E-08	9.33E-10	6.13E-08	9.26E-10	-7.01E-08	1.82E-07	3.65E-09	n.d.	-
3	T1C	9.48E-08	1.90E-09	9.48E-08	1.90E-09	4.62E-08	9.24E-10	3.09E-08	9.21E-10	-1.57E-08	1.78E-07	3.56E-09	33	4
4	T1D	7.98E-08	1.60E-09	7.98E-08	1.60E-09	4.65E-08	9.30E-10	3.04E-08	9.45E-10	-2.96E-08	1.81E-07	3.61E-09	51	4
5	T2A	8.31E-08	1.66E-09	8.31E-08	1.66E-09	4.67E-08	9.33E-10	5.76E-09	9.37E-10	2.04E-08	1.82E-07	3.64E-09	39	4
6	T2B	9.54E-08	1.91E-09	9.54E-08	1.91E-09	4.67E-08	9.33E-10	2.04E-08	9.74E-10	1.48E-09	1.82E-07	3.65E-09	71	9
7	T2C	8.53E-07	1.71E-08	8.53E-07	1.71E-08	4.69E-08	9.38E-10	3.26E-07	9.10E-10	1.22E-07	1.85E-07	3.69E-09	94	8
8	T2D	2.73E-07	5.46E-09	2.73E-07	5.46E-09	4.67E-08	9.35E-10	1.22E-07	9.38E-10	-2.63E-08	1.83E-07	3.65E-09	66	7
9	T2G	8.29E-08	1.66E-09	8.29E-08	1.66E-09	4.65E-08	9.30E-10	1.89E-08	9.57E-10	-4.98E-09	1.81E-07	3.62E-09	58	8
10	T3A	8.46E-08	1.69E-09	8.46E-08	1.69E-09	4.67E-08	9.33E-10	2.20E-08	9.41E-10	-1.01E-08	1.83E-07	3.65E-09	39	3
11	T3B	1.25E-07	2.50E-09	1.25E-07	2.50E-09	4.66E-08	9.32E-10	4.35E-08	9.31E-10	-1.26E-08	1.82E-07	3.64E-09	38	3
12	T3C	1.18E-07	2.36E-09	1.18E-07	2.36E-09	4.65E-08	9.31E-10	5.19E-08	9.53E-10	6.68E-08	1.81E-07	3.62E-09	40	4
13	T3D	1.11E-07	2.22E-09	1.11E-07	2.22E-09	4.65E-08	9.31E-10	4.24E-08	9.09E-10	6.30E-08	1.81E-07	3.62E-09	46	5
14	T3E	9.79E-08	1.96E-09	9.79E-08	1.96E-09	4.64E-08	9.28E-10	3.25E-08	9.31E-10	-1.60E-08	1.80E-07	3.60E-09	34	3
15	T3F	8.28E-08	1.66E-09	8.28E-08	1.66E-09	4.63E-08	9.26E-10	3.46E-08	9.15E-10	3.54E-08	1.79E-07	3.58E-09	16	2
16	T4A	9.38E-08	1.88E-09	9.38E-08	1.88E-09	4.65E-08	9.31E-10	1.47E-08	9.28E-10	1.47E-08	1.81E-07	3.63E-09	60	27
17	T4D	9.32E-08	1.86E-09	9.32E-08	1.86E-09	4.61E-08	9.22E-10	2.67E-08	9.13E-10	-7.76E-09	1.76E-07	3.52E-09	23	2
18	T4G	7.90E-08	1.58E-09	7.90E-08	1.58E-09	4.62E-08	9.23E-10	1.62E-08	9.43E-10	-1.97E-09	1.77E-07	3.54E-09	26	4
19	T4H	1.11E-07	2.23E-09	1.11E-07	2.23E-09	4.62E-08	9.25E-10	5.71E-08	9.44E-10	-5.17E-08	1.78E-07	3.56E-09	24	4
20	T5A	8.41E-08	1.68E-09	8.41E-08	1.68E-09	4.66E-08	9.33E-10	2.04E-08	9.30E-10	-6.37E-09	1.82E-07	3.64E-09	19	3
21	T5D	9.21E-08	1.84E-09	9.21E-08	1.84E-09	4.64E-08	9.27E-10	2.41E-08	9.35E-10	-4.78E-09	1.79E-07	3.59E-09	27	4
22	T5E	9.51E-08	1.90E-09	9.51E-08	1.90E-09	4.66E-08	9.32E-10	3.46E-08	9.18E-10	-2.19E-08	1.82E-07	3.64E-09	27	3
23	T5G	1.10E-07	2.19E-09	1.10E-07	2.19E-09	4.64E-08	9.28E-10	2.10E-08	9.71E-10	5.94E-08	1.80E-07	3.60E-09	43	5
24	T6A	7.80E-08	1.56E-09	7.80E-08	1.56E-09	4.64E-08	9.28E-10	2.46E-08	9.13E-10	-1.95E-08	1.80E-07	3.60E-09	45	5
25	T6C	7.60E-08	1.52E-09	7.60E-08	1.52E-09	4.70E-08	9.40E-10	2.04E-08	9.41E-10	-1.38E-08	1.86E-07	3.73E-09	30	5

#	ID	$^4\text{He}_{\text{tot}}$ (ac)	±	$^4\text{He}_{\text{tot}}$ (f)	±	$^4\text{He}_{\text{eq}}$	±	$^4\text{He}_{\text{ea}}$	±	$^4\text{He}_{\text{rad}}$	$^{20}\text{Ne}_{\text{eq}}$	±	Età apparente	±
		(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)		(cm ³ STP/g)	(cm ³ STP/g)		anni	
26	T6D	6.04E-08	1.21E-09	6.04E-08	1.21E-09	4.64E-08	9.27E-10	1.26E-08	9.38E-10	1.22E-08	1.80E-07	3.59E-09	n.d.	-
27	T6E	6.55E-08	1.31E-09	6.55E-08	1.31E-09	4.64E-08	9.28E-10	2.41E-08	9.27E-10	-3.05E-08	1.80E-07	3.59E-09	n.d.	-
28	T6G	5.93E-08	1.19E-09	6.51E-08	1.30E-09	4.65E-08	9.29E-10	0.00E+00	9.47E-10	1.28E-08	1.81E-07	3.62E-09	45	6
29	T6I	4.78E-08	9.57E-10	6.61E-08	1.32E-09	4.63E-08	9.26E-10	0.00E+00	9.53E-10	7.49E-09	1.79E-07	3.57E-09	30	4
30	T7C	5.13E-08	1.03E-09	5.32E-08	1.06E-09	4.63E-08	9.25E-10	0.00E+00	9.11E-10	1.12E-08	1.78E-07	3.56E-09	27	4
31	T8C	6.03E-08	1.21E-09	6.03E-08	1.21E-09	4.63E-08	9.27E-10	1.16E-08	9.16E-10	-9.56E-09	1.79E-07	3.58E-09	25	5
32	T9A	7.75E-08	1.55E-09	7.75E-08	1.55E-09	4.64E-08	9.28E-10	3.41E-08	9.29E-10	-3.90E-08	1.80E-07	3.60E-09	n.d.	-
33	T9B	5.78E-08	1.16E-09	5.78E-08	1.16E-09	4.63E-08	9.27E-10	1.57E-09	9.18E-10	7.53E-09	1.79E-07	3.58E-09	34	4
34	T9D	4.59E-08	9.18E-10	4.86E-08	9.73E-10	4.64E-08	9.28E-10	0.00E+00	9.16E-10	2.15E-09	1.80E-07	3.59E-09	34	4
35	T9F	5.38E-08	1.08E-09	5.38E-08	1.08E-09	4.62E-08	9.23E-10	0.00E+00	9.87E-10	5.79E-09	1.77E-07	3.55E-09	11	2
36	T10A	1.07E-07	2.14E-09	1.07E-07	2.14E-09	4.64E-08	9.27E-10	3.20E-08	9.29E-10	-5.24E-09	1.79E-07	3.59E-09	35	4
37	T10B	8.37E-08	1.67E-09	8.37E-08	1.67E-09	4.64E-08	9.27E-10	2.10E-08	9.44E-10	-6.61E-09	1.80E-07	3.59E-09	27	3
38	T11A	7.25E-08	1.45E-09	7.25E-08	1.45E-09	4.63E-08	9.26E-10	1.99E-08	9.14E-10	-1.42E-08	1.79E-07	3.58E-09	20	5
39	T11B	6.20E-08	1.24E-09	6.20E-08	1.24E-09	4.63E-08	9.26E-10	4.19E-09	9.09E-10	7.38E-09	1.79E-07	3.58E-09	21	3
40	T11C	9.84E-08	1.97E-09	9.84E-08	1.97E-09	4.65E-08	9.31E-10	4.14E-08	9.10E-10	-3.07E-08	1.79E-07	3.58E-09	41	3
41	T12A	1.14E-07	2.28E-09	1.14E-07	2.28E-09	4.61E-08	9.23E-10	3.28E-08	9.11E-10	8.65E-10	1.77E-07	3.54E-09	33	4
42	T12B	6.36E-08	1.27E-09	6.36E-08	1.27E-09	4.62E-08	9.24E-10	5.76E-09	9.13E-10	5.63E-09	1.78E-07	3.55E-09	27	4
43	T12C	7.50E-08	1.50E-09	8.09E-08	1.62E-09	4.64E-08	9.27E-10	0.00E+00	9.32E-10	3.30E-08	1.80E-07	3.59E-09	43	6
44	T12D	7.06E-08	1.41E-09	7.94E-08	1.59E-09	4.63E-08	9.26E-10	0.00E+00	9.31E-10	3.12E-08	1.79E-07	3.58E-09	42	4

n.d. non determinato

In Figura 6.28 viene presentata la distribuzione spaziale delle età ottenute, raggruppate in 8 classi di valori con passo di 10 anni. Le classi più popolose sono 3, con la seguente descrizione:

- con il 32% sul totale, la classe 30-40 anni è costituita da 18 pozzi, distribuiti per tutta l'area di alta e media pianura investigata, ad eccezione del transetto 4, ubicato nella sotto-area Ticino-Adda e del transetto 11, ubicato nella sotto-area Mella-Chiese;
- la classe 20-30 rappresenta il 25% sul totale ed è costituita da 14 pozzi, distribuiti tra i vari transetti ad eccezione dei primi tre, ovvero della sotto-area Ticino-Adda, e del transetto 9, ubicato nella sotto-area Oglio-Mella;
- le età apparenti per 13 pozzi (23%) ricadono invece nella classe 40-50 anni; questo range d'età non è rinvenuto per i transetti 1 e 2 nella sotto-area Ticino-Adda, e nei transetti T9 e T10.

Infine, relativamente alle classi meno popolose, citiamo i due range d'età più giovani: la classe <10 anni, che presenta 1 solo campione (T4E) e la classe 10-20 anni, costituita da 3 campioni (T3F, T5A e T9F; 5%; Figura 6.28). Tra le età maggiori rilevate, citiamo la classe 50-60 (7% del totale), costituita dai 4 pozzi T1A, T1D, T2G, T4A che caratterizzano la sotto-area Ticino-Adda; ed infine le classi 60-70 e >70, rappresentate da 3 pozzi e 1 pozzo, rispettivamente, ubicati nella sotto-area Ticino-Adda (T2B, T2C e T2D) e Adda-Oglio (T6F, 63 ± 29 anni; Figura 6.28).

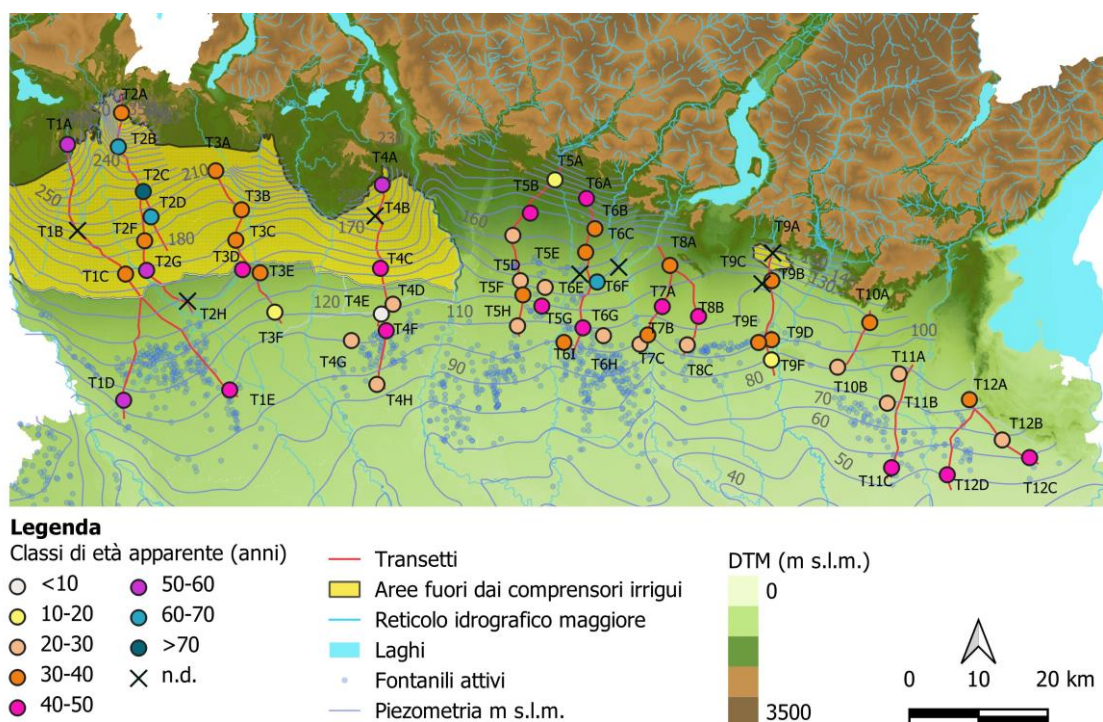


Figura 6.28 Mappa delle età apparenti stimate e rappresentate 8 classi. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 6.4

Da un'analisi della distribuzione d'età sul territorio (Figura 6.28) non sembra emergere una discretizzazione spaziale per l'alta e media pianura lombarda. Tuttavia, se analizziamo i dati relativi alle classi d'età in funzione della latitudine (Figura 6.29) possiamo apprezzare come le classi con età più elevate caratterizzino pozzi ubicati a latitudini maggiori. Aggregando i dati di mediana per le 8 classi di età mostrate in Figura 6.28 in funzione della latitudine (Figura 6.30) è possibile osservare come i pozzi ubicati nelle zone pedemontane presentino età relativamente più elevate rispetto ai pozzi disposti a valle idrogeologico (Figura 6.28). Emerge quindi una buona correlazione lineare tra età della falda e latitudine di ubicazione dei pozzi (r^2 pari a 0.82). Questa evidenza risulta apparentemente in contrapposizione con le aspettative di età via via maggiori all'aumentare del percorso idrico sotterraneo, che in questa porzione di pianura segue una direzione principale nord-sud (Figura 6.28).

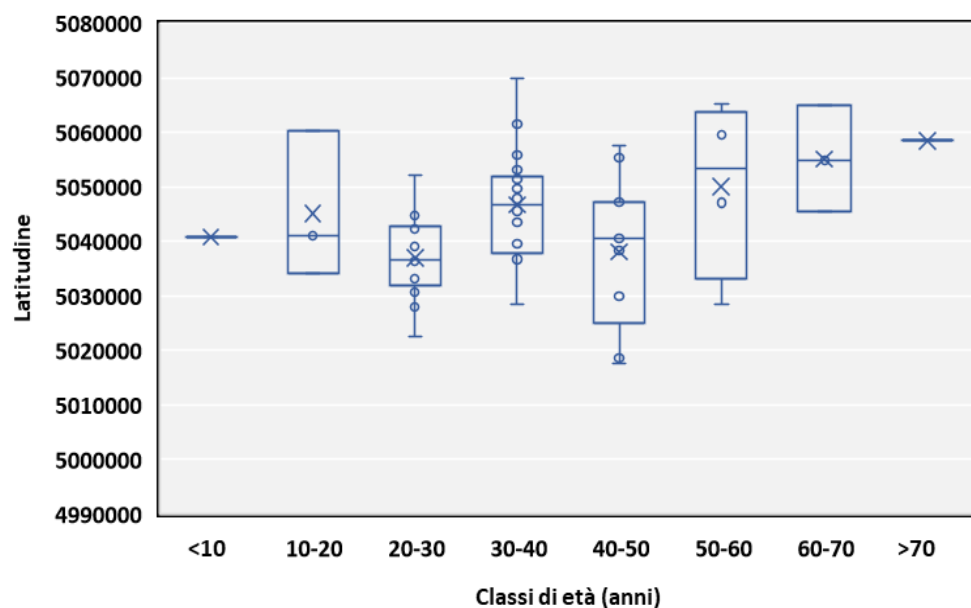


Figura 6.29 Box-plot delle classi di età rappresentate in Figura 6.28, in funzione della Latitudine. Per i dati puntuali di età, fare riferimento alla Tabella 6.4

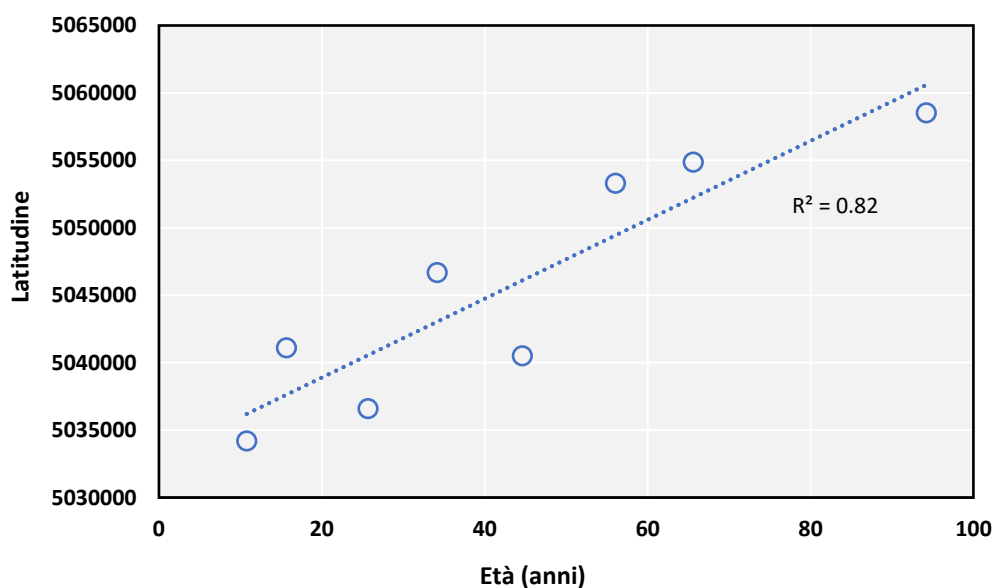


Figura 6.30 Scatterplot delle mediane per ogni classe di età (Figura 6.28) rispetto la latitudine

Il modello di circolazione che prevede delle età via via maggiori seguendo le linee di flusso, quindi procedendo verso valle idrogeologico, è valido nel momento in cui, lungo il suo percorso, si assume che la massa di acqua in transito non riceva apporti significativi di acqua con percorsi più brevi (ad esempio da parte di una ricarica locale

sulla verticale). Tuttavia, come discusso nella sezione 6.2, relativa al tracciamento delle voci di ricarica per l'ISS, si evince come, oltre alla ricarica dalle precipitazioni, la ricarica da pratiche irrigue rappresenti un importante input alla falda (Figura 6.4). L'alimentazione della falda ad opera delle acque superficiali per azione delle pratiche irrigue rappresenta quindi una componente alla ricarica locale che, in termini di età, sulla base dei principi definiti nella sezione 6.3.1, corrisponde ad una componente più giovane rispetto al flusso di base caratteristico dell'acquifero superficiale. Il ruolo di questa ricarica in un'ipotesi di mescolamento della falda dell'ISS potrebbe localmente contribuire alla restituzione di età apparenti inferiori. Dei 57 pozzi di cui è stato possibile ottenere dati di età tramite il metodo del $^3\text{He}_{\text{tri}}/^3\text{H}$, solamente il 23% (13 pozzi) ricade in aree non irrigate, mentre il restante 77% (44 pozzi) è rappresentativo invece di aree irrigate (Tabella 6.4; Figura 6.28). Osservando il box-plot di Figura 6.31, risulta evidente l'effetto della ricarica di acque con età inferiori a seguito delle pratiche irrigue. Le mediane che identificano il box-plot per le acque campionate in zone irrigue e per i pozzi localizzati al di fuori dei comprensori irrigati sono difatti di 33 e 49 anni, rispettivamente. La distribuzione delle età per le acque campionate in pozzi ricadenti in area irrigue presenta dunque una mediana 16 anni inferiore, oltre a disporsi in un range interquartile più ristretto rispetto a quello dei pozzi ubicati in zone non irrigue (Figura 6.31).

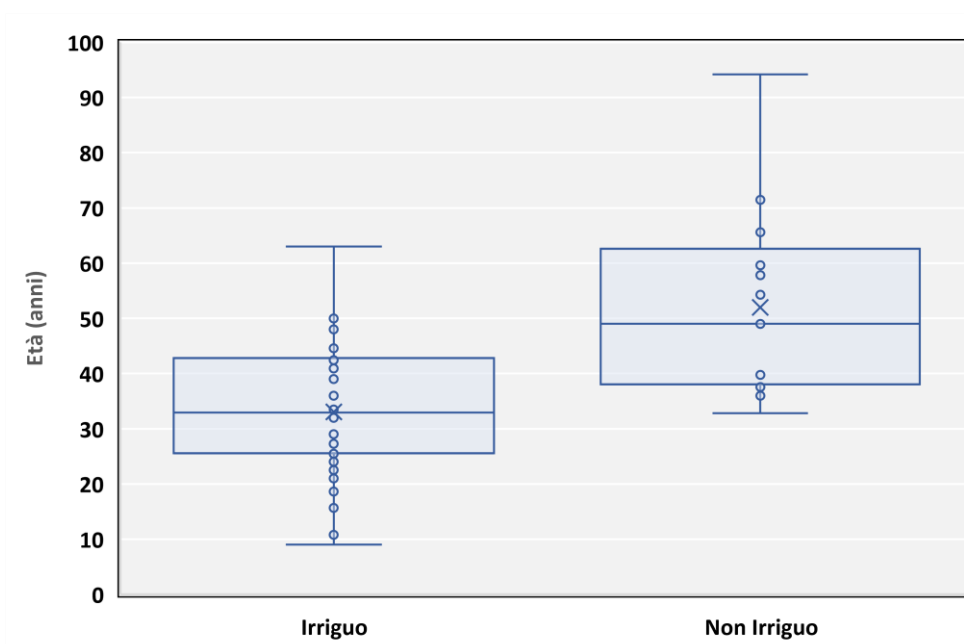


Figura 6.31 Box-plot delle età apparenti (anni) rappresentate in Figura 6.28, in funzione dell'ubicazione del pozzo in area irrigua o non irrigua. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 6.4

L'influenza delle voci di ricarica sull'età della falda non è l'unica variabile che entra in gioco nella determinazione del valore di età apparente per un campione di falda prelevato da pozzo. Occorre considerare inoltre la posizione del filtro del pozzo, sia rispetto all'idrostruttura dove ricade, sia come distanza dalla tavola d'acqua. Non solo, anche lo spessore dell'insaturo, e dunque il tempo di infiltrazione in falda della componente zenitale alla ricarica ha un ruolo importante. Per tutti questi motivi, ai fini della discussione e di una migliore comprensione dei dati di età apparente derivati nell'ambito del presente progetto, è indispensabile la consultazione ed interpretazione del dato di età congiuntamente alle sezioni litostratigrafiche prodotte (Cap 6.1), di seguito riportate dalla Figura 6.32 alla Figura 6.37 (sezioni dell'Allegato III alle quali è stata aggiunta l'informazione relativa all'età apparente e il relativo errore associato per ogni pozzo campionato).

Di seguito vengono discussi i risultati in funzione dell'ubicazione dei pozzi all'interno delle 5 sotto-aree Ticino-Adda, Adda-Oglio, Oglio Mella, Mella-Chiese e Chiese-Mincio.

La sotto-area Ticino-Adda è caratterizzata da 4 transetti (T1÷T4) (Figura 6.28). Partendo da ovest, relativamente al transetto T1 sono disponibili due sezioni: T1.1 e T1.2 (Figura 6.32). Per questa sotto-area si hanno a disposizione informazioni sulla datazione di 4 pozzi, il T1A ed il T1C, più a monte idrogeologico e ricadenti in aree non irrigue, ed il T1D e T1E a valle e rientranti in aree irrigue. Tre di questi pozzi, il T1A, T1D e T1E presentano un'età di circa 50 anni mentre uno solo (T1C) è caratterizzato da acque più giovani, con età intorno ai 30 anni. Il T1A pur presentando un filtro superficiale (Tabella 5.1), prossimo alla tavola d'acqua, sembrerebbe, dal dato di età, ricevere non solo apporti da una ricarica locale, ma anche da acque che hanno transitato più lentamente o più a lungo nell'acquifero (dunque acque più vecchie). Dalle ricostruzioni litostratigrafiche nell'intorno del tratto filtrante del pozzo, si rinvencono depositi, anche localmente torbosi, a bassa o comunque minore permeabilità rispetto ai depositi predominanti dell'acquifero. Condizione completamente diversa è quella che caratterizza il T1C, pozzo con unico filtro ubicato in una porzione totalmente libera dell'acquifero, che giustifica l'età più giovane della falda in questo punto. I punti T1D e il T1E, ubicati più a sud/valle ed all'interno della zona irrigata, sono caratterizzati entrambi da un unico filtro posizionato in ISI e ricadente nel Gruppo Acquifero B. Per questa porzione di acquifero è possibile ipotizzare che le acque che caratterizzano l'ISI possano, con molta probabilità, non essere in stretta connessione idraulica con il sistema di circolazione più superficiale dell'ISS (si veda stratigrafia in sezione idrogeologica T1.2, Figura 6.32). Laddove poi venga intercettato il Gruppo Acquifero B, è possibile che il pozzo capti acque con età apparenti piuttosto elevate. L'età apparente intorno ai 50 anni per questi pozzi è con tutta probabilità la risultanza di un mescolamento di acque più vecchie ed una componente più giovane derivante da ricarica superficiale dovuta alle pratiche irrigue, come dimostrato dagli isotopi stabili dell'acqua (Figura 6.5).

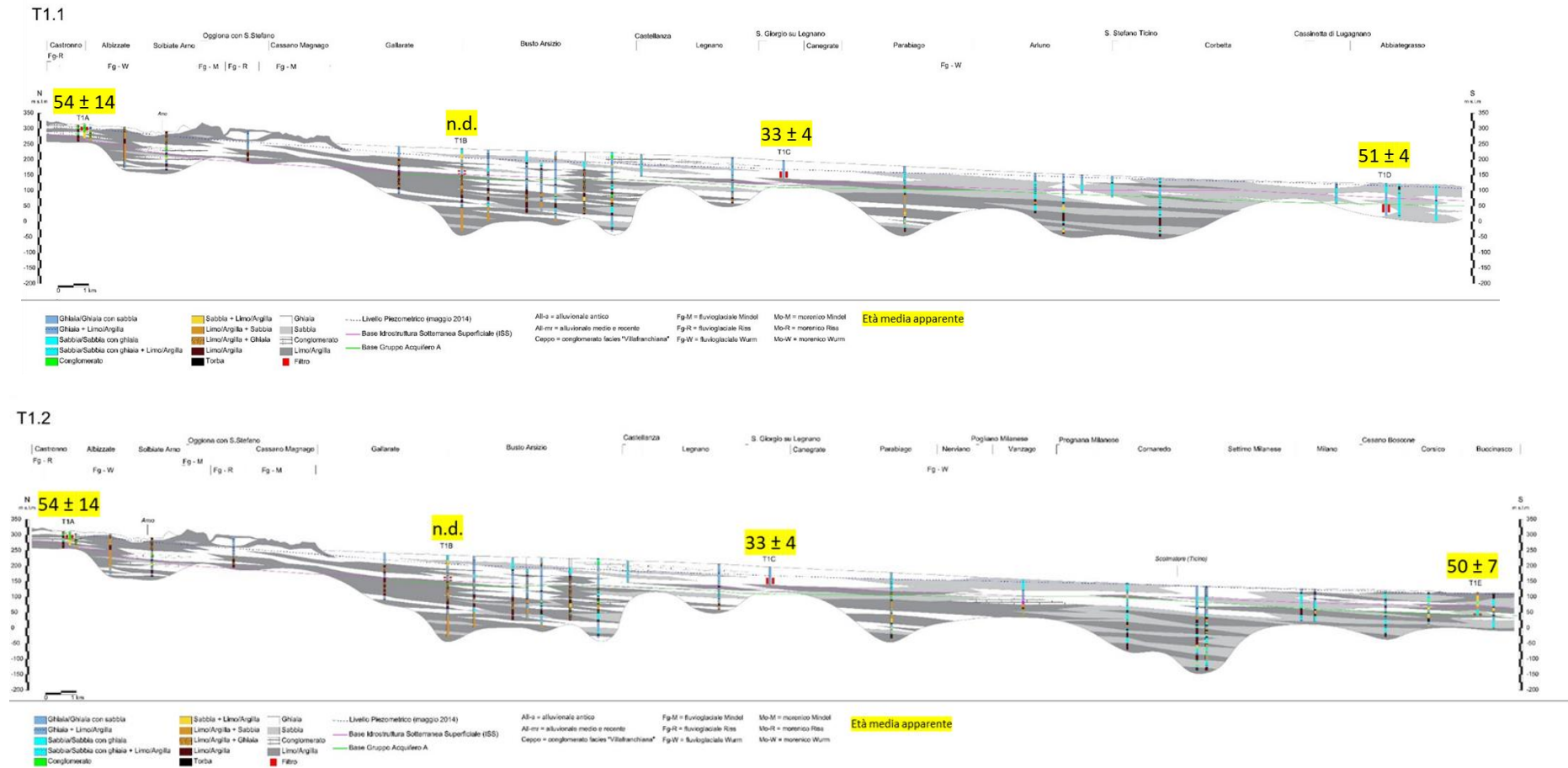


Figura 6.32 Sezioni T1.1 e T1.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

Relativamente al T2, sono disponibili informazioni su 6 pozzi, tutti ubicati in aree non irrigue. Ad eccezione del T2A e del T2G, i cui campioni riflettono acque più giovani (39 ± 4 e 36 ± 4 anni, rispettivamente), si registrano per questo transetto le età più vecchie di tutto il dataset (Figura 6.33; Figura 6.28). Il T2A, posto a monte, riceve acqua che con molta probabilità non appartiene a circuiti idrici molto lunghi. Relativamente al T2F, l'età più giovane è riconducibile alle caratteristiche costruttive del pozzo: la lunghezza del filtro ricopre tutto lo spessore dell'ISS, fino a lambire la parte più superficie nei pressi della tavola d'acqua; questa condizione favorisce l'influenza di ricarica locale di acque particolarmente giovani.

Per i quattro pozzi T2B, T2C, il T2D e il T2G come già detto in precedenza sono state registrate le età apparenti più vecchie. Nel caso del T2B (71 ± 9 anni), il pozzo è costituito da due tratti filtranti, entrambi in ISS, di cui uno ricadente in una porzione di acquifero caratterizzata da materiali a bassa permeabilità e dove la falda sembra essere semiconfinata. A tal proposito, questi materiali potrebbero localmente indurre il rallentamento del flusso idrico come anche ritardo nei tempi di infiltrazione di una ricarica locale. Il T2C invece con un'età di 94 ± 8 anni può essere interpretato tramite due linee di evidenza: (1) la stratigrafia del pozzo, che suggerisce come fenomeni di ricarica locale possano essere ridotti, rinvenendosi fino a 70 m del materiale limoso-argilloso misto a ghiaia che precede il primo filtro; e (2) il posizionamento del secondo tratto filtrante, molto più profondo rispetto al primo e ricadente in ISI, caratterizzato da una separazione ben marcata dal sistema idrico più superficiale. Anche nel caso del T2D il posizionamento del tratto filtrante del pozzo sembrerebbe modulare l'età della falda (66 ± 7 anni): in questo punto l'età riflette una porzione di falda che caratterizza l'ISI, il cui tetto coincide con quello del Gruppo Acquifero B. Per il T2G, infine, posto più a valle del transetto, l'età apparente è di 58 ± 8 anni potrebbe essere la risultante del flusso da monte, più vecchio, e di un'infiltrazione dalla verticale di acque più giovani, seppur ritardata a causa di uno strato di materiale superficiale meno grossolano.

In generale, per il transetto T2 vediamo come i dati costruttivi dei pozzi e, localmente, la litologia suggeriscano come il sistema di circolazione che interessa l'ISI sia caratterizzato da età apparenti più vecchie (fino a 94 ± 8 anni). Diversamente, in

condizioni dove il filtro è più superficiale, intercettando solo l'ISS senza limitazioni nei deflussi per motivi litologici ed escludendo l'influenza di una ricarica locale più giovane da parte delle pratiche irrigue, è possibile osservare come l'età apparente associata a questa porzione di acquifero sia compresa all'incirca tra 30 e 40 anni.



Figura 6.33 Sezioni T2.1 e T2.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

Il transetto T3 è caratterizzato da un totale di 6 pozzi, di cui 3 a monte (T3A÷T3C), ricadenti in aree non irrigue, e 3 (T3D÷T3F) a valle, in zone invece irrigue (Figura 6.34; Figura 6.28). Si tratta di un transetto con età omogenea, intorno ai 40 anni, con unica eccezione il pozzo T3F (16 ± 2 anni), per il quale si osserva un'età apparente più giovane, sia a causa delle pratiche irrigue e sia, probabilmente, della stretta vicinanza del fiume Seveso. Il pozzo T3F è inoltre caratterizzato da un filtro di spessore contenuto, localizzato nella parte più superficiale ed in prossimità della tavola d'acqua. Fatto salvo questa eccezione, il dato più rilevante per questo transetto è la similitudine per le età misurate in aree irrigue e non irrigue. A tal proposito, i pozzi T3D e il T3E in zona irrigua (46 ± 5 e 34 ± 3 anni, rispettivamente) presentano età simili ai pozzi di monte, in aree non irrigue. Per entrambi i punti, ancorché ricadenti in area irrigua, possedendo tratti filtranti che raggiungono la base del Gruppo Acquifero A, è plausibile che la frazione meno giovane nel mescolamento delle acque captate sia mediamente più vecchia dei 40 anni circa registrati nei pozzi posti a monte idrogeologico. Tale condizione non permetterebbe di rilevare, come nel T3F, acque molto più giovani.

Il transetto T4 è l'ultimo per la sotto-area Ticino-Adda e consta di 7 pozzi, 5 ubicati in zona irrigua e 2 in area non irrigua (Figura 6.34; Figura 6.28). Anche in questo caso, ad eccezione del punto T4F, si individuano acque più vecchie a monte, ovvero in area non irrigua, con il valore più alto in corrispondenza del T4A (60 ± 27 anni), e acque più giovani procedendo verso valle idrogeologico, dove si rinviene in T4E il valore più basso registrato (9 ± 3 anni). Il T4E presenta due tratti filtranti, sia in ISI che in ISP (Tabella 5.1), suggerendo una possibile captazione combinata di acque giovani (acque superficiali o acque sotterranee di recente ricarica) e acque più vecchie appartenenti alla circolazione della falda più profonda. L'intenso pompaggio (uso idropotabile del pozzo) unito alla vicinanza con il naviglio Martesana (pozzo ubicato a circa 500 m a valle idrogeologico di esso) potrebbero facilitare l'alimentazione di acque superficiali al pozzo, ringiovanendo fortemente l'età della falda e giustificando così la bassa età calcolata. Per quanto riguarda il T4F, che pur essendo in zona irrigua registra un'età di 46 ± 38 anni, si segnala che il dato non è comparabile con i pozzi vicini in quanto i dati costruttivi del pozzo segnalano una corrispondenza del tratto

filtrante con l'ISI, e dunque supportano la possibilità che il pozzo intercetti un circuito idrico più profondo, con acque relativamente più vecchie (Tabella 5.1; Figura 6.34).

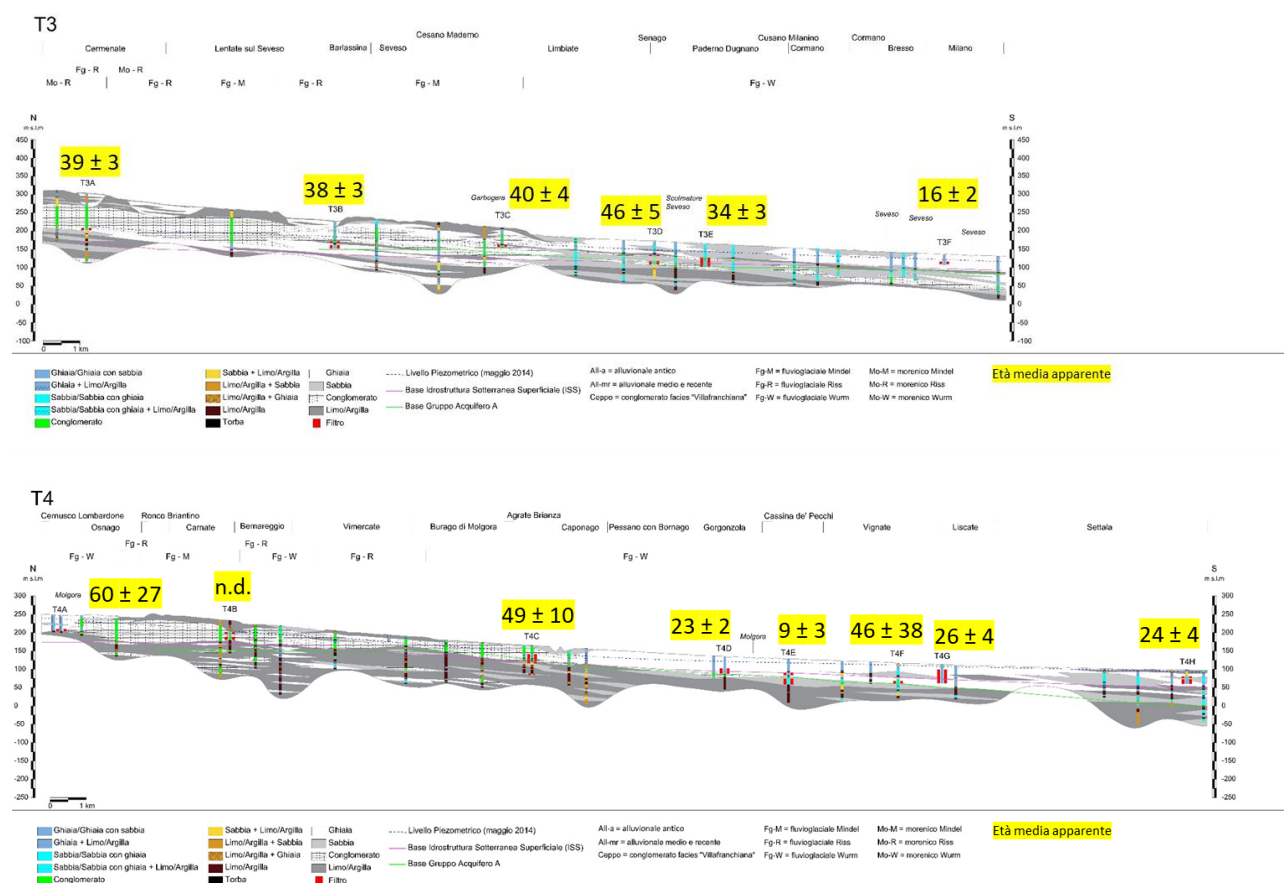


Figura 6.34 Sezioni T3 e T4 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

La sotto-area Adda-Oglio, soggetta ad irrigazione agricola nella sua totalità, è caratterizzata da due transetti (T5 e T6; Figura 6.35; Figura 6.28). Relativamente al transetto T5, il punto T5A, posto più a nord/monte di tutti, presenta il dato di età più giovane (19 ± 3 anni), probabilmente dovuto all'intensa alimentazione da parte delle acque del fiume Serio, sia tramite eccessi irrigui che per alimentazione diretta dall'alveo, considerando la vicinanza di questo pozzo al Serio stesso. Il T5B presenta tre filtri, di cui l'ultimo captante l'ISI, condizione che potrebbe spiegare l'età più vecchia registrata per questo transetto (48 ± 8 anni). Un dato di età relativamente giovane caratterizza il pozzo T5C (21 ± 2 anni) che con i suoi 2 filtri, di cui il più superficiale

disposto in prossimità della tavola d'acqua, potrebbe ricevere un'alimentazione importante da acque di recente infiltrazione. Per il T5D, T5E e T5F si registra un'età apparente media di 29 anni circa, in linea con il fatto che tutti i pozzi, ravvicinati tra loro, presentano profondità del filtro/i del tutto comparabili. Anche il T5H (24 ± 2 anni) è in linea con la tendenza ad età più giovani verso valle idrogeologico, pur presentando filtri che pescano in tutte e tre le idrostrutture (ISS, ISI e ISP). Le età più giovani potrebbero essere generate da una maggiore captazione dal filtro più superficiale rispetto a quello più profondo. Il T5G, diversamente dai pozzi vicini, presenta un'età più vecchia (43 ± 5 anni), nonostante non vi siano elementi o caratteristiche costruttive tali da giustificare un valore così elevato.

Per il transetto T6 sono disponibili informazioni per 7 pozzi per i quali, in linea generale e ad eccezione di due punti (T6F e T6G), è possibile apprezzare una leggera tendenza verso età via via più giovani procedendo verso valle idrogeologico (Figura 6.35; Figura 6.28). Per il T6A ed il T6G si registra un'età nell'intorno dei 45 anni, mentre per i pozzi T6B, T6C, T6H e T6I è rilevata un'età intorno ai 30 anni. In corrispondenza di T6F, localizzato a Martinengo (BG) invece, le acque risultano più vecchie (63 ± 29 anni). Questo risultato potrebbe essere legato all'ubicazione dei filtri del T6F, in prossimità della base dell'ISS e sovrastati da almeno due livelli limoso/argillosi, favorendo così un possibile richiamo di acqua più antica da porzioni più profonde dell'acquifero.

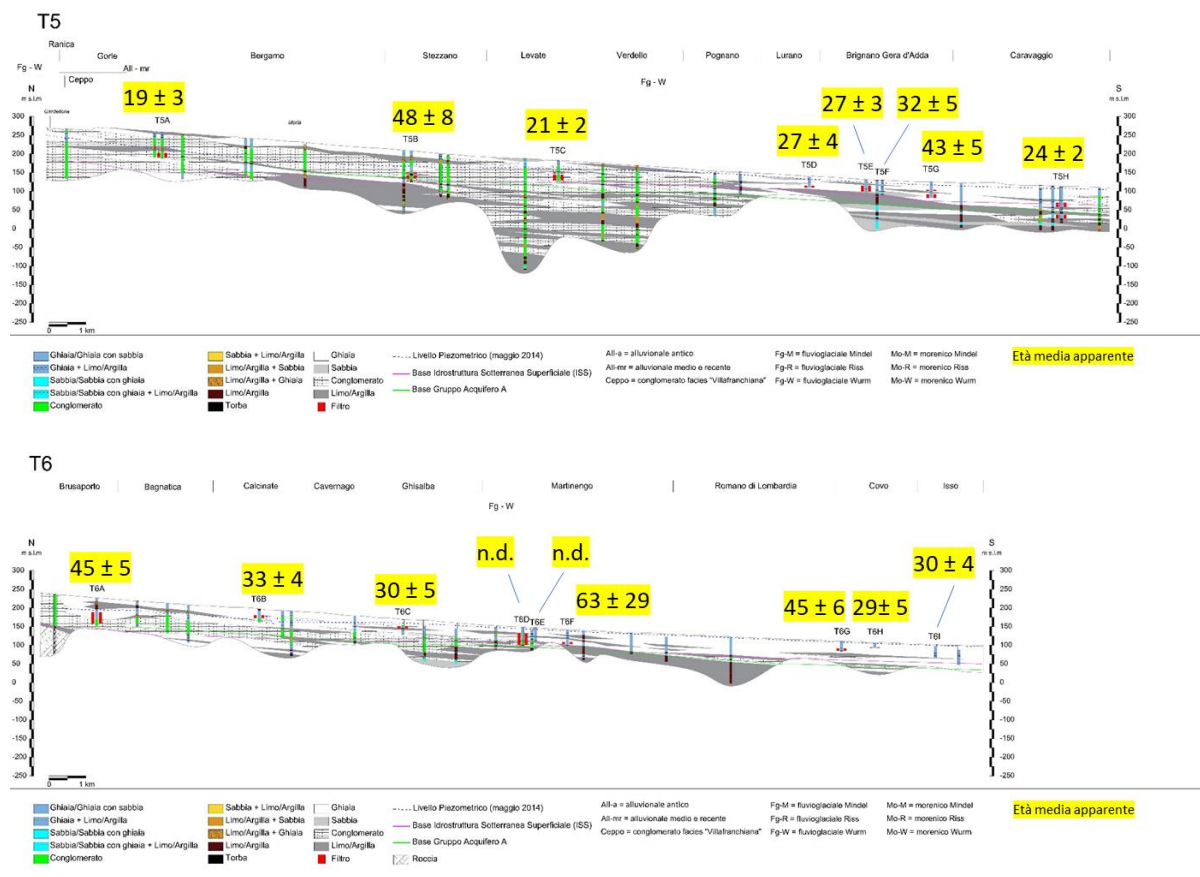


Figura 6.35 Sezioni T5 e T6 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

La sotto-area Oglio-Mella contiene 3 transetti (T7÷ T9; Figura 6.36; Figura 6.28); per la quasi totalità soggetta ad irrigazione agricola ad eccezione della zona pedemontana compresa tra la cerchia morenica dell'Iseo e il fiume Mella, dove l'irrigazione o non viene praticata o viene fatta utilizzando pozzi irrigui. Relativamente al transetto T7, che consta di 3 pozzi (più il T8A di monte), è apprezzabile, ad esclusione del T8A, un gradiente di diminuzione dell'età da monte verso valle, dove il T7A presenta un'età di 47 ± 5 anni, mentre per il punto posto più a sud, il T7C, che ricade nella zona dei fontanili, registriamo un'età apparente di 27 ± 4 anni. Per questo transetto, il ruolo della ricarica da acque superficiali è ben evidente; vediamo infatti come il pozzo T7B, che presenta più filtri che arrivano anche a captare il Gruppo Acquifero B (Figura 6.36), sia caratterizzato comunque da un segnale isotopico tipico delle acque superficiali e da un'età intermedia (36 ± 5 anni). Il transetto T8, sempre composto da 3 pozzi, invece non restituisce la medesima tendenza del precedente, presentando età minori nei

pozzi di monte (T8A, 33 ± 17 anni) e valle (T8C, 25 ± 5 anni) ed un valore di età maggiore, pari a 45 ± 9 anni in corrispondenza del T8B, nel centro del transetto, quest'ultimo di difficile interpretazione da un punto di vista stratigrafico/costruttivo (filtri superficiali con assenza di livelli limosi/argillosi sopra ad essi).

Relativamente al transetto T9 è possibile osservare una distribuzione più omogenea dell'età: sia il T9B che il T9D presentano un'età di 34 ± 4 anni ed il T9E (fontanile) risulta in linea con i dati di monte con un'età di 39 ± 6 anni (Figura 6.36; Figura 6.28). Il pozzo T9B, che presenta filtri profondi (captando al di sotto dell'ISS), è ubicato nell'area pedemontana dove, come indicato dai traccianti di ricarica, la ricarica sembra principalmente dovuta alla cosiddetta "surface mountain-front recharge", nello specifico a carico del torrente Gandovere (Figura 6.7). Infine, il pozzo più a valle, il T9F, risulta avere acque più giovani (11 ± 2 anni), in virtù probabilmente del posizionamento più superficiale dei filtri rispetto agli altri pozzi che compongono il transetto.

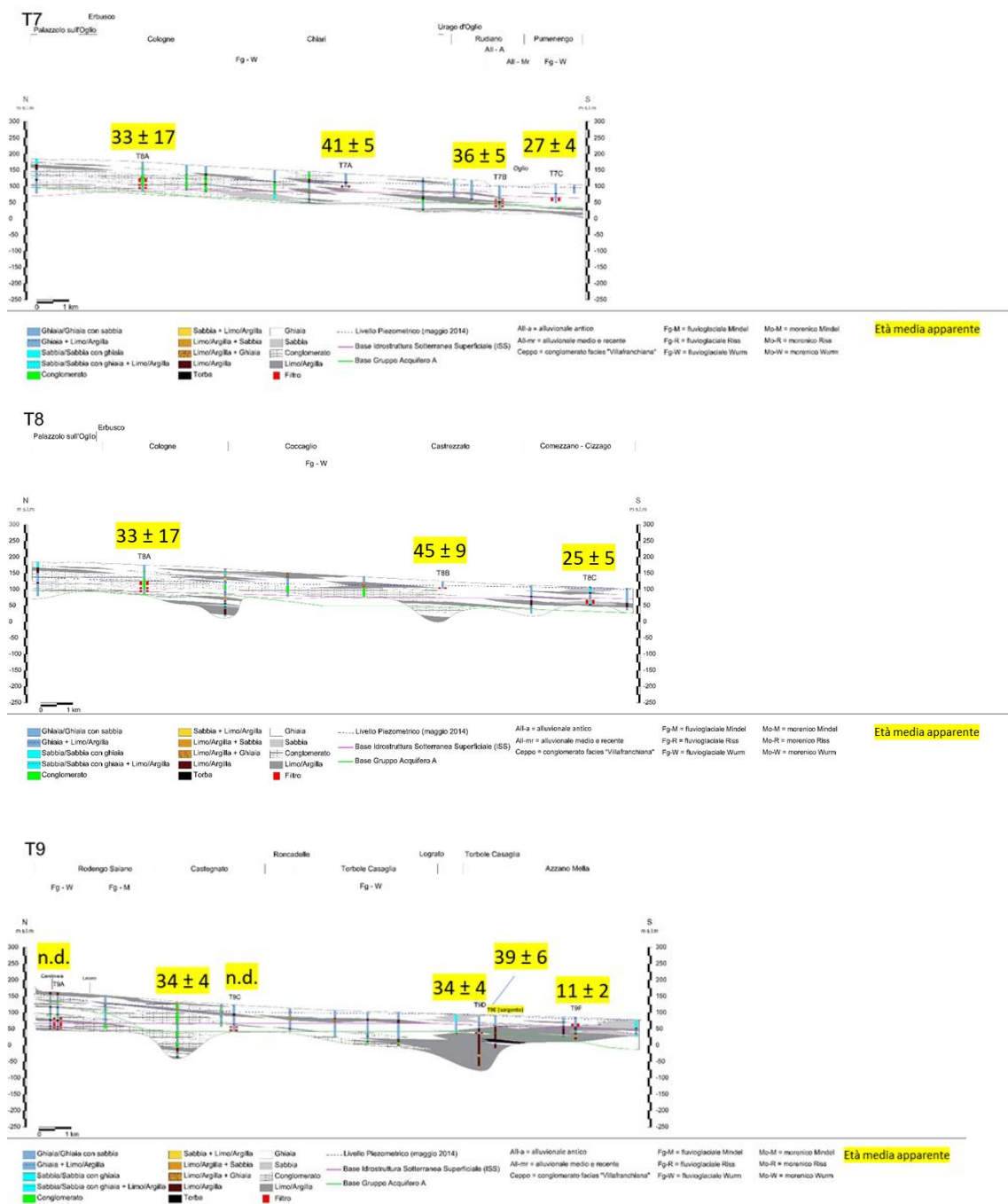
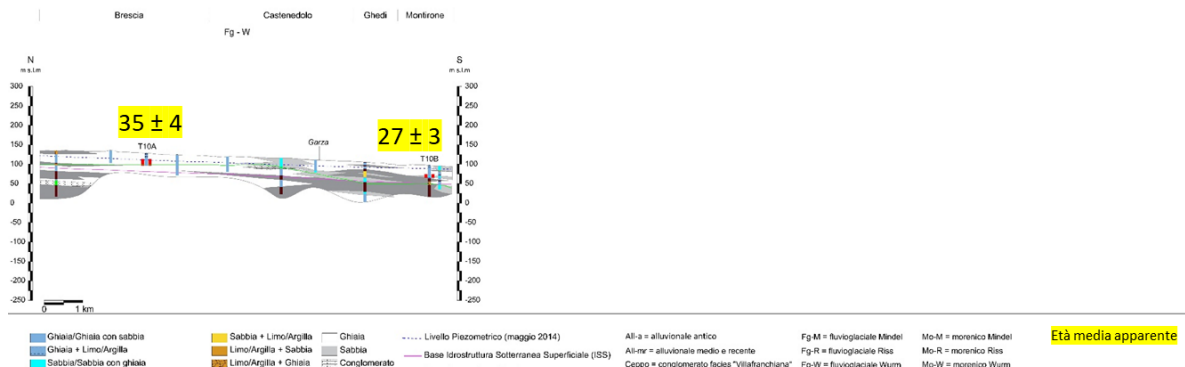


Figura 6.36 Sezioni T7, T8 e T9 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

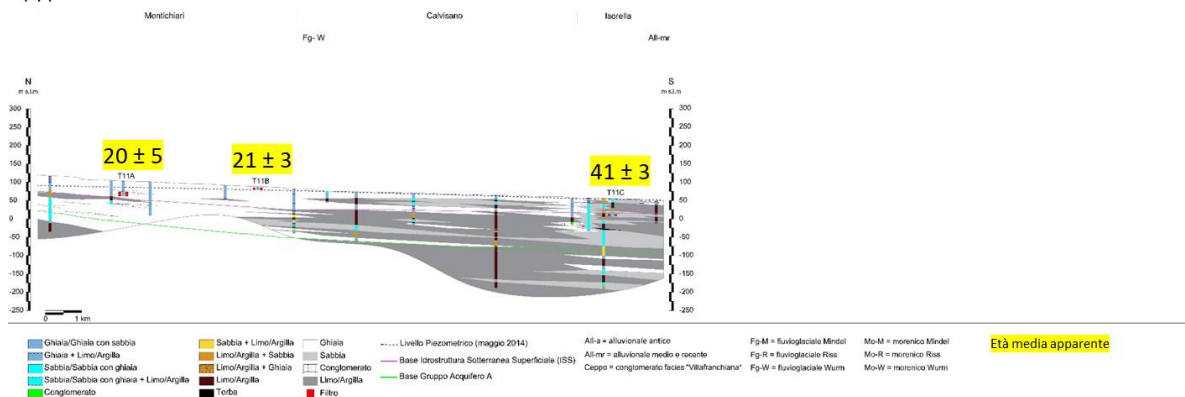
La sotto-area Mella-Chiese contiene 2 transetti (T10 e T11; Figura 6.37; Figura 6.28), localizzati in un'area fortemente influenzata da ricarica dovuta alle pratiche irrigue. Il transetto T10 (2 pozzi) è caratterizzato da un'età maggiore per il pozzo di monte (T10A, 35 ± 4 anni) rispetto a quello di valle (T10B, con un'età di 27 ± 3 anni). Relativamente al transetto T11 (3 pozzi), i primi due pozzi, T11A e T11B, presentano un'età simile intorno a 20 anni, mentre il T11C, più a valle, registra un'età di 41 ± 3 anni. Tale età apparente maggiore, è dovuta possibilmente a ragioni di tipo litologico: in questa porzione di acquifero gli strati a bassa permeabilità si fanno più spessi, intervallandosi più frequentemente ai depositi di sabbia e ghiaia rispetto a ciò che si rinviene a monte (Figura 6.37). Tale condizione, con elevata probabilità determina un rallentamento della circolazione idrica, oltre a limitare e ritardare l'infiltrazione zenitale.

La sotto-area Chiese-Mincio contiene 1 transetto, il T12, costituito da 4 pozzi (Figura 6.37; Figura 6.28). La maggior parte di questa sotto-area è soggetta ad irrigazione agricola, come evidenziato anche dagli isotopi stabili che indicano una maggiore influenza della ricarica da acque superficiali (Canale Arnò) nei pozzi ubicati più a sud (T12C e T12D). Per quanto riguarda invece i dati di età, riscontriamo una situazione simile a quella del transetto T11 dove i pozzi a monte (T12A e T12B) presentano un'età comparabile e pari rispettivamente a 33 ± 4 e 27 ± 4 anni, mentre i due pozzi a valle idrogeologico (T12C e T12D) sono caratterizzati da età più vecchie, rispettivamente 43 ± 6 e 42 ± 4 anni. Tale comportamento può essere spiegato ancora una volta in base alle caratteristiche costruttive ed alle litologie dei pozzi. Partendo da monte, i pozzi di questo transetto presentano profondità dei filtri via via più profonde, fino al limite dell'ISS, con presenza maggiore di materiale fine nell'acquifero; queste caratteristiche sono con tutta probabilità le condizioni che determinano le età maggiori (circa 40 anni) che si riscontrano in questa porzione dell'acquifero.

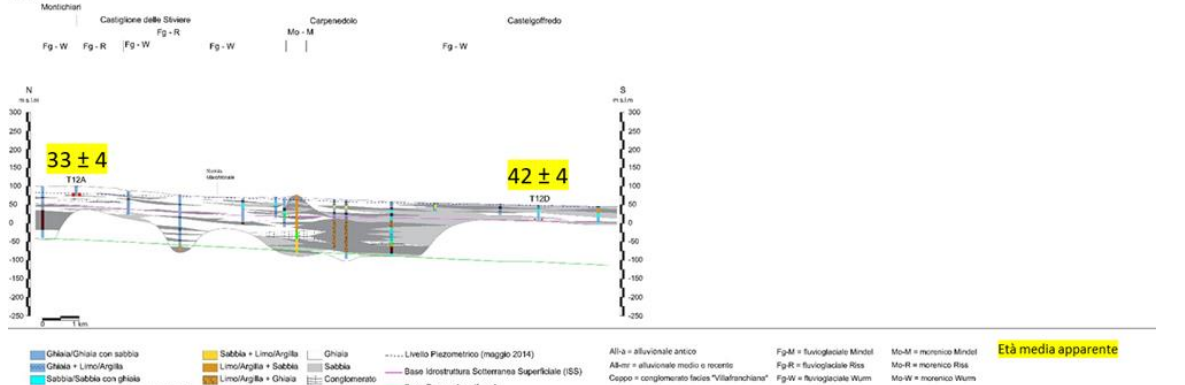
T10



T11



T12.1



T12.2

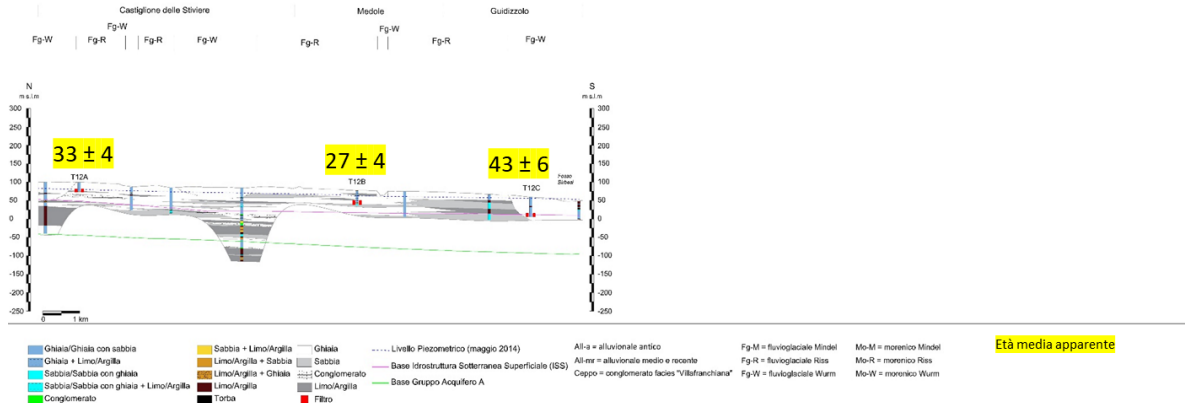


Figura 6.37 Sezioni T10, T11 e T12.1 e T12.2 riportanti il dato di età apparente (anni) ed il suo errore associato

In definitiva, seppur a scala regionale sia evidente una relazione di diminuzione di età all'aumentare del percorso idrico sotterraneo, a scala di transetto questa relazione non emerge con chiarezza, rendendosi visibile solo per i transetti T3 e T4 (sotto-area Ticino-Adda), T7 e T9 (sotto-area Oglio-Mella) e T10 (sotto-area Mella-Chiese). Il motivo è che a scala di transetto diventano più rilevanti le differenze di età generate dalle diverse profondità dei filtri e da aspetti sito-specifici legati all'idrogeologia (spessore dell'insaturo, distanza dei filtri dalla tavola d'acqua, ecc.) alla litologia (presenza di livelli a bassa permeabilità, ecc.) e alle voci di ricarica (intensità della ricarica da eccesso irriguo, ecc.).

6.3.3 Valutazione dei processi di mixing

In questo paragrafo vengono presentati due metodi grafici utili per indagare eventuali processi di mixing per i campioni di falda considerati. L'applicazione di questa indagine è motivata dal fatto che l'interpretazione dei dati di età, così come quelli dei traccianti di ricarica, ha fatto emergere come elemento importante il mescolamento tra acque sotterranee più antiche provenienti da monte idrogeologico e acque più giovani infiltrate dalla superficie come eccesso irriguo. Il primo metodo utilizzato è quello che segue il diagramma di "Craig", mentre il secondo è il metodo dell'input curve, con il quale si procede alla comprensione di come questi mixing si possano poi tradurre in modelli di flusso.

In Figura 6.38 vengono rappresentati i 57 campioni della prima campagna di monitoraggio secondo il diagramma di Craig (Craig et al., 1978), che mostra i rapporti di $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ rispetto al rapporto R/R_a ; quest'ultimo (R/R_a) già descritto precedentemente, e qui ripreso, è inteso come il rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ (R), considerando ^3He e ^4He misurati (totali), diviso il rapporto atmosferico (R_a). Questa rappresentazione fornisce una semplice discretizzazione delle sorgenti di elio per vari fluidi terrestri, permettendo di identificare facilmente il verificarsi di processi di mixing per i campioni in esame.

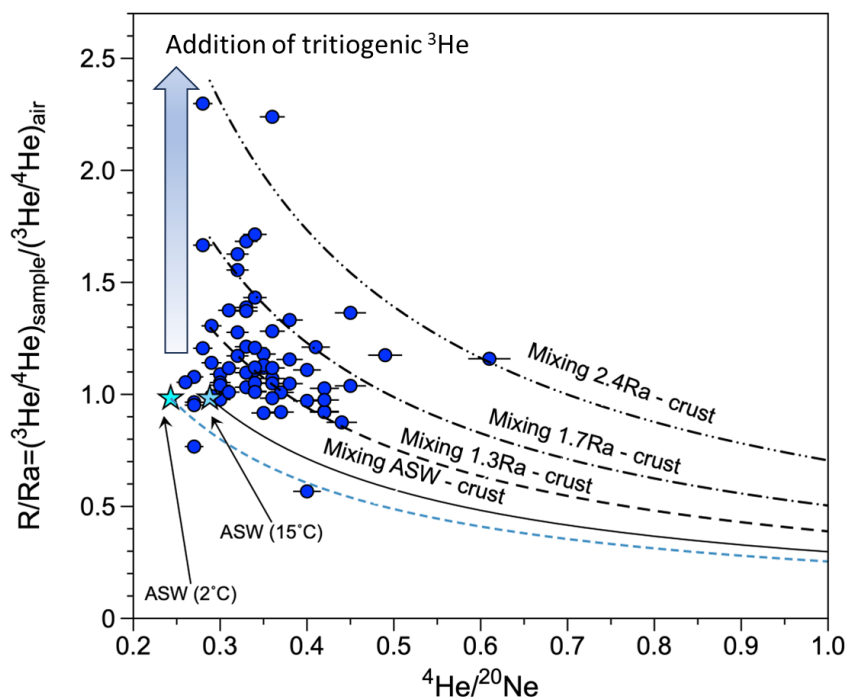


Figura 6.38 Diagramma di Craig con indicazione dei diversi end-member ASW, ASW+TRI e TERR e possibili linee di mixing

Per falde provenienti da acquiferi liberi, generalmente si ipotizza che l'He misurato sia il prodotto di mixing di almeno due fonti: (i) la componente l'atmosferica (ASW), presente nell'acqua meteorica recente che si infiltra nelle aree di ricarica con una composizione, ad esempio a 10 °C, di $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ pari a 0.254 (Smith and Kennedy, 1983) e con un R/Ra atmosferico vicino a 1 (Benson and Krouse, 1980), ed una (ii) componente più antica (TERR) con un $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} \gg 10$ ed un R/Ra pari a 0.01-0.2, che ha accumulato ^4He radiogenico per interazione acqua-roccia come prodotto dal decadimento di U e Th (Torgersen, 1980). In aggiunta alle due componenti ASW e TERR, è possibile prendere in considerazione una terza componente che può concorrere al mixing: si tratta di acqua sub-moderna (quindi più antica), che ha accumulato $^3\text{He}_{\text{tri}}$, infiltratasi al momento in cui il trizio disciolto era presente in concentrazioni molto elevate in atmosfera a seguito degli esperimenti nucleari degli anni '50 e '60 (ASW+TRI). Le curve rappresentate in Figura 6.38, indicano diverse possibilità di mixing tra i 3 end-member appena descritti.

Per il nostro dataset (Tabella 6.3; Tabella 6.4), possiamo notare come, anche se in concentrazioni esigue, l' ^4He radiogenico è stato riscontrato in 34 campioni su 64, dove

la concentrazione massima misurata è di $1.25 \cdot 10^{-07} \text{ cm}^3\text{STP/g}$. Possiamo già segnalare quindi come nella porzione di acquifero considerato, con tutta probabilità, l'elio totale misurato è il risultato del mixing tra la componente atmosferica e gli altri due end-member (ASW+TRI e TERR), per indicazione della compresenza di $^3\text{He}_{\text{tri}}$ e $^4\text{He}_{\text{rad}}$ nello stesso campione.

In Figura 6.39 il diagramma di Craig viene proposto per i dati complessivi delle due campagne di monitoraggio, utilizzando una rappresentazione semplificata e suddividendo i dati in grafici diversi, ognuno riportante i pozzi ricadenti in una stessa sotto-area, similmente alla presentazione dei risultati nel capitolo 6.2 per il tracciamento delle voci di ricarica e il 6.3.2 per la descrizione dei risultati delle età stimate. In generale, è possibile osservare come l'He misurato faccia riferimento in maniera preponderante ad un'acqua moderna, molto vicina alla composizione dell'ASW, il cui discostamento dalla composizione dell'ASW risulta da un mixing seppur di entità esigua con gli altri due end-member. Dalla composizione preponderante in ASW sono pochi i pozzi il cui He disciolto si differenzia maggiormente verso le altre due componenti.

Relativamente alla sotto area Ticino-Adda, la più popolosa in termini di dati a disposizione (Figura 5.1 e Figura 6.28), è possibile osservare la maggiore variabilità sia in R/R_a che in $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$. Mentre con maggior frequenza i dati sono disposti nell'intorno della composizione di acqua moderna (ASW), non mancano alcune chiare differenziazioni, risultanti di mixing, in rapporti diversi, con i rimanenti due end-members ASW+TRI e TERR. A tal proposito segnaliamo i pozzi T1D e T2B, con $^3\text{He}_{\text{tri}}$ maggiore a quello dell'acqua moderna (ASW). Rapporti più bassi in R/R_a , indicando uno spostamento verso l'end-member TERR, caratterizzano i cinque pozzi T1A, T2A, T4A, T2C e T2D, sono rappresentativi di un mescolamento tra acque circolate più a lungo/profondamente (soggette ad una maggiore interazione acqua-roccia) e acque infiltrate recentemente (prossime alla composizione atmosferica), sia da precipitazione locale che da eccesso irriguo (questa elaborazione non riesce a discriminare tra le due).

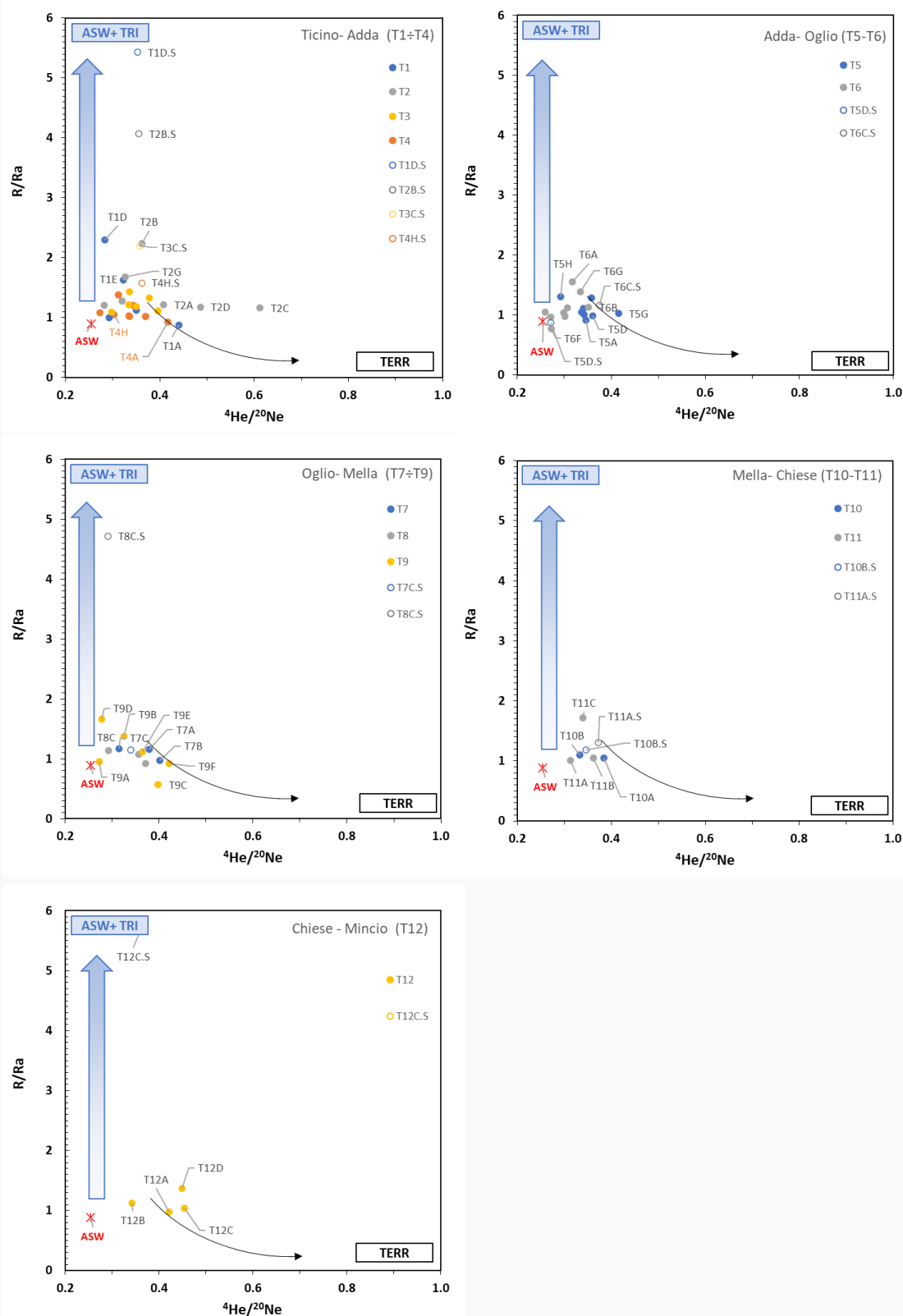


Figura 6.39 Il diagramma di Craig, con indicazione dei diversi end-member ASW, ASW+TRI e TERR. I pozzi della rete interessati dal secondo campionamento di settembre 2022, sono rappresentati senza riempimento colore

La sotto-area Adda-Oglio presenta tutti i campioni che si distribuiscono nell'intorno della composizione di ASW; questa condizione rispecchia l'uso del territorio, dove la totalità di quest'area è soggetta ad irrigazione agricola, traducendosi in un input importante di acqua moderna in falda.

Anche nella sotto area Oglio-Mella, la maggioranza dei campioni ricade in prossimità della composizione ASW. Alcune eccezioni sono date dai pozzi T9C, con una maggiore componente radiogenica, e T9D con una maggiore componente triziogenica.

Nella sotto-area Mella-Chiese è possibile osservare una variazione, seppur minima, della composizione di He rispetto all'ASW solo per il campione T11C, che presenta un leggero spostamento verso la componente ASW+TRI.

Relativamente alla sotto-area Chiese-Mincio, si riscontrano lievi deviazioni delle composizioni di He tipiche dell'ASW. Il T12C ed ancor più il T12D evidenziano un contributo della componente radiogeniche, probabilmente a causa dell'intercettamento da parte di questi due pozzi di circuiti più lunghi/profondi.

Per gli 11 pozzi oggetto dalla seconda campagna di monitoraggio (Cap. 5.4; Figura 5.2; Tabella 6.3; Tabella 6.4), è possibile osservare come:

- 10 pozzi presentano variazioni significative tra le due campagne delle componenti che vanno a caratterizzare l'elio in soluzione. Anche se in rapporti diversi, si osserva un incremento nella componente sub-moderna ovvero quella che vede un arricchimento in $^3\text{He}_{\text{tri}}$ (ASW+TRI; Figura 6.39); i valori più arricchiti, con $R/R_a \geq 4$, riguardano i pozzi T1D, T2B, T8C e T12C.
- 1 pozzo (T5D) al contrario, localizzato nella sotto-area Adda-Oglio, rappresenta l'unico punto di monitoraggio la cui composizione di elio risulta essere più vicina alla ASW a settembre rispetto al dato analitico di marzo 2022 (Figura 6.39).

L'incremento osservato in $^3\text{He}_{\text{tri}}$ per la maggior parte dei punti potrebbe essere spiegato dalla siccità dell'estate 2022, che ha comportato l'utilizzo di minori volumi irrigui e conseguentemente un minor contributo alla falda di acque moderne, giustificando un'influenza maggiore di acqua sub-moderna e maggiormente arricchita di $^3\text{He}_{\text{tri}}$.

Il quadro generale fornito dall'interpretazione del diagramma di Craig indica un'influenza preponderante di ricarica moderna, dovuta, secondo le interpretazioni effettuate di traccianti e età, principalmente all'eccesso irriguo. Risulta comunque significativo lo spostamento per alcuni campioni verso la componente radiogenica (Figura 6.38; Figura 6.39), indicando quindi un mescolamento tra acque moderne ed acque che hanno attraversato circuiti più lunghi/profondi. Infine, si sottolinea che la maggior parte dei campioni che hanno mostrato uno spostamento verso la componente triziogenica sono quelli relativi alla sotto-area Ticino-Adda, per la maggior parte non irrigata, confermando il legame tra acque più antiche (nello specifico sub-moderne) e zone non irrigate.

Di seguito si propone una migliore comprensione delle età apparenti calcolate e dei processi di mixing tramite il metodo grafico dell'input curve. Questo metodo è basato sul confronto tra il contenuto iniziale di trizio, $^3\text{H}_{\text{init}}$ (inteso come la somma del contenuto di trizio ed $^3\text{He}_{\text{tri}}$ nel campione, definito a partire dai dati di Tabella 6.3 e Tabella 6.4) e il record della serie storica di trizio della stazione di monitoraggio IAEA (GNIP - Global Network of Isotopes in Precipitation) più vicina alla nostra area di studio, in questo caso Vienna.

Il dato iniziale di trizio calcolato per i pozzi monitorati è indicativo della composizione isotopica del nostro campione al momento (e quindi all'anno) della sua infiltrazione in falda, isolandosi così dai gas atmosferici, rappresentando un determinato input di ricarica per la porzione di acquifero investigata.

In Figura 6.40 viene riportata la curva dei dati medi mensili di trizio misurati nelle precipitazioni della stazione di Vienna dal 1960 a 2021, che viene anche definita input curve e sulla quale sono state graficate le età apparenti dei 57 punti della rete di monitoraggio sui quali abbiamo calcolato i dati di età.

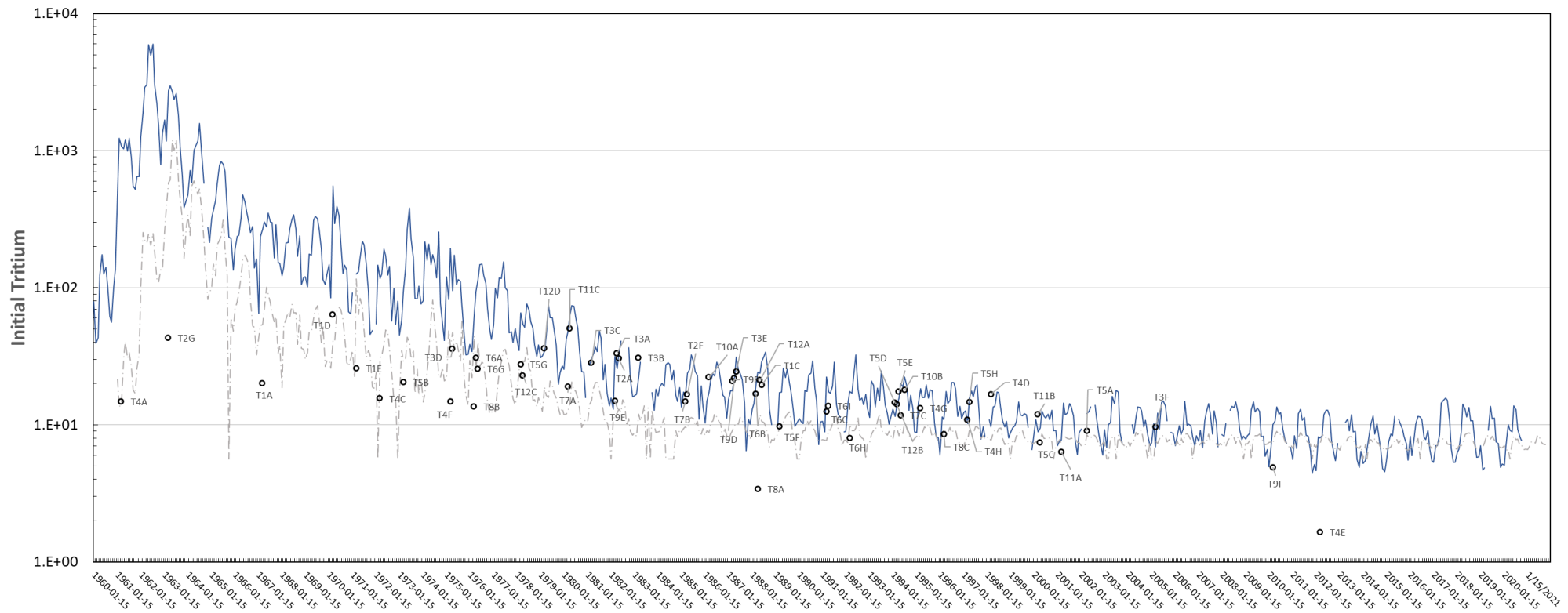


Figura 6.40 Contenuto iniziale di trizio ($^3\text{H}+^3\text{He}_{\text{tri}}$) delle acque campionate (indicate con il cerchio nero) confrontato con $^3\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ di precipitazione come registrato presso la stazione GNIP di Vienna, Austria (<https://www.iaea.org/services/networks/gnip>). In tratteggiato una possibile linea di mixing che vede acqua recente del 2022 per circa l'80%, che è stata "diluata" da una frazione di acqua pre-bomb, quindi molto povera in ^3H ed $^3\text{He}_{\text{tri}}$

In base al posizionamento del valore di $^3\text{H}_{\text{init}}$ rispetto all'andamento dell'input curve è possibile una valutazione qualitativa in merito al modello di flusso che ha caratterizzato una determinata particella di acqua dall'area di ricarica fino al momento del campionamento. Se i valori di $^3\text{H}_{\text{init}}$ dei singoli campioni (simbolo di un cerchio nero, Figura 6.40) ricadono in corrispondenza dell'input curve, allora in questo caso è possibile considerare per la particella d'acqua un comportamento idrodinamico di riferimento simile ad un modello a pistone (Piston Flow Model - PFM). Comportamenti simili ad un PFM, in sistemi naturali, si osservano con maggior facilità per campioni prelevati a partire da pozzi poco profondi, in acquiferi non confinati e caratterizzati da aree di ricarica circoscritte. Per questa casistica è possibile considerare come valido l'anno di ricarica leggibile in ordinata del grafico di Figura 6.40.

Nel momento in cui il valore di $^3\text{H}_{\text{init}}$ non ricade in corrispondenza dell'input curve, quindi discostandosi dalla condizione di PFM, è possibile che le particelle di acqua contenute nel campione possano essere affette da dispersione o mixing. La condizione di dispersione idrodinamica (Dispersion Model - DM) si riscontra quando un dato di $^3\text{H}_{\text{init}}$ (del campione) è superiore al dato di trizio misurato per l'anno in cui ci si aspetta l'input d'infiltrazione; diversamente, la condizione di mixing secondo un mixing binario (Binary Mixing Model - BMM) o secondo un flusso a pistone esponenziale (Exponential Piston model - EPM) si riscontra in entrambi i casi quando il dato di $^3\text{H}_{\text{init}}$ del campione risulta essere minore rispetto al trizio registrato nella serie storica. In questo caso, il dato misurato si posiziona più in basso rispetto al dato di trizio dell'input curve.

Per il dataset a disposizione è possibile escludere per tutti i campioni condizioni associabili ad un DM. Inoltre, per 25 campioni si rileva un comportamento del sistema acquifero riconducibile maggiormente ad un PFM (Figura 6.40) mentre per i rimanenti 28 pozzi, ovvero quelli i cui valori di $^3\text{H}_{\text{init}}$ si posizionano di sotto dei valori dell'input curve, si segnala come la circolazione idrica sotterranea segua un BMM o più probabilmente un EPM.

Tra le tipologie di mixing che possono variare di molto la composizione isotopica iniziale di un campione e la relativa interpretazione dell'età apparente, riconosciamo il mixing che vede la (1) compresenza di ^3He triziogenico e ^4He radiogenico all'interno

dello stesso campione ed il mixing con (2) una componente di acqua denominata “pre-bomb”, più antica dell’acqua sub-moderna, cioè acqua infiltratesi precedentemente al 1953 circa, anno di partenza dei primi esperimenti atomici che hanno immesso in atmosfera grandi quantità di trizio. Le acque pre-bomb e quelle arricchite in $^4\text{He}_{\text{rad}}$ hanno un potere “diluente” per la composizione isotopica del campione, sia per il trizio che per l’ $^3\text{He}_{\text{tri}}$, producendo rapporti ridotti tra i due traccianti, oltre che valori in generale più bassi. Di conseguenza, l’età apparente relativa ai campioni con comportamento simile ad EPM è rappresentata come la risultante di almeno due componenti che compongono il flusso: una corrispondente al flusso di base ed una seconda a carattere probabilmente esponenziale, che rappresenta la ricarica locale. Al fine di avanzare qualitativamente nell’interpretazione dei dati analitici, è possibile ipotizzare delle linee di mixing che possono spiegare la risultante della composizione misurata, sulla base di due possibili contributi principali. In Figura 6.40 è riportata in grigio la linea di mixing che meglio spiega i risultati ottenuti e che può rappresentare una chiave interpretativa dei pozzi che la intercettano, come nel caso del T4A, T1E, T1D e T7A, per citare solo qualche esempio. Il campione T1E che presenta un’età apparente di 50 ± 7 anni ed una composizione isotopica di $^3\text{H}_{\text{init}}$ risultato del mixing a due componenti, può essere spiegato con una prima componente rappresentata dalla composizione isotopica dell’input curve per l’anno 1976 (80%) mentre la restante (20%) è caratterizzata da una ricarica recente, datata al momento del campionamento, in questo caso il 2018. Per la falda captata dal pozzo T1E, si può pensare che l’età apparente sia la risultante di una circolazione sotterranea che ha un percorso molto più lungo, cui si somma una circolazione con percorso più breve e caratterizzata da input di ricarica più locale. Tale ipotesi trova una spiegazione anche da un punto di vista costruttivo e litologico, dal momento che il pozzo capta una porzione di falda dove sia sopra che immediatamente al bottom del filtro non risultano presenti depositi a bassa permeabilità, condizione favorevole per una ricarica verticale locale (in una condizione di EPM).

I campioni, infine, che non ricadono sulla linea ipotizzata di mixing rappresentata in Figura 6.40 possono considerarsi la risultante di altre tipologie di mixing, tutte sito- e/o pozzo-specifiche. Per citare un esempio, le acque campionate in corrispondenza del pozzo T4E presentano una composizione isotopica calcolata particolarmente

impoverita rispetto all'input curve, la cui età apparente può rappresentare la risultante di un mixing che vede acqua recente (2022) per circa l'80%, che si va a sommare ad una frazione di acqua pre-bomb (20%), ovvero molto povera in T e $^3\text{He}_{\text{tri}}$. Quanto riportato è in linea con i dati stratigrafici: questo pozzo presenta infatti due filtri entrambi molto profondi, che pescano l'ISI e l'ISP, intercettando plausibilmente una circolazione con età apparente maggiore.

La valutazione dell' $^3\text{H}_{\text{init}}$ ha reso possibile l'identificazione di due modelli di flusso principali che caratterizzano la circolazione idrica a scala regionale: il PFM ed il EPM. La condizione verificata di EPM risulta essere in linea dal punto di vista idrodinamico con il modello concettuale definito nelle elaborazioni precedenti che appunto vede localmente una giovane ed ingente ricarica dalla verticale per infiltrazione da eccesso irriguo.

6.4 Relazioni tra età, ricarica e concentrazioni di nitrato in falda

Il Cap. 6.3 ha evidenziato come, a scala regionale e per le falde dell'ISS dell'alta pianura, ci sia una relazione tra l'età della falda e la lunghezza del suo percorso idrico sotterraneo; nello specifico questa relazione è costituita da un progressivo ringiovanimento delle età della falda all'aumentare del suo percorso sotterraneo, in altre parole, si evidenzia una diminuzione delle età al procedere del flusso idrico sotterraneo verso la fascia dei fontanili. Questa relazione è ragionevolmente legata alla ricarica da eccesso irriguo: procedendo dalle zone pedemontane verso la fascia dei fontanili si realizza generalmente un aumento dell'infiltrazione dell'eccesso irriguo; quest'acqua di neo-infiltrazione per definizione ha un'età prossima allo zero ed è quindi in grado, mescolandosi con la falda più antica proveniente da monte idrogeologico, di ringiovanire l'età media di tutta la falda. Il legame tra età della falda e irrigazione agricola è ben mostrato dal box-plot di Figura 6.31, dove i campioni di falda prelevati in aree irrigue hanno presentato una mediana di età pari a 33 anni mentre quelli in zone non-irrigue hanno registrato una mediana di 49 anni. Questa differenza è risultata statisticamente significativa dal test di Mann-Whitney, che ha restituito un p-value di 5.37E-04.

Il ruolo dominante dell'eccesso irriguo nella ricarica delle falde dell'ISS nell'alta pianura è stato evidenziato anche dai traccianti isotopici ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) e chimici (Cl/Br) nel Cap. 6.2. L'eccesso irriguo è risultato la prima voce di ricarica della falda nelle zone irrigue. A sostegno di questa affermazione si rimanda alla Figura 6.4 dove emerge come la mediana di $\delta^2\text{H}$ della falda in zone irrigue, pari a -56.9‰, indichi una ricarica prevalente da eccesso irriguo, mentre la mediana di $\delta^2\text{H}$ in zone non-irrigue, pari a -51.2‰, indichi una ricarica prevalente da piogge locali; la differenza tra queste due mediane è statisticamente significativa secondo il test di Mann-Whitney (p-value di 6.7E-07).

Questo risultato è in linea e conferma la relazione identificata tra età e percorso idrico sotterraneo, in quanto la diminuzione di età delle falde lungo il loro percorso verso valle idrogeologico, dovuta all'infiltrazione delle acque di irrigazione in eccesso, è validata dai traccianti di ricarica che indicano l'eccesso irriguo come voce principale di ricarica. Questa validazione è indicata in Figura 6.41 e Figura 6.42, che mostrano rispettivamente lo scatterplot delle età contro $\delta^2\text{H}$ e il box-plot delle età secondo classi di $\delta^2\text{H}$. Dalla Figura 6.41 è possibile leggere una generale tendenza di diminuzione delle età al diminuire dei valori di $\delta^2\text{H}$ (indicando una maggiore ricarica da eccesso irriguo). Nella Figura 6.42, le tre classi di $\delta^2\text{H}$ considerate indicano un'alimentazione prevalente da piogge locali (-53/-47‰), mista (-56/-53‰) e prevalente da eccesso irriguo (-56/-63‰). Vediamo come l'età mediana diminuisca progressivamente al passare dalla prima alla terza delle tre classi sopracitate: da 38.9 anni per la classe ad alimentazione prevalente da piogge locali (-53/-47‰ di $\delta^2\text{H}$) a 26.8 anni per quella ad alimentazione prevalente da eccesso irriguo (-56/-63‰ di $\delta^2\text{H}$).

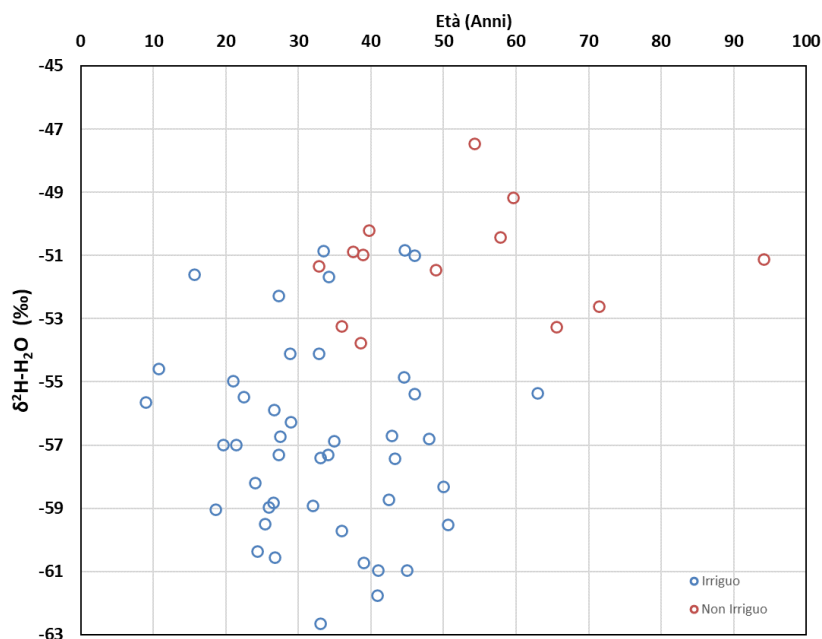


Figura 6.41 Scatterplot età vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli riferiscono all'ubicazione del pozzo in area irrigua o meno. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2 e alla Tabella 6.4

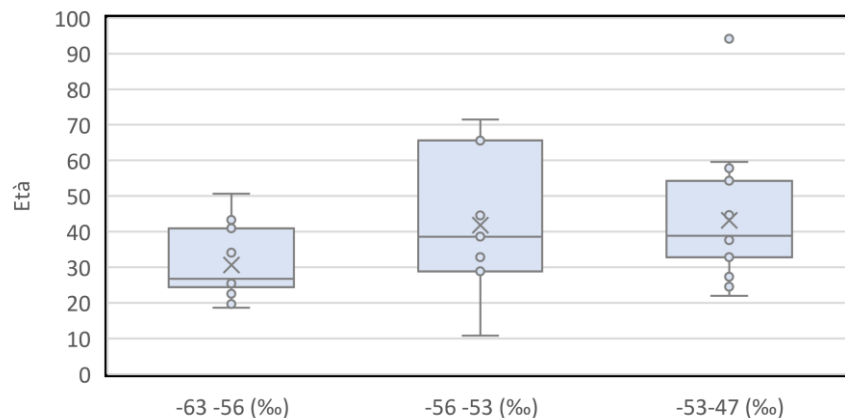


Figura 6.42 Box-plot delle età secondo classi di $\delta^2\text{H}$. Per i dati puntuali fare riferimento alla Tabella 5.2 e alla Tabella 6.4

In questo quadro delineato sul funzionamento del sistema idrogeologico dell'ISS di alta pianura risulta interessante e fondamentale inserire anche l'evoluzione delle concentrazioni di nitrato. La Figura 6.43 mostra lo scatterplot dei valori di $\delta^2\text{H}$ contro le concentrazioni medie di NO_3 calcolate per ciascun pozzo in base ai dati disponibili. È possibile osservare un iniziale aumento di concentrazioni di NO_3 all'aumentare

progressivo del contributo alla ricarica da parte dell'eccesso irriguo (quindi al diminuire di $\delta^2\text{H}$) fino a raggiungere i massimi valori di nitrato (superiori al limite dei 50 mg/L) in corrispondenza di valori di $\delta^2\text{H}$ compresi generalmente tra -54 e -57‰, che possono essere interpretati come l'espressione di un'irrigazione "non-intensiva". Questi picchi di NO_3 possono essere quindi interpretati come l'effetto della lisciviazione dell'eccesso di azoto dai campi agricoli sottoposti ad irrigazione, fenomeno ben noto in letteratura (Chen et al., 2010; Diez et al., 2000; Poch-Massegú et al., 2014; Schmidt and Sherman, 1987; Yesilnacar and Gulluoglu, 2008). All'aumentare ulteriore della ricarica da eccesso irriguo, quindi al diminuire dei valori di $\delta^2\text{H}$, è possibile osservare un ribaltamento della relazione precedentemente individuata: è possibile osservare una diminuzione di NO_3 al diminuire di $\delta^2\text{H}$. Questa diminuzione delle concentrazioni di NO_3 è individuabile per valori di $\delta^2\text{H}$ compresi tra -58 e -63‰, che possono essere considerati come indicatori di un'irrigazione "intensiva". Questa diminuzione di NO_3 può essere interpretata come l'effetto della diluizione esercitata dal largo eccesso irriguo, in linea con quanto dimostrato da studi precedenti (Rotiroti et al. 2019, 2023). Questa evoluzione di nitrato al variare di $\delta^2\text{H}$ è ben visibile dal box-plot di Figura 6.44 dove da una mediana di nitrato pari a 36.6 mg/L per le falde ricaricate principalmente da pioggia locale ($\delta^2\text{H}$ tra -53 e -47‰) si passa ad una mediana di 40.5 mg/L per le falde alimentate in maniera mista tra piogge ed eccesso irriguo ($\delta^2\text{H}$ tra -56 e -53‰) per poi diminuire fino a 24.9 mg/L per le falde alimentate principalmente da eccesso irriguo ($\delta^2\text{H}$ tra -63 e -56‰). L'effetto dell'intensità dell'irrigazione sulle concentrazioni di nitrato in falda, discusso precedentemente, è visibile più chiaramente se le classi di $\delta^2\text{H}$ sono suddivise, in funzione del picco di NO_3 emerso dalla Figura 6.43, in maniera da indicare assenza di irrigazione ($\delta^2\text{H}$ tra -54 e -47‰), irrigazione non-intensiva ($\delta^2\text{H}$ tra -58 e -54‰) e irrigazione intensiva ($\delta^2\text{H}$ tra -63 e -58‰), come mostrato in Figura 6.45. Le mediane di nitrato sono risultate pari a 36.4 mg/L in assenza di irrigazione, 41.0 mg/L con irrigazione non-intensiva e 19.5 mg/L con irrigazione intensiva.

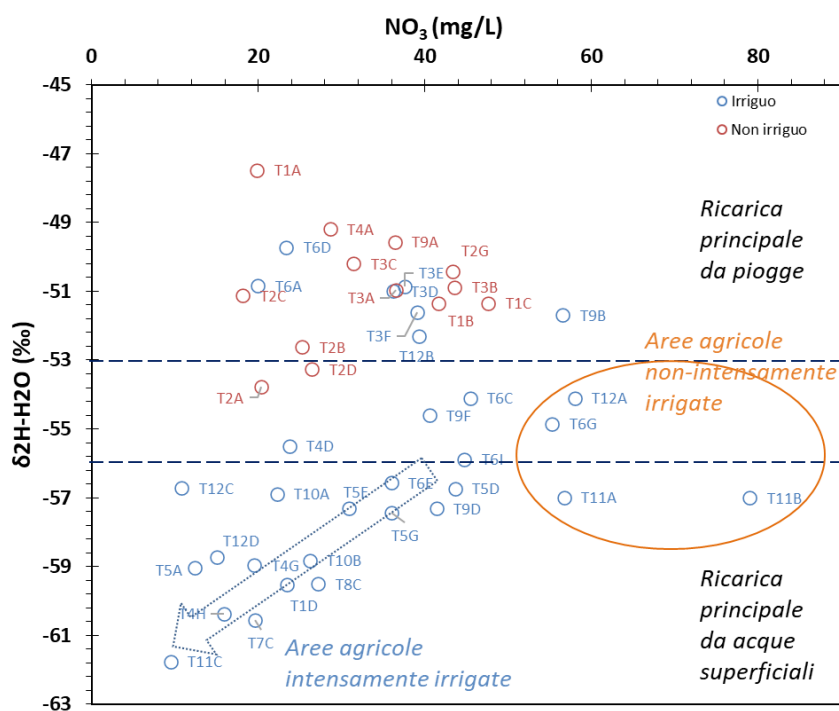


Figura 6.43 Scatterplot delle concentrazioni medie di nitrato vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli riferiscono all'ubicazione del pozzo in area irrigua o meno

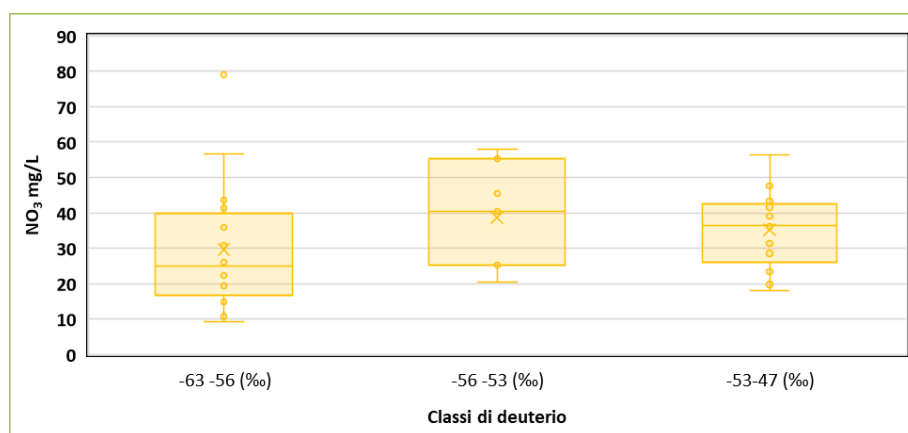


Figura 6.44 Box-plot delle concentrazioni medie di nitrato secondo classi di $\delta^2\text{H}$

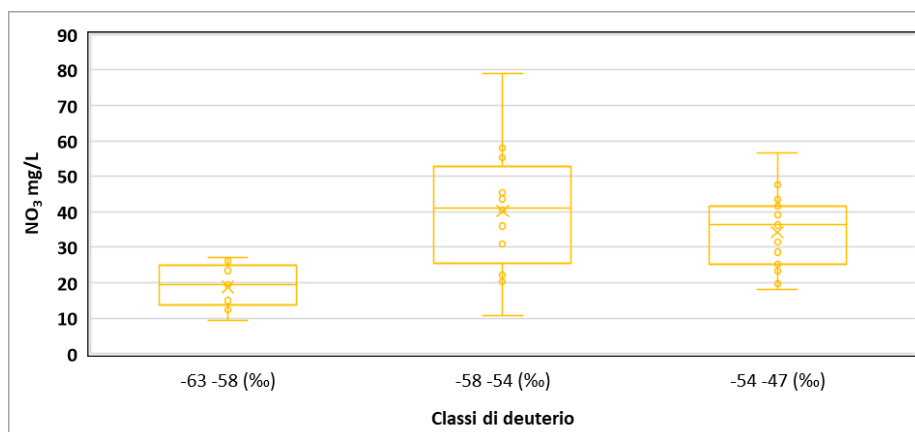


Figura 6.45 Box-plot delle concentrazioni medie di nitrato secondo classi di $\delta^2\text{H}$ - focus sull'effetto dell'intensità dell'irrigazione

L'ultimo elemento di sintesi è fornito dall'unione tra concentrazioni di nitrato, voci di ricarica ed età della falda, come mostrato in Figura 6.46. Anche se i valori di età risultano maggiormente dispersi, è possibile identificare una relazione caratterizzata da concentrazioni di NO_3 intermedie per ricarica prevalente da piogge locali (valori isotopici più arricchiti) ed età maggiori, passando a concentrazioni di NO_3 maggiori per ricarica mista (valori isotopici intermedi), associabile ad un'irrigazione non-intensiva, ed età intermedie, per arrivare infine a concentrazioni minori di NO_3 per ricarica prevalente da eccesso irriguo (valori isotopici più impoveriti) ed età minori.

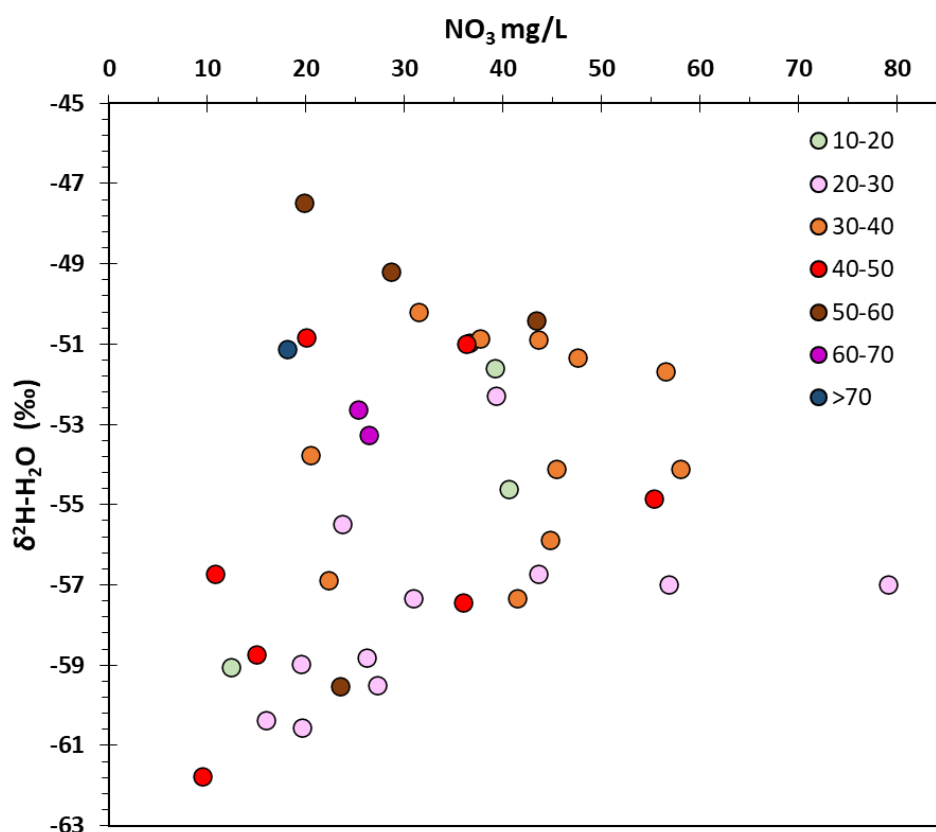


Figura 6.46 Scatterplot delle concentrazioni medie di nitrato vs $\delta^2\text{H}$. I colori dei simboli si riferiscono alle classi d'età presentate in Figura 6.28

6.5 Elaborazione dei dati pluviometrici ed irrigui

Dal tracciamento delle voci di ricarica è emerso che le principali voci di ricarica della falda superficiale (ISS) di alta e media pianura sono le precipitazioni locali e l'eccesso irriguo. In questo capitolo vengono elaborati i dati acquisiti relativi a queste due voci di ricarica, in maniera tale da poter poi, nel capitolo successivo, relazionare i dati pluviometrici e irrigui con le età della falda e gli andamenti temporali di nitrato.

6.5.1 Dati pluviometrici

L'analisi della distribuzione spaziale dei dati pluviometrici ha avuto l'obiettivo di quantificare le precipitazioni locali per ciascun punto della rete di monitoraggio, dal momento che assieme all'input da eccesso irriguo, rappresenta una delle principali voci di ricarica alla falda (Cap 6.2).

Per ciascuna delle 39 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio regionale (Figura 3.4), sono stati raggruppati i dati giornalieri di precipitazione in modo da poter calcolare le precipitazioni cumulate annue per un periodo di 15 anni (2005-2020). Sul dato cumulato annuale si è proceduto ad un'analisi atta a verificare la completezza del dato, sia a scala di singolo anno, come anche per tutta la serie storica a disposizione. Il criterio valutativo scelto per la verifica della significatività e completezza della serie di dati su scala annuale è stato quello di considerare utili i dati cumulati annui relativi a misure che non avessero un gap informativo maggiore a 30 giorni. In Tabella 6.5, è riportata, per uno stesso anno, la somma delle mancate misure per singola stazione, nella finestra temporale dal 2005 al 2020, riportando in giallo dati mancanti maggiori a 20 giorni, come soglia di attenzione, ed in rosso misure non rilevate superiori a 30 giorni quale soglia limite. L'approccio utilizzato ha fatto emergere la presenza di importanti gap informativi per molte stazioni, soprattutto nella finestra temporale tra il 2005 ed il 2012, da un minimo di 5 stazioni con dati incompleti nel 2008 (13% sul totale) fino ad un massimo di 14 nel 2005 (36% sul totale) (Tabella 6.5, Figura 6.47). Dal 2013 al 2020, invece, si rileva una buona copertura temporale dei dati registrati, a meno di due stazioni, 1205 e 1228, localizzate a Molteno (LC) e Goito (MN), rispettivamente (Tabella 6.5, Figura 6.47). In virtù di questa valutazione è stata selezionata la finestra temporale dal 2013 al 2020 per tutte le serie storiche delle stazioni meteo a disposizione, ad esclusione delle due stazioni 1205 e 1228 di Molteno e Goito. In questo modo, si è passati ad una disponibilità informativa di 37 stazioni (su 39) (Figura 6.48), garantendo comunque una copertura a scala almeno provinciale anche nel caso delle aree dove non sono state considerate le due stazioni (LC e MN). I dati di precipitazione cumulata annuale per le 37 stazioni meteo selezionate, sono stati mediati nella finestra 2013-2020 ed utilizzati per un'interpolazione spaziale secondo il metodo dei poligoni di Thiessen (Figura 6.49).

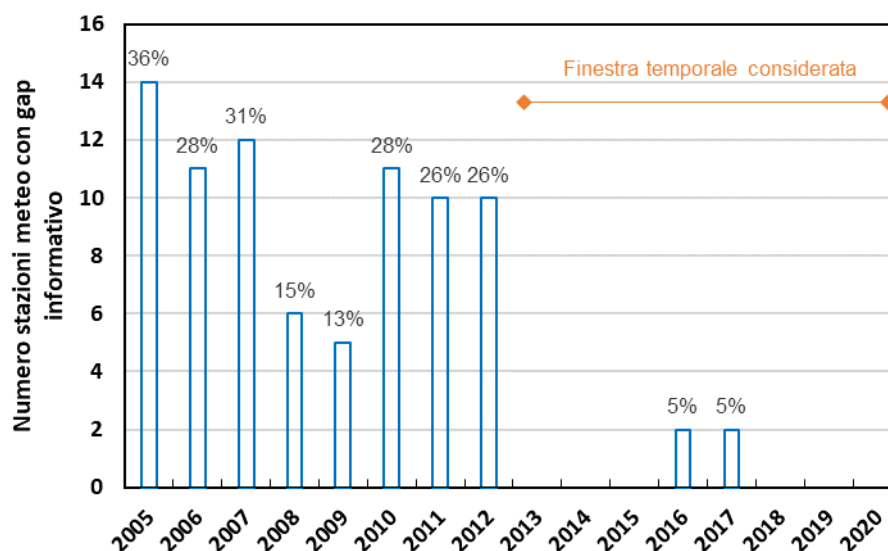


Figura 6.47 Numero di stazioni meteo che presentano un gap informativo maggiore ai 30 giorni su ogni anno di misura nella finestra d'acquisizione 2005-2020. La linea arancione indica la finestra temporale (2013-2020) presa in considerazione per il presente studio

Tabella 6.5 Somma delle mancate misure per singola stazione meteo nella finestra temporale dal 2005 al 2020; in giallo sono riportati dati mancanti maggiori a 20 giorni, come soglia di attenzione, mentre in rosso vengono segnalate le misure non rilevate superiori ai 30 giorni per uno stesso anno

#	ID Stazione	Comune	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	119	SAN GIOVANNI BIANCO	20	3	0	0	16	0	2	1	0	1	0	5	5	0	0	0
2	132	BERGAMO	7	1	37	26	204	0	16	0	0	1	0	1	6	0	0	0
3	874	SARNICO	10	1	0	0	0	0	2	1	0	4	0	3	4	0	0	0
4	889	TORRE BOLDONE	10	0	0	0	0	0	92	117	0	16	3	2	7	0	0	0
5	1209	ROTA DIMAGNA	365	123	217	42	19	228	4	1	0	2	1	5	3	8	6	0
6	1210	RANZANICO	26	12	40	1	6	1	4	0	0	0	0	3	7	0	0	0
		CASTIONE DELLA																
7	1212	PRESOLANA	24	12	123	1	4	1	334	317	0	0	2	7	9	1	0	0
8	1221	CASNIGO	57	14	37	20	4	10	5	0	0	1	0	8	8	0	1	0
9	129	CAPO DI PONTE	17	0	0	1	18	0	30	0	0	1	0	4	4	0	6	0
10	130	BRESCIA	23	0	1	0	5	0	7	0	0	1	2	3	6	0	0	0
11	134	CORZANO	181	23	4	7	115	234	35	0	1	3	19	2	5	0	0	0
12	145	DARFO BOARIO TERME	51	23	67	21	20	0	5	0	0	1	5	1	7	0	0	11
13	820	PISOGNE	8	1	1	0	0	1	4	1	0	2	1	9	14	1	1	0
14	851	TREVISO BRESCIANO	10	1	1	0	1	4	39	11	1	3	0	5	6	1	0	0
15	877	BOVEGNO	10	0	0	0	0	2	1	1	6	5	0	5	6	0	0	3
16	900	CHIARI	10	0	1	0	0	28	1	2	1	2	0	2	7	0	0	4
17	910	MANERBIO	10	0	1	0	0	0	0	1	0	13	0	2	5	0	0	0
18	865	CANTU	19	4	3	0	0	2	153	103	0	3	0	8	6	0	2	0
19	867	CASLINO DERBA	10	0	0	0	0	0	9	2	0	3	2	6	11	2	1	0
20	870	COMO	10	0	0	0	0	0	4	1	0	21	9	3	4	0	0	0
21	911	LAMBRUGO	10	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	6	6	0	0	0
22	1233	LURAGO MARINONE	55	60	239	15	29	94	4	0	1	0	1	3	6	0	0	0
23	137	RIVOLTA DADDA	237	44	6	120	67	0	11	4	2	1	0	3	6	0	0	0
24	111	CASSINA VALSASSINA	37	72	88	130	309	23	13	0	0	1	0	6	6	1	1	0
25	1205	MOLTENO	52	53	11	5	6	7	59	0	0	0	0	139	94	0	0	0
26	1224	CORTENOVA	43	75	207	6	13	12	4	0	0	0	4	3	6	0	0	0
27	1234	OSNAGO	31	56	21	23	6	15	5	0	0	1	1	4	6	0	0	0
28	903	MISINTO	16	0	0	1	0	0	0	1	0	3	0	12	6	0	0	0
29	100	MILANO	74	0	94	1	18	0	62	8	0	1	0	5	6	0	0	0
30	147	CINISELLO BALSAMO	29	49	109	159	60	9	121	1	0	15	3	5	6	0	1	0
31	873	PONTI SUL MINCIO	10	0	2	0	0	0	62	1	0	3	4	14	5	0	2	2
32	1228	GOITO	50	45	34	81	24	27	10	0	0	0	0	123	50	0	0	1
33	884	CUVEGLIO	18	0	0	0	0	0	0	1	1	13	1	5	5	0	1	0
34	885	ARCISATE	18	0	0	0	0	0	3	1	0	3	1	4	7	0	0	0
35	897	BUSTO ARSIZIO	17	0	0	0	0	31	0	1	0	3	2	2	6	0	0	0
36	907	VARESE	15	0	0	0	0	0	0	1	0	8	1	3	8	0	0	0
37	998	LAVENO - MOMBELLO	18	0	0	0	2	111	365	85	0	15	2	1	5	0	1	0
38	1206	CAVARIA CON PREMEZZO	160	35	30	36	4	8	4	0	0	0	1	3	5	0	0	0
39	1211	CASTRONNO	365	73	11	14	10	98	4	5	2	0	2	2	6	0	0	0

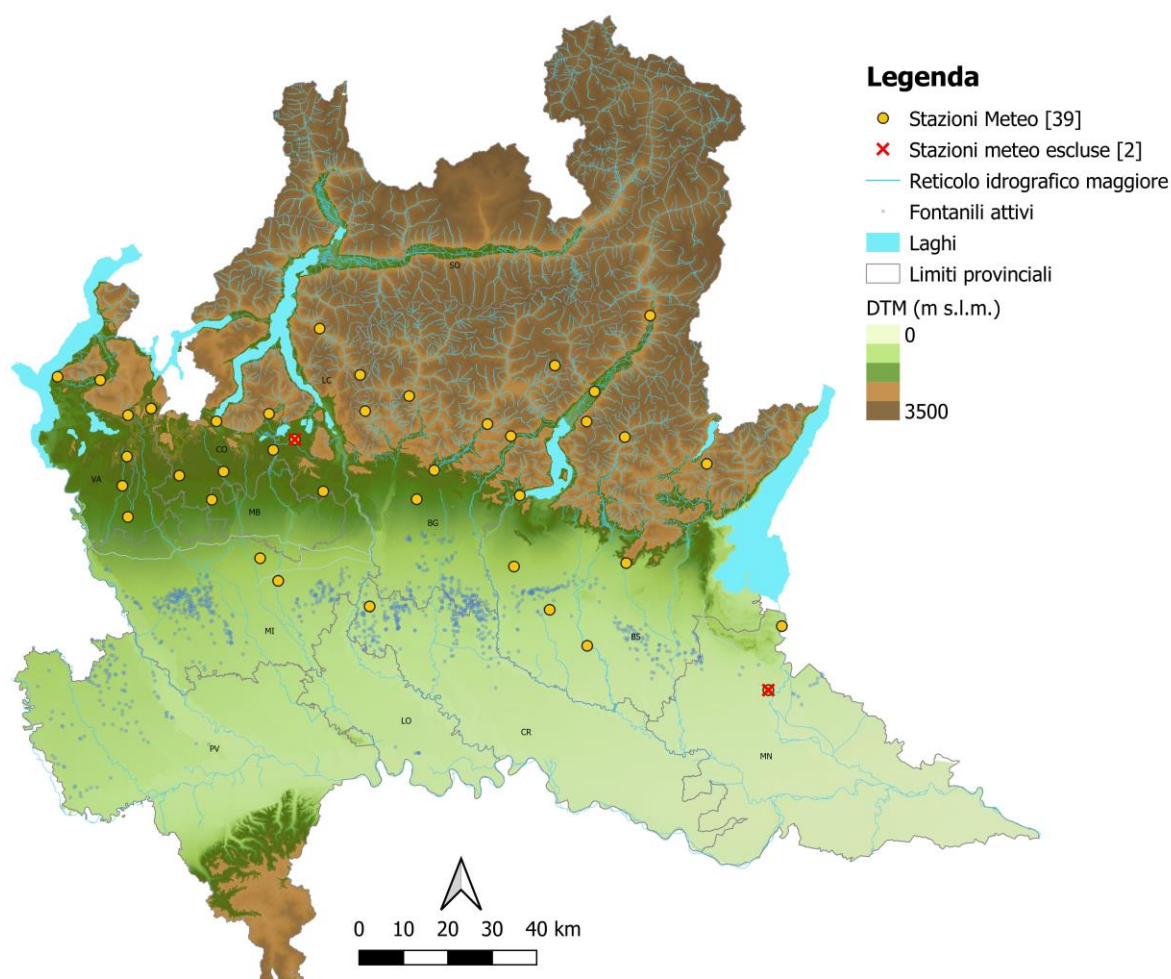


Figura 6.48 Mappa delle stazioni meteo con indicazione delle due stazioni 1205 e 1228, di Molteno (LC) e Goito (MN), escluse dalla trattazione

In tal modo è stato possibile associare a ciascun punto della rete di monitoraggio un valore di precipitazione media (mm) in funzione della stazione meteo rappresentativa di quel determinato areale. In definitiva, i dati di precipitazione media associati ad ogni punto della rete di monitoraggio sono stati calcolati a partire da valori registrati da 17 stazioni meteo (Tabella 6.6). In Figura 6.49 e Figura 6.50 è possibile osservare una variabilità spaziale significativa, con valori di precipitazione media maggiori per le stazioni ubicate a latitudini maggiori ma anche un gradiente che si esprime con valori in diminuzione procedendo da ovest verso est.

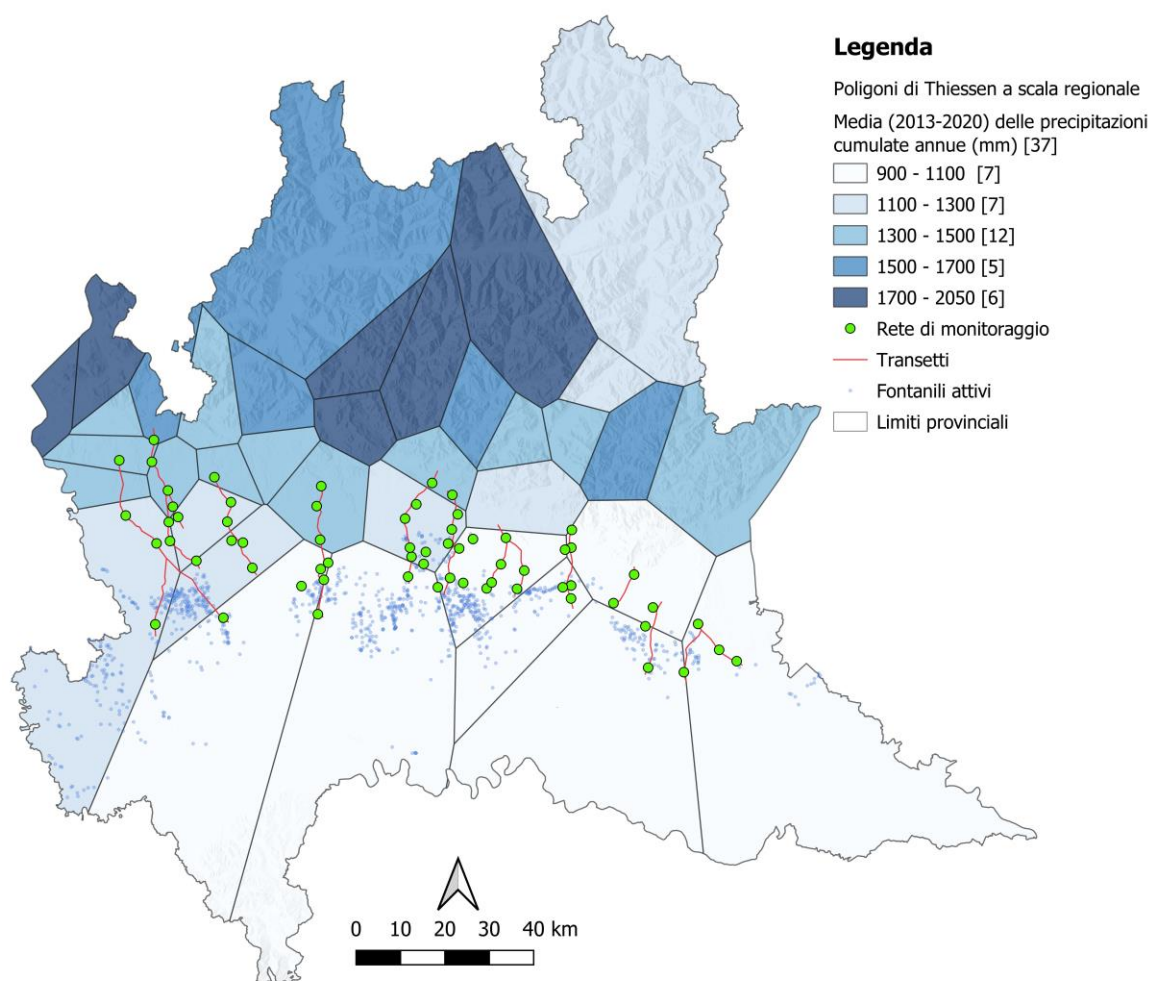


Figura 6.49 Interpolazione spaziale dei dati medi delle precipitazioni cumulate annue (mm) e rappresentazione della rete di monitoraggio

Tabella 6.6 Sensori meteo associati ad ogni punto della rete di monitoraggio con rispettivo dato di media (2013- 2020) delle precipitazioni (mm)

#	Codice progetto	COORD_EST	COORD_NORD	PV	Comune	Stazione	Selezione	UTM_Nord	UTM_Est	PV	Media (2013-2020) delle precipitazioni cumulate annue (mm)
1	T1A	485002	5065315	VA	Albizzate	1211	1	5066146	486058	VA	1438.40
2	T1B	486453	5052880	VA	Busto Arsizio	897	1	5052553	486271	VA	1172.35
3	T1C	493394	5046599	MI	San Giorgio su Legnano	897	1	5052553	486271	VA	1172.35
4	T1D	493116	5028379	MI	Abbiategrosso	897	1	5052553	486271	VA	1172.35
5	T1E	508448	5029865	MI	Buccinasco	100	1	5038171	520120	MI	1070.15
6	T2A	492805	5069886	CO	Binago	885	1	5076955	491501	VA	1579.33
7	T2B	492344	5064960	VA	Venegono Inferiore	1233	1	5061867	497850	CO	1401.72
8	T2C	495957	5058515	CO	Mozzate	1233	1	5061867	497850	CO	1401.72
9	T2D	497073	5054860	VA	Cislago	1233	1	5061867	497850	CO	1401.72
10	T2F	496153	5051408	MI	Rescaldina	897	1	5052553	486271	VA	1172.35
11	T2G	496431	5047129	MI	San Vittore Olona	897	1	5052553	486271	VA	1172.35
12	T2H	502359	5042684	MI	Rho	147	1	5043257	516051	MI	1126.42
13	T3A	506428	5061507	CO	Cermenate	865	1	5062780	507811	CO	1375.95
14	T3B	510155	5055878	MB	Barlassina	903	1	5056428	505172	MB	1248.58
15	T3C	509330	5051480	MB	Limbiate	903	1	5056428	505172	MB	1248.58
16	T3D	510294	5047238	MI	Senago	147	1	5043257	516051	MI	1126.42
17	T3E	512851	5046778	MI	Paderno Dugnano	147	1	5043257	516051	MI	1126.42
18	T3F	514971	5041096	MI	Milano	147	1	5043257	516051	MI	1126.42
19	T4A	530490	5059489	LC	Cernusco Lombardone	1234	1	5058312	530261	LC	1345.28
20	T4B	529470	5054991	MB	Carnate	1234	1	5058312	530261	LC	1345.28
21	T4C	530244	5047427	MB	Agrate Brianza	1234	1	5058312	530261	LC	1345.28
22	T4D	532049	5042247	MI	Gorgonzola	100	1	5038171	520120	MI	1070.15
23	T4E	530364	5040826	MI	Cassina De Pecchi	100	1	5038171	520120	MI	1070.15
24	T4F	531071	5038419	MI	Vignate	100	1	5038171	520120	MI	1070.15
25	T4G	526038	5036998	MI	Pioltello	100	1	5038171	520120	MI	1070.15
26	T4H	529722	5030665	MI	Settala	137	1	5032417	540720	CR	922.60

#	Codice progetto	COORD_EST	COORD_NORD	PV	Comune	Stazione	Selezione	UTM_Nord	UTM_Est	PV	Media (2013-2020) delle precipitazioni cumulate annue (mm)
27	T6A	560015	5057521	BG	Brusaporto	889	1	5063070	555269	BG	1420.72
28	T5B	551901	5055400	BG	Stezzano	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
29	T5C	549371	5052184	BG	Levate	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
30	T6G	559508	5038835	BG	Covo	900	1	5041392	573236	BS	999.73
31	T6C	559894	5049743	BG	Ghisalba	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
32	T5F	550831	5043595	BG	Brignano Gera D'Adda	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
33	T5A	555466	5060205	BG	Gorle	889	1	5063070	555269	BG	1420.72
34	T5H	550048	5039116	BG	Caravaggio	137	1	5032417	540720	CR	922.60
35	T6I	556753	5036727	BG	Isso	137	1	5032417	540720	CR	922.60
36	T6B	561235	5053148	BG	Calcinante	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
37	T5D	550460	5045643	BG	Lurano	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
38	T6E	559068	5046574	BG	Martinengo	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
39	T5E	554043	5044672	BG	Morengo	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
40	T6F	561560	5045457	BG	Martinengo	900	1	5041392	573236	BS	999.73
41	T5G	553557	5041981	BG	Pagazzano	132	1	5056541	551321	BG	1239.75
42	T6H	562464	5037700	BG	Antegnate	900	1	5041392	573236	BS	999.73
43	T6D	564666	5047586	BG	Palosco	900	1	5041392	573236	BS	999.73
44	T7A	570974	5041899	BS	Chiari	900	1	5041392	573236	BS	999.73
45	T7B	568874	5037803	BS	Rudiano	900	1	5041392	573236	BS	999.73
46	T7C	567748	5036468	BG	Pumenengo	900	1	5041392	573236	BS	999.73
47	T8A	572081	5047850	BS	Cologne	900	1	5041392	573236	BS	999.73
48	T8B	576212	5040497	BS	Castrezzato	900	1	5041392	573236	BS	999.73
49	T8C	574582	5036376	BS	Comezzano-Cizzago	900	1	5041392	573236	BS	999.73
50	T9A	586929	5049639	BS	Rodengo - Saiano	130	1	5042175	598502	BS	982.95
51	T9B	586813.01	5045648.31	BS	Castegnato	130	1	5042175	598502	BS	982.95
52	T9C	585398	5045187	BS	Castegnato	900	1	5041392	573236	BS	999.73
53	T9D	586775.97	5037120.31	BS	Azzano Mella	134	1	5031659	581271	BS	925.70
54	T9E	584895	5036719	BS	Lograto	134	1	5031659	581271	BS	925.70
55	T9F	586750.52	5034207.15	BS	Azzano Mella	134	1	5031659	581271	BS	925.70

#	Codice progetto	COORD_EST	COORD_NORD	PV	Comune	Stazione	Selezione	UTM_Nord	UTM_Est	PV	Media (2013-2020) delle precipitazioni cumulate annue (mm)
56	T10A	600963	5039596	BS	Brescia	130	1	5042175	598502	BS	982.95
57	T10B	596315	5033160	BS	Montirone	130	1	5042175	598502	BS	982.95
58	T11A	605200	5032183	BS	Montichiari	130	1	5042175	598502	BS	982.95
59	T11B	603498	5027951	BS	Calvisano	910	1	5023553	589720	BS	911.00
60	T11C	604118	5018644	BS	Isorella	910	1	5023553	589720	BS	911.00
61	T12A	615368	5028467	MN	Castiglione delle Stiviere	873	1	5027985	633560	MN	913.58
62	T12B	620111	5022646	MN	Medole	873	1	5027985	633560	MN	913.58
63	T12C	624064	5020093	MN	Guidizzolo	873	1	5027985	633560	MN	913.58
64	T12D	612166	5017617	MN	Castel Goffredo	910	1	5023553	589720	BS	911.00

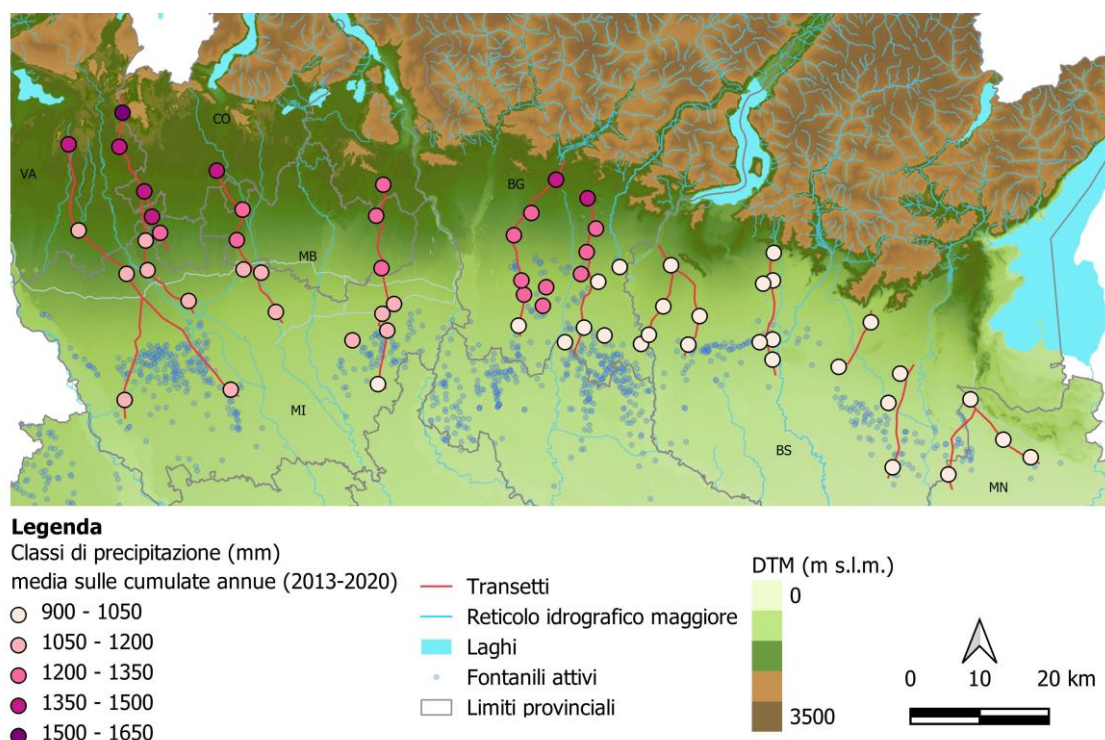


Figura 6.50 Classi di precipitazione (mm, valore medio sulle cumulate annue 2013-2020)

Con un dettaglio a scala di rete di monitoraggio, dove ad ogni pozzo è stato associato il valore di precipitazione della stazione meteorologica rappresentativa (Figura 6.50), è possibile confermare il gradiente nord-sud, osservando inoltre una variabilità con tendenza ovest-est e quindi anche in relazione ai transetti appartenenti alle diverse sotto-aree. Partendo da ovest, per i primi 4 transetti T1÷T4 (sotto-area Ticino-Adda), distribuiti tra le province di Varese, Como, Lecco, Monza-Brianza e Milano, è ben apprezzabile un gradiente dalle zone pedemontane a quelle di media pianura. Il valore massimo di precipitazione è di 1579.3 mm, rappresentando anche il valore maggiore per tutti i punti della rete di monitoraggio sperimentale, mentre il valore minimo è di 922.6 mm (Figura 6.50). I due transetti T5 e T6 (sotto-area Adda-Oglio), distribuiti in provincia di Bergamo, presentano valori di precipitazione massima di 1420.7 mm ed un minimo di 922.6 mm (Figura 6.50); anche per questa sotto-area osserviamo una discretizzazione spaziale delle precipitazioni con andamento nord-sud. Per i transetti T7÷T9 (sotto-area Oglio- Mella), ubicati nella provincia di Brescia, osserviamo una minore variabilità nei dati di precipitazione: il valore massimo registrato è di 999.7 mm

con un valore minimo di 925.7 mm. Un'influenza delle precipitazioni pressoché omogenea è quella che si riscontra anche per i transetti T10 e T11 (sotto-area Mella-Chiese; provincia di Brescia) dove registriamo un valore massimo di 982.9 mm e un minimo di 911 mm. Similmente, per il transetto T12 (sotto-area Chiese-Mincio, provincia di Mantova), le precipitazioni variano da 913.6 mm a 911 mm.

6.5.2 Dati irrigui

Una prima fase del lavoro riguardante i dati irrigui è stata quella di far convergere tutte le informazioni e il materiale fornito da ANBI in un database unico e di agile gestione (WP1, Cap 3.2.3). Le elaborazioni effettuate hanno portato allo sviluppo di un quadro di sintesi a scala di rete di monitoraggio; l'obiettivo è stato ancora una volta associare ai punti della rete di monitoraggio l'informazione relativa ai volumi d'acqua distribuiti durante la stagione irrigua (originati da corpi idrici superficiali).

Come visto già in precedenza, per la rete di monitoraggio (44 della rete sperimentale e 20 della rete UniPV), sono stati individuati 16 punti su 64 (il 25% sul totale) non ricadenti in zone irrigue; trattasi di pozzi ubicati nella sotto-area Ticino-Adda, a nord del canale Villoresi e del pozzo T9A, appartenente alla sotto-area Oglio-Mella. Questi 16 pozzi sono classificati in

Tabella 6.7 come *"Fuori dai comprensori irrigui"*. Per il restante 75% dei punti monitorati (48 punti), ubicati in zona irrigua, è stato necessario comprendere quali di questi ricadessero in comprensori irrigui, elemento determinante per poter associare poi le informazioni a corredo utili al calcolo del volume irriguo distribuito. Di questi 48 pozzi, 11 non appartengono ad un comprensorio irriguo. L'appartenenza ad un comprensorio, che sia un distretto o un comizio irriguo (Figura 3.2) infatti, ha permesso di avere informazioni in merito all'areale irrigato, alla fonte di acqua utilizzata per quell'unità di territorio, al punto in cui viene monitorata la portata d'acqua erogata a scopo irriguo (canale, naviglio o roggia), e al relativo codice del misuratore di portata CeDATer.

Tabella 6.7 Valutazione dei volumi di acqua su ettari di superficie irrigua associati ai pozzi della rete sperimentale

#	Codice Progetto	PV	Comune	Codice Progetto	Ubicazione in area irrigua	Appartenenza ad un comprensorio irriguo	Fonte di approvvigionamento irriguo totale	Approvvigionamento irriguo diretto *	Codice misuratore di portata utilizzato	Volume per stagione irrigua 2021 (m³)	Volume irriguo su area agricola per la stagione 2021 (m³/ha)
1	T1A	VA	Albizzate	T1A	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
2	T1B	VA	Busto Arsizio	T1B	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
3	T1C	MI	San Giorgio su Legnano	T1C	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
4	T1D	MI	Abbiategrosso	T1D	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Naviglio Grande	m01101	265049.7	127.2
5	T1E	MI	Buccinasco	T1E	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Naviglio Grande	m01106	782736.8	30.5
6	T2A	CO	Binago	T2A	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
7	T2B	VA	Venegono Inferiore	T2B	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
8	T2C	CO	Mozzate	T2C	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
9	T2D	VA	Cislago	T2D	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
10	T2F	MI	Rescaldina	T2F	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
11	T2G	MI	San Vittore Olona	T2G	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
12	T2H	MI	Rho	T2H	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Canale Villoresi	m01092	20918.2	46.2
13	T3A	CO	Cermenate	T3A	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
14	T3B	MB	Barlassina	T3B	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
15	T3C	MB	Limbiate	T3C	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
16	T3D	MI	Senago	T3D	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Canale Villoresi	m01095	40380.0	75.8
17	T3E	MI	Paderno Dugnano	T3E	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Canale Villoresi	m01096	14785.3	39.9
18	T3F	MI	Milano	T3F	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Canale Villoresi	Media m01095 e m01096	27582.6	57.8
19	T4A	LC	Cernusco Lombardone	T4A	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
20	T4B	MB	Carnate	T4B	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
21	T4C	MB	Agrate Brianza	T4C	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
22	T4D	MI	Gorgonzola	T4D	SI	SI	Fiume Ticino (diretto)	Canale Villoresi	m01100	149717.0	100.3
23	T4E	MI	Cassina De Pecchi	T4E	SI	SI	Fiume Adda (diretto)	Naviglio Martesana	m01109	524100.0	95.9
24	T4F	MI	Vignate	T4F	SI	SI	Fiume Adda (diretto)	Naviglio Martesana	m01109	524100.0	95.9

#	Codice Progetto	PV	Comune	Codice Progetto	Ubicazione in area irrigua	Appartenenza ad un comprensorio irriguo	Fonte di approvvigionamento irriguo totale	Approvvigionamento irriguo diretto *	Codice misuratore di portata utilizzato	Volume per stagione irrigua 2021 (m³)	Volume irriguo su area agricola per la stagione 2021 (m³/ha)
25	T4G	MI	Pioltello	T4G	SI	SI	Fiume Adda (diretto)	Naviglio Martesana	m01109	524100.0	95.9
26	T4H	MI	Settala	T4H	SI	SI	Fiume Adda (diretto)	Canale Muzza	m01113	74031	65.63
27	T5A	BG	Gorle	T5A	SI	SI	Fiume Serio (diretto)	Roggia Morlana	m00017	298212.2	394.5
28	T5B	BG	Stezzano	T5B	SI	SI	Fiume Serio (diretto)	Roggia Serio	m00016	291575.4	121.3
29	T5C	BG	Levate	T5C	SI	SI	Fiume Serio (diretto)	Roggia Morlana	m00017	298212.2	394.5
30	T5D	BG	Lurano	T5D	SI	SI	Fiume Adda (diretto) Fiume Serio (a monte)	Canale Adda-Serio	m00097	60862.4	80.4
31	T5E	BG	Morengo	T5E	SI	NO	Fiume Adda (a monte) Fiume Serio (a monte)	Roggia Urgnana (a monte) e Roggia Serio (a monte)	Media m00086 e m00016	151517.0	67.0
32	T5F	BG	Brignano Gera D'adda	T5F	SI	SI	Fiume Brembo (diretto) Fiume Adda (a monte) Fiume Serio (a monte)	Roggia Moschetta	m00018	101024.1	75.8
33	T5G	BG	Pagazzano	T5G	SI	NO	Fiume Adda (a monte) Fiume Serio (a Monte) Pozzi privati (a monte)	Roggia Urgnana (a monte) e Roggia Serio (a monte)	Media m00086 e m00016	151517.0	67.0
34	T5H	BG	Caravaggio	T5H	SI	SI	Pozzi consortili (diretto) Fiume Brembo (a monte) Fiume Adda (a monte) Fiume Serio (a monte)	Roggia Moschetta (a monte) Canale Adda-Serio (a monte) Roggia Morlana (a monte) Roggia Serio (a monte)	Media m00018, m00097, m00017 e m00016	187918.5	168.0
35	T6A	BG	Brusaporto	T6A	SI	SI	Fiume Serio (diretto)	Roggia Borgogna	m00020	279928.0	99.1
36	T6B	BG	Calcinatè	T6B	SI	SI	Fiume Serio (diretto)	Roggia Borgogna	m00020	279928.0	99.1
37	T6C	BG	Ghisalba	T6C	SI	SI	Pozzi consortili (diretto) Fiume Serio (a monte)	Roggia Borgogna (a monte)	m00020	279928.0	99.1
38	T6D	BG	Palosco	T6D	SI	SI	Pozzi consortili (diretto) Fiume Serio (a monte)	Roggia Borgogna (a monte)	m00020	279928.0	99.1
39	T6E	BG	Martinengo	T6E	SI	SI	Pozzi consortili (diretto) Fiume Serio (a monte)	Roggia Borgogna (a monte)	m00020	279928.0	99.1
40	T6F	BG	Martinengo	T6F	SI	SI	Pozzi consortili (diretto) Fiume Serio (a monte)	Roggia Borgogna (a monte)	m00020	279928.0	99.1
41	T6G	BG	Covo	T6G	SI	NO	Fiume Serio (a monte) Fiume Oglio (a monte) Pozzi privati (a monte)	Roggia Borgogna (a monte) e Roggia Sale (a monte)	Media m00020 e m00032	270169.7	108.2
42	T6H	BG	Antegnate	T6H	SI	SI	Fiume Oglio (diretto) Pozzi (a monte)	Roggia Antegnata	m00042	117019.4	82.3
43	T6I	BG	Isso	T6I	SI	NO	Fiume Serio (a monte) Fiume Oglio (a monte) Pozzi privati (a monte)	Roggia Borgogna (a monte) e Roggia Sale (a monte)	Media m00020 e m00032	270169.7	108.2
44	T7A	BS	Chiari	T7A	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Seriola Vecchia	m00033	124582.5	79.1
45	T7B	BS	Rudiano	T7B	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Roggia Castellana e Antegnata	Media m00041 e m00042	178781.0	399.6
46	T7C	BG	Pumenengo	T7C	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Roggia Donna	m00033	124582.5	79.1
47	T8A	BS	Cologne	T8A	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Sollevamento Franciacorta	m00029	11944.9	5.7

#	Codice Progetto	PV	Comune	Codice Progetto	Ubicazione in area irrigua	Appartenenza ad un comprensorio irriguo	Fonte di approvvigionamento irriguo totale	Approvvigionamento irriguo diretto *	Codice misuratore di portata utilizzato	Volume per stagione irrigua 2021 (m³)	Volume irriguo su area agricola per la stagione 2021 (m³/ha)
48	T8B	BS	Castrezzato	T8B	SI	NO	Fiume Oglio (a monte)	Seriola Vecchia (a monte)	m00033	124582.5	79.1
49	T8C	BS	Comezzano-Cizzago	T8C	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Roggia Castellana	m00041	240542.6	634.7
50	T9A	BS	Rodengo - Saiano	T9A	NO	NO	Fuori dai comprensori irrigati	-	-	0.0	0.0
51	T9B	BS	Castegnato	T9B	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Roggia Seriola Nuova	m00036	597775.2	266.5
52	T9C	BS	Castegnato	T9C	SI	SI	Fiume Oglio (diretto)	Roggia Seriola Nuova	m00036	597775.2	266.5
53	T9D	BS	Azzano Mella	T9D	SI	SI	Pozzi e Fontanili (diretti) Fiume Oglio (a monte)	Castrina e Seriola Nuova (a monte)	Media m00037 e m00036	400670.9	193.1
54	T9E	BS	Lograto	T9E	SI	SI	Pozzi e Fontanili (diretti) Fiume Oglio (a monte)	Castrina e Seriola Nuova (a monte)	Media m00037 e m00036	400670.9	193.1
55	T9F	BS	Azzano Mella	T9F	SI	NO	Pozzi e Fontanili (a monte) Fiume Oglio (a monte)	Castrina e Seriola Nuova (a monte)	Media m00037 e m00036	400670.9	193.1
56	T10A	BS	Brescia	T10A	SI	SI	Fiume Chiese (diretto)	Naviglio Grande Bresciano	m00059	927322.2	130.3
57	T10B	BS	Montirone	T10B	SI	NO	Fiume Chiese (a monte)	Naviglio Grande Bresciano (a monte)	m00059	927322.2	130.3
58	T11A	BS	Montichiari	T11A	SI	NO	Fiume Chiese (a monte)	Naviglio Grande Bresciano (a monte)	m00059	927322.2	130.3
59	T11B	BS	Calvisano	T11B	SI	NO	Fiume Chiese (a monte)	Roggia Montichiara (a monte) Naviglio Grande Bresciano (a monte)	Media 00969 e m00059	600942.4	114.8
60	T11C	BS	Isorella	T11C	SI	NO	Fiume Chiese (a monte) Pozzi privati e fontanili (a monte)	Roggia Montichiara (a monte) Naviglio Grande Bresciano (a monte)	Media 00969 e m00059	600942.4	114.8
61	T12A	MN	Castiglione delle Stiviere	T12A	SI	NO	Fiume Chiese (a monte) Pozzi privati (a monte)	Roggia Calcinata e Roggia Lonata (a monte)	Media f00013 e f00010	188794.1	76.7
62	T12B	MN	Medole	T12B	SI	SI	Fiume Chiese (diretto)	Canale Arno'	m01160	227892.7	85.6
63	T12C	MN	Guidizzolo	T12C	SI	SI	Fiume Chiese (diretto)	Canale Arno'	m01160	227892.7	85.6
64	T12D	MN	Castel Goffredo	T12D	SI	SI	Fiume Mincio (diretto) Fiume Chiese (a monte) Fontanili e pozzi privati (a monte)	Canale secondario di Casalmoro (Canale Virgilio)	m01141	105048.2	20.1

*si indicano gli apporti diretti da acque superficiali; in caso di assenza di un apporto diretto viene riportato l'apporto irriguo proveniente da monte

A tal proposito in

Tabella 6.7, più precisamente nella colonna “Fonte di approvvigionamento irriguo totale” è riportata l’indicazione del corpo idrico che approvvigiona un determinato comprensorio irriguo. A corredo poi, tra parentesi viene fornita l’indicazione di un apporto diretto o da monte di una determinata fonte irrigua intendendo “da monte” tutte quelle casistiche per le quali il pozzo, pur non ricadendo in un comprensorio irriguo ma essendo comunque ubicato in zona irrigua, risenta degli approvvigionamenti delle zone poste a monte. Va da sé che per tutti i punti della rete ubicati all’interno di un comprensorio irriguo viene indicata l’informazione di un approvvigionamento di acqua diretto, talvolta unito al dettaglio dell’acqua proveniente anche da monte. Diversamente, per quei punti della rete che ricadono in zona irrigua ma non appartengono ad un comprensorio è disponibile unicamente l’informazione della/e fonte/i di approvvigionamento proveniente da monte (

Tabella 6.7). Per le finalità del progetto, come step metodologico è stato scelto di utilizzare per i punti della rete di monitoraggio solo le informazioni derivanti dalle fonti di approvvigionamento dirette dove disponibili ed esplicitate in

Tabella 6.7 nella colonna “*Approvvigionamento irriguo diretto*”. Per i punti della rete che ricadono in zona irrigua ma non appartengono ad un comprensorio e sono dunque in assenza di un apporto diretto è stata mantenuta l’informazione dell’apporto o degli apporti da monte.

A partire poi dall’informazione riportata nella colonna “*Approvvigionamento irriguo diretto*” è stato possibile associare il codice del misuratore di portata CeDATer, relativo ad ogni canale, naviglio o roggia in cui viene monitorata la quantità d’acqua erogata a scopo irriguo.

Il dataset CeDATer utilizzato riporta le serie giornaliere di portata misurata (m^3/s) per 34 misuratori (Figura 3.3; Tabella 3.2). I dati di portata sono stati elaborati ed espressi per ogni misuratore inizialmente come m^3/g , per arrivare poi ad un valore cumulato su tutta la stagione irrigua (1 aprile - 30 settembre). In Figura 6.51 sono riportati, per ciascun misuratore, i volumi (m^3) di acqua distribuiti durante le stagioni irrigue 2021 e 2022. Il grafico (Figura 6.51) rispecchia chiaramente il quadro di crisi idrica che ha riguardato il 2022 con minori volumi a scopo irriguo disponibili, e riduzioni registrate in

15 su 34 misuratori fino ad oltre il 50%. Proprio per tale motivo per le elaborazioni successive i dati della stagione irrigua del 2022 non sono stati presi in considerazione perché considerati non rappresentativi dei volumi irrigui “standard” distribuiti nell’area di studio. Sono stati invece considerati i dati della stagione 2021, considerati più rappresentativi della condizione normale; per questo motivo in

Tabella 6.7 è riportato il “Volume per stagione irrigua 2021 (m^3)”.

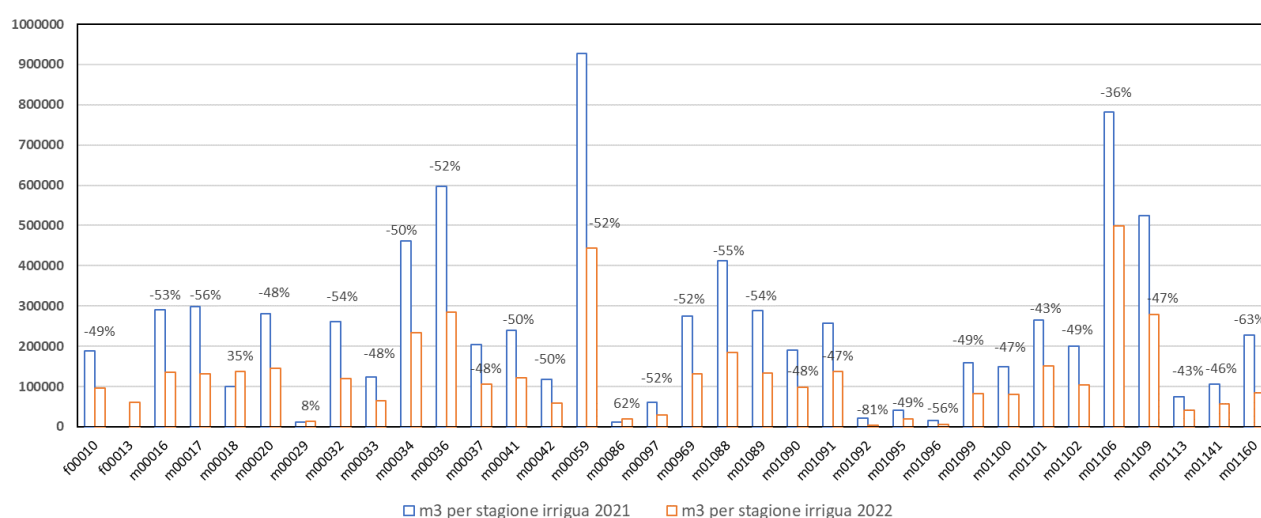


Figura 6.51 Istogramma dei volumi irrigui per le due stagioni irrigue 2021 e 2022 per i 34 misuratori CeDATer (Figura 3.3). Le etichette rappresentano la diminuzione percentuale dei volumi misurata per il 2022. Il misuratore con codice f00013 non presenta il monitoraggio della portata per il 2021

Il dato di volume irriguo calcolato per ciascun misuratore è stato poi associato a ciascun pozzo della rete. Per i pozzi ricadenti in un comprensorio è stato utilizzato il volume calcolato sul misuratore dell’approvvigionamento diretto (è stata calcolata la media nel caso di più misuratori). Per quei pozzi che non ricadono in un comprensorio ma che sono comunque ubicati in area irrigua, si è proceduto ad inserire come valore di volume irriguo la media dei volumi dei misuratori che caratterizzano gli apporti da monte. Con gli stessi criteri è stata popolata infine la colonna relativa “Volume irriguo su area agricola per la stagione 2021 (m^3/ha)”, dove il dato cumulato di volume irriguo è stato distribuito sulla superficie irrigata (ha) del comprensorio di appartenenza. I volumi irrigui sull’area agricola espressi in m^3/ha per la stagione 2021 sono stati infine rappresentati secondo 5 classi nella mappa di Figura 6.52. Dalla mappa è possibile

notare come i maggiori volumi irrigui caratterizzino i transetti T9 e T5, seguiti dai transetti T10 e T11.

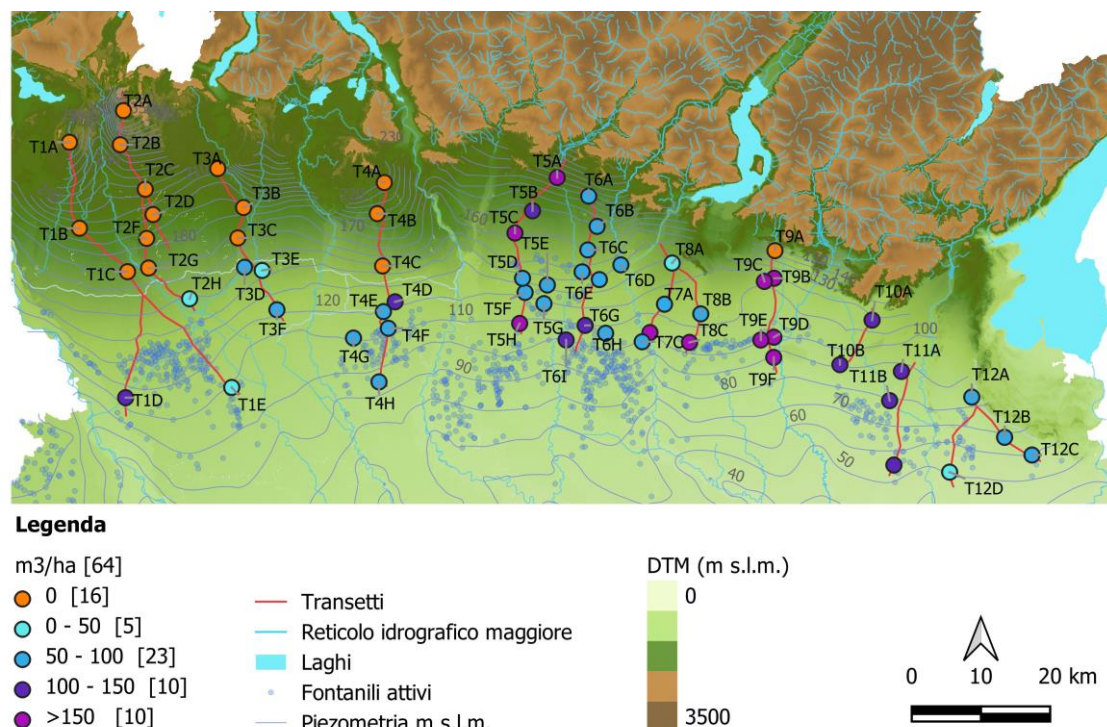


Figura 6.52 Mappa dei volumi di acqua distribuiti su territorio irriguo (m³/ha) per l'anno 2021, rappresentata su scala colori per ogni pozzo della rete di monitoraggio sperimentale. I dati fanno riferimento alla

Tabella 6.7

6.6 Relazioni tra andamenti temporali di nitrato e età della falda, voci di ricarica e carichi azotati agricoli

In base agli obiettivi del presente lavoro, risulta importante relazionare gli andamenti temporali dei nitrati su lungo periodo (16 anni) con tre tipologie di informazione: (1) le età della falda, che forniscono l'indicazione sui tempi di rinnovamento del sistema idrogeologico, (2) le due principali voci di ricarica emerse dallo studio, ovvero precipitazioni ed eccesso irriguo, parametrizzate rispettivamente come cumulata annua media e volumi irrigui distribuiti nella stagione irrigua (Cap. 6.5), (3) le sorgenti di azoto di origine agricola, parametrizzate come carico azotato, definito da ERSAF (Cap. 3.2.3), e categorizzate in funzione della presenza (ZVN) o assenza (ZnVN) di zone vulnerabili ai nitrati.

La Figura 6.53 mostra i profili temporali di nitrato nei pozzi (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni, con l'indicazione dell'età della falda. È necessario ricordare che il valore di età è presente solo per i pozzi della rete di monitoraggio del presente studio (quindi non per il totale dei pozzi sottoposti a cluster analysis). La Figura 6.54 mostra i box-plot di età della falda con la suddivisione dei pozzi per cluster. Da queste immagini è possibile verificare come non ci sia uno stretto legame diretto tra andamento temporale di NO_3 (cluster) ed età della falda, in quanto per la maggior parte dei cluster è presente una buona variabilità delle età. Uniche eccezioni sono costituite dai cluster F, dove i due pozzi datati per questo cluster hanno restituito età nel range 40-50 anni, e C, dove, ad eccezione di un pozzo, tutti gli altri pozzi (4) sono stati datati nel range 30-40 anni.

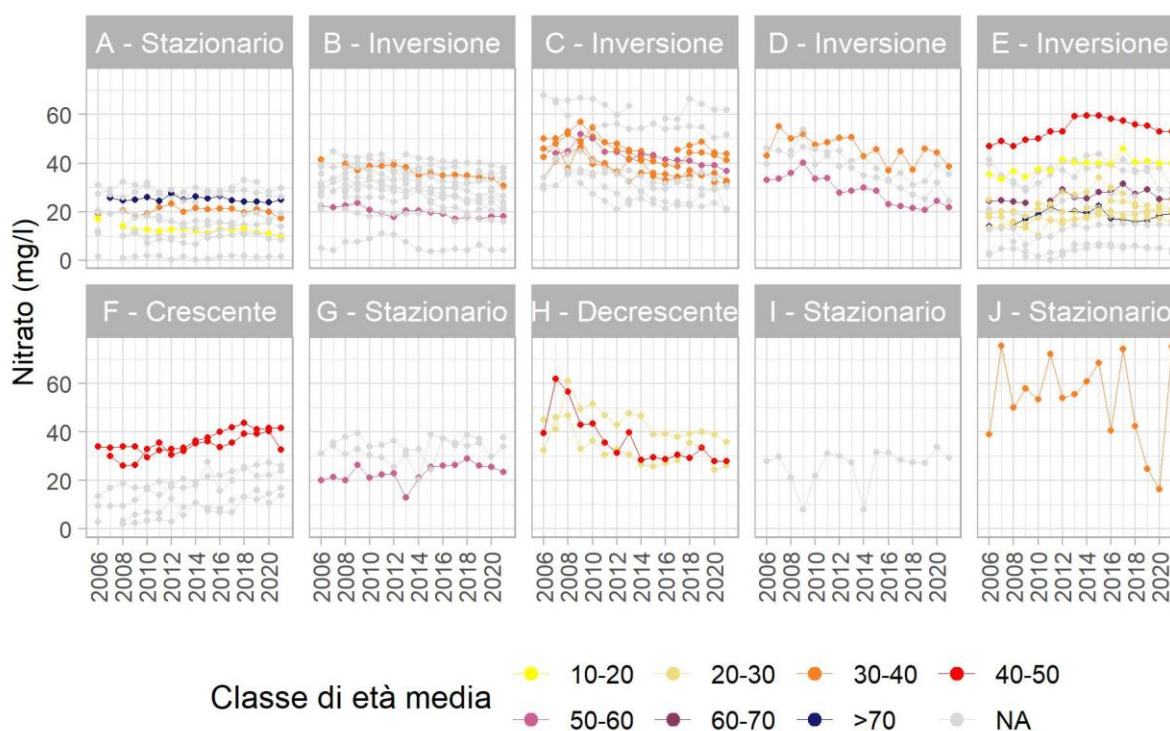


Figura 6.53 Profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione delle classi di età della falda

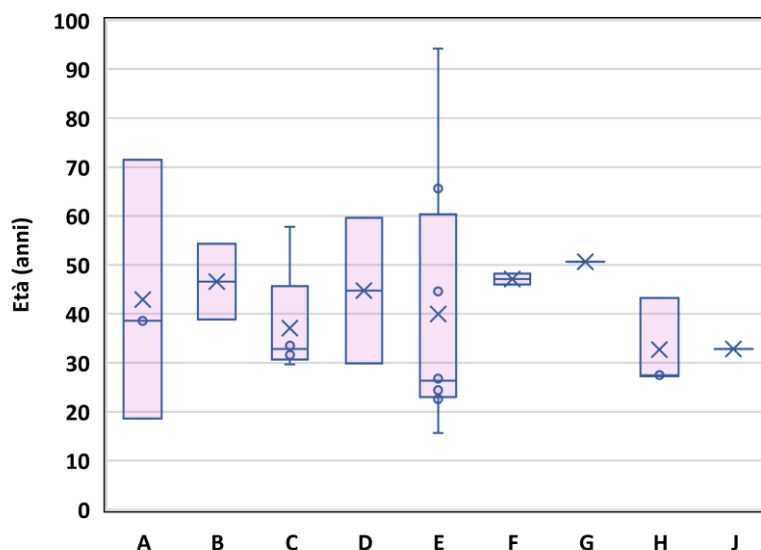


Figura 6.54 Box-plot di età della falda in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster

La Figura 6.55 mostra i profili temporali di nitrato nei pozzi (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni, con l'indicazione della precipitazione cumulata annuale media sul periodo 2013-2020. La Figura 6.56 mostra i box-plot di precipitazione con la suddivisione dei pozzi per cluster. In questo caso è possibile riscontare una relazione generale tra andamento temporale di NO_3 e precipitazione, che è sostanzialmente determinata dalla latitudine: i cluster che raggruppano pozzi ubicati a maggiori latitudini presentano maggiori precipitazioni, mentre quelli ubicati a minori latitudini presentano minori precipitazioni, secondo la relazione latitudine/precipitazione evidenziata nel Cap. 6.5.1. Nello specifico, il cluster D è risultato con maggiori precipitazioni (mediana di 1345 mm), mentre il cluster E ha presentato minori precipitazioni (mediana di 1070 mm).

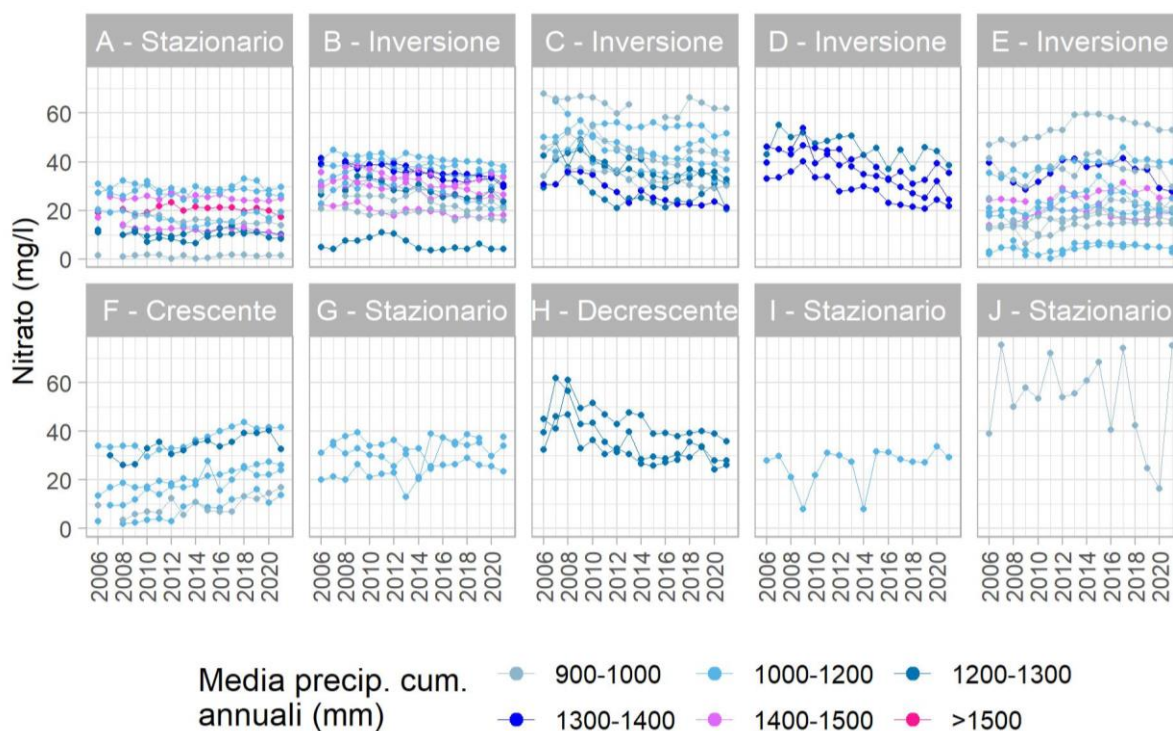


Figura 6.55 profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione della precipitazione cumulata annuale media sul periodo 2013-2020

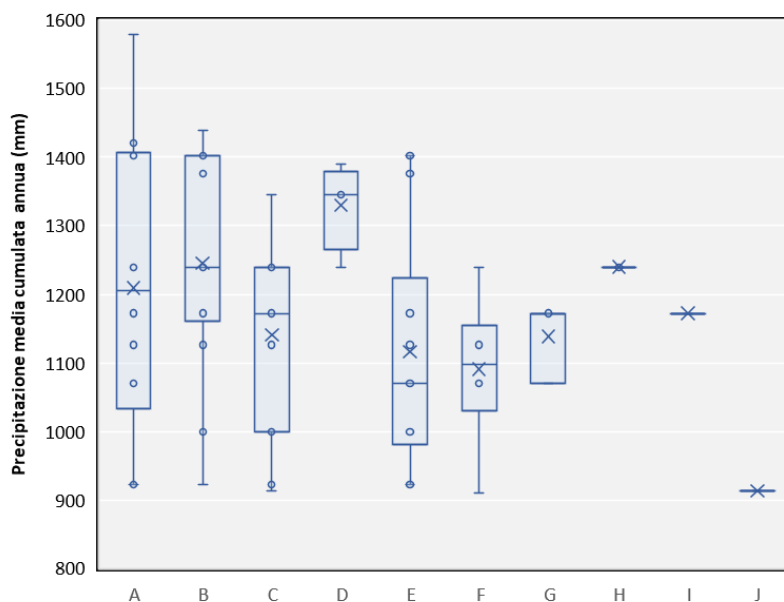


Figura 6.56 Box-plot di precipitazione cumulata annuale media sul periodo 2013-2020 in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster

La Figura 6.57 mostra i profili temporali di nitrato nei pozzi (in concentrazione tal quale) organizzati nei cluster identificati su 16 anni, con l'indicazione del volume irriguo

distribuito per ettaro durante la stagione irrigua 2021. È necessario ricordare che è stato possibile calcolare il volume irriguo solo per i pozzi della rete di monitoraggio del presente studio (quindi non per il totale dei pozzi sottoposti a cluster analysis). La Figura 6.58 mostra i box-plot di volume irriguo con la suddivisione dei pozzi per cluster. È possibile riscontare una sorta di relazione tra andamento temporale di NO_3 per alcuni cluster e volume irriguo. Nello specifico, il cluster B è caratterizzato da bassi volumi irrigui (3 pozzi su 4 con volume pari a zero); questo risultato è in linea con la generale ubicazione dei pozzi di questo cluster a latitudini maggiori (Cap. 4.6.1), corrispondenti a zone non irrigue. Il cluster E è caratterizzato da maggiori volumi irrigui (mediana di $72.4 \text{ m}^3/\text{ha}$) indicando una maggiore presenza in zone irrigue dei pozzi che compongono questo cluster, confermata anche dalla generale minore latitudine per la loro ubicazione (Cap. 4.6.1). Per gli altri cluster, le considerazioni sono limitate dal basso numero di pozzi con volume irriguo all'interno dei cluster.

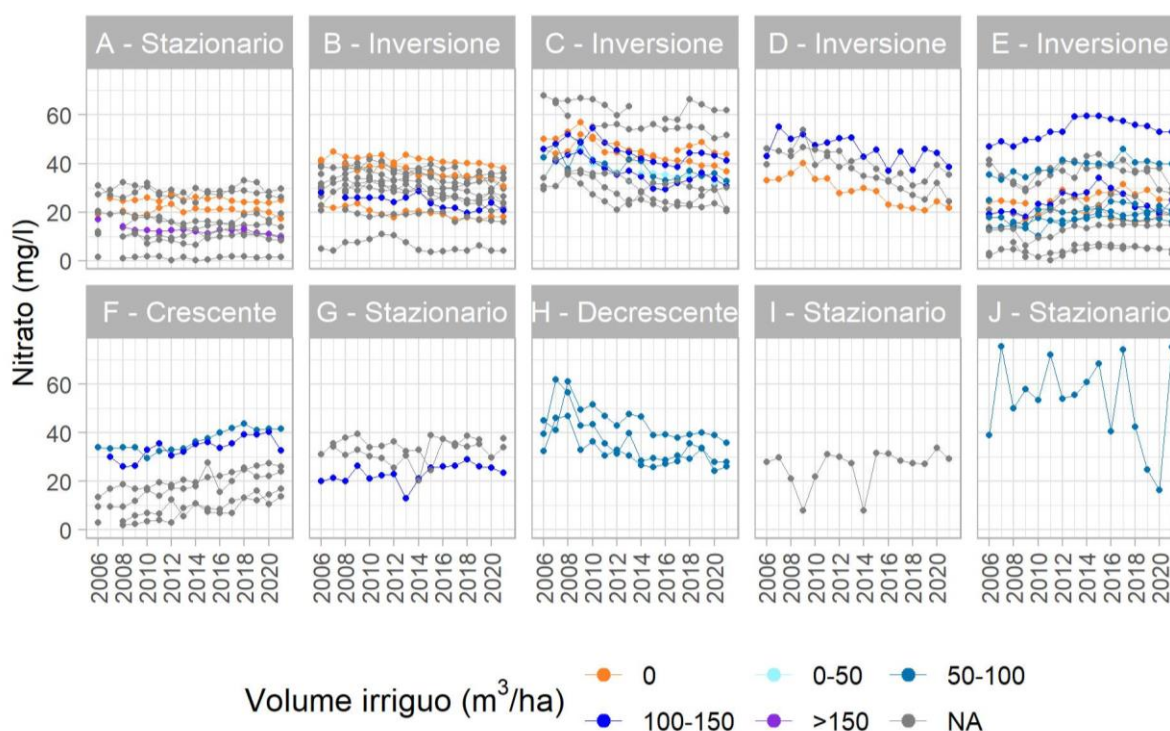


Figura 6.57 Profili temporali di nitrato (in concentrazione tal quale) nei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni (Tabella 4.14), con l'indicazione del volume irriguo distribuito per ettaro durante la stagione irrigua 2021

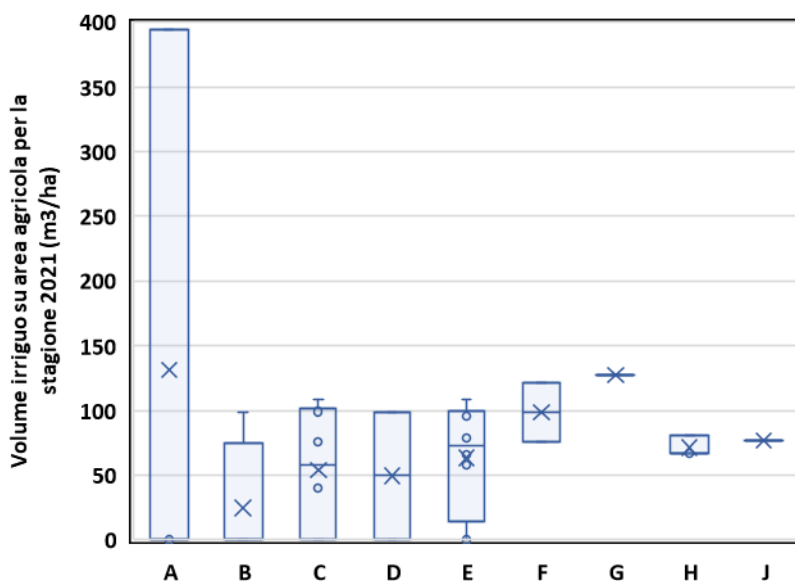


Figura 6.58 Box-plot di volume irriguo in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster

La Figura 6.59 mostra i profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione dell'ubicazione in zona vulnerabile (ZVN) o non vulnerabile (ZnVN) ai nitrati. La Figura 6.60 rappresenta l'istogramma con i conteggi dei pozzi in ZVN e ZnVN per ciascun cluster. Quello che emerge è una distinzione marcata tra ZVN e ZnVN solo per pochi cluster. Nello specifico, i cluster C e D, entrambi caratterizzati da inversione intorno all'anno 2010, raggruppano pozzi che sono esclusivamente ubicati in zone vulnerabili, con l'eccezione di un solo pozzo nel cluster D. Da segnalare anche la presenza prevalente di pozzi ubicati in zone non vulnerabili per il cluster A, caratterizzato da stazionarietà. Per gli altri cluster più popolosi (B, E e F) c'è una sostanziale parità tra ZVN e ZnVN.

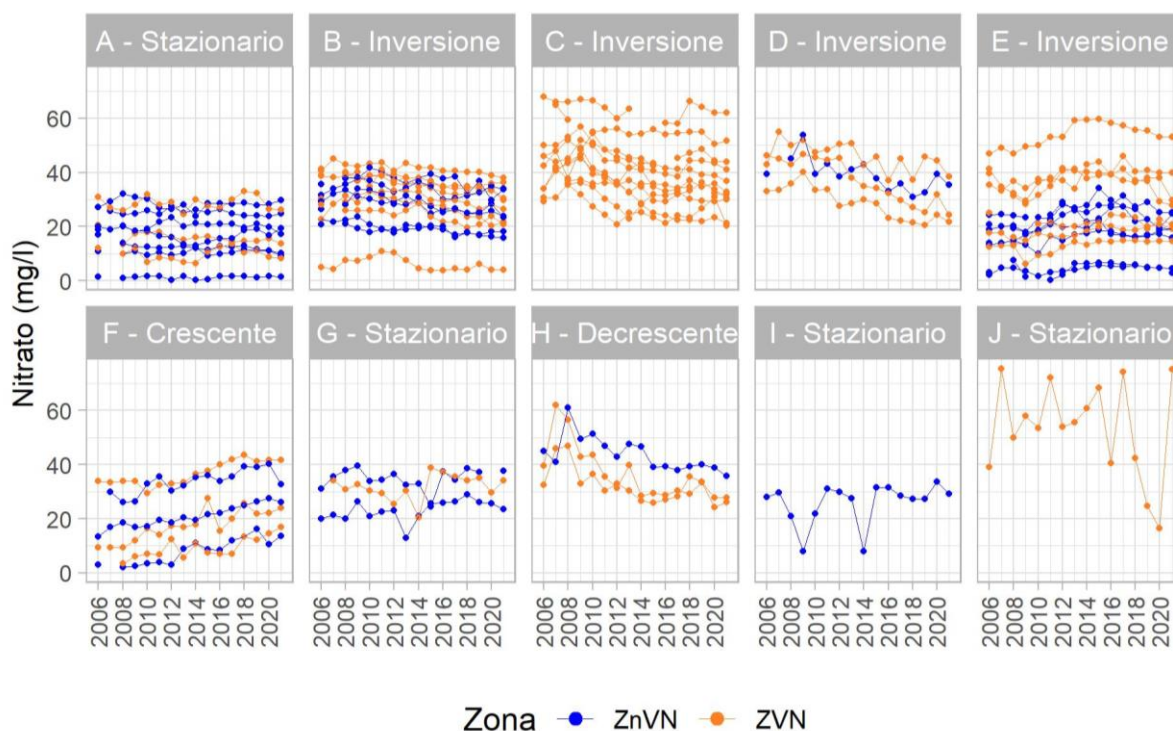


Figura 6.59 Profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione dell'ubicazione in zona vulnerabile (ZVN) o non vulnerabile (ZnVN) ai nitrati

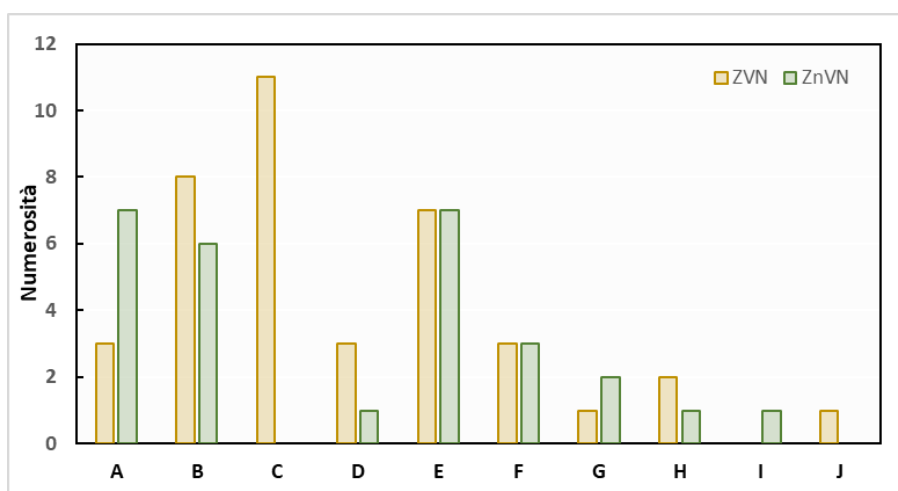


Figura 6.60 Istogramma con i conteggi dei pozzi in ZVN e ZnVN per ciascun cluster

La Figura 6.61 mostra i profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione del carico azotato di origine agricola espresso come kg N/ha/anno, mentre la Figura 6.62 riporta i box-plot di carico azotato con la suddivisione

dei pozzi per cluster. Si ricordano i limiti di carico pari a 170 kg N/ha/anno per le ZVN e di 340 kg N/ha/anno per le ZnVN. Quello che emerge da questo grafico è che:

- non è identificabile una chiara relazione tra gli andamenti temporali di nitrato e il carico azotato di origine agricola;
- il carico maggiore (mediana di 95 kg/ha) si riscontra per il cluster C che raggruppa solo pozzi afferenti a ZVN; la soglia di carico relativa alle ZVN è superata in corrispondenza di molti punti di questo cluster, tanto da generare un valore medio di carico per il cluster pari a 197 kg/ha, superiore quindi alla soglia di 170 kg/ha;
- il cluster F, caratterizzato da andamento crescente, presenta i valori di carico più bassi, con mediana pari a 16 kg/ha;
- i 3 pozzi a carico agricolo nullo distribuiti nei cluster C, D ed E, caratterizzati da concentrazioni di nitrato superiori a 20 mg/L e da un'inversione di tendenza intorno agli anni 2010-2011, sono quindi ragionevolmente associabili ad una sorgente civile di nitrato.

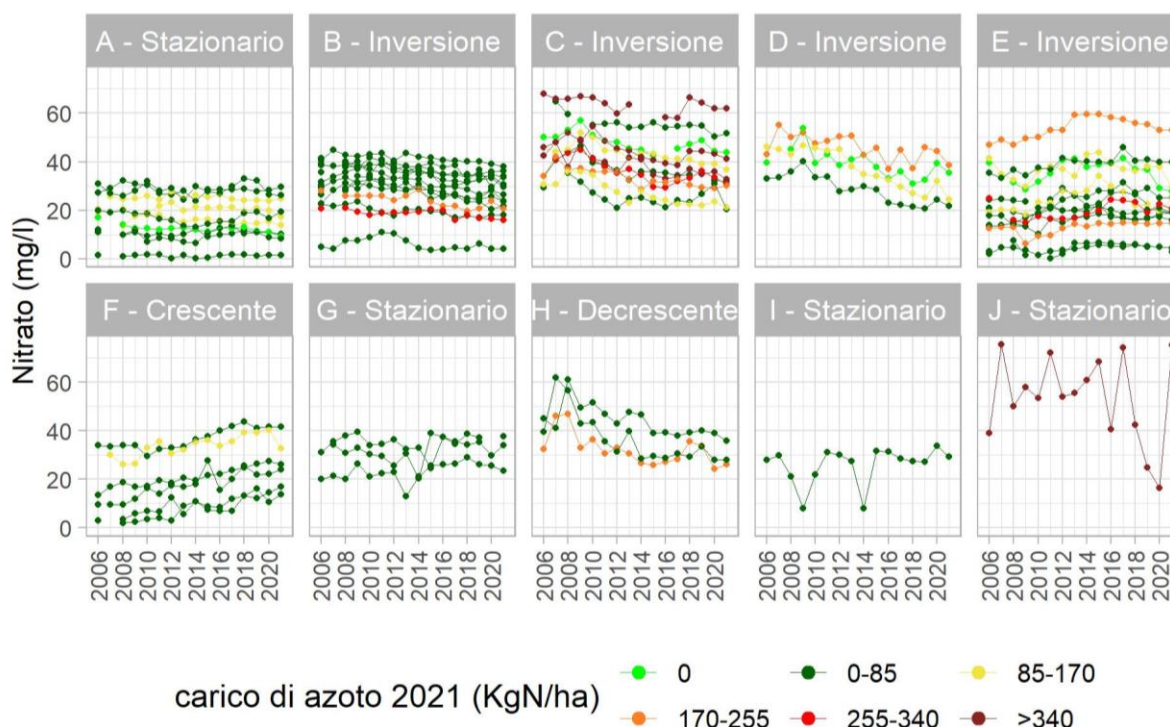


Figura 6.61 Profili temporali dei pozzi organizzati nei cluster identificati su 16 anni con l'indicazione del carico azotato di origine agricola espresso come kg N/ha/anno

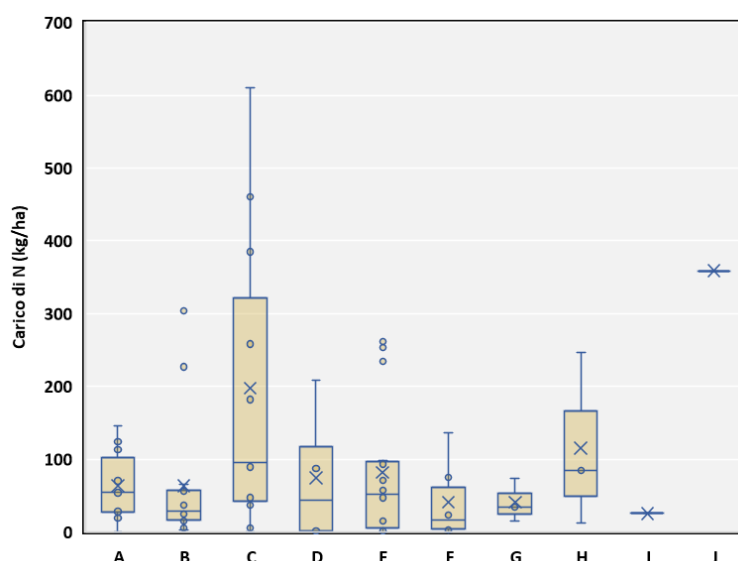


Figura 6.62 I box-plot di carico azotato in funzione della suddivisione dei pozzi per cluster

In sintesi, è possibile riassumere il quadro emerso per i cluster più popolosi (A÷F) come segue:

- il cluster A, caratterizzato da stazionarietà, presenta al suo interno un maggior numero di pozzi ubicati in ZnVN;
- il cluster B, caratterizzato da inversione intorno al 2011, presenta bassi volumi irrigui;
- il cluster C, caratterizzato da inversione intorno al 2010, è formato da soli pozzi ubicati in ZVN e presenta il maggior carico azotato di origine agricola; l'età della falda è generalmente circoscritta nell'intervallo 30-40 anni;
- il cluster D, caratterizzato da inversione intorno al 2010, è formato quasi esclusivamente da pozzi ubicati in ZVN e presenta le precipitazioni più abbondanti;
- il cluster E, caratterizzato da inversione intorno al 2015, presenta le precipitazioni minori e, allo stesso tempo, i maggiori volumi irrigui;
- il cluster F, caratterizzato da andamento in crescita, presenta il carico azotato di origine agricola più basso e precipitazioni che, anche se non le minime, sono comunque inferiori rispetto alla maggior parte degli altri cluster più popolosi; il cluster F presenta anche il volume irriguo massimo e un range di età della falda

ben definito (40-50 anni), ma queste due caratteristiche sono condizionate dal fatto di essere state calcolate su soli 2 pozzi dei 6 totali del cluster.

Una rappresentazione utile a supportare l'identificazione di un'eventuale relazione tra gli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo e l'età della falda è quella riportata in Figura 6.63, dove i profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta sono raggruppati per classi di età della falda e rappresentati con colori diversi in funzione del cluster di appartenenza. In questa figura sono stati rappresentati solo i 6 cluster più popolosi (A÷F). È importante sottolineare che questa rappresentazione è riferita esclusivamente ai pozzi che sono stati datati, pari a 22 (Tabella 6.8), quindi ad un numero inferiore di pozzi rispetto ai rispettivi sottoposti a cluster analysis.

Tabella 6.8 Elenco dei 22 pozzi della serie dei 16 anni che sono stati rappresentati nel grafico di Figura 6.63

#	Codice Progetto	Codice ARPA	Comune	Profondità m	Filtri_TOP (m)	Livello Piezometrico medio m s.l.m.	Lunghezza Serie	Appartenenza cluster	Territorio	Età	±	Classe di età	Appartenenza a ZVN
1	T1A	PO012002NU0008	Albizzate	48.5	18	303.17	16 anni	B	Non Irriguo	54	14.44	50-60	NO
2	T1C	PO015194NR0015	San Giorgio su Legnano	60	35	168.19	16 anni	C	Non Irriguo	33	3.96	30-40	SI
3	T2A	PO0130230U0003	Binago	30	20.5	363.29	16 anni	A	Non Irriguo	39	3.68	30-40	NO
4	T2B	PO012136NU0001	Venegono Inferiore	109	81	282.69	16 anni	A	Non Irriguo	71	9.46	>70	NO
5	T2C	PO0131590U0001	Mozzate	102.5	40	225.92	16 anni	E	Non Irriguo	94	8.45	>70	NO
6	T2D	PO012050NU0004	Cislago	114	69	203.11	16 anni	E	Non Irriguo	66	6.52	60-70	NO
7	T2G	PO015201NR0013	San Vittore Olona	50	30	167.91	16 anni	C	Non Irriguo	58	8.27	50-60	SI
8	T3A	PO013064NU0002	Cermenate	110	98.3	215.00	16 anni	B	Non Irriguo	39	3.44	30-40	SI
9	T3D	PO0152060U0004	Senago	104	41.29	148.11	16 anni	F	Irriguo	46	4.94	40-50	SI
10	T3E	PO0151660U0001	Paderno Dugnano	63	39	143.19	16 anni	C	Irriguo	34	3.31	30-40	SI
11	T3F	PO015146NR0699	Milano	30	21.59	122.74	16 anni	E	Irriguo	16	2.11	10-20	SI
12	T4A	PO0970200U0003	Cernusco Lombardone	50	37	239.35	16 anni	D	Non Irriguo	60	26.83	50-60	SI
13	T4D	PO0151080U0002	Gorgonzola	90	33.05	122.62	16 anni	E	Irriguo	23	2.21	20-30	NO
14	T4G	PO015175NR0150	Pioltello	50	13.2	110.89	16 anni	E	Irriguo	26	3.59	20-30	SI
15	T4H	PO015210NR0022	Settala	40	18	95.37	16 anni	E	Irriguo	24	3.92	20-30	NO
16	T5A	PO0161150R0118	Gorle	70.5	56	215.91	16 anni	A	Irriguo	19	2.95	10-20	NO
17	T5B	PO0162070R0001	Stezzano	84	54	285.00	16 anni	F	Irriguo	48	8	40-50	NO
18	T5F	PO0160400U0001	Brignano Gera D'Adda	40	29.35	123.00	16 anni	C	Irriguo	32	5	30-40	SI
19	T6C	PO0161130R0001	Ghisalba	35	18	160.72	16 anni	D	Irriguo	30	4.67	30-40	SI
20	T6G	PO0160870R0001	Covo	30	20	109.82	16 anni	E	Irriguo	45	6.38	40-50	SI
21	T6I	PO0161220R0519	Isso	35	n.d.	99.95	16 anni	C	Irriguo	29	3.67	30-40	SI
22	T7C	PO0161770U0001	Pumenengo	60	42	99.63	16 anni	E	Irriguo	27	4.30	20-30	SI

Dall'analisi della Figura 6.63 si evince che:

- la classe di età 20-30 anni è popolata esclusivamente da pozzi del cluster E, caratterizzato da inversione intorno all'anno 2015; tuttavia questa relazione non è univoca in quanto altri pozzi del cluster E coprono quasi tutto il range di età identificato;
- la classe di età 30-40 anni è popolata maggiormente da pozzi dei cluster B, C e D, tutti caratterizzati da un'inversione intorno al 2010-2011;
- la classe di età 40-50 anni contiene gli unici 2 pozzi che sono stati datati del cluster F, caratterizzato da andamento crescente;
- la classe di età 50-60 anni è popolata esclusivamente da pozzi dei cluster B, C e D, tutti caratterizzati da un'inversione intorno al 2010-2011.

Incrociando anche l'informazione sull'ubicazione dei pozzi in ZVN o ZnVN (Figura 6.64) e ricordando che le ZVN sono entrante in vigore nel 2006 e non hanno avuto modifiche rilevanti e sostanziali fino ad oggi, è possibile fare delle valutazioni che possano spiegare alcuni profili temporali di nitrato. Queste valutazioni, riportate di seguito, sono basate sull'assunzione che (a) le inversioni di tendenza evidenziate in alcuni cluster siano l'espressione di azioni migliorative intraprese in passato e che (b) gli effetti di queste azioni migliorative siano ragionevolmente visibili in falda dopo che sia trascorso almeno tra il 30 e il 50% del tempo di rinnovamento totale della falda, ovvero tra il 30 e il 50% della sua età. Date queste assunzioni, le valutazioni sono:

- per il pozzo della classe di età 10-20 facente parte del cluster E e ubicato in ZVN (T3F), i tempi necessari per apprezzare gli effetti in falda di un'azione migliorativa intrapresa in passato sarebbero compresi, secondo le assunzioni sopracitate, tra 3 e 10 anni. Per i pozzi del cluster E lo sfasamento temporale tra inversione (2015) e istituzione delle ZVN (2006) è di 9 anni, quindi, questo intervallo di tempo è compatibile con i tempi di risposta assunti per questo pozzo (3-10 anni), e l'inversione del 2015 potrebbe essere compatibile con un eventuale miglioramento causato dalla creazione delle ZVN nel 2006;
- il pozzo della classe di età 10-20 facente parte del cluster A (T5A), cluster caratterizzato da generale stazionarietà, è l'unico pozzo di questo cluster ad aver registrato un trend decrescente significativo (secondo il test di Mann-

Kendall); questa decrescita, già in corso da almeno il 2006, non è compatibile con la creazione delle ZVN nello stesso 2006, in quanto mancherebbe lo sfasamento temporale relativo ai tempi di risposta del sistema, stimati come per il pozzo precedente in 3-10 anni; a conferma di questo ragionamento (irrelevanza delle ZVN per questo pozzo) c'è l'ubicazione di questo pozzo in ZnVN (Figura 6.64); se la decrescita fosse dovuta ad azioni migliorative realizzate in passato, necessariamente di altra natura rispetto alle ZVN, queste dovrebbero essere state intraprese almeno 3-10 anni prima del 2006 (quindi almeno tra il 1996 e il 2003);

- per i 4 pozzi della classe di età 20-30 (tutti appartenenti al cluster E) i tempi di risposta per apprezzare degli effetti migliorativi in falda si aggirerebbero, secondo le assunzioni sopracitate, tra 6 e 15 anni; anche in questo caso (cluster E), lo sfasamento temporale tra inversione (2015) e istituzione delle ZVN (2006) è di 9 anni, che rientra nel range dei tempi di possibile risposta di questi pozzi (6-15 anni); due pozzi di questo raggruppamento sono ubicati in ZVN (T4G e T7C), gli altri due sono ubicati in ZnVN, uno (T4D) subito a valle idrogeologico di ZVN mentre l'altro (T4H) sempre a valle di ZVN ma in posizione più distale; è ragionevole quindi pensare che l'inversione del 2015 possa essere compatibile con un eventuale miglioramento causato dalla creazione delle ZVN nel 2006, almeno per i 2 pozzi ubicati in ZVN e per il T4D, subito a valle di ZVN;
- per i 6 pozzi della classe di età 30-40 anni che presentano un'inversione intorno agli anni 2010-2011 (cluster B, C e D), i tempi di risposta per apprezzare degli effetti migliorativi in falda si aggirerebbero, secondo le assunzioni sopracitate, tra 9 e 20 anni. Lo sfasamento temporale tra inversione (2010-2011) e istituzione delle ZVN (2006) è di 4-5 anni, periodo dunque troppo breve rispetto ai tempi di risposta ipotizzati per questi pozzi (9-20); un'eventuale influenza delle ZVN è quindi da escludersi per questi pozzi. Tuttavia, l'inversione intorno al 2010-2011 potrebbe essere collegabile ad azioni migliorative, di altra natura rispetto alle ZVN, intraprese ragionevolmente tra il 1990 e il 2002 (es. miglioramento dello stoccaggio e

della distribuzione in campo dei reflui zootecnici; aumento del collettamento dei reflui civili destinati a depurazione);

- la classe di età 40-50 raggruppa un pozzo del cluster E (flesso al 2015) e due pozzi del cluster F (andamento in crescita); i tempi di risposta per apprezzare degli effetti migliorativi in falda si aggirerebbero, secondo le assunzioni sopracitate, tra 12 e 25 anni. Per il pozzo del cluster E (T6G) non è ragionevole considerare un possibile effetto delle ZVN del 2006 ma bensì altre azioni migliorative eventualmente intraprese tra il 1990 e il 2003. Per i due pozzi del cluster F (T3D e T5B), il primo, ubicato in ZVN vedrebbe un eventuale effetto migliorativo dovuto all'istituzione delle ZVN del 2006 solo tra gli anni 2018 e 2031: in altre parole, il trend di crescita registrato nel T3D prima del 2018 non sarebbe in contrasto con l'applicazione della Direttiva Nitrati, ma solo dovuto ai maggiori tempi di risposta del pozzo. L'altro pozzo del cluster F, ubicato in ZnVN (T5B), a monte idrogeologico di ZVN, registrerebbe gli effetti di una azione migliorativa istituita oggi solo ragionevolmente tra 12-25 anni;
- i 3 pozzi della classe di età 50-60 anni presentano tutti un'inversione intorno agli anni 2010-2011 (cluster B, C e D), ed i tempi di risposta per apprezzare degli effetti migliorativi in falda si aggirerebbero, secondo le assunzioni sopracitate, tra 15 e 30 anni. Lo sfasamento temporale tra inversione (2010-2011) e istituzione delle ZVN (2006) è di 4-5 anni, periodo troppo breve rispetto ai tempi di risposta ipotizzati per questi pozzi (15-30); un'eventuale influenza delle ZVN è quindi da escludersi per questi pozzi. Tuttavia, l'inversione intorno al 2010-2011 potrebbe essere collegabile ad azioni migliorative, di altra natura rispetto alle ZVN, intraprese ragionevolmente tra il 1980 e il 1996;
- i pozzi con età >60 sono 3, tutti ubicati in ZnVN, uno facente parte del cluster A (stazionario), gli altri due del cluster E (inversione al 2015). I due pozzi del cluster E, in particolare, non hanno fatto emergere la presenza di flesso secondo il test eseguito (Cap. 4.5), mentre il test di Mann-Kendall ha indicato una stazionarietà. Pertanto, questi tre pozzi possono essere accumulati da stazionarietà, la quale può ragionevolmente indicare o (a) che non sono state intraprese azioni migliorative in passato (in linea con l'ubicazione in ZnVN) o

(b) che, anche se intraprese, i lunghi tempi di risposta di questi pozzi (>18 anni) non abbiano ancora permesso di rendere visibili le eventuali risposte in falda.

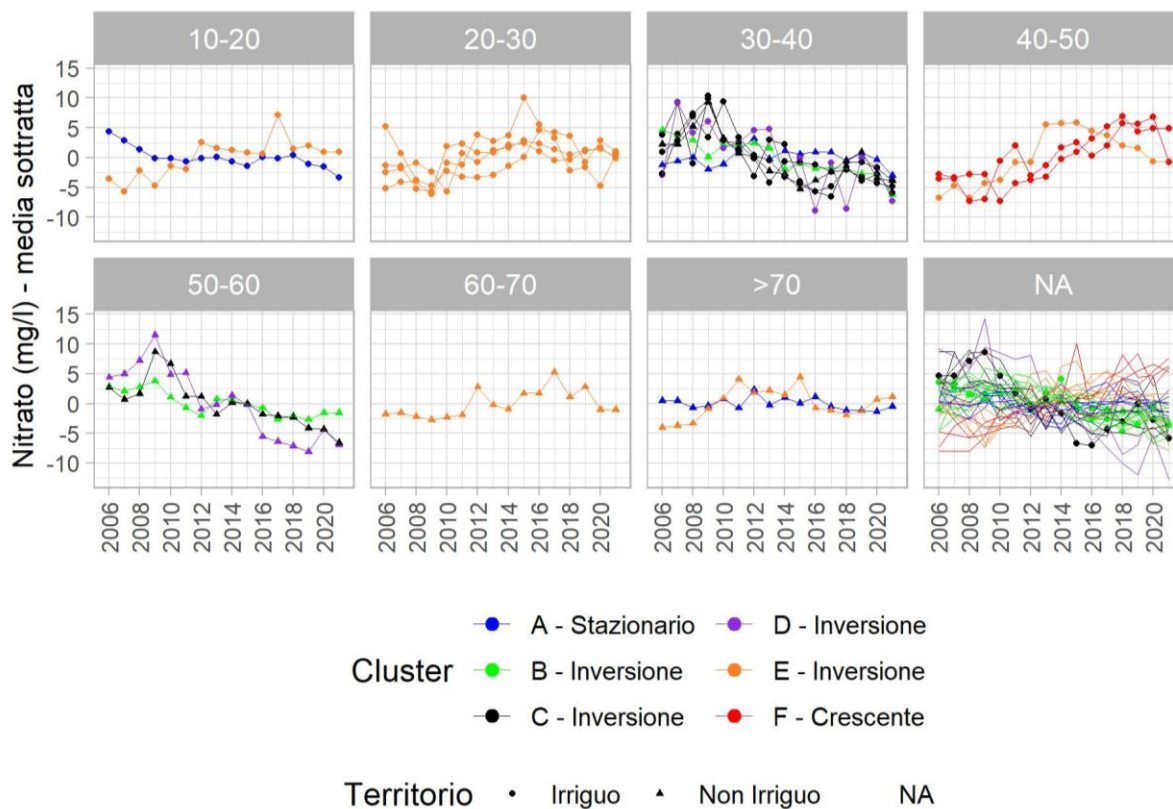


Figura 6.63 Profili temporali di nitrato a media sottratta organizzati in classi di età con l'indicazione degli andamenti di nitrato per cluster e appartenenza o meno dei pozzi a territorio irriguo

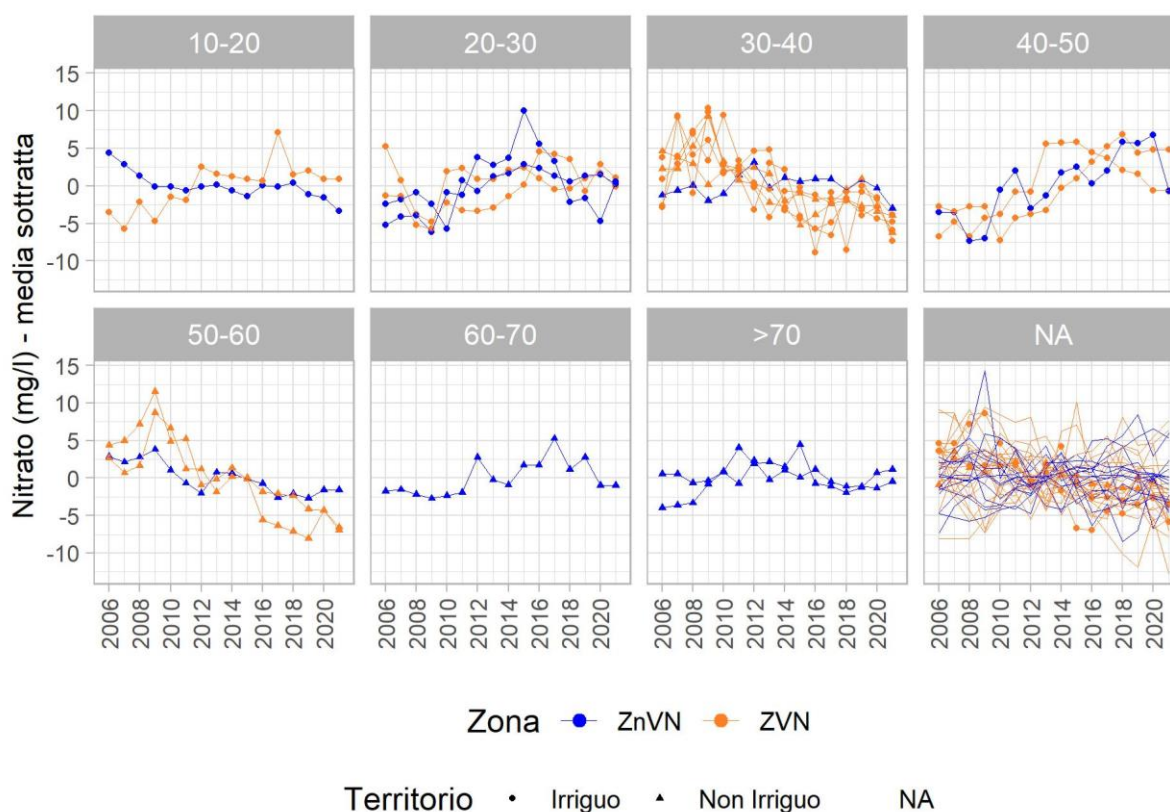


Figura 6.64 Profili temporali di nitrato a media sottratta organizzati in classi di età con l'indicazione degli andamenti di nitrato per cluster e appartenenza dei pozzi a territorio ZnVN o ZVN

Nella Figura 6.65, Figura 6.66 e Figura 6.67 sono riportati i profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione, rispettivamente, della precipitazione cumulata annua media (sul periodo 2013-2020), del volume di acqua irrigua utilizzato nella stagione 2021 e del carico azotato di origine agricola (anno 2021). Nella Figura 6.65 la relazione rappresentata riguarda le età della falda con il quantitativo di precipitazioni: a minori età (<30 anni) corrispondono minori precipitazioni (<1200 mm ad eccezione di un solo pozzo), mentre a maggiori età (>50 anni) corrispondono maggiori precipitazioni (>1300 mm ad eccezione di un solo pozzo). Questa relazione è spiegabile da un nesso indiretto (no causa/effetto) determinato dal fatto che nelle zone pedemontane, che sono più piovose, le falde hanno registrato un'età maggiore, mentre nelle zone di pianura più a valle idrogeologico, che sono meno piovose, si sono ottenute età minori per l'effetto di ringiovanimento generato dall'eccesso irriguo (Cap. 6.4). Questa spiegazione è

confermata dalla Figura 6.66 dove si osserva che le falde più giovani (<30 anni) presentano volumi irrigui >50 m³/ha, mentre le falde più antiche (>50 anni) sono ubicate in zone non irrigue, quindi con volume pari a 0 m³/ha. Infine, la Figura 6.67 non fa emergere nessuna chiara relazione tra carico azotato (calcolato sull'anno 2021) ed età delle falde o profili temporali di nitrato.

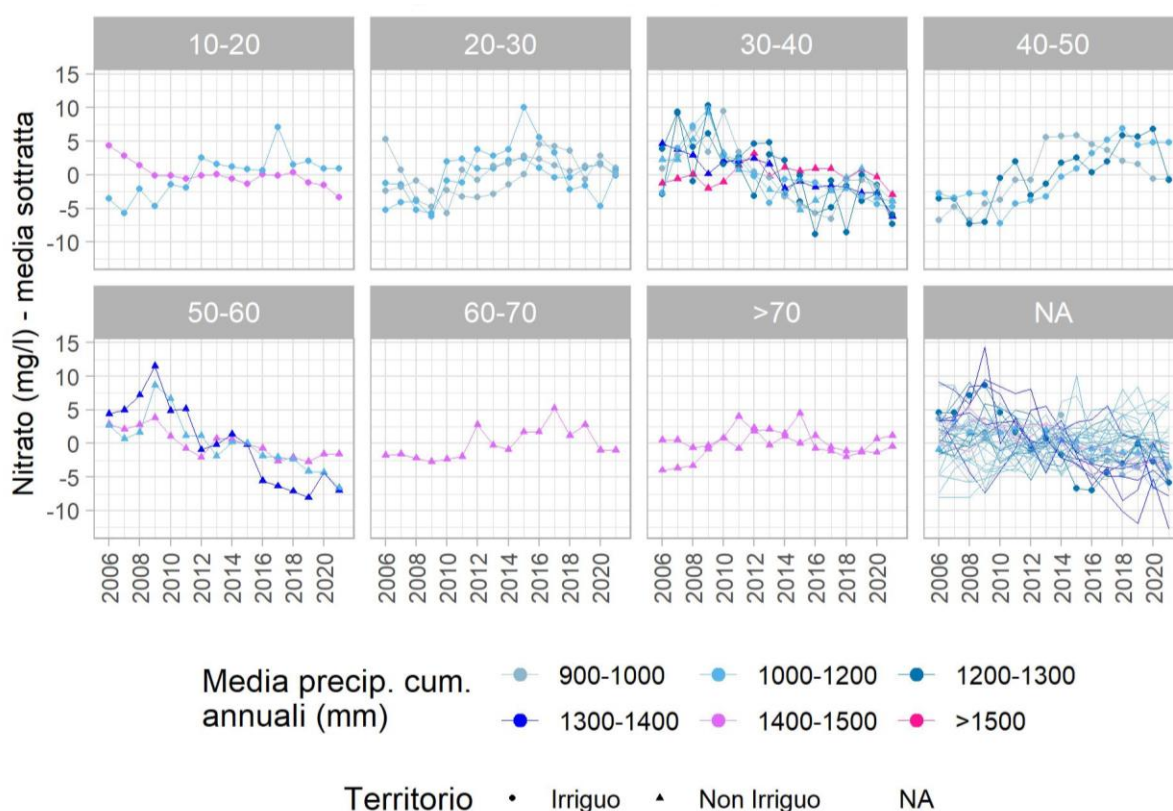


Figura 6.65 Profili di concentrazione di NO₃ a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione della precipitazione cumulata annua media (sul periodo 2013-2020)

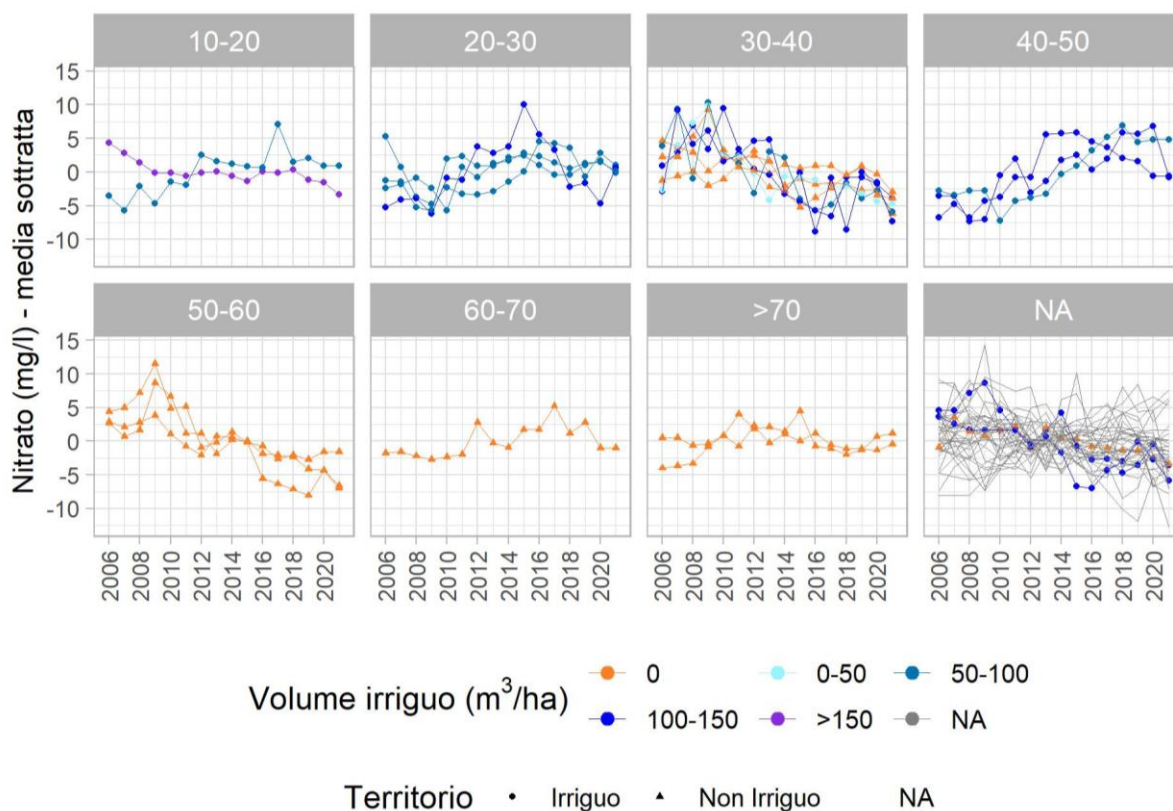


Figura 6.66 Profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione del volume di acqua irrigua utilizzato nella stagione 2021

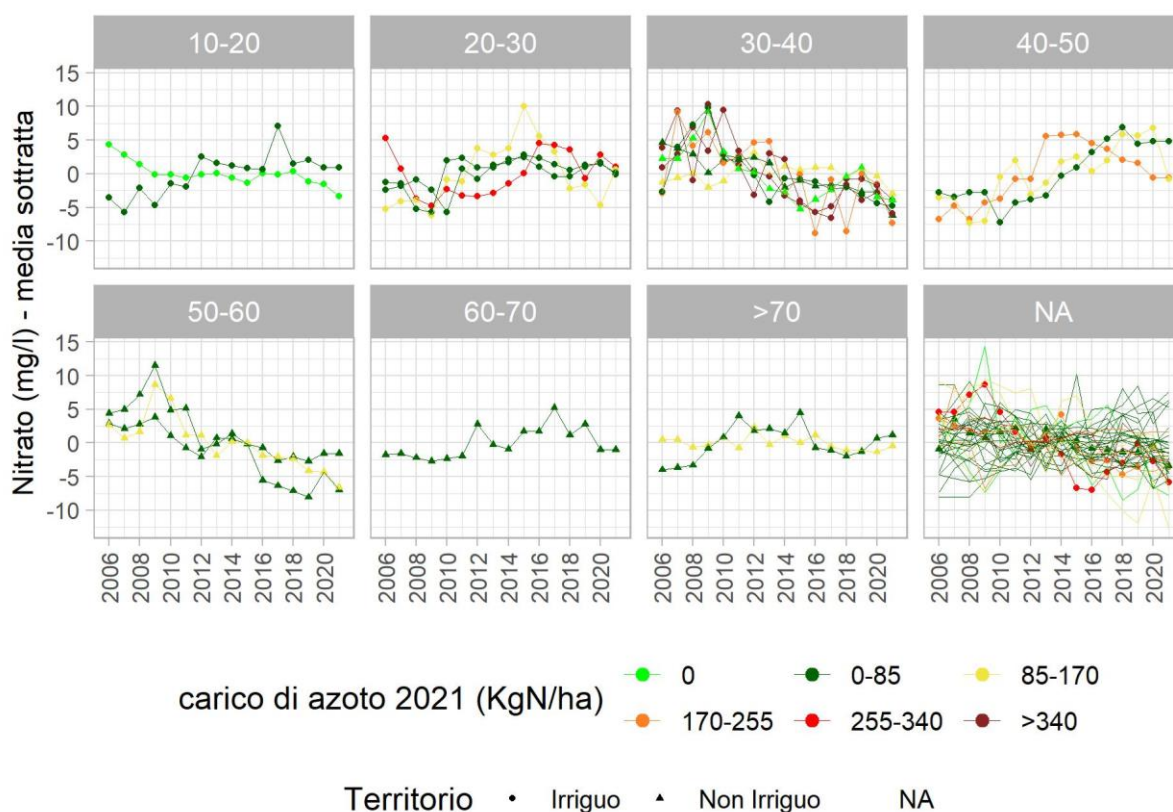


Figura 6.67 Profili di concentrazione di NO_3 a media sottratta raggruppati per classi di età della falda e rappresentati in funzione carico azotato di origine agricola (anno 2021)

7-----CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente lavoro è consistito nell'elaborazione di dati sia pregressi, acquisiti da enti regionali, di ricerca e gestori del servizio idrico (WP1, Cap. 3), che sperimentali, acquisiti tramite campagne di monitoraggio dedicate (WP3, Cap. 5), relativi principalmente a (1) serie storiche di concentrazione di nitrato in falda, (2) traccianti di ricarica della falda e (3) traccianti di età della falda.

L'elaborazione ed interpretazione dei dati sopracitati ha consentito di implementare un modello concettuale relativo agli acquiferi superficiali (ISS) dell'alta pianura lombarda che ha permesso la comprensione (1) degli andamenti temporali delle concentrazioni in falda di nitrato su lungo periodo (Cap. 4), (2) delle principali voci di ricarica della falda (Cap. 6.2), (3) delle età della falda e, conseguentemente, dei tempi di rinnovamento degli acquiferi (Cap. 6.3), (4) dei principali processi idrogeologici che legano tra loro le voci di ricarica della falda, le età della falda e le concentrazioni di nitrato in falda (Cap. 6.4) e (5) delle relazioni che legano gli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo alle età della falda, alle voci di ricarica e ai carichi azotati di natura agricola (Cap. 6.6).

Per quanto riguarda la caratterizzazione degli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo, equivalente a 16 anni (massimo periodo considerabile in funzione dei dati acquisiti), il presente lavoro ha fatto emergere alcuni aspetti importanti sia dal punto di vista metodologico che dal punto di vista conoscitivo. Per quanto riguarda gli aspetti metodologici, i principali punti emersi sono:

- risulta fondamentale sviluppare un sistema standardizzato di individuazione ed eliminazione dei veri outliers, da effettuare a monte della validazione del dato acquisito in campo/laboratorio; in caso contrario l'informazione contenuta nei dati rimane estraibile con meno chiarezza, rendendo più difficoltosa ed incerta l'interpretazione delle elaborazioni stesse;
- altro aspetto da cercare di standardizzare, al netto delle risorse disponibili, è quello dell'identificazione, all'interno dell'anno, di periodi (mesi) di campionamento regolari, da ripetere ciclicamente con continuità; la scelta specifica dei periodi dovrebbe tenere conto di eventuali stagionalità, non solo

delle concentrazioni di nitrati, ma anche delle più importanti variabili idrogeologiche, come ad esempio l'intensità di ricarica alla falda. Al fine di una migliore interpretabilità dei dati acquisiti, un periodo idoneo per effettuare il campionamento potrebbe essere quello di marzo, in cui non sono presenti irrigazioni agricole e segue il periodo invernale tipicamente più povero di precipitazioni e che, a livello idrogeologico, può rappresentare un minimo piezometrico. Relativamente al periodo autunnale, si ritiene utile cercare di distinguere tra i mesi di settembre/ottobre, dove si risente maggiormente della ricarica da eccesso irriguo, e novembre, dove l'effettuo irriguo è cessato ed è generalmente dominante la ricarica da precipitazione; in altre parole, si suggerisce di campionare con regolarità o in settembre/ottobre o in novembre, senza alternare questi due periodi nei diversi anni;

- considerando che è emerso un andamento temporale delle concentrazioni di nitrato su lungo periodo principalmente di tipo non monotono (si veda sotto), i risultati delle elaborazioni sull'identificazione delle tendenze temporali effettuate tramite i test comunemente usati di Mann-Kendal e Sen's slope possono risultare poco informativi, in quanto funzionali all'identificazione unicamente di tendenze monotone;
- in presenza quindi di andamenti non monotoni, risulta invece fondamentale l'uso di tecniche di analisi capaci di evidenziare eventuali inversioni di tendenza presenti, come test statistici per l'identificazione di punti di flesso e/o cluster analysis temporali.

Dal punto di vista conoscitivo, è emerso che:

- gli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo seguono, nella maggior parte dei casi, un andamento non monotono, presentando in molti casi delle inversioni di tendenza, come evidenziato dall'identificazione di un punto di flesso per 29 su 114 pozzi investigati (25%) con serie di 16 anni;
- la cluster analysis ha identificato 10 gruppi di pozzi ad andamento temporale omogeneo (cluster), tra i 67 pozzi con serie di 16 anni considerati, di cui 6 cluster (A÷F) comprendono la maggior parte dei pozzi considerati (88%) e sono di seguito descritti:

- il cluster A (10 pozzi) presenta una stabilità di valori nel tempo, caratterizzabile dalla presenza di un andamento stazionario;
 - il cluster B (14 pozzi) presenta dei massimi nei primi anni della serie storica (2006-2010), una successiva decrescita monotona ed una stabilizzazione in prossimità degli anni 2018-2021; il cluster B è caratterizzato dalla presenza di un'inversione di tendenza identificabile nell'anno 2011;
 - il cluster C (11 pozzi) presenta dei massimi negli anni 2006-2009, una successiva decrescita monotona ed una stabilizzazione negli anni 2015-2021; anche questo cluster è caratterizzato dalla presenza di un'inversione di tendenza, identificabile nell'anno 2010;
 - il cluster D (4 pozzi) ha un andamento simile al cluster C ma presenta una maggiore variazione totale, compresa entro 30 mg/L (mentre quella del cluster C è compresa entro 15-20 mg/L); il cluster D è caratterizzato dalla presenza di un'inversione di tendenza identificabile nell'anno 2010;
 - il cluster E (14 pozzi) ha un andamento temporale che presenta una fase crescente fino al 2015 e una seconda fase decrescente fino al 2021; il cluster E è caratterizzato dalla presenza di un'inversione di tendenza identificabile nell'anno 2015;
 - il cluster F infine comprende 6 pozzi con tendenza in crescita che arriva a relativa stabilizzazione negli ultimi 3-4 anni (2018-2021); il cluster F non contiene pozzi che presentano flesso ed è caratterizzato dalla presenza di un andamento crescente.
- La cluster analysis temporale sulle serie di 16 anni ha fatto emergere un generale quadro positivo sugli andamenti di nitrato, in quanto, su 67 pozzi investigati, 43 pozzi (64%) sono caratterizzati da un'inversione di tendenza (crescita o stazionarietà seguita da decrescita), con flesso tra gli anni 2010 e 2015, 3 pozzi (5%) presentano andamento decrescente, 15 pozzi (22%) sono caratterizzati da stazionarietà e solamente 6 pozzi (9%) presentano andamento crescente:
 - confrontando questi andamenti caratterizzanti emersi dalla cluster analysis su 16 anni con gli andamenti derivati su 8 anni secondo le prescrizioni della

Direttiva Nitrati, calcolati tramite differenza delle medie tra i quadrienni 2012-2015 e 2016-2019, emerge come per il 26% dei pozzi confrontati (quindi circa un quarto del totale) l'andamento temporale calcolato sui 16 anni abbia delineato un quadro migliorativo del problema dei nitrati rispetto all'analisi svolta su 8 anni. Questo risultato dimostra come il fatto di considerare un tempo più lungo nella valutazione dell'evoluzione temporale di nitrato in falda, accompagnato dall'utilizzo di appropriate tecniche che possano dare il giusto peso alle inversioni di tendenza (es., identificazione del punto di flesso, cluster analysis), possa mettere in luce un quadro migliorativo della situazione che non emergerebbe dall'analisi su un orizzonte temporale più breve. Questo quadro migliorativo emerso su 16 anni rispetto agli ultimi 8 è principalmente dovuto al fatto che molti andamenti stazionari identificati sugli ultimi 8 anni sono stati verosimilmente preceduti da inversione di tendenza su tempi meno recenti;

- per gli andamenti stazionari identificabili sia su lungo (16 anni) che su breve (8 anni) periodo è fondamentale considerare anche la magnitudo della contaminazione: se le concentrazioni di nitrato relative agli andamenti stazionari risultano essere pari o inferiori ai valori di fondo di nitrato per il sistema acquifero considerato, è lecito considerare per questi pozzi l'impossibilità del cambiamento in futuro di tendenza da stazionario a decrescente in quanto, una volta raggiunti i valori di fondo, le concentrazioni difficilmente potranno abbassarsi ulteriormente. Come valori di fondo di nitrato indicativi possiamo considerare, per il fondo naturale, la concentrazione di 10 mg/L, come derivabile dal progetto di ricerca europeo BRIDGE (Hinsby et al., 2008) e, per il fondo antropico relativo al contesto altamente antropizzato dell'alta pianura padana, la concentrazione minima di 20 mg/L. Considerando le tendenze derivate dal test di Mann-Kendall sulle serie di 16 anni, il 56% dei pozzi con trend stazionario (37 pozzi) ha presentato concentrazioni di nitrato inferiori al fondo naturale di 10 mg/L, percentuale che sale al 70% (46 pozzi) considerando il fondo antropico di 20 mg/L.

Per quanto riguarda il tracciamento delle voci di ricarica agli acquiferi superficiali dell'alta pianura lombarda, è emerso che:

- esistono 2 principali voci di ricarica, costituite da (1) precipitazioni locali (che cadono sul territorio dell'alta pianura) e (2) acque superficiali;
- le acque superficiali ricaricano la falda principalmente tramite infiltrazione dell'eccesso di irrigazione agricola (alimentata, in alta pianura lombarda, maggiormente da acque superficiali), combinata con la perdita di acqua irrigua direttamente dai canali irrigui (per quei canali non cementati sul fondo);
- l'eccesso irriguo (relativo alle acque irrigue alimentate da corsi d'acqua superficiali) costituisce la prima voce di ricarica delle falde (dell'ISS di alta pianura) nelle zone irrigate, che caratterizzano la maggior parte di questa porzione di pianura. Il contributo percentuale della ricarica da eccesso irriguo si attesta, nella quasi totalità dei pozzi ubicati in aree irrigate, tra il 50% e il 75% della ricarica totale. Nelle aree non irrigate, quasi esclusivamente ubicate tra i fiumi Ticino e Adda e a nord del canale Villoresi, la principale voce di ricarica è costituita dall'infiltrazione delle precipitazioni locali.

Per quanto riguarda la determinazione delle età della falda, è emerso che:

- l'età media è risultata pari a 37 anni mentre quella mediana di 35 anni;
- a scala regionale è identificabile una relazione tra l'età della falda e la lunghezza del suo percorso idrico sotterraneo; nello specifico questa relazione è costituita da un progressivo ringiovanimento delle età della falda all'aumentare del suo percorso sotterraneo; in altre parole, si evidenzia una diminuzione delle età al procedere del flusso idrico sotterraneo verso la fascia dei fontanili. Questa relazione è ragionevolmente legata alla ricarica da eccesso irriguo: procedendo dalle zone pedemontane verso la fascia dei fontanili si realizza generalmente un aumento dell'infiltrazione dell'eccesso irriguo; quest'acqua di neo-infiltrazione per definizione ha un'età prossima allo zero ed è quindi in grado, mescolandosi con la falda più antica proveniente da monte idrogeologico, di ringiovanire l'età media di tutta la falda. Questo modello concettuale è supportato dal fatto di aver ottenuto nelle aree irrigate una media di età pari a 33 anni, mentre nelle zone non irrigate la media sale a 49 anni;
- la valutazione dei processi di mescolamento effettuata tramite l'elaborazione dei gas nobili e del trizio ha fatto emergere l'importanza del meccanismo di

flusso a pistone esponenziale, che contempla il mescolamento di una componente giovane che si infiltra costantemente dalla verticale al procedere del flusso idrico sotterraneo di una componente più antica proveniente da monte idrogeologico, in linea con il modello concettuale descritto al punto precedente.

Per quanto riguarda il modello concettuale che lega voci di ricarica, età della falda e concentrazione di nitrato, è emerso che:

- per pozzi le cui acque risultano con età tendenzialmente maggiori, è possibile osservare un aumento di concentrazioni di nitrato all'aumentare progressivo del contributo alla ricarica da parte dell'eccesso irriguo, fino a raggiungere i massimi valori di nitrato (superiori al limite di 50 mg/L) in corrispondenza di pozzi soggetti ad un'irrigazione "non-intensiva", che presentano età generalmente intermedie. Questi picchi di nitrato sono interpretati come l'effetto della lisciviazione dell'eccesso di azoto dai campi agricoli sottoposti ad irrigazione. All'aumentare ulteriormente della ricarica da eccesso irriguo, quindi al diminuire ulteriormente dell'età della falda, è possibile osservare una diminuzione di nitrato in falda. Questa diminuzione è individuabile per pozzi soggetti ad un'irrigazione "intensiva" e può essere interpretata come l'effetto della diluizione esercitata dal largo eccesso irriguo.

Per quanto riguarda le relazioni che legano gli andamenti temporali di nitrato su lungo periodo alle età della falda, alle voci di ricarica e ai carichi azotati di natura agricola, è emerso che:

- in generale, non si evince alcuna correlazione diretta tra andamento temporale di nitrato su lungo periodo e tutte le altre variabili considerate (età della falda, quantitativo di precipitazioni, volumi irrigui, carichi azotati agricoli e presenza di aree vulnerabili (ZVN) o non vulnerabili (ZnVN) ai nitrati). È possibile comunque identificare delle caratteristiche tipiche per ciascuno dei 6 cluster più popolosi, di seguito descritte:
 - il cluster A, caratterizzato da stazionarietà, presenta al suo interno un maggior numero di pozzi ubicati in ZnVN;

- il cluster B, caratterizzato da inversione intorno al 2011, presenta bassi volumi irrigui;
 - il cluster C, caratterizzato da inversione intorno al 2010, è formato da soli pozzi ubicati in ZVN e presenta il maggior carico azotato di origine agricola; l'età della falda è generalmente circoscritta nell'intervallo 30-40 anni;
 - il cluster D, caratterizzato da inversione intorno al 2010, è formato quasi esclusivamente da pozzi ubicati in ZVN e presenta le precipitazioni più abbondanti;
 - il cluster E, caratterizzato da inversione intorno al 2015, presenta le precipitazioni minori e, allo stesso tempo, i maggiori volumi irrigui;
 - il cluster F, caratterizzato da andamento in crescita, presenta il carico azotato di origine agricola più basso e precipitazioni che, anche se non le minime, sono comunque inferiori rispetto alla maggior parte degli altri cluster più popolosi; il cluster F presenta anche il volume irriguo massimo e un range di età della falda ben definito (40-50 anni), ma queste due caratteristiche sono condizionate dal fatto di essere state calcolate su soli 2 pozzi dei 6 totali del cluster.
- L'analisi di dettaglio tra andamento temporale di nitrato ed età della falda effettuata su 22 pozzi (Figura 6.63) ha evidenziato che:
 - tra i 15 pozzi caratterizzati da inversione di tendenza, 4 pozzi, secondo le assunzioni riportate in dettaglio nel Cap. 6.6, presentano un punto di flesso compatibile con una possibile risposta all'adozione delle ZVN nel 2006. Per 1 pozzo, il flesso è considerevole compatibile con una possibile risposta della falda ad azioni migliorative intraprese orientativamente tra il 2000 e il 2010, ma di altra natura rispetto alle ZVN (ad esempio, un possibile aumento del collettamento dei reflui civili destinati a depurazione) in quanto questo pozzo è ubicato in ZnVN. Per 7 pozzi, il flesso è considerevole compatibile con una possibile risposta della falda ad azioni migliorative intraprese orientativamente tra il 1990 e il 2000, quindi necessariamente di altra natura rispetto alle ZVN istituite successivamente nel 2006 (ad esempio, il miglioramento dello

stoccaggio dei reflui zootecnici, a seguito della L.R. 15 dicembre 1993, n. 37 “Norme per il trattamento, la maturazione e l'utilizzo dei reflui zootecnici”). Per 3 pozzi, il flesso è considerevole compatibile con una possibile risposta della falda ad azioni migliorative intraprese orientativamente tra il 1980 e il 1995, quindi necessariamente di altra natura rispetto alle ZVN; (ad esempio, un possibile aumento del collettamento dei reflui civili destinati a depurazione).

- per i 3 pozzi caratterizzati, effettivamente, da stazionarietà e con età più alte (>60 anni), questa stazionarietà può ragionevolmente indicare o (a) che non sono state intraprese azioni migliorative in passato in prossimità di questi pozzi o (b) che, anche se intraprese, i lunghi tempi di risposta di questi pozzi non abbiano ancora permesso di rendere visibili le eventuali risposte in falda;
- per i 2 pozzi sono caratterizzati da tendenza in crescita, ed età tra 40 e 50 anni, ubicati uno in ZVN e l'altro in ZnVN. Nel primo, un eventuale effetto migliorativo dovuto all'istituzione delle ZVN nel 2006 sarebbe ragionevolmente visibile tra gli anni 2018 e 2031. In altre parole, il trend di crescita registrato prima del 2018 non sarebbe in contrasto con l'applicazione della Direttiva Nitrati, tramite l'istituzione delle ZVN, ma solo dovuto ai maggiori tempi di risposta del pozzo. Il secondo, in ZnVN, se sottoposto ad un'azione migliorativa oggi, vedrebbe gli effetti di questa azione ragionevolmente tra 12-25 anni.
- L'analisi di un eventuale legame tra andamento temporale di nitrato ed età della falda, discussa al punto precedente, ha fatto emergere l'importanza di considerare un terzo elemento come necessario per un'effettiva interpretazione dei dati: l'evoluzione temporale, partendo possibilmente dagli anni '80, di tutte le azioni migliorative intraprese sul territorio dell'alta pianura lombarda volte alla diminuzione dei carichi di azoto infiltrabili in falda, non solo relative al comparto agricolo (come ad esempio le ZVN) ma anche quelle relative alla gestione dei reflui civili. Questo aspetto, non trattato in dettaglio nel presente studio, potrebbe essere oggetto di studi specifici futuri.

Infine, come sintesi conclusiva, vengono ribaditi i seguenti aspetti rilevanti:

- la datazione delle falde ha fatto emergere dei tempi di funzionamento del sistema idrogeologico sull'ordine generale dei 35-40 anni;
- in funzione di questi tempi di funzionamento del sistema idrogeologico, risulta necessario indagare la dinamica del nitrato in falda su una finestra temporale relativamente lunga, corrispondente ad almeno 15-20 anni. Elaborazioni svolte su tempi più brevi, ad esempio gli 8 anni considerati nel confronto tra quadrienni della Direttiva Nitrati, potrebbero non far emergere un miglioramento dello stato qualitativo della falda di fatto esistente nel corpo idrico sotterraneo.

Milano, 30 agosto 2023

Dott. Marco Rotiroti



8 BIBLIOGRAFIA

Alcalá, F. J., & Custodio, E. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, 359(1-2), 189-207.

Andrews, J. N., & Lee, D. J. (1979). Inert gases in groundwater from the Bunter Sandstone of England as indicators of age and palaeoclimatic trends. *Journal of Hydrology*, 41(3-4), 233-252.

Balestrini, R., Delconte, C. A., Sacchi, E., & Buffagni, A. (2021). Groundwater-dependent ecosystems as transfer vectors of nitrogen from the aquifer to surface waters in agricultural basins: The fontanili of the Po Plain (Italy). *Science of the Total Environment*, 753, 141995.

Ballentine, C. J., & Hall, C. M. (1999). Determining paleotemperature and other variables by using an error-weighted, nonlinear inversion of noble gas concentrations in water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(16), 2315-2336.

Benson, B. B., & Krause, D. (1980). Isotopic fractionation of helium during solution: A probe for the liquid state. *Journal of Solution Chemistry*, 9, 895-909.

Bonomi, T., Fumagalli, M. L., Rotiroti, M., Bellani, A., & Cavallin, A. (2014). Banca dati idrogeologica TANGRAM©: strumento per elaborazioni quantitative di dati per la valutazione delle acque sotterranee. *Ital J Groundw*, 3(2/136), 35-45.

Carcano, C., & Piccin, A. (2002). *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia*. Soc. Elaborazioni Cartogr, Florence.

Chen, S., Wu, W., Hu, K., & Li, W. (2010). The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale. *Ecological Complexity*, 7(2), 131-138.

Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.

Davis, S. N., Cecil, L. D., Zreda, M., & Moysey, S. (2001). Chlorine-36, bromide, and the origin of spring water. *Chemical Geology*, 179(1-4), 3-16.

Davis, S. N., Fabryka-Martin, J. T., & Wolfsberg, L. E. (2004). Variations of bromide in potable ground water in the United States. *Ground Water*, 42(6), 902-909.

Diez, J. A., Caballero, R., Roman, R., Tarquis, A., Cartagena, M. C., & Vallejo, A. (2000). Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain (Vol. 29, No. 5, pp. 1539-1547). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Direttiva 91/676/CEE “relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole – direttiva nitrati”

Duckett, K. A., Langman, J. B., Bush, J. H., Brooks, E. S., Dunlap, P., & Stanley, J. R. (2020). Noble gases, dead carbon, and reinterpretation of groundwater ages and travel time in local aquifers of the Columbia River Basalt Group. *Journal of Hydrology*, 581, 124400.

EPA, U.S. (2006). *Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners EPA QA/G-9S*. Washington, DC.

Frollini, E., Preziosi, E., Calace, N., Guerra, M., Guyennon, N., Marcaccio, M., Menichetti, S., Romano, R., Ghergo, S. (2021). Groundwater quality trend and trend reversal assessment in the European Water Framework Directive context: an example with nitrates in Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17), 22092-22104.

Garzanti, E., Vezzoli, G., & Andò, S. (2011). Paleogeographic and paleodrainage changes during Pleistocene glaciations (Po Plain, northern Italy). *Earth-Science Reviews*, 105(1-2), 25-48.

Giorgino, T. (2009). Computing and visualizing dynamic time warping alignments in R: the dtw package. *Journal of statistical Software*, 31, 1-24.

Giustini, F., Brilli, M., & Patera, A. (2016). Mapping oxygen stable isotopes of precipitation in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 162-181.

Guerra M, Preziosi E, Ghergo S, Calace N, Guyennon N, Marcaccio M, Menichetti S, Romano E (2017). Linee guida per la valutazione delle tendenze ascendenti e d'inversione degli inquinanti nelle acque sotterranee (DM 6 luglio 2016) "Guidelines for the identification of any significant and sustained upward trends in pollutant concentrations and for the definition of the starting point for trend reversal in groundwater". ISPRA, Manuali e Linee Guida 161/2017.

Heaton, T. H. E., & Vogel, J. C. (1981). "Excess air" in groundwater. *Journal of Hydrology*, 50, 201-216.

Hem, J. (1992). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p. Alex. VA US Geol. Surv.

Hinsby, K., Condesso de Melo, M.T., Dahl, M. (2008). European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Sci. Total Environ.* 401, 1–20.

Hoque, M.A., McArthur, J.M., Sikdar, P.K., Ball, J.D., Molla, T.N. (2014). Tracing recharge to aquifers beneath an Asian megacity with Cl/Br and stable isotopes: the example of Dhaka, Bangladesh. *Hydrogeol. J.* 22, 1549–1560.

Katz, B.G., Eberts, S.M., Kauffman, L.J. (2011). Using Cl/Br ratios and other indicators to assess potential impacts on groundwater quality from septic systems: A review and examples from principal aquifers in the United States. *J. Hydrol.* 397, 151–166.

Kendall, M. G. (1975) - Rank Correlation Methods, 4th ed. Charles Griffin, London.

Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F., & Stute, M. (2002). Noble gases in lakes and ground waters. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 47(1), 615-700.

Ladouche, B., Luc, A., Nathalie, D. (2009). Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996–2002): Potential use as input signal for karst functioning investigation. *J. Hydrol.* 367, 150–164.

Li, C., Gao, X., Liu, Y., Wang, Y. (2019). Impact of anthropogenic activities on the enrichment of fluoride and salinity in groundwater in the Yuncheng Basin constrained by Cl/Br ratio, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^7\text{Li}$ isotopes. *J. Hydrol.* 579, 124211.

Long, F. A., & McDevit, W. F. (1952). Activity coefficients of nonelectrolyte solutes in aqueous salt solutions. *Chemical reviews*, 51(1), 119-169.

Longinelli, A., & Selmo, E. (2003). Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270(1-2), 75-88.

Lucas, L. L., & Unterweger, M. P. (2000). Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 105(4), 541.

Lupton, J. E. (1983). Terrestrial inert gases: Isotope tracer studies and clues to primordial components in the mantle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 11(1), 371-414.

Ma, L., Castro, M. C., Hall, C. M., & Walter, L. M. (2005). Cross-formational flow and salinity sources inferred from a combined study of helium concentrations, isotopic ratios, and major elements in the Marshall aquifer, southern Michigan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(10).

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.

Marchetti, M. (2002). Environmental changes in the central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities. *Geomorphology*, 44(3-4), 361-373.

Markovich, K. H., Manning, A. H., Condon, L. E., & McIntosh, J. C. (2019). Mountain-block recharge: A review of current understanding. *Water Resources Research*, 55(11), 8278-8304.

Martinelli, G., Dadomo, A., De Luca, D. A., Mazzola, M., Lasagna, M., Pennisi, M., Elisa S., Pilla, G. & Saccon, P. (2018). Nitrate sources, accumulation and reduction in groundwater from Northern Italy: Insights provided by a nitrate and boron isotopic database. *Applied Geochemistry*, 91, 23-35.

Mazor, E. (1972). Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwaters; Jordan Rift Valley, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(12), 1321-1336.

McArthur, J. M., Sikdar, P. K., Hoque, M., & Ghosal, U. (2012). Waste-water impacts on groundwater: Cl/Br ratios and implications for arsenic pollution of groundwater in the Bengal Basin and Red River Basin, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 437, 390-402.

Musacchio, A., Re, V., Mas-Pla, J., & Sacchi, E. (2020). EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio*, 49, 504-516.

Musacchio, A., Mas-Pla, J., Soana, E., Re, V., & Sacchi, E. (2021). Governance and groundwater modelling: Hints to boost the implementation of the EU Nitrate Directive. The Lombardy Plain case, N Italy. *Science of the Total Environment*, 782, 146800.

Ozima, M., & Podosek, F. A. (2002). Noble gas geochemistry. Cambridge University Press.

Panno, S., Hackley, K.C., Hwang, H., Greenberg, S., Krapac, I., Landsberger, S., O'Kelly, D. (2005). Database for the characterization and identification of the sources of sodium and chloride in natural waters of Illinois. Open File Ser. 2005-01.

Parrone, D., Ghergo, S., & Preziosi, E. (2019). A multi-method approach for the assessment of natural background levels in groundwater. *Science of the Total Environment*, 659, 884-894.

Pinti D. (1995). SOLUBILITY 4.7: a program to calculate solubility data of noble gases and other species in crustal fluids®, Osaka University, Comunicazione e Trasmissione personale.

Pinti, D. L., & Van Drom, E. (1998). PALEOTEMP: a Mathematica® program for evaluating paleotemperatures from the concentration of atmosphere-derived noble gases in ground water. *Computers & Geosciences*, 24(1), 33-41.

Poch-Massegú, R., Jiménez-Martínez, J., Wallis, K. J., de Cartagena, F. R., & Candela, L. (2014). Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management*, 134, 1-13.

Regione Lombardia (2017). Piano Tutela delle Acque del 2016, approvato con d.g.r. n. 6990 del 31 luglio 2017.

Rotiroti, M., McArthur, J., Fumagalli, L., Stefania, G. A., Sacchi, E., & Bonomi, T. (2017). Pollutant sources in an arsenic-affected multilayer aquifer in the Po Plain of Italy: Implications for drinking-water supply. *Science of the Total Environment*, 578, 502-512.

Rotiroti, M., Bonomi, T., Sacchi, E., McArthur, J. M., Stefania, G. A., Zanotti, C., Taviani, S., Patelli, M., Nava, V., Soler, V., Fumagalli, L. & Leoni, B. (2019). The effects of irrigation on groundwater quality and quantity in a human-modified hydro-system: The Oglio River basin, Po Plain, northern Italy. *Science of the Total Environment*, 672, 342-356.

Rotiroti, M., Sacchi, E., Caschetto, M., Zanotti, C., Fumagalli, L., Biasibetti, M., Bonomi T. & Leoni, B. (2023). Groundwater and surface water nitrate pollution in an intensively irrigated system: sources, dynamics and adaptation to climate change. *Journal of Hydrology*, 129868.

Sacchi, E., Acutis, M., Bartoli, M., Brenna, S., Delconte, C. A., Laini, A., & Pennisi, M. (2013). Origin and fate of nitrates in groundwater from the central Po plain: Insights from isotopic investigations. *Applied Geochemistry*, 34, 164-180.

Schmidt, K. D., & Sherman, I. (1987). Effect of irrigation on groundwater quality in California. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 113(1), 16-29.

Schlosser, P., Stute, M., Sonntag, C., & Münnich, K. O. (1989). Tritogenic ^3He in shallow groundwater. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(3-4), 245-256.

Seltzer, Alan, Ng, J.; Aeschbach, W., Kipfer, R.; Kulongoski, J. T.; Severinghaus, J. P.; Stute, M.; Wieser, M.; Deshpande, R D; Van Khoi, L.; Schlosser, P.; Love, A.; Herczeg, A.; Clark, J. F.; Simpson, J. (2021). Paleotemperature Records of the Last Glacial Maximum from Noble Gases in Groundwater. *PANGAEA*

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63:1379-1389

Smith, S. P., & Kennedy, B. M. (1983). The solubility of noble gases in water and in NaCl brine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3), 503-515.

Stute, M., & Schlosser, P. (1993). Principles and applications of the noble gas paleothermometer. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 78, 89-100.

Suckow, A. (2014). The age of groundwater—Definitions, models and why we do not need this term. *Applied Geochemistry*, 50, 222-230.

Torgersen, T. (1980). Controls on pore-fluid concentration of ^4He and ^{222}Rn and the calculation of $^4\text{He}/^{222}\text{Rn}$ ages. *Journal of Geochemical Exploration*, 13(1), 57-75.

Vengosh, A., & Pankratov, I. (1998). Chloride/bromide and chloride/fluoride ratios of domestic sewage effluents and associated contaminated ground water. *Groundwater*, 36(5), 815-824.

Winid, B. (2015). Bromine and water quality—Selected aspects and future perspectives. *Applied Geochemistry*, 63, 413-435.

Yesilnacar, M. I., & Gulluoglu, M. S. (2008). Hydrochemical characteristics and the effects of irrigation on groundwater quality in Harran Plain, GAP Project, Turkey. *Environmental Geology*, 54(1), 183-196.

Zanotti, C., Caschetto, M., Bonomi, T., Parini, M., Cipriano, G., Fumagalli, L., & Rotiroti, M. (2022). Linking local natural background levels in groundwater to their generating hydrogeochemical processes in Quaternary alluvial aquifers. *Science of the Total Environment*, 805, 150259.