



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze  
Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA  
IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**ANALISI DEL MECCANISMO DI  
CONTAMINAZIONE DELLE ACQUE  
SOTTERRANEE DA CROMO ESAVALENTE IN  
UN SITO INDUSTRIALE DISMESSO IN  
PROVINCIA DI VICENZA**

*Relatore: Prof. Leonardo Mason*  
*Correlatore: Dott. Pierluigi Bullo*

*Laureando: Ruben Faccio*

ANNO ACCADEMICO 2014/ 2015



## SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi consiste nello studio dei meccanismi in grado di mobilizzare un inquinante in un sito dell'alta pianura veneta. Nello specifico, prendendo in considerazione il sito contaminato da cromo esavalente della ex "Galvanica p.m." a Tezze Sul Brenta (VI), si è voluto distinguere il contributo dell'innalzamento della falda da quello delle precipitazioni piovose nella mobilizzazione del cromo esavalente dal terreno contaminato alle acque sotterranee. Dall'elaborazione dei dati storici di monitoraggio, si sono ricostruiti gli andamenti della quota piezometrica, delle precipitazioni piovose e della loro infiltrazione, delle concentrazioni di cromo esavalente in falda e delle portate degli emungimenti.

Analizzando queste serie di dati, è stato possibile ricostruire i quantitativi (massa) di cromo esavalente estratto dal 2008 al 2014, evidenziando il ruolo fondamentale delle precipitazioni piovose nel trasporto dell'inquinante in falda.

L'analisi dei dati storici ha consentito di distinguere i diversi meccanismi che portano al rilascio di contaminante in falda ed il loro peso.

Nel dettaglio, lo studio ha evidenziato come nei periodi, nei quali si registra l'effetto dell'infiltrazione delle acque di pioggia, si originano eventi di contaminazione in falda, duraturi nel tempo, con concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$  nell'ordine delle centinaia di  $\mu\text{g/l}$ . Mentre, con l'innalzamento della quota piezometrica sopra ad una soglia limite, i valori di cromo esavalente raggiungono valori di qualche migliaio di  $\mu\text{g/l}$  per brevi periodi di tempo. Infine, si è rilevato che l'azione combinata di abbondanti precipitazioni piovose ed innalzamento della falda, origina un meccanismo di mobilitazione che porta a valori di concentrazione intermedi a quelli sopra descritti ma per lunghi periodi di tempo.





# INDICE

ELENCO DELLE FIGURE .....	3
ELENCO DELLE TABELLE .....	7
ELENCO SIMBOLI UTILIZZATI.....	9
1. INTRODUZIONE .....	10
2. DATI GENERALI.....	12
2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	13
2.2. IL SITO.....	14
2.3. GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA.....	15
2.4. LA STORIA DEL SITO E DELLA CONTAMINAZIONE .....	17
2.5. CARATTERIZZAZIONE DELL'INQUINANTE .....	19
2.5.1. CARATTERISTICHE .....	19
2.5.2. LIMITI .....	20
2.6. PROCESSO PRODUTTIVO GALVANICA .....	22
2.7 LA MESSA IN SICUREZZA D'EMERGENZA .....	23
2.7.1 LA BARRIERA IDRAULICA.....	23
3. OBIETTIVI DELLA TESI .....	26
4. DATA-BASE ED ELABORAZIONE PRELIMINARE DEI DATI.....	27
4.1. LIVELLO DI FALDA.....	31
4.2. PRECIPITAZIONI PIOVOSE .....	34
4.3. TEMPERATURE MEDIE GIORNALIERE.....	37
4.4. CONCENTRAZIONE DEL CROMO ESAVALENTE IN FALDA .....	42
4.5. EMUNGIMENTO .....	48
5. ELABORAZIONE DEI DATI.....	54
5.1. IL SEGNALE RELATIVO ALLA PRECIPITAZIONE PIOVOSA .....	54

5.1.1	EVAPOTRASPIRAZIONE .....	55
5.1.2.	INFILTRAZIONE (MODELLO DI HORTON).....	60
5.2.	IL SEGNALE RELATIVO AL LIVELLO DI FALDA .....	66
5.3.	ANALISI DELLA BARRIERA IDRAULICA .....	72
5.4.	ANALISI DEI RITARDI .....	94
5.5.	ELABORAZIONE SEGNALE PRECIPITAZIONE PIOVOSA INFILTRATA .....	97
5.5.1	MEDIA MOBILE SEMPLICE.....	97
6.	RELAZIONI TRA LA CONCENTRAZIONE DELL'INQUINANTE CROMO, PRECIPITAZIONI PIOVOSE E FALDA ACQUIFERA.....	101
6.1.	RELAZIONE TRA CONCENTRAZIONI DI CROMO E PRECIPITAZIONI PIOVOSE.....	101
6.2.	RELAZIONE TRA CONCENTRAZIONI DI CROMO E QUOTA PIEZOMETRICA.....	102
6.3.	CONFRONTO TRA PRECIPITAZIONI PIOVOSE, Cr <sup>6+</sup> E QUOTA PIEZOMETRICA.....	104
7.	CONCLUSIONI .....	108
8.	BIBLIOGRAFIA .....	110
9.	APPENDICE.....	112
	analisi_pozzi_2.m.....	112
	sistemazione_vettore.m.....	115
	calcolo_vettore_derivate_cr.m .....	116
	geostat_2.m .....	118
	analisi_ETP.m .....	119
	analisi_infiltrazioni_4.m.....	120

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 - Inquadramento territoriale. Sito ex Galvanica p.m.....	13
Figura 2 - Foto aerea e planimetria dell'area ex "Galvanica p.m.". Foto gennaio 2015.....	14
Figura 3 - Deflusso idrico tra le province di Padova e Vicenza (Antonelli R. Dal Prà A., 1980).....	17
Figura 4 - Diagramma Eh - ph Cromo ( <a href="http://openi.nlm.nih.gov">http://openi.nlm.nih.gov</a> ).....	20
Figura 5- Planimetria area ex Galvanica p.m.. Ubicazione pozzi esistenti.....	24
Figura 6 - Esempio calcolo punti ignoti equidistanti lungo l'asse X.....	28
Figura 7 - Esempio calcolo portate ignote equidistanti lungo l'asse Tempo. ....	29
Figura 8 - Andamento quota piezometrica misura in pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	32
Figura 9 - Andamenti quota piezometrica misurata nel pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. ....	33
Figura 10 - Andamento medio quota piezometrica misurata nel pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	34
Figura 11 - Precipitazioni piovose dal 2008 al 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI). ....	35
Figura 12 - Precipitazioni piovose annuali. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI). Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013. ....	36
Figura 13 - Temperatura media giornaliera dal 01/01/2008 al 21/07/2014. Dati stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI).....	38
Figura 14 - Andamenti temperatura media giornaliera. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI). ....	39
Figura 15 - Andamento temperatura media giornaliera. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI). ....	40
Figura 16 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	42



Figura 17 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	43
Figura 18 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	44
Figura 19 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	45
Figura 20 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	46
Figura 21 - Planimetria “Galvanica pm”. Concentrazioni Cr <sup>6+</sup> in data 02/08/2011. Pozzi: G2; G3; G4; G5; G6.....	48
Figura 22 - Andamento portata e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	49
Figura 23 - Andamento portata e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	50
Figura 24 - Andamento portata e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	51
Figura 25 - Andamento portata e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	52
Figura 26 - Andamento portata e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	53
Figura 27 - Andamento capacità d'infiltrazione in funzione del tempo. Horton (1940).....	61
Figura 28 - Andamento continuo della capacità d'infiltrazione in funzione del tempo. ....	63
Figura 29 – Precipitazione piovosa infiltrata dal 01/01/2008 al 31/07/2014.....	64
Figura 30 – Precipitazione piovosa infiltrata e andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Pozzo: G6. Dal 01/01/2008 al 31/07/2014.....	65
Figura 31 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr(VI), portata. Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	67
Figura 32 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr <sup>6+</sup> , portata. Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.....	68

Figura 33 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr <sup>6+</sup> , portata. Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. ....	69
Figura 34 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr <sup>6+</sup> , portata. Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. ....	70
Figura 35 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr <sup>6+</sup> , portata. Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. ....	71
Figura 36 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G2. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.....	74
Figura 37 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G3. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.....	76
Figura 38 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G4. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.....	79
Figura 39 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G5. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.....	81
Figura 40 - Andamento concentrazioni Cr <sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G6. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.....	86
Figura 41 - Quantità Cr <sup>6+</sup> estratto dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	88
Figura 42 - Quantitativo di Cr(VI) in Kg estratto annualmente. Pozzo G6. Precipitazioni piovose cumulate annue. Stazione Rosà (VI).....	89
Figura 43 - Quantitativo di Cr(VI) in Kg estratto annualmente. Pozzo G6. Quote piezometriche medie annue. Pozzo: G1. ....	89
Figura 44 - Andamenti: Livello di falda in G1. Piogge giornaliere. Portate di emungimento. Concentrazioni Cr(VI) in G6. Dal 01/01/2008 al 31/07/2014.....	92
Figura 45 – Andamento correlazione tra segnale precipitazioni piovose infiltrate e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Dati G6. ....	95
Figura 46 – Andamento correlazione tra segnale precipitazioni piovose infiltrate e concentrazioni Cr <sup>6+</sup> . Dati G5. ....	96
Figura 47 - Precipitazioni piovose infiltrata con media mobile a 35 giorni e andamento concentrazione Cr <sup>6+</sup> . Pozzo G6. Dal 04/02/2008 al 31/07/2014.....	98
Figura 48 – Confronto tra precipitazione piovosa infiltrata con media mobile a 35 giorni e precipitazione piovosa infiltrata traslata di 35 giorni. ....	99

Figura 49 - Precipitazioni piovose infiltrata con media mobile a 29 giorni e andamento concentrazione $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo G5. Dal 04/02/2008 al 31/07/2014 .....	100
Figura 50 - Confronto pioggia infiltrata con media mobile a 35 giorni e concentrazioni $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.....	102
Figura 51 - Confronto quota piezometrica e concentrazioni $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014. ....	103
Figura 52 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.....	105
Figura 53 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014. Visione ortogonale. Sezione ottenuta tramite funzione (geostat_2.m) .....	106
Figura 54 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.....	107

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 - Concentrazione soglia di contaminazione nel suolo e nel sottosuolo riferiti alla specifica destinazione d'uso dei siti da bonificare (DLgs.152, 2006).	21
Tabella 2 - Concentrazione soglia di contaminazione nelle acque sotterranee (DLgs.152, 2006)	21
Tabella 3- Valori limiti di emissione in acque superficiali e in fognatura (DLgs.152, 2006)	21
Tabella 4 - Calcolo iterativo punti ignoti equidistanti	29
Tabella 5 - Esempio dati di emungimento	30
Tabella 6 - Valori di precipitazione annuale totale e valori massimi di precipitazione giornaliera	37
Tabella 7 - Valori di temperatura media annuale dal 2008 al 2013	40
Tabella 8 - Valori di temperatura massima giornaliera dal 2008 al 2013. Stazione ARPAV Rosà (VI)	41
Tabella 9 - Valori di temperatura minima giornaliera dal 2008 al 2013. Stazione ARPAV Rosà (VI)	41
Tabella 10 - Valori massimi e medi di concentrazione Cr6+. Pozzi: G2; G3; G4; G5; G6	47
Tabella 11 - Coefficiente bi , numero di ore di sole espresse in 30 giorni di 12 ore. (Thornthwaite, 1948)	56
Tabella 12 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2008.	56
Tabella 13 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2009.	57
Tabella 14 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2010.	57
Tabella 15 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2011.	58
Tabella 16 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2012.	58
Tabella 17 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2013.	59
Tabella 18 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2014.	59
Tabella 19 – Parametri equazione di Horton (1940). (S.K. Mishra, 2003)	62

Tabella 20 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G2. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	73
Tabella 21 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G3. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	75
Tabella 22 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G4. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	78
Tabella 23 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G5. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	81
Tabella 24 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G6. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014. ....	85
Tabella 25 - Valori analisi chimiche su campioni a diverse profondità. Pozzo G8. (Perizia stratigrafica C.T.U., 2005) .....	91

## ELENCO SIMBOLI UTILIZZATI

Nome	Descrizione	Unità di misura
VCLA	Valori di concentrazione limiti ammissibili	
CSR	Concentrazioni soglia di rischio	
K	Conducibilità idraulica	[m/s]
ppb	parti per miliardo	[ $\mu\text{g/L}$ ]
Cr tot.	Cromo totale	
p.c.	piano campagna	
P	Punto noto	
I	Punto ignoto	
$ET_{po}$	Evapotraspirazione potenziale	[mm/mese]
I	Indice termico annuale	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
$f_p$	capacità d'infiltrazione del suolo	[mm/ora]
$f_{\infty}$	capacità d'infiltrazione del suolo minima	[mm/ora]
$f_0$	capacità d'infiltrazione del suolo massima	[mm/ora]
t	tempo dall'inizio della precipitazione	[s]
a	coefficiente di decadimento	[ $\text{s}^{-1}$ ]
$t_d$	tempo alla fine della precipitazione piovosa	[s]
$a_d$	coefficiente di decadimento per la curva di recupero	[ $\text{s}^{-1}$ ]
$P_{inf}$	segnale precipitazioni infiltrate	[mm]
Cr	segnale concentrazioni Cr(VI)	[ $\mu\text{g/L}$ ]
$R_{P_{inf} Cr}$	Vettore valori di correlazione tra $P_{inf}$ e Cr	
$P_{inf}^{M35}$	Media mobile a 35 giorni di $P_{inf}$	[mm]
$P_{inf}^T$	$P_{inf}$ traslato di 35 giorni	[mm]
$P_{inf}^{M29}$	Media mobile a 29 giorni di $P_{inf}$	[mm]

# 1. INTRODUZIONE

L'ex ditta Galvanica p.m., situata in via tre case n. 67 nella zona industriale di Tezze sul Brenta è stata, oggetto, nel corso degli ultimi anni, di numerose indagini, con l'obiettivo di individuare la distribuzione degli inquinanti nelle diverse matrici ambientali coinvolte: suolo, sottosuolo e acque sotterranee.

L'attività industriale nell'area indagata, si è sviluppata a partire dal 1973, prima come opificio di costruzioni meccaniche trasformatosi poi in galvanica nello stesso anno con il nome di TRICOM S.p.a.. (ARPA Veneto, 2004)

Il ritrovamento del cromo esavalente nelle acque sotterranee ha portato nel 2002 la decisione di chiudere numerosi pozzi privati presenti nella zona. In seguito alle indagini atte a determinare le cause di tale inquinamento nelle acque sotterranee nei comuni di Cittadella e Fontaniva, ARPAV ha individuato l'industria Galvanica p.m. come area sorgente della contaminazione.

Le analisi di caratterizzazione eseguite sulle matrici ambientali del sito hanno evidenziato il superamento dei limiti di concentrazione di cromo esavalente imposti dall'attuale D.M. 471/99 sostituito oggi dal D.Lgs. 152/2006.

L'area indagata, situata a nord est della provincia di Vicenza, si trova in corrispondenza dell'alta pianura, pochi chilometri a nord dell'area delle risorgive e ricadente all'interno del bacino scolante della laguna veneta. (ARPA Veneto, 2005)

Attualmente il sito ha subito numerosi interventi per evitare la dispersione nelle matrici ambientali di altro inquinante. L'intero ciclo produttivo è stato smantellato ed una parte degli edifici è stata demolita.

È stata, inoltre, realizzata la messa in sicurezza dell'area, con l'installazione di una barriera idraulica abbinata ad un impianto di depurazione. (ARPA Veneto, 2005)

Un corretto studio dei dati storici costituisce un passaggio fondamentale per valutare le vie di contaminazione e le relative dinamiche di un inquinante fortemente mobile come il cromo esavalente. Nello studio dei meccanismi in grado di mobilizzare l'inquinante in un sito di alta pianura. Si sono voluti distinguere due meccanismi fondamentali. Il contributo dell'innalzamento della falda da quello delle precipitazioni piovose nel rilascio del cromo nell'acquifero.



## 2. DATI GENERALI

La contaminazione della falda acquifera nell'area di Tezze sul Brenta, è stata riscontrata ufficialmente nel 2002. (ARPA Veneto, 2005) A seguito delle analisi effettuate sull'acqua proveniente da un pozzo privato. È stato riscontrato il superamento dei limiti di potabilità per quanto riguarda il cromo totale fissato a 50 µg/L. (DLgs.152, 2006)

Dato il superamento è stata eseguita la speciazione individuando il superamento dei limiti per il cromo esavalente.

Il cromo metallico e quello trivalente non sono ritenuti pericolosi per la salute umana, al contrario Il Cr<sup>6+</sup> è considerata la forma ionica più pericolosa del metallo pesante, altamente solubile risulta essere molto tossico per l'uomo. Esiste inoltre un'ampia letteratura scientifica a dimostrazione dei suoi effetti cancerogeni. (ATSDR, 2000)

Data l'alta solubilità del cromo in acqua è stato necessario eseguire un approfondito studio geologico e idrogeologico per risalire alla sorgente della contaminazione. Con i pozzi esistenti è stato possibile mappare il plume di contaminazione individuando due aree per le quali la presenza di "pericolo concreto e attuale di inquinamento" ha dato il via alle indagini preliminari. Le successive analisi hanno riscontrato nelle aree esterne al capannone della Galvanica p.m. il superamento delle VCLA. I valori riscontrati hanno dato il via all'iter per la bonifica del sito. Data la pericolosità si è proceduto con la messa in sicurezza di emergenza. A seguito dell'attuazione del piano di caratterizzazione è stato definito grado ed estensione della contaminazione, ottenendo i parametri chimici e fisici necessari per eseguire l'analisi di rischio sito specifica. Tale studio ha permesso di definire le CSR nonché gli obiettivi di bonifica.

## 2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area sorgente dell'inquinamento (Figura 1) si colloca in provincia di Vicenza, nella porzione centrale della Regione Veneto, entro il settore di Alta pianura, in una posizione di elevata vulnerabilità delle acque sotterranee dell'acquifero freatico ad eventi inquinanti. Inoltre, la vicinanza del fiume Brenta, costituisce una variabile fondamentale da tenere in considerazione, nella determinazione della direzione del plume di contaminazione.

Dai dati a disposizione, si osserva che l'area è pressoché pianeggiante, con quote assolute comprese tra 74 e 76 m s.l.m. e quote medie di 75,6 m s.l.m..



Figura 1 - Inquadramento territoriale. Sito ex Galvanica p.m..

## 2.2. IL SITO

L'area della ex Galvanica P.M. (Figura 2), occupa un'area di 4850 m<sup>2</sup>, quasi interamente occupata dal capannone dove si svolgeva l'attività produttiva. L'intera area è pavimentata da una strato di 3 cm d'asfalto o da solette in calcestruzzo di 12 cm di spessore. (ARPA Veneto, 2005)

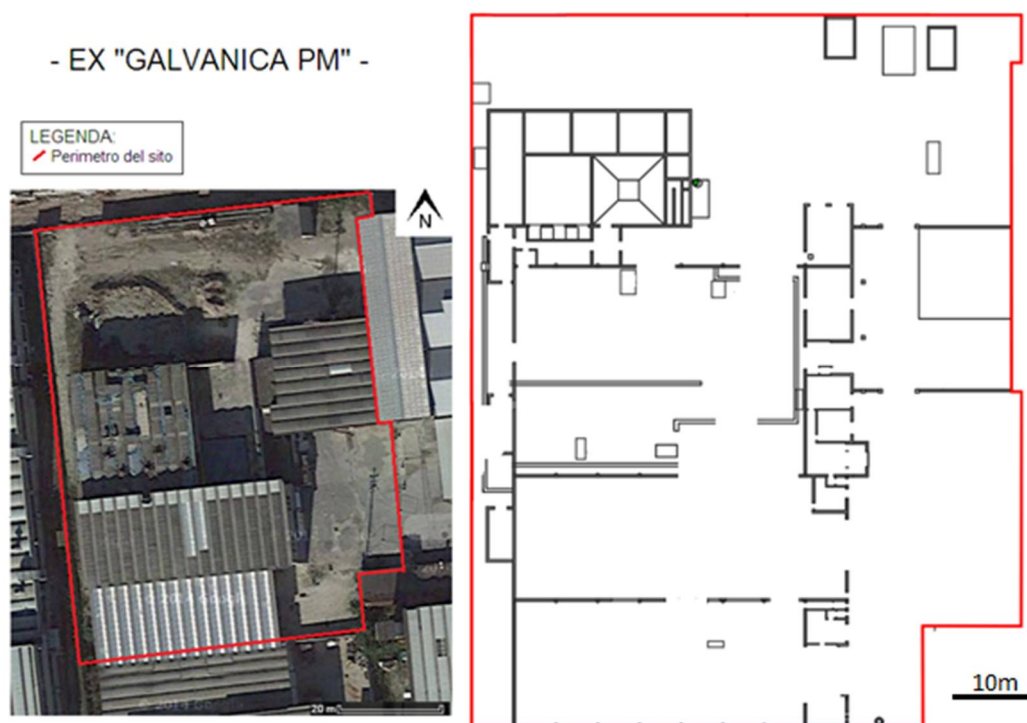


Figura 2 - Foto aerea e planimetria dell'area ex "Galvanica p.m.". Foto gennaio 2015.

## 2.3. GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

I megafan che costituiscono la pianura veneta si differenziano, procedendo dagli sbocchi vallivi delle Prealpi sino alla laguna, per caratteristiche nettamente differenti. In particolare si può distinguere tra alta, media e bassa pianura. Il sito in esame si colloca in corrispondenza dell'alta pianura veneta.

Il sottosuolo nell'area di alta pianura risulta costituito in prevalenza da ghiaie e materiale grossolano. Tale deposito è caratterizzato da alti valori di permeabilità e porosità, costituendo un acquifero di notevoli proporzioni avente come limite superiore la superficie freatica.

Queste considerazioni, valide a scala regionale, non tengono conto delle variazioni litologiche e morfologiche alla scala locale, specifica del sito analizzato. Dalle numerose indagini geognostiche condotte in fase di caratterizzazione ambientale è stata osservata la prevalenza di orizzonti litologici ghiaioso-sabbiosi, con locali intercalazioni di livelli limosi, argillosi e conglomeratici. (Perizia stratigrafica C.T.U., 2005) La presenza di lenti a permeabilità differente, determina, dal punto di vista della contaminazione, la possibilità di migrazione laterale, oltre che verticale dell'inquinante, modificando forma e geometria del plume.

Infatti, anche se l'area della ditta è completamente pavimentata, la presenza dei livelli conglomeratici, non consentono di escludere la possibilità che le precipitazioni piovose possano infiltrarsi esternamente al sito, quindi migrare orizzontalmente raggiungendo i settori di terreno contaminato al di sotto dell'area produttiva e favorendo il trasporto dell'inquinante in falda. (Studio Tedesi, 2007)

Nella media pianura, posta qualche chilometro più a sud del sito in esame, si assiste ad una differenziazione del materasso ghiaioso, con alternanze tra i materiali più grossolani e gli orizzonti a granulometria più fine (limi e argille) meno permeabili, che permettono l'affioramento della falda lungo la fascia delle

risorgive a sud di Cittadella. Valori di soggiacenza della superficie piezometrica non particolarmente elevati hanno favorito nel corso degli anni la realizzazione di numerosi pozzi privati, alcuni dei quali sono stati coinvolti dalla contaminazione da Cromo VI, come è emerso dalle indagini svolte. (ARPA Veneto, 2005)

Da un punto di vista idrogeologico, il settore di alta pianura risulta particolarmente vulnerabile ad eventuali episodi di inquinamento, in assenza di unità litologiche a bassa permeabilità in grado di proteggere l'acquifero freatico e le acque sotterranee dalla migrazione verticale delle sostanze contaminanti. (CNR, 1988)

Dagli studi fatti, si evince, inoltre, un'influenza fondamentale del fiume Brenta nelle dinamiche di flusso alla scala del sito e, quindi, sulla geometria del plume di contaminazione. Tale corso d'acqua assume nei confronti della falda un comportamento disperdente a nord dell'area delle risorgive. Il suo contributo come fattore di alimentazione, legato alla variazione del tirante idrico, è in grado di far ruotare la direzione di deflusso della falda di circa 30°. La quota piezometrica al di sotto del sito si attesta mediamente su 54.66 m s.l.m., con un'escursione tra il valore massimo e quello minimo di circa 6 metri<sup>1</sup>.

Dalle osservazioni dei livelli stagionali, il fiume Brenta registra il periodo di piena, nel periodo tardo estivo-autunnale, mentre la magra corrisponde ai periodi invernali-primaverili. È stato evidenziato inoltre, nel periodo autunnale tra settembre e ottobre, un periodo di magra all'interno della fase di piena principale.

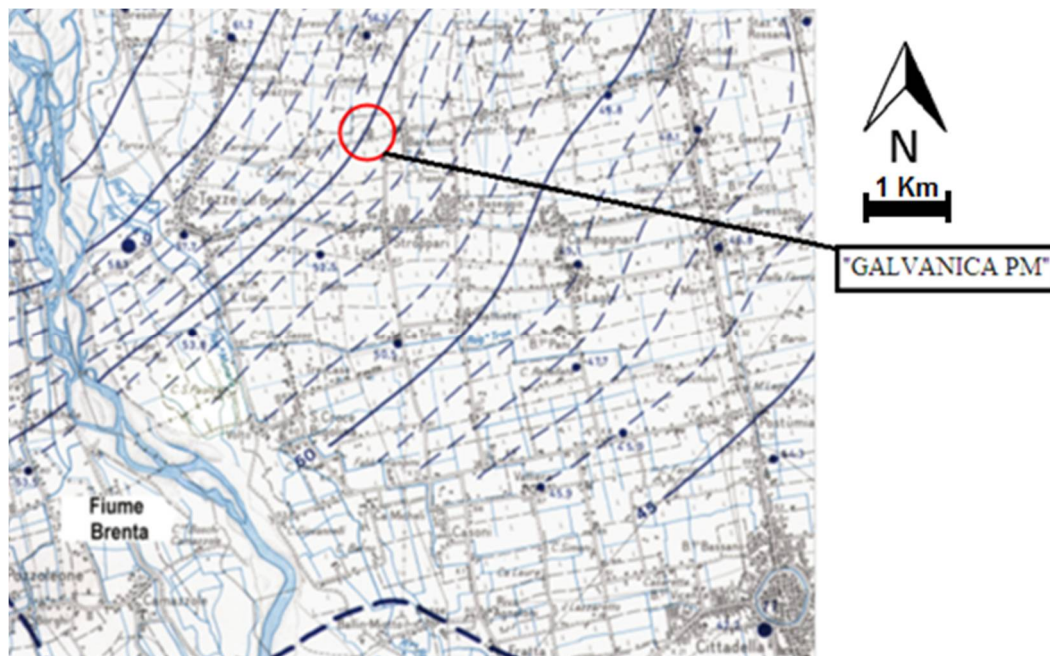
Il deflusso idrico sotterraneo ha direzione all'incirca NW-SE e gradiente medio di 2-3 per mille (Figura 3). Dagli studi effettuati è stata valutata una velocità di falda di 11 m/giorno, con una conducibilità idraulica K stimata di  $1.16 \times 10^{-3}$  m/s. (ARPA Veneto, 2006)

In relazione ai dati disponibili, l'andamento e i volumi della falda appaiono influenzati maggiormente dall'azione disperdente del fiume Brenta, mentre è

---

<sup>1</sup> I dati sono stati ottenuti dal monitoraggio dei livelli piezometrici del pozzo G1, situato nell'area nord ovest del sito.

sostanzialmente minore il contributo dell'infiltrazione delle acque meteoriche locali.



*Figura 3 - Deflusso idrico tra le province di Padova e Vicenza (Antonelli R. Dal Prà A., 1980)*

## 2.4. LA STORIA DEL SITO E DELLA CONTAMINAZIONE

Dalle ricerche storiche effettuate sullo sviluppo della zona industriale, si è riscontrato che il corpo centrale dell'edificio della galvanica fu costruito nel 1973, anno in cui iniziò l'attività produttiva come opificio di costruzioni meccaniche. Già nello stesso anno la produzione fu sostituita da una galvanica con la ditta TRICOM S.p.a.. Nel 1995 il nome dell'azienda cambiò in "Galvanica p.m.", fino al 19 dicembre 2003, data nella quale viene sciolta e messa in liquidazione. Dai documenti si evidenzia come nell'ultimo periodo venisse effettuato il trattamento galvanico di manufatti metallici mediante l'elettrodeposizione di nichel e cromo. (ARPA Veneto, 2004)

Il primo episodio di contaminazione da  $\text{Cr}^{6+}$  è da far risalire al 1977, anche se le indagini eseguite all'epoca non furono sufficienti a ricostruire forma e dimensione del plume di contaminazione. Esso, si estendeva nei comuni di Fontaniva e Cittadella in direzione circa N-S. Dalle geometrie individuate, la contaminazione si chiudeva a monte dei comuni indicati, facendo supporre che la sorgente fosse collocata in corrispondenza dell'attuale zona industriale di Tezze sul Brenta.

Nel 2001, a seguito di alcune analisi svolte per la verifica di potabilità di acque provenienti da due pozzi privati a nord di Cittadella, è stato riscontrato un superamento dei limiti di concentrazione di cromo totale. Successive analisi di speciazione hanno dimostrato che anche la concentrazione di cromo esavalente era superiore ai limiti.

Come per l'episodio del 1977, la sorgente era ignota. Si è cominciato dunque a mappare il nuovo plume utilizzando i pozzi esistenti. Innanzitutto si è proceduto con il censimento dei pozzi e delle relative stratigrafie, profondità e fenestrate, individuando la rete di monitoraggio più rappresentativa per la ricostruzione del campo di flusso e per definire l'evoluzione spazio temporale del plume.

Individuata l'area sorgente, si è proceduto con il censimento delle aziende che operavano con prodotti contenenti cromo e dei punti di recapito degli scarichi industriali.

Sulla base dei dati ottenuti, si sono individuate due aree sorgenti: (ARPA Veneto, 2004)

- La Galvanica p.m.,
- La roggia punto di recapito delle acque piovane dell'industria.

In tali aree è stato riscontrato il pericolo concreto ed attuale dell'inquinamento, sufficiente all'attivazione delle prime indagini, che hanno evidenziato indici di inquinamento da metalli, rendendo necessario una caratterizzazione più approfondita del sito.

Le indagini, eseguite da ARPAV, hanno rilevato il superamento dei VCLA, ai sensi dell'allora vigente D.M. 471/99, rendendo necessario un piano di caratterizzazione dell'area, in base al quale sono stati realizzati cinque piezometri (G1; G2; G3; G4; G5) con fenestrazione da -15 a -36 m dal p.c. all'interno della ditta. Inoltre è stata realizzata una trincea esplorativa profonda 4,5 m che ha consentito di individuare una contaminazione da  $\text{Cr}^{6+}$  nei primi 160 cm di sottosuolo, con tenori fino a 780 mg/kg. Data la possibile dispersione di inquinante nelle matrici ambientali, si è resa necessaria la messa in sicurezza d'emergenza. (ARPA Veneto, 2005) (Sottani A., 2015)

## 2.5. CARATTERIZZAZIONE DELL'INQUINANTE

### 2.5.1. CARATTERISTICHE

Il cromo, è di norma presente sotto forma di ioni inorganici. Gli stati di ossidazione più comuni sono +6 e +3. Cariche differenti determinano caratteristiche profondamente diverse. Questo è ben evidenziato dal potenziale ionico che esprime la densità di carica dello ione considerato.

Valutando come si comportano i diversi ioni in acqua, si può osservare come il  $\text{Cr}^{3+}$  ha un potenziale ionico compreso tra 3 e 10. Con tali caratteristiche, il cromo si lega all'ossigeno degli OH, formando ossidi e idrossidi insolubili. Al contrario il  $\text{Cr}^{6+}$ , ha un alto potere polarizzante che gli permette di legarsi all'ossigeno della molecola d'acqua, inducendo l'allontanamento dell'idrogeno. Si formano così ossianioni mobili (cromati e dicromati). (EPA, 2000) Il  $\text{Cr}^{6+}$ , risulta estremamente mobile nonché tossico e cancerogeno mentre il  $\text{Cr}^{3+}$ , che è la forma più stabile e comune, è scarsamente mobile e tossico (Figura 4).



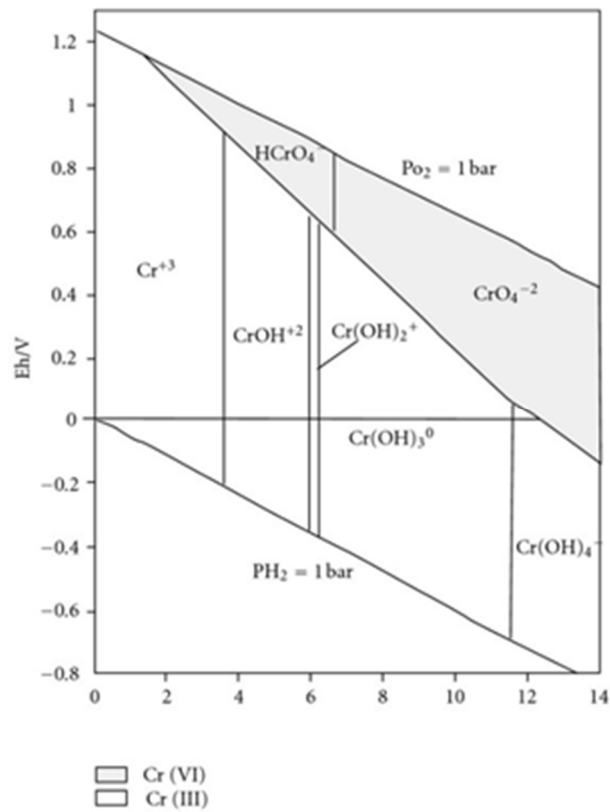


Figura 4 - Diagramma Eh - pH Cromo (<http://openi.nlm.nih.gov>)

## 2.5.2. LIMITI

I limiti, fissati dalla normativa, per quanto riguarda la concentrazione degli inquinanti nelle matrici ambientali, sono specificati nel D.lgs. n. 152/2006, “Norme in materia ambientale”. In particolare, nell’Allegato 5, sono indicate le concentrazioni soglia di contaminazione nel suolo, sottosuolo e acque sotterranee (CSC). Per cromo e nichel i valori sono i seguenti (Tabella 1):

	Siti ad uso Verde pubblico, privato e residenziale [mg/kg]	Siti ad uso Commerciale ed industriale [mg/kg]
Cromo totale	150	800
Cromo esavalente	2	15
Nichel	120	500

*Tabella 1 - Concentrazione soglia di contaminazione nel suolo e nel sottosuolo riferiti alla specifica destinazione d'uso dei siti da bonificare (DLgs.152, 2006)*

Per quanto riguarda le CSC nelle acque sotterranee la (Tabella 2) dell'Allegato 5, contiene i seguenti valori:

	Valore limite [ $\mu\text{g/L}$ ]
Cromo totale	50
Cromo esavalente	5
Nichel	20

*Tabella 2 - Concentrazione soglia di contaminazione nelle acque sotterranee (DLgs.152, 2006)*

I Valori limiti di emissione in acque superficiali e in fognatura sono (Tabella 3):

	Scarico in acque superficiali [mg/L]	Scarico in rete fognaria [mg/L]
Cromo totale	$\leq 2$	$\leq 4$
Cromo esavalente	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$
Nichel	$\leq 2$	$\leq 4$

*Tabella 3- Valori limiti di emissione in acque superficiali e in fognatura (DLgs.152, 2006)*

Nello stesso decreto legislativo, sono indicate le caratteristiche di qualità delle acque superficiali destinate alla produzione di acqua potabile. Per il Cr tot. il limite è di 0,05 mg/L.

L'attuale normativa ha sostituito il precedente D.M. 471 del 1999.

## 2.6. PROCESSO PRODUTTIVO GALVANICA

Il processo produttivo, utilizzato dalla Galvanica P.M. per la cromatura, richiedeva numerosi passaggi e prodotti chimici differenti. Gli oggetti da trattare, venivano immersi in vasche contenenti apposite soluzioni.

I materiali metallici, venivano posizionati manualmente dai lavoratori su appositi telai, i quali, mossi automaticamente, immergevano gli oggetti metallici in apposite vasche contenenti le soluzioni necessarie alla sgrassatura, lavaggio, nichelatura e cromatura.

Inizialmente, nella fase iniziale di sgrassatura, si eliminavano gli olii e i grassi dal materiale grezzo, mediante una soluzione alcalina addizionata di tensioattivi ed emulsionanti. Successivamente, si eseguiva il decapaggio acido per rimuovere lo strato di ossido superficiale. Per eliminare i grassi superficiali, si eseguiva la sgrassatura elettrolitica, al termine della quale, dopo un lavaggio in acqua i pezzi venivano immersi in uno dei due bagni principali del processo galvanico: la nichelatura.

Il nichel, in questa fase veniva depositato con una cella elettrolitica in cui il metallo da ricoprire rappresenta il catodo, in grado di accettare i cationi provenienti dall'anodo, a sua volta costituito dal materiale di cui si vuole rivestire l'oggetto da trattare. In questa fase erano utilizzati cloruri, solfati di nichel e acido borico.

Dopo un ulteriore lavaggio, si procedeva con l'ultima fase della lavorazione, ovvero la cromatura.

Anche questa fase, come la nichelatura, avveniva con l'immersione in una soluzione elettrolitica, costituita da un bagno di cromo esavalente.

Il ciclo produttivo si concludeva con il lavaggio del pezzo cromato con acqua corrente. (ARPA Veneto, 2004)

## 2.7 LA MESSA IN SICUREZZA D'EMERGENZA

### 2.7.1 LA BARRIERA IDRAULICA

Il campionamento delle acque di falda, eseguito da ARPAV, ha evidenziato, in corrispondenza dei piezometri (G1; G2; G3; G4; G5)(Figura 5), elevate concentrazioni di cromo. Su queste basi si è deciso di effettuare la messa in sicurezza di emergenza del sito, mediante l'utilizzo del metodo "Pump and treat".

Tale tecnica è una delle più utilizzate per la messa in sicurezza dei siti contaminati e consiste nell'emungimento di acqua contaminata e nel suo trattamento con un impianto di depurazione.

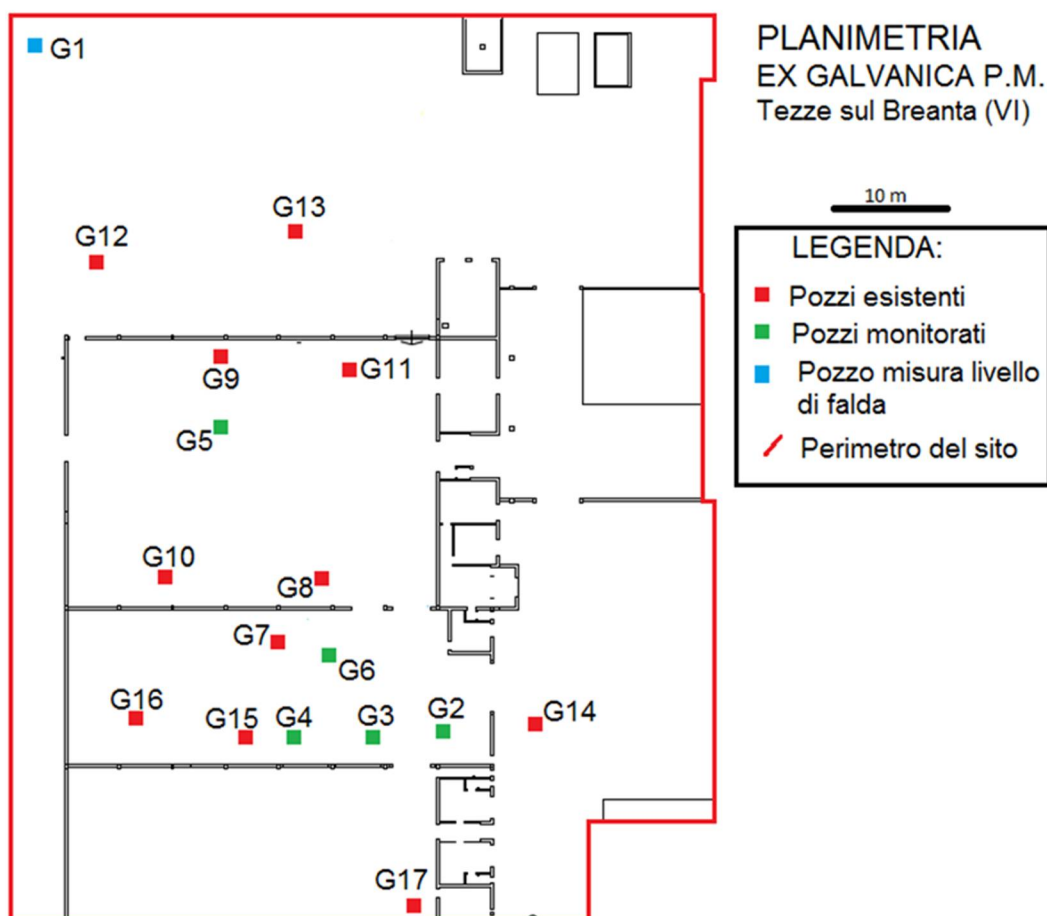


Figura 5- Planimetria area ex Galvanica p.m.. Ubicazione pozzi esistenti

Constatando che le concentrazioni massime di cromo si trovavano in corrispondenza del pozzo G5, si è proceduto con l'installazione di una pompa sommersa. Il diametro del pozzo, 190 mm, ha consentito il posizionamento di una pompa sommersa a -24 m dal p.c., con portata massima di 12 m<sup>3</sup>/h. Successivamente, per isolare al meglio la sorgente inquinante, si è avviato l'emungimento anche sugli altri pozzi realizzati nel 2004. Nel gennaio 2005, a valle delle vasche per la cromatura, si è terebrato un ulteriore pozzo, denominato G6, al cui interno è stata installata un pompa con portata massima di 60 m<sup>3</sup>/h al fine di incrementare i volumi emunti. (ARPA Veneto, 2005)

Le caratteristiche, di portata e dimensione del nuovo pozzo hanno permesso di effettuare una prova idraulica. Dai risultati, si è evidenziata una portata massima erogabile di 42 m<sup>3</sup>/h, con un cono di depressione di circa 15 – 16 m. La portata ottimale è stata valutata in 36 m<sup>3</sup>/h. (Dal Prà M., De Rossi J., 2005)

Le acque sono ancora oggi emunte e trattate dall'impianto di depurazione, per poi essere scaricate in fognatura, rispettando i relativi limiti di legge allo scarico.

La barriera idraulica descritta, è gestita da ETRA S.p.a che si occupa di comunicare ad ARPAV e Comune:

- Livello della falda, rilevato nel piezometro G1.
- Portata delle pompe in G2, G3, G4, G5, G6, Pozzo nuovo 2, Pozzo nuovo 3.
- Concentrazioni di Cr<sup>6+</sup> e Ni (espresse in ppb) in G2, G3, G4, G5, G6, Pozzo nuovo 2, Pozzo nuovo 3.

Le pompe sono attivate solo quando le concentrazioni di cromo superano un certo valore critico e sono, quindi, ritenute pericolose per la migrazione a valle del sito.

### 3. OBIETTIVI DELLA TESI

Il seguente lavoro ha come obiettivo, lo studio dei meccanismi in grado di mobilizzare l'inquinante in un sito di alta pianura. In particolare, prendendo in considerazione il sito contaminato da cromo esavalente della ex Galvanica p.m., si sono voluti distinguere due meccanismi fondamentali nel rilascio di cromo nell'acquifero:

- Il contributo dato dall'innalzamento della falda, in grado di lisciviare il  $\text{Cr}^{6+}$  dalla porzione di terreno insaturo,
- Il contributo della lisciviazione di  $\text{Cr}^{6+}$  da parte delle precipitazioni piovose.

Per il raggiungimento di tale obiettivo appare necessario studiare la relazione tra i diversi dati ed informazioni raccolti nel corso degli anni e delle varie fasi di caratterizzazione cui è stato sottoposto il sito. Il monitoraggio del sito, ha permesso di raccogliere in maniera costante numerose informazioni specifiche riguardanti:

- La concentrazione del cromo esavalente in falda,
- Il livello di falda misurato nel pozzo G1,
- Le portate di emungimento della barriera idraulica,
- Informazioni di carattere meteorologico-climatico (stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI)).

È necessario, inoltre, valutare l'entità della ricarica della falda da parte delle piogge locali ed il riconoscimento di eventuali correlazioni tra i diversi segnali (eventi precipitativi intensi, innalzamento dei livelli di falda, aumento delle concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$ , etc...). Tali aspetti devono essere valutati tenendo conto dei periodi in cui è attiva la barriera idraulica, valutandone l'eventuale effetto sull'andamento della falda e sull'abbattimento delle concentrazioni di cromo.

## 4. DATA-BASE ED ELABORAZIONE PRELIMINARE DEI DATI

Attualmente, in attesa della bonifica definitiva, il sito è stato messo in sicurezza mediante barriera idraulica.

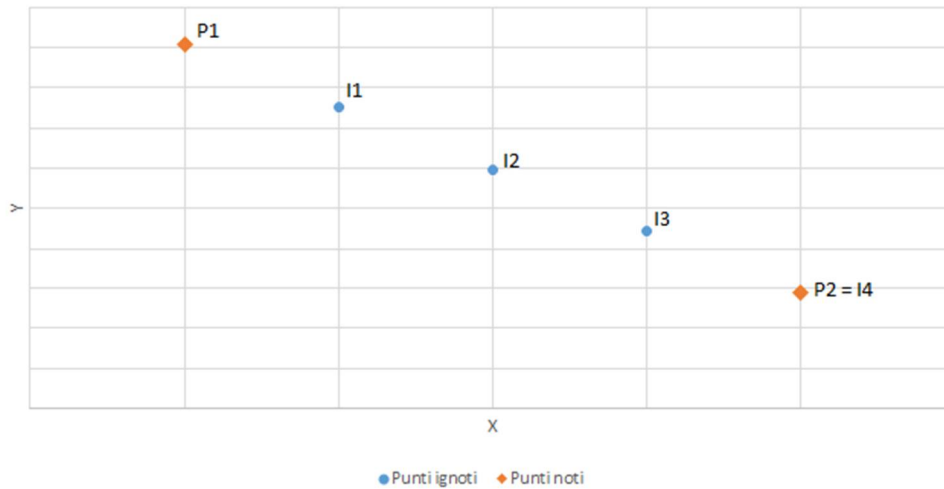
La gestione dei pozzi è affidata ad ETRA S.p.a. che ogni tre giorni invia ad ARPAV un bollettino contenente il livello di falda giornaliero misurato nel pozzo G1, inoltre per quanto riguarda i pozzi G2, G3, G4, G5, G6, PN2, PN3 comunica la concentrazione di cromo esavalente in ppb e la portata delle pompe in m<sup>3</sup>/h.

I dati utilizzati sono relativi ai giorni che vanno dall'04/01/2008 al 03/11/2014. Considerata l'elevata mole di informazioni, i dati sono stati estratti e organizzati automaticamente, suddividendo i valori per pozzo di appartenenza e distribuendoli poi nello spazio temporale dei cinque anni considerati. I dati mancanti sono segnalati con un valore pari a -99.

Al fine di stimare la concentrazione giornaliera di Cr<sup>6+</sup> ai pozzi nei giorni compresi tra due campionamenti, è stato utilizzato il metodo seguente (funzione: calcolo\_vettore\_derivate\_cr.m):

Considerando la Figura 6 sottostante, vengono riportati due punti noti: P1(Xp1; Yp1), P2(Xp2; Yp2)





*Figura 6 - Esempio calcolo punti ignoti equidistanti lungo l'asse X*

Volendo avere, come risultato finale, un insieme di punti equidistanti tra loro lungo l'asse X, si procede nel seguente modo:

Si calcola la derivata tra i punti noti:  $d1 = \frac{Y_{p2} - Y_{p1}}{X_{p2} - X_{p1}}$

Considerando un valore di equidistanza finale tra i punti  $\Delta X = 1$

S'individua il numero delle equidistanze tra un punto noto e l'altro:

$$N1 = \frac{X_{p2} - X_{p1}}{\Delta X}$$

La serie dei punti noti (P) e ignoti (I) viene calcolata nel modo iterativo seguente (Tabella 4):

Con  $N1 = 4$

Nome punto	X	Y
P1	$X_{p1}$	$Y_{p1}$
I1	$X_{i1} = 2 \cdot \Delta X$	$Y_{i1} = Y_{p1} + d1$
I2	$X_{i2} = 3 \cdot \Delta X$	$Y_{i2} = Y_{i1} + d1$
I3	$X_{i3} = 4 \cdot \Delta X$	$Y_{i3} = Y_{i2} + d1$
P2 = I4	$X_{p2} = X_{i4} = 5 \cdot \Delta X$	$Y_{p2} = Y_{i4} = Y_{i3} + d1$

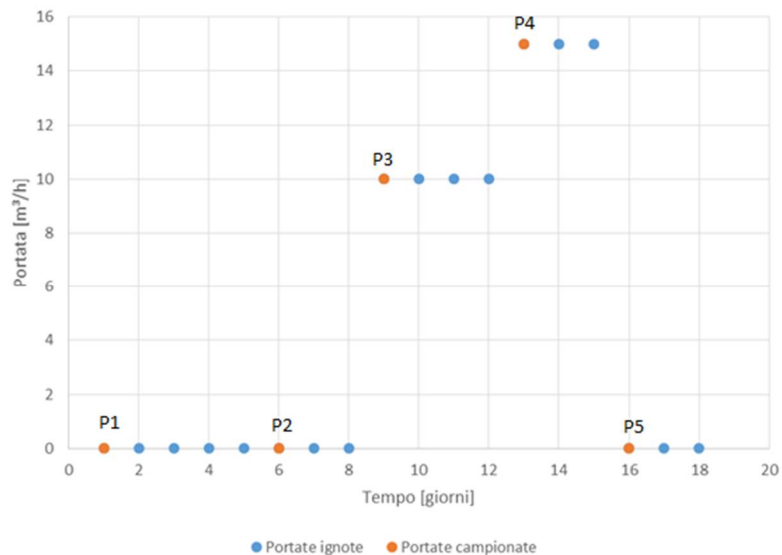
*Tabella 4 - Calcolo iterativo punti ignoti equidistanti*

In questo modo si trovano  $N1+1$  valori equidistanti lungo l'asse X.

Il procedimento descritto, viene ripetuto per ogni coppia di punti noti.

I valori di portata sono stati stimati con la funzione (analisi\_pozzi\_2.m). Il procedimento utilizzato è il seguente:

Considerando dei dati di portata distribuiti nel tempo come in Figura 7:



*Figura 7 - Esempio calcolo portate ignote equidistanti lungo l'asse Tempo.*

Le portate campionate fanno riferimento ai seguenti dati (Tabella 5):

Nome punto	Portata [m <sup>3</sup> /h]	Giorno
P1	0	1
P2	0	6
P3	10	9
P4	15	13
P5	0	16

*Tabella 5 - Esempio dati di emungimento*

Il calcolo viene fatto sapendo che le portate possono subire variazioni solo nei giorni di campionamento.

Sapendo questo, il valore di portata corrispondente a un generico punto  $P_i$ , rimane tale anche nei giorni successivi fino a  $P_{i+1}$ .

I dati relativi al livello di falda, espressi come soggiacenza dal piano di riferimento quotato, sono stati trasformati in quota piezometrica assoluta. In questo caso i valori sono acquisiti con frequenza giornaliera ed i pochi dati mancanti sono stati ricavati in modo analogo a quanto eseguito per la stima delle concentrazioni.

I dati relativi alle precipitazioni piovose ed alle temperature dal 2008 al 2014 sono forniti da ARPAV e fanno riferimento alla stazione pluviometrica di Rosà. I dati disponibili sono già a cadenza giornaliera.

In particolare le temperature sono espresse come medie giornaliere, mentre le precipitazioni piovose sono espresse in mm/giorno.

Questi dati sono poi stati integrati con le precipitazioni orarie dal 2008 al 2014.

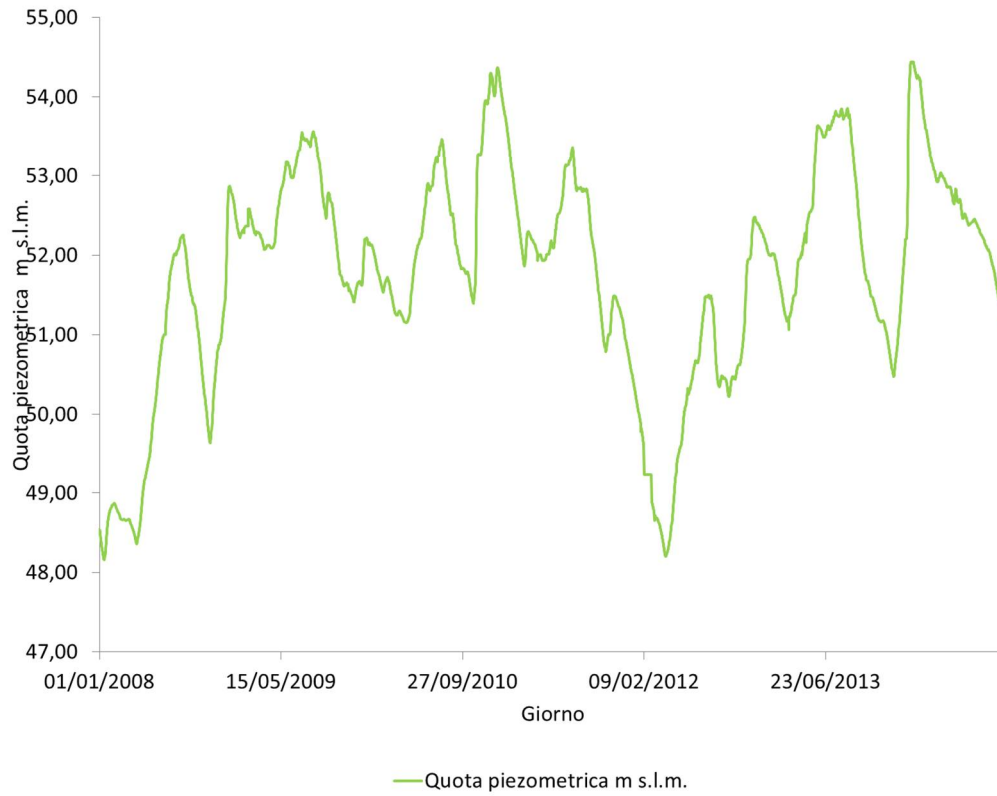
Altre informazioni, riguardo la parametrizzazione idrogeologica dell'acquifero, l'ubicazione e lo sviluppo dei piezometri e pozzi di monitoraggio sono derivate dal piano di caratterizzazione e dal progetto preliminare di bonifica del sito.

## 4.1. LIVELLO DI FALDA

Il livello di falda come specificato precedentemente, è relativo al pozzo G1. Essendo il sito della galvanica relativamente piccolo, esso è stato assunto come rappresentativo per l'intero sito ed esteso anche agli altri pozzi presi in considerazione. Il livello di falda è influenzato dalle precipitazioni piovose e dal livello idrometrico del fiume Brenta che dista circa 3,5 km ad ovest del sito con direzione di scorrimento N-S.

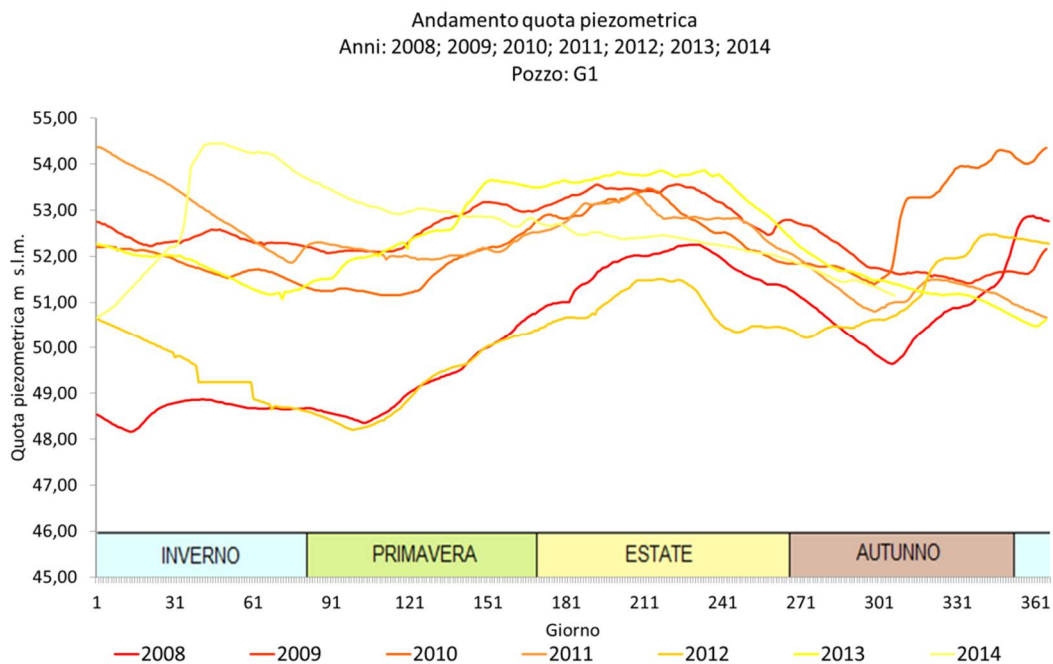
Di seguito (Figura 8) vengono proposti i grafici relativi al regime piezometrico ottenuto dai dati giornalieri misurati nel pozzo G1.

Andamento quota piezometrica  
Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014  
Pozzo: G1



*Figura 8 - Andamento quota piezometrica misura in pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*

Nel seguente grafico (Figura 9) vengono sovrapposti gli andamenti della quota piezometrica relativi ad ogni singolo anno.



*Figura 9 - Andamenti quota piezometrica misurata nel pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*

Dal grafico soprastante si può osservare la variazione della quota piezometrica nel corso degli ultimi sette anni. Nel periodo di tempo considerato la quota media è stata di 51,77 m s.l.m. mentre il massimo si è registrato in febbraio 2014 con un valore di 54,44 m s.l.m..

Come si può vedere dal grafico sottostante (Figura 10), il livello medio della quota piezometrica tra il 2008 e il 2014 ha un andamento caratteristico, con valori più elevati in estate e tardo autunno che si contrappongono a valori più bassi ad inizio autunno e tardo inverno. Le uniche eccezioni a tale comportamento sono costituite dagli anni 2010 e 2014: il 2010 è stato caratterizzato da forti precipitazioni autunnali mentre nel 2014 le abbondanti nevicate invernali hanno modificato il regime di alimentazione della falda in modo tale da modificarne l'andamento rispetto agli anni precedenti.

Andamento medio quota piezometrica  
Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014  
Pozzo: G1

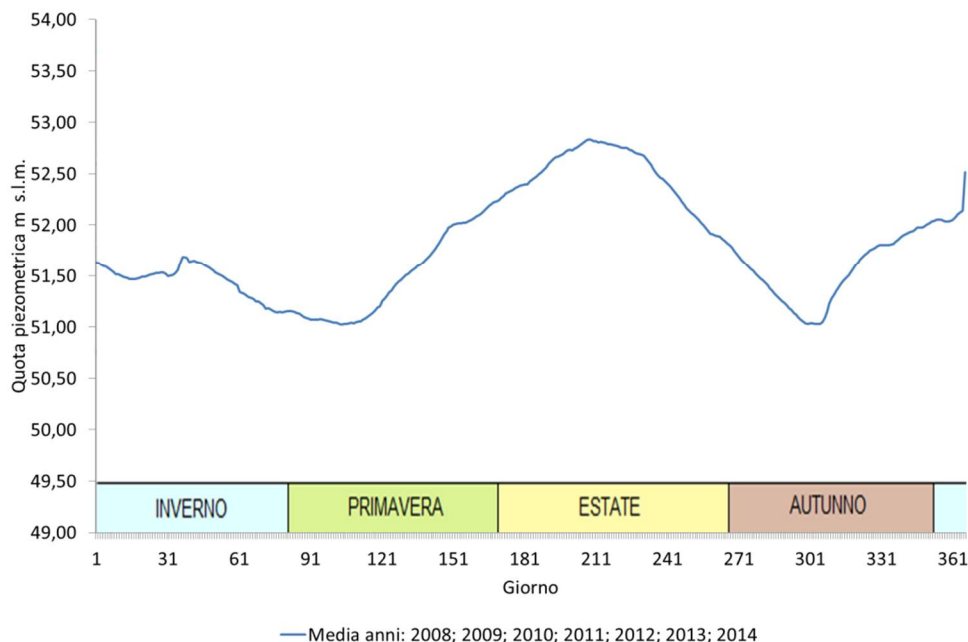


Figura 10 - Andamento medio quota piezometrica misurata nel pozzo G1. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.

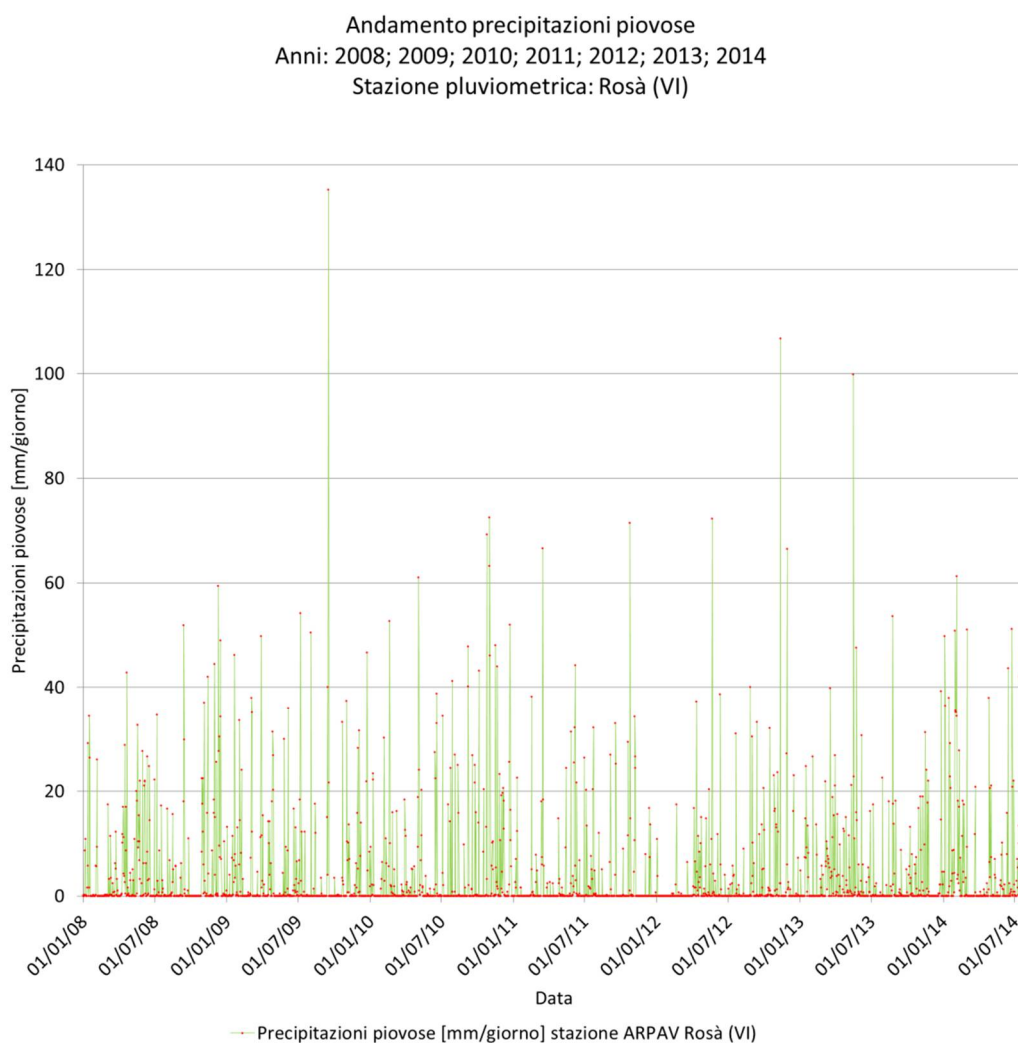
La quota piezometrica è ragionevolmente influenzata dalle precipitazioni piovose, dalla quantità d'acqua che s'infiltra localmente e dal contributo fornito dalla dispersione in falda del fiume Brenta. Tali fenomeni sono in grado di modificare il rilascio ed il trasporto del contaminante in falda.

## 4.2. PRECIPITAZIONI PIOVOSE

Nell'ottica di approfondire il contributo delle piogge nel rilascio del contaminante, sono state identificate le piogge locali per le successive valutazioni. Le precipitazioni piovose locali fanno riferimento alla stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI), la più vicina al sito contaminato.

Il dato viene fornito in mm/h, successivamente viene integrato sulle 24 ore per renderlo confrontabile con gli altri dati aventi frequenza di campionamento giornaliera.

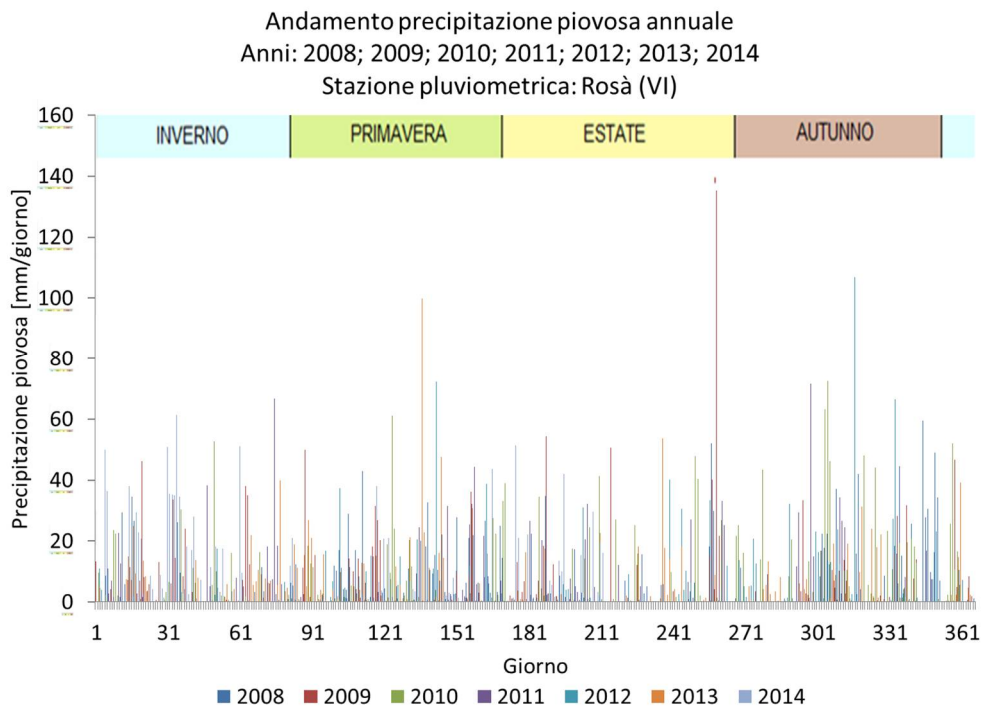
Nel grafico sottostante (Figura 11) vengono proposte le precipitazioni piovose in mm/giorno relative al periodo temporale compreso tra il 01/01/2008 al 31/07/2014.



*Figura 11 - Precipitazioni piovose dal 2008 al 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI).*



Di seguito (Figura 12) vengono confrontate le precipitazioni relative ai diversi anni considerati.



*Figura 12 - Precipitazioni piovose annuali. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI). Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013.*

Il regime pluviometrico è caratterizzato da abbondanti precipitazioni primaverili e autunnali. Tra gli anni considerati quello più piovoso è risultato il 2010 con un totale di 1730 mm di pioggia. Di seguito in *Tabella 6* vengono riportati i valori di precipitazione annuale totale e i valori massimi di precipitazione giornaliera.

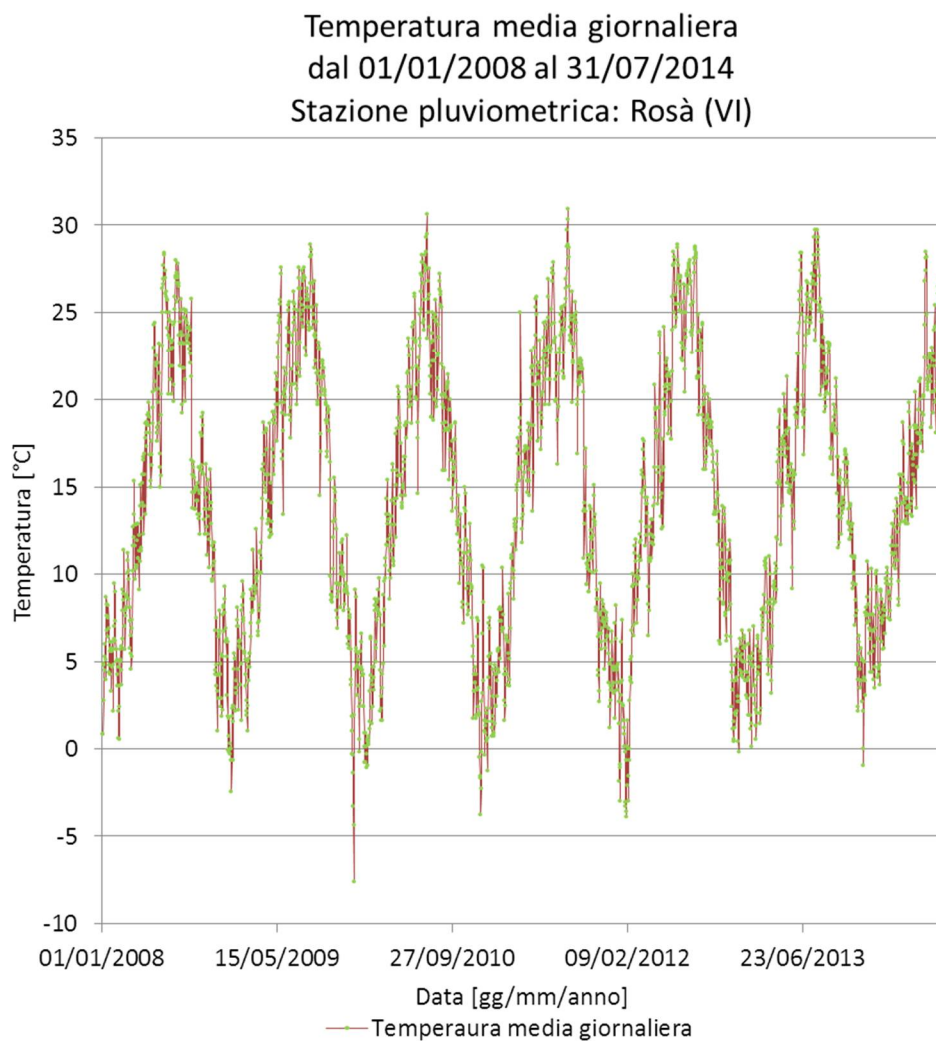
Anno	Totale annuale [mm/anno]	Massimo giornaliero [mm/giorno]	Data
2008	1597,4	59,4	10/12/2008
2009	1431	135,2	16/09/2009
2010	1730,2	72,4	01/11/2010
2011	1016	71,4	25/10/2011
2012	1056,4	106,8	11/11/2012
2013	1303,2	99,8	16/05/2013

*Tabella 6 - Valori di precipitazione annuale totale e valori massimi di precipitazione giornaliera*

Le precipitazioni in mm/h verranno successivamente utilizzate per il calcolo della pioggia infiltrata tenendo conto di alcuni parametri caratteristici del sito.

### 4.3. TEMPERATURE MEDIE GIORNALIERE

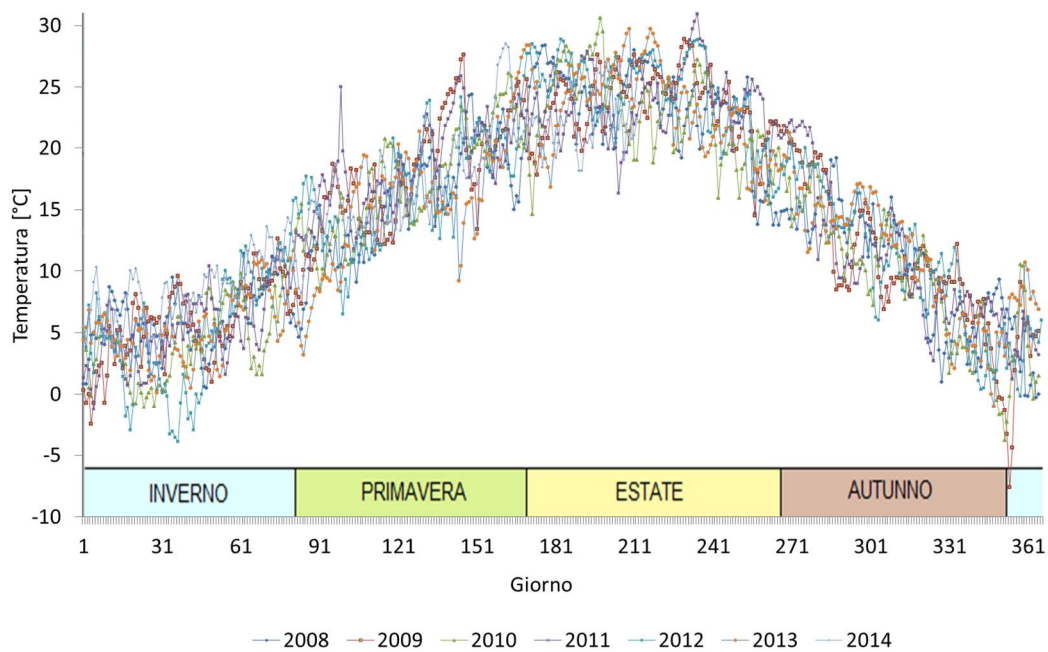
Anche le temperature medie giornaliere, come le precipitazioni, fanno riferimento alla stazione meteorologica di Rosà. Nel grafico sottostante (Figura 13) si può osservare l'andamento della temperatura media giornaliera dal 01/01/2008 al 31/07/2014. A scala annuale si nota come la temperatura dell'aria sia condizionata principalmente dalle stagioni, con massimi estivi e minimi invernali.



*Figura 13 - Temperatura media giornaliera dal 01/01/2008 al 21/07/2014. Dati stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI).*

Questi andamenti sono meglio visibili nei grafici seguenti (Figura 14; Figura 15), in cui, sovrapponendo gli andamenti delle temperature annuali, si osserva un caratteristico andamento a campana con apice nei mesi estivi.

Andamento temperatura media giornaliera  
Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014  
Stazione pluviometrica: Rosà (VI)



*Figura 14 - Andamenti temperatura media giornaliera. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI).*

Andamento temperatura media giornaliera  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014  
 Stazione pluviometrica: Rosà (VI)

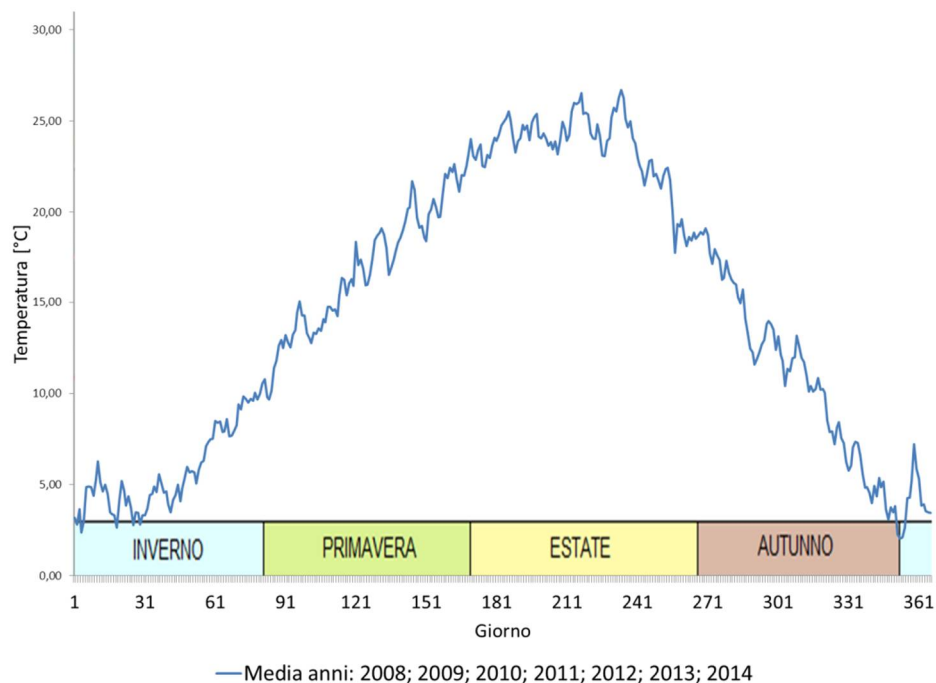


Figura 15 - Andamento temperatura media giornaliera. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014. Stazione pluviometrica ARPAV di Rosà (VI).

Di seguito si riportano le tabelle contenenti informazioni relative agli anni compresi tra il 2008 ed il 2103 (Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9).

Anno	Temperatura media annuale [°C]
2008	14,0
2009	14,6
2010	13,6
2011	14,7
2012	14,3
2013	14,0

Tabella 7 - Valori di temperatura media annuale dal 2008 al 2013

Data	Temperatura massima giornaliera [°C]
26/06/2008	28,4
18/08/2009	28,9
16/07/2010	30,6
23/08/2011	30,9
01/07/2012	28,9
28/07/2013	29,7

*Tabella 8 - Valori di temperatura massima giornaliera dal 2008 al 2013. Stazione ARPAV Rosà (VI)*

Data	Temperatura minima giornaliera [°C]
30/12/2008	-0,3
20/12/2009	-7,6
17/12/2010	-3,8
05/01/2011	-1,3
06/02/2012	-3,9
14/12/2013	-1

*Tabella 9 - Valori di temperatura minima giornaliera dal 2008 al 2013. Stazione ARPAV Rosà (VI)*

Mediamente l'anno più caldo è stato il 2011 mentre il più freddo è risultato essere il 2010. Il massimo di temperatura media giornaliera si è registrato in data 23/08/2011 con 30,9 °C, mentre il minimo di -7,6 °C è stato misurato in data 20/12/2009.

Le temperature medie giornaliere sono necessarie nel successivo calcolo dell'evapotraspirazione per l'individuazione dell'infiltrazione efficace.

#### 4.4. CONCENTRAZIONE DEL CROMO ESAVALENTE IN FALDA

La concentrazione del cromo esavalente è misurata in  $\mu\text{g/l}$ . Tali valori provengono da campionamenti bisettimanali. Nei grafici seguenti (Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20) sono rappresentate le concentrazioni in funzione del tempo. I dati proposti sono relativi ai pozzi G2, G3, G4, G5, G6 dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

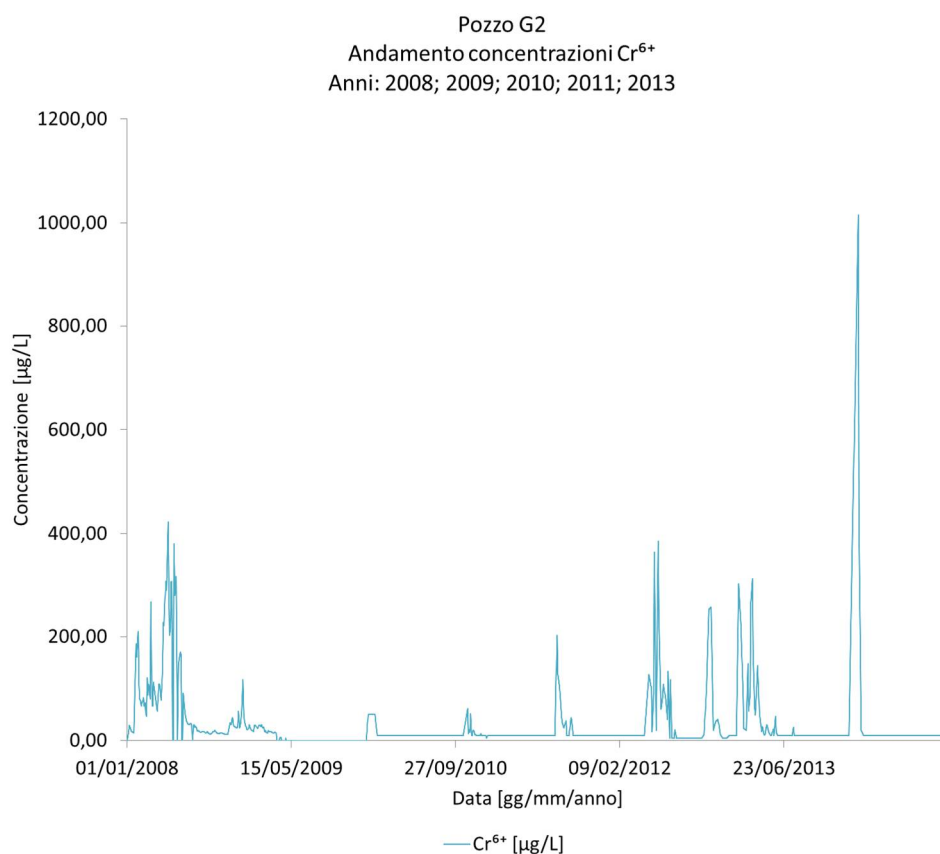
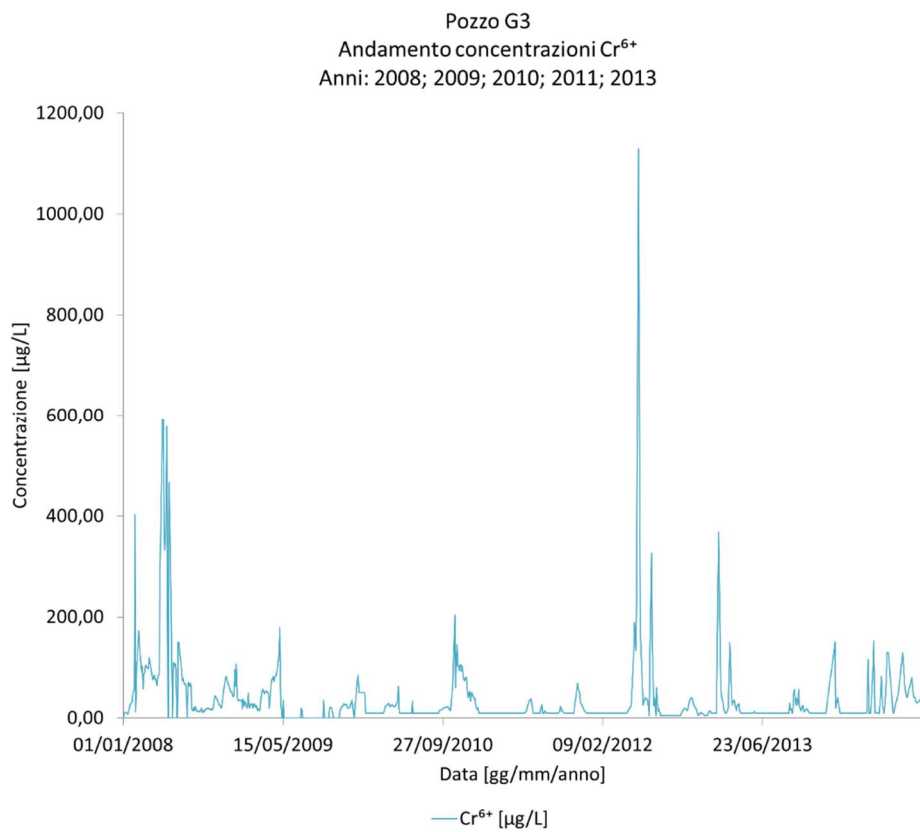


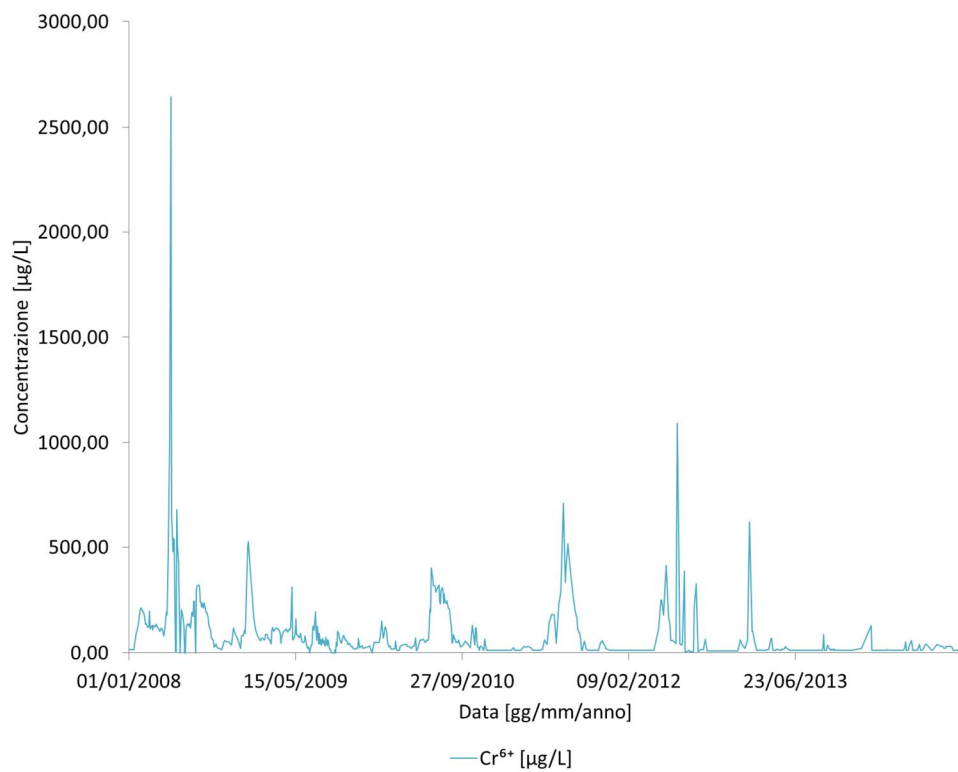
Figura 16 - Andamento concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.



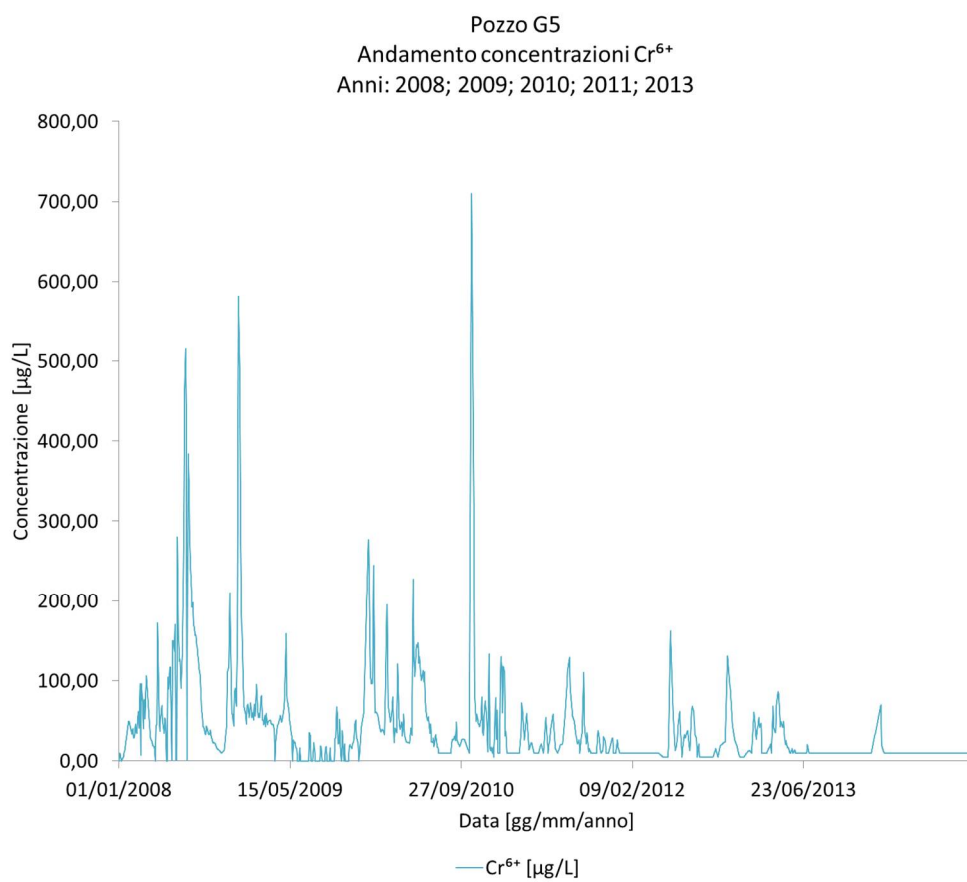
*Figura 17 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*



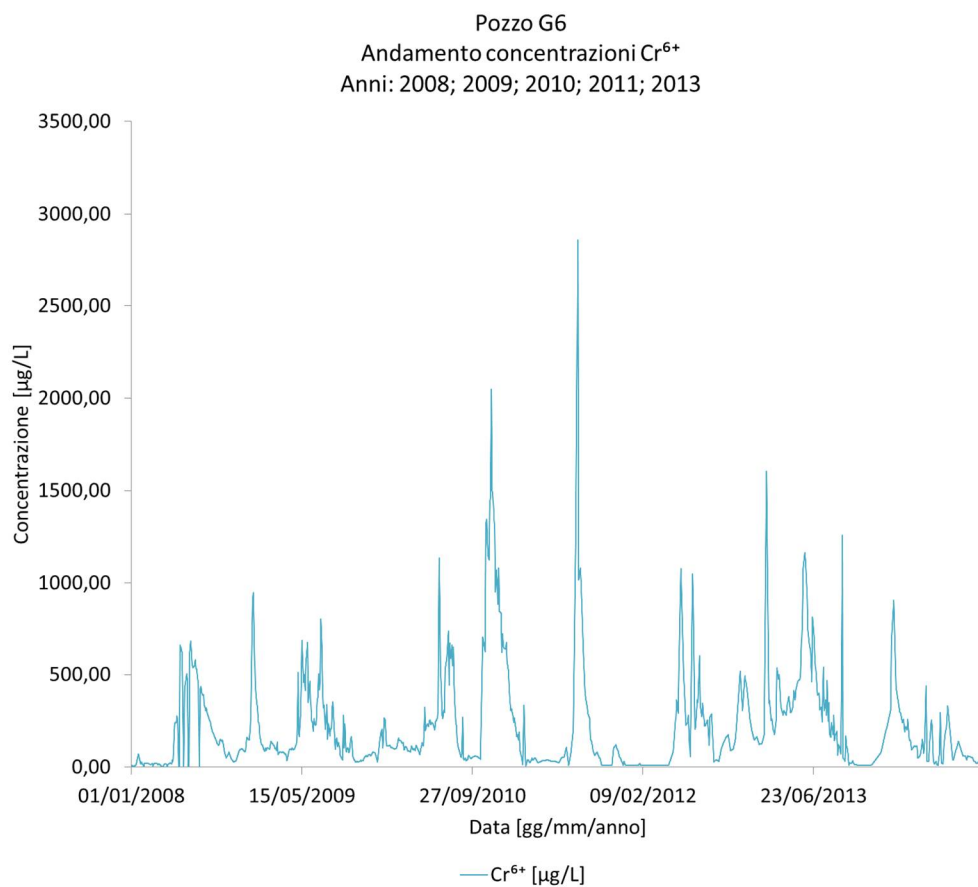
Pozzo G4  
Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013



*Figura 18 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*



*Figura 19 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*



*Figura 20 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*

I valori massimi e medi di concentrazione misurati sono riportati nella tabella seguente (Tabella 10).

Pozzo	Media [µg/l]	Massimo [µg/l]	Data
G2	32,3	1015,0	04/02/2014
G3	40,1	1129,0	30/05/2012
G4	86,2	2643,3	05/05/2008
G5	45,0	710,0	27/10/2010
G6	247,1	2860,0	02/08/2011

*Tabella 10 - Valori massimi e medi di concentrazione Cr6+. Pozzi: G2; G3; G4; G5; G6*

Dalla tabella si nota come, pur trovandosi a breve distanza l'uno dall'altro, i pozzi hanno valori di concentrazione medi di Cr(VI) molto differenti tra loro. I valori massimi si rilevano in G6, in relazione alla sua maggiore vicinanza rispetto all'area dove in passato erano ubicate le vasche per la cromatura. Si considera, infatti, che al di sotto di tale zona sia concentrata la maggior parte del cromo esavalente.

Di conseguenza i pozzi G2, G3, G4 a valle del G6 presentano valori che si attenuano allontanandosi da esso.

Nell'immagine seguente (Figura 21) è raffigurata la planimetria del sito, le aree inquinate sono state individuate con l'inverso del quadrato delle distanze funzione (geostat\_2.m). Le concentrazioni di contaminante fanno riferimento al 02/08/2011.

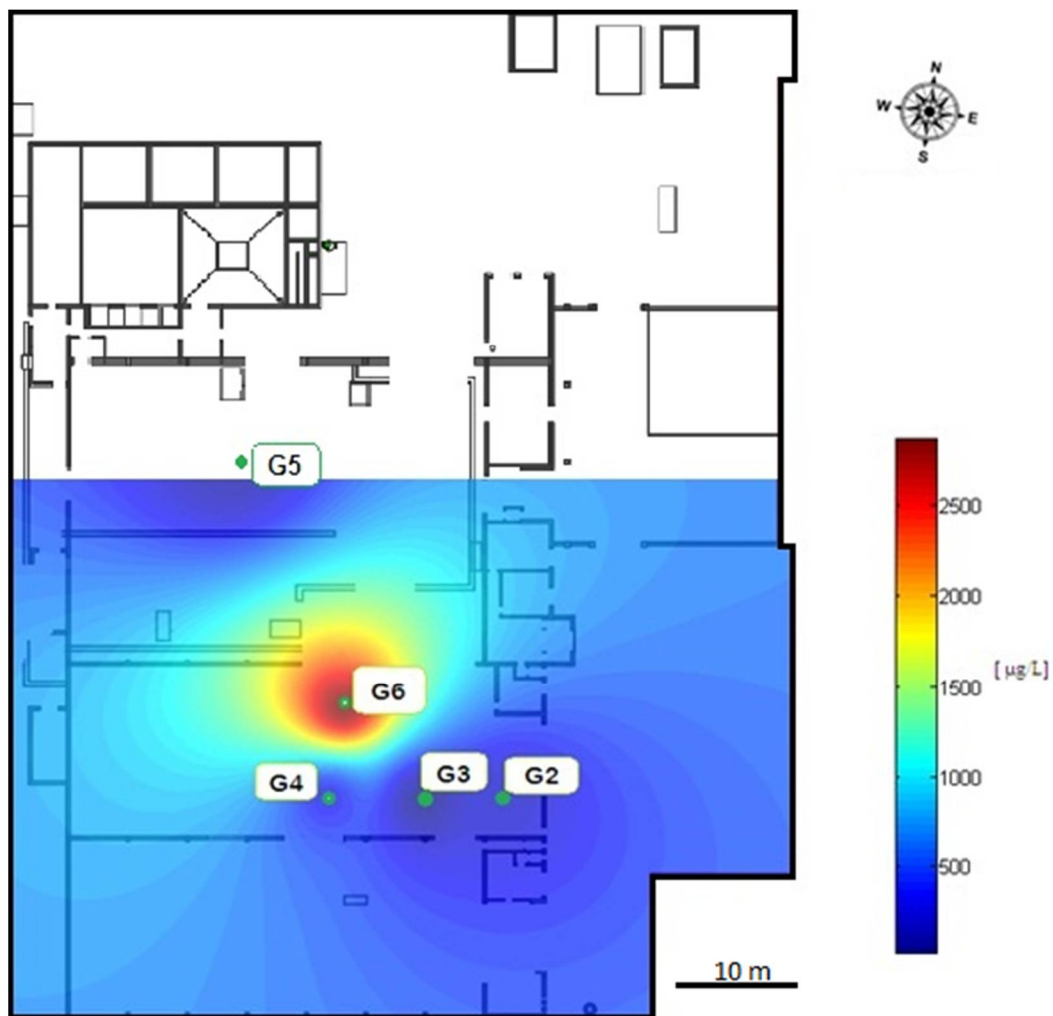


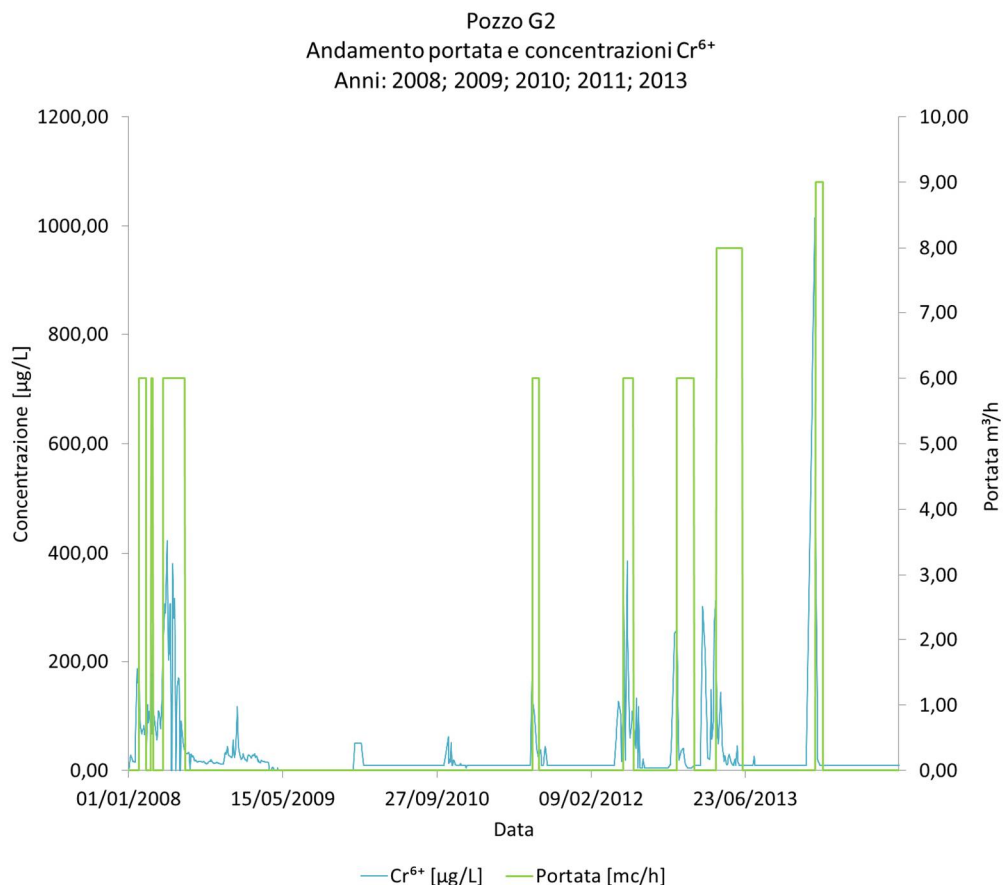
Figura 21 - Planimetria "Galvanica pm". Concentrazioni Cr<sup>6+</sup> in data 02/08/2011. Pozzi: G2; G3; G4; G5; G6

#### 4.5. EMUNGIMENTO

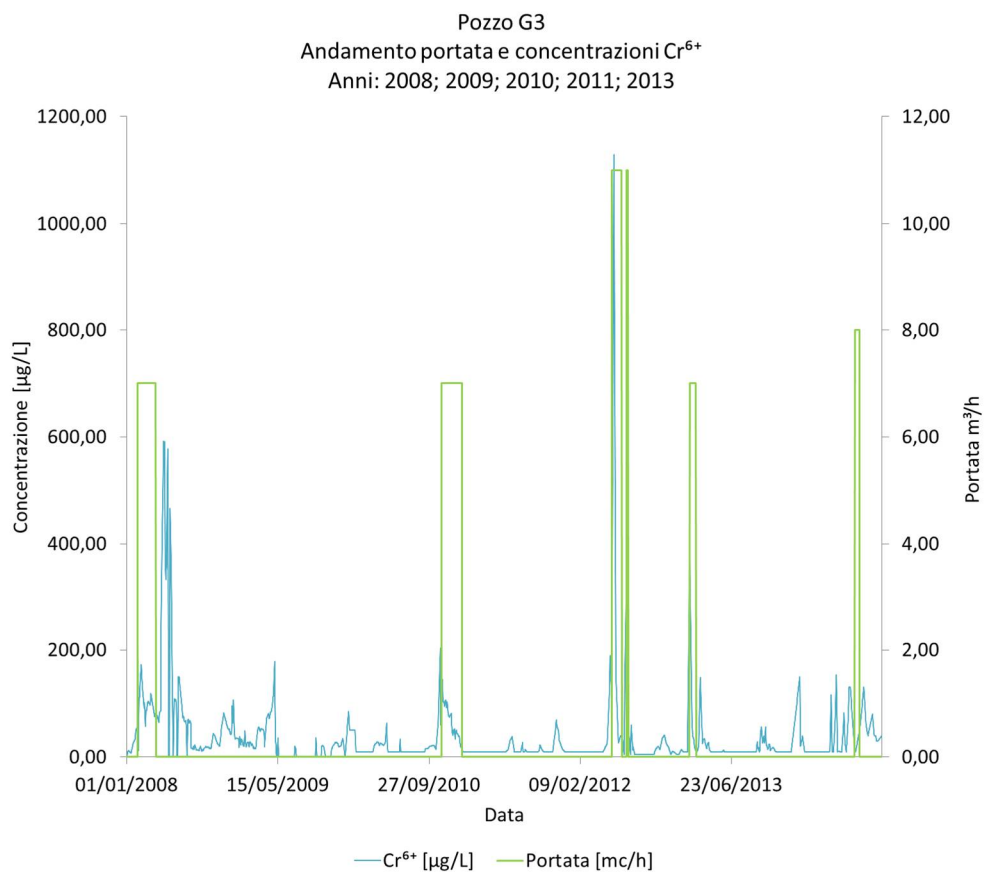
L'emungimento effettuato nei pozzi sotto monitoraggio costituisce l'azione più efficace per impedire la migrazione del contaminante in falda a valle del sito. Come evidenziato in precedenza, l'attivazione delle pompe è condizionata dai tenori di cromo misurati. Di conseguenza essi sono strettamente dipendenti, oltre

che dalle dinamiche della contaminazione, anche dai periodi di emungimento nonché dalle portate esercitate.

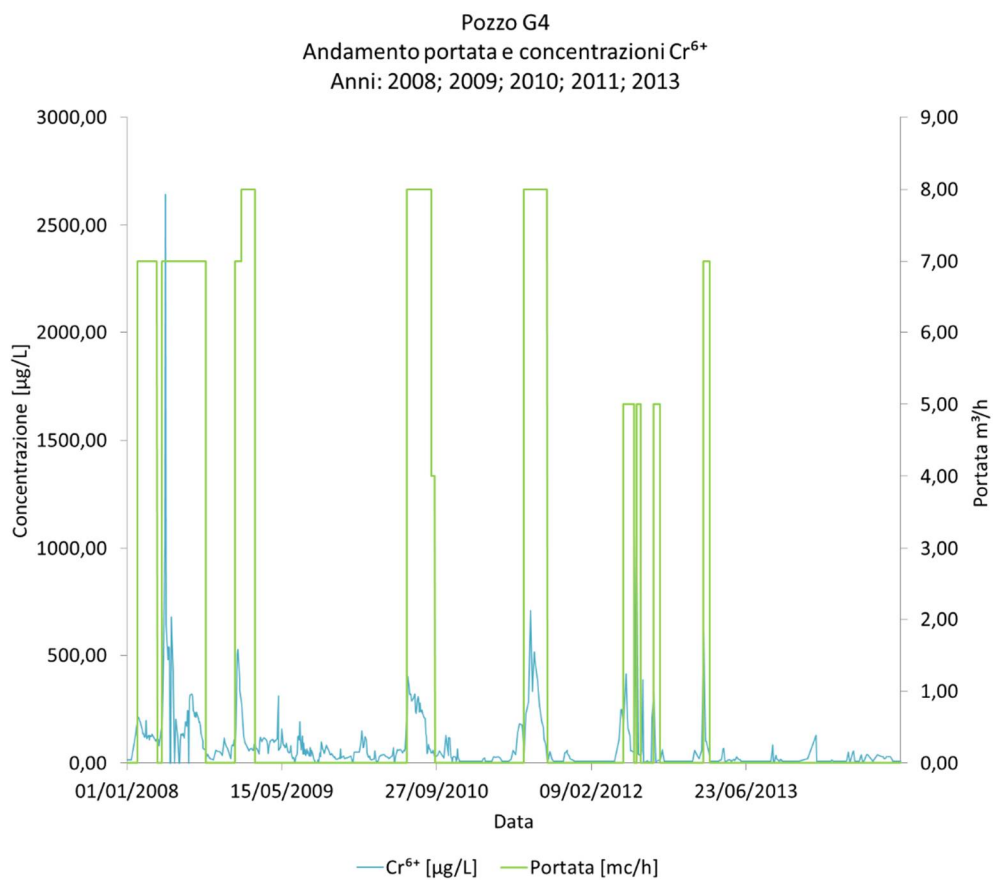
Nei grafici seguenti (Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26) sono rappresentati i periodi di emungimento e i valori di cromo esavalente per i pozzi considerati.



*Figura 22 - Andamento portata e concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*

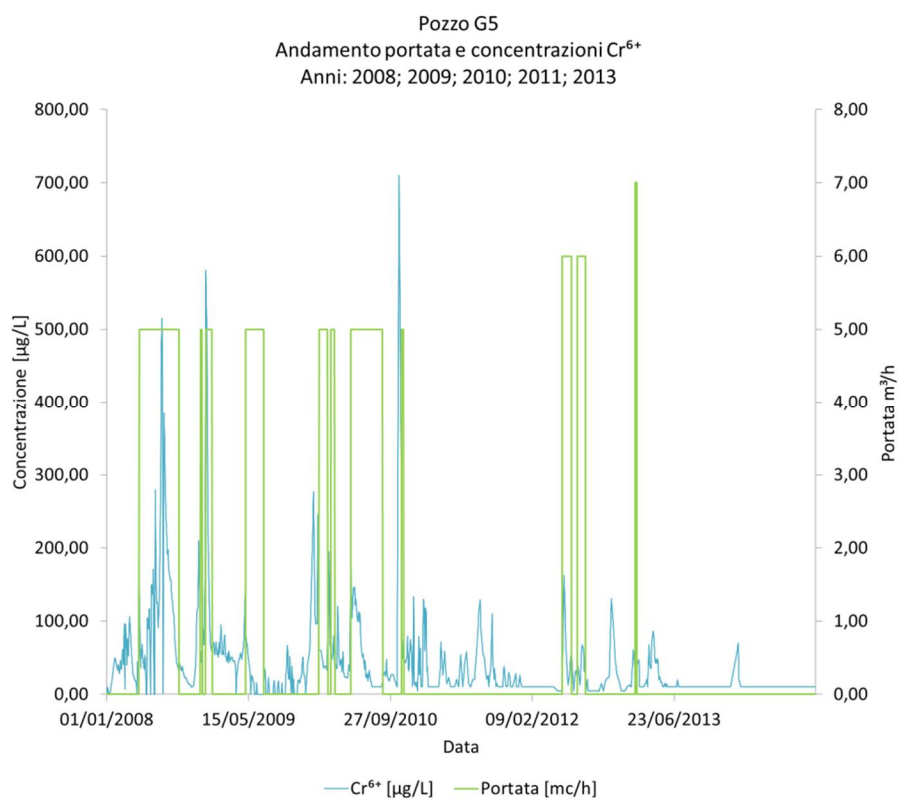


*Figura 23 - Andamento portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*

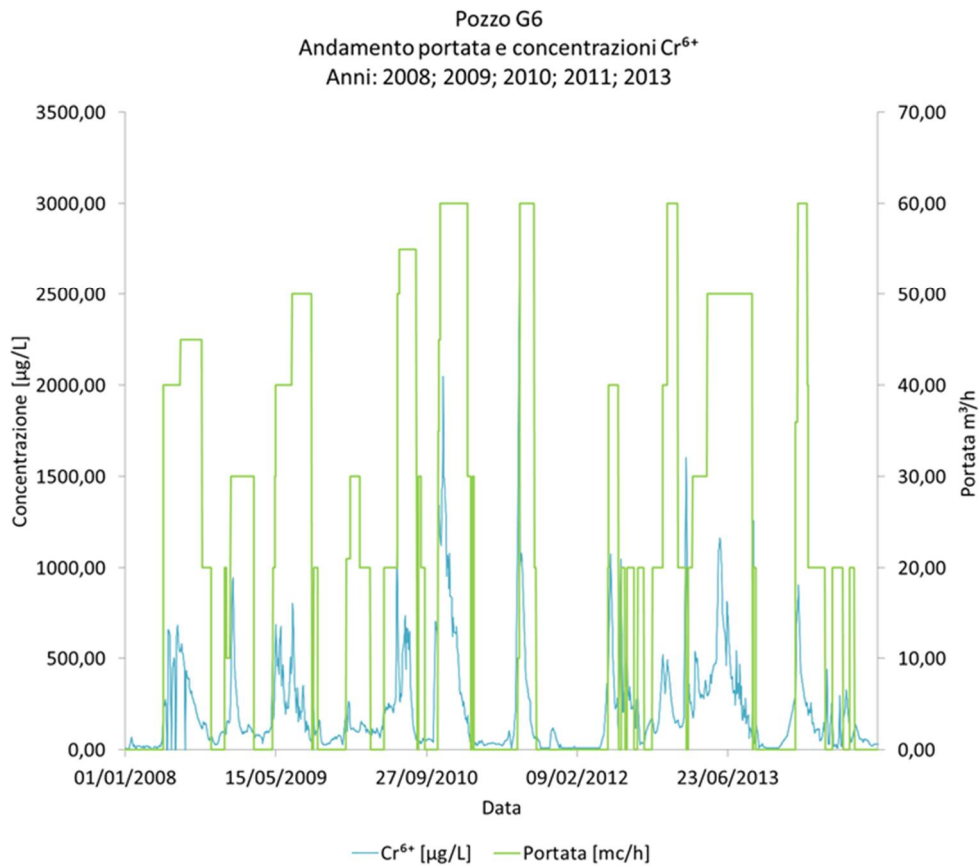


*Figura 24 - Andamento portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*





*Figura 25 - Andamento portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*



*Figura 26 - Andamento portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014*

Dai grafici proposti si osserva come l'aumento di concentrazione del cromo esavalente sia contrastato dall'attivazione della barriera idraulica. Il contaminante segue un andamento caratteristico. Dall'inizio del pompaggio tende progressivamente a diminuire fino a consentire lo spegnimento delle pompe. Le portate di emungimento sono funzione delle caratteristiche tecniche della pompa installata nello specifico pozzo. I valori massimi si registrano nel pozzo G6, dotato di una tubazione di 225 mm di diametro e di una pompa da 6'', che raggiunge la portata massima di 60 m<sup>3</sup>/h. (Dal Prà M., De Rossi J., 2005)

## 5. ELABORAZIONE DEI DATI

I dati precedentemente descritti costituiscono le basi per la analisi ed osservazioni oggetto del presente lavoro. Per le finalità dello studio appare di fondamentale importanza gestire i dati dei campionamenti come se si trattasse di un segnale continuo.

### 5.1. IL SEGNALE RELATIVO ALLA PRECIPITAZIONE PIOVOSA

Le precipitazioni piovose locali, come visto in precedenza, possono influenzare il trasporto del contaminante in falda. Prima di valutare questo aspetto è necessario fare alcune considerazioni iniziali.

Quando la precipitazione arriva al suolo, si può scomporre in tre componenti:

- infiltrazione,
- evapotraspirazione,
- ruscellamento superficiale.

Il calcolo di queste componenti per il sito è stato eseguito in base ai dati a disposizione.

L'evapotraspirazione potenziale è valutata mediante la formula di Thornthwaite (1948), mentre l'infiltrazione potenziale viene stimata mediante il modello di Horton (1933).

### 5.1.1 EVAPOTRASPIRAZIONE

L'evapotraspirazione potenziale può essere valutata mediante la formula di Thornthwaite (1948). Viene espressa in cm/mese ed è funzione solamente della posizione dell'area studiata e della temperatura media mensile. (Thornthwaite, 1948)

La formula è:

$$ET_{po} = cT^a$$

Con:

T [°C] temperatura media del mese considerato.

I parametri  $a$  e  $c$  sono descritti nel seguente modo:

$$a = 0.016 I + 0.5$$

$$c = 1.6 \left( \frac{10}{I} \right)^a$$

Con  $I$  indice termico annuale espresso dalla formula:

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T_i/5)^{1.514}$$

dove  $i$  è il mese considerato.

Volendo stimare l'evapotraspirazione potenziale riferita ad un specifico mese si utilizza la seguente formula:

$$(ET_{po})_i = 16.2 b_i \left( \frac{10T_i}{I} \right)^a$$

Con  $b_i$  che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera, tale parametro è estratto dalla tabella seguente (Tabella 11):

Lat.	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.
45°	0,8	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75

*Tabella 11 - Coefficiente bi , numero di ore di sole espresse in 30 giorni di 12 ore.  
(Thornthwaite, 1948)*

Attraverso le relazioni sopraindicate si sono individuati i seguenti valori (Tabella 12, Tabella 13, Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17, Tabella 18) relativi agli anni 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014 (dati ottenuti mediante funzione analisi\_ETP.m):

Anno: 2008	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	5,3	10,1
Febbraio	5,3	10,2
Marzo	8,4	26,0
Aprile	12,5	52,3
Maggio	18,6	106,7
Giugno	22,3	141,0
Luglio	24,0	159,6
Agosto	24,0	147,3
Settembre	18,1	83,2
Ottobre	14,8	55,9
Novembre	8,8	21,5
Dicembre	4,5	7,6

*Tabella 12 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2008.*

Anno: 2009	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	3,5	4,7
Febbraio	5,4	9,2
Marzo	9,4	27,8
Aprile	15,0	64,7
Maggio	20,6	121,0
Giugno	21,7	132,4
Luglio	24,4	162,0
Agosto	25,5	160,2
Settembre	21,1	102,4
Ottobre	14,1	49,0
Novembre	9,6	22,4
Dicembre	3,8	5,0

*Tabella 13 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2009.*

Anno: 2010	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	2,1	2,6
Febbraio	5,4	10,7
Marzo	8,4	26,2
Aprile	14,8	67,3
Maggio	17,9	101,5
Giugno	22,5	143,0
Luglio	25,5	174,9
Agosto	23,0	139,0
Settembre	18,5	86,3
Ottobre	12,7	44,6
Novembre	9,0	22,4
Dicembre	3,0	4,2

*Tabella 14 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2010.*

Anno: 2011	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	2,9	3,3
Febbraio	5,8	10,4
Marzo	9,6	28,5
Aprile	16,4	74,1
Maggio	20,2	117,2
Giugno	22,0	134,7
Luglio	22,9	145,7
Agosto	25,6	161,1
Settembre	22,6	113,4
Ottobre	13,5	45,5
Novembre	8,8	19,3
Dicembre	5,6	8,9

*Tabella 15 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2011.*

Anno: 2012	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	3,2	4,0
Febbraio	2,5	2,9
Marzo	12,5	44,0
Aprile	12,8	50,8
Maggio	18,2	99,7
Giugno	23,3	148,7
Luglio	25,2	170,1
Agosto	25,8	163,4
Settembre	20,0	94,5
Ottobre	14,5	51,7
Novembre	10,2	25,0
Dicembre	3,3	4,1

*Tabella 16 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2012.*

Anno: 2013	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	4,3	7,3
Febbraio	4,3	7,4
Marzo	7,7	22,3
Aprile	13,9	60,5
Maggio	15,9	83,7
Giugno	22,0	138,1
Luglio	25,8	177,4
Agosto	24,1	148,3
Settembre	19,5	92,3
Ottobre	14,8	55,2
Novembre	9,7	24,6
Dicembre	5,6	10,0

*Tabella 17 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2013.*

Anno: 2014	Temperatura media [°C]	ETpo [mm/mese]
Gennaio	6,5	14,5
Febbraio	8,3	20,8
Marzo	11,9	44,6
Aprile	15,1	70,4
Maggio	17,6	99,3
Giugno	22,4	143,1
Luglio	22,5	146,1
Agosto	21,5	125,9
Settembre	14,5	60,9
Ottobre	11,8	40,7
Novembre	8,9	22,5
Dicembre	6,1	12,3

*Tabella 18 - Valori evapotraspirazione potenziale anno 2014.*



### 5.1.2. INFILTRAZIONE (MODELLO DI HORTON)

Il segnale relativo alle precipitazioni piovose è stato elaborato al fine di individuare il contenuto d'acqua che può effettivamente infiltrarsi (infiltrazione efficace).

Il calcolo della capacità d'infiltrazione del suolo è stata calcolata a partire dall'equazione di Horton (1940). Dove la capacità d'infiltrazione è funzione del tempo: (C., Wayne; Dickinson, Robert E.) (Ramírez Jorge A., -)

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-at}$$

Con:

$f_p$  : capacità d'infiltrazione del suolo [mm/h]

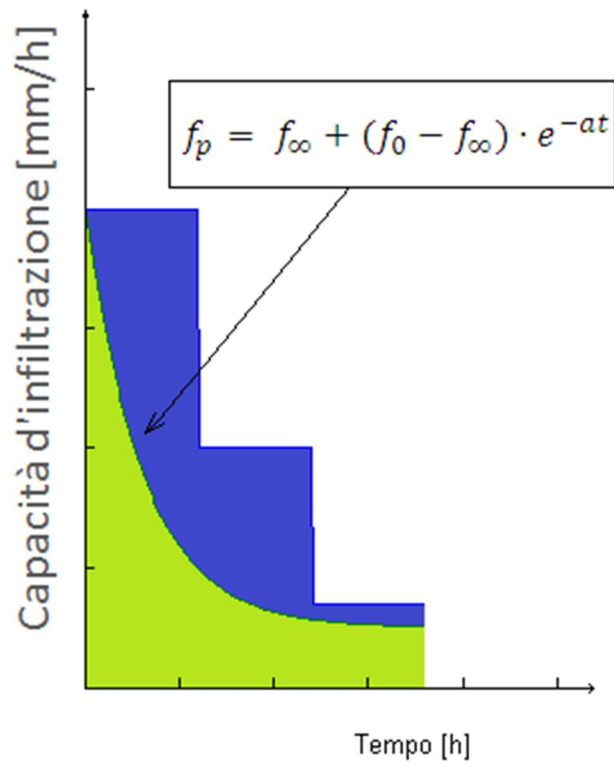
$f_\infty$  : capacità d'infiltrazione del suolo minima [mm/h]

$f_0$  : capacità d'infiltrazione del suolo massima [mm/h]

$t$  : tempo dall'inizio della precipitazione [s]

$a$  : coefficiente di decadimento [ $s^{-1}$ ]

Un esempio di tale funzione è rappresentato nella figura seguente (Figura 27).



*Figura 27 - Andamento capacità d'infiltrazione in funzione del tempo. Horton (1940).*

Dallo ietogramma si può osservare la curva che rappresenta l'infiltrazione potenziale in mm/h.

Integrando l'area sottesa, nel diagramma il settore colorato in verde, è possibile calcolare il volume d'acqua che potenzialmente s'infiltra. L'integrazione viene fatta sulle 24 ore, ottenendo un risultato in mm/giorno.

I parametri che governano la funzione sono caratteristici della potenzialità di deflusso del terreno dell'area considerata (Tabella 19).

Tipo di terreno	$f_0$ [mm/h]	$f_\infty$ [mm/h]	$a$ [1/s]
Terreno con scarsa potenzialità di deflusso.	250	25,4	2
Terreno con potenzialità di deflusso moderatamente bassa.	200	12,7	2
Potenzialità di deflusso moderatamente alta.	125	6,3	2
Potenzialità di deflusso molto alta.	76	2,5	2

Tabella 19 – Parametri equazione di Horton (1940). (S.K. Mishra, 2003)

Con l'obiettivo di simulare l'infiltrazione nel corso dei sette anni considerati è stato necessario fare alcune considerazioni. Innanzitutto, la stima dell'infiltrazione precedentemente descritta, non tiene conto della capacità che ha il terreno di ripristinare le sue caratteristiche iniziali al termine dell'evento di precipitazione piovosa.

La capacità d'infiltrazione si rigenera durante i periodi non piovosi secondo una curva esponenziale analoga a quella vista con l'equazione di Horton, definita curva di recupero: (C., Wayne; Dickinson, Robert E.)

$$f_p = f_0 - (f_0 - f_\infty) \cdot e^{(-a_a t_a)}$$

Con:

$f_p$  : capacità d'infiltrazione del suolo [mm/h]

$f_\infty$  : capacità d'infiltrazione del suolo minima [mm/h]

$f_0$  : capacità d'infiltrazione del suolo massima [mm/h]

$t_d$  : tempo dalla fine della precipitazione piovosa[s]

$a_d$ : coefficiente di decadimento per la curva di recupero [ $s^{-1}$ ]

Quando  $f_p = f_\infty$   $t_d = 0$  . Altrimenti  $t_d = \frac{1}{-a_d} \cdot \ln\left(\frac{f_p - f_\infty}{f_o - f_\infty}\right)$  (Figura 28):

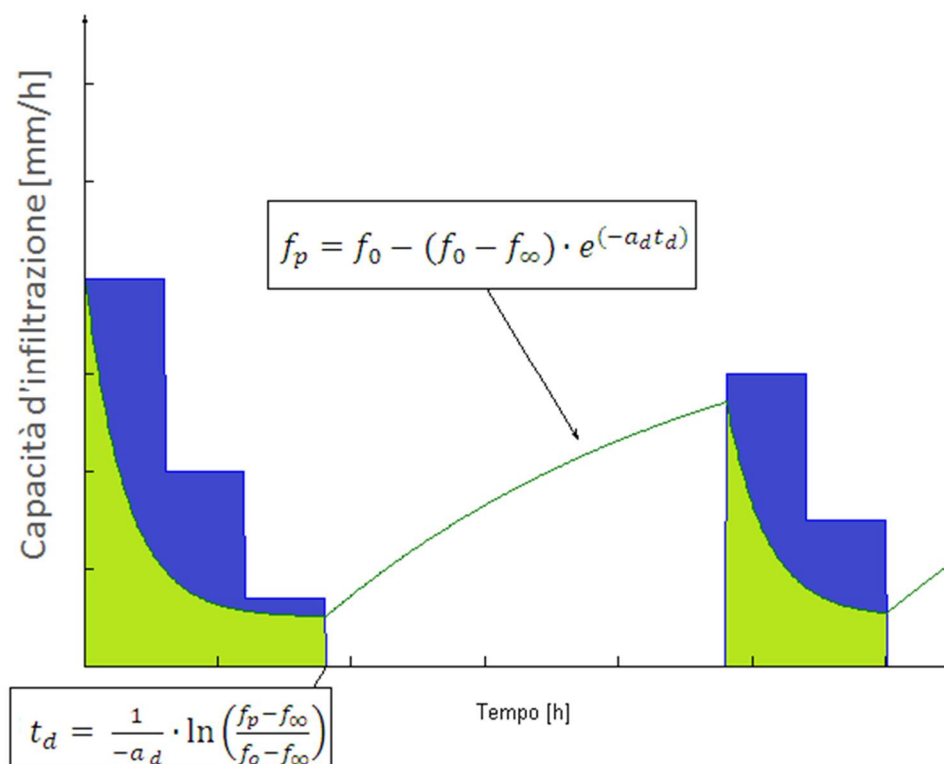
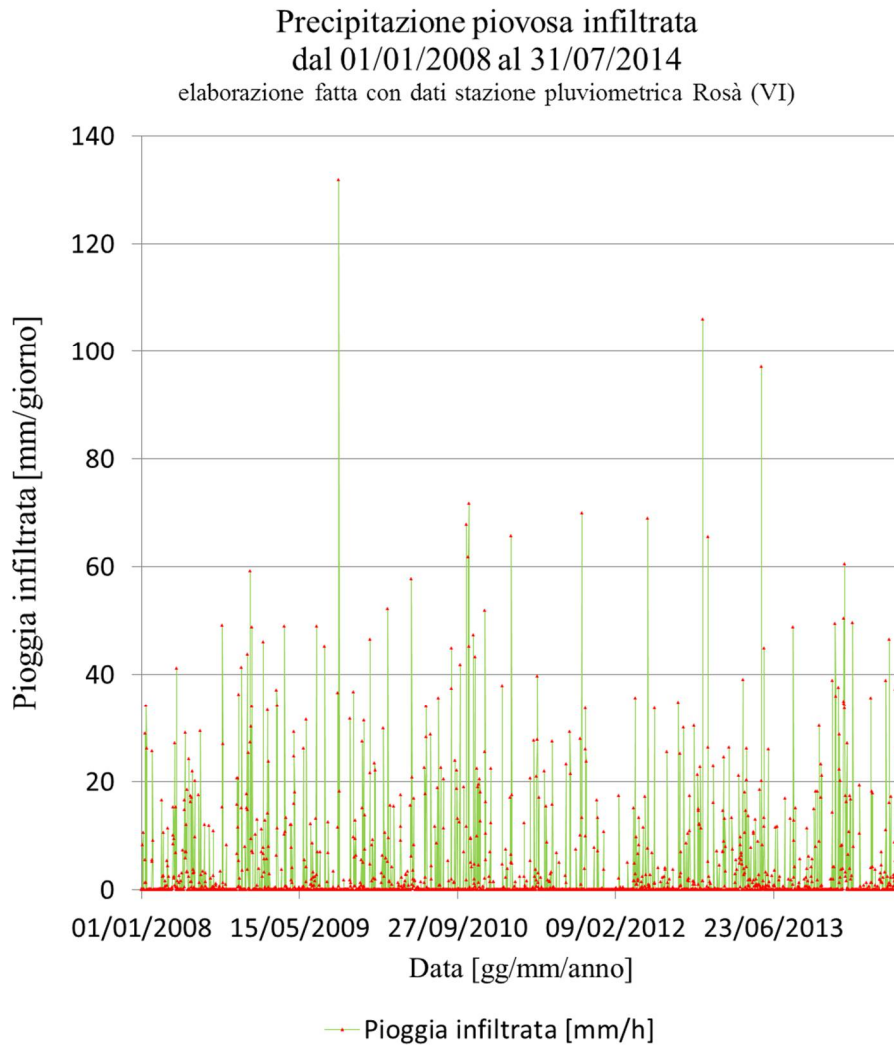


Figura 28 - Andamento continuo della capacità d'infiltrazione in funzione del tempo.

Di seguito viene riportato lo ietogramma con la capacità d'infiltrazione generato dalla funzione (analisi\_infiltrazioni\_4.m) con la quale viene anche calcolato il volume d'acqua che si infila giornalmente.

L'elaborazione delle precipitazioni sui sette anni considerati viene fatta dunque andando a sottrarre al segnale originale delle piogge l'evapotraspirazione e l'infiltrazione giorno per giorno in [mm/giorno].

Di seguito viene riportato il grafico relativo al segnale pluviometrico ricalcolato tenendo conto degli effetti sopra descritti (Figura 29):



*Figura 29 – Precipitazione piovosa infiltrata dal 01/01/2008 al 31/07/2014.*

Le precipitazioni piovose infiltrandosi costituiscono un possibile meccanismo per il trasporto del cromo esavalente in falda. In prima analisi (Figura 30), il segnale relativo alla pioggia infiltrata è sovrapposto a quello relativo al cromo misurato in G6:

Precipitazione piovosa infiltrata e concentrazione  $\text{Cr}^{6+}$   
dal 01/01/2008 al 31/07/2014

elaborazione fatta con dati stazione pluviometrica Rosà (VI)

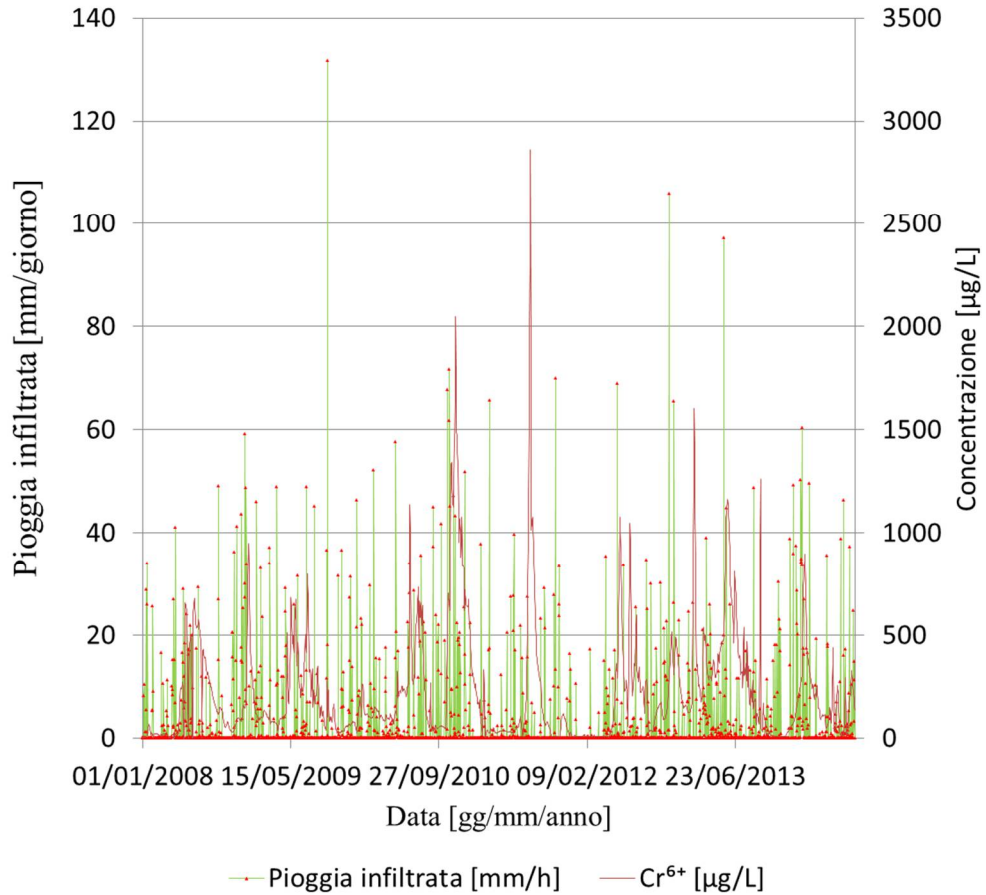


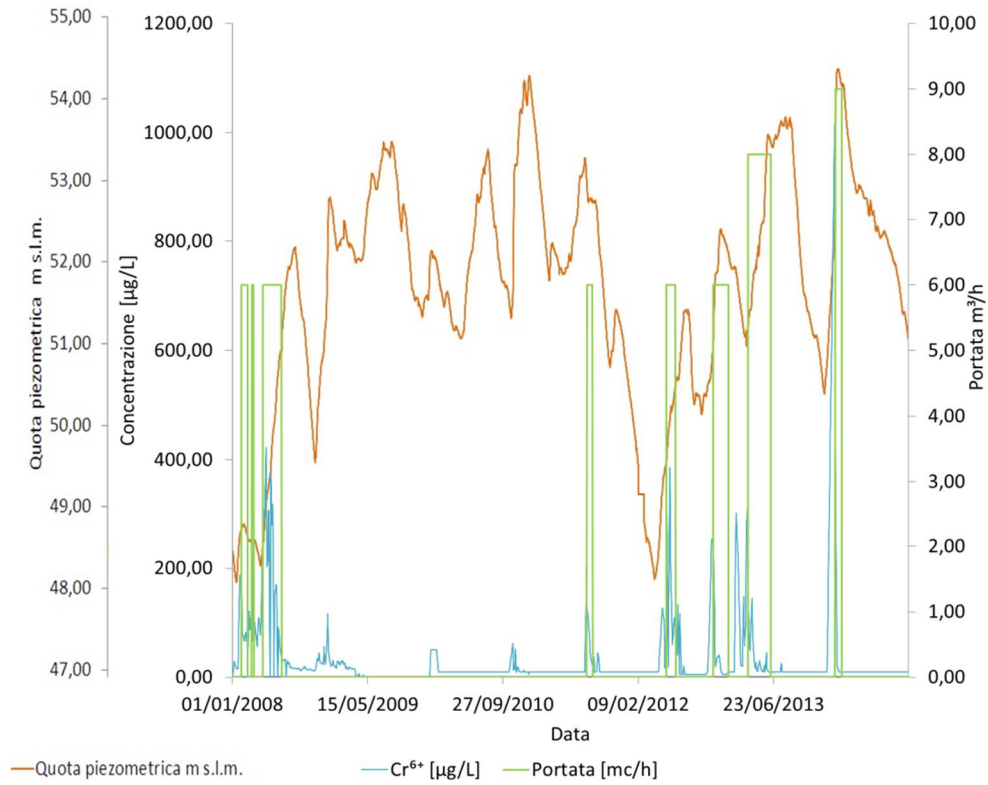
Figura 30 – Precipitazione piovosa infiltrata e andamento concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$ .  
Pozzo: G6. Dal 01/01/2008 al 31/07/2014.

La correlazione tra i due segnali, è difficilmente osservabile. Bisogna, infatti considerare la natura diversa delle due serie di dati. Si ipotizza che le precipitazioni infiltrandosi necessitino di un certo periodo di tempo per attraversare lo spessore di terreno insaturo, lisciviare il cromo in esso contenuto e raggiungere la falda. Per tale motivo verrà di seguito calcolato questo ritardo attraverso la correlazione incrociata.

## 5.2. IL SEGNALE RELATIVO AL LIVELLO DI FALDA

La falda acquifera, costituisce un possibile meccanismo di trasporto del contaminante. La tipologia di acquifero ad alta permeabilità, la vicinanza al fiume Brenta, portano la quota piezometrica ad avere, nel sito in esame, grandi escursioni durante l'anno. Questa variabilità permette alla falda di interessare livelli più o meno contaminati. La quota piezometrica viene quindi confrontata con il segnale di concentrazione di cromo, per valutare se esiste o meno una correlazione tra le due serie di dati. Di seguito vengono riportati i grafici relativi all'andamento della quota piezometrica e concentrazione di  $\text{Cr}^{6+}$  dei pozzi (G2, G3, G4, G5, G6) dal 01/01/2008 al 03/11/2014 (Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35).

Pozzo G2  
 Andamento quota piezometrica, portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013



*Figura 31 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr(VI), portata.  
 Pozzo: G2. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.*



Pozzo G3  
 Andamento quota piezometrica, portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013

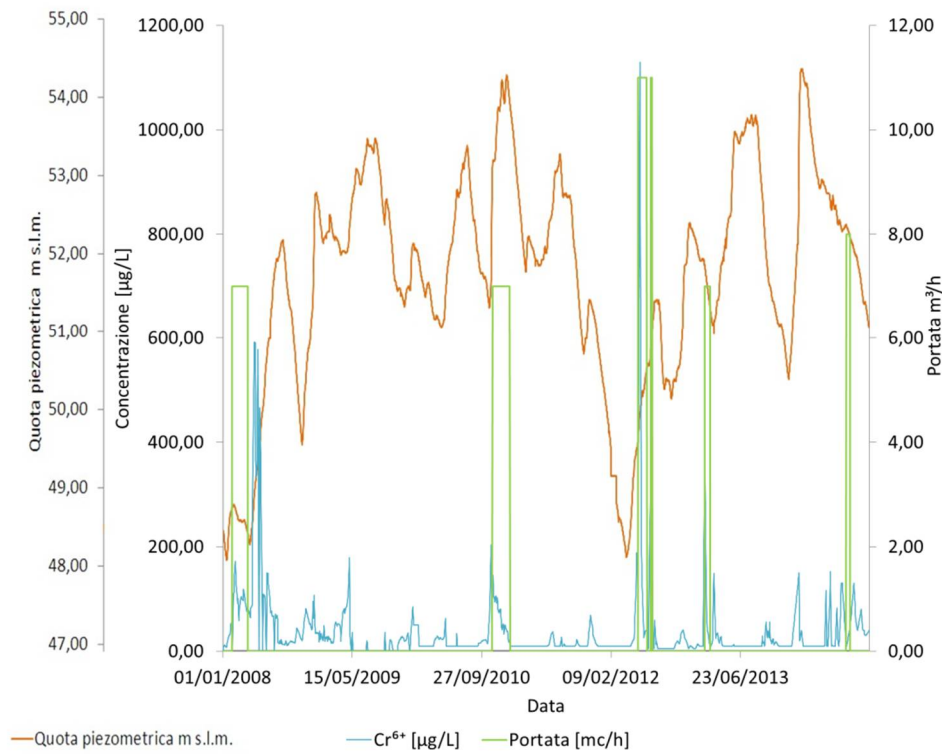


Figura 32 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr<sup>6+</sup>, portata. Pozzo: G3. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.

Pozzo G4  
 Andamento quota piezometrica, portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013

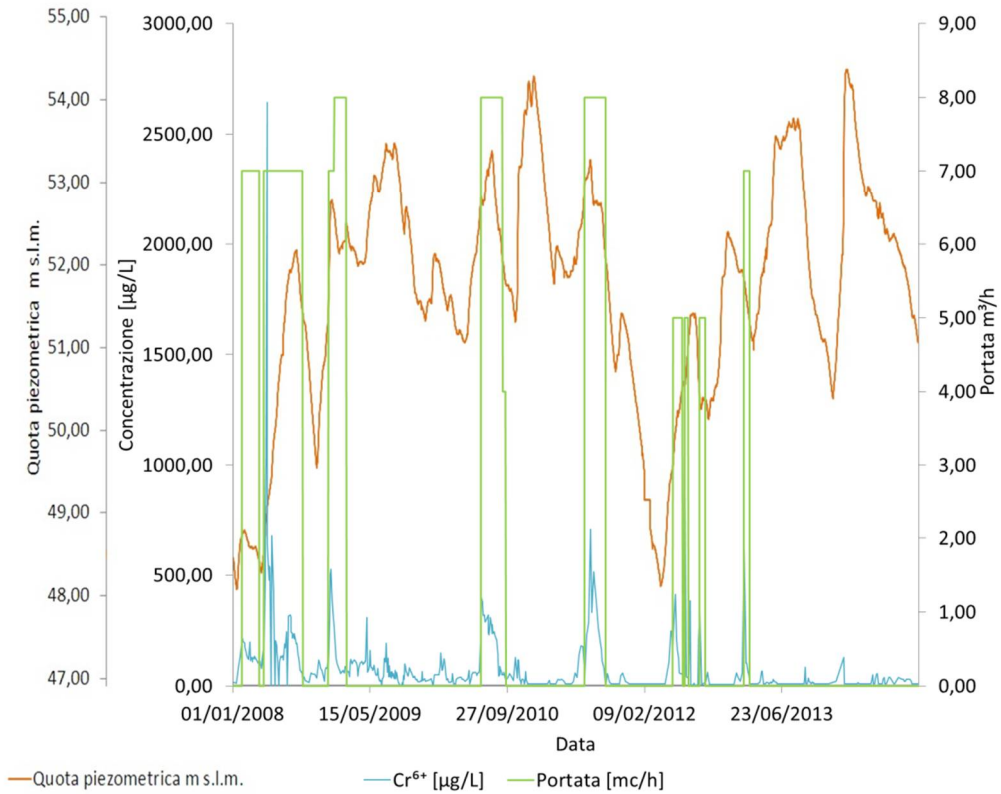


Figura 33 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr<sup>6+</sup>, portata. Pozzo: G4. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.

Pozzo G5  
 Andamento quota piezometrica, portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013

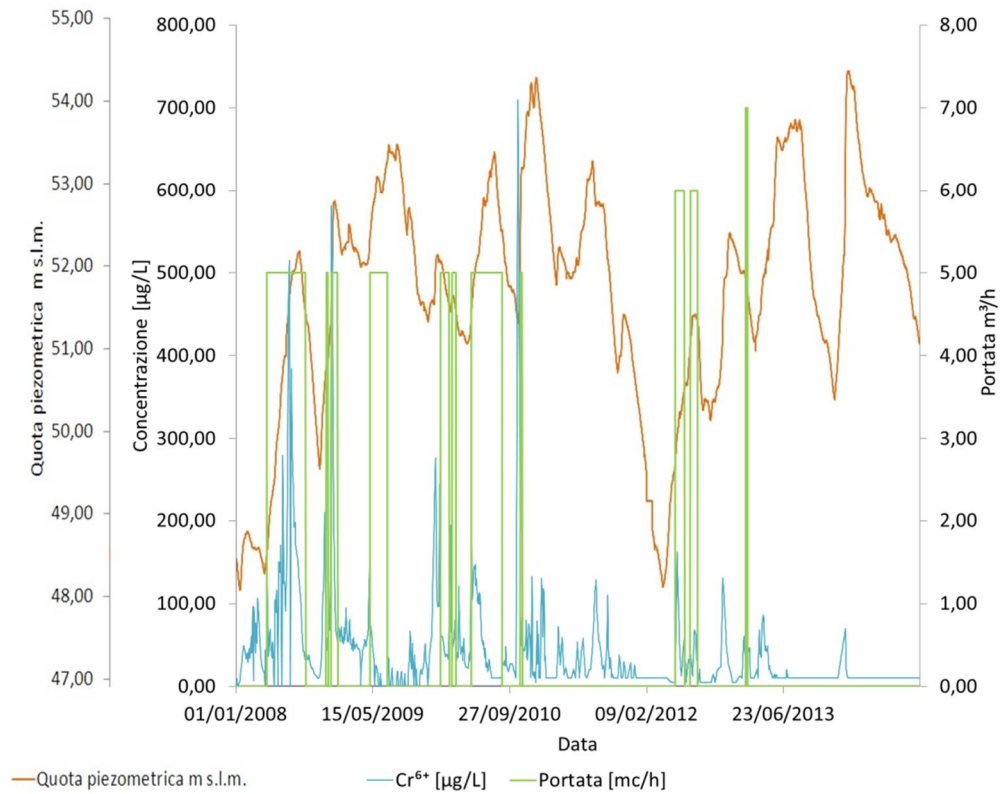
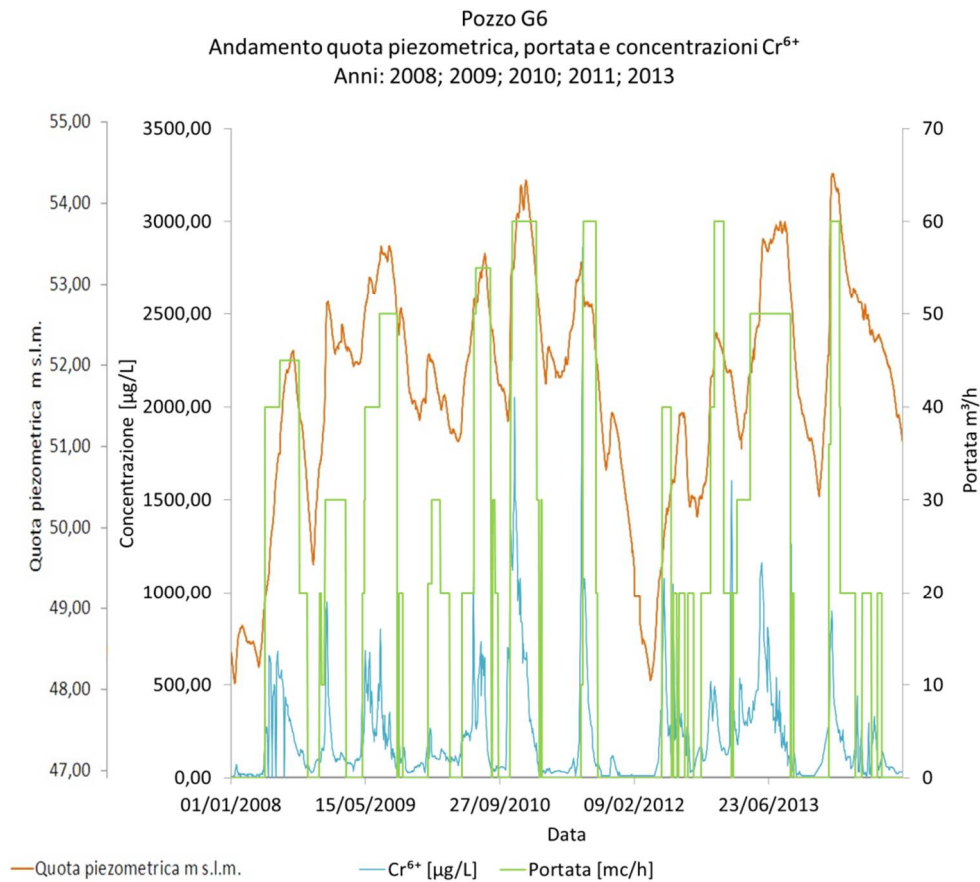


Figura 34 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr<sup>6+</sup>, portata. Pozzo: G5. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.



*Figura 35 – Andamento quota piezometrica, concentrazioni Cr<sup>6+</sup>, portata. Pozzo: G6. Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014.(vedi pagina 126)*

I grafici proposti, sono utili per ricavare alcune considerazioni. Generalmente ad alti valori di quota piezometrica corrispondono elevati valori di concentrazioni di cromo. Tuttavia, i due segnali hanno andamenti differenti. Queste disparità sono imputabili alla sovrapposizione del segnale dato dall'emungimento della barriera idraulica. Come si può vedere dai grafici, il pompaggio ha una grande influenza sulle concentrazioni di cromo, infatti, dopo l'accensione delle pompe anche ad alti livelli di falda, le concentrazioni tendono a diminuire, probabilmente per un effetto di diluizione. Di seguito sarà approfondito il comportamento delle concentrazioni di cromo durante i periodi di emungimento.

### 5.3. ANALISI DELLA BARRIERA IDRAULICA

La barriera idraulica costituisce l'elemento principale della messa in sicurezza d'emergenza. Prendendo in considerazione i dati di emungimento e la concentrazione del cromo esavalente, si è cercato di valutare il funzionamento e l'efficacia dei pompaggi. In particolare per ogni pozzo sono stati considerati i periodi di emungimento calcolando alcuni parametri, quali:

- portata in m<sup>3</sup>/h, giorni,
- volume di acqua estratto in m<sup>3</sup>,
- massa di Cr<sup>6+</sup> in Kg,
- portata espressa come %,
- concentrazione iniziale di Cr<sup>6+</sup> in µg/L,
- tenore finale di Cr<sup>6+</sup> in µg/L,
- variazione Cr<sup>6+</sup> iniziale e finale in µg/L,
- variazione percentuale Cr<sup>6+</sup> iniziale e finale,
- escursione media giornaliera di Cr<sup>6+</sup> espressa in µg/L,
- escursione media giornaliera di Cr(VI) espressa in %.

Di seguito vengono riportate le tabelle di tutti i parametri sopra elencati ed i grafici relativi all'andamento del cromo nello specifico periodo di emungimento (Tabella 20, Tabella 21, Tabella 22, Tabella 23, Tabella 24)(Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40)(funzione analisi\_pozzi\_2):

Num. Evento	Data inizio [gg/mm/anno]	Data fine [gg/mm/anno]	Giorni di emungimento
1	04/02/2008	26/02/2008	23
2	14/03/2008	20/03/2008	7
3	23/04/2008	01/07/2008	70
4	04/08/2011	24/08/2011	21
5	24/05/2012	25/06/2012	33
6	13/11/2012	07/01/2013	56
7	21/03/2013	13/06/2013	85
8	06/02/2014	02/03/2014	25

Num. Evento	Volume emunto [m <sup>3</sup> ]	portata [m <sup>3</sup> /h]
1	3312	6
2	1008	6
3	10080	6
4	3024	6
5	4752	6
6	8064	6
7	16320	8
8	5400	9

Num. Evento	Valore CrVI+ iniziale [µg/L]	Valore CrVI+ finale [µg/L]	Variazione CrVI+ iniziale e finale [µg/L]	Variazione percentuale CrVI+ iniziale e finale [%]
1	210,0	62,5	-147,5	-70,2
2	267,0	89,5	-177,5	-66,5
3	221,0	36,5	-184,5	-83,5
4	127,0	26,5	-100,5	-79,1
5	364,0	91,4	-272,6	-74,9
6	257,0	9,4	-247,6	-96,4
7	166,0	10,0	-156,0	-94,0
8	430,0	10,0	-420,0	-97,7

Num. Evento	Media variazione giornaliera Cr(VI) [µg/L]	Media variazione giornaliera [%]	Cr(VI) estratto [kg]
1	-6,8	-3,3	0,3
2	-22,1	-8,3	0,1
3	-2,7	-1,2	1,8
4	-4,7	-3,7	0,2
5	-8,4	-2,3	0,7
6	-4,4	-1,7	0,3
7	-1,8	-1,1	0,6
8	-16,8	-3,9	0,4
Totale Cr(VI) estratto [kg] ---->			4,5

*Tabella 20 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G2. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*

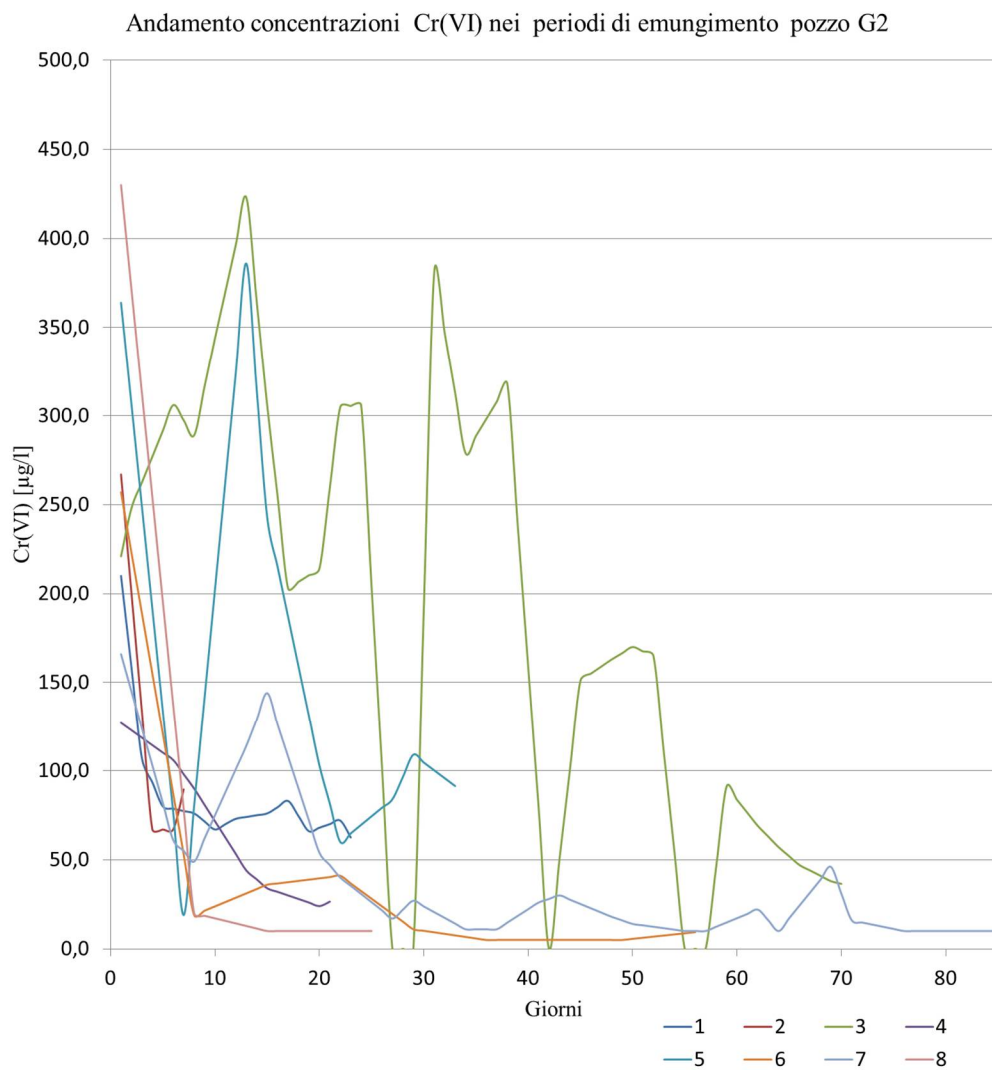


Figura 36 - Andamento concentrazioni  $Cr^{6+}$  nei periodi di emungimento. Pozzo G2. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

Num. Evento	Data inizio [gg/mm/anno]	Data fine [gg/mm/anno]	Giorni di emungimento
1	06/02/2008	06/04/2008	61
2	08/11/2010	13/01/2011	67
3	24/05/2012	25/06/2012	33
4	12/07/2012	16/07/2012	5
5	05/02/2013	25/02/2013	21
6	05/08/2014	20/08/2014	16

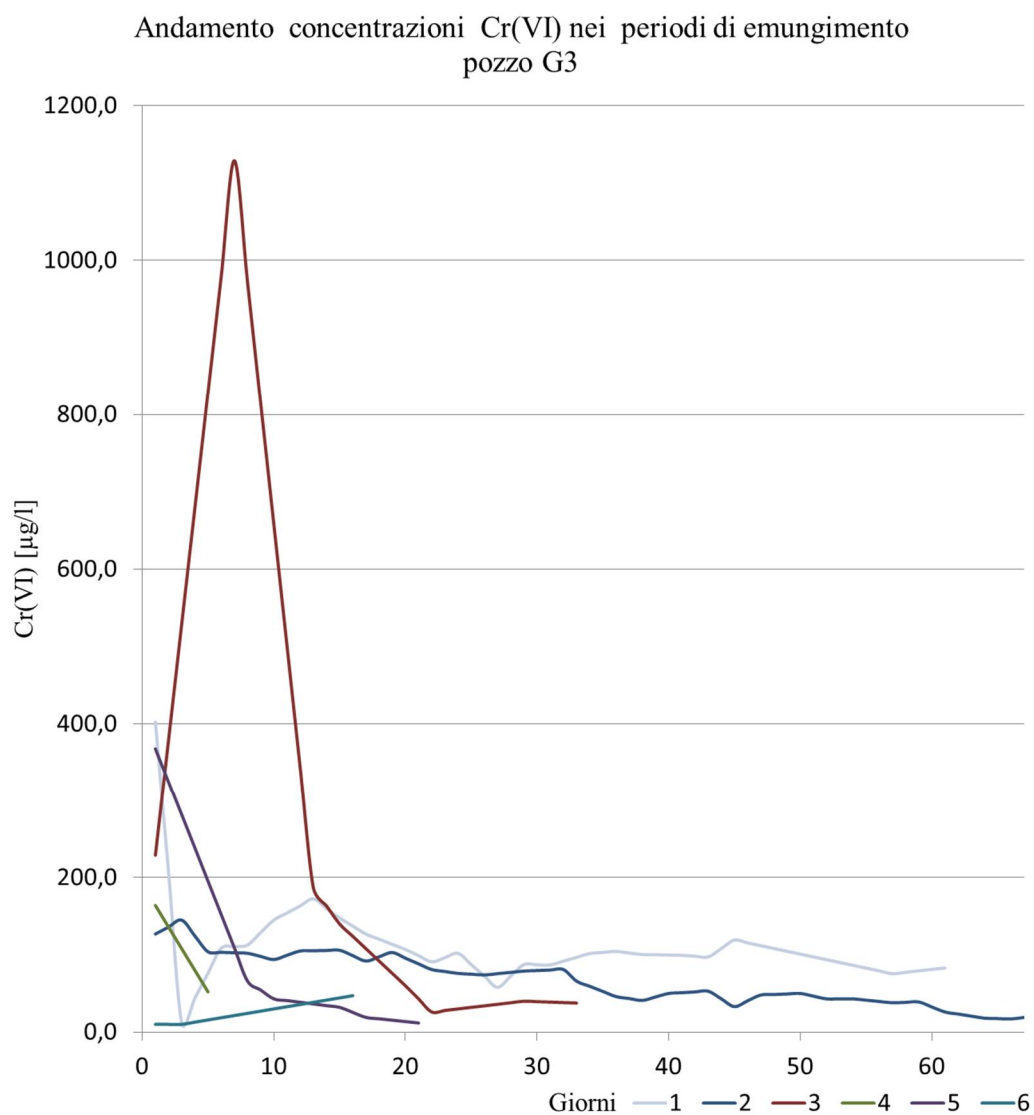
Num. Evento	Volume emunto [m <sup>3</sup> ]	portata [m <sup>3</sup> /h]
1	10248	7
2	11256	7
3	8712	11
4	1320	11
5	3528	7
6	3072	8

Num. Evento	Valore CrVI+ iniziale [µg/L]	Valore CrVI+ finale [µg/L]	Variazione CrVI+ iniziale e finale [µg/L]	Variazione percentuale CrVI+ iniziale e finale [%]
1	402,6	83,0	-319,6	-79,4
2	127,0	19,0	-108,0	-85,0
3	229,0	37,6	-191,4	-83,6
4	164,0	52,0	-112,0	-68,3
5	368,0	11,8	-356,2	-96,8
6	10,0	47,1	37,1	371,4

Num. Evento	Media variazione giornaliera Cr(VI) [µg/L]	Media variazione giornaliera [%]	Cr(VI) estratto [kg]
1	-5,2	-1,3	1,1
2	-1,6	-1,2	0,8
3	-5,8	-2,5	1,2
4	-28,0	-17,1	1,2
5	-17,0	-4,6	0,8
6	2,5	25,0	0,9
Totale Cr(VI) estratto [kg] --->			5,9

*Tabella 21 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G3. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*





*Figura 37 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G3. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*

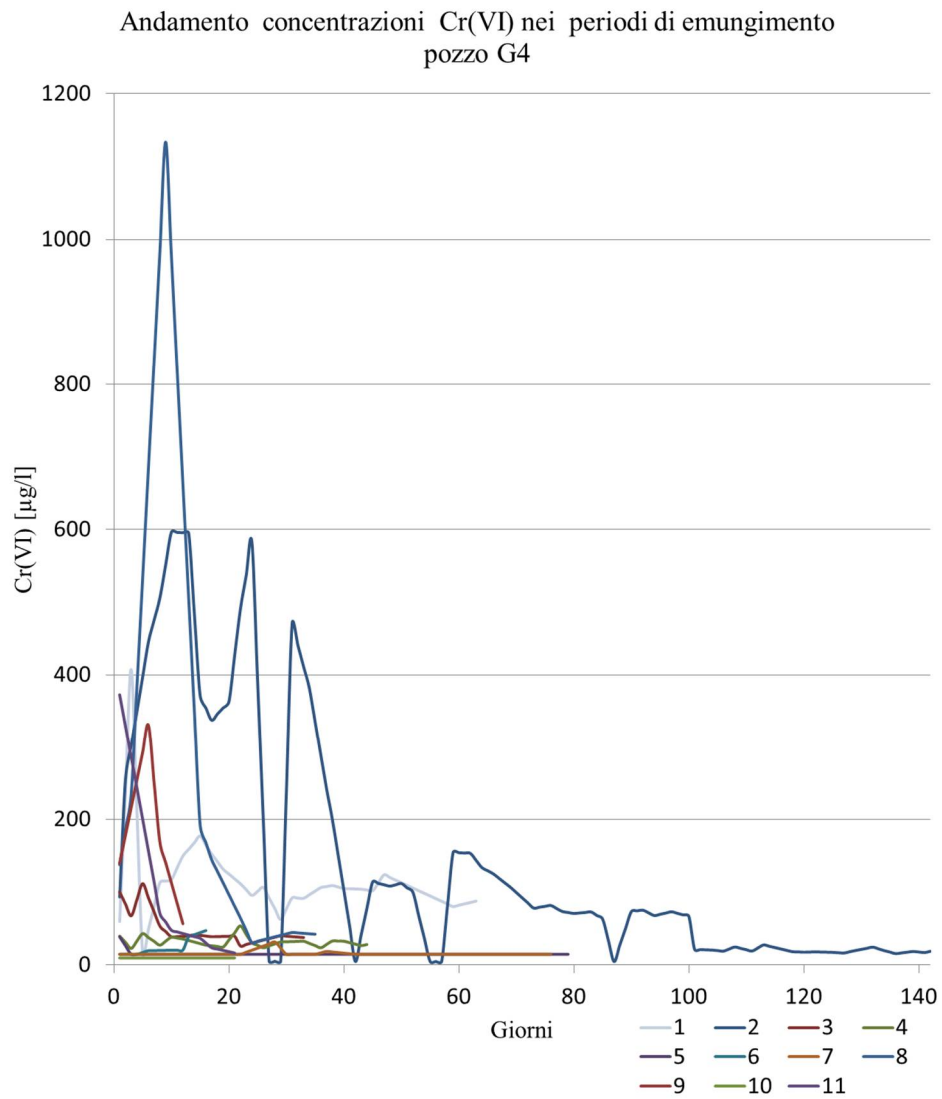
Num. Evento	Data inizio [gg/mm/anno]	Data fine [gg/mm/anno]	Giorni di emungimento
1	04/02/2008	06/04/2008	63
2	23/04/2008	11/09/2008	142
3	15/12/2008	04/01/2009	21
4	05/01/2009	17/02/2009	44
5	23/06/2010	09/09/2010	79
6	10/09/2010	21/09/2010	12
7	06/07/2011	19/09/2011	76
8	22/05/2012	25/06/2012	35
9	05/07/2012	16/07/2012	12
10	28/08/2012	17/09/2012	21
11	05/02/2013	25/02/2013	21

Num. Evento	Volume emunto [m <sup>3</sup> ]	portata [m <sup>3</sup> /h]
1	10584	7
2	23856	7
3	3528	7
4	8448	8
5	15168	8
6	1152	4
7	14592	8
8	4200	5
9	1440	5
10	2520	5
11	3528	7

Num. Evento	Valore CrVI+ iniziale [µg/L]	Valore CrVI+ finale [µg/L]	Variazione CrVI+ iniziale e finale [µg/L]	Variazione percentuale CrVI+ iniziale e finale [%]
1	59,5	87,5	28,0	47,1
2	93,2	18,6	-74,5	-80,0
3	100,1	39,3	-60,8	-60,7
4	39,5	28,0	-11,5	-29,1
5	38,5	14,5	-24,0	-62,3
6	14,5	20,4	5,9	40,4
7	14,5	14,5	0,0	0,0
8	137,5	42,1	-95,4	-69,4
9	139,5	56,5	-83,0	-59,5
10	9,5	9,5	0,0	0,0
11	372,5	16,3	-356,2	-95,6

Num. Evento	variazione giornaliera Cr(VI)	Media variazione giornaliera [%]	Cr(VI) estratto [kg]
1	0,5	0,8	1,2
2	-0,5	-0,6	3,4
3	-2,9	-2,9	0,3
4	-0,2	-0,6	0,3
5	-0,3	-0,8	0,2
6	0,5	3,4	0,0
7	0,0	0,0	0,2
8	-2,7	-2,0	1,2
9	-9,3	-6,6	0,3
10	0,0	0,0	0,02
11	-17,0	-4,6	0,4
		Totale Cr(VI) estratto [kg] --->	7,4

*Tabella 22 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G4.  
Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*



*Figura 38 - Andamento concentrazioni Cr<sup>6+</sup> nei periodi di emungimento. Pozzo G4. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*

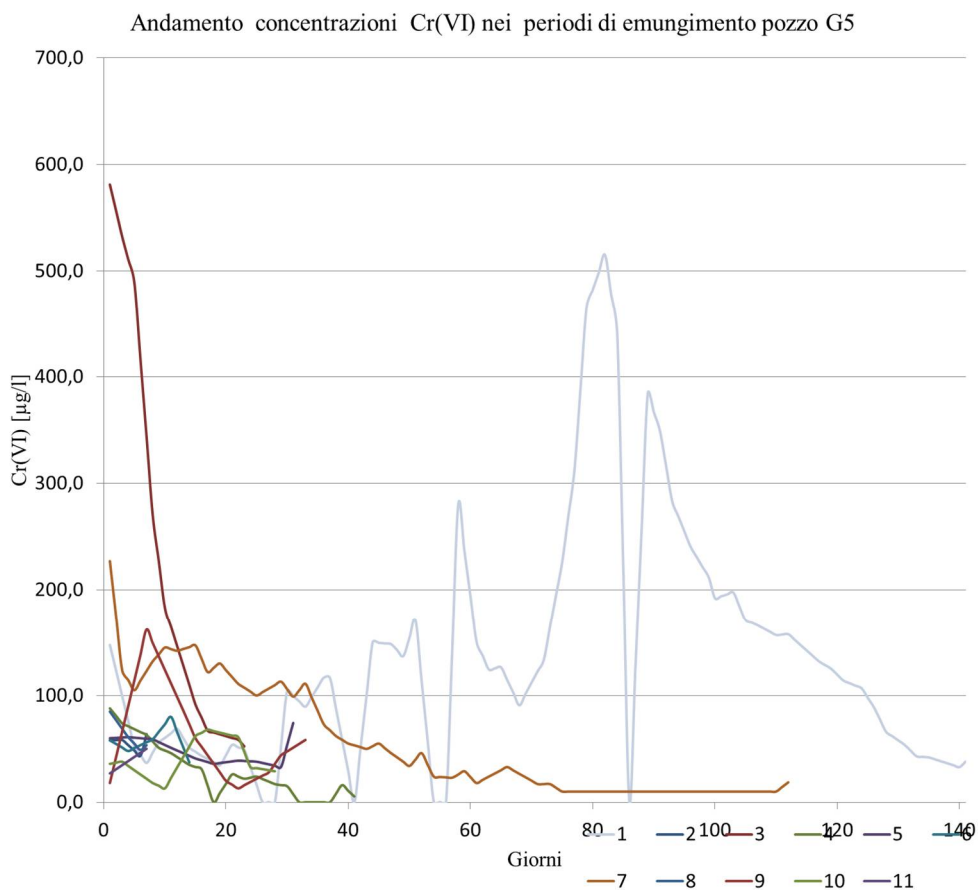
Num. Evento	Data inizio [gg/mm/anno]	Data fine [gg/mm/anno]	Giorni di emungimento
1	24/04/2008	11/09/2008	141
2	26/11/2008	02/12/2008	7
3	15/12/2008	06/01/2009	23
4	05/05/2009	07/07/2009	64
5	18/01/2010	17/02/2010	31
6	01/03/2010	14/03/2010	14
7	10/05/2010	29/08/2010	112
8	05/11/2010	11/11/2010	7
9	24/05/2012	25/06/2012	33
10	17/07/2012	13/08/2012	28
11	05/02/2013	11/02/2013	7

Num. Evento	Volume emunto [m <sup>3</sup> ]	portata [m <sup>3</sup> /h]
1	16920	5
2	840	5
3	2760	5
4	7680	5
5	3720	5
6	1680	5
7	13440	5
8	840	5
9	4752	6
10	4032	6
11	1176	7

Num. Evento	Valore CrVI+ iniziale [µg/L]	Valore CrVI+ finale [µg/L]	Variazione CrVI+ iniziale e finale [µg/L]	Variazione percentuale CrVI+ iniziale e finale [%]
1	147,5	38,1	-109,4	-74,2
2	58,0	63,8	5,8	10,0
3	581,2	52,3	-528,9	-91,0
4	88,0	0,0	-88,0	-100,0
5	60,0	74,3	14,3	23,9
6	58,0	37,2	-20,8	-35,8
7	227,0	18,7	-208,3	-91,8
8	85,0	53,5	-31,5	-37,1
9	18,0	58,4	40,4	224,4
10	36,0	29,0	-7,0	-19,4
11	27,0	50,1	23,1	85,7

Num. Evento	Media variazione giornaliera Cr(VI) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Media variazione giornaliera [%]	Cr(VI) estratto [kg]
1	-0,7	-0,5	2,3
2	3,7	6,4	0,0
3	-23,3	-4,0	0,6
4	-1,4	-1,6	0,1
5	1,1	1,9	0,2
6	-2,5	-4,3	0,1
7	-1,8	-0,8	0,7
8	-3,9	-4,5	0,1
9	1,3	7,4	0,3
10	-0,3	-0,8	0,2
11	3,9	14,3	0,0
Totale Cr(VI) estratto [kg] --->			4,7

*Tabella 23 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G5. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*



*Figura 39 - Andamento concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$  nei periodi di emungimento. Pozzo G5. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*

Num. Evento	Data inizio [gg/mm/anno]	Data fine [gg/mm/anno]	Giorni di emungimento
1	07/05/2008	01/07/2008	56
2	02/07/2008	11/09/2008	72
3	12/09/2008	12/10/2008	31
4	26/11/2008	02/12/2008	7
5	03/12/2008	14/12/2008	12
6	15/12/2008	16/12/2008	2
7	17/12/2008	03/03/2009	77
8	05/05/2009	12/05/2009	8
9	13/05/2009	14/05/2009	2
10	15/05/2009	07/07/2009	54
11	08/07/2009	10/09/2009	65
12	18/09/2009	01/10/2009	14
13	04/01/2010	17/01/2010	14
14	18/01/2010	17/02/2010	31
15	18/02/2010	24/03/2010	35
16	10/05/2010	22/06/2010	44
17	23/06/2010	29/06/2010	7
18	30/06/2010	24/08/2010	56
19	25/08/2010	26/08/2010	2
20	01/09/2010	09/09/2010	9
21	10/09/2010	21/09/2010	12
22	05/11/2010	07/11/2010	3
23	08/11/2010	11/11/2010	4
24	12/11/2010	10/02/2011	91
25	11/02/2011	20/02/2011	10
26	28/02/2011	03/03/2011	4
27	27/07/2011	01/08/2011	6
28	02/08/2011	03/08/2011	2
29	04/08/2011	19/09/2011	47
30	20/09/2011	26/09/2011	7
31	22/05/2012	23/05/2012	2
32	24/05/2012	25/06/2012	33
33	05/07/2012	16/07/2012	12
34	24/07/2012	15/08/2012	23
35	28/08/2012	17/09/2012	21
36	16/10/2012	19/11/2012	35
37	20/11/2012	03/12/2012	14
38	04/12/2012	07/01/2013	35
39	08/01/2013	04/02/2013	28
40	12/02/2013	25/02/2013	14
41	26/02/2013	15/04/2013	49
42	16/04/2013	12/09/2013	150
43	16/09/2013	24/09/2013	9
44	03/02/2014	09/02/2014	7
45	10/02/2014	13/03/2014	32
46	14/03/2014	16/03/2014	3
47	17/03/2014	11/05/2014	56
48	06/06/2014	10/07/2014	35
49	02/08/2014	17/08/2014	16

Num. Evento	Volume emunto [m³]	portata [m³/h]
1	53760	40
2	77760	45
3	14880	20
4	3360	20
5	2880	10
6	960	20
7	55440	30
8	3840	20
9	1440	30
10	51840	40
11	78000	50
12	6720	20
13	7056	21
14	22320	30
15	16800	20
16	21120	20
17	8400	50
18	73920	55
19	1440	30
20	6480	30
21	5760	20
22	2520	35
23	4320	45
24	131040	60
25	7200	30
26	2880	30
27	1440	10
28	2400	50
29	67680	60
30	3360	20
31	960	20
32	31680	40
33	5760	20
34	11040	20
35	10080	20
36	16800	20
37	13440	40
38	50400	60
39	13440	20
40	6720	20
41	35280	30
42	180000	50
43	4320	20
44	6048	36
45	46080	60
46	2880	40
47	26880	20
48	16800	20
49	7680	20



Num. Evento	Valore CrVI+ iniziale [µg/L]	Valore CrVI+ finale [µg/L]	Variazione CrVI+ iniziale e finale [µg/L]	Variazione percentuale CrVI+ iniziale e finale [%]
1	242,3	538,4	296,1	122,2
2	540,3	120,3	-420,0	-77,7
3	116,1	76,3	-39,8	-34,3
4	87,3	112,6	25,3	28,9
5	137,0	188,7	51,7	37,7
6	209,5	262,8	53,3	25,4
7	316,0	113,5	-202,5	-64,1
8	195,0	362,5	167,5	85,9
9	445,0	565,0	120,0	27,0
10	685,0	459,0	-226,0	-33,0
11	502,0	42,5	-459,5	-91,5
12	234,0	82,0	-152,0	-65,0
13	203,0	150,8	-52,3	-25,7
14	116,0	109,7	-6,3	-5,5
15	115,0	88,3	-26,7	-23,2
16	324,0	1019,5	695,5	214,7
17	903,0	343,0	-560,0	-62,0
18	282,0	57,5	-224,5	-79,6
19	52,0	62,5	10,5	20,2
20	44,0	36,0	-8,0	-18,2
21	38,0	48,6	10,6	27,8
22	1320,0	1336,0	16,0	1,2
23	1344,0	1181,5	-162,5	-12,1
24	1147,0	168,0	-979,0	-85,4
25	189,0	25,7	-163,3	-86,4
26	104,0	11,0	-93,0	-89,4
27	1221,0	2586,8	1365,8	111,9
28	2860,0	1937,5	-922,5	-32,3
29	1015,0	67,4	-947,6	-93,4
30	62,0	79,6	17,6	28,4
31	292,0	421,5	129,5	44,3
32	551,0	102,8	-448,2	-81,3
33	875,0	332,8	-542,2	-62,0
34	600,0	250,0	-350,0	-58,3
35	287,0	32,3	-254,7	-88,8
36	175,0	492,3	317,3	181,3
37	519,0	466,4	-52,6	-10,1
38	493,0	161,8	-331,3	-67,2
39	164,0	1399,7	1235,7	753,5
40	346,0	205,8	-140,2	-40,5
41	192,0	313,2	121,2	63,1
42	296,0	231,5	-64,5	-21,8
43	1260,0	101,0	-1159,0	-92,0
44	301,8	774,3	472,5	156,6
45	805,7	260,0	-545,7	-67,7
46	242,5	207,5	-35,0	-14,4
47	190,0	93,0	-97,0	-51,1
48	177,8	123,0	-54,8	-30,8
49	98,0	111,4	13,4	13,7

Num. Evento	Media variazione giornaliera Cr(VI) [ $\mu\text{g/L}$ ]	Media variazione giornaliera [%]	Cr(VI) estratto [kg]
1	5,3	2,2	20,2
2	-5,9	-1,1	24,3
3	-1,1	-1,0	1,6
4	7,1	8,1	0,3
5	6,0	4,4	0,4
6	53,3	25,4	0,2
7	-2,3	-0,7	13,3
8	31,3	16,0	0,9
9	120,0	27,0	0,7
10	-3,4	-0,5	21,1
11	-7,1	-1,4	19,4
12	-10,5	-4,5	0,8
13	-6,2	-3,1	1,4
14	0,0	0,0	2,4
15	-0,7	-0,6	2,0
16	13,2	4,1	6,3
17	-88,7	-9,8	4,6
18	-4,1	-1,5	29,3
19	10,5	20,2	0,1
20	-0,7	-1,5	0,3
21	0,7	1,8	0,3
22	8,0	0,6	3,3
23	-49,3	-3,7	5,4
24	-10,5	-0,9	98,5
25	-17,5	-9,3	0,6
26	-21,8	-20,9	0,1
27	273,2	22,4	2,7
28	-922,5	-32,3	5,8
29	-20,3	-2,0	32,1
30	3,0	4,8	0,2
31	129,5	44,3	0,3
32	-14,9	-2,7	16,0
33	-42,8	-4,9	2,3
34	-15,0	-2,5	3,2
35	-12,2	-4,2	0,8
36	9,8	5,6	3,3
37	-1,9	-0,4	5,5
38	-9,4	-1,9	13,5
39	51,4	31,4	4,0
40	-11,0	-3,2	1,9
41	2,1	1,1	11,9
42	0,6	0,2	81,1
43	-121,1	-9,6	0,8
44	72,0	23,9	3,5
45	-17,6	-2,2	20,8
46	-17,5	-7,2	0,6
47	-2,1	-1,1	3,5
48	-1,1	-0,6	1,1
49	1,3	1,3	0,6
		Totale Cr(VI) estratto [kg] --->	473,6

*Tabella 24 - Parametri calcolati relativi ai periodi di emungimento. Pozzo G6. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.*

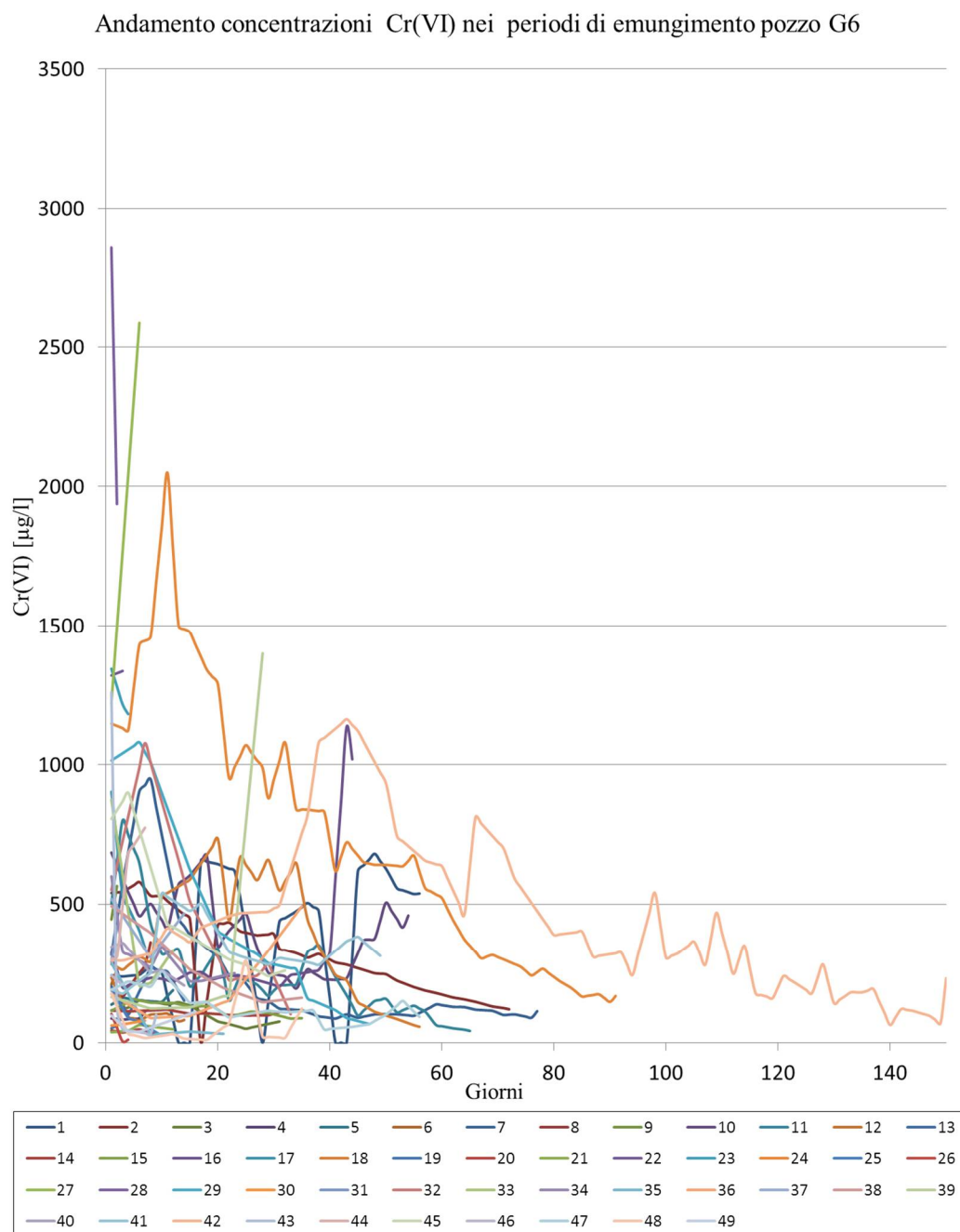


Figura 40 - Andamento concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$  nei periodi di emungimento. Pozzo G6. Dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

Da una prima osservazione dei dati si può notare come le concentrazioni di cromo tendano a diminuire nel corso dei periodi di pompaggio. In particolare, nei primi

giorni di emungimento la riduzione di cromo non è così marcata. Questo fenomeno è probabilmente imputabile all'iniziale richiamo di acqua più contaminata all'accensione delle pompe. Successivamente, i valori sono soggetti ad una variabilità del tutto simile a quella che si registra nell'andamento del livello di falda e nelle precipitazioni piovose.

Ai fini di un confronto fra l'apporto ponderale di cromo in falda proveniente dalla porzione insatura del sottosuolo e da quella soggetta all'oscillazione della superficie di falda, si è calcolato il quantitativo in Kg di cromo emunto fra il 2008 ed il 2014 dai pozzi della barriera idraulica.

Il valore è stato ottenuto conoscendo la portata e la concentrazione di Cr(VI) nel periodo di tempo di interesse.

Considerando per esempio, i giorni compresi tra il 07/05/2008 ed il 13/05/2008 i dati relativi al pozzo G6 sono i seguenti:

Giorno	Portata [m <sup>3</sup> /h]	Cr <sup>6+</sup> [µg/L]
1	40	242.3
2	40	240.1
3	40	238.0
4	40	240.1
5	40	242.1
6	40	244.2
7	40	259.6

La massa di Cr<sup>6+</sup> del giorno 1 è data da:

Con portata = 40 [m<sup>3</sup>/h] = 40000 [L/h]

$$Cr^{6+}[kg] = \frac{40000 \left[ \frac{L}{h} \right] \cdot 24[h] \cdot 242.3 \left[ \frac{\mu g}{L} \right] \cdot 10^{-6}}{1000} = 0.23 [kg]$$

Sommando la massa estratta giornalmente, si ottengono i chilogrammi complessivi emunti. Per i 7 giorni considerati nell'esempio è di 1.6 Kg.

I dati ottenuti nel periodo che va dal 04/01/2008 al 03/11/2014 sono esposti nella tabella riassuntiva seguente (Figura 41):

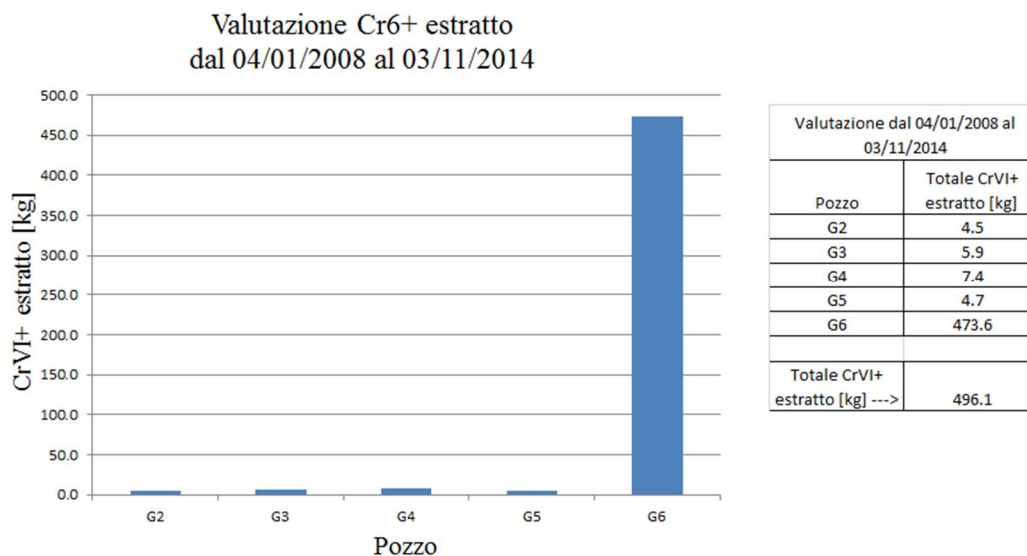


Figura 41 - Quantità Cr<sup>6+</sup> estratto dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

I risultati della sommatoria mostrano che nel corso di sette anni sono stati estratti in fase disciolta circa 500 kg di Cromo esavalente.

Facendo specifico riferimento al pozzo G6 (cioè quello che ha dato il maggiore contributo) è stata confrontata la massa estratta annualmente tramite pompaggio sia con le precipitazioni annue (Figura 42) sia con il livello medio della falda (Figura 43).

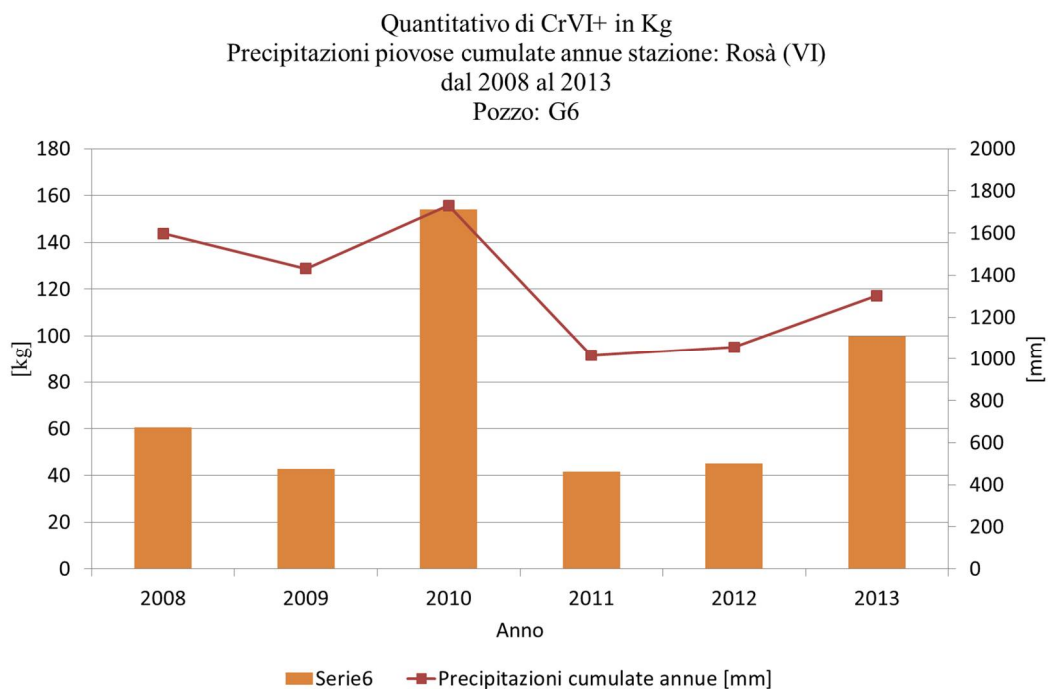


Figura 42 - Quantitativo di Cr(VI) in Kg estratto annualmente. Pozzo G6. Precipitazioni piovose cumulate annue. Stazione Rosà (VI).

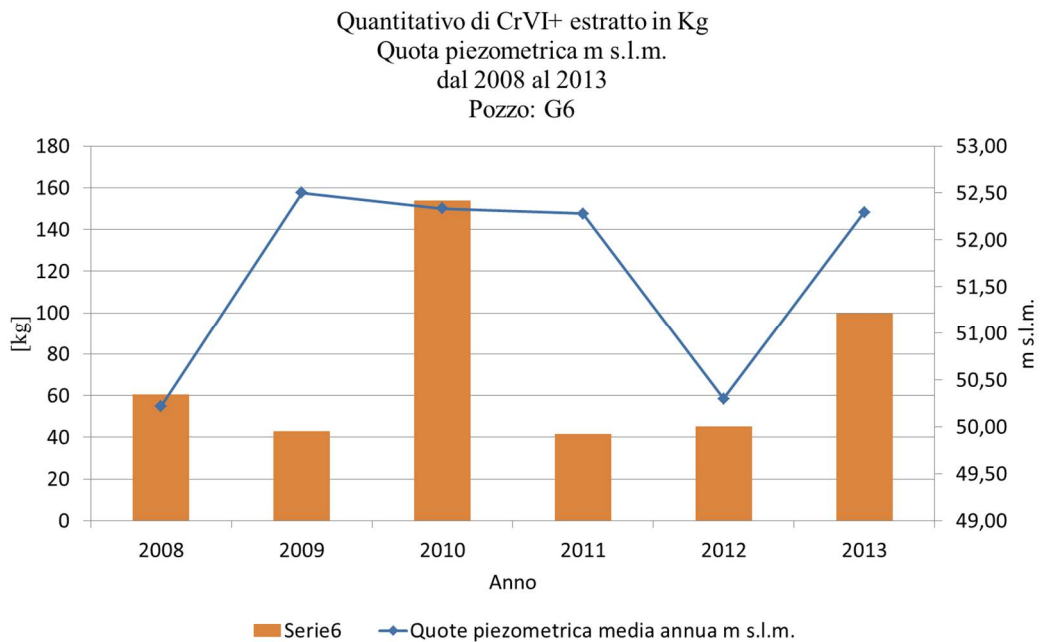


Figura 43 - Quantitativo di Cr(VI) in Kg estratto annualmente. Pozzo G6. Quote piezometriche medie annue. Pozzo: G1.

Dal confronto delle due figure si può osservare che la migliore correlazione si ottiene con il regime delle piogge, infatti il valore massimo ed il valore minimo coincidono con gli stessi anni, diversamente si evidenzia una minore correlazione con il livello medio della falda, soprattutto per quanto riguarda gli anni 2009 e 2011.

Oltre a questo confronto di larga massima, è stata calcolata a quale concentrazione media corrisponde la massa di cromo estratta qualora provenisse dalla sola zona di oscillazione di falda.

Per questi calcoli è stata considerata un'area sorgente riferibile al pozzo G6 di 10x10 m (100 m<sup>2</sup>) e uno spessore di oscillazione pari a 6 m. Considerando un peso specifico del terreno di 1.7 t/m<sup>3</sup>, si ricava che l'area sorgente è compresa in una porzione di terreno del peso di 1000 t. Considerando che la massa estratta dal pozzo G6 provenga solo da questa porzione di sottosuolo si ricava che la concentrazione media sull'intero spessore ad inizio 2008 doveva essere almeno pari a (473 kg / 1000 t = 473 mg/kg) e teoricamente dovrebbe essere diminuita progressivamente fino a scomparire.

Tuttavia:

le concentrazioni ad oggi si mantengono ancora elevate, quindi considerando questo solo meccanismo la concentrazione dovrebbe essere ancora maggiore;

il pompaggio è iniziato nel 2004, quindi le concentrazioni dovevano essere inizialmente certamente maggiori;

le analisi dei terreni eseguite sui campioni del sondaggio G8 realizzato nel 2005 e ubicato entro l'area ipotetica della sorgente relativa al G6 mostrano che entro la zona di fluttuazione le concentrazioni di Cr(VI) nei terreni alle quote comprese fra -22 m e - 28 m dal p.c. erano allora nettamente più basse come la tabella seguente evidenzia (Tabella 25):

Numero	Campione (prof. da p.c. in m)	Cromo VI [mg/Kg]
1	4.5 - 5.5	360
2	9 - 10.1	460
3	14.1 - 14.8	220
4	19 - 20	540
5	20.8 - 21	210
6	22 - 22.3	215
7	22.5 - 22.7	42
8	23.3 - 24.4	3.1
9	27 - 28	<1.5

*Tabella 25 - Valori analisi chimiche su campioni a diverse profondità. Pozzo G8. (Perizia stratigrafica C.T.U., 2005)*

Quindi l'ipotesi che ci sia solo l'apporto da lisciviazione entro la zona di fluttuazione della falda non è verosimile.

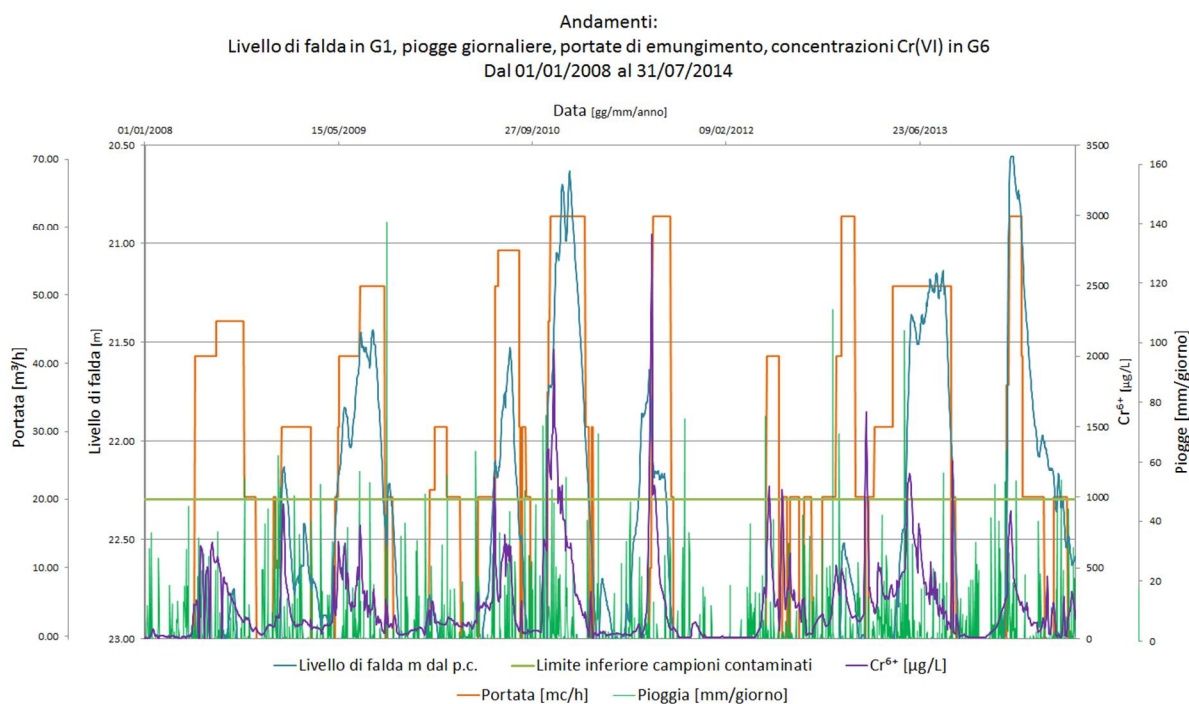
Invece, partendo dalla tabella sopra riportata si mette in evidenza un meccanismo molto realistico: partendo dalla quota -20 m dal p.c. e procedendo in profondità le concentrazioni dei terreni diminuiscono progressivamente come correttamente deve accadere in quanto entro la zona di oscillazione la parti più profonde sono soggette ad una maggiore lisciviazione, essendo sature per un tempo maggiore. La Figura 44, mostra come nel periodo 2008-2014 la distribuzione del periodo di saturazione sia maggiore per gli strati più profondi, che quindi giustamente dovranno essere anche i meno contaminati.

Poiché in ultima analisi va ricordato che vi è una correlazione diretta fra le precipitazioni e il livello di falda, per riuscire a distinguere e scomporre i due fattori di mobilizzazione è stata fatta una analisi di dettaglio del grafico di Figura 44 dove sono riportati:

- Livello di falda in G1 (zoom quote da -23 a -20,5 quindi la porzione più superficiale e tendenzialmente con una contaminazione residua maggiore, da tabella valori nel 2005 compresi fra 40 e 200 mg/kg),
- Concentrazione di Cr6 in nel pozzo G6,



- Periodi di pompaggio e portata del pozzo G6,
- Precipitazioni in mm/giorno alla stazione di Rosà.



*Figura 44 - Andamenti: Livello di falda in G1. Piogge giornaliere. Portate di emungimento. Concentrazioni Cr(VI) in G6. Dal 01/01/2008 al 31/07/2014.(vedi pagina 127)*

Dal grafico si osserva che:

Alcuni picchi di concentrazione sono effettivamente associati a livelli falda che superano quota -23 m dal p.c., tuttavia a questi picchi non corrispondono concentrazioni analoghe, cosa che ci si dovrebbe aspettare visto che attraversano strati con la stessa concentrazione, inoltre le concentrazioni dovrebbero diminuire nel tempo invece di aumentare;

l'andamento delle concentrazioni in fase di picco sono fortemente attenuate dall'azione del pompaggio, quindi il pompaggio provoca un richiamo di acqua più

pulita che va a diluire le elevate concentrazioni, ne consegue che il plume presente in G6 è estremamente limitato arealmente;

in occasione di periodi piovosi intensi non associati a livelli alti di falda si manifestano concentrazioni di Cr(VI) di circa 500-600 µg/l questi picchi sono molto simili fra di loro ad indicare che il meccanismo di trasporto è sempre lo stesso (lisciviazione lungo lo spessore insaturo);

laddove si sovrappongono eventi piovosi ed innalzamento elevato della falda si registra un abbassamento del valore massimo del picco legato alla lisciviazione ad opera della falda degli strati ancora contaminati, evidentemente il contributo in termini di massa d'acqua coinvolta è molto maggiore, si ipotizza dunque, che l'infiltrazione delle piogge provochi un effetto di diluizione delle concentrazioni di Cr(VI) in falda.

In conclusione si può affermare che nel pozzo G6 le concentrazioni di Cr<sup>6+</sup> sono riconducibili ad entrambi i fattori studiati ma con un peso ed un effetto diverso:

la lisciviazione per effetto dell'innalzamento della falda si verifica solo quando il livello sale a quote inferiori a - 23 m da pc, in tali occasioni in G6 si innesca un plume di contaminazione con valori massimi di qualche migliaio di µg/l ma che ha dimensioni limitatissime e tali da venire diluito dalle acque di infiltrazione delle piogge,

la lisciviazione della porzione insatura determina un effetto minore in termini di concentrazione massima (rispetto al punto precedente) ma il suo contributo in termini di massa è nettamente maggiore tanto che la maggior parte di massa estratta dal pompaggio non può che derivare che dall'apporto dalla verticale in quanto ad oggi costituisce una sorgente di materia ancora ampiamente disponibile e i trend annuali di massa estratta non mostrano variazioni apprezzabili.

## 5.4. ANALISI DEI RITARDI

Le serie di dati, quali precipitazioni piovose infiltrate e quote piezometriche sono legate ai valori di concentrazione di cromo esavalente. Volendo cercare questa correlazione, è necessario considerare lo sfasamento temporale tra i diversi segnali. In particolare, si ipotizza l'esistenza di un ritardo tra l'andamento della pioggia infiltrata e quello della concentrazione di cromo. La valutazione di questo periodo di tempo è stata fatta eseguendo una correlazione incrociata tra i segnali. (M. Owor, R. G. Taylor, C. Tindimugaya, D. Mwesigwa, 2009)

Considerando due segnali, per esempio quello relativo alle precipitazioni infiltrate  $P_{inf}$ ; e quello relativo alle concentrazioni di cromo  $Cr$ . Si ipotizza che essi differiscono di uno spazio temporale  $t$ . È possibile fare la correlazione incrociata per calcolare di quanto sia necessario posticipare  $P_{inf}$  perché vi sia una più elevata correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ .

In particolare possiamo definire la correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ . (Weisstein)

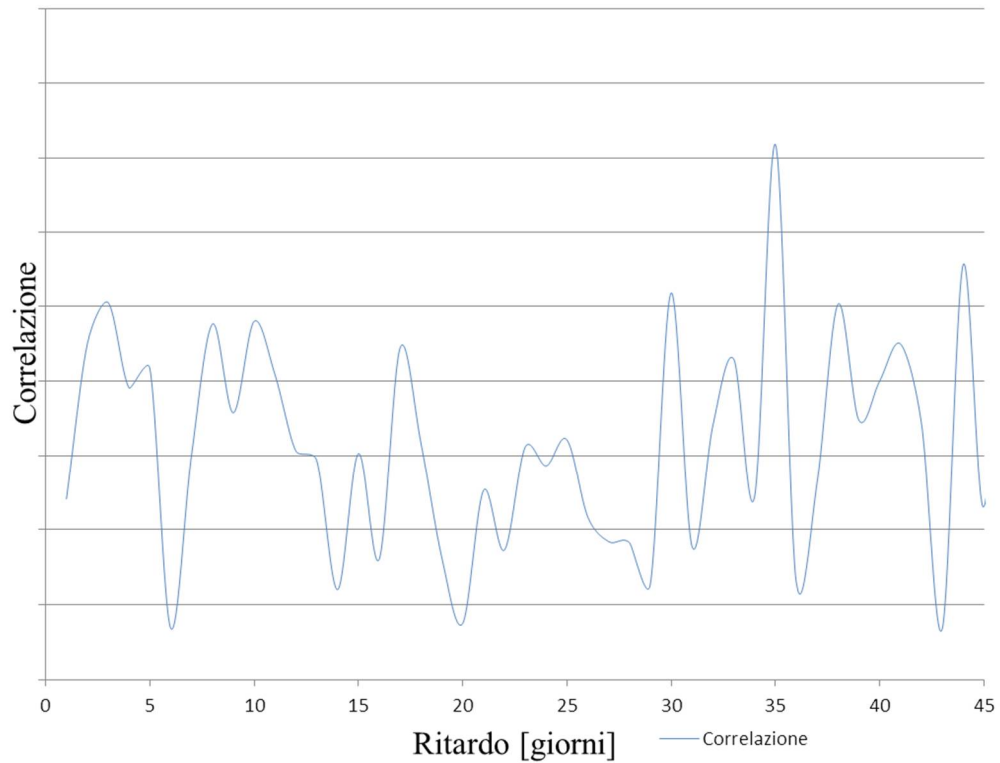
$$R_{P_{inf}|Cr} = \int_{-\infty}^{+\infty} Cr(\tau) \cdot P_{inf}(t + \tau) d\tau$$

Per ogni valore di  $t$  si ha dunque un valore di  $R_{P_{inf}|Cr}$ . I due segnali sono stati correlati iterativamente incrementando  $t$  di un giorno ad ogni iterazione. È stato così ottenuto un vettore di valori di  $R_{P_{inf}|Cr}$ . I massimi di questo vettore si ottengono quando la correlazione tra i due segnali è elevata, è così possibile conoscere il ritardo temporale che intercorre tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ .

Il calcolo del ritardo è stato effettuato attraverso le funzioni (analisi\_picchi.m; ritardo\_calc.m; Corr.m).

Di seguito (Figura 45) è possibile osservare la correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ ; dove i dati relativi alle concentrazioni si riferiscono a quelle misurate nel pozzo G6:

Andamento correlazione tra segnale precipitazioni  
piovose infiltrate e concentrazioni di  $Cr^{6+}$   
Dati pozzo: G6



*Figura 45 – Andamento correlazione tra segnale precipitazioni piovose infiltrate e concentrazioni  $Cr^{6+}$ . Dati G6.*

È possibile osservare come la massima correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$  riferiti al pozzo G6 si verifica con un ritardo pari a 35 giorni. Questo valore sarà successivamente utilizzato per sincronizzare i due segnali.

Di seguito (Figura 46) è possibile osservare la correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ ; dove i dati relativi alle concentrazioni si riferiscono a quelle misurate nel pozzo G5:

Andamento correlazione tra segnale precipitazioni  
piovose infiltrate e concentrazioni di  $Cr^{6+}$   
Dati pozzo: G5

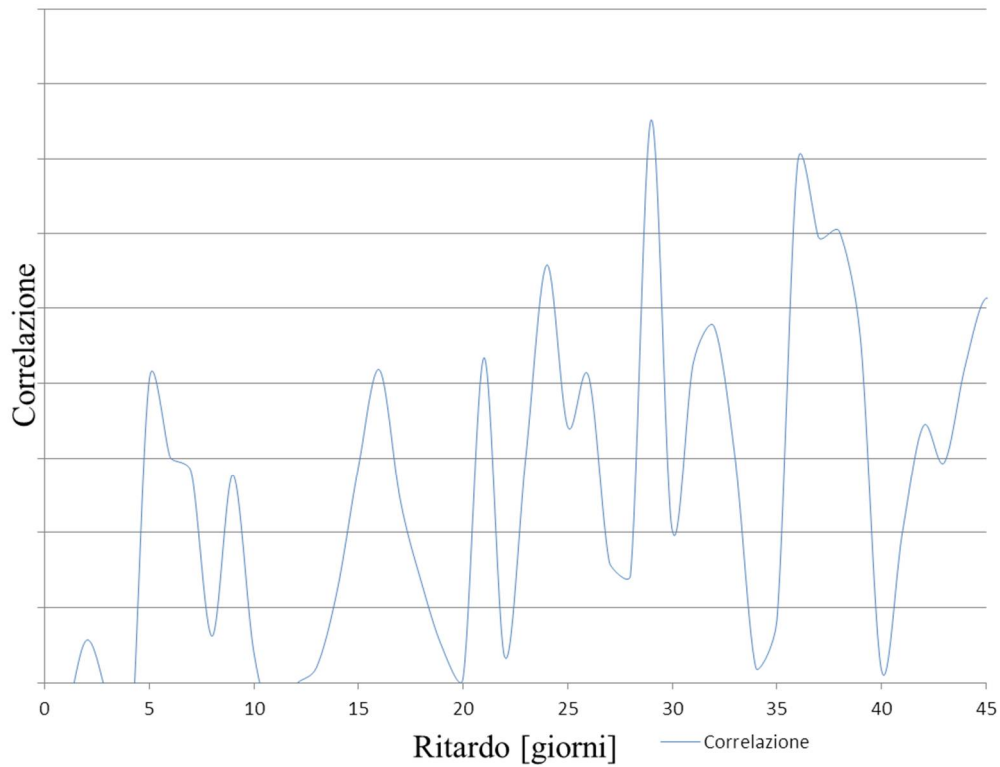


Figura 46 – Andamento correlazione tra segnale precipitazioni piovose infiltrate e concentrazioni  $Cr^{6+}$ . Dati G5.

È possibile osservare come la massima correlazione tra  $P_{inf}$  e  $Cr$  riferiti al pozzo G5 si verifica con un ritardo di 29 giorni.

## 5.5. ELABORAZIONE SEGNALE PRECIPITAZIONE PIOVOSA INFILTRATA

Nel paragrafo precedente, con il metodo della correlazione incrociata, è stata fatta una stima del ritardo che intercorre tra  $P_{inf}$  e  $Cr$ , utilizzando i dati del pozzo G6 e G5.

La valutazione di questo intervallo temporale risulta essere di fondamentale importanza nella sincronizzazione dei due segnali. Questo processo infatti permette di osservare le eventuali correlazioni tra le due serie di dati.

Dovendo dunque traslare  $P_{inf}$ , di un determinato periodo di tempo, si sono ipotizzati due metodi: il primo prevede semplicemente la traslazione del segnale  $P_{inf}$  del ritardo previsto, mentre nel secondo metodo viene calcolata una media mobile semplice di  $P_{inf}$  su un numero di valori pari al ritardo scelto.

Di seguito vengono esplicitati i due metodi e relativi risultati.

### 5.5.1 MEDIA MOBILE SEMPLICE

La media mobile semplice, come anticipato, è utilizzata per elaborare  $P_{inf}$ , con un ritardo specifico, quindi, considerando per esempio un ritardo pari a 35 giorni tra  $P_{inf}$  e  $Cr$  per quanto riguarda i dati relativi a G6. Si esegue una media aritmetica di  $P_{inf}$  ogni 35 giorni per tutta la serie temporale considerata. In questo modo, viene elaborato un nuovo segnale definito  $P_{inf}^{M35}$ .

Di seguito, vengono riportati i grafici relativi a  $Cr$  e  $P_{inf}^{M35}$  per quanto riguarda il pozzo G6:

Precipitazione piovosa infiltrata con media mobile a 35 giorni  
 e andamento concentrazione  $Cr^{6+}$   
 dal 04/02/2008 al 31/07/2014  
 elaborazione fatta con dati stazione pluviometrica Rosà (VI)  
 Pozzo: G6

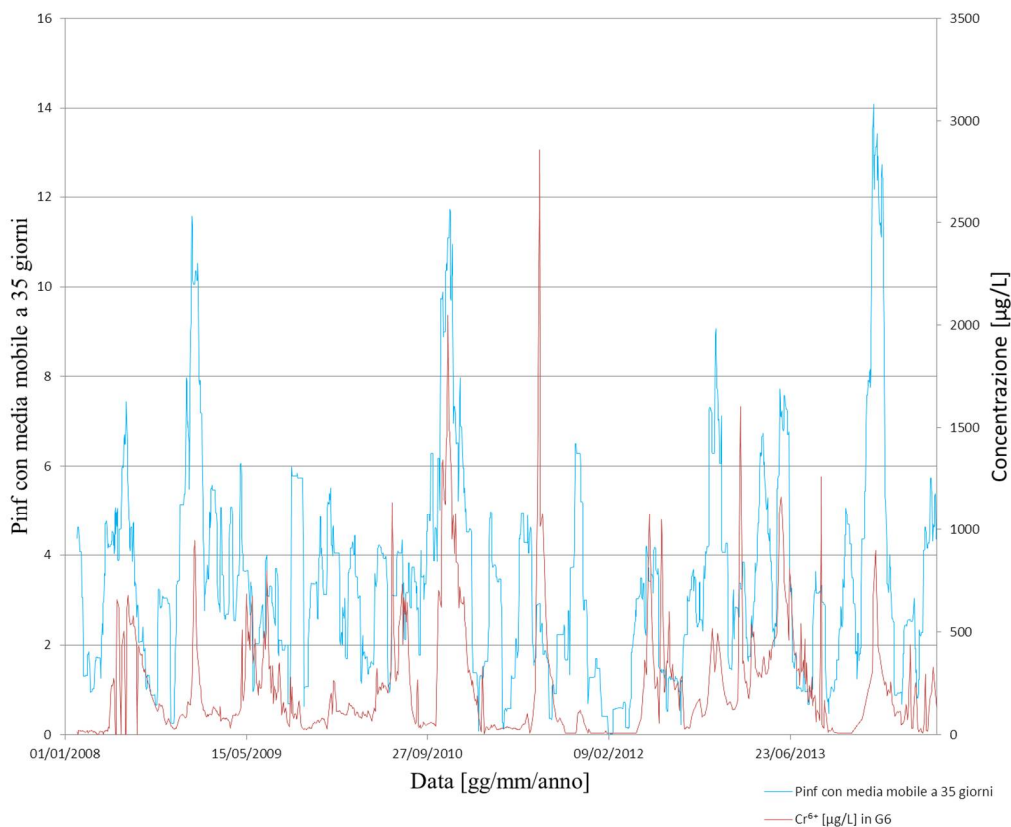
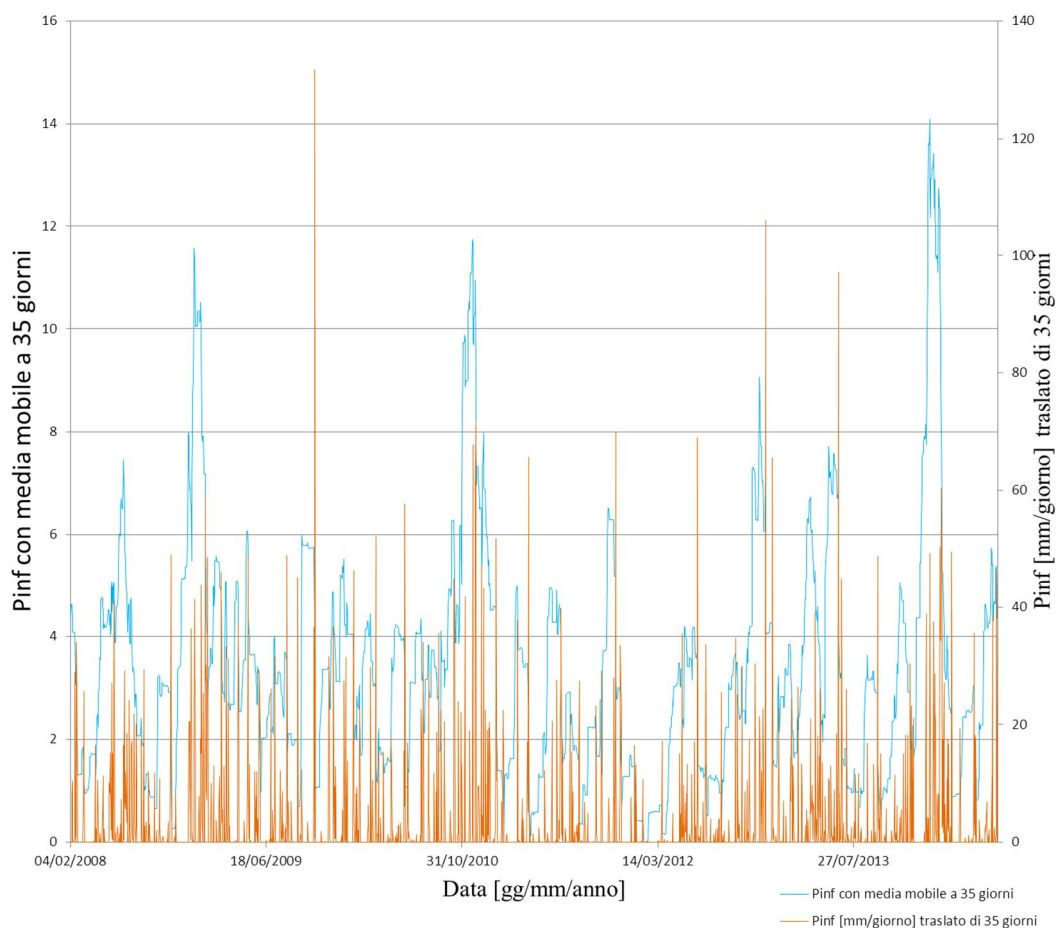


Figura 47 - Precipitazioni piovose infiltrata con media mobile a 35 giorni e andamento concentrazione  $Cr^{6+}$ . Pozzo G6. Dal 04/02/2008 al 31/07/2014

Dal grafico si nota come in alcuni periodi di tempo i valori di  $P_{inf}^{M35}$  si adattano bene a  $Cr$ , da ciò, si evidenzia un legame tra i due segnali che tuttavia non è osservabile per tutta la serie temporale. Inoltre bisogna considerare che  $P_{inf}^{M35}$  non è un segnale impulsivo come  $P_{inf}$ , infatti esso non è mai zero, questo fatto lo rende maggiormente correlabile a  $Cr$  anch'esso segnale continuo.

Nel grafico seguente (Figura 48) si confronta  $P_{inf}$  semplicemente traslato di 35 giorni ( $P_{inf}^T$ ) e  $P_{inf}^{M35}$ :

Confronto Precipitazione piovosa infiltrata con media mobile a 35 giorni  
 e precipitazione piovosa infiltrata traslata di 35 giorni  
 dal 04/02/2008 al 31/07/2014  
 elaborazione fatta con dati stazione pluviometrica Rosà (VI)  
 Pozzo: G6

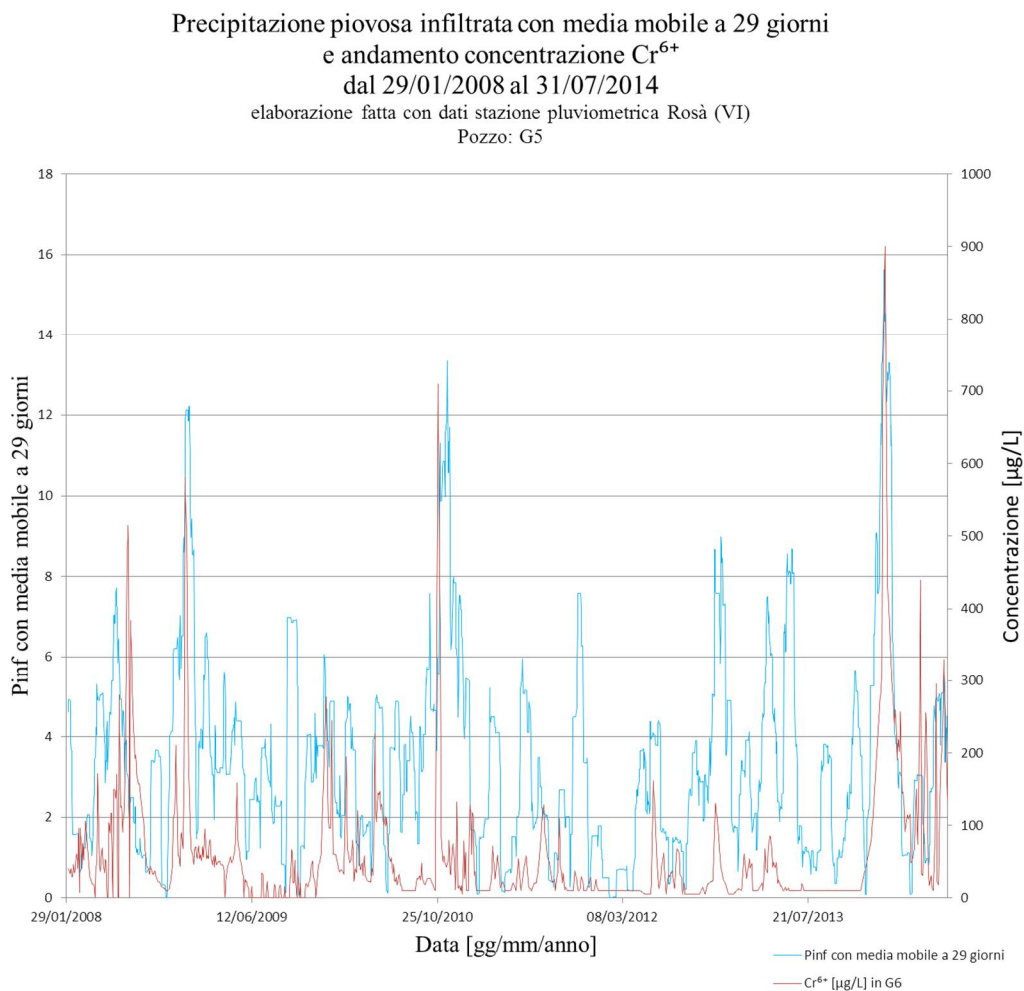


*Figura 48 – Confronto tra precipitazione piovosa infiltrata con media mobile a 35 giorni e precipitazione piovosa infiltrata traslata di 35 giorni.*

Dal confronto, si nota che con il metodo della media mobile, eventi di precipitazione elevati ma isolati sono meno considerati rispetto al metodo della semplice traslazione. Per queste caratteristiche per le successive elaborazioni si utilizza  $P_{inf}^{M35}$ .



Di seguito (Figura 49), vengono riportati i grafici relativi a  $Cr$  e  $P_{inf}^{M29}$  per quanto riguarda il pozzo G5:



*Figura 49 - Precipitazioni piovose infiltrata con media mobile a 29 giorni e andamento concentrazione  $Cr^{6+}$ . Pozzo G5. Dal 04/02/2008 al 31/07/2014*

Anche nel caso dei valori riferiti a G5, si osserva in alcuni casi una correlazione tra  $Cr$  e  $P_{inf}^{M29}$ , indice di un legame tra le precipitazioni piovose e i valori di concentrazione misurati.

## 6. RELAZIONI TRA LA CONCENTRAZIONE DELL'INQUINANTE CROMO, PRECIPITAZIONI PIOVOSE E FALDA ACQUIFERA

Relazionare le concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$  con l'andamento della falda acquifera e le precipitazioni piovose, è il principale obiettivo di questo elaborato. Nei paragrafi seguenti verranno confrontati i segnali elaborati, col fine di discriminare il meccanismo che gioca il ruolo fondamentale nel trasporto del contaminante.

### 6.1. RELAZIONE TRA CONCENTRAZIONI DI CROMO E PRECIPITAZIONI PIOVOSE

Volendo ricercare un possibile legame tra le precipitazioni infiltrate e le concentrazioni di Cr(VI) in soluzione, ci si pone nella condizione di fare la seguente ipotesi: ad elevate precipitazioni efficaci corrispondono elevati valori di concentrazione di cromo in falda. Partendo da questo presupposto, sono stati realizzati i seguenti grafici (Figura 50) riferiti al pozzo G6 dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

Confronto pioggia infiltrata con media mobile a 35  
giorni e concentrazioni CrVI+

Dal 04/02/2008 al 03/11/2014

Pozzo: G6

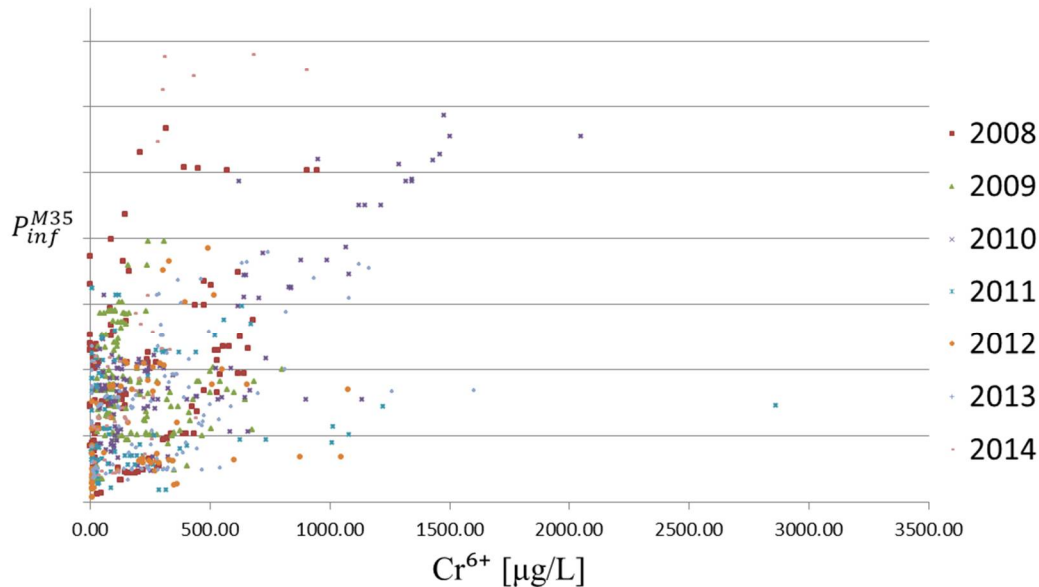


Figura 50 - Confronto pioggia infiltrata con media mobile a 35 giorni e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>. Pozzo G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014

Dalla Figura 50 viene evidenziata l'esistenza di una correlazione positiva tra concentrazione di Cr(VI) ed il segnale  $P_{inf}^{M35}$ . Ciò non esclude che anche le oscillazioni dei livelli piezometrici costituiscano un meccanismo di lisciviazione del contaminante e che, in determinate condizioni, la falda acquifera possa anche essere l'unico meccanismo di trasporto attivo.

## 6.2. RELAZIONE TRA CONCENTRAZIONI DI CROMO E QUOTA PIEZOMETRICA

Il secondo possibile meccanismo di trasporto è rappresentato dalle oscillazioni dei livelli della falda freatica. L'elevata permeabilità dell'alta pianura, nonché la vicinanza al fiume Brenta comportano, alla scala locale del sito, escursioni massime superiori ai 6 metri, in grado di portare in soluzione l'eventuale contaminante presente negli strati di terreno insaturo più profondi.

Di seguito in Figura 51 vengono confrontati i valori di quota piezometrica con le concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$  dal 04/01/2008 al 03/11/2014.

Confronto quota piezometrica e  
concentrazioni  $\text{CrVI}^+$   
Dal 04/02/2008 al 03/11/2014  
Pozzo: G6

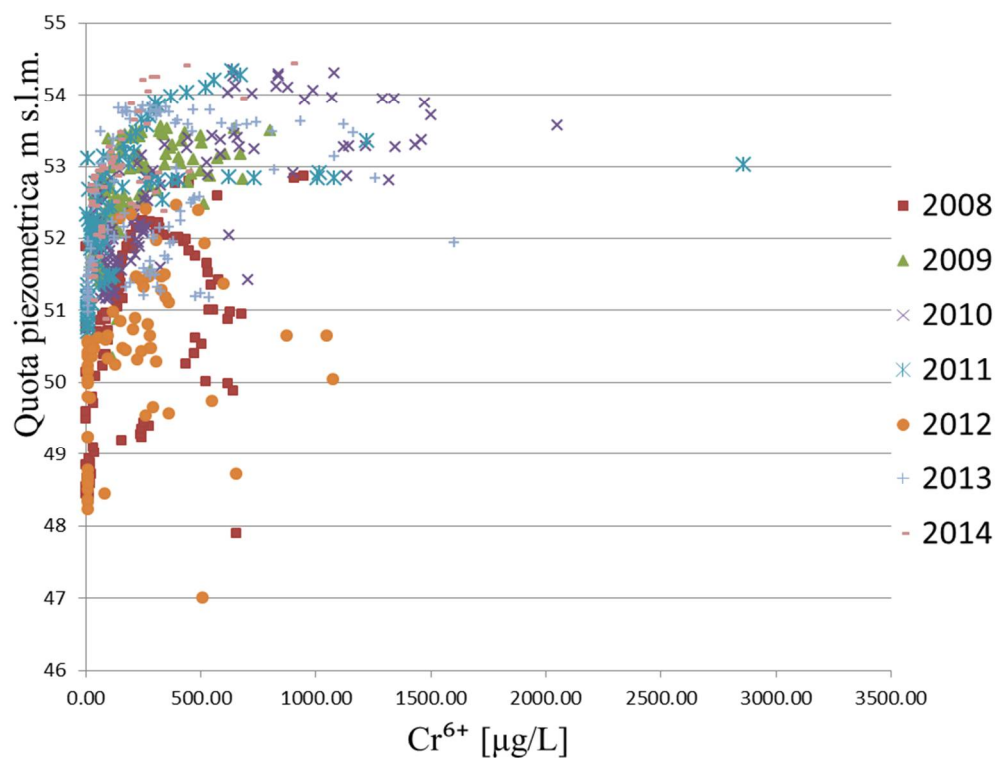


Figura 51 - Confronto quota piezometrica e concentrazioni  $\text{Cr}^{6+}$ . Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.

Dalla Figura 51 si denota la possibilità di avere basse concentrazioni di cromo anche quando la quota piezometrica è elevata. Mentre in Figura 50 si poteva osservare un trend di crescita più lineare. In questo caso le concentrazioni di cromo più elevate si trovano solo quando la quota piezometrica è al di sopra dei 52,5 m s.l.m..

Per rappresentare nel suo complesso le relazioni tra i dati elencati, nel paragrafo seguente vengono plottati i dati su tre assi.

### 6.3. CONFRONTO TRA PRECIPITAZIONI PIOVOSE, $\text{Cr}^{6+}$ E QUOTA PIEZOMETRICA

Confrontare assieme tutte le serie di dati elaborate risulta necessario per definire meglio i rapporti esistenti tra di esse. Sicuramente le precipitazioni considerate, anche se locali, possono influenzare direttamente o indirettamente, con l'innalzamento della falda, i valori di concentrazione campionati. La quota piezometrica con le sue oscillazioni stagionali, non correlate alle precipitazioni locali, è in grado di mobilizzare il cromo, il quale, trasportato dalla falda freatica, viene intercettato dalla barriera idraulica.

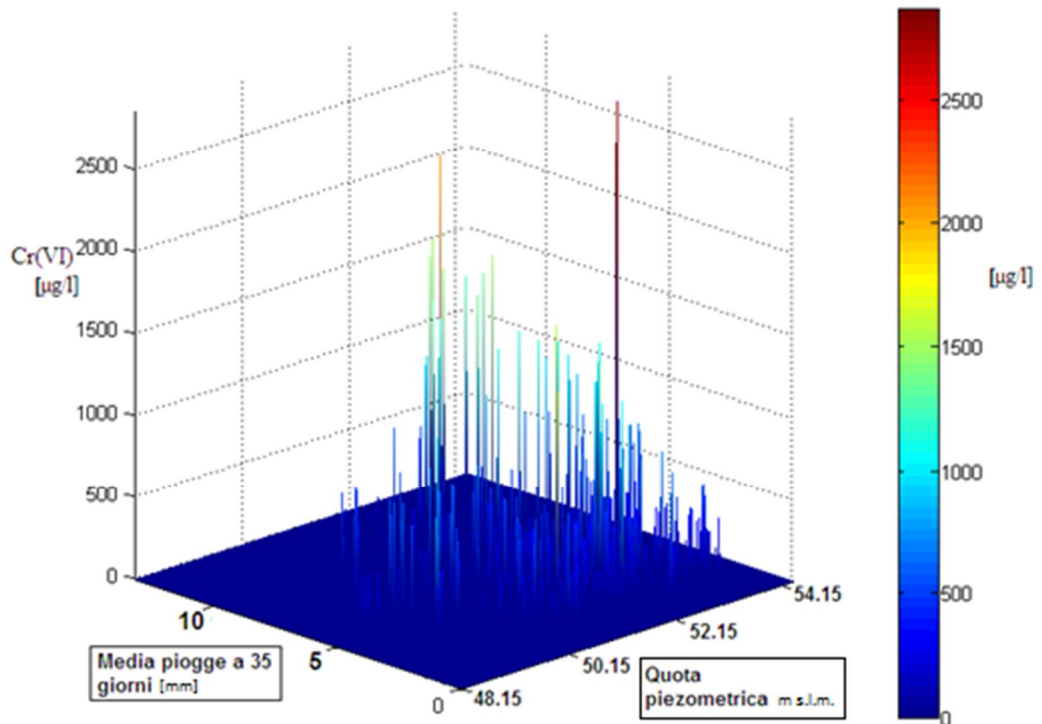
Per comprendere al meglio questi aspetti, i segnali elaborati, relativi al pozzo G6, vengono in Figura 52 plottati nel modo seguente:

Asse x: quota piezometrica m s.l.m..

Asse y: pioggia infiltrata con media mobile a 35 giorni.

Asse z: concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$ .

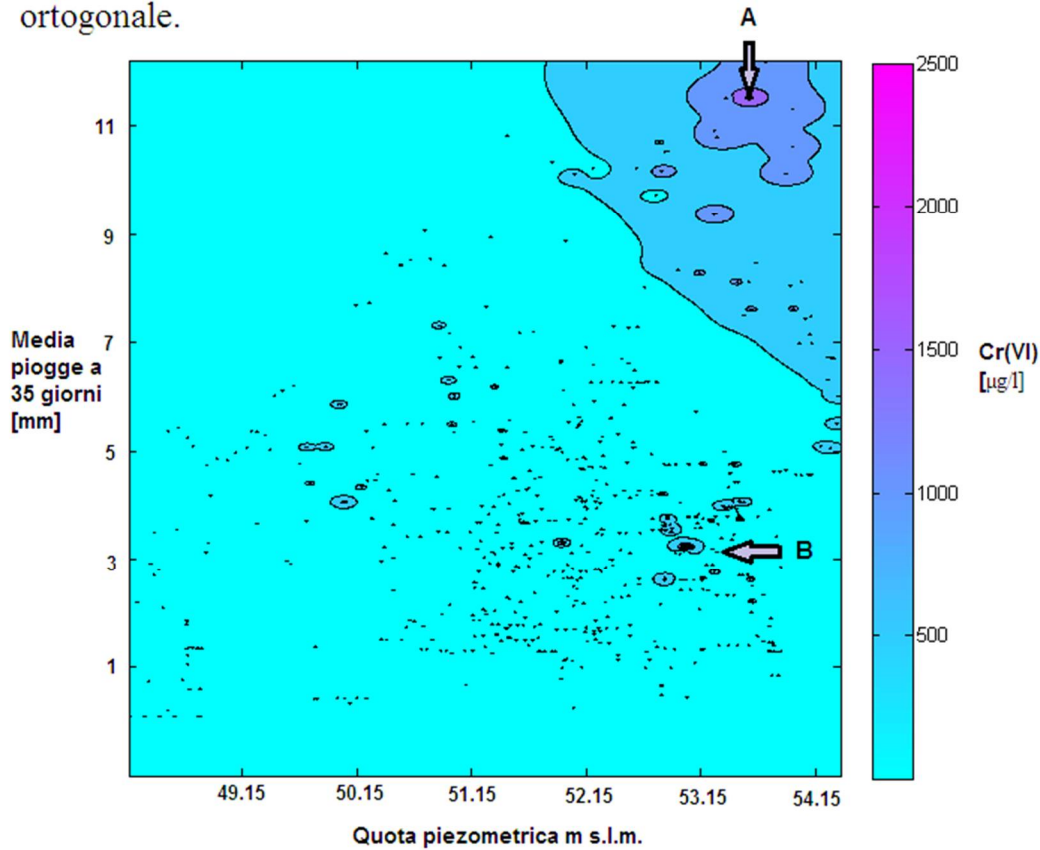
Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni.  
Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.



*Figura 52 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014.*

Dal grafico, si possono osservare in che condizioni si registrano determinati valori di contaminazione. In particolare, s'individuano alti valori di concentrazione solamente quando la quota piezometrica è elevata. Questa affermazione, esclude da parte delle precipitazioni piovose, di essere il solo meccanismo di trasporto del contaminante. Tuttavia, osservando Figura 53, si distinguono due zone dove le concentrazioni di cromo sono più elevate:

Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014. Visione ortogonale.



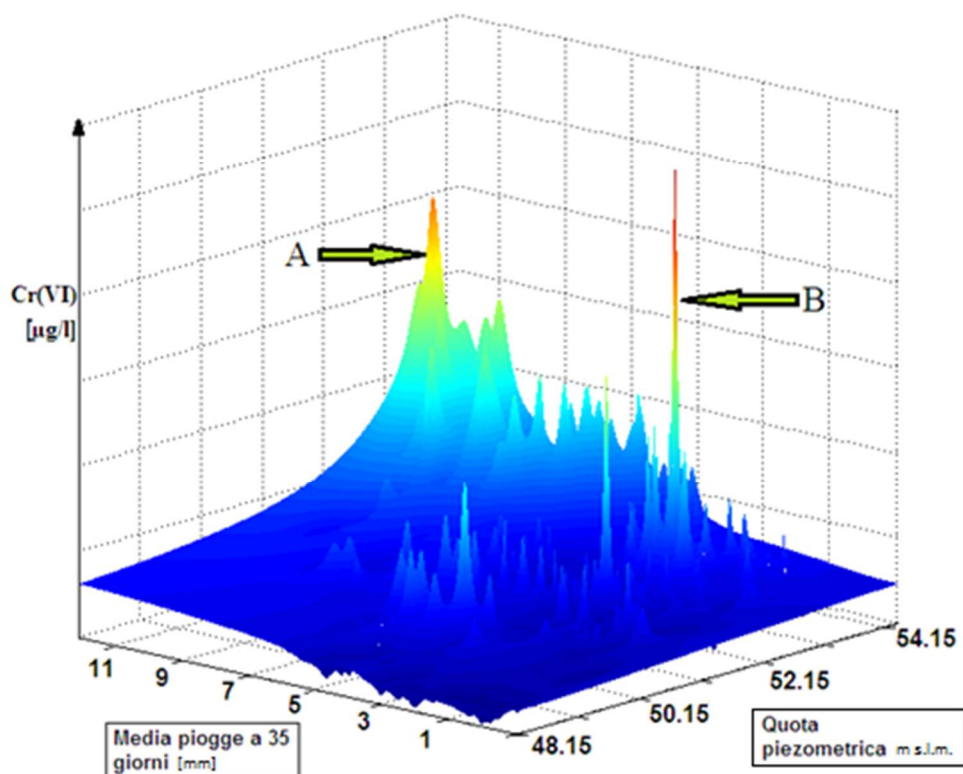
*Figura 53 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014. Visione ortogonale. Sezione ottenuta tramite funzione (geostat\_2.m)*

Zona A: Alte precipitazioni locali e quote piezometriche elevate. In quest'area si registrano la maggior parte degli eventi ad elevate concentrazioni di  $\text{Cr}^{6+}$ . Le quali, però non superano mai il valore di 2000  $\mu\text{g/l}$ .

Zona B: Quote piezometriche elevate e basse precipitazioni locali. In quest'area si registrano pochi eventi con concentrazioni molto elevate di  $\text{Cr}^{6+}$ . Le quali, arrivano fino a 2860  $\mu\text{g/l}$ .

Per visualizzare al meglio quanto scritto si osservi la Figura 54 seguente ottenuta mediante funzione geostat\_2.m.

Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014



*Figura 54 - Distribuzione dei dati relativi alle concentrazioni in funzione della quota piezometrica e della pioggia infiltrata con media mobile a 35giorni. Pozzo: G6. Dal 04/02/2008 al 03/11/2014*



## 7. CONCLUSIONI

Lo studio svolto permette di fare alcune valutazioni sui meccanismi in grado di mobilizzare il Cr(VI) dal suolo alle acque sotterranee nel sito inquinato della ex Galvanica p.m. a Tezze sul Brenta.

Dalle elaborazioni svolte si evidenzia che il segnale relativo alla concentrazione del cromo è influenzato dall'emungimento, dalle precipitazioni piovose e dall'oscillazione del livello di falda.

Lo studio ha consentito di rilevare come nel caso specifico la pioggia sia il fattore di lisciviazione più frequente e, quindi, più importate anche in termini di quantità di massa di Cr(VI) mobilizzata. L'effetto delle precipitazioni piovose, nel trasportare il cromo in falda nel sito in esame, è stato confermato anche dalla valutazione dei quantitativi di cromo estratto annualmente, i quali, pur essendo in presenza di un sito dismesso (assenza della sorgente primaria), non registrano alcun trend di diminuzione.

Il presente elaborato ha poi evidenziato come l'oscillazione del livello di falda è risultato essere un fattore di lisciviazione meno frequente, perché per attivarsi necessita di quote piezometriche particolarmente elevate, inoltre esso mobilizza una quantità di Cr(VI) nettamente inferiore.

Lo studio svolto ha infine consentito di evidenziare come le concentrazioni di Cr(VI), inoltre, assumono valori diversi in relazione al meccanismo di mobilizzazione:

- con l'innalzamento della quota piezometrica sopra ad una soglia limite si originano eventi di contaminazione elevati (qualche migliaio di  $\mu\text{g/l}$ ) in termini di concentrazione ma limitati come estensione spaziale e di breve durata;

- con l'infiltrazione delle acque di pioggia le concentrazioni in falda assumono valori di qualche centinaio di  $\mu\text{g/l}$  ma con un elevato impatto areale e più duraturo nel tempo;
- se il meccanismo di mobilitazione è costituito dall'azione combinata di abbondanti precipitazioni piovose ed innalzamento della falda si registrano invece valori di concentrazione intermedi a quelli sopra descritti ma per lunghi periodi di tempo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Perizia stratigrafica C.T.U., Procedimento penale 78/03 R.G. (Tribunale di Padova sezione distaccata di Cittadella, Padova 2005).
- DLgs.152. (2006). *Norme in materia ambientale - Allegati*.
- Antonelli R. Dal Prà A. (1980). *Carta dei deflussi freatici dell'alta pianura veneta con note illustrative*. Roma: Ist. Ric. sulle acque.
- ARPA Veneto. (2004). *Relazione investigazione preliminare - Roggia Brotta*.
- ARPA Veneto. (2005). *Piano della caratterizzazione "Ex Galvanica PM"*. Dipartimento provinciale di Vicenza.
- ARPA Veneto. (2006). *Piano della caratterizzazione "Ex Galvanica PM" - risultati*.
- ATSDR. (2000). *Toxicological profile for chromium*. Atlanta, USA, Georgia: Department of Health and Human Services.
- C., Wayne; Dickinson, Robert E. (s.d.). *Storm Water Management Model, Version 4*. Athens, Georgia, USA: U.S. Environmental Protection Agency.
- CNR. (1988). *Stato dell'inquinamento e della vulnerabilità delle acque sotterranee del Bacino del Brenta*. Venezia: Regione del Veneto.
- Dal Prà M., De Rossi J. (2005). *Prove idrauliche nel pozzo della ditta Galvanica P.M. S.r.l. GEODELTA*.
- EPA. (2000). *In situ treatment of soil and groundwater contaminated with chromium. Technical resource guide*.
- <http://openi.nlm.nih.gov>. (s.d.). Tratto da An open access biomedical image search engine.

- M. Owor, R. G. Taylor, C. Tindimugaya, D. Mwesigwa. (2009). Rainfall intensity and groundwater. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*.
- Ramírez Jorge A. (-). *Infiltration Computations Example*. Tratto da <http://www.engr.colostate.edu/>.
- S.K. Mishra, V. P. (2003). In *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer Science & Business Media.
- Sottani A., A. V. (2015). *Relazione geologica e idrogeologica - RSI - Progetto di bonifica sito ex PM Galvanica in Comune di Tezze sul Brenta (VI) - Primo stralcio*. Sinergeo.
- Studio Tedesi. (2007). *Area ex industria Galvanica PM - Tezze sul Brenta (VI) Progetto preliminare di bonifica*.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. In *Geographical Review* (Vol. 38, p. 55-94).
- Weisstein, E. W. (s.d.). *Cross-Correlation Theorem*. Tratto da <http://mathworld.wolfram.com/Cross-CorrelationTheorem.html>.

## 9. APPENDICE

Di seguito viene riportato il listato (Matlab ver. 2013.a) delle funzioni utilizzate:

### analisi\_pozzi\_2.m

```
[num,txt,row]= xlsread('tezze_etra_1.xls', 1, 'A4:A2502');
data_tot=txt;%giorni totali

F=5;%numero di foglio da analizzare

[num,txt,row]= xlsread('tezze_etra_1.xls', F, 'A4:A1004');
data_pozzi=txt;%giorni di analisi

Cr6 = xlsread('tezze_etra_1.xls', F, 'B4:B1004');%Cr6 vettore dati analisi cromo
se il dato è mancante mettere -99
[n_Cr6_tot,n_Cr6,n_Cr_data]=si_stemazione_vettore(Cr6,data_tot,data_pozzi);%scrive
il vettore completo delle analisi del cromo
Cr6_all=n_Cr6_tot;

% Cr6 = xlsread('tezze_etra_1.xls', F, 'C4:C656');
% [n_Cr6_tot]=si_stemazione_vettore(Cr6,data_tot,data_pozzi);%scrive il vettore
completo delle analisi del Ni
% Ni_all=n_Cr6_tot;
%
Cr6 = xlsread('tezze_etra_1.xls', F, 'D4:D1004');
[n_Cr6_tot]=si_stemazione_vettore(Cr6,data_tot,data_pozzi);%scrive il vettore
completo delle analisi delle portate
portate_all=n_Cr6_tot;

[posi z,data_time,V_Cr6,der_Cr6]=calcolo_vettore_derivate_cr(Cr6_all,data_tot,n_Cr6
);

%%%%%%%%%%%%%% vettore totale portate %%%%%%%%%%%%%%%
L_portate_all=length(portate_all);

i=1;
for j=1:L_portate_all

    if portate_all(j,1)>=0

        portate_posi z(i,1)=j;
        i=i+1;
    end
end

z=0;
p=0;
for j=1:L_portate_all
```

```

    if portate_all(j, 1) >= 0
        p=p+1;
        if p<length(portate_posiz)
            for i=portate_posiz(p, 1):portate_posiz(p+1)
                portate_completo(j+z, 1)=portate_all(j, 1);
                z=z+1;
            end
        end
        z=0;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%conteggio periodi funzionamento portate%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
L_portate_completo=length(portate_completo);

i=1;
for j=2:L_portate_completo
    if portate_completo(j-1, 1) ~= portate_completo(j, 1) && portate_completo(j, 1)
        ~=0
            portate_inizio(i, 1)=j;
            portate_inizio_data(i, 1)=data_tot(j, 1); %date inizio pompaggio
            i=i+1;
        end
    end
end

i=1;
for j=1:L_portate_completo
    if j<L_portate_completo
        if portate_completo(j+1, 1) ~= portate_completo(j, 1) && portate_completo(j, 1)
            ~=0
                portate_fine(i, 1)=j;
                portate_fine_data(i, 1)=data_tot(j, 1); %date fine pompaggio
                i=i+1;
            end
        end
    end
end

for i=1:length(portate_fine)
    portate_dt(i, 1)=portate_fine(i, 1)-portate_inizio(i, 1)+1;
end

```

```

p=1;
som=0;
h=1;
for j =1: length(portate_fi ne)
    for i =0: (portate_dt(h, 1)-1)
        som=portate_compl eto(portate_i ni zi o(h, 1)+i , 1)+som;
        sum(p, 1)=som; %mc emunti
    end
    som=0;
    h=h+1;
    p=p+1;
end

for i =1: length(portate_fi ne)
    portate_medi a(i, 1)=sum(i, 1)/portate_dt(i, 1);
end

portate_max=max(portate_medi a);

for i =1: length(portate_fi ne)
    portate_perc(i, 1)=portate_medi a(i, 1)*100/portate_max;
end

di f=L_portate_compl eto-length(der_Cr6);
for i =1: di f-1
    portate_der_Cr6(i, 1)=n_Cr6(1, 1)/(di f-1);
end

portate_der_Cr6=[portate_der_Cr6; der_Cr6];

Cr6_tutti _gi orni (1, 1)=0;
som=0;
for j =1: L_portate_compl eto-1
    som=portate_der_Cr6(j, 1)+som;
    Cr6_tutti _gi orni (j +1, 1)=som;
end

for i =1: length(portate_fi ne)
    portate_Cr6_i ni zi o(i, 1)=Cr6_tutti _gi orni ((portate_i ni zi o(i, 1)), 1);
    portate_Cr6_fi ne(i, 1)=Cr6_tutti _gi orni ((portate_fi ne(i, 1)), 1);
    portate_Cr6_vari az_tot(i, 1)=portate_Cr6_fi ne(i, 1)-portate_Cr6_i ni zi o(i, 1);
end
mc_emunti =sum;
mc_emunti =mc_emunti .*24;
%%%%%%medi a vari az gg%%%%%%
p=1;
som=0;
h=1;
for j =1: length(portate_fi ne)
    for i =0: portate_dt(h, 1)-1
        som=portate_der_Cr6(portate_i ni zi o(h, 1)+i , 1)+som;
        sum(p, 1)=som;
    end
end

```

```

end
som=0;
h=h+1;
p=p+1;
end

for i =1: length(portate_fi ne)
    portate_medi a_var_gg(i , 1)=sum(i , 1)/portate_dt(i , 1);
end
%%%%%%media vari az % gg%%%%%%%%
for i =1: length(portate_fi ne)

portate_medi a_var_gg_perc(i , 1)=(portate_medi a_var_gg(i , 1)*100)/portate_Cr6_i ni zi o(
i , 1);
end
%%%%%%media vari az % tot%%%%%%%%
for i =1: length(portate_fi ne)
    portate_medi a_var_gg_tot(i , 1)=((portate_Cr6_i ni zi o(i , 1) -
portate_Cr6_fi ne(i , 1))*100)/(portate_Cr6_i ni zi o(i , 1));
end
portate_medi a_var_gg_tot=portate_medi a_var_gg_tot*-1;
%%%%%%%%estrazione vettori analisi portate%%%%%%%%
p=1;
for i =1: length(portate_fi ne)
    for j =portate_i ni zi o(i , 1): portate_fi ne(i , 1)
        portate_estr_vett(p , i )=Cr6_tutti _gi orni (j , 1);
        p=p+1;
    end
    p=1;
end
end

num_event=[1: 1: length(portate_fi ne)];
num_event_vert=num_event(:);

%%%%%%%%

```

## sistemazione\_vettore.m

```

functi on
[n_Cr6_tot, n_Cr6, n_Cr_data]=si stemazi one_vettore(Cr6, data_tot, data_pozzi )

L_data_pozzi =l ength(Cr6);
L_data_tot=l ength(data_tot);

%ci clo che riscrive il vettore dei valori del cromo escludendo i dati
%manca nti

```



```

j=1;
for i=1:L_data_pozzi
    if Cr6(i)~= -99
        n_Cr6(j,1)=Cr6(i);
        j=j+1;
    end
end

%ciclo che riscrive il vettore contenente i giorni in cui si hanno le
%analisi escludendo i giorni con il dato mancante
j=1;
for i=1:L_data_pozzi
    if Cr6(i)~= -99
        n_Cr_data(j,1)=data_pozzi(i,1);
        j=j+1;
    end
end

L_n_Cr_data=length(n_Cr_data);
for i=1:L_data_tot
    n_Cr6_tot(i,1)=-99;
end

%ciclo che scrive il vettore completo contenente i valori delle analisi solo nei
giorni in cui sono state effettuate
for j=1:L_n_Cr_data
    for i=1:L_data_tot
        TF = strcmp(n_Cr_data(j,1),data_tot(i,1));
        if TF==1
            n_Cr6_tot(i,1)=n_Cr6(j,1);
        end
    end
end
end

```

## calcolo\_vettore\_derivate\_cr.m

```

function
[posiz, data_time, V_Cr6, der_Cr6]=calcolo_vettore_derivate_cr(Cr6_all, data_tot, n_Cr6
)

L_Cr6_all=length(Cr6_all);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
i=0;
for j=1:L_Cr6_all
    if Cr6_all(j,1) == -99

```

```

i=i+1;
    Cr6_prova(j,1)=i;

    el se
i=0;
    end
end

i=1;
for j=1:(L_Cr6_all)
    if Cr6_all(j,1)>=0
        posiz(i,1)=j;
        i=i+1;
    end
end

posiz=posiz-1;

L_posiz=length(posiz);
i=1;
for j=1:L_posiz
    time(i,1)=Cr6_prova(posiz(j,1),1);
    i=i+1;

end

time=time+1;

i=1;
for j=1:L_posiz
    data_time(i,1)=data_tot((posiz(j,1)+1),1);
    i=i+1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcolo velocità%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dt=time;

L_Cr6=length(n_Cr6);
j=0;
for i=1:L_Cr6
    j=j+1;
    if j<L_Cr6
        dcr(j,1)=n_Cr6((i+1),1)-n_Cr6(i);
    end
end

for i=1:(length(dt)-1);
V_Cr6(i,1)=dcr(i,1)/dt(i+1,1);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% vettore derivate der_Cr6 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

p=1;
i =1;
sum=1;
for j =1: L_Cr6_all
    if (p+1)<=length(dt)
        for i =1: dt(p+1, 1)
            der_Cr6(sum, 1)=V_Cr6(p, 1);
            sum=sum+1;
        end
        p=p+1;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

## geostat\_2.m

```

clear all
clc

maxi =720;
GRID=(zeros(720, 570));
G2=203;
G3=27;
G4=333;
G5=94;
G6=2860;
G1=0;
G=[G2, G3, G4, G5, G6];
GRID(331, 162)=G5; GRID(499, 239)=G6; GRID(560, 228)=G4; GRID(557, 282)=G3; GRID(554, 338)=
G2; GRID(48, 35)=G1;
image(GRID);
for i =1: 570
    for j =1: 720

X6 = [i , j ; 230, maxi -490];
d6 = pdist(X6, 'euclidean');
X5 = [i , j ; 160, maxi -330];
d5 = pdist(X5, 'euclidean');
X4 = [i , j ; 220, maxi -550];
d4 = pdist(X4, 'euclidean');
X3 = [i , j ; 280, maxi -550];
d3 = pdist(X3, 'euclidean');
X2 = [i , j ; 330, maxi -550];
d2 = pdist(X2, 'euclidean');
X1 = [i , j ; 30, maxi -50];
d1 = pdist(X1, 'euclidean');
di stanze=[d6, d5, d4, d3, d2, d1]';
d=((di stanze).^(-1)).^2;

```

```

GRID(j,i) = ((G6*d(1,1) + G5*d(2,1) + G4*d(3,1) + G3*d(4,1) + G2*d(5,1) + G1*d(6,1)) / sum(d));
    end
end
figure(2);

surf(GRID);
shading interp
view(2);

set(gca, 'CLim', [min(G(:)), max(G(:))]);
colorbar;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

## analisi\_ETP.m

```

clear all
clc
%%evapotraspirazione potenziale%%
[num,txt,raw]= xlsread('analisi_ET.xlsx', 2, 'A2:A367');
data_tot=txt;
T = xlsread('analisi_ET.xlsx', 2, 'B2:B367');
R = xlsread('analisi_ET.xlsx', 2, 'C2:C367');
P = xlsread('analisi_ET.xlsx', 2, 'F2:F367');
T=T';
gg_mese = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];

%%calcolo temperature medie mensili%%
p = 1;
gg_i = 0;
gg_f = 31;
for i = 1:12
    T_m(p,1) = mean(T((1+gg_i):(gg_f)));
    gg_i = 1+gg_f;
    if p < 12
        gg_f = gg_f + gg_mese(p+1);
        p = p+1;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%calcolo indice termico I%%
I = sum((T_m./5).^1.514);
%%calcolo coefficiente a%%
a=0.016*I+0.5;
%%calcolo coefficiente bi%%
bi = [0.8 0.81 1.02 1.13 1.28 1.29 1.31 1.21 1.04 0.94 0.79
      0.75]'; % bi a latitudine 45°

```

```

%%%%%%%%calcolo ETpoi%%%%%%%%
ETpoi = 16.2.*bi.*((10.*T_m)./I).^a;

%%%%%%%%calcolo ETpog giornaliera%%%
for i=1:12
    ETpog(i,1)=ETpoi(i,1)/gg_mese(i);
end
p=1;
for i=1:12
    for j=1:gg_mese(i)
        ETpogi(p,1)=ETpog(i,1);
        p=p+1;
    end
end
end

```

## analisi\_infiltrazioni\_4.m

```

clear all
clc

fo = --;%infiltrazione massima mm/h
fc = --;%infiltrazione a regime mm/h
a = 2;%coeff. di decadimento
div=60;%parametro che divide l'ora

piogge_1 = xlsread('y.xlsx', 4, 'B25:B57697');%vettore piogge orarie 2008-2014
%piogge_1 = [40, 20, 7, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 15, 0];
cut = length(piogge_1);
piogge_1 = [piogge_1; 1; 0; 1];
%piogge_1 = piogge_1(:);

c=1;
for i=1:length(piogge_1)
    for j=1:div
        piogge(c,1)=piogge_1(i,1);
        c=c+1;
    end
end

p=1;
o=1;
for i=1:length(piogge)
    if piogge(i,1)>0
        posi_z_p(p,1)=i;
        p=p+1;
    else
        posi_z_o(o,1)=i;
        o=o+1;
    end
end
end

```

```

for i=1:(length(posi_z_p)-1)
    dif_p(i,1)=posi_z_p(i+1,1)-posi_z_p(i,1);
end

```

```

for i=1:(length(posi_z_o)-1)
    dif_o(i,1)=posi_z_o(i+1,1)-posi_z_o(i,1);
end

```

```

c=1;
for i=1:length(dif_p)
    if dif_p(i,1)>1
        posi_z_p_1(c,1)=i;
        c=c+1;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcolo A_o%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
c=1;
for i=1:length(dif_o)
    if dif_o(i,1)>1
        posi_z_o_1(c,1)=i;
        c=c+1;
    end
end

```

```

c=1;
for i=1:length(posi_z_o_1)
    n_posi_z_o_1(c,1)=posi_z_o_1(i,1);
    n_posi_z_o_1(c+1,1)=posi_z_o_1(i,1)+1;
    c=c+2;
end
o_1=ones(length(posi_z_o),1);
o_1=o_1(:);
posi_z_o_1=[1;n_posi_z_o_1];

```

```

c=1;
g=1;
for i=1:length(posi_z_o_1)
    if c<length(posi_z_o_1)
        a=posi_z_o_1(c,1);
        b=posi_z_o_1(c+1,1);
        A_o(g,1)=sum(o_1(a:b));
        c=c+2;
        g=g+1;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcolo A_p%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
c=1;
for i=1:length(dif_p)
    if dif_p(i,1)>1
        posi_z_p_1(c,1)=i;
        c=c+1;
    end
end

```

```

c=1;
for i =1: length(posi z_p_1)
    n_posi z_p_1(c, 1)=posi z_p_1(i , 1);
    n_posi z_p_1(c+1, 1)=posi z_p_1(i , 1)+1;
    c=c+2;
end
p_1=ones(length(posi z_p), 1);
p_1=p_1(:);
posi z_p_1= [1; n_posi z_p_1];

```

```

%%%%%%%%%%
p=1;
for i =1: length(pi ogge)
    if pi ogge(i , 1)>0
        C(p, 1)=1;
    else
        p=p+1;
    end
end

p=1;
for i =1: length(C)
    if i <length(C)
        if C(i , 1)~=C(i +1, 1)
            C_n(p, 1)=C(i , 1);
            p=p+1;
        end
    end
end

if C(length(C), 1)==0
    C_n=[C_n; 0];
else
    C_n=[C_n; 1];
end

C_n=C_n(1: (length(C_n)-2));

%%%%%%%%estraz valori i n i z i o f i n e%%%%%%%%
for i =1: length(posi z_p_1)
    p_pos(i , 1)=posi z_p(posi z_p_1(i , 1), 1);
end

for i =1: length(posi z_o_1)
    p_zer(i , 1)=posi z_o(posi z_o_1(i , 1), 1);
end

p_pos = p_pos(1: (length(p_pos)-1));
p_zer = p_zer(1: (length(p_zer)-1));

```

```

%%%%%%%%%%

a=2;
g=1;
h=1;
t=0;
ad=-0.01;
ff=fo;
fo_1=fo;

%%%%%%%%%%

for i=1:length(C_n)
    t = 0;

    if C_n(i,1)==1
        for tempo=p_pos(g,1):p_pos(g+1,1)

            inf(tempo,1) = (fc+(fo-fc)*exp(-a*(t)));
            if inf(tempo,1) <= pi ogge(tempo,1)
                inf_real(tempo,1) = inf(tempo,1);
            else
                inf_real(tempo,1) = pi ogge(tempo,1);
            end
            t = t+(1/div);
        end
        fi = inf(tempo,1);
        g = g+2;
    end

    t = 0;

    if C_n(i,1)==0

        t = (1/ad)*log((fi-ff)/(-ff+fc));

        %t = time(indice,1);

        for tempo = p_zer(h,1):p_zer(h+1,1)

            inf(tempo,1) = ff-(ff-fc)*exp(ad*t); %%funzione di recupero

            %disp(inf(tempo,1));

            t = t+(1/div);

        end
        h = h+2;
        fo = inf(tempo,1);
    end
end

```



```

end

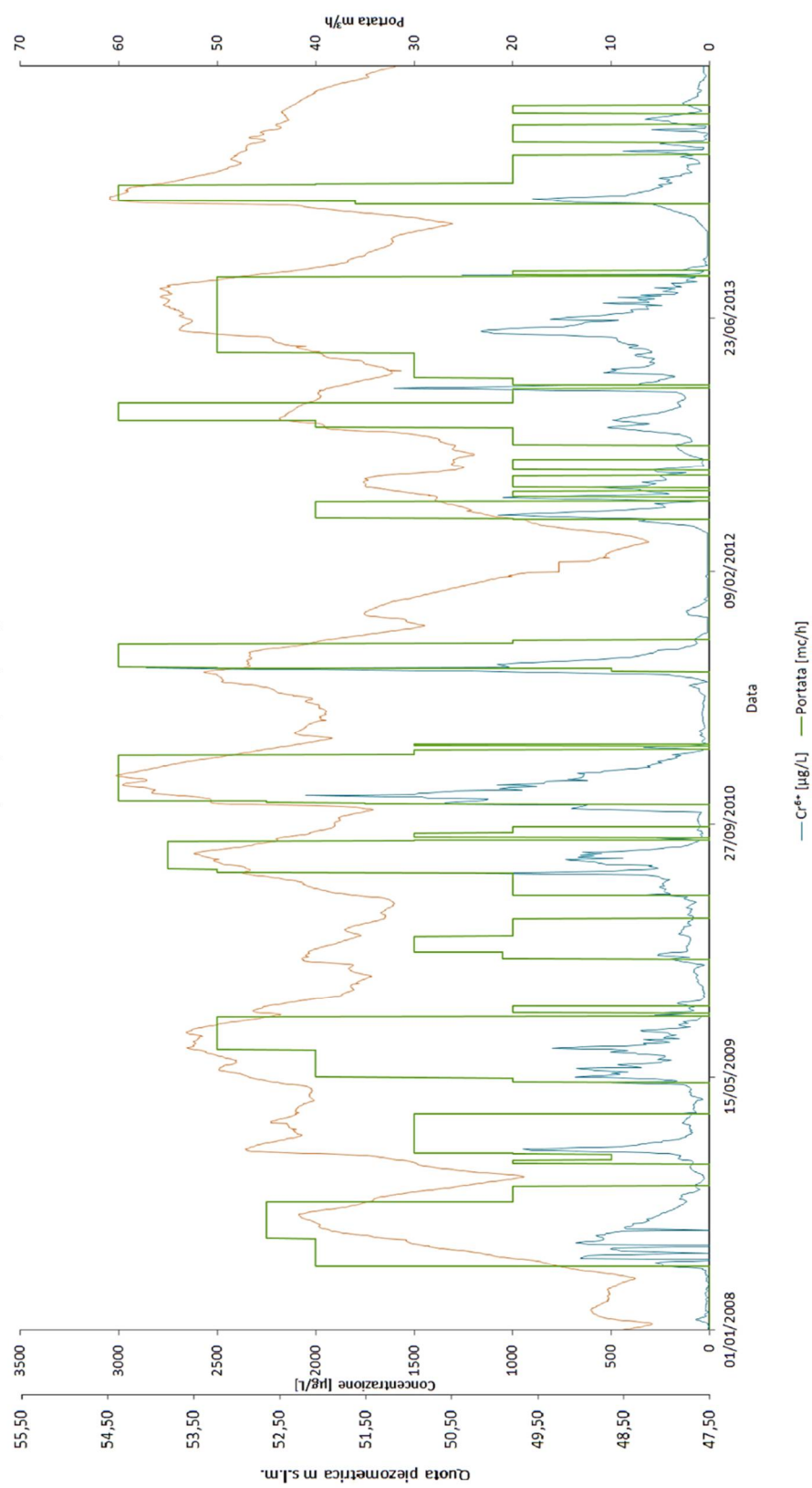
pi_ogge = pi_ogge(1: cut*di_v);
i_nf = i_nf(1: cut*di_v);
i_nf_real = i_nf_real(1: cut*di_v);
tempo = [1: 1: length(pi_ogge)];

figure(3);
plot(tempo, pi_ogge, tempo, i_nf);
xlim([0, max(tempo)]);
%%%%%%%%%calcolo pioggia infiltrata%%%%%%%%%
giorni=length(pi_ogge)/(24*di_v);

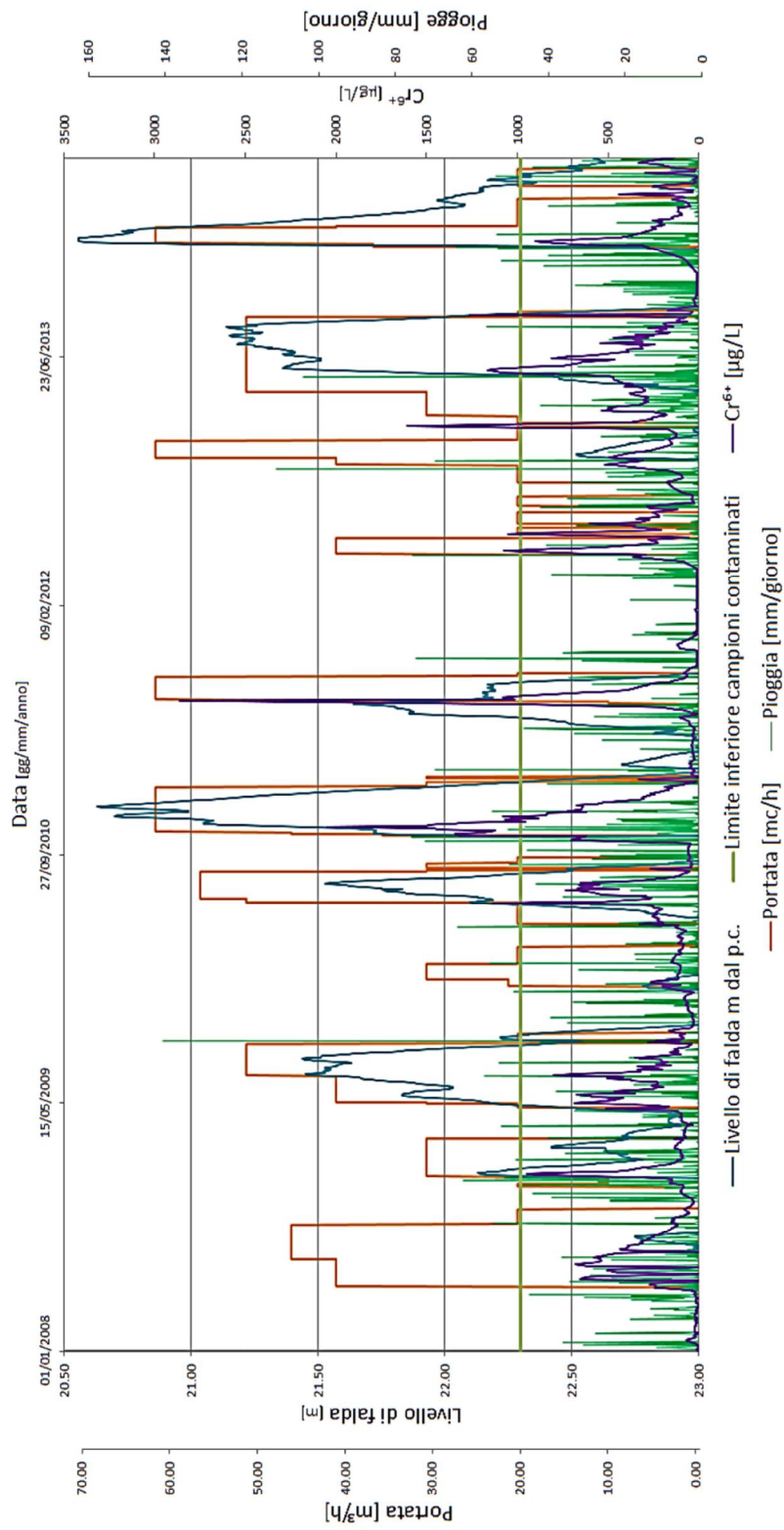
ini_z=1;
fin=di_v*24;
for j=1:giorni
    matr=(i_nf_real(ini_z: fin))/di_v;
    infiltrazione(j, 1)=trapz(matr);
    ini_z=fin;
    fin=fin+(di_v*24);
end

```

Pozzo G6  
 Andamento quota piezometrica, portata e concentrazioni Cr<sup>6+</sup>  
 Anni: 2008; 2009; 2010; 2011; 2013; 2014



**Andamenti:**  
**Livello di falda in G1, piogge giornaliere, portate di emungimento, concentrazioni Cr(VI) in G6**  
**Dal 01/01/2008 al 31/07/2014**





## RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto la mia famiglia. I miei genitori Irma e Antonio per il sostegno e il grande aiuto che mi hanno dato in questi anni di studio.

Mia sorella Naomi per essermi stata vicino con i suoi consigli e insegnamenti.

Mia nonna Maria per l'entusiasmo e l'incoraggiamento che mi da ogni giorno. I miei nonni Giuseppe, Gino, Livia che mi seguono da lassù e che saranno sicuramente orgogliosi per questo mio traguardo.

I miei amici con i quali sono cresciuto e sulla loro amicizia posso sempre contare.

I compagni di corso, con i quali ho condiviso gli anni di università, e gli amici pendolari che viaggiando con me in treno mi hanno fatto compagnia durante il tragitto.

La Sinergeo per avermi aiutato nel percorso di stesura della tesi in particolare Dott. Pierluigi Bullo e la Dott.ssa Valentina Accoto per la loro disponibilità e competenza in questi mesi di stage.

Il Prof. Leonardo Mason per avermi trasmesso durante le sue lezioni la passione per il suo lavoro.