



Università degli Studi di Cagliari

## **DOTTORATO DI RICERCA**

in Scienze e tecnologie della Terra e dell'ambiente

Ciclo XXIX

### **TITOLO TESI**

"Applicazione di modelli geologici e idrogeologici 3D per la valutazione delle risorse idriche sotterranee dell'acquifero alluvionale della Piana del Cixerri (Sardegna Sud Ovest)".

Settore scientifico disciplinare di afferenza

GEO/05

Presentata da:	Dott.ssa Patrizia Fenza
Coordinatore Dottorato	Prof. Aldo Muntoni
Tutor	Prof. Giorgio Ghiglieri
CoTutor	Dott.ssa Stefania Da Pelo Dott.ssa Cristina Buttau

Esame finale anno accademico 2015 – 2016  
Tesi discussa nella sessione d'esame marzo – aprile 2017

# Indice

Indice .....	2
Introduzione.....	5
Modelli 3D geologici: stato dell'arte .....	7
Obiettivo della ricerca .....	10
Inquinamento delle acque sotterranee da nitrati .....	11
• Ciclo dell'azoto .....	13
• Normativa di riferimento .....	17
1 Area di studio .....	22
1.1 Inquadramento geografico.....	22
1.2 Inquadramento geologico .....	23
• Il basamento paleozoico.....	23
• Successione Vulcano-Sedimentaria Terziaria.....	26
• Depositi alluvionali Pleistocenici e quaternari .....	28
1.3 Inquadramento tettonico.....	29
• Rapporti tra tettonica e sedimentazione.....	30
1.4 L'acquifero alluvionale quaternario della piana del Cixerri.....	32
2 Approccio metodologico .....	35
2.1 Sviluppo del modello geologico e idrogeologico .....	37
2.1.1 Acquisizione e trattamento dei dati bibliografici .....	37
• Realizzazione del Database.....	38
• Interpretazione SEV.....	40
2.1.2 Creazione modello geologico 3D .....	44
• Metodi geostatistici per la creazione di superfici 3D.....	47
• Limiti del metodo di interpolazione con il metodo Delanuay triangulation...48	
2.1.3 Acquisizione e trattamento dei dati idrogeologici.....	51

2.1.3.1	Campagna piezometrica: acquisizione, elaborazione e trattamento dati ...	51
2.1.3.2	Acquisizione dati di permeabilità, in laboratorio e in situ .....	57
	• Analisi granulometriche: acquisizione, elaborazione e trattamento dati .....	57
	• Prove di infiltrazione: acquisizione, elaborazione e trattamento dati .....	67
2.1.4	Stima del bilancio idrogeologico e potenzialità degli acquiferi .....	70
2.1.5	Campagna idrogeochimica: acquisizione, elaborazione e trattamento dati.....	74
	• Analisi statistiche: Analisi delle componenti principali (PCA).....	78
3	Risultati.....	80
3.1	Modello geologico e idrogeologico 3D .....	81
3.1.1	Dati di input .....	81
	• Log stratigrafici pozzi .....	81
	• SEV .....	81
3.1.2	Modello geologico 3D .....	83
3.1.3	Dati idrogeologici .....	86
3.1.3.1	Campagne piezometriche.....	86
	• Censimento Centri di pericolo (CDP).....	94
3.1.4	Caratterizzazione dei sedimenti.....	96
	• Analisi granulometriche.....	96
	• Prove di infiltrazione .....	100
3.1.5	Stima del bilancio idrogeologico e potenzialità dell'acquifero.....	101
3.1.6	Campagna idrogeochimica .....	107
	• Analisi statistiche: Analisi delle componenti principali (PCA).....	121
4	Discussioni .....	123
5	Conclusioni.....	125
6	Bibliografia.....	127
	Ringraziamenti .....	135
	Appendice 1.....	136

Appendice 2.....	150
Appendice 3.....	155
Appendice 4.....	161
Appendice 5.....	164

## **Introduzione**

La risorsa idrica sotterranea rappresenta un'essenziale fonte alternativa al fabbisogno idrico per il consumo umano e per l'agricoltura, soprattutto in questi ultimi decenni in cui a causa dei cambiamenti climatici si assiste a periodi di siccità estrema e intense alluvioni. La corretta gestione delle risorse idriche, volta a preservarne le caratteristiche quantitative e qualitative della stessa, ricopre una funzione cardine nelle attività di mitigazione e contrasto dei processi di desertificazione (Ghiglieri et al., 2006).

L'eccessivo sfruttamento della risorsa e l'aumento delle pressioni antropiche, spesso effettuati senza un'attenta pianificazione, hanno tuttavia provocato un grave deterioramento quantitativo e qualitativo delle risorse idriche sotterranee, soprattutto nelle pianure alluvionali, dove gli acquiferi superficiali presentano spesso una bassa soggiacenza e dove c'è un'elevata densità della popolazione (Cox et al., 1996; Grassi et al., 2007). Per invertire questo trend e per limitare il depauperamento della Risorsa Idrica Sotterranea, la Comunità Europea negli ultimi decenni ha effettuato un intenso lavoro legislativo. Sono state emanate due importanti direttive, la 91/676/CEE e la 2006/118/CE, rispettivamente per la protezione delle acque da nitrati di origine agricola, e per la protezione delle acque sotterranee da contaminanti e deterioramento della risorsa, recepite in Italia rispettivamente con il D.Lgs 152/99 e il D.Lgs 30/2009. Per proteggere le acque sotterranee da fonti di contaminazione è necessario attuare una corretta e sostenibile gestione della risorsa idrica sotterranea, e per far ciò è necessario avere una conoscenza globale del sistema acquifero: caratteristiche geologiche, geometria delle formazioni sede dell'acquifero, proprietà idrogeologiche e geochemiche.

Proprio in questa direzione sono state sviluppate nuove metodologie basate sulla modellistica geologica tridimensionale e su un approccio multidisciplinare.

La creazione di modelli geologici 3D ha modificato le prospettive anche in campo idrogeologico; infatti contestualmente allo sviluppo di modelli geologici 3D in molti campi geologici s.s. e geoingegneristici, si sono sviluppate numerose applicazioni della modellistica geologica tridimensionale in campo idrogeologico (Ross et al. 2005; Jiménez-Martínez et al., 2012; Zhu et al. 2012; Cox et al. 2013; Di Maio et al. 2013). Si tratta di modelli in cui i dati geologici sono stati integrati con dati idrogeologici, idrogeochimici e geofisici (Da Pelo et al., 2015, 2016, Ghiglieri et al. 2016) al fine di stabilire le relazioni spaziali tra i principali acquiferi e i fattori che influenzano l'evoluzione delle acque. L'applicazione di tecniche statistiche multivariate consente inoltre di identificare le facies idrochimiche distintive dei

diversi percorsi evolutivi delle acque determinate dalla loro interazione con uno o più acquiferi (Raiber et al., 2012).

Questi modelli, di più semplice lettura rispetto alle più tradizionali tecniche di visualizzazione 2D, rappresentano un efficace strumento di dialogo tra specialisti geologi e idrogeologi e gestori, amministratori e fruitori della Risorsa Idrica Sotterranea, non necessariamente esperti in materia.

Pertanto, obiettivo principale di questo studio è stato applicare una metodologia innovativa per sviluppare un modello geologico e idrogeologico tridimensionale, integrando informazioni idrogeologiche e geochemiche, al fine di ricostruire la geometria dell'acquifero e il campo di moto dell'acqua.

La metodologia sviluppata è stata applicata all'acquifero freatico delle alluvioni quaternarie della Piana del Cixerri, nella Sardegna sud occidentale.

Questo acquifero è caratterizzato da un'elevata vulnerabilità intrinseca dovuta principalmente alla sua bassa soggiacenza e alla sua attitudine a contenere e diffondere inquinanti derivanti da attività antropiche (agricoltura, aziende zootecniche e urbanizzato diffuso).

La determinazione del volume dell'acquifero insieme ai parametri di porosità totale ed efficace, acquisiti *ex novo* attraverso misure in situ e in laboratorio, ha consentito di effettuare una stima della capacità di immagazzinamento dell'acquifero.

Il modello idrogeologico tridimensionale realizzato, sarà la base di un futuro modello numerico di flusso e trasporto, strumento fondamentale per valutare la dispersione dei contaminanti nelle acque sotterranee (Anderson et al., 2015; Zheng et al., 2002), non oggetto specifico di questo lavoro.

## **Modelli 3D geologici: stato dell'arte**

La comprensione delle strutture profonde, i rapporti spaziali tra le varie unità stratigrafiche e tettoniche in tre dimensioni sono obiettivi primari per un geologo. Pertanto l'utilizzo di tecniche di modellazione geologica 3D sono attualmente lo strumento più utilizzato nei campi di ricerca geingegneristico e geologico (Jones, 1988; Hack et al., 2006; Turner, 2006; De Rienzo et al., 2008; Royse et al., 2009), in quanto consentono una rappresentazione più esaustiva e coerente della realtà.

Il recente sviluppo di software per la visualizzazione 3D (Lynx, 3D GeoModeller, GOcad, Earth Vision, 3D MOVE, etc) e l'aumento delle prestazioni computazionali degli hardware hanno facilitato la diffusione dell'applicazione dei modelli geologici 3D per la visualizzazione e l'analisi di situazioni geologiche complesse (Raiber et al., 2012).

Negli ultimi decenni sono state sviluppate e testate diverse metodologie per la realizzazione di modelli geologici 3D (Lemon & Jones, 2003; Smirnoff et al., 2008; Tremblay et al., 2010). I campi di applicazione della modellazione tridimensionale sono molteplici, dalla geologia strutturale (Borraccini et al., 2004; Cocco, 2014), alla ricerca di idrocarburi (Perrin et al., 2005; Chilès et al., 2004), al campo minerario (Kaufmann & Martin, 2008) e al campo idrogeologico (Ross et al. 2005; Wu et al., 2005; Wycisk et al., 2009; Jiménez-Martínez et al., 2012; Zhu et al. 2012; Cox et al. 2013; Di Maio et al., 2014; Da Pelo et al., 2015, 2016; Fenza et al., 2016a; Ghiglieri et al. 2016). Tutte le metodologie si basano sulla realizzazione dei modelli tridimensionali mediante l'utilizzo di dati e software specifici per la modellizzazione geologica tridimensionale. I dati utilizzati nella modellizzazione geologica provengono dal rilevamento geologico di superficie da perforazioni geognostiche e log stratigrafici e geofisici. Il processo di realizzazione dei modelli 3D è schematizzato in Figura 1. La fase iniziale prevede la raccolta dei dati, la validazione, la standardizzazione e la catalogazione degli stessi (Kaufmann & Martin, 2008; Raiber et al., 2012; Chesnaux et al., 2011).

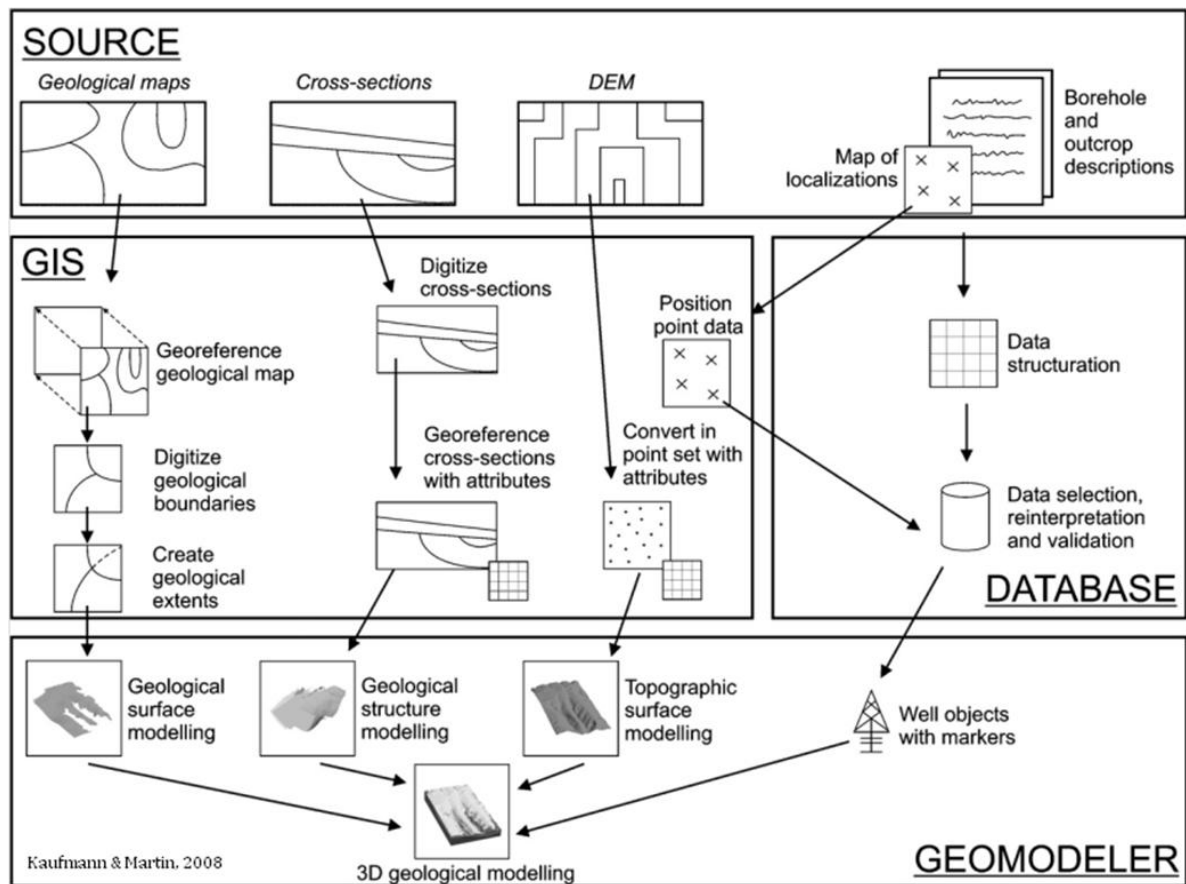


Figura 1 - Schema fasi realizzazione modello geologico da Kaufmann & Martin (2008)

Il processo di omogeneizzazione e standardizzazione dei dati risulta la fase più delicata (Ross, 2005) a causa della variabilità del dettaglio dei dati disponibili. Tale processo prevede l'utilizzo di un codice litostratigrafico (es. quello della carta geologica) che facilita la correlazione di dati stratigrafici, altamente dettagliati, con quelli che hanno una descrizione molto povera. Questa fase riguarda i dati geologici di superficie (carte geologiche) e i dati geologici di profondità (log stratigrafici). Pertanto i log vengono riclassificati utilizzando un codice litostratigrafico. (Ross, 2005). Questo è un passaggio fondamentale nella realizzazione di modelli idrogeologici 3D, nei quali le litologie sono ulteriormente classificate con un codice standard scelto a fini idrogeologici; per cui le litologie aventi caratteristiche idrogeologiche simili vengono accorpate e classificate con un univoco codice standard (Ross et al., 2005; Chesnaux et al., 2011; Di Maio et al., 2014; Da Pelo et al., 2015; 2016).

La fase intermedia prevede la realizzazione di sezioni geologiche e dove è possibile, il bilanciamento delle stesse. L'interpolazione degli orizzonti rappresentati nelle sezioni verranno utilizzati per la realizzazione delle superfici che verranno utilizzate per ricostruire i volumi dei corpi che si vogliono ricostruire. La fase finale è il controllo della correttezza e attendibilità del modello, ossia prima di tutto il modello deve essere geometricamente



corretto. A seconda della finalità del modello è previsto l'incremento dello stesso con dati di varia natura.

Negli ultimi anni si stanno sviluppando applicazioni della modellazione tridimensionale in campo idrogeologico mirate alla valutazione del flusso idrico sotterraneo e della contaminazione da nitrati in aree particolarmente soggette a pressioni antropiche (Raiber et al., 2012; Da Pelo et al., 2015; 2016; Ghiglieri et al. 2016). In questi lavori si propone una nuova metodologia in cui il modello geologico tridimensionale viene arricchito con dati idrogeologici e idrogeochimici. Questo approccio innovativo permette di raggiungere nuovi risultati in merito alle condizioni al contorno degli acquiferi strategici, inoltre fornisce una indispensabile conoscenza di base per comprendere e monitorare le dinamiche di trasporto degli inquinanti nelle acque sotterranee per una migliore gestione delle risorse idriche (Da Pelo et al., 2015).

Nonostante i software di modellazione 3D consentano di realizzare facilmente la modellazione di corpi geologici anche complessi utilizzando carte geologiche, log stratigrafici e informazioni strutturali, costruire un modello geologico corretto è ancora una sfida (Kaufmann & Martin, 2008).

In accordo con la letteratura internazionale, uno dei principali problemi nella realizzazione di un buon modello tridimensionale è la distribuzione spaziale delle informazioni stratigrafiche, dovute principalmente alle lacune presenti nei log stratigrafici dei pozzi e dei sondaggi che possono portare alla realizzazione di un modello geologico 3D poco accurato (Ghiglieri et al. 2016).

## **Obiettivo della ricerca**

L'obiettivo della ricerca è lo sviluppo di una metodologia per l'analisi quantitativa e qualitativa delle caratteristiche idrogeologiche di un acquifero alluvionale, inoltre si cercherà di definire il flusso principale delle acque sotterranee, al fine di prevedere la diffusione della contaminazione da nitrato negli acquiferi.

L'area di studio per l'applicazione della metodologia è ubicata nella valle del Cixerri, nella Sardegna sud occidentale. Il sito è stato scelto perchè si tratta di un'area non complessa dal punto di vista geologico in cui affiorano depositi di età quaternaria che ospitano un acquifero non confinato con un'elevata vulnerabilità intrinseca. Infatti, nell'area, sono state individuate delle zone potenzialmente vulnerabili da nitrati di origine organica.

I risultati della ricerca potranno essere di supporto agli enti di gestione e controllo delle risorse idriche per la loro corretta gestione e permetterà di individuare possibili azioni di mitigazione della contaminazione da nitrati nelle acque sotterranee e superficiali.

La metodologia proposta è basata sulla modellazione geologica e idrogeologica tridimensionale, realizzata utilizzando dati geologico stratigrafici e geofisici esistenti, implementati con un set di dati idrogeologici e idrogeochimici acquisiti ex-novo, al fine di verificare la dinamica di trasporto dei contaminanti azotati all'interno dell'acquifero.

Lo studio può essere riassunto in tre fasi.

La prima fase ha previsto l'acquisizione e la elaborazione dei dati geologici e geofisici necessari per la costruzione del modello geologico tridimensionale

La seconda fase ha previsto la realizzazione di un rilievo piezometrico in tre differenti periodi; una campagna idrogeochimica; l'acquisizione, in laboratorio e in situ, dei valori di permeabilità idraulica, porosità e porosità efficace. Sempre durante questo periodo è stato fatto il calcolo del bilancio idrogeologico dell'acquifero.

Nella terza fase i dati acquisiti e elaborati sono stati inseriti nel modello idrogeologico concettuale che ha garantito una visione globale dell'acquifero al fine di valutarne il suo stato quantitativo e qualitativo. Alla fine si è ricostruita la geometria dell'acquifero e le caratteristiche idrogeologiche e idrogeochimiche dello stesso, al fine di poter stimare la contaminazione da nitrato e la sua mobilità all'interno dell'acquifero.

## **Inquinamento delle acque sotterranee da nitrati**

L'aumento delle pressioni sull'ambiente e il conseguente impatto sulle risorse idriche ha sviluppato nella comunità una maggiore coscienza sulla tutela quantitativa e qualitativa della risorsa idrica.

Per inquinamento delle acque sotterranee si intende la presenza di sostanze estranee tali da causare un degrado chimico e/o fisico della qualità di base delle acque stesse, non necessariamente tale da arrecare danno alla salute. L'inquinamento da fonti naturali è causato da sostanze che provengono da processi dinamici e/o idrogeochimici non indotti direttamente dall'opera dell'uomo. L'inquinamento antropico delle acque in generale e di quelle sotterranee in particolare, è legato a fonti puntuali, detti centri di pericolo (CDP), quali insediamenti urbani e industriali, e a fonti diffuse (FDP) connesse con l'agricoltura e la zootecnia (Civita, 2005).

I CDP e le FDP sono i seguenti:

- insediamenti industriali, assimilabili e connessi;
- discariche di rifiuti e assimilabili;
- attività minerarie ed estrattive;
- insediamenti urbani, assimilabili e connessi;
- vie di comunicazione e infrastrutture di collegamento;
- attività agricole;
- attività zootecniche;
- attività diverse che impegnano i sistemi acquiferi. (Civita, 2005).

Una delle fonti principali d'inquinamento delle acque sotterranee è la contaminazione da composti azotati e nello specifico da nitrati. Il suo impatto nocivo sulla salute umana e la sua ampia diffusione nelle acque di falda, ha indotto molti Paesi ad imporre dei valori limite di concentrazione variabili a seconda degli usi, ma molto rigorosi per le acque destinate al consumo umano.

L'organizzazione mondiale della sanità ha stabilito per il nitrato nelle acque sotterranee il valore soglia di 50 mg/L (WHO, 2003). Tuttavia le concentrazioni di nitrato nelle acque sotterranee in Europa comunemente eccedono il livello raccomandato in almeno il 22% delle aree coltivate (Sacco & Offi, 2007). Studi recenti mostrano una parziale riduzione della contaminazione di azoto, questo a seguito delle politiche ambientali della comunità europea volte alla diminuzione delle emissioni azotate in agricoltura e in particolar modo a seguito della

attuazione della direttiva nitrati. Velthof et al. (2014) hanno verificato che in Europa nel periodo 2000-2008 la lisciviazione dei nitrati è diminuita del 16%.

Simili concentrazioni si riscontrano anche nelle aree arabili degli USA (Canter, 1996). Studi recenti (Nolan & Hitt, 2006) dimostrano che il 78% delle aree coltivate e il 4% delle aree urbane presentano nelle acque sotterranee (sia superficiali che profonde) una contaminazione da nitrato superiore a 5 mg/L. Inoltre Nolan & Hitt (2006) dimostrano che negli acquiferi superficiali tale valore di contaminazione è maggiore del 12% rispetto ad acquiferi aventi una profondità compresa tra i 10 e i 50m.

La contaminazione da nitrato nelle acque sotterranee proviene da fonti antropiche quali l'eccessivo utilizzo di fertilizzanti o di letame in agricoltura, le pratiche di smaltimento dei rifiuti associati con l'applicazione sul terreno di fanghi o effluenti di acque reflue, le discariche comunali o industriali, le fosse settiche dell'abitato rurale sparso (Canter, 1996).

Le differenze tra la concentrazione di azoto nelle acque sotterranee in acquiferi sottesi ad aree agricole e urbane sono minime, e in alcuni casi la concentrazione di azoto è superiore nelle aree urbane. L'alta concentrazione di azoto è dovuta al numero di potenziali sorgenti di contaminazione, all'elevata densità e alla natura delle stesse (es. percolato di discarica o di acque reflue) (Wakida & Lerner, 2005).

Importante per ridurre la concentrazione da nitrato nelle acque sotterranee è poter distinguere quali sono le sorgenti di contaminazione delle stesse, al fine di contenerle e eliminarle. Una metodologia ampiamente usata nell'ultimo decennio è la misura degli isotopi del nitrato ( $N^{15}$  e  $O^{18}$ ), nota come metodo denitricatore. Questo metodo è stato ampiamente utilizzato per risalire alle sorgenti di contaminazione da nitrati nelle acque sotterranee e ai meccanismi di denitrificazione (Hosono et al., 2013). Tuttavia, un inconveniente degli studi con traccianti sono alcune sovrapposizioni delle composizioni isotopiche delle diverse fonti di contaminazione e i trend di denitrificazione. Esistono, infatti, enormi difficoltà a distinguere la contaminazione dovuta al letame utilizzato in agricoltura da quella dei reflui urbani in quanto presentano firme isotopiche simili (Xue et al., 2009; Fenech et al., 2012; Minet et al., 2012).

Negli ultimi anni è stato testato un metodo basato sull'utilizzo come tracciante del dolcificante artificiale Acesulfame (ACE), prodotto ampiamente usato nell'industria alimentare, che permane inalterato ai trattamenti depurativi, e che pertanto è un buon indicatore della contaminazione da nitrato proveniente da fosse settiche. (Robertson et al., 2016).

La preoccupazione circa la potenziale contaminazione delle acque a causa dell'aumento delle pressioni umane sull'ambiente ha portato allo sviluppo di un'ampia produzione legislativa

Comunitaria e Nazionale, con lo scopo di impedire o almeno di mitigare l'introduzione da parte dell'uomo di sostanze inquinanti nelle acque reflue e sotterranee.

La conoscenza dei processi di contaminazione da nitrato e dei processi mirati all'attenuazione naturale della stessa e alla riduzione del rischio, è fondamentale per l'attuazione di tali direttive.

- **Ciclo dell'azoto**

L'azoto può esistere nell'ambiente in varie forme. Il movimento e la trasformazione dei composti azotati nella biosfera può essere descritto con il ciclo dell'Azoto. L'atmosfera è utilizzata come riserva di azoto sotto forma di gas (il 79% dell'atmosfera è costituito da Azoto) (Canter, 1996).

L'azoto atmosferico è tuttavia non direttamente utilizzabile, deve essere combinato con idrogeno o ossigeno, prima di poter essere assimilato dalla maggior parte degli organismi viventi. La trasformazione dei componenti di azoto all'interno della biosfera si verifica attraverso diversi meccanismi, quali la fissazione, ammonificazione, sintesi, nitrificazione e denitrificazione, che costituiscono il ciclo dell'azoto (Figura 2)

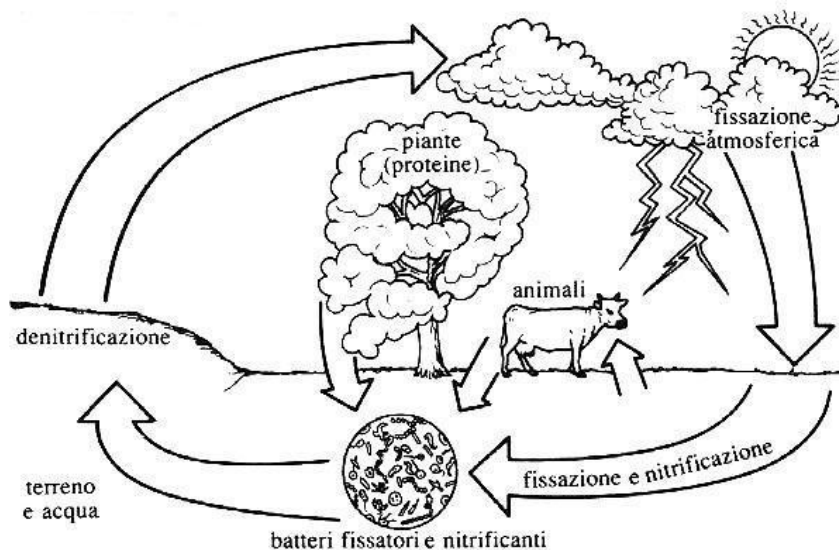
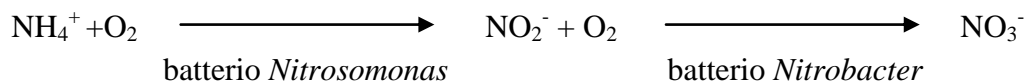


Figura 2 - Ciclo dell'Azoto

La fissazione, ossia la conversione da  $N_2$  gas ad azoto organico (nitrati, ammonio e composti organici dell'azoto). La fissazione avviene ad opera di numerosi batteri appartenenti principalmente ai generi *Clostridium* (anaerobici) ed *Azotobacter* (aerobici), che vivono nel suolo, oppure ad opera di batteri fissatori del genere *Rhizobium*, viventi in simbiosi con alcune specie di piante, a cui sottraggono diversi composti organici e sali minerali, cedendogli in cambio composti azotati. Oltre alla fissazione organica, esiste la fissazione atmosferica. In

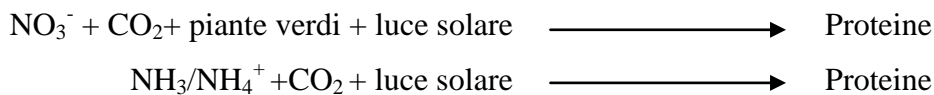
questo caso la fissazione avviene per mezzo di fenomeni atmosferici, come fulmini e scariche elettriche, che ossidano l'azoto gassoso formando ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), che una volta trasformati in acido nitrico (HNO<sub>3</sub>) ritornano sul terreno grazie alle precipitazioni atmosferiche.

L'ammoniaca, liberata nel suolo durante il processo di fissazione, subisce un processo di nitrificazione ossia avviene l'ossidazione dello ione ammonio da parte di batteri. Questo processo si verifica in due passaggi successivi, con il primo si ottiene il nitrito e con il secondo il nitrato.



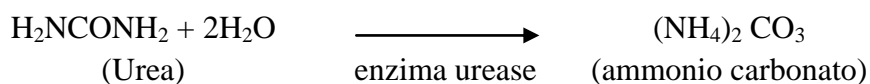
Entrambe le reazioni, che in natura avverrebbero molto lentamente, sono velocizzate grazie all'attività batterica; la prima avviene ad opera di batteri nitrosi (Nitrosomonas), che ossidano l'ammoniaca in nitrito, mentre la seconda, si verifica ad opera di batteri nitrici (Nitrobacter) che ossidano il nitrito a nitrato.

I nitrati rilasciati nel terreno vengono trasformati mediante un processo di sintesi. Per Sintesi o assimilazione, si intendono una serie di processi biochimici in cui l'ammonio o il nitrato sono utilizzati per la formazione di proteine per gli esseri viventi:

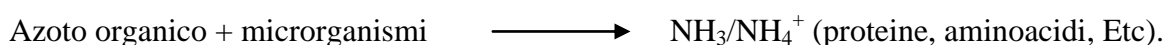


Gli animali acquisiscono le proteine o direttamente dalle piante, se erbivori, o da altri animali, se carnivori. L'azoto in questo modo viene assimilato dagli organismi viventi che poi lo restituiscono al terreno sotto forma di sali ammonio.

Il processo di trasformazione dell'azoto organico, creatosi durante il processo di fissazione, in forma ammonio è noto come ammonificazione. Importante reazione di idrolisi che coinvolge l'urea, un componente azotato che si trova nelle urine.

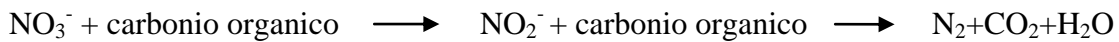


Si verifica, in linea generale, durante la decomposizione di animali o resti di piante o deiezioni animali può essere espressa come segue:



La fase finale del ciclo dell'azoto è la denitrificazione, processo di riduzione biologica del nitrato in azoto gassoso ad opera di microorganismi (Bacillus, Pseudomonas ed altri batteri) che passano dalla respirazione aerobica alla respirazione dei nitrati, soprattutto nel caso di

suoli scarsamente aerati. Questo processo avviene soltanto in presenza di una grande sorgente di carbonio organico, che serve da energia.



In alternativa alle specie batteriche chemiorganotrofe, che utilizzano come substrato carbonioso composti organici, è possibile utilizzare biomasse autotrofe che sfruttano carbonio inorganico come fonte per la sintesi del materiale cellulare, processo conosciuto come denitrificazione autotrofa. Le più comuni biomasse autotrofe sono: *Thiobacillus denitrificans* e *Thiomicrospira denitrificans*.

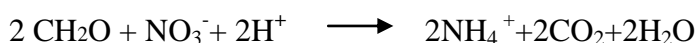
Nella denitrificazione autotrofa i batteri utilizzano, a seconda delle loro caratteristiche, come fonte di energia Ferro, Idrogeno o composti dello Zolfo, e come fonte di carbonio CO<sub>2</sub> o bicarbonato (Karanasios et al., 2010). Vista l'abbondante presenza di CO<sub>2</sub> e bicarbonato nelle acque di falda non vi è la necessità di un'aggiunta di substrato dall'esterno. La denitrificazione autotrofa, dunque, ha il vantaggio di non necessitare di una fonte organica di carbonio, riducendo fino a quasi annullare il rischio di un rilascio di inquinante organico nell'effluente trattato.

Altri processi per la riduzione del nitrato e dell'ammoniaca in azoto gassoso sono l'Anammox e la riduzione dissimilativa in NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (DNRA).

L'ossidazione anaerobica dell'ammoniaca (ANAMMOX, Anaerobic Ammonium Oxidation) è un processo biologico avanzato tramite il quale l'ammoniaca viene convertita in azoto gas in condizioni anaerobiche, utilizzando il nitrito come accettore di elettroni.

L'ossidazione anaerobica dell'ammoniaca ad azoto gas avviene ad opera di batteri autotrofi (*Candidatus Brocadia*, *Candidatus Kuenenia* e *Candidatus Scalindua*) che usano il bicarbonato come fonte di carbonio. Il processo quindi si verifica senza l'aggiunta di carbonio organico esterno, permettendo di accorciare il normale ciclo dell'azoto.

La riduzione dissimilativa dei nitrati a ione ammonio (DNRA) avviene per mezzo di batteri anaerobi facoltativi in presenza di un substrato organico (CH<sub>2</sub>O), secondo la reazione di seguito riportata. Questa reazione, competitiva rispetto alla denitrificazione, risulta favorita quando il nitrato è un fattore limitante (Gibert et al., 2008).



Il ciclo naturale dell'azoto è stato modificato con la scoperta e l'utilizzo sempre maggiore di fertilizzanti azotati sintetici in agricoltura, L'uso di fertilizzanti in agricoltura è aumentato in maniera esponenziale a scala globale con gravi conseguenze per le acque superficiali e

sotterranee. L'aumento di azoto (N) nelle acque superficiali e sotterranee è legato prevalentemente a fonti antropiche, quali attività agricole e industriali e rifiuti fognari.

Una volta che letame o urea sintetica sono distribuiti, diversi processi fisici e biologici regolano il destino dell'ammoniaca idrolizzata. L'ammoniaca può essere assorbita da particelle di terreno, essere assimilata dalle colture, volatilizzata nell'atmosfera, o essere nitrificata e trasformata in nitrato. Il nitrato può essere assimilato direttamente dalle colture o disperso nelle acque superficiali o, più probabilmente, essere lisciviato nell'acquifero e in parte lungo il percorso denitrificato e trasformato in  $N_2O$  o  $N_2$ , con una perdita irreversibile di azoto in atmosfera (Mastrocicco et al., 2011).

Studi recenti (Hinkle & Tesoriero, 2014), condotti sugli acquiferi superficiali, hanno mostrato come il processo di denitrificazione varia considerevolmente a seconda del tempo di residenza delle acque dell'acquifero. Infatti il processo di denitrificazione aumenta considerevolmente all'aumentare del tempo di residenza. Inoltre utilizzando come variabili le condizioni redox, la geologia e il tempo di residenza, è stato valutato statisticamente un modello per determinare il processo di denitrificazione nelle acque sotterranee. Dallo studio risulta che il processo di denitrificazione si manifesta prevalentemente in due condizioni:

- acquiferi superficiali con soggiacenza <1.27 m, con età apparente delle acque maggiore ai 10 anni e in acquiferi caratterizzati da sabbia e ghiaia o in acquiferi glaciali.
- acquiferi superficiali con soggiacenza compresa tra 1.27 m e 1.83 m, con età apparente delle acque maggiore ai 30 anni.

Una grande quantità dell'azoto reattivo prodotto dalle attività antropiche viene quindi disperso nell'ambiente creando dannose conseguenze, tra le quali l'aumento della concentrazione dei nitrati nei corpi idrici, l'eutrofizzazione e l'incremento delle emissioni degli ossidi di azoto.

La distribuzione dell'azoto all'interno delle acque sotterranee dipende dalle condizioni redox, in presenza di condizioni ossidate prevale il nitrato, mentre in condizioni riducenti lo ione ammonio ( $NH_4^+$ ). Pertanto il nitrato prevale in acquiferi superficiali, a contatto con l'aria, mentre lo ione ammonio si trova prevalentemente negli acquiferi confinati. La presenza di nitrito nelle acque sotterranee può indicare o una fase intermedia del processo di nitrificazione (acquiferi superficiali) o una fase intermedia del processo di denitrificazione (acquiferi profondi). In generale la presenza di ione ammonio e di nitrito in acquiferi superficiali indicano una contaminazione antropica recente, dovuta rispettivamente a sversamenti di liquami e a concimi organici o a parziale nitrificazione dello ione ammonio.



- ***Normativa di riferimento***

La Direttiva Nitrati 91/676/CEE (Protezione delle acque dall'inquinamento da nitrati provenienti da fonti agricole, detta Direttiva nitrati), mira a ridurre l'inquinamento delle acque causato direttamente o indirettamente dai nitrati di origine agricola e a prevenire qualsiasi ulteriore inquinamento di questo tipo. Recepita in Italia con il D.Lgs. 152/1999, integrato dal D.Lgs. 258/2000 e in seguito sostituito dal D.Lgs 152/06, prevede che vengano individuate delle Zone Vulnerabili da Nitrati di origine agricola (ZVN), zone di territorio che scaricano direttamente o indirettamente composti azotati in acque già inquinate o che potrebbero esserlo in conseguenza di tali scarichi. Ossia quelle acque dolci superficiali destinate al consumo umano e/o acque sotterranee che contengono o possono contenere una concentrazione di nitrato superiore a 50 mg/L (espressi come  $\text{NO}_3^-$ ). Rientrano nella perimetrazione delle ZVN i laghi naturali di acque dolci o altre acque dolci, estuari, acque costiere e marine, in cui vi è la presenza di eutrofizzazione oppure la possibilità del verificarsi di tale fenomeno nell'immediato futuro. Nella designazione delle ZVN va inoltre tenuto conto delle caratteristiche fisiche e ambientali delle acque e dei terreni che determinano il comportamento dei nitrati nel sistema acqua/terreno.

La norma prevede che in ogni ZVN si adotti un programma d'azione in cui sono riportate, oltre alle indicazioni contenute nel Codice di Buona Pratica Agricola, tutte le misure/azioni che le aziende devono seguire al fine di ridurre o contenere l'inquinamento da Nitrato, mantenendo un equilibrio tra il prevedibile fabbisogno di azoto delle colture, e l'apporto di azoto proveniente dal terreno e dalla fertilizzazione. Le misure devono garantire che, per ciascun'azienda o allevamento, il quantitativo di effluente zootecnico sparso sul terreno ogni anno, compreso quello depositato dagli animali stessi, non superi un apporto pari a 170 kg di azoto per ettaro.

La direttiva 2000/60/CE (Direttiva quadro sulle acque), modificata con la 2008/32/CE, ha istituito un quadro per la protezione delle acque superficiali interne, delle acque di transizione, delle acque costiere e sotterranee che impedisca un ulteriore deterioramento, protegga e migliori lo stato degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico, assicuri la graduale riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee e ne impedisca l'aumento. Ha istituito i distretti idrografici a cui è affidata la gestione di uno o più bacini idrografici. Obiettivo principale della norma è quello di raggiungere un buono stato per tutti i corpi idrici superficiali e sotterranei entro il 2015. Ove le acque abbiano già raggiunto un

buono stato, si dovrebbe mantenere tale situazione. Per le acque sotterranee, oltre ai requisiti di un buono stato, si dovrebbe identificare e correggere qualsiasi tendenza significativa e prolungata all'aumento della concentrazione di sostanze inquinanti. L'obiettivo finale è quello di eliminare le sostanze pericolose prioritarie e contribuire a raggiungere valori vicini a quelli del fondo naturale.

La Direttiva 2006/118/CE, recentemente modificata con la 2014/80/UE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento è stata recepita in Italia con il D.Lgs. 30/2009. La norma istituisce misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento delle acque sotterranee, quali i criteri per l'identificazione e la caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei; gli standard di qualità e i valori soglia necessari alla valutazione del buono stato chimico delle acque sotterranee; i criteri per individuare e per invertire le tendenze significative e durature all'aumento dell'inquinamento e per determinare i punti di partenza per dette inversioni di tendenza; i criteri per la classificazione dello stato quantitativo; le misure per prevenire o limitare le immissioni di inquinanti nelle acque sotterranee e le modalità per la definizione dei programmi di monitoraggio quali-quantitativo.

Il D.Lgs. 152/2006, e successive modifiche, recanti norme in materia ambientale e nello specifico, nella parte terza, norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche. Questa norma ha lo scopo di assicurare la tutela ed il risanamento del suolo e del sottosuolo, il risanamento idrogeologico del territorio tramite la prevenzione dei fenomeni di dissesto, la messa in sicurezza delle situazioni a rischio e la lotta alla desertificazione. Definisce le competenze dei diversi enti pubblici e nella sezione II parte Terza legifera in merito alla tutela delle acque dall'inquinamento. Stabilisce gli obiettivi per la tutela delle acque superficiali, marine e sotterranee ossia prevenire e ridurre l'inquinamento e attuare il risanamento dei corpi idrici inquinati, conseguire il miglioramento dello stato delle acque ed adeguate protezioni di quelle destinate a particolari usi; perseguire usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, con priorità per quelle potabili; mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate; mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità e impedire un ulteriore deterioramento, proteggere e migliorare lo stato degli ecosistemi acquatici, degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico. Al fine della tutela e del risanamento delle acque superficiali e sotterranee, la parte terza del presente decreto individua gli obiettivi minimi di qualità ambientale per i corpi idrici significativi e gli obiettivi di qualità per specifica destinazione per i corpi idrici. L'obiettivo di

qualità ambientale e' definito in funzione della capacità dei corpi idrici di mantenere i processi naturali di autodepurazione e di supportare comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate. Questo decreto stabilisce inoltre i criteri per l'individuazione delle aree vulnerabili da nitrati di origine agricola.

In applicazione del D.Lgs. 152/99, la Regione Autonoma della Sardegna, dal 2002 ha attivato, su coordinamento dall'Assessorato della Difesa dell'Ambiente, il monitoraggio della qualità delle acque dei corpi idrici superficiali su tutto il territorio regionale. Dal 2003 ha inoltre avviato la redazione del Piano di Tutela delle Acque (PTA), in attuazione dell'art. 44, comma 1, del suddetto Decreto, approvato successivamente con Deliberazione della Giunta Regionale n. 14/16 del 4 aprile 2006. Gli studi, intrapresi per la redazione del PTA, si sono basati sulla delineazione degli acquiferi, della loro vulnerabilità intrinseca e sulla individuazione delle zone vulnerabili da nitrati.

Il PTA contiene, ai sensi dell'art. 44, comma 4, del Decreto suddetto:

- a) i risultati dell'attività conoscitiva;
- b) l'individuazione degli obiettivi di qualità ambientale per specifica destinazione;
- c) l'elenco dei corpi idrici a specifica destinazione e delle aree richiedenti specifiche misure di prevenzione dall'inquinamento e di risanamento;
- d) le misure di tutela qualitative e quantitative tra loro integrate e coordinate per bacino idrografico;
- e) l'indicazione della cadenza temporale degli interventi e delle relative priorità;
- f) il programma di verifica dell'efficacia degli interventi previsti;
- g) gli interventi di bonifica dei corpi idrici.

Finalità fondamentale del PTA è quella di costituire uno strumento conoscitivo, programmatico, dinamico attraverso azioni di monitoraggio, programmazione, individuazione di interventi, misure, vincoli, finalizzati alla tutela integrata degli aspetti quantitativi e qualitativi della risorsa idrica che, nell'ambito del PTA, sono tra loro integrate e coordinate per Unità Idrografiche Omogenee (UIO). In modo particolare prevede l'adozione di specifici programmi di misure di tutela e miglioramento per il mantenimento o il raggiungimento, entro il 31.12.2016, degli obiettivi di qualità per specifica destinazione per i corpi idrici a specifica destinazione.

Nella relazione del PTA sono riportati i risultati dello studio della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi effettuata mediante il metodo SINTACS, uno dei sistemi maggiormente utilizzati in Italia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Le considerazioni concernenti la Vulnerabilità dovuta ai contenuti in nitrati rilevati nelle analisi

chimiche delle acque sotterranee, la Vulnerabilità intrinseca degli acquiferi e la Vulnerabilità legata ai carichi potenziali di nitrati del comparto agricolo e zootecnico, permettono, nel loro insieme, di individuare situazioni pericolose per le acque sotterranee. Ciò ha permesso di individuare una zona vulnerabile da Nitrati di origine agricole, il comune di Arborea, e di segnalare come zone potenzialmente vulnerabili i seguenti complessi acquiferi in Sardegna:

- 02-Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della Marina di Sorso;
- 16-Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Cixerri;
- 17-Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Campidano;
- 18-Acquifero delle Vulcaniti Plio-Pleistoceniche del Logudoro;
- 32-Acquifero dei Carbonati Mesozoici della Nurra.

Per circoscrivere esattamente le porzioni di territorio contaminate da nitrati, come previsto nel Decreto Legislativo 152/99, è però necessario eseguire delle indagini integrative e di maggior dettaglio. La designazione di una ZVN deve infatti prendere in considerazione tutti i rilevanti fattori ambientali e fisici (cioè caratteristiche dell'acquifero, flusso e trasporto dei soluti nella zona satura, le caratteristiche degli elementi dell'azoto nell'ambiente e l'uso del suolo) che possono influenzare la dinamica dell'azoto.

In applicazione della Direttiva Nitrati, come previsto dal D.Lgs. 152/99, la Regione Autonoma della Sardegna ha emanato la delibera n.1/12 del 18 gennaio 2005, recante la designazione delle zone vulnerabili da nitrati di origine agricola nella Regione Sardegna.

Gli studi effettuati per il PTA hanno evidenziato nella zona di Arborea una vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, una qualità delle acque sotterranee con presenza di nitrati superiori a 50 mg/l, la presenza di allevamenti a carattere intensivo pari a circa 36.000 capi bovini e il connesso sistema di smaltimento sul terreno della totalità degli effluenti zootecnici e dei reflui domestici delle aziende zootecniche, tale per cui si rendesse necessaria da parte della Regione Sardegna, ai sensi dell'articolo 3 della Direttiva 91/676/CEE e dell'articolo 19 del D.Lgs. 152/99, la delineazione della stessa a zona vulnerabile da nitrati, e nello specifico quella parte del territorio del Comune di Arborea corrispondente ad un'area di circa 55 Km<sup>2</sup> delimitata dal Canale Acque Medie e comprendente lo stagno di Corru s'ittiri.

In quest'area, come previsto dalla normativa, dovrà essere predisposto un Programma di azione (PA), che contenga:

- Periodi di divieto di spandimento di fertilizzanti
- Capacità di stoccaggio per effluenti di allevamento

- Limitazioni dell'applicazione al terreno di fertilizzanti secondo il Codice di Buona Pratica Agricola (CBPA) e con il rispetto del limite di 170 Kg/ha/anno di Azoto (N) da effluente zootecnico
- Integrazione del CBPA e la definizione delle modalità di attuazione
- Interventi di formazione e informazione degli agricoltori
- Elaborazione e applicazione di strumenti di controllo e verifica dell'efficacia dei programmi azione.

# 1 Area di studio

## 1.1 Inquadramento geografico

L'area studiata è rappresentata dalla Valle del Cixerri, ricade nella parte Sud-Occidentale della Sardegna e precisamente nel Sulcis Iglesiente (Figura 3). È un'ampia depressione strutturale allungata in direzione Est-Ovest. È compresa nei territori comunali di Carbonia, Iglesias, Domusnovas, Villamassargia, Musei, Siliqua, Vallermosa e marginalmente Villaspeciosa e Uta, e ricade nelle Carte I.G.M. a scala 1:50.000 nel Fogli 555 "Iglesias" e "556" Assemini.

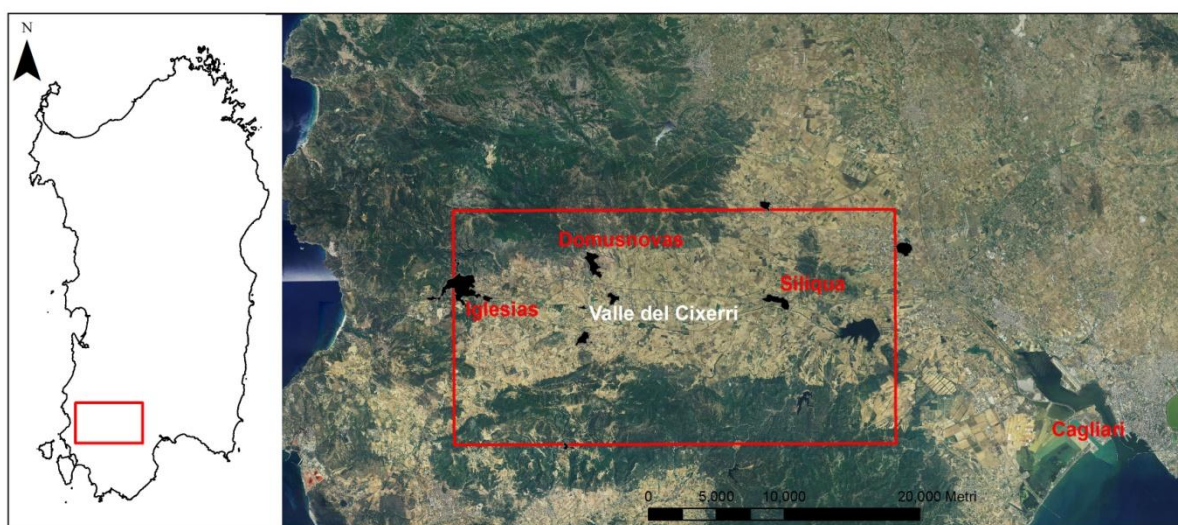


Figura 3 - Inquadramento geografico Valle del Cixerri

Ha una lunghezza media di circa 26 km e una larghezza di circa 8 km, per un'area totale di 220 kmq. È bordata a Nord, Ovest e Sud da morfologie montuose caratterizzate da affioramenti di rocce del basamento metamorfico paleozoico, mentre ad Est è separata dalla Piana del Campidano da morfologie collinari di Vulcaniti terziarie (Soglia di Siliqua). Tra i rilievi più importanti si segnala a Nord la Punta San Michele che raggiunge la quota di 906 m s.l.m. e a sud il Monte Orri con i suoi 722 m s.l.m.. Il fiume principale della piana è il fiume Cixerri il più importante affluente del Flumini Mannu, ha una foce autonoma e la sua lunghezza è di 50,6 Km e ha un bacino idrografico di 534,7 Kmq (Funedda et al., 2009).

La delimitazione dell'area di interesse è stata effettuata in base alla carta geologica e alla conoscenze geologiche strutturali dell'area.

## 1.2 *Inquadramento geologico*

La valle del Cixerri è situata nella parte settentrionale del Sulcis Iglesiente (SO Sardegna). Le principali strutture dell'area del Sulcis-Iglesiente sono due grandi depressioni strutturali aventi estensione Est-Ovest a seguito dell'evoluzione tettonica dell'Oligocene Superiore-Pleistocene: Bacino di Narcao e il Bacino del Cixerri. La depressione del Cixerri è stata interpretata da alcuni autori come un *graben* delimitato da faglie sin-sedimentarie oloceniche (Cocozza & Schafer 1974; Pala et al. 1976; Cherchi & Montadert 1982). Sulla base di nuove evidenze la valle del Cixerri è stata interpretata come un'ampia sinclinale con asse E-W formatasi a seguito degli eventi plicativi dell'Oligocene superiore -Aquitano, che hanno interessato il basamento, le coperture dell'Eocene inferiore e medio e la porzione basale della formazione del Cixerri. La zona assiale della sinclinale ha agito da depocentro di sedimentazione della parte superiore di questa formazione continentale (Carmignani et al., 2004). La valle è bordata dalle formazioni sedimentarie del basamento paleozoico mentre all'interno affiorano, non in maniera continua, il Lignitifero Aict. (Eocene Inf.-Medio) e la Formazione del Cixerri (Eocene medio-? Oligocene.) e la successione vulcano sedimentario oligo-miocenica. Sulle successioni vulcano-sedimentarie terziarie poggiano i depositi alluvionali di età quaternaria (Pleistocene e Olocene).

- ***Il basamento paleozoico***

Il basamento paleozoico affiorante nell'area di studio appartiene alla Zona esterna e alla Zona a falde del segmento sardo della catena ercinica. È caratterizzato da un metamorfismo di grado molto basso, al limite tra l'anchizona e la Facies a scisti Verdi (Franceschelli et al., 1992), i cui effetti sono evidenti nelle rocce pelitiche e arenaceo-pelitiche, poco riconoscibili nelle rocce carbonatiche e mai visibili in quelle dolomitiche (Funedda et al., 2009).

La successione stratigrafica della Zona esterna del basamento paleozoico (Figura 4), nell'area di studio, è interrotta da una discordanza angolare che separa le formazioni del Cambriano-Ordoviciano inferiore (formazione di Nebida, formazione di Gonnese, formazione di Campo Pisano e formazione di Cabitza) da quella dell'Ordoviciano medio superiore (formazione di Monte Argentu). Discordanza conosciuta in letteratura come "discordanza sarda", è attribuibile alla tettonica della "Fase Sarda" (Stille, 1939).

Si ritiene, per analogia con gli affioramenti nella zona del Gerrei, che esista una seconda discordanza angolare tra i depositi di tipo "Culm" del Carbonifero e le sottostanti formazioni paleozoiche, ma nel Sulcis-Iglesiente la qualità degli affioramenti non ha permesso di verificare la reale natura discordante dei depositi.

Le sequenze separate da queste due discordanze sono note come:

Successione sedimentaria pre-"discordanza sarda";

Successione sedimentaria post-"discordanza sarda";

Depositi sintettonici tipo "Culm".

Nel Sulcis-Iglesiente la successione sedimentaria pre-"discordanza sarda" ha un'età compresa tra il Cambriano Inferiore e l'Ordoviciano Inferiore. È caratterizzata da depositi clastici con intercalazioni di rocce carbonatiche nei termini più antichi e da sedimenti inizialmente carbonatici, poi carbonatico-terrigeni e infine prevalentemente terrigeni, nei termini più giovani. La successione è ricoperta in discordanza angolare dai metasedimenti dell'Ordoviciano medio-Superiore della formazione di Monte Argentu. Questa presenta alla base depositi grossolani, connessi a un ringiovanimento del rilievo, e in successione depositi clastici a minore granulometria, legati a condizioni di relativa stabilità, fino all'Ashgill superiore quando si hanno depositi che testimoniano un'attività tettonica con vulcanismo attivo (Loi & Dabard, 1997).

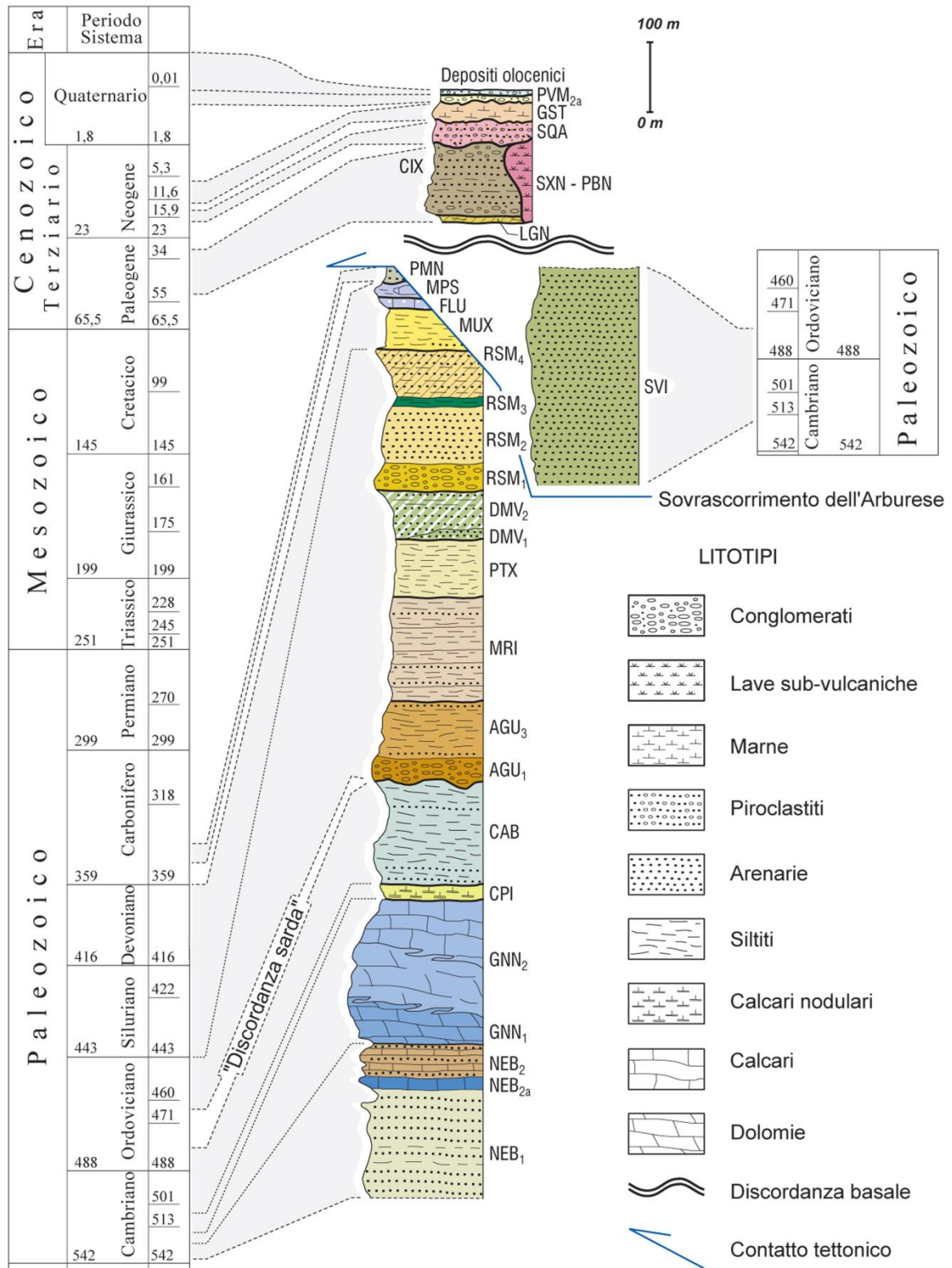
Nell'area di studio non sono presenti affioramenti di depositi sintettonici tipo "Culm" del carbonifero.

In successione stratigrafica, nella Sardegna SW (Iglesiente-Sulcis), è presente l'unità tettonica dell'Arburese, strutturalmente più elevata dell'edificio a falde del basamento ercinico di quest'area. Presenta un grado metamorfico maggiore rispetto alle successioni sottostanti del Sulcis-Iglesiente, ma comunque di basso grado tanto che i caratteri litostratigrafici risultano ben conservati. L'unità dell'Arburese si considera corrispondente all'Unità del Sarrabus, affiorante a NE della fossa del Campidano. Entrambe queste unità rappresentano la parte frontale delle Falde Esterne della Sardegna centrale sovrascorsa sulla Zona esterna della catena ercinica. Nell'area di studio, l'Unità dell'Arburese è rappresentata esclusivamente dalla formazione delle arenarie di San Vito di età cambro-ordoviciane.

Il ciclo Paleozoico si chiude con il Complesso intrusivo e filoniano tardo Paleozoico, costituito dall'unità intrusiva di Villacidro e dal corteo filoniano. Tali filoni sono ampiamente diffusi, tagliano sia il complesso granitico sia il basamento metamorfico e sono attribuibili al Carbonifero superiore-Permiano. Oggetto di studio in passato per le mineralizzazioni che contengono, spesso sfruttate, sono distinti in tre tipi principali: filoni di Gabbro, filoni intermedio-basici, filoni idrotermali.



### SCHEMA LITOSTRATIGRAFICO



**Figura 4 - Colonna stratigrafica delle formazioni affioranti nell'area del Foglio 556 "Assemini" tratto da "ISPR4 foglio geologico scala 1:50.000 - 556 "Assemini"**

- **Successione Vulcano-Sedimentaria Terziaria**

Nel Sulcis Iglesiente non si ritrovano affioramenti di rocce metamorfiche, ma sono abbondanti i sedimenti dell'Eocene medio-Oligocene e i prodotti vulcanici ipoabissali e piroclastici olocenici (successione vulcano-sedimentaria terziaria).

La successione eocenico-oligocenica rappresenta un ciclo sedimentario trasgressivo-regressivo (Figura 5). I termini marini, testimoni della trasgressione marina, sono stati rinvenuti solo in sondaggio nella parte occidentale del Sulcis. La fase regressiva è invece ben rappresentata e si trova in discordanza stratigrafica sul basamento paleozoico, con spessori sempre minori da Ovest verso Est, ad indicare che la trasgressione marina veniva da Ovest. È rappresentata da quattro formazioni sedimentarie continentali (dal basso verso l'alto): "Calcari a macroforaminiferi", il "Miliolitico" Auct., il "Lignitifero" Auct. e la "Formazione del Cixerri". Nell'area di studio sono presenti solo i termini superiori della successione. Il Lignitifero Auct. è caratterizzato da Calcari grigi, localmente brecciati, in strati di poche decine di centimetri, con talvolta sottili intercalazioni di argilliti rossastre, con abbondante materia organica e depositi di lignite.

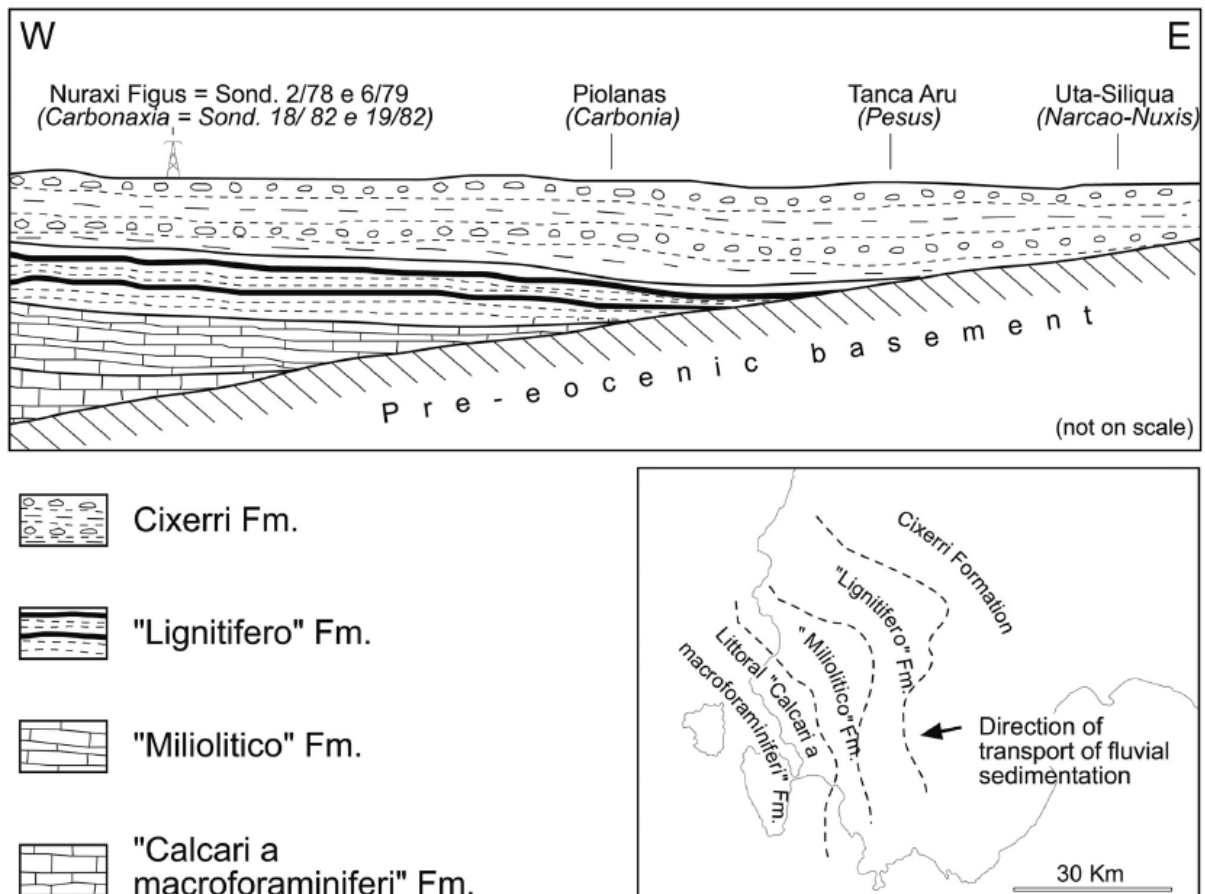


Figura 5 - Stratigrafia delle Formazioni dell'Eocene-Oligocene e rispettivi affioramenti nell'area del Sulcis Iglesiente (Carmignani et al., 2004)

La Formazione del Cixerri si ritrova in tutto il Sulcis Iglesiente, fino al bordo del Campidano, e affiora in modo discontinuo tra i depositi quaternari. È costituita in prevalenza da arenarie quarzoso-feldspatiche, generalmente ben stratificate, con frequenti intercalazioni di lenti di conglomerati (interpretati come paleoalvei). La parte basale è caratterizzata da brecce e conglomerati, marne e argille spesso contenenti noduli ferruginosi. L'orizzonte con i noduli ferruginosi è interpretato come un paleosuolo sviluppato in condizioni di clima caldo umido (Ferrara et al., 1995). In successione si trovano prima arenarie grigio-giallastre, grossolane, con elementi di quarzo e frammenti litici del basamento e poi arenarie più massive (circa 10 m) con granulometrica più fine in banchi plurimetrici, privi di strutture sedimentarie. La successione è chiusa da argille rosse, alternate a siltiti rosso-violacee. I litotipi arenacei presentano frequentemente laminazioni incrociate, mentre i livelli conglomeratici, frequenti nella parte alta della formazione, sono in genere poco classati e sono caratterizzati da clasti poligenici, eterometrici, il cui diametro varia da 2 a 30 cm.

L'età della formazione del Cixerri, vista la mancanza di fossili, è stata stimata grazie a correlazioni con i depositi a tetto e a letto. Si trova in debole discordanza sui sedimenti dell'eocene medio (Lignitifero Auct.), mentre la presenza di depositi clastici della formazione del Cixerri nelle andesiti ipoabissali calcoalcaline del complesso vulcanico di Siliqua di età Oligocene superiore. Da queste correlazioni risulta dunque compresa tra l'Eocene medio e l'Oligocene superiore circa (Funedda et al., 2009).

L'ambiente deposizionale è prevalentemente continentale e riconducibile ad una deposizione fluvio lacustre, in un vasto sistema di piana alluvionale con carattere distale in un clima temperato-caldo e umido (Barca, 1973).

Lo spessore in affioramento può raggiungere i 150-180 m, mentre nei sondaggi eseguiti nel Sulcis son stati rilevati spessori fino a 300 m circa.

Sulla successione sedimentaria poggiano le rocce sub-vulcaniche ed effusive. Si tratta di rocce magmatiche ad affinità calcoalcalina appartenenti al ciclo vulcanico oligo-miocenico sardo. Non direttamente correlabili con gli altri affioramenti di rocce vulcaniche della stessa epoca affioranti nella Sardegna meridionale, in quanto caratterizzate da caratteri maggiormente intrusivi e di età più vecchia.

Si rinvencono prevalentemente nella parte orientale della valle del Cixerri e lungo i bordi meridionali della stessa, dove svettano strutture cupoliformi ritenute da alcuni Autori dei veri e propri *neck*. Un grande apparato domico di circa 4 kmq affiora in prossimità del bordo occidentale del graben del Campidano, nota in letteratura come soglia di Siliqua. Una vera e propria "soglia" strutturale, che da Vallermosa si estende verso Siliqua e Uta per una lunghezza di circa 15 km.

Il complesso vulcanico di Siliqua è costituito dalla Daciti e andesiti di Monte Sa Pibionada, ammassi lavici sub-vulcanici di colore variabile dal grigio-verdastro al violaceo e al bruno che intrudono sia il basamento paleozoico che la copertura terziaria; dalle Tonaliti di Monte Su Silixianu, e dalle Piroclastiti di Siliqua, alternanze di depositi di flusso piroclastico ed epiclastiti (arenarie vulcanoclastiche più o meno conglomeratiche).

- ***Depositi alluvionali Pleistocenici e quaternari***

Nell'area di studio affiorano estesamente depositi alluvionali, distinguibili in alluvioni antiche del Pleistocene superiore e in alluvioni recenti olocenici. Due diverse unità deposizionali separate da una superficie di erosione corrispondente a un periodo di incisione e terrazzamento. Le alluvioni antiche, facenti parte del Sintema di Portovesme e nello specifico il subsintema di Portoscuso, sono caratterizzate da depositi di conoide alluvionale, costituiti prevalentemente da ghiaie grossolane, a spigoli subangolosi e subarrotondati, con strutture incrociate concave in genere di limitata ampiezza e profondità, fino a blocchi. L'ambiente deposizionale è quello della piana alluvionale, con corsi d'acqua a canali intrecciati e terrazzi, di conoide alluvionale e di versante, tipici di clima arido e freddo. I depositi crionivali, formano terrazzi alluvionali ai lati dei letti fluviali attuali e dei depositi alluvionali olocenici, in genere anch'essi costituiti da conoidi alluvionali a loro volta terrazzate. Le scarpate variano da qualche metro sino a varie decine di metri di altezza.

I depositi olocenici sono caratterizzati da sedimenti attuali e da sedimenti frutto di processi erosivi avvenuti in età olocenica. Tra questi depositi sono compresi anche depositi alluvionali terrazzi posti a quote inferiori rispetto ai terrazzi pleistocenici, ma i più rappresentativi sono quelli di pianura alluvionale, che mostrano passaggi progressivi a quelli di conoide alluvionale; sono ben rappresentati anche i depositi di versante.

I depositi alluvionali terrazzati sono costituiti da ghiaie a stratificazione incrociata e parallela, ed hanno uno spessore di circa 10 m. I sedimenti alluvionali, che si ritrovano lungo gli alvei dei diversi corsi d'acqua che scorrono all'interno della piana del Cixerri, sono generalmente grossolani e solo localmente si ritrovano piccole lenti sabbiose. I sedimenti diventano via via più fini man mano che il corso d'acqua si allontana dai rilievi. Lo spessore di questi sedimenti è molto variabile e non supera mai i 5 m.

### ***1.3 Inquadramento tettonico***

Il Sulcis Iglesiente rappresenta un alto strutturale, frutto della tettonica dell'Oligocene-Pleistocene, limitato ad Est dalla faglia che borda ad occidente la piana del Campidano e ad Ovest dalle faglie della piattaforma occidentale Sarda. I principali lineamenti strutturali del Sulcis-Iglesiente sono rappresentati da due grandi depressioni allungate in direzione Est-Ovest, il bacino del Cixerri e il Bacino di Narcao.

Queste depressioni sono state precedentemente interpretate come graben delimitati da faglie da faglie dirette e legate all'evoluzione oligo-miocenica della Fossa sarda (Cocozza & Schafer 1974; Pala et al., 1976; Cherchi & Montadert 1982). Nuovi rilevamenti geologici effettuati nell'ambito del progetto CARG (Cartografia geologica e geotematica) hanno documentato, per il Sulcis Iglesiente, una diversa evoluzione.

È stato riscontrato che in diverse località, il contatto tra i depositi eocenici e oligocenici, affioranti lungo i margini delle depressioni ed il basamento ercinico è una discordanza basale (*non conformity*) non un contatto per faglia come ritenuto precedentemente e che le rocce sedimentarie di età Eocene-Oligocene, che affiorano lungo i margini delle depressioni, immergono in modo costante verso l'asse del bacino con un angolo di 20-25° e in alcuni casi si superano i 45°, inoltre la successione paleogenica al contatto con gli alti strutturali del basamento paleozoico è caratterizzata da facies argilloso-arenacee, tipiche di ambienti con bassa energia di rilievo. In tutta l'area sono assenti invece le facies tipiche delle scarpate di faglia attiva, caratteristiche di bordi di fossa tettonica dove la sedimentazione è controllata da faglie attive. La deformazione interna del Lignitifero e della formazione del Cixerri, la cui intensità aumenta progressivamente verso il basso, è caratterizzata da strutture coerenti con raccorciamenti sub-orizzontali e al contrario, mancano faglie dirette sinsedimentarie. Faglie inverse (N110-120 e immergenti SW di circa 50°) con rigetti metrici e decametrici sono frequenti in diverse località. Strutture plicative con lunghezze d'onda ettometriche sono ben evidenziate anche nei piani di coltivazione mineraria del Bacino Lignitifero del Sulcis (Taricco, 1924; Fadda et al., 1994).

Inoltre esistono piccoli affioramenti della parte basale della formazione del Cixerri sui rilievi, costituiti da rocce del basamento paleozoico, che separano i due bacini di Narcao e del Cixerri.

Tutte queste evidenze indicano che i bacini di Narcao e del Cixerri non sono graben delimitati da faglie oligoceniche sin sedimentarie, ma corrispondono ad una blanda sinclinale di età Oligocenica, con un trend assiale approssimativamente Est-Ovest (Carmignani et al., 2004).

- ***Rapporti tra tettonica e sedimentazione***

Le successioni eoceniche-oligoceniche della Sardegna sudoccidentale rappresentano un ciclo sedimentario trasgressivo-regressivo. La lunga e calma fase regressiva, cominciata nell'Eocene inferiore, inizia con una successione di ambiente paralico e alluvionale, caratteristico di una morfologia matura e di una bassa energia di rilievo.

Questi ambienti coincidono con la deposizione delle formazioni del "Miliolitico", del "Lignitifero". Mentre la formazione del Cixerri è caratterizzata, alla base, da sedimenti clastici di ambiente alluvionale evoluto e verso l'alto da sedimenti che indicano un progressivo ringiovanimento del rilievo. La parte basale della formazione del Cixerri è caratterizzata da siltiti e arenarie quarzose con subordinati livelli di microconglomerati ad elementi ben arrotondati di quarzo e liditi, mentre nella parte sommitale sono abbondanti i conglomerati poligenici ed etrometrici e le arenarie quarzoso-feldspatiche.

Sulla natura del contatto di base della Formazione del Cixerri esistono due diverse teorie: secondo alcuni Autori è discoridante sui sedimenti del Lignitifero, secondo altri è concordante; gli ultimi rilevamenti effettuati dal CARG dimostrano l'esistenza di entrambi i tipi di contatto (Funedda et al., 2009).

La natura del contatto di base e il trend evolutivo di questa avvalorano l'ipotesi che i bacini di Narcao e del Cixerri siano due blande sinclinali (Figura 6). L'evoluzione tettono-sedimentaria del Sulcis Iglesiente è pertanto caratterizzata dallo sviluppo di grandi e blande strutture plicative, anticlinali e sinclinali, che controllano i processi di erosione e di sedimentazione. Le anticlinali corrispondevano a rilievi in crescita, mentre le sinclinali rappresentavano il depocentro della sedimentazione. In questo modello la parte sommitale della formazione del Cixerri rappresenta un deposito sintettonico coevo degli eventi plicativi.

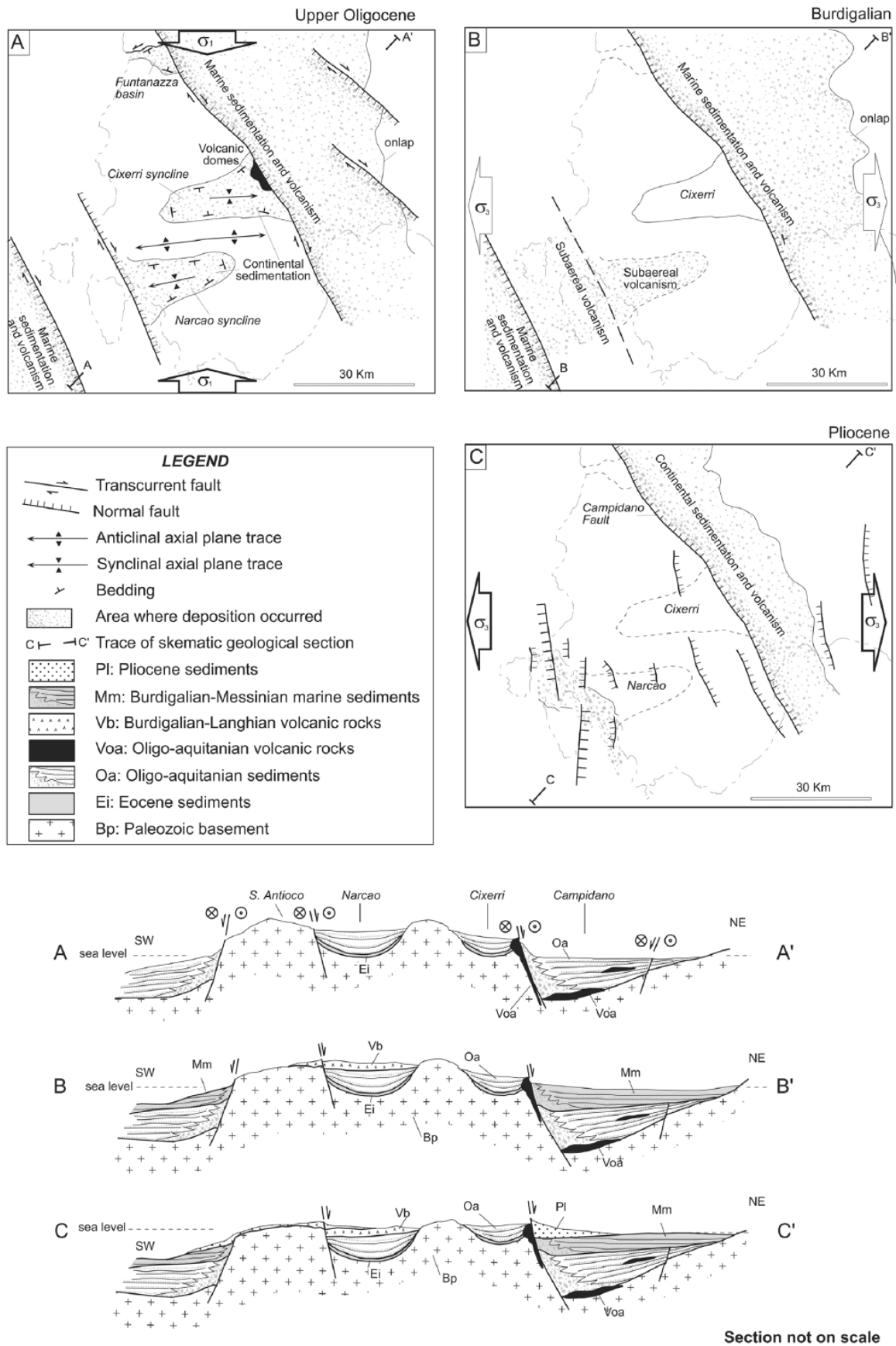


Figura 6 - Schema della Evoluzione tettonica stratigrafica del periodo Oligocene-Pliocene nel sud Sardegna (Carmignani et al., 2004)

#### ***1.4 L'acquifero alluvionale quaternario della piana del Cixerri***

L'acquifero quaternario della Piana del Cixerri in base alla “Relazione idrogeologica Sulcis-Cixerri” realizzata durante il progetto CASMEZ (1984) risulta caratterizzato da ghiaie, sabbioni ed alluvioni limo-argillose. Presenta una permeabilità generalmente bassa per porosità.

Il complesso delle alluvioni che ospita l'acquifero, avente un'estensione di circa 198 Km<sup>2</sup>, è costituito da una coltre di depositi sciolti quaternari (Pleistocenici e Olocenici) posti al di sopra del substrato roccioso costituito dal basamento paleozoico scistoso-metamorfico, dalla Formazione del Cixerri (conglomerati, marne e calcari) e dalle vulcaniti oligo mioceniche (andesiti e basalti).

L'acquifero è caratterizzato da alluvioni antiche e recenti e da detriti di versante. Le alluvioni antiche sono formate da ciottoli di quarzo, scisto e andesiti misti a sabbie quarzose ed argillose più o meno ferrettizzate. Questi depositi mostrano un colore giallo-rossastro e sono generalmente molto costipati. Esse danno origine a due ordini di terrazzi. Il primo si attesta intorno ai 100-60 m s.l.m., mentre il secondo tra i 50-30 m s.l.m. la potenza di questi sedimenti varia da 50 cm a 5-6 m.

Le alluvioni recenti ed attuali occupano i fondo valle dei corsi d'acqua e spesso giacciono sopra le alluvioni antiche, sono caratterizzate da materiali provenienti sia dagli affioramenti rocciosi limitrofi sia dal rimaneggiamento delle alluvioni antiche ad opera dei corsi d'acqua che vi si sono impostati sopra. Mentre i detriti di versante sono ubicati al piede dei versanti dei rilievi paleozoici e vulcanici. Lo spessore delle alluvioni è ridotto (massimo 10 m), soltanto lungo il Rio Cixerri lo spessore risulta leggermente maggiore (fino a 20 m).

In base “Relazione idrogeologica Sulcis-Cixerri” realizzata durante il progetto CASMEZ (1984) queste alluvioni, vista la loro resistività elettrica relativamente elevata, hanno una permeabilità media. Le alluvioni ghiaiose hanno uno spessore medio di 8 m, una trasmissività  $\leq 0.6 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  e una permeabilità media di  $\leq 0.7 * 10^{-4} \text{ m/s}$ . La falda si trova a bassa profondità (meno di 5 m) e l'andamento piezometrico segue la morfologia superficiale. Inoltre risulta evidente il drenaggio della falda superficiale da parte del corso d'acqua.

Secondo quanto è riportato nel PTA, l'acquifero possiede una permeabilità complessiva medio-bassa che, localmente, può diventare medio-alta nei livelli a matrice più grossolana. Nello specifico sono da considerare a bassa permeabilità le alluvioni terrazzate antiche, molto compatte e ferrettizzate, ed i detriti di versante, compatti e con una elevata percentuale di argilla. Mentre i depositi alluvionali sabbiosi sono caratterizzati da una permeabilità relativamente più elevata.



I corsi d'acqua esistenti nella piana del Cixerri drenano la falda superficiale, avente una bassa soggiacenza (1-5 m). Il flusso idrico sotterraneo è diretto verso Est.

Sempre secondo gli studi realizzati dalla Regione Sardegna, la ricarica dell'acquifero è prevalentemente di tipo zenitale, ad opera delle acque meteoriche, ma si presume possa esistere una ricarica laterale ad opera delle acque circolanti nel substrato roccioso poste alla base dello stesso (RAS, 2009).

Studi precedenti sono stati indirizzati a valutare la Vulnerabilità intrinseca dell'acquifero alluvionale del Cixerri (RAS, 2009; Brangi et al., 2010)

In base al metodo CNR-GNDCI si può ritenere che l'acquifero del Cixerri sia caratterizzato da vulnerabilità intrinseca "Elevata" (E), principalmente a causa delle sue caratteristiche litologiche e per la presenza di una falda a bassa soggiacenza, posta a pochi metri dal piano campagna (RAS, 2009). La vulnerabilità dell'acquifero, nel caso specifico nei confronti dei nitrati, è data dalla elevata permeabilità connessa principalmente ai seguenti fattori:

- presenza di un acquifero in materiale alluvionale grossolano e poroso;
- presenza di suoli a capacità di attenuazione tendenzialmente bassa.

La vulnerabilità integrata si ottiene dalla sovrapposizione della vulnerabilità intrinseca e dei Centri di Pericolo Potenziale (CDP). I CDP sono rappresentati da insediamenti o attività che possono rilasciare inquinanti idroveicolabili sul suolo o nel sottosuolo.

Le pressioni diffuse, nella valle del Cixerri, sono rappresentate dai carichi zootecnici ed agricoli, essendo questa un'area ad alta vocazione agro-zootecnica. Mentre le pressioni puntuali sono rappresentate dai reflui domestici dell'edificato diffuso.

Un recente studio (Brangi et al., 2010) ha valutato il rischio potenziale di contaminazione delle acque sotterranee, sulla base degli Indici di Vulnerabilità Intrinseca (S.I.N.T.A.C.S.) e di pericolosità (IPNOA). Dall'analisi emergono quattro differenti zone:

- a rischio molto basso e basso: coincidenti con i versanti e le pendici dei rilievi del basamento metamorfico paleozoico e delle successioni vulcano-sedimentarie terziarie, oltre alla zona di pianura nelle vicinanze del Castello d'Acquafredda ad ovest del Lago del Cixerri. Sono comunque aree poco diffuse e poco estese;
- a rischio moderato: rappresentate dalle vaste aree di pianura tra i paesi di Domusnovas e Siliqua e a sud dell'abitato di Iglesias;
- a rischio alto: le ampie zone di pianura alluvionale presenti tra le zone urbanizzate e le aree golenali del Cixerri e dei suoi affluenti. La maggior parte dell'area ricade in questa classe;

- a rischio elevato o estremamente elevato: sono diffuse e coincidono con parte dell'alveo del Cixerri e dei suoi affluenti, zona a sud-ovest di Villamassargia, nella pianura tra Domusnovas e Musei, a nord-est di Siliqua e in corrispondenza dello sbarramento sul Cixerri.

Nello specifico SINTACS (Civita & De Maio, 2000) è una metodica utilizzata per la valutazione della vulnerabilità intrinseca ed integrata all'inquinamento degli acquiferi mentre IPNOA, indice di pericolosità da nitrati di origine agricola, è una metodologia per la valutazione del pericolo di inquinamento delle acque sotterranee da nitrati di origine agricola (Padovani & Trevisan, 2002).

Entrambe queste metodologie, molto utilizzate negli studi di contaminazione da nitrati, sono state impiegate in altre aree della Sardegna, per la valutazione del rischio di contaminazione da nitrati di origini agricole negli acquiferi (Ghiglieri et al., 2006; 2009).

Le conoscenze attuali sulla idrogeologia dell'acquifero del Cixerri, lacunose soprattutto sull'entità dei prelievi delle acque di falda, non permettono di valutare un eventuale rischio di depauperamento della risorsa sotterranea, anche se è plausibile supporre l'esistenza di un sovra-sfruttamento dell'acquifero alluvionale del Cixerri (Brangi et al., 2010).

## 2 *Approccio metodologico*

In questo capitolo viene descritta la metodologia utilizzata per caratterizzare l'acquifero non confinato della Valle del Cixerri. L'approccio utilizzato ha previsto la realizzazione del modello geologico tridimensionale, l'acquisizione di parametri idrogeologici, in campo e in laboratorio, la caratterizzazione idrogeochimica delle acque sotterranee e infine la costruzione del modello idrogeologico tridimensionale. Le informazioni acquisite costituiscono il prerequisito indispensabile per la determinazione della dinamica di flusso e di trasporto degli inquinanti all'interno dell'acquifero.

Al fine di realizzare un accurato modello geologico e idrogeologico tridimensionale, è stato necessario sviluppare una metodologia, basata su un approccio multidisciplinare, che permette di integrare tutte le informazioni geologiche e idrogeologiche dell'acquifero investigato, tenendo conto della varietà dei dati disponibili, spesso di differente origine.

Per ottenere gli obiettivi prefissati e precedentemente descritti sono stati utilizzati diversi dati e diverse metodiche. Il flusso di lavoro che schematizza il procedimento seguito è riportato in Figura 7.

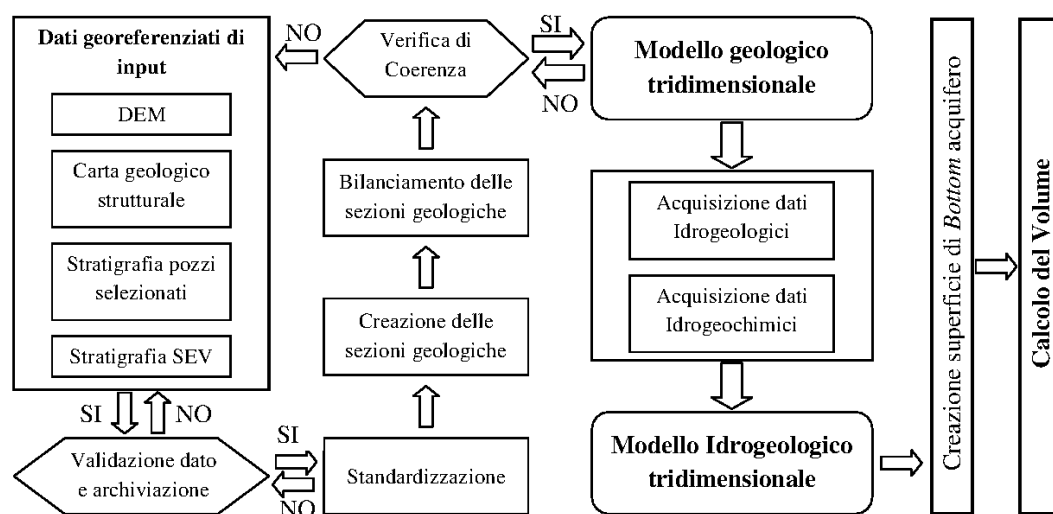


Figura 7 - modello di flusso

Si possono distinguere 4 fasi principali:

- Acquisizione e trattamento dei dati di input geologici, stratigrafici e geofisici;
- Creazione del modello geologico tridimensionale
- Acquisizione e interpretazione dei dati Idrogeologici e Idrogeochimici
- Creazione del modello idrogeologico tridimensionale.

Tutte le informazioni ottenute serviranno infine per la realizzazione del modello concettuale geologico e idrogeologico dell'area di studio.

Per modello concettuale si intende la modellazione e semplificazione delle condizioni geologiche e idrogeologiche reali. Per la sua realizzazione sono necessarie molteplici e dettagliate informazioni, sia geologiche che idrogeologiche, quali:

- confini e geometria del dominio di studio;
- carico idraulico;
- regime di flusso;
- permeabilità delle formazioni geologiche, raggruppate per caratteristiche idrogeologiche simili;
- zone di ricarica o perdita rispetto alla falda;

La fase di concettualizzazione è un passaggio fondamentale nel processo di modellazione, perché implica la conversione di un sistema reale in un modello numerico.

Il presente lavoro ha pertanto fornito la base conoscitiva per una successiva implementazione del modello numerico di flusso e trasporto e per la sua calibrazione con le osservazioni di campo raccolte e con i dati idrogeologici rilevati *ex-novo*. La realizzazione del modello numerico non è stato oggetto di questo studio.

## 2.1 Sviluppo del modello geologico e idrogeologico

### 2.1.1 Acquisizione e trattamento dei dati bibliografici

La fase preliminare della ricerca è consistita nel reperimento del materiale bibliografico sullo stato dell'arte della modellazione geologica e idrogeologica, e sul contesto geologico, strutturale e idrogeologico dell'area di studio. In Tabella 1 è riportato l'elenco dei dati geologici, idrogeologici, strutturali, etc. esistenti, sia cartacei che digitali.

<b>Tipologia dato</b>	<b>Scala</b>	<b>Formato</b>	<b>n.</b>	<b>Fonte</b>
Carta geologica della Sardegna	1:25.000	Shapefile	1	(RAS, 2008)
Geologia lineare	1:25.000	Shapefile	1	(RAS, 2008)
Modello di Elevazione Digitale del Terreno (DEM)	Cella 10x10 m	Raster	2	(RAS, 2011)
Log stratigrafici di pozzi		Cartacea/digitale	56	(ISPRA, 2010)
Carta Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)	1:100.000	Cartacea	1	(CASMEZ, 1984)
Curve di resistività apparente dei Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)		Cartacea	125	(CASMEZ, 1984)

**Tabella 1- Elenco dei dati acquisiti**

Nell'area di studio è presente un considerevole numero di pozzi a largo diametro realizzati sulle alluvioni quaternarie, parte dei quali utilizzati per il rilievo piezometrico, aventi profondità nel range di 2-8 m. La mancanza di informazioni sulla profondità del letto delle alluvioni non ha permesso di utilizzare i dati di questi pozzi nella realizzazione del modello geologico tridimensionale, se non solo parzialmente.

I dati relativi alle curve di resistività apparente dei Sondaggi Elettrici Verticali (SEV) acquisiti in seguito alle campagne geoelettriche condotte durante il progetto CASMEZ (1984), per quanto dettagliati, erano disponibili solo in formato cartaceo. La georeferenziazione dei punti nei quali erano state eseguite le indagini era desumibile solo dall'elaborato cartografico a piccola scala (1:100.000) fornito in formato cartaceo a corredo degli output di progetto. Pertanto, al fine dell'interpretazione dei dati è stato necessario ricampionare e digitalizzare

tutte le curve di resistività e georeferenziare le posizioni dei SEV. Per uniformità di trattamento, tutte le quote dei punti di analisi sono state estrapolate dal Modello di Elevazione Digitale del terreno a 10 m (DEM) realizzato dalla Regione Sardegna ([www.sardegnageoportale.it](http://www.sardegnageoportale.it)) e il Datum utilizzato è stato per tutti Roma 40 (Monte\_Mario\_Italy\_1).

In questa fase ci si è scontrati con diverse difficoltà dovute alla incompletezza delle informazioni idrogeologiche generali recenti alla insufficienza di log stratigrafici di sondaggi profondi che intercettassero la base delle alluvioni e alla distribuzione spaziale disomogenea dei dati sia stratigrafici sia idrogeologici.

- ***Realizzazione del Database***

Al fine di conseguire un risultato accurato, è stato necessario catalogare i dati disponibili per la realizzazione del modello tenendo conto della varietà degli stessi. Pertanto è stato sviluppato un geodatabase contenente tutti i dati (strutturali, stratigrafici, geochimici, idrogeologici) per consentire di eseguire facilmente modifiche e aggiornare il modello attraverso l'immissione di nuovi dati.

Il geodatabase è stato basato sul Datum Roma 40 (Monte Mario Italy 1) utilizzando il software ArcGIS. Contiene la carta di posizionamento dei sondaggi geoelettrici georeferenziata e immagazzinata come file raster; la carta geologica e il limite dell'acquifero del Cixerri, come shapefile poligonali; le tracce delle sezioni geologiche e i fiumi, come shapefile lineari, e la localizzazione dei pozzi (log stratigrafici), dei SEV, dei pozzi utilizzati per i rilievi piezometrici, i punti di esecuzione delle prove di infiltrazione e i punti di campionamento del materiale per indagini di laboratorio inseriti come shapefile puntuali.

Il geodatabase permette di comparare simultaneamente diversi tipi di dati sulla base della posizione geografica, rendendo più immediata l'analisi degli stessi. L'aggiornamento del geodatabase è stato effettuato durante tutto il periodo del dottorato.

Un passaggio importante nella creazione del geodatabase è stato quello di catalogare solo i pozzi utili per la realizzazione del modello idrogeologico tridimensionale. Pertanto si è effettuata una fase di validazione dei dati acquisiti dalla letteratura, log stratigrafici di pozzi e SEV. La fase di validazione, basata su un processo di verifica dei dati, è stata realizzata in accordo con i criteri e le strategie proposte da Ross et al. (2005) e Chesnaux et al. (2011).

Il primo passo è stato verificare che i pozzi e i SEV ricadessero all'interno degli affioramenti delle alluvioni quaternarie della piana del Cixerri e che avessero una profondità tale da intercettare la base delle alluvioni. Successivamente si è proceduto a verificare che le

stratigrafie attraversate fossero coerenti con la geologia di superficie e con la stratigrafia dell'area di studio e a unificare i dati che avevano una differente descrizione, ossia differenti attributi, ma caratteristiche litologiche simili (Figura 8).

La fase di correzione e validazione del dato è legata principalmente alla qualità del dato di origine, alla differente accuratezza e precisione delle descrizioni stratigrafiche, frutto del lavoro di differenti professionisti. Infine è stato assegnato a ciascuna litologia la sigla dell'unità stratigrafica corrispondente nella carta geologica.

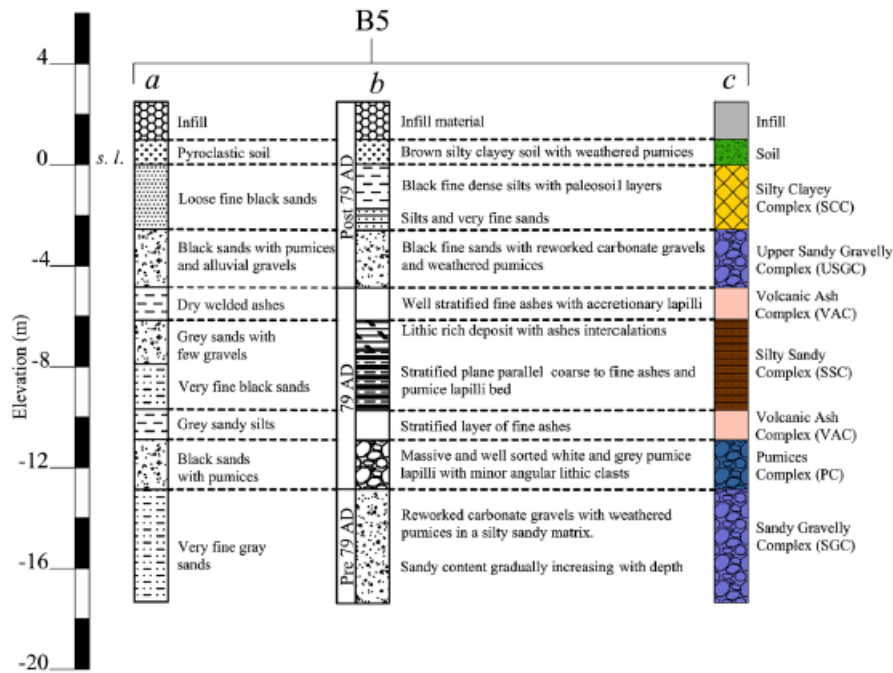


Figura 8 - Esempio processo di correlazione unità stratigrafiche in unità idrostratigrafiche (Di Maio et al. 2013)

Per una maggiore corrispondenza e uniformità tra dati di superficie derivati dalla cartografia e dati di profondità, è stata assegnata una sigla univoca dell'unità stratigrafica di appartenenza secondo la nomenclatura seguente: AQ per le alluvioni quaternarie; FCIX per la formazione del Cixerri; VT per le Vulcaniti terziarie; MP per le metamorfite paleozoiche.

Nel geodatabase sono stati inoltre inseriti come shapefile tutti i dati relativi alle campagne di acquisizione dei dati idrogeologici e idrogeochimici.

- ***Interpretazione SEV***

Per la ricostruzione del modello geologico tridimensionale sono stati utilizzati dati geofisici e nello specifico Sondaggi Elettrici Verticale (SEV), realizzati negli anni '80 dall'Università di Sassari (CASMEZ, 1984).

I sondaggi elettrici verticali, detti anche sondaggi di profondità, si usano per studiare la variazione di resistività tra le varie litologie, quando il sottosuolo può essere assimilato ad una serie di strati orizzontali (Mussett et al., 2003). Il metodo geo-elettrico SEV consiste nell'immettere nel terreno una corrente di valore noto ( $i$ ), tramite due elettrodi (AB), nel misurare la differenza di potenziale ( $\Delta V$ ) tra due punti intermedi, mediante altri due elettrodi (MN), e nel dedurre la resistività apparente degli elettro-strati attraversati, mediante l'equazione della prima legge di Ohm:

$$R = \Delta V / i$$

Dove:

R = resistività

$\Delta V$  = differenza di tensione di corrente

$i$  = intensità di corrente

Esistono due diversi metodi di acquisizione del dato: quadripolo di Wenner e quadripolo di Schlumberger. Nel caso specifico le misure sono state realizzate con il quadripolo di Schlumberger (Figura 9); il sondaggio elettrico verticale realizzato con questa metodologia consiste in una serie di determinazioni di resistività apparente effettuate distanziando progressivamente, rispetto al centro che rimane fisso, gli elettrodi di corrente e di potenziale lungo un azimut costante (Carrara et al., 1992). Questo permette di investigare volumi sempre maggiori, e ottenere valori di resistività apparente di litotipi presenti a profondità sempre maggiori. La profondità di esplorazione si crede sia pari ad 1/4 della distanza tra gli elettrodi AB (Carrara et al., 1992). In campo idrogeologico sono ampiamente utilizzati per studiare la ripartizione e l'andamento strutturale delle formazioni permeabili acquifere presenti nel sottosuolo, come dimostra l'abbondante bibliografia (Balìa et al., 2003; 2009).



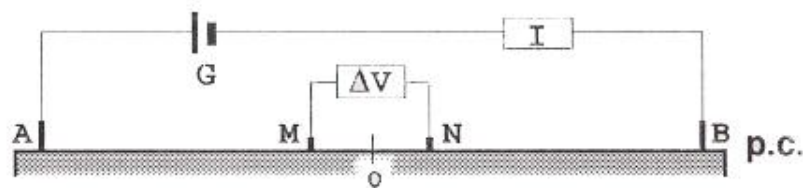


Figura 9 - Quadripolo di Schlumberger (Carrara et al., 1992).

I SEV, utilizzati nel presente lavoro, sono stati effettuati mediante stendimento di Schlumberger con separazione variabile tra gli elettrodi AB ( $AB \leq 1000$  m;  $AB = 1500-2000$  m;  $AB = 3000$  m). Come prodotto finale del lavoro geofisico è stata realizzata una carta indicante l'ubicazione dei sondaggi elettrici e una raccolta cartacea delle curve di resistività apparente dei singoli SEV. Queste ultime si ottengono riportando i valori di resistività apparente su un diagramma bilogaritmico in cui nelle ascisse viene riportato il valore di  $AB/2$  espresso in metri, mentre sulle ordinate, quelli di resistività in  $\text{ohm} \cdot \text{m}$  (Figura 10).

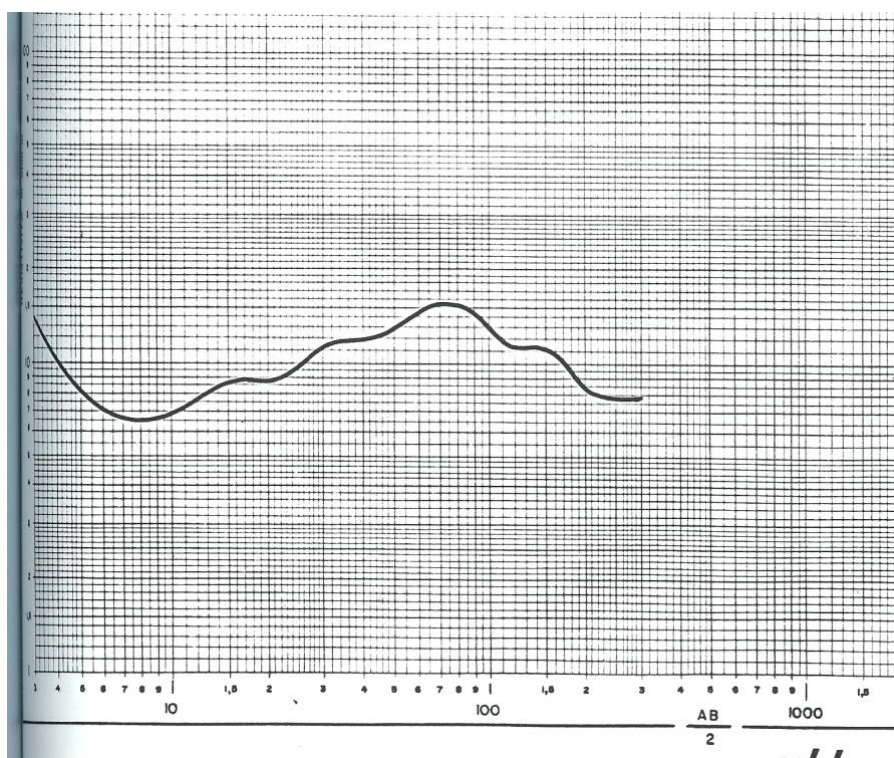
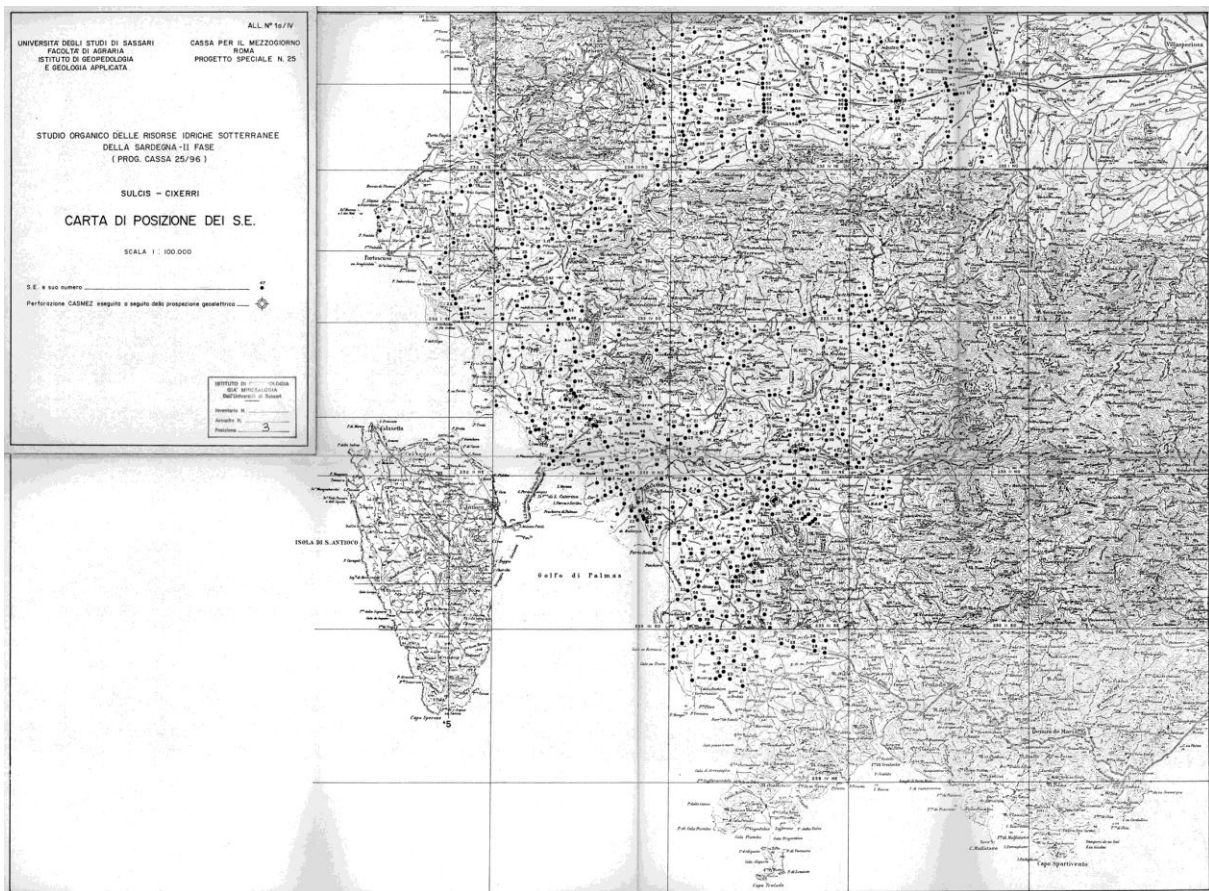


Figura 10 - Curva di resistività apparente

Pertanto il lavoro iniziale ha riguardato la georeferenziazione dei SEV tramite scansione della Carta di Posizione dei SE in scala 1:100.000 (Figura 11) e georeferenziazione della stessa utilizzando il software ArcGIS 10, scegliendo come punti noti i vertici delle tavolette

1:50.000 della Sardegna di cui sono note le coordinate, e come sistema di riferimento quello Gauss-Boaga (Roma 40 - Monte Mario Italy 1).

Tra i vari metodi di interpretazione dei diagrammi di resistività ottenibili da SEV, il più immediato e semplice è quello del confronto per sovrapposizione, totale o parziale, con diagrammi teorici precalcolati. Questi vengono sempre graficati in coordinate bilogaritmiche e presentati in abachi raggruppati per famiglie e tipi (Carrara et al., 1992).



**Figura 11 - Carta di Posizione dei SEV in scala 1:100.000 (CASMEZ, 1984)**

Nel presente lavoro di tesi i valori di resistività apparente ricavati dalle curve di resistività sono stati riprocessati utilizzando il software SEVDos, che permette di ottenere curve di resistività reale e una colonnina elettrostratigrafica in cui sono riportati gli spessori e le resistività dei singoli strati (Figura 12).

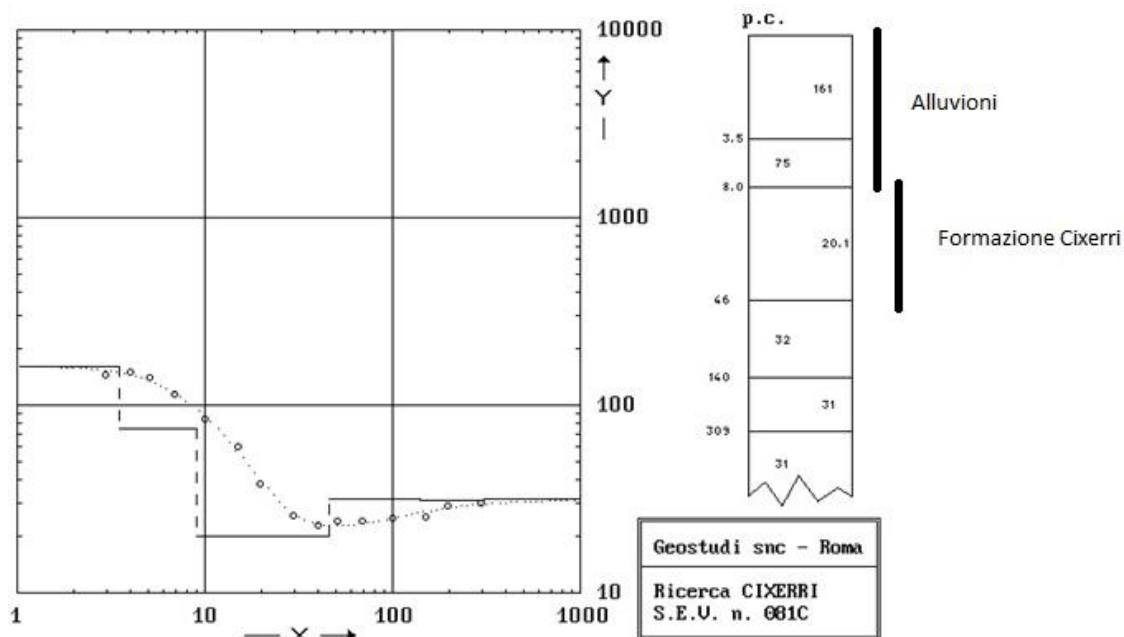


Figura 12 - Curva resistività apparente e interpretazione SEV CIXE081C

Naturalmente una corrispondenza tanto più reale e precisa con la stratigrafia esistente si avrà quanto maggiore sarà il numero di informazioni al contorno, quali stratigrafia della zona, profondità della falda, giacitura degli strati, etc.

L'associazione tra il valore di resistività e la litologia è stata eseguita tenendo conto della stratigrafia dei pozzi situati vicino ad ogni SEV, della geologia di superficie e dei valori di resistività riportati in letteratura (Casmez, 1984) (Tabella 2).

Formazione rocciosa	Resistività ( $\Omega$ .m)
Alluvioni - detriti di falda - parte alterata delle formazioni più antiche	50-500 ohm.m
Formazione arenacea del Cixerri	10-40 ohm.m
Terreni paleozoici (calcari metalliferi più resistenti)	> 100 ohm.m
Complesso trachitico andesitico Resistenti gli intervalli lavici - conduttori tufi argillificati	5-10 ohm.m /400 ohm.m
Marne eoceniche	20-40 ohm.m
Argille quaternarie-Tufi vulcanici argillificati	5-15 ohm
Vulcaniti con strati permeabili, ma che può talvolta inglobare anche alcuni livelli marnosi arenacei	25-100 ohm.m

Tabella 2 - Valori di resistività per le litologie affioranti nella valle del Cixerri (CASMEZ, 1984).

### 2.1.2 Creazione modello geologico 3D

I dati di superficie (Carta geologica, Modelli digitali di elevazione del terreno, immagini da satellite) e i dati profondi (log di pozzi e SEV) sono stati digitalizzati ed utilizzati per la realizzazione del Modello geologico 3D.

Il software utilizzato è 3D MOVE di Midland Valley ([www.mve.com/software/move](http://www.mve.com/software/move)), un'applicazione in grado di fornire un ambiente autonomo per l'integrazione dei dati, la costruzione di sezioni bidimensionali, di modelli 3D e la base per i moduli strutturali specialistici riguardanti la modellazione cinematica, geo-meccanica, di fratturazione e sedimentazione con rappresentazione 2D (bidimensionale) e 3D (tridimensionale).

Il programma permette di rappresentare e visualizzare la superficie del terreno, i contatti geologici tra le varie formazioni e i log stratigrafici, nelle reali posizioni spaziali, in modo da avere una visione globale del modello geologico dell'area.

La realizzazione del modello può essere schematizzata in quattro passaggi fondamentali:

- Creazione sezioni
- Editazione orizzonti
- Realizzazione superfici 3D
- Calcolo volume

La prima fase del lavoro consiste nell'importare all'interno di MOVE la Superficie del DEM, lo shapefile della Carte geologica e i log stratigrafici dei pozzi e dei SEV, digitalizzati e implementati in ambiente GIS, impiegando il software ArcGIS. Per la realizzazione del Modello sono stati selezionati i pozzi e i SEV che intercettavano l'acquifero oggetto di studio e fornivano informazioni utili alla delineazione della superficie del letto dei sedimenti alluvionali quaternari, e nello specifico un totale di 56 pozzi e di 125 SEV (Figura 13).

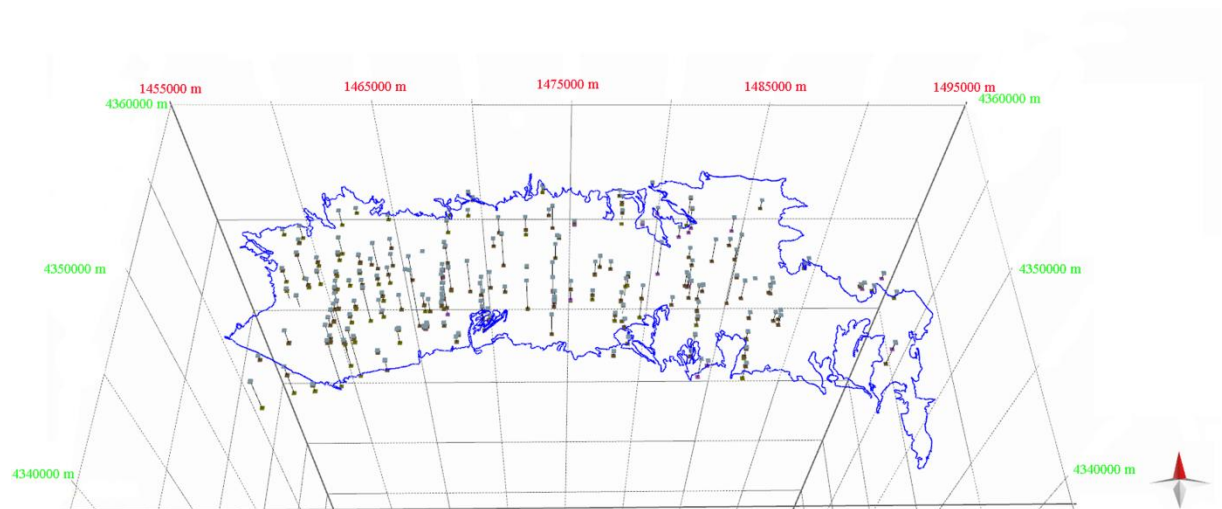
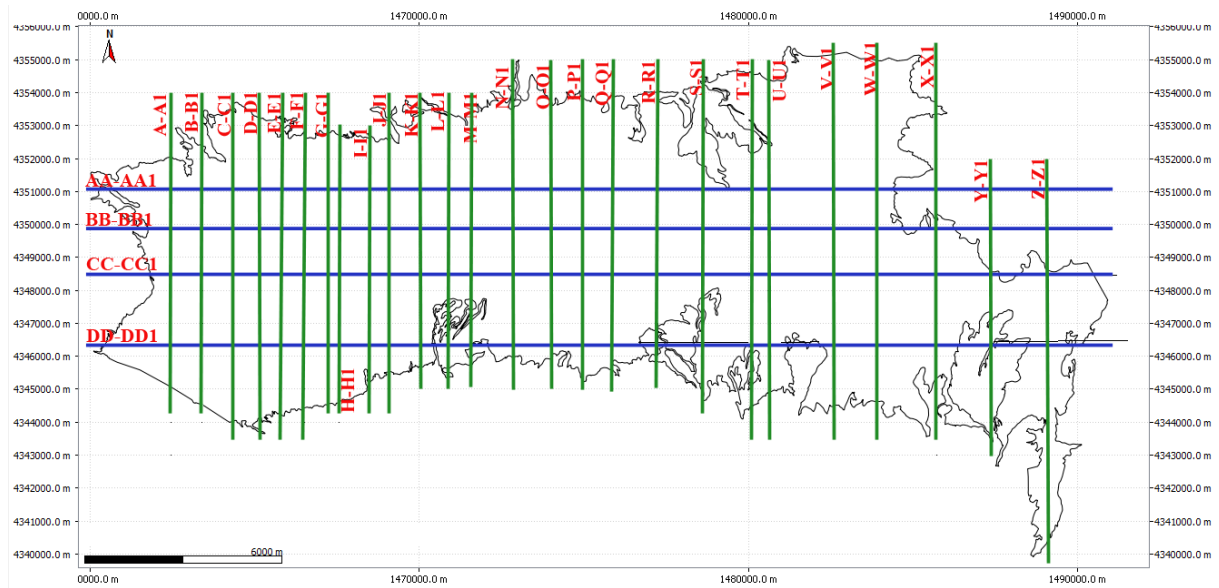


Figura 13 - Localizzazione 3D dei Log stratigrafici (pozzi e SEV) nell'area di studio.

Per costruire la superficie tridimensionale di letto dell'acquifero, sono state realizzate delle sezioni geologiche parallelamente e perpendicolarmente alle strutture principali (26 orientate N-S e 4 W-E) (Figura 14). Le sezioni sono state costruite utilizzando il software MOVE che automaticamente, utilizzando il DEM e uno shapefile lineare, contenente le singole tracce delle sezioni, genera in ambiente 2D un profilo topografico per ogni traccia. Successivamente il programma permette di proiettare, sulla superficie topografica di ogni sezione, i contatti tra le varie litologie e i log stratigrafici dei sondaggi che nella realtà sono posizionati nelle vicinanze della sezione.



**Figura 14 - Tracce delle sezioni geologiche in ambiente 2D.**

Interpretando la cartografia geologica e le stratigrafie dei log, e utilizzando il tool di MOVE “horizon” è stato possibile digitalizzare la base delle alluvioni quaternarie.

Questo passaggio richiede una buona conoscenza della geologia dell'area di studio, una quantità maggiore di informazioni geologiche permette di ricostruire gli orizzonti dei singoli strati in maniera molto più precisa ed accurata oltre che realistica.

Prima di realizzare la superficie 3D, si è effettuata la validazione degli orizzonti creati, verificando l'effettiva coincidenza nei punti di intersezione delle sezioni e soprattutto verificando che ad una esattezza geometrica corrispondesse un'altrettanta correttezza geologica. Quando si sono riscontrate delle anomalie geologiche nella rappresentazione degli orizzonti, sono stati riesaminati e rivalidati i dati di input immessi nel programma, correggendo eventuali errori o modificando errate interpretazioni. Questo procedimento è stato utilizzato fino a ottenere la più corretta rappresentazione geologica possibile.

Il passaggio successivo ha previsto la realizzazione della superficie tridimensionale di separazione tra le alluvioni e le formazioni sottostanti, attraverso la funzione "Surface" di MOVE, che permette di creare delle superfici 3D interpolando i vari orizzonti realizzati, sia come punti di controllo sia come linee, attraverso diversi operatori geometrici, deterministici e geostatistici.

Creando una superficie da punti, i metodi di interpolazione che possono essere applicati sono:

- Delaunay Triangulation;
- Multilevel B-Spline Approximation
- Inverse Distance Weight (IDW)
- Ordinary Kriging

Mentre creando superfici da linee sono i seguenti:

- Linear
- Spline Curves
- Delaunay Triangulation
- Extrusion

Il programma permette di creare le superfici con due tipi di maglie: il mesh e il grid. Il primo tipo di maglia è irregolare e forma dei poligoni, solitamente triangoli, formati dall'unione dei punti di controllo. Il secondo tipo è una maglia regolare quadrata.

Nel presente di lavoro di tesi si è ritenuta più rappresentativa la superficie creata con il metodo di interpolazione Delaunay Triangulation (Delaunay, 1934), basata su punti di controllo. Si tratta di un metodo geometrico di interpolazione triangolare di punti noti, nello specifico linee, quali: gli orizzonti del letto delle alluvioni realizzati per ogni singola sezione, il limite del bacino dell'acquifero, i contatti geologici delle formazioni affioranti all'interno della piana ed infine tutti i 56 pozzi e i 125 SEV, ai quali è stata data profondità pari al contatto tra alluvioni e formazioni sottostanti. È il metodo maggiormente utilizzato per la creazione di modelli del terreno basandosi su dati di superficie e di profondità. Utilizzando il metodo "Delaunay Triangulation" si ha inoltre il vantaggio che durante l'interpolazione non viene aggiunto o rimosso nessun punto, cosa che invece avviene con i metodi deterministici o geostatistici quali IDW o Kriging.

La superficie Mesh creata con il tool "Surface" e con il metodo "Delaunay Triangulation" è stata trasformata in Grid, con cella 10x10m, tramite il tool "Top/Mid/Base Surface" di MOVE che permette di convertire le superfici Mesh in superfici Grid. La superficie di base, così

realizzata, è stata esportata in formato .dxf e successivamente elaborata con il software ArcGIS, in quanto il software MOVE non permette di esportare direttamente formati Raster. La nuvola di punti esportati in formato CAD, prima di essere riconvertita in formato Raster, è stata elaborata per correggere eventuali errori dovuti alla fase di interpolazione (vedi paragrafo successivo).

Una volta creata la superficie di base si è ottenuto il modello geologico 3D, che ci ha permesso di visualizzare in tre dimensioni l'area di studio, di stimare lo spessore delle alluvioni e calcolare il volume totale dei sedimenti che sono sede dell'acquifero oggetto di studio.

Per il volume dei depositi alluvionali, presenti nella porzione di acquifero in studio, è stata utilizzata la funzione di 3D MOVE "Volume Builder Tool" e nello specifico l'algoritmo "create Volume between horizons".

- ***Metodi geostatistici per la creazione di superfici 3D***

Come descritto in precedenza, il programma 3D MOVE offre diversi algoritmi geostatistici per l'interpolazione dei dati stratigrafici 2D al fine di ottenere una superficie 3D.

1. Delaunay triangulation

Metodo basato sull'interpolazione triangolare che sfrutta i punti conosciuti mettendoli in relazione. E' considerato un buon metodo per l'ottenimento di una superficie perché tende a rispettare i valori reali di quota, ma presenta il difetto di appiattire le zone in cui non sono presenti dati. Crea superfici abbastanza irregolari e spigolose.

2. Multilevel B-spline approximation

Metodo che ricostruisce una superficie con caratteristiche di minima curvatura passante esattamente attraverso i punti di controllo utilizzati. E' un metodo valido per superfici "dolci" ma non nel caso in cui ci sono grandi variazioni di quota su brevi distanze, poiché tende a sovrastimare i valori reali.

3. Inverse distance weight (IDW)

Metodo di interpolazione basato sulla media pesata; i punti di misura pesano (quindi esercitano un controllo sulla superficie da ricostruire) sempre meno maggiore è la loro distanza dal nodo (cioè dal punto di controllo), secondo una legge esponenziale. Anche con questo tipo di interpolazione le superfici sono state create usando i due tipi di maglie. Il risultato di questo metodo risulta però approssimativo perché tende a costruire superfici meno curve di quanto ci si aspetterebbe dai dati di partenza considerati (carte geologiche e sezioni geologiche, in questo caso).

#### 4. Ordinary kriging

Metodo di interpolazione lineare che viene utilizzato per stimare il valore di una variabile in un punto in cui essa non è nota. La stima dei valori incogniti si ottiene attuando una media pesata dei punti misurati al contorno; i pesi da attribuire ai punti misurati dipendono non solo dalla distanza tra essi e il punto da predire ma anche dall'andamento dell'autocorrelazione spaziale definita dal variogramma. Esistono diversi tipi di Kriging, il più usato è l'Ordinary Kriging, requisito fondamentale per l'utilizzo è la stazionarietà, la media e la varianza non devono variare nello spazio e nel tempo.

La qualità della superficie 3D ricostruita dipende prevalentemente dal metodo di interpolazione utilizzato. La scelta del metodo appropriato è difficile e spesso dipende dal software utilizzato e dagli obiettivi dello studio (Galera et al., 2003).

La metodica più utilizzata nei lavori di modellazione idraulica è il metodo Delaunay triangulation (Galera et al., 2003 ; Lemon & Jones, 2003; Borraccini et al., 2004; Wycisk et al., 2009)

Uno studio recente (MacCormack et al., 2013) presenta un metodo per valutare l'accuratezza degli algoritmi di interpolazione, Ordinary kriging e IDW, per la creazione di modelli di superficie 3D. Dalle simulazioni effettuate risulta che l'ordinary kriging produce una migliore rappresentazione della superficie rispetto al metodo IDW, indipendentemente dalla distribuzione dei punti usati e dalla complessità della superficie da modellare. Solo nel caso di superfici complesse e un ridotto numero di punti l'algoritmo più accurato risulta l>IDW.

Lo studio di MacCormack et al. (2013), dimostra che non sempre utilizzare un numero elevato di dati puntuali per la creazione di un modello, produca una maggiore accuratezza dello stesso. In alcuni casi si ottiene una maggiore accuratezza a seconda della distribuzione spaziale degli stessi. Risulta inoltre che quando si crea la modellazione di un ambiente geologico semplice, la distribuzione di punti sembra avere un maggior controllo sull'accuratezza dello stesso rispetto al numero di punti utilizzati. Tuttavia, quando si modella una situazione geologica complessa il numero di punti diventa sempre più importante rispetto alla distribuzione spaziale.

- ***Limiti del metodo di interpolazione con il metodo Delaunay triangulation***

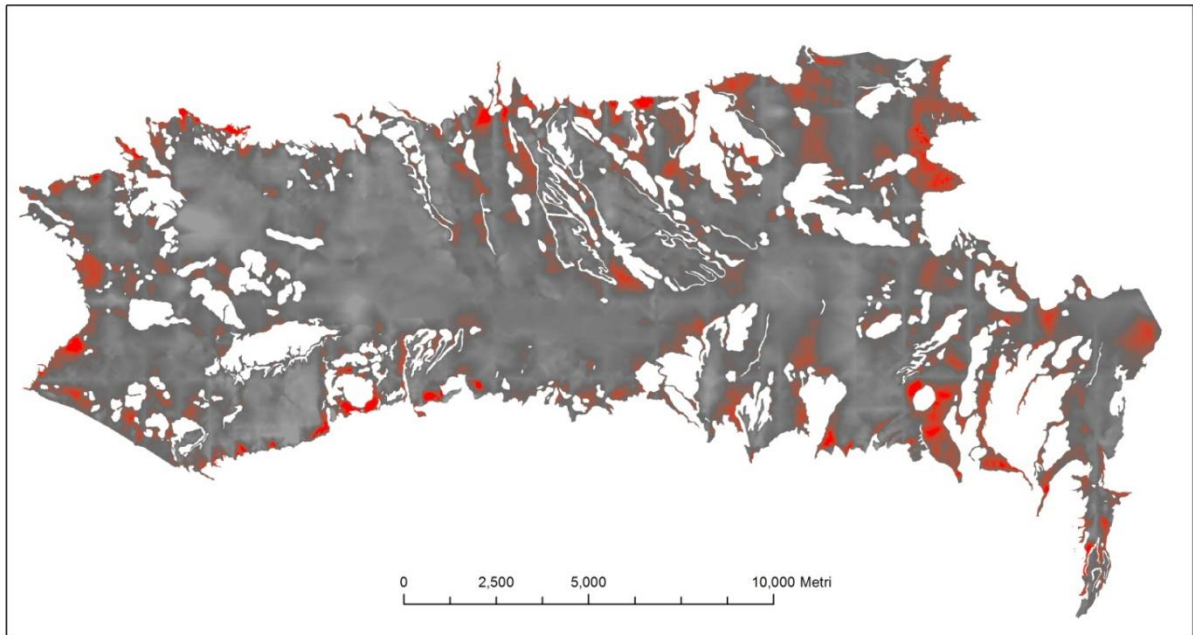
La creazione della superficie di base con il metodo Delaunay triangulation, così come la maggior parte dei modelli matematici derivati dall'interpolazione di dati spaziali non



omogeneamente distribuiti, ha mostrato alcune limitazioni pratiche e sorgenti di errore quali: la densità spaziale dei dati posseduti, le limitazioni della scala di rappresentazione e le limitazioni dovute all'algoritmo di interpolazione. Dopo la creazione della superficie di base, è stata verificata la presenza di errori dovuti al processo di interpolazione. In ogni punto è stata verificata la differenza tra le quote di base ricavate dal file puntuale esportato da MOVE e il DEM. La verifica ha mostrato che in diversi punti la superficie di base presenta quote superiori a quelle del DEM; questo è spiegabile in quanto la superficie creata è un risultato approssimato della realtà. La bontà dell'approssimazione dipende da diversi fattori quali la quantità di dati a disposizione, la loro omogeneità, la loro qualità e dettaglio. Il metodo della "Delaunay Triangulation" crea una superficie mediante la triangolazione dei punti inseriti nel sistema; maggiore sarà il numero di punti utilizzabili, minore sarà la lunghezza dei lati dei triangoli, e migliore sarà la approssimazione della superficie.

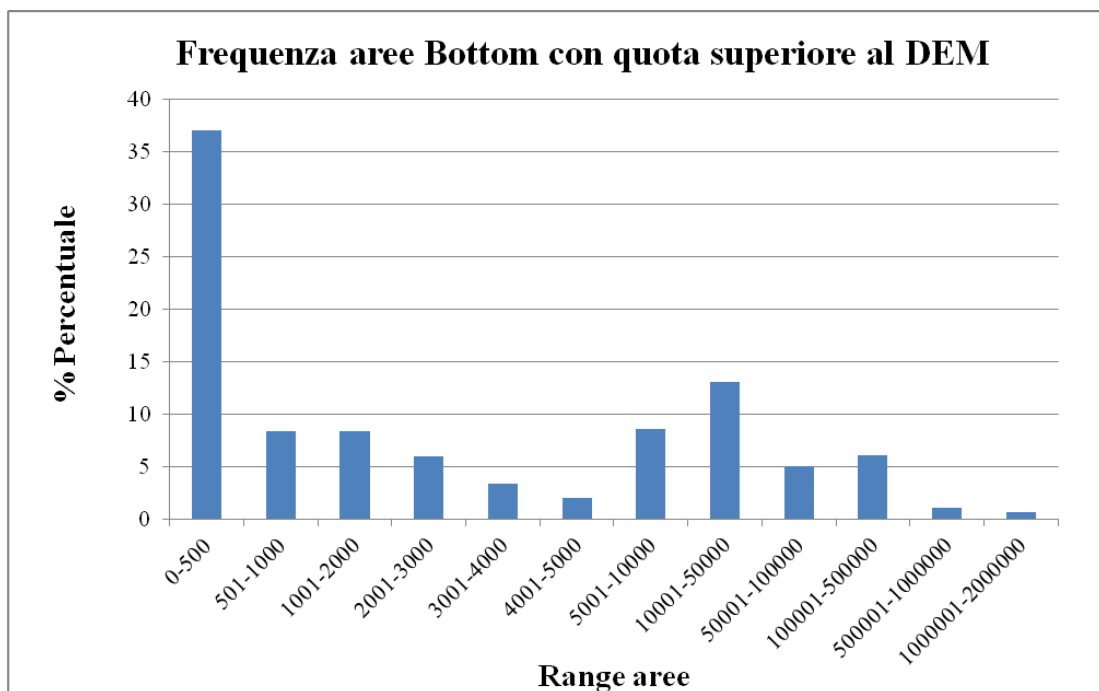
Nella restituzione cartografica lo spessore minimo che può essere rappresentato dipende dalla scala e dall'ampiezza del tratto utilizzato. Generalmente, la cartografia geologica rappresenta uno spessore minimo di 1 m per i depositi quaternari al contatto (Lawley & Garcia-Bajo, 2009). Pertanto, tenuto conto che la scala di dettaglio possibile con i dati a disposizione è 1:10.000, si è deciso di correggere la superficie impostando in tutti i punti in cui la quota della base era superiore a quella DEM una quota pari a un metro al di sotto del DEM. Lo stesso criterio è stato applicato anche alle aree in cui le alluvioni avevano uno spessore inferiore ad un metro. Questa correzione è inoltre utile a garantire il deflusso minimo delle acque nell'acquifero, condizione necessaria per la creazione di un futuro modello di flusso (Sharif et al., 2012).

Su un'area totale della base del bacino di 189.8 kmq, una superficie di 51,36 kmq è risultata avere una quota superiore a quella del DEM. La localizzazione delle aree interessate dal problema evidenziato è mostrata in colore rosso nella figura seguente.



**Figura 15 - Bottom delle alluvioni, in rosso sono indicate le aree con quota superiore al DEM**

Le aree sono situate soprattutto ai bordi della piana, nelle zone adiacenti agli affioramenti delle formazioni non sede dell'acquifero (nella figura le aree di colore bianco), e soprattutto nella parte ad Est della piana, zona in cui la quantità di dati di input era molto limitata. Dalla analisi del risultato ottenuto risulta che il 37% delle superfici che superano la quota del DEM ha un'area inferiore ai 500 mq, il 13 % ha una dimensione areale tra i 10000 e 50000 mq e solo il 2 % supera i 500000 mq.



**Tabella 3- Frequenza aree Bottom con quota superiore al DEM**

## 2.1.3 *Acquisizione e trattamento dei dati idrogeologici*

### 2.1.3.1 **Campagna piezometrica: acquisizione, elaborazione e trattamento dati**

Per la realizzazione del modello idrogeologico 3D è stato necessario rilevare dati idrogeologici nell'area di studio, da implementare nel modello geologico. Sono state realizzate in tutto tre campagne piezometriche, la prima a maggio 2015, la seconda a dicembre 2015 e la terza ad aprile 2016. L'acquisizione dei dati sperimentali è iniziata con uno studio dei dati bibliografici, selezionando dai database forniti da diversi Enti pubblici (Regione Sardegna, Arpas, etc) i pozzi potenzialmente utilizzabili per le indagini idrogeologiche. I criteri utilizzati per la selezione sono stati: acquifero captato, posizione all'interno della piana e accessibilità. La fase successiva è stata il censimento in campagna dei pozzi presenti nell'area. Data l'impossibilità di eseguire misure in tutti i punti d'acqua censiti nel bacino, per il rilevamento piezometrico è stato seguito il criterio della maglia regolare (1 pozzo ogni 2 kmq), ottenendo così una scala di dettaglio del modello al 50.000.

Il rilevamento piezometrico e dei parametri chimici e chimico-fisici dei pozzi è stato realizzato con l'ausilio della seguente strumentazione: un freatimetro (max 100m), un pHmetro, un conduttivimetro, un GPS (Figura 16), alcuni campionatori di diverse dimensioni e la serie completa delle carte topografiche e geologiche del bacino.

Per ogni punto d'acqua, censito e numerato progressivamente, sono stati rilevati i seguenti dati, segnati su una apposita scheda di campagna (Figura 17):

- coordinate Est-Nord e quota, acquisiti tramite GPS Trimble, Juno series;
- località d'ubicazione del pozzo;
- dati costruttivi dell'opera, quali diametro e profondità dell'opera, altezza del boccapozzo ecc.;
- livello piezometrico misurato mediante freatimetro;
- parametri chimico-fisici, mediante misure speditive in situ quali temperatura, pH e conducibilità elettrica attraverso l'utilizzo di un pHmetro (Hanna) e un conduttivimetro portatile (DIST Hanna). Tutti gli strumenti sono stati calibrati quotidianamente con appositi standard.

Range	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mg/L	0-1	1-3	3-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-70	70-90	90-120	>120

Tabella 4 - Codifica dei valori di concentrazione del nitrato

- parametri chimici quali la concentrazione di  $\text{NO}_3^-$ , tramite kit colorimetrico da campagna (Test 5-41 Visocolor Eco – Nitrati della Macherey-Nagel). L'analisi

restituisce il range di concentrazione in cui ricade il campione secondo la seguente scala:

- documentazione fotografica.



**Figura 16 - Rilevamento piezometrico: pozzo, freatimetro, GPS, Conduttimetro e pHmetro.**

Oltre ai rilievi idrogeologici sono state ricavate ulteriori informazioni quali: nominativo del proprietario, anno di perforazione, utilizzo prevalente, potenza della pompa, ove possibile. Inoltre sono state inserite informazioni descrittive sulle condizioni al contorno del pozzo ed in particolare è stata segnalata la presenza di centri di pericolo, soprattutto relativi alle fonti di contaminazione da Nitrato.

L'inquinamento delle risorse idriche è connesso principalmente, in maniera più o meno diretta, alle attività antropiche. Tutte le attività che generano e/o trasmettono un impatto sui

sistemi idrici superficiali o sotterranei sono considerati centri di pericolo (CDP). Questi possono essere di tipo puntuale (pozzi perdenti, discarica, etc.) o diffuso (terreni coltivati, pascoli, etc.).

Sigla_Pozzo			Sigla_vecchi DB			
Foglio CTR			Comune			
Tav IGM			Località			
			Provincia			
Coordinate GPS			Diametro pozzo (mm)			
Lat.			Sezione pozzo			
Long.			Profondità da BP (m)			
Quota			Altezza Boccapozzo (m)			
			Modalità costruzione			
Proprietario			Copertura pozzo			
Indirizzo			Soggiacenza	Livello statico da BP (m)		
recapito tel.				Livello dinamico da BP (m)		
altri recapiti			Uso acque			
			Modalità prelievo			
Litologia	Da (m)	A (m)	Potenza pompa			
			Prelievo istantaneo (l/s)			
			Prelievo estivo (mc)			
			Prelievo invernale (mc)			
			Qualità acque (limpidità/colore)			
			Presenza vegetazione			
Data	Prof. m Prelievo BP	pH	Eh	Temp °C	Conducibilità µS/cm	Nitrati ppm
Note (presenza fonti di contaminazione- Situazione al contorno)						

Figura 17 - Scheda di rilevamento dati

Allo scopo di esaminare la contaminazione da nitrato nella risorsa idrica della piana del Cixerri, è stato compiuto, durante la campagna piezometrica, il censimento dei centri di pericolo esistenti, sia reali che potenziali, sia areali che puntuali.

Nell'area sono state evidenziate diverse fonti di potenziale inquinamento, ricadenti nelle categorie (Civita, 2005), qui di seguito elencate:

- attività agricole;

- attività zootecniche;
- depuratori di acque reflue;
- insediamenti urbani;
- discariche di rifiuti e ssimilabili;
- insediamenti industriali;
- attività minerarie;
- vie di comunicazione.

Conclusa la fase di censimento dei pozzi e la fase di misura, i dati sono stati implementati in un database allo scopo di semplificare e velocizzare tutte le successive operazioni di elaborazione e trattamento degli stessi. Inoltre è stata creata una scheda per ogni pozzo campionato, in cui sono state inserite tutte le informazioni acquisite in campagna e la localizzazione del punto su carta IGM e Ortofoto.

L'elaborazione delle misure di soggiacenza, effettuata tramite Programma Surfer ([www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)), ha portato alla creazione, tramite interpolazione dei dati acquisiti in campagna, delle curve piezometriche, curve di isoconducibilità e curve di isoconcentrazione dei nitrati. Le curve isopiezometriche, dette anche isoidroipse, sono quelle curve immaginarie che congiungono punti avente uguale quota piezometrica, espressa in m s.l.m.m.. Si tratta quindi di linee equipotenziali, ovvero di uguale carico piezometrico, alle quali risultano perpendicolari le linee di flusso. Queste ultime rappresentano le traiettorie che percorrono le particelle d'acqua in movimento; la rete di flusso così costruita consente di stabilire le direzioni di scorrimento delle acque di falda. Le curve di isoconducibilità sono quelle curve immaginarie che congiungono punti di eguale valore di conducibilità elettrica delle acque sotterranee, espresse nel nostro caso in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Ghiglieri et al., 2006).

Per le elaborazioni è stato utilizzato il metodo geostatistico di Kriging.

La geostatistica studia fenomeni regionalizzati che hanno una distribuzione nello spazio e nel tempo, descritti attraverso variabili regionalizzate stazionarie e non stazionarie, esse possono essere isotrope (il valore della variabile non varia lungo una stessa direzione) o anisotrope (il valore della variabile varia lungo una stessa direzione). Il Kriging è un metodo stocastico o probabilistico che permette di stimare i valori di una determinata variabile in punti in cui questa non è nota, con il minor errore possibile.

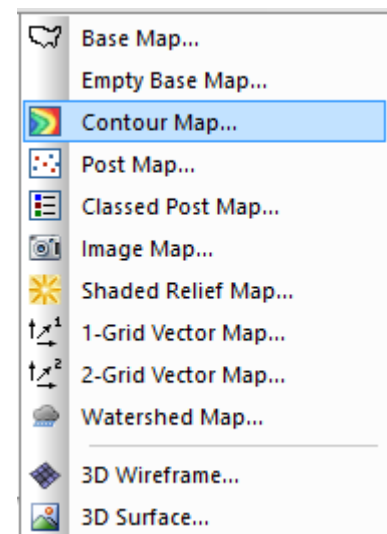
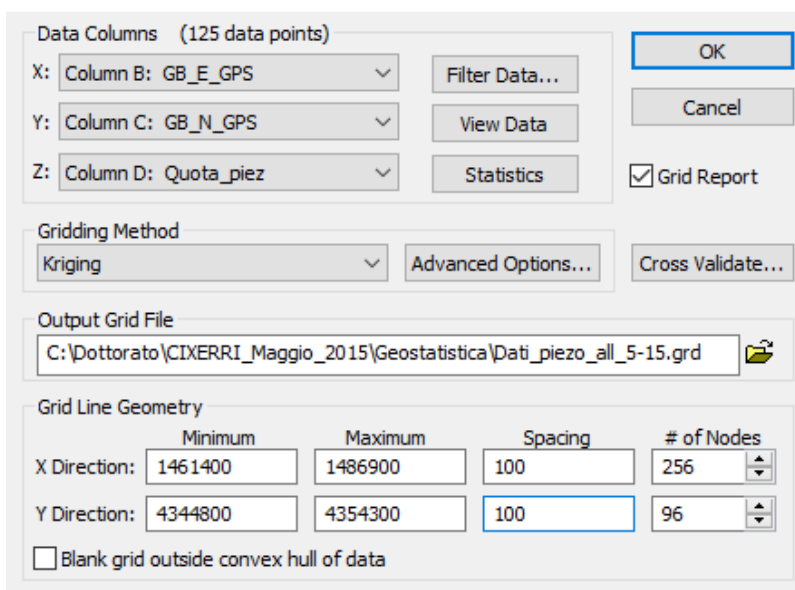
Ogni punto della griglia viene stimato separatamente come media ponderata delle osservazioni note in cui i pesi assegnati per ogni valore di campione noto dipendono dalla correlazione spaziale definita tramite un variogramma (Marinoni, 2003). Il variogramma

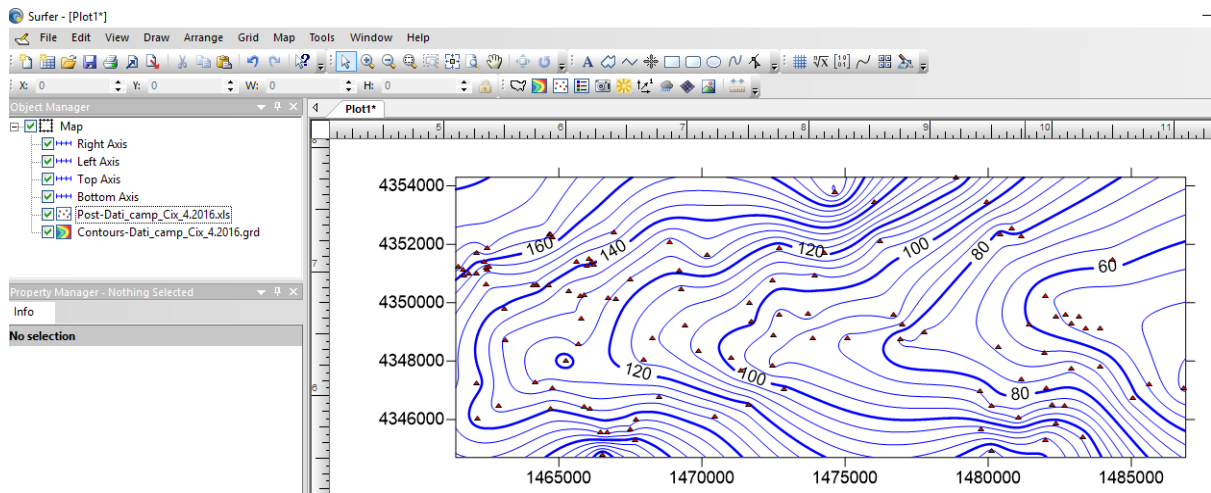
indica come varia, in media quadratica e lungo direzioni fissate, lo scarto dei valori tra due punti (x) e (x+h) all'aumentare di h. In pratica il variogramma quantifica il grado di correlazione dei dati nello spazio e/o nel tempo.

Come tutti i metodi stocastici ha numerosi vantaggi, quali:

- individuazione andamenti regionali;
- possibilità di controllo attendibilità delle correlazioni anche al di fuori dei punti di misura;
- possibilità di quantificare l'errore di stima.

Attraverso il programma Surfer, dati un set di dati puntuali di partenza (coordinate Est e Nord, quota piezometrica, conducibilità elettrica o concentrazione di nitrati, a seconda dell'elaborazione), utilizzando il metodo di interpolazione di Kriging si è ricostruito una superficie GRID (griglia) (Figura 18). Una volta ricavata la griglia, il programma permette di ricavare le curve di isovalori, esportabili in formato shapefile e utilizzabili per successive elaborazioni in ambiente GIS.





**Figura 18 - Passaggi realizzazione del Grid delle curve piezometriche con il software Surfer**

**Per la creazione della curve piezometriche sono stati interpolati con il metodo di Kriging i valori delle quote piezometriche (m), per le curve di isoconducibilità i valori di conducibilità elettrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), mentre per le curve di isoconcentrazione dei nitrati si sono utilizzati un range di valori compresi tra 0-10 (**

Tabella 4), che corrispondono a determinati intervalli di concentrazione del Nitrato ( $\text{mg}/\text{L}$ ), acquisiti in campagna con il kit colorimetrico.



### 2.1.3.2 Acquisizione dati di permeabilità, in laboratorio e in situ

La conducibilità Idraulica è un parametro essenziale nei modelli fisicamente basati per la simulazione del flusso d'acqua e il trasporto chimico nei terreni (Köhne et al., 2011).

Ci sono diversi metodi e tecniche in situ e in laboratorio per misurare la conducibilità idraulica. I metodi più comuni includono il permeometro (Hvorslev, 1951; Chen, 2000, 2007; Todd & Mays, 2005; Kennedy et al., 2008), lo Slug Test (Cey et al., 1998; Springer et al., 1999; Landon et al., 2001) e la prova di pompaggio (Kelly & Murdoch, 2003). Inoltre, la conducibilità idraulica può essere calcolata mediante relazioni empiriche fra  $K$  e vari parametri statistici granulometrici quali la media geometrica, la moda o il diametro efficace (Vukovic & Soro, 1992; Kasenow, 2002; Song et al., 2009).

Sebbene si possano utilizzare molti metodi per determinare la conducibilità idraulica di sedimenti non consolidati, ogni metodo ha i suoi limiti di applicazione (Uma et al., 1989). Rispetto agli altri metodi, quelli basati sulla granulometria sono meno costosi e più facili da ottenere e quindi i più utilizzati (Alyamani & Sen, 1993; Song et al., 2009)

Pertanto, vista l'impossibilità di eseguire misure di permeabilità in situ mediante prove di pompaggio a causa della geometria dei pozzi censiti e per i costi, si è scelto di stimare il valore della conducibilità idraulica ( $K$ ) da curve granulometriche e da prove di infiltrazione in situ con l'infiltrometro a doppio anello (Haise et al., 1956).

- ***Analisi granulometriche: acquisizione, elaborazione e trattamento dati***

La prima fase del lavoro ha previsto il prelievo di campioni di sedimento nell'area oggetto di studio su cui eseguire un'analisi granulometrica. La localizzazione dei siti da campionare è frutto di una scelta ponderata, basata sullo studio bibliografico pregresso e sulle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'area; si è pertanto cercato di prelevare un numero congruo di campioni significativi, che fossero rappresentativi di tutte le tipologie di sedimento presenti nell'area di studio (Figura 19, Tabella 5).

In ogni sito di campionamento è stata prelevata, mediante differenti tecniche prelievo, una quantità di sedimento a profondità variabili (da 40 cm a 2 m), che fosse il più possibile inalterata e rappresentativa. Preliminarmente, a novembre 2015, si è effettuato un prelievo del campione mediante una perforatrice a miscela Cobra Atlas Copco, che ha permesso di effettuare perforazioni fino a 2 m di profondità e di ottenere un campione indisturbato (carote 1x0.05 m) (Figura 20).

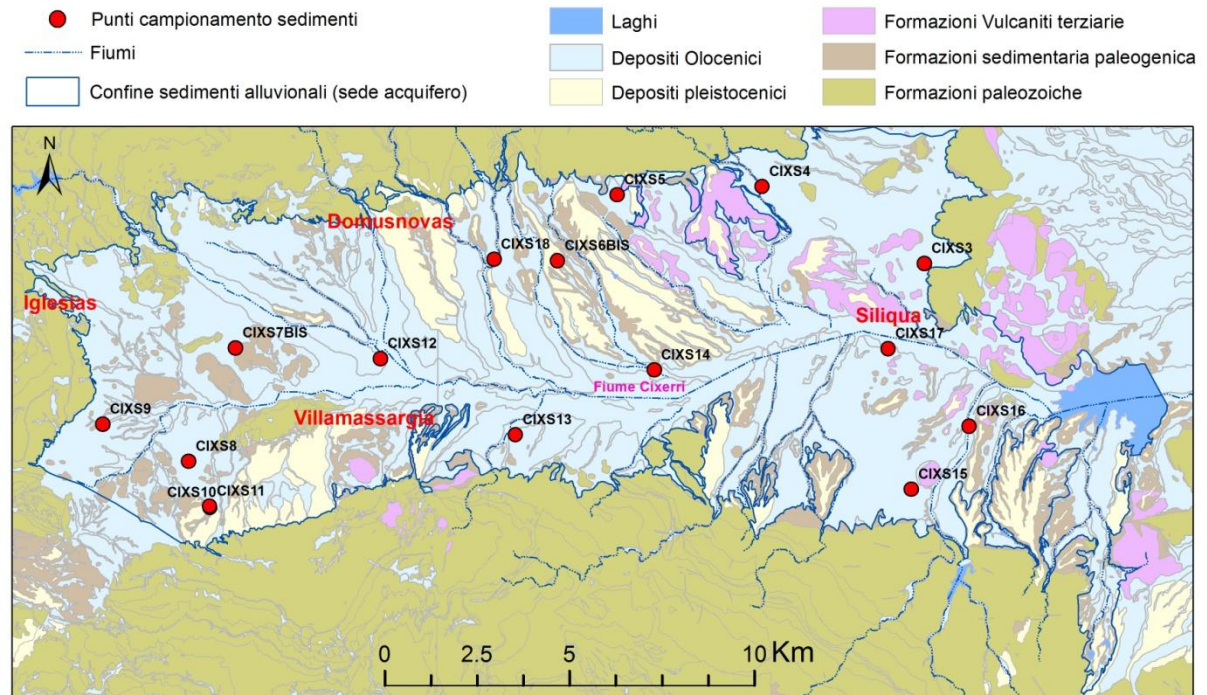


Figura 19 - Carta Posizionamento Punti Campionamento Sedimenti

Nome Campione	Coordinata X GB	Coordinata Y GB	Quota	Metodo prelievo	Profondità di prelievo materiale
			m		m
CIXS1	1461704.32	4350925.79	160.00	Perforatrice Cobra Atlas Copco	0-2
CIXS2	1466118.47	4351446.64	140.27	Perforatrice Cobra Atlas Copco	0-1
CIXS3	1484360.59	4351577.88	116.00	Vanga e piccozza	0.10-0.20
CIXS4	1479971.78	4353658.62	157.00	Vanga e piccozza	0.10-0.25
CIXS5	1476051.04	4353435.50	190.00	Vanga e piccozza	0.30-0.50
CIXS6bis	1466634.95	4350227.98	177.00	Vanga e piccozza	0.50-0.70
CIXS7bis	1464453.58	4346226.01	184.00	Vanga e piccozza	0.50-0.70
CIXS8	1462129.54	4347232.43	191.00	Vanga e piccozza	0.60-0.70
CIXS9	1465031.61	4344976.16	212.00	Vanga e piccozza	1.10-1.20
CIXS11	1465026.18	4345014.66	212.00	Vanga e piccozza	0-1
CIXS12	1469649.17	4349008.20	154.00	Vanga e piccozza	2-2.40
CIXS13	1473299.69	4346942.29	148.00	Vanga e piccozza	0.90-1
CIXS14	1477053.09	4348696.42	123.00	Vanga e piccozza	0.90-1
CIXS15	1484013.46	4345470.86	131.00	Vanga e piccozza	1.80-2
CIXS16	1485577.94	4347176.89	101.00	Vanga e piccozza	0.90-1
CIXS17	1483386.39	4349273.01	56.00	Vanga e piccozza	1-1.10
CIXS18	1472718.78	4351692.40	151.00	Vanga e piccozza	1-1.10

Tabella 5 - Coordinate punti di campionamento, metodi e profondità di prelievo campione



**Figura 20 - Prelievo del campione inalterato con la perforatrice Cobra Atlas Copco**

In un secondo momento, giugno 2016, sono stati prelevati i campioni del sedimento utilizzando una vanga e una piccozza, che hanno permesso di scavare la superficie del terreno fino a profondità tali da ottenere un campione inalterato. Durante questa seconda fase di campionamento sono stati prelevati campioni sia scavando la superficie, sia lungo trincee presenti in loco (Figura 21).



**Figura 21 - Prelievo del campione inalterato sotto la prima porzione di suolo**

In campo è stata effettuata una prima descrizione del campione: colore (utilizzando la tavola di Munsell), consistenza, grado di coesione, dimensione e litologia dei clasti. Una volta prelevato, il campione è stato conservato all'interno di una busta porta-campione, preventivamente siglata con il nome di riconoscimento e richiusa ermeticamente (Figura 22). Oltre al prelievo del campione è stata effettuata la localizzazione del punto di prelievo mediante l'acquisizione delle coordinate con il GPS Juno Trimble serie 3 e un piccolo rilievo fotografico.



**Figura 22 - Conservazione campione**

Le analisi granulometriche dei sedimenti sono state effettuate procedendo con la quartatura, lavaggio, asciugatura e setacciatura dei campioni trattenuti al setaccio da 63  $\mu\text{m}$  (Folk, 1980), con intervallo, su Scala Krumbein (Krumbein, 1934) di un  $\Phi$ . La frazione passante al 63  $\mu\text{m}$  è stata caratterizzata per via umida mediante sedimentazione secondo la legge di Stokes. I dati ottenuti dalla setacciatura e dalla sedimentazione sono stati inseriti in un foglio di calcolo ed è stata realizzata la curva granulometrica, dove viene messo in relazione la percentuale passante, in ordinate, e la dimensione dei grani in scala logaritmica, in ascisse.

Per la stima della permeabilità si sono utilizzati diversi metodi empirici basati sull'equazione presentata in Vukovic & Soro (1992).

$$K = \frac{\rho g}{\mu} C \phi(n) D_e^2$$

Dove

K = conducibilità idraulica;

g = accelerazione di gravità;

$\rho$  = densità fluida.

$\mu$  = viscosità dinamica;

C = coefficiente dipendente dalle caratteristiche del mezzo poroso

$\phi(n)$  = funzione della porosità

$D_e$  = diametro efficace dei grani

Il calcolo della conducibilità idraulica è stato eseguito alla temperatura standard di 25°C con un valore del parametro  $\frac{\rho g}{\mu}$  pari a  $11.21 \cdot 10^4$  1/ms .

I valori di C,  $\phi(n)$  dipendono dai diversi metodi di analisi utilizzati, mentre la porosità (n) è derivata dalla relazione empirica con il coefficiente di uniformità (Vukovic & Soro, 1992; Kasenow, 2002), come riportato nelle seguente formula:

$$n = 0.255 (1 + 0.83^U)$$

dove

U = coefficiente di Uniformità ( $d_{60}/d_{10}$ )

$d_{60}$ ,  $d_{10}$  = dimensione dei grani corrispondente a una determinata % (al 60% e al 10%) di peso passante attraverso i setacci.

Di seguito vengono elencate alcune tra le più diffuse e testate formule empiriche, basate sempre sulla equazione di Vukovic & Soro (1992), ma aventi C, f(n) e campi di applicazione differenti.

- **Hazen:** 
$$K = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2$$

la formula di Hazen, originariamente sviluppata per determinare la conducibilità idraulica di una sabbia uniformemente gradata, ma anche sedimenti, tra sabbia fine e ghiaia, con coefficiente di uniformità inferiore a 5 e il diametro efficace dei grani compreso tra 0.1 e 3 mm.

- **Kozeny - Carman:** 
$$K = \frac{g}{v} \times 8.3 \times 10^{-3} \left[ \frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}^2$$

L'equazione di Kozeny-Carman è una delle più validate e utilizzate per la determinazione della permeabilità in funzione delle caratteristiche del terreno (Odong, 2007). Non è adatta per suoli aventi grani di diametro superiore ai 3 mm e per suoli argillosi (Carrier, 2003).

- **Breyer:** 
$$K = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U} d_{10}^2$$

L'equazione di Breyer è ritenuta adatta per materiali aventi una distribuzione eterogenea e grani scarsamente sortiti, con coefficiente di uniformità tra 1 e 20, e dimensione effettiva dei grani tra 0.06 mm e 0.6 mm.

- **Slitcher:** 
$$K = \frac{g}{v} \times 1 \times 10^{-2} n^{3.287} d_{10}^2$$

Questa è ben applicabile su sedimenti con dimensione dei grani tra 0.01 e 5 mm.

- **Terzaghi:** 
$$K = \frac{g}{v} \cdot C_t \cdot \left( \frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$$

dove  $C_t$  è il coefficiente di sorting ed è compreso tra  $6.1 \times 10^{-3}$  e  $10.7 \times 10^{-3}$ . È adatta maggiormente a sabbia grossolana (Cheng & Chen, 2007).

- **USBR:** 
$$K = \frac{g}{v} \times 4.8 \times 10^{-4} d_{20}^{0.3} \times d_{20}^2$$

Nella formula USBR la conducibilità idraulica viene calcolata in base a al diametro efficace dei grani  $d_{20}$  (corrispondente al 20 % di passante attraverso i setacci), inoltre la funzione della

porosità è pari a 1. La formula è applicabile su sabbie medie con coefficiente di uniformità pari a 5 (Cheng & Chen, 2007).

Per campioni con alto valore del coefficiente di uniformità Urumovic & Urumovic (2014) propongono l'utilizzo del modello di Kozeny-Carman in cui al posto del valore del diametro efficace  $d_{10}$ , viene sostituito il valore della media geometrica della dimensione dei grani. Infatti utilizzando i valori di diametro efficace medio o il  $d_{10}$  il modello di Kozeny-Carman restituisce valori corretti di permeabilità solo per campioni poco assortiti. La ragione è che in natura i campioni di origine alluvionale mostrano un ampio range di diametri per i quali la media geometrica risulta più rappresentativa. L'affidabilità del metodo proposto è stata confermata dalla buona correlazione riscontrata fra la conducibilità idraulica calcolata e quella misurata in situ e in laboratorio (Urumović & Urumović Sr, 2014) .

Il calcolo delle permeabilità è stato effettuato utilizzando il software HydrogeoSieveXL (Devlin, 2015). HydrogeoSieveXL è un programma disponibile gratuitamente che calcola i valori di conducibilità idraulica  $K$  mediante curve di distribuzione granulometriche utilizzando 15 differenti metodi empirici (Devlin, 2015).

Oltre alle formule precedentemente descritte, HydrogeoSieveXL ne utilizza altre otto, si seguito elencate.

Source	$N$	$\phi(n)$	$d_e$	Applicable Conditions
Sauerbrei (1932) <sup>a</sup> (Vuković and Soro, 1992)	$(3.75 \times 10^{-5}) \times \tau$ $\tau \cong 1.093 \times 10^{-4} T^2 + 2.102 \times 10^{-2} T + 0.5889$	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	$d_{17}$	sand and sandy clay $d_{10} < 0.05$ cm
Krüger (1919) <sup>a</sup>	$4.35 \times 10^{-4}$	$\frac{n}{(1-n)^2}$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta w_i}{d_i}}$	medium sand $U > 5$ $T = 0$ °C
Zunker (1930) <sup>a</sup>	0.7 × 10 <sup>-3</sup> for nonuniform, clayey, angular grains 1.2 × 10 <sup>-3</sup> for nonuniform coarse grains 1.4 × 10 <sup>-3</sup> for uniform, coarse grains 2.4 × 10 <sup>-3</sup> for uniform sand, well rounded grains	$\frac{n}{(1-n)}$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^m \Delta g_i \frac{d_i^g - d_i^d}{d_i^g d_i^d \ln \left( \frac{d_i^g}{d_i^d} \right)}}$	no fractions finer than $d = 0.0025$ mm
Zamarin (1928) <sup>a</sup>	$8.65 \times 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1-n)^2} C_n$ $C_n = (1.275 - 1.5n)^2$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^m \Delta g_i \frac{\ln \left( \frac{d_i^g}{d_i^d} \right)}{d_i^g - d_i^d}}$	Large grained sands with no fractions having $d < 0.00025$ mm
Barr (2001)	$\frac{1}{(36)5C_s^2}$ $C_s^2 = 1$ for spherical grains $C_s^2 = 1.35$ for angular grains	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	$d_{10}$	unspecified
Alyamani and Sen (1993)	1300	1.0	$[I_o + 0.025(d_{50} - d_{10})]$	unspecified
Chapuis (2004)	$\frac{\mu}{\rho g}$	$10^{1.291\xi - 0.6435}$ $\xi = \frac{n}{1-n}$	$d_{10} \left( \frac{10^{(0.5504 - 0.2937\xi)}}{2} \right)$	$0.3 < n < 0.7$ $0.10 < d_{10} < 2.0$ mm $2 < U < 12$ $d_{10}/d_5 < 1.4$
Krumbein and Monk (1942)	$7.501 \times 10^{-6}$	$e^{(-1.31 \times \sigma_\phi)}$ $\sigma_\phi = \frac{d_{84\phi} - d_{16\phi}}{\frac{d_{95\phi} - d_{5\phi}}{6.6}}$	$2 \left( \frac{d_{16\phi} + d_{50\phi} + d_{84\phi}}{3} \right)$	natural sands with lognormal grain size distribution

Tabella 6 - Equazioni empiriche software HydrogeoSieveXL (Devlin, 2015).

I dati necessari per il calcolo della conducibilità idraulica (numero dei setacci, dimensione della maglia, peso totale del campione e peso passante attraverso i setacci) vengono inseriti nel programma tramite una schermata di input (Figura 23).



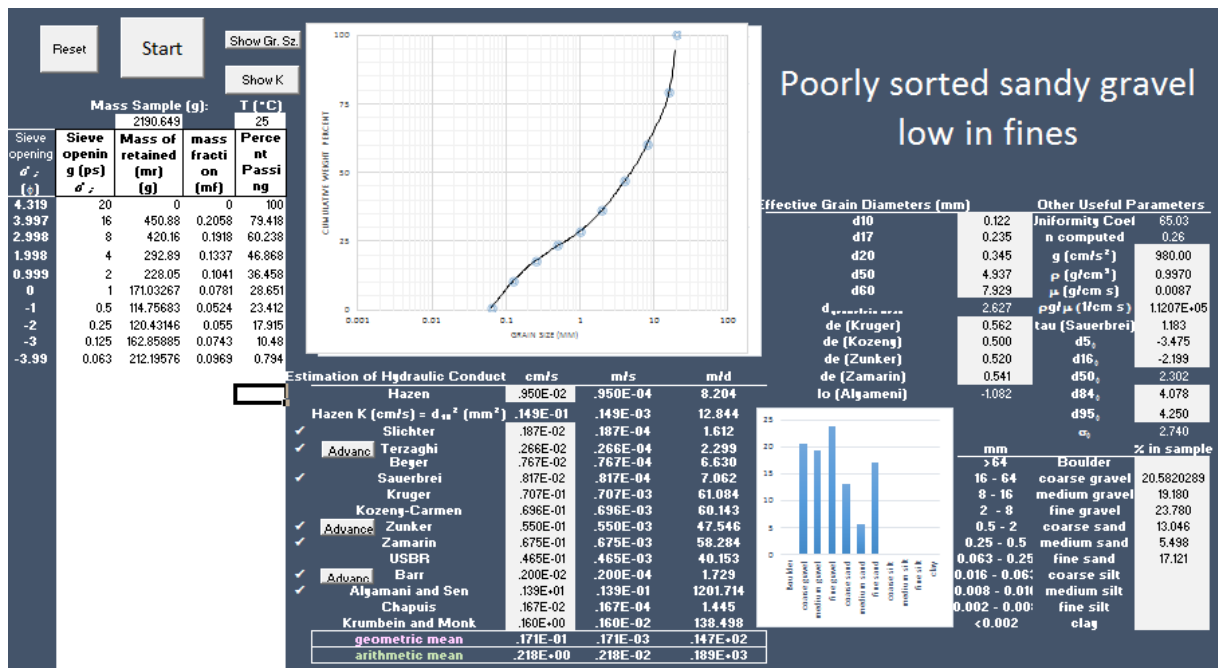


Figura 23 - Schermata di input software HydrogeoSieveXL (Devlin, 2015).

Il programma in automatico produce un report relativo alla analisi granulometrica e uno relativo alla conducibilità idraulica in cui sono vengono riportati i valori di K (in cm/s, m/s, m/d) ottenuti da ognuna delle 15 equazioni empiriche, sia numericamente che graficamente (Figura 24).

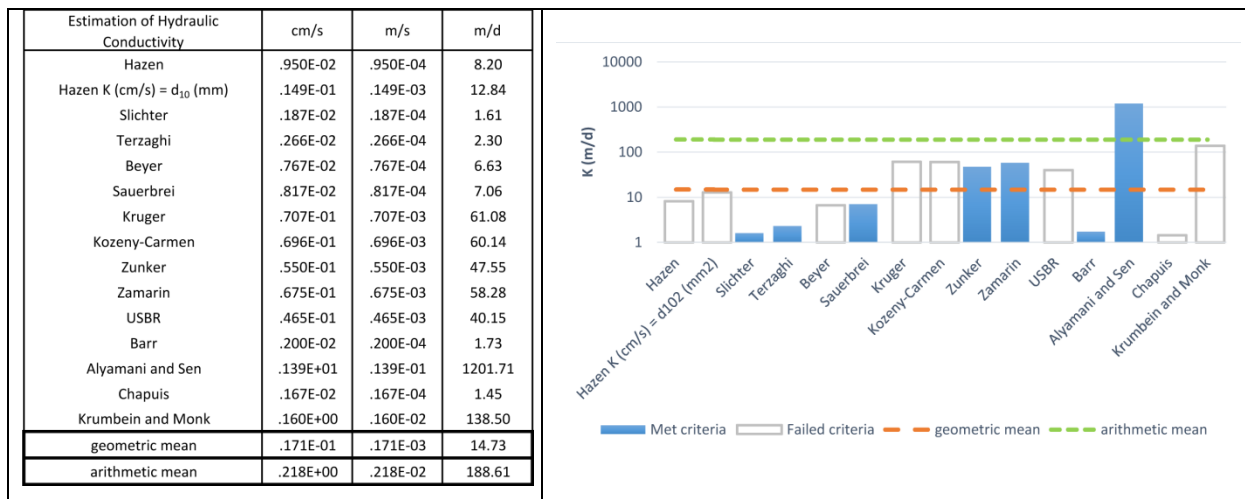


Figura 24 - Report Conducibilità idraulica software HydrogeoSieveXL (Devlin, 2015).

I valori di porosità sono stati calcolati sia usando l'equazione empirica di Vukovic e Soro (1992), sia come rapporto tra volume dei vuoti su volume totale, secondo la formula:

$$n = 1 - \gamma_d / \gamma_s$$

in cui  $\gamma_d$  è Peso specifico secco (peso di volume secco) espresso, in g/cm<sup>3</sup>, dalla formula

$$\gamma_d = W_s/V$$

e  $\gamma_s$  Peso specifico del solido (o dei granuli) espresso, in  $\text{g/cm}^3$ , dalla formula

$$\gamma_s = W_s/V_s$$

La porosità efficace ( $n_e$ ) è stata stimata a partire dalla porosità totale (Water Supply Paper, USGS; Johnson, 1967), e nello specifico, visto che i sedimenti alluvionali costituenti la piana del Cixerri sono sabbie e ghiaie non uniformi, il suo valore è inferiore al 10% della porosità ( $n$ ).



L'abbassamento del livello dell'acqua nell'anello interno è stato determinato con intervalli di tempo crescenti (15 sec, 1 min, 2 min, fino ad arrivare a 60 min). La prova veniva conclusa quando il tasso di infiltrazione raggiungeva un valore costante.



**Figura 26 - Prove di infiltrazione**

Il processo di infiltrazione è spiegato dalla teoria di Green & Ampt (1911), metodo che consente una descrizione più pertinente, ma semplificata, del processo di infiltrazione. L'infiltrazione, derivata dalla legge di Darcy, è così espressa:

$$F = K_{sat} (H_w + D - H_f) / D$$

Dove F si riferisce alla capacità di infiltrazione, K alla conducibilità idraulica del terreno allo stato saturo,  $H_w$  è lo spessore dello strato di acqua, D si riferisce alla profondità del fronte di saturazione e  $H_f$  si riferisce al carico idraulico.

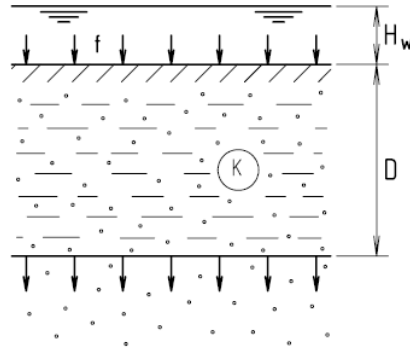


Figura 27 - Descrizione fenomeno d'infiltrazione nel suolo (Green & Ampt, 1911)

La capacità di infiltrazione del suolo diminuisce rapidamente con l'andare del tempo, come mostrato in Figura 28, dovuto alla saturazione del suolo, fino a raggiungere un valore costante, che esprime la capacità di infiltrazione del suolo (Infiltrazione permanente), che equivale approssimativamente alla conducibilità idraulica allo stato saturo.

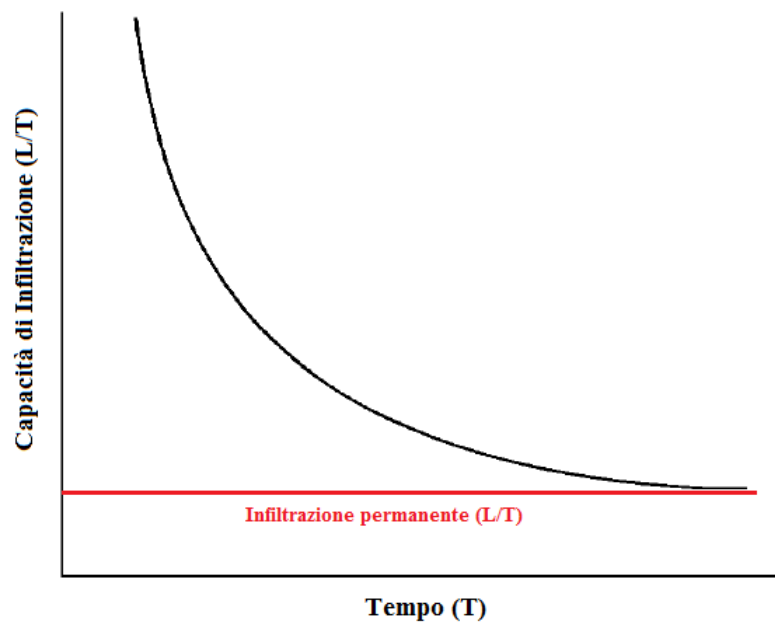


Figura 28 - Grafico Tempi/Capacità di infiltrazione

#### **2.1.4 Stima del bilancio idrogeologico e potenzialità degli acquiferi**

È di fondamentale importanza conoscere il volume delle acque che ricaricano il nostro acquifero, per poter programmare una corretta gestione della Risorsa idrica sotterranea.

Il bilancio idrogeologico è la stima della quantità di acqua in entrata ed in uscita da un sistema acquifero ed è regolato dalla seguente equazione:

$$P = ETR + R + I$$

P = Precipitazione (mm/anno)

ETR = Evapotraspirazione reale (mm/anno)

R = Ruscellamento superficiale (mm/anno)

I = infiltrazione efficace (mm/anno)

Il calcolo del bilancio è riferito all'area delle alluvioni quaternarie site all'interno della piana del Cixerri, stessa areale utilizzato per la realizzazione del modello geologico 3D.

Per il calcolo del bilancio idrogeologico sono state fatte alcune assunzioni; vista l'impossibilità di reperire dati esaustivi, si è considerato nulla l'entità dei prelievi dalla falda, che risultano comunque irrilevanti, esistendo in zona la condotta idrica del Consorzio di bonifica del Cixerri. Inoltre si è considerata solo la ricarica zenitale, e assumendo come assente la ricarica artificiale legata all'irrigazione.

Sono stati utilizzati i dati di 9 stazioni pluviometriche (Tabella 7) ricadenti nell'area di studio, facenti parte della stazioni storiche dell'Ente Idrografico della Sardegna, e reperibili sul sito della Regione Sardegna. Su queste stazioni è stato calcolato il bilancio idrogeologico per il ventennio 1989-2009.

<b>Nome</b>	<b>X_GB</b>	<b>Y_GB</b>	<b>Z</b>	<b>Anni</b>
Decimomannu (Vivaio)	1497500.00	4349950.00	15.00	1989-2009
Flumentepido	1455280.00	4337780.00	60.00	1989-2009
Iglesias	1460250.00	4351290.00	193.00	1989-2009
S.Giovanni Domusnovas	1467790.00	4354270.00	170.00	1989-2009
Siliqua	1483390.00	4350230.00	53.00	1989-2009
Terraseu	1467690.00	4339510.00	325.00	1989-2009
Vallermosa	1482420.00	4357110.00	70.00	1989-2009
Villamassargia	1468980.00	4347460.00	154.00	1989-2009

**Tabella 7 - Coordinate stazioni storiche**

Si è poi calcolato il bilancio annuale per il triennio 2013-2015, acquisendo i dati da 6 stazioni termo-pluviometriche (Tabella 8) facenti parte del sistema di monitoraggio della Regione Sardegna. I dati sono stati forniti dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna (Arpas), Dipartimento Specialistico Regionale Meteo Climatico.

<b>Nome</b>	<b>X_GB</b>	<b>Y_GB</b>	<b>Anni</b>
Campanassissa	1480413.77	4340172.81	2013-2015
Cixerri Meteo	1490998.62	4347705.53	2013-2015
Iglesias	1462355.61	4350257.07	2013-2015
Punta Gennarta	1461031.50	4353778.38	2013-2015
San Michele	1465918.95	4354495.73	2013-2015
Vallermosa	1482971.17	4358416.24	2013-2015

**Tabella 8 - Coordinate stazioni attuali**

I singoli valori di pluviometria e di temperatura sono stati calcolati con il Metodo dei topoietai su reticolo di Thiessen, che prevede la suddivisione dell'intero territorio in topoietai, indicanti le aree di influenza di ogni singola stazione di misura. Per ogni topoietao, avente una determinata area (mq), si ottiene il valore di precipitazioni (mm) e di temperature (°C) relativi alla stazione ubicata all'interno dello stesso. Attraverso una semplice media ponderata, si ricava la lama d'acqua riferita a tutto il dominio idrogeologico.

$$L_m = [P_1 * (A_1/A_t)] + [P_2 * (A_2/A_t)] + [P_n * (A_n/A_t)]$$

Dove

$P_1, P_2, P_n$  = altezze di precipitazione (mm/anno) misurate nei singoli pluviometri;

$A_1, A_2, A_n$  = aree (mq) delle porzioni dei singoli topoietai ricadenti nell'area di studio;

$A_t$  = area totale (mq) del dominio idrogeologico in studio.

Per il calcolo della Evapotraspirazione reale è stata utilizzata la formula di Turc (Turc, 1954). Metodica più utilizzata per studi idrogeologici, adatta a regioni diverse e particolarmente idonea per climi temperati come il nostro. Altro aspetto a favore di questa metodica è la possibilità di correggere i dati di temperatura dell'aria con i valori di piovosità.

Essa valuta l'evapotraspirazione reale media annua (ETR):

$$ETr = \frac{P}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{0.5}}$$

$$L = 300 + 25 T_c + 0,05 T_c^3$$

$T_c$  = temperatura media annua corretta (°C)

$P$  = precipitazione media annua (mm/anno)

Per gli ambienti semiaridi del Mediterraneo, per temperature medie annue comprese tra 10 °C e 18 °C, Santoro (1970) propone una modifica del parametro  $L$  con  $L = 586 - 10 T + 0,05 T^3$ .

La differenza tra precipitazioni e evapotraspirazione reale si ottiene il valore delle precipitazioni efficaci (PE), che corrispondono al deflusso idrico globale.

$$PE = R + I = D$$

Il deflusso idrico globale è dato dalla somma dei deflussi superficiali ( $R$ ) e di quelli sotterranei ( $I$ ):

$$D = R + I$$

$R$  = ruscellamento superficiale, ossia la quantità d'acqua che scorre sulla superficie del suolo andando ad alimentare l'idrografia superficiale;

$I$  = infiltrazione; quantità d'acqua che si infiltra nel sottosuolo.

Per il calcolo dell'infiltrazione efficace si è fatto riferimento alle metodiche descritte in Civita (2005).

$$I_{eff} = PE \chi \quad (\text{mm/anno})$$

$I_{eff}$  = infiltrazione efficace annua (mm/anno)

$PE$  = precipitazione efficace annua (mm/anno)

$\chi$  = coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.)

Quest'ultimo consente di definire la percentuale di acqua che si infiltra tenendo conto delle caratteristiche litologiche del complesso idrogeologico (con scarsa copertura di suolo o con roccia affiorante). Nelle Tabella 9 e Tabella 10 sono riportati i valori del coefficiente di



infiltrazione potenziale (c.i.p.) per ogni litotipo presente in letteratura, e i coefficienti di infiltrazione potenziale (c.i.p.) per ciascun affioramento del complesso idrogeologico della Piana del Cixerri, ricavato dalla carta geologica in scala 1.25.000 (RAS, 2008).

<b>Litologia</b>	<b>c.i.p. %</b>	<b>Litologia</b>	<b>c.i.p. %</b>
Calcari	90 – 100	Lave	90 – 100
Calcari dolomitici	70 – 90	Depositi piroclastici	50 – 70
Dolomie	50 – 70	Piroclastiti e lave	70 – 90
Calcari marnosi	30 – 50	Rocce intrusive	15 – 35
Detriti grossolani	80 – 90	Rocce metamorfiche	5 – 20
Depositi alluvionali	80 – 100	Sabbie	80 – 90
Depositi argillosi	5 – 25	Sabbie argillose	30 – 50

**Tabella 9 - Dati di letteratura del coefficiente di infiltrazione potenziale per ciascun litotipo (Civita, 2005).**

<b>Affioramento</b>	<b>Superfici (mq)</b>	<b>C.i.p</b>
Centri Abitati	4213014	0.3
Depositi antropici	224748	0.3
Alluvioni recenti	165900884	0.8
Alluvioni Antiche	22772701	0.8
Formazione del Cixerri	15943480	0.2
Vulcaniti Terziarie	5035240	0.6
Metamorfico Paleozoico	6099687	0.2

**Tabella 10 - Coefficiente di infiltrazione potenziale per ciascun affioramento nell'area di studio**

Analogamente il ruscellamento superficiale si ottiene dalla differenza tra il deflusso idrico globale (D) e l'infiltrazione efficace.

$$R = D - I_{eff}$$

Una volta ricavati tutti i parametri del bilancio idrogeologico, è possibile stimare le riserve regolatrici, ovvero il volume d'acqua che annualmente ricarica l'acquifero. Questo valore, espresso in metri cubi, si ottiene moltiplicando le infiltrazioni efficaci per l'area del bacino idrogeologico (A) di cui si è calcolato il bilancio.

$$\text{Riserva regolatrice} = I_{eff} * A$$

### **2.1.5 Campagna idrogeochimica: acquisizione, elaborazione e trattamento dati**

Per stimare le caratteristiche qualitative delle risorse idriche sotterranee a luglio 2015 si è eseguito uno studio idrogeochimico su 15 pozzi e 6 punti di acqua superficiali (Figura 29). I pozzi su cui eseguire le indagini geochimiche sono stati scelti fra quelli censiti durante la campagna piezometrica. I criteri utilizzati per la scelta dei punti da campionare sono stati la posizione rispetto alle direzioni di deflusso della falda, il grado di contaminazione da nitrati e la distanza dai centri di pericolo. I punti d'acqua superficiali sono stati campionati sull'asta principale del Rio Cixerri e su tre suoi affluenti, per valutare la qualità delle acque che si immettono nel Rio Cixerri e la provenienza di eventuali contaminanti riscontrati durante l'analisi.

Il prelievo del campione, nei pozzi dotati di pompa sommersa, è stato sempre preceduto dal pompaggio fino a stabilizzazione dei parametri di pH e conducibilità. Tuttavia in alcuni pozzi privi di pompa è stato impossibile eseguire il pompaggio preventivo, e per il campionamento è stato utilizzato un secchio in plastica. In ogni sito sono stati presi tre aliquote di campione per l'esecuzione delle analisi di laboratorio. Tutte le aliquote sono state filtrate *in situ* con filtri di policarbonato aventi pori da 0,2 micron, e stabilizzate a seconda dell'analisi a cui erano destinate. L'aliquota per l'analisi degli anioni è stata lasciata tal quale mentre le aliquote per l'analisi dei metalli e dell'As sono state stabilizzate rispettivamente con HNO<sub>3</sub> 1% e con HCl 0.5% . I campioni sono stati riposti in una borsa termica e poi conservati in frigo alla temperatura di 4°C, fino alla esecuzione delle analisi.

Su tutte le stazioni di campionamento sono stati determinati *in situ* i seguenti parametri:

- la temperatura dell'acqua e dell'aria in °C, con termometro digitale;
- il pH, per via potenziometrica con l'elettrodo di Ross, modello Orion 230A;
- l'Eh in mV, per via potenziometrica con elettrodo al platino, modello Orion Star A324, e il valore corretto mediante confronto con la soluzione di Zobell (Nordstrom, 1977);
- la conducibilità elettrica in µS/cm e in mS/cm, misurata con conduttimetri portatili modello DIST 3 e 4 HANNA;
- l'alcalinità in meq/L per via volumetrica usando come titolante HCl 0.01N e come indicatore del viraggio il Metilarancio;
- l'Ossigeno disciolto in mg/L con kit da campo 6014 HCK TITRATEST OSSIGENO;
- i nitrati in mg/L con kit da campo VISOCOLOR® ECO Nitrate.

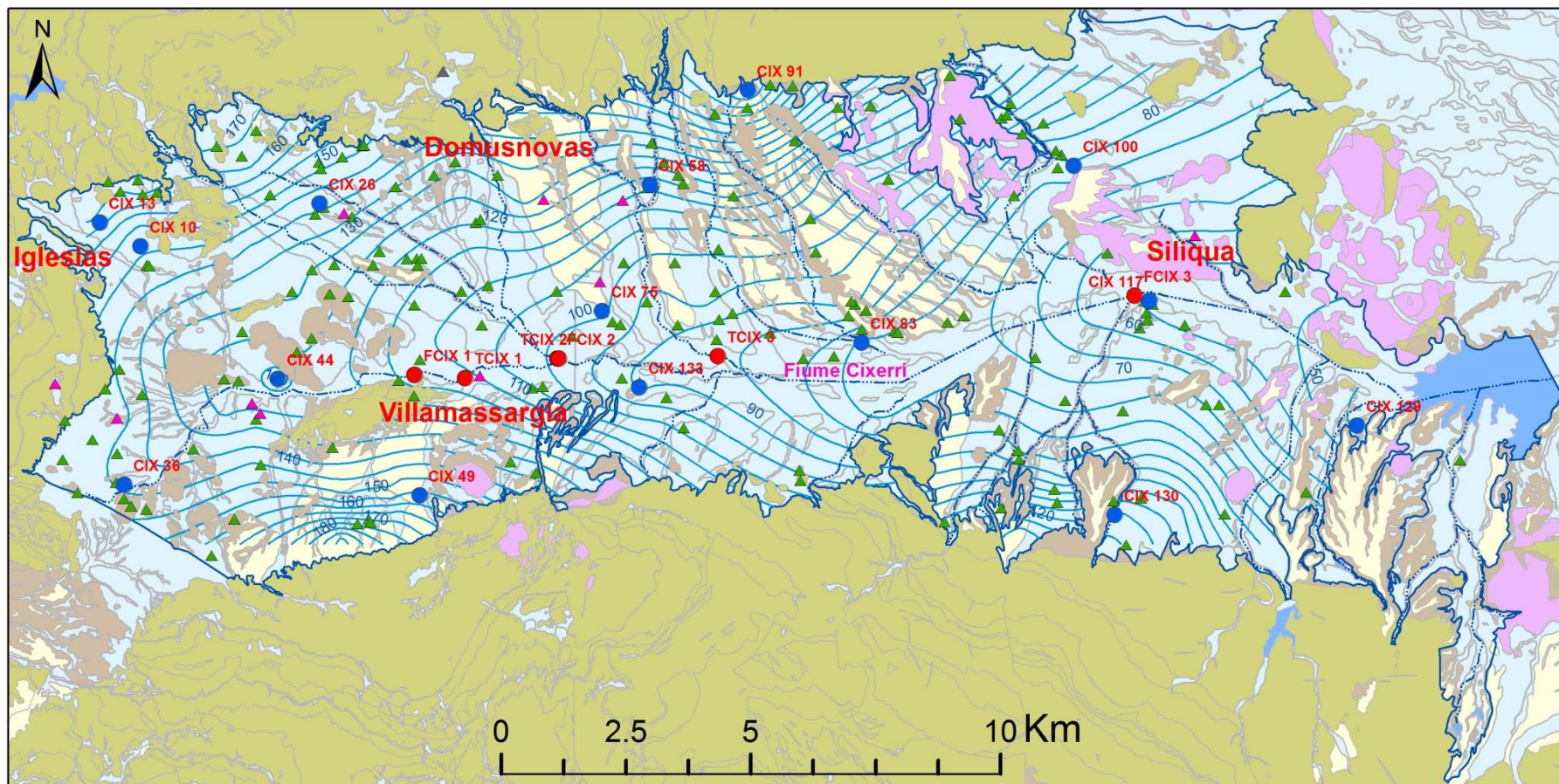
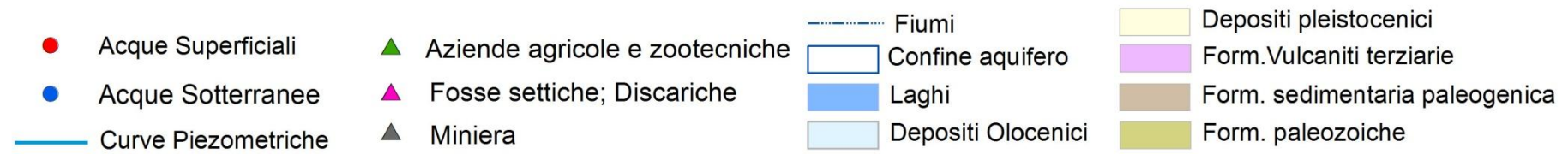


Figura 29 - Carta dei punti di campionamento idrogeochimico 29 e 31/07/2015

Per la misura delle diverse specie chimiche disciolte nelle acque sono state utilizzate le metodiche analitiche standard per la determinazione degli ioni maggiori e per gli ioni minori. I campioni acidificati con 1% HNO<sub>3</sub> sono stati analizzati con spettrometria di emissione atomica a plasma ad accoppiamento induttivo (ICP-OES) e in spettrometria di massa con sorgente di plasma ad accoppiamento induttivo (ICP – MS). I campioni non acidificati invece furono analizzati con la cromatografia ionica (IC) (Tabella 11).

	IC	ICP-MS	ICP-OES
Ag		X	
Al		X	
As		X	
B		X	X
Ba		X	X
Be		X	
Bi		X	
Br	X		X
Ca	X		X
Cd		X	
Cl	X		
Co		X	
Cr		X	
Cu		X	
F	X		
Fe		X	X
Ga		X	
K	X		X
Li	X	X	
Mg	X		X
Mn		X	X
Mo		X	
Na	X		X
Ni		X	
NO <sub>2</sub>	X		
NO <sub>3</sub>	X		
Pb		X	
Rb		X	
S	X (come SO <sub>4</sub> )		X
Se		X	
Si			X
Sr		X	X
Te		X	
Tl		X	
U		X	
V		X	
Zn		X	X
HCO <sub>3</sub>	Potenziometria con il metodo di GRAN		

**Tabella 11 - Analisi effettuata per ogni campione.**

Durante il campionamento sono state preparate delle soluzioni di bianco, e analizzati insieme ai campioni per verificare la eventuale contaminazione dell'acido durante il campionamento. Il limite di rilevabilità (DL) per gli elementi chimici è stato calcolato come 10 volte la

deviazione standard delle letture del Bianco (Jarvis et al., 1992). Per valutare l'accuratezza e la precisione delle analisi, sono stati utilizzati campioni duplicati e soluzioni standard internazionali (SRM-I643, EnviroMAT™ EP-H-3 e EP-L-3). Inoltre, è stato usato il rodio come standard interno per analisi ICP-MS per correggere la deriva strumentale. L'equilibrio ionico è sempre inferiore a  $\pm 5\%$ .

Il calcolo della speciazione e dell'equilibrio delle le fasi minerali è stato effettuato attraverso l'utilizzo del software PHREEQC (<http://water.usgs.gov/software>), fornito dal servizio geologico americano U.S.G.S.; il valore dell'indice di saturazione (IS) di ogni specie mineralogica viene calcolato come  $IS = \log IAP/Ks$  dove IAP rappresenta il prodotto delle attività ioniche delle specie in soluzione e Ks la costante di equilibrio di solubilità della stessa specie ad una specifica temperatura dell'acqua (Parkhurst & Appelo, 1999).

- ***Analisi statistiche: Analisi delle componenti principali (PCA)***

Per la semplificazione dei dati geochimici e per l'individuazione delle diverse famiglie di acque sotterranee è stata utilizzata l'analisi statistica multivariata, che permette di interpretare un grande set di dati, e nello specifico l'analisi delle componenti principali (PCA).

Questa tecnica riduce le numerose e diverse variabili originarie in un numero inferiore più facilmente confrontabile, tramite la trasformazione lineare delle variabili di partenza. Si sviluppa calcolando la matrice di covarianza dei dati, che definisce il grado di correlazione tra le variabili stesse, al fine di ridurre l'abbondanza di variabili e rappresentare la varianza delle stesse utilizzando un numero inferiore di componenti principali. Le componenti principali sono variabili non correlate che hanno una grande varianza. I dati vengono poi proiettati in un nuovo sistema cartesiano in cui gli assi coincidono con le principali componenti e non più con le variabili originali.

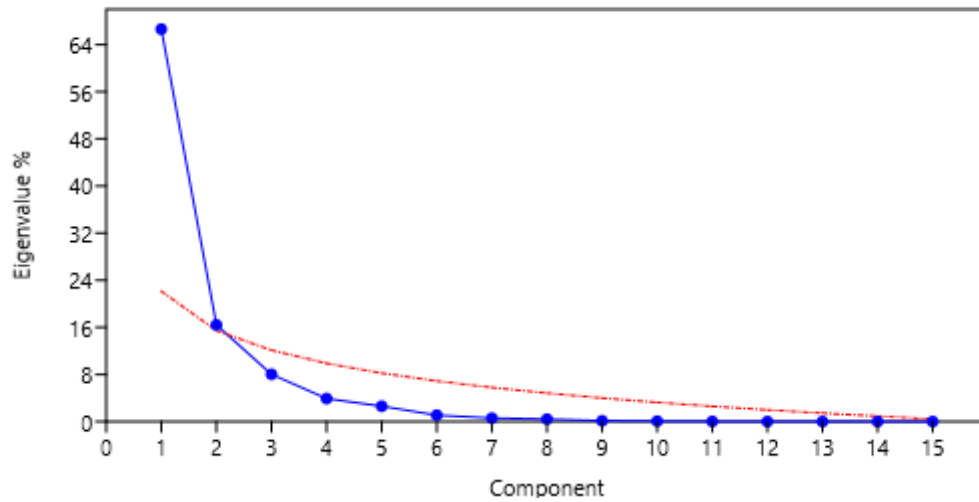
L'utilizzo dei nuovi assi cartesiani consente di raffigurare la natura multivariata dei dati in due dimensioni. Per semplificare l'interpretazione e integrare tutte le informazioni, è possibile rappresentare in un unico grafico, chiamato biplot, sia le componenti principali sia le variabili. Le componenti principali rappresentano le direzioni di massima correlazione tra i dati, pertanto la prima componente principale è orientata verso le direzioni di massima correlazione, mentre le successive verso le direzioni di scarsa correlazione.

La scelta del numero di componenti che rappresentano il campione è regolata da tre criteri:

1. Quota di varianza totale spiegata
2. Scree-graph
3. Eigenvalue one o Regola di Kaiser

Secondo il primo criterio si deve considerare un numero di componenti principali aventi una percentuale significativa (in genere pari al 80-90%) di varianza totale. Tale percentuale varia in base al numero di variabili di partenza, maggiore è il numero minore può essere la percentuale di varianza spiegata.

Il secondo criterio, si basa sull'utilizzo di un grafico, chiamato scree-graph, che mette in relazione gli autovalori con le Componenti Principali (PC). Nello specifico potranno essere considerate tutte le componenti principali i cui autovalori ricadono nella parte della curva antecedenti la rottura di pendenza (Figura 30).



**Figura 30 - Scree-graph**

Il terzo criterio noto come Eigenvalue one o Regola di Kaiser (Kaiser, 1958), raccomanda di considerare tutte le CP il cui autovalore è maggiore di 1.

L'utilizzo della PCA sui dati geochimici permette di ridurre la variabilità delle componenti analizzate in un unico dato, favorendo pertanto l'analisi simultanea di tutti quei parametri che controllano la variabilità dei dati. Inoltre, se combinato con la analisi spaziali, la PCA può essere un valido strumento per l'identificazione dei processi che regolano l'evoluzione delle acque sotterranee, oltre che il flusso delle acque sotterranee regionali (Raiber et al., 2012).

### ***3 Risultati***

In questo capitolo sono riportati i principali risultati ottenuti, durante i tre anni di dottorato, a seguito di attività di campo, di laboratorio e di modellizzazione, utilizzati per la realizzazione di un modello concettuale geologico e idrogeologico dell'acquifero alluvionale della piana del Cixerri,. Lo studio aveva come obiettivo la valutazione dello stato quantitativo e qualitativo dell'acquifero, e in particolar modo aveva lo scopo di stimare e capire la dinamica e contaminazione da nitrati.

Il primo luogo si è delineata la geometria dell'acquifero in secondo luogo sono state ricostruite le caratteristiche idrogeologiche e idrogeochimiche dello stesso, in fine, sono state utilizzate le informazioni desunte dalle fasi precedenti per capire la dinamica dell'acquifero, la geochimica delle acque e l'individuazione dei centri di pericolo.



### 3.1 Modello geologico e idrogeologico 3D

#### 3.1.1 Dati di input

- *Log stratigrafici pozzi*

Per la realizzazione del modello geologico tridimensionale sono stati utilizzati 56 log stratigrafici di pozzi, i cui dati sono stati acquisiti dall'ISPRA (2010). Dalle stratigrafie è stato possibile valutare lo spessore delle alluvioni, queste variano tra un metro e 12 metri con una media aritmetica di 4.7 m.

Analizzando le classi di frequenza (Grafico 1) si riscontra che il 34 % delle alluvioni ha uno spessore compreso tra i 2 e i 4 metri, e in totale nell'80% dei campioni il letto delle alluvioni si trova ad una profondità compresa tra 0 e 6 m.

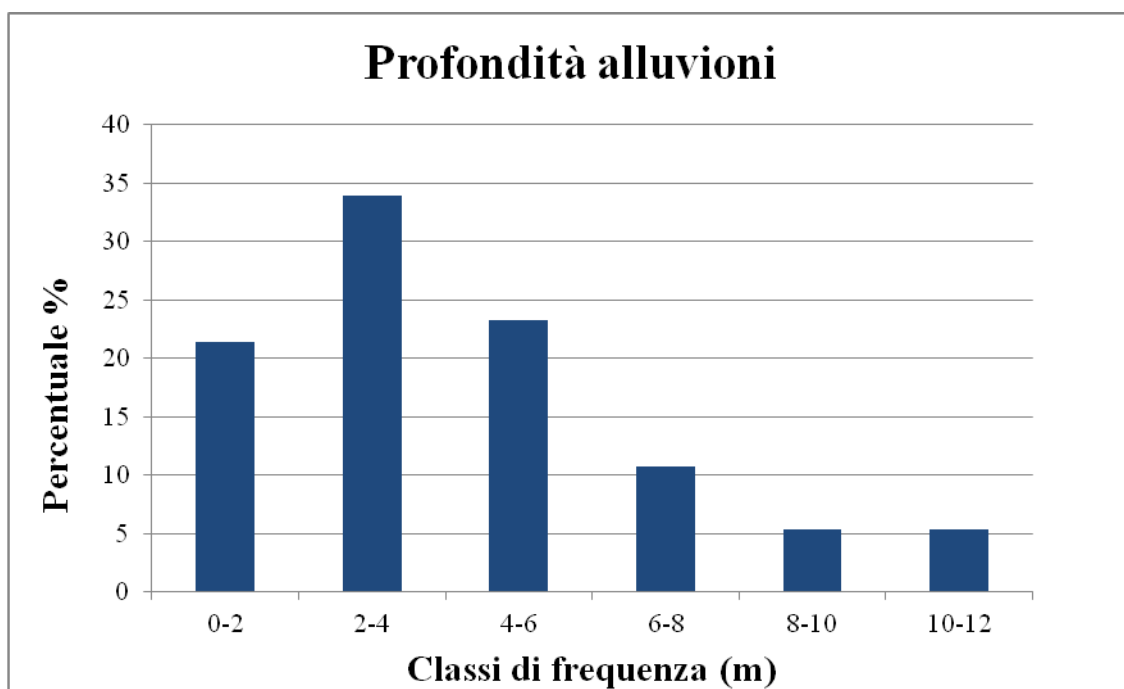


Grafico 1 - Classi di frequenza sulla profondità delle alluvioni (da Pozzi ISPRA)

- *SEV*

Per la ricostruzione del Modello Geologico dell'acquifero alluvionale quaternario del Cixerri sono stati utilizzati oltre i dati dei pozzi anche dati geofisici, e nello specifico sondaggi elettrici verticali (SEV). I SEV, acquisiti dalla letteratura, sono stati realizzati dall'Università di Sassari nell'ambito della II fase del Progetto Speciale n.25 della Cassa per il Mezzogiorno (1984), riguardante lo studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna.

Per il lavoro di tesi i SEV sono stati rielaborati e reinterpretati, utilizzando la metodologia precedentemente descritta. Si sono così ottenuti 173 log stratigrafici (descritti in Appendice) che hanno permesso di ricostruire la geologia profonda. Di questi soltanto 125 sono stati utilizzati per la creazione del modello, poiché ricadenti all'interno del limite dell'acquifero e soprattutto attraversavano le alluvioni quaternarie.

Dall'analisi delle stratigrafie risulta che lo spessore delle alluvioni non è molto considerevole, infatti varia tra i 20 metri e un metro con una media aritmetica di 5.5 m.

Analizzando le classi di frequenza (Grafico 2) si riscontra che il 35 % delle alluvioni ha uno spessore compreso tra i 2 e i 4 metri, e in totale nell'80% dei campioni il letto delle alluvioni si trova ad una profondità compresa tra 0 e 8 m.

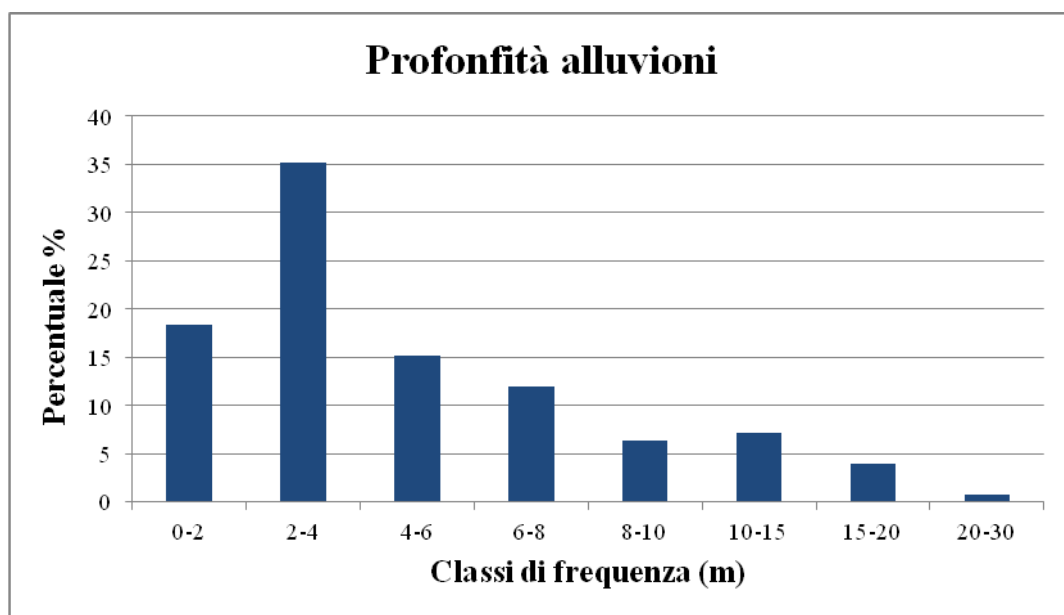


Grafico 2 - Classi di frequenza sulla profondità delle alluvioni (da SEV)

### 3.1.2 Modello geologico 3D

Il modello geologico 3D, realizzato utilizzando i log stratigrafici dei pozzi e dei Sondaggi Elettrici Verticali, e le sezioni geologiche orientate N-S e E-W (Figura 31), ha permesso di ricostruire la superficie di contatto tra le alluvioni della piana del Cixerri e le formazioni di letto (Vulcaniti terziarie, Formazione del Cixerri e metamorfiti paleozoiche). Come si può vedere nella Figura 32 e Figura 33) la superficie si approfondisce da Ovest verso Est e dai bordi della piana verso il centro, con quote che variano tra i 260 m e i 24 m s.l.m.

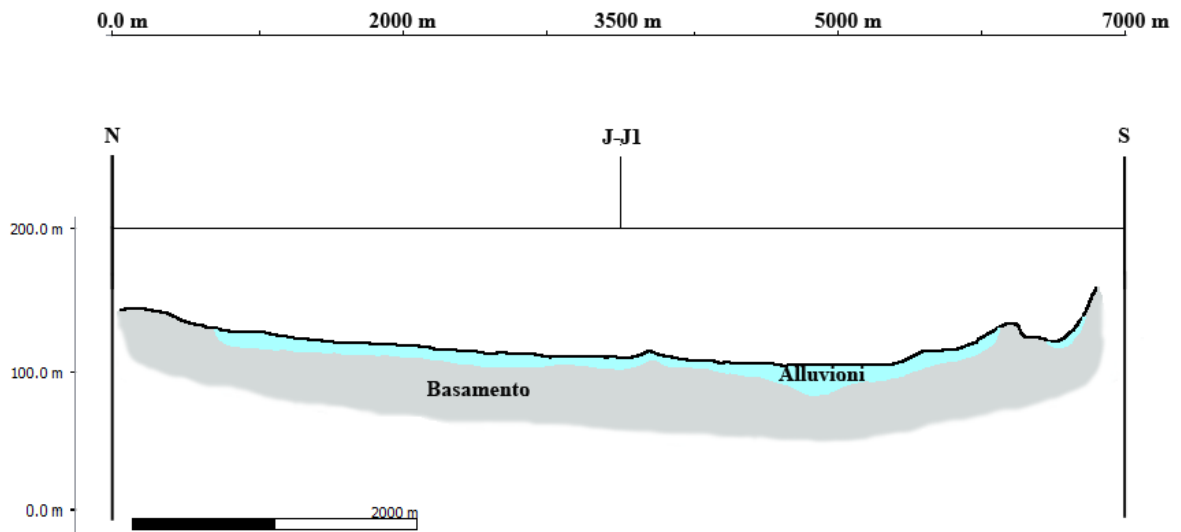


Figura 31- Sezione J-J1 direzione Nord-Sud (esagerazione quote 10x).

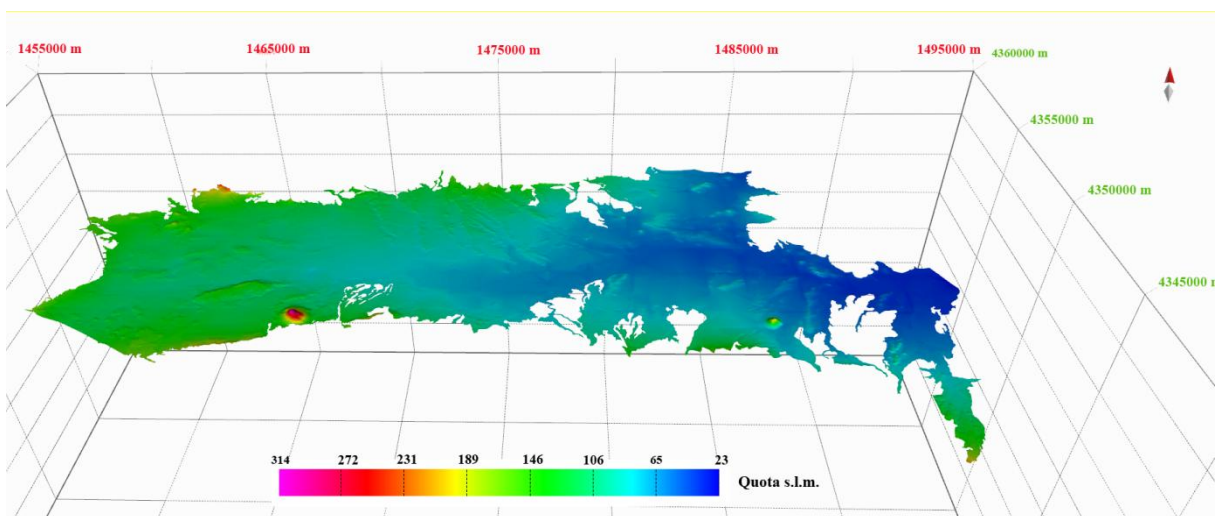
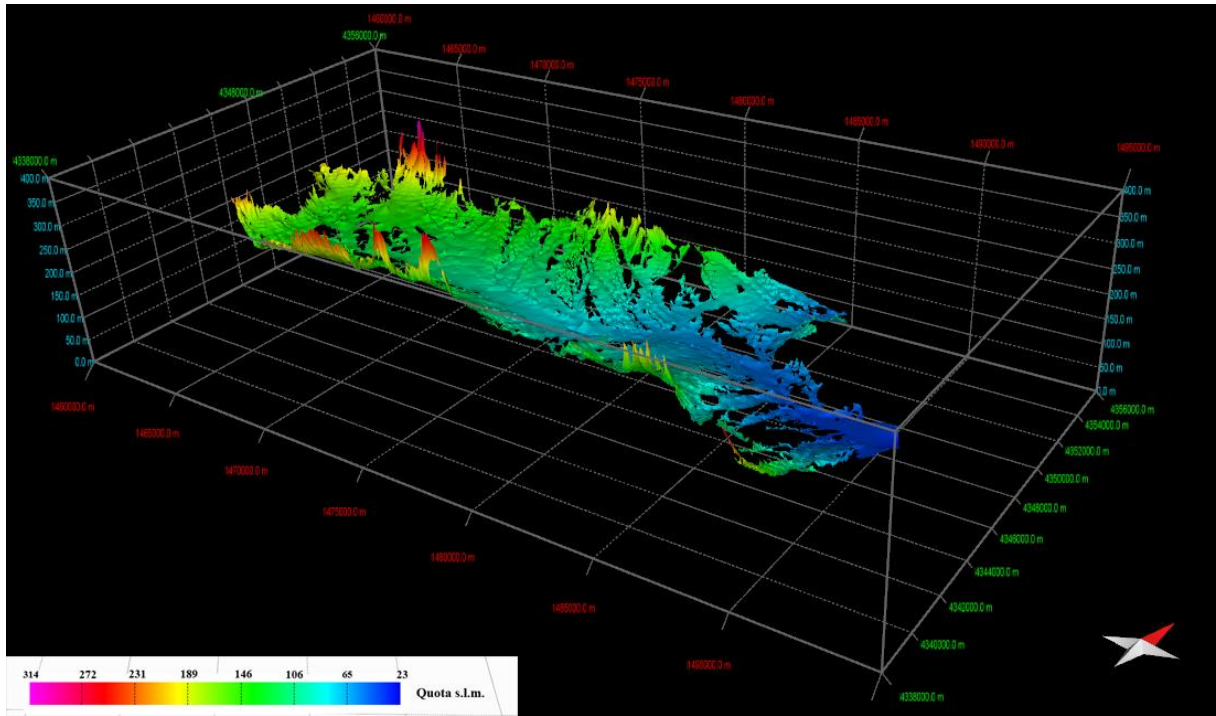
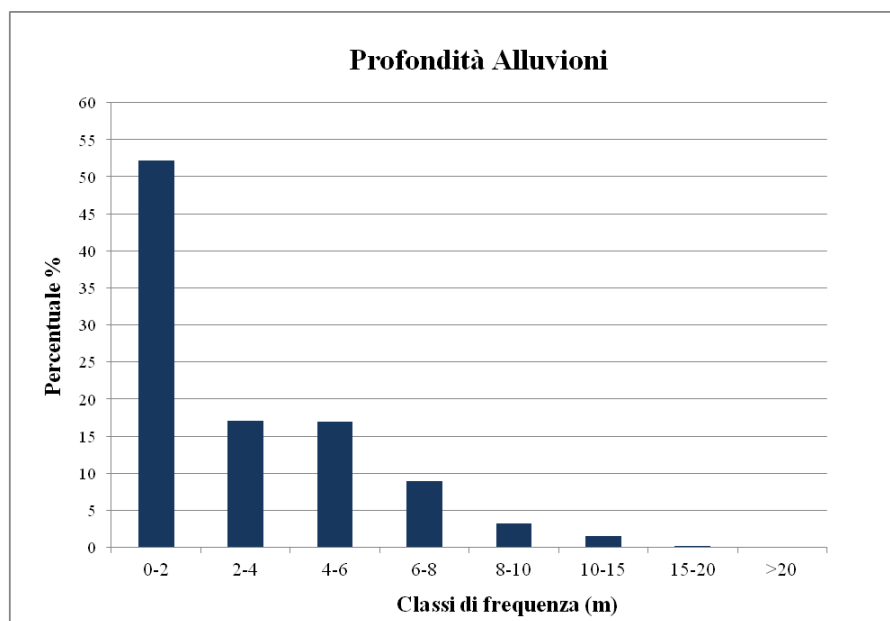


Figura 32 - Superficie 3D Bottom Alluvioni quaternarie



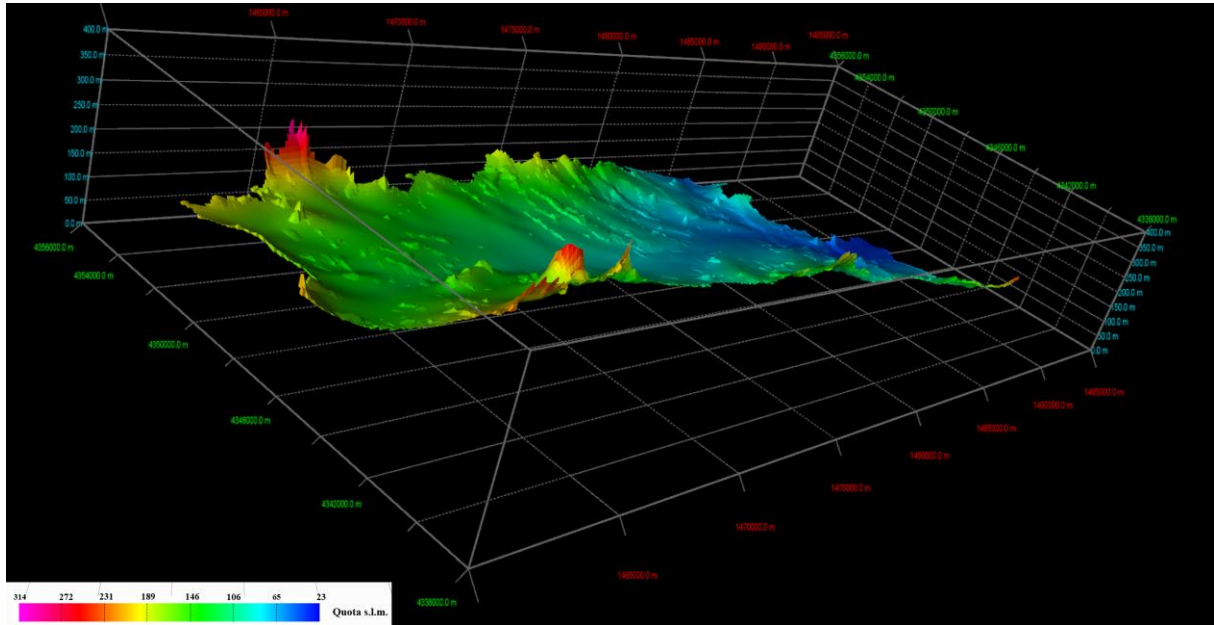
**Figura 33 - Superficie 3D Bottom lluvioni quaternarie (esagerazione verticale 20x), dove sono state splitate gli affioramenti delle litologie non alluvionali.**

Lo spessore medio delle alluvioni desunto dalle elaborazione di dati risultanti dalla modellazione geologica è di circa 3 m. La distribuzione della frequenza (Grafico 3) dimostra che all'interno della piana il 52% delle alluvioni hanno uno spessore di 2 m, mentre il restante 34% da spessori compresi tra i 2 e i 6 metri, un altro 12% tra gli 8 e i 10 metri e solo meno del 2% hanno spessori maggiori di 10 metri.



**Grafico 3 - Classi di frequenza sulla profondità delle alluvioni (da Superficie Bottom 3D)**

Nonostante uno spessore esiguo delle alluvioni, vista l'estensione della piana di 190 kmq, dalla modellazione geologica 3D si è stimato un volume totale di circa 700 milioni di mc (Figura 34).



**Figura 34 - Volume delle alluvioni quaternarie (esagerazione verticale 15x)**

### 3.1.3 Dati idrogeologici

#### 3.1.3.1 Campagne piezometriche

Le curve piezometriche, ottenute durante le tre diverse campagne di rilevamento (dati completi riportati in Appendice 2), svolte secondo le tempistiche e metodologie descritte nel capitolo precedente, hanno permesso di ricostruire la morfologia della falda superficiale e le direzioni principali di flusso, da cui risulta che:

- la direzione di flusso principale va da W verso E;
- le acque sotterranee alimentano il fiume Cixerri;
- il fiume Cixerri coincide con l'asse di drenaggio principale;
- la trasmissività dell'acquifero aumenta verso il centro della valle;
- sono visibili 4 aree di ricarica due a nord e due a sud, presumibilmente in coincidenza con 4 sorgenti (a Nord sopra Iglesias e sopra la strada che collega Vallermosa a Domusnovas, a Sud sui monti di Villamassargia e le sorgenti di Zinnigas).

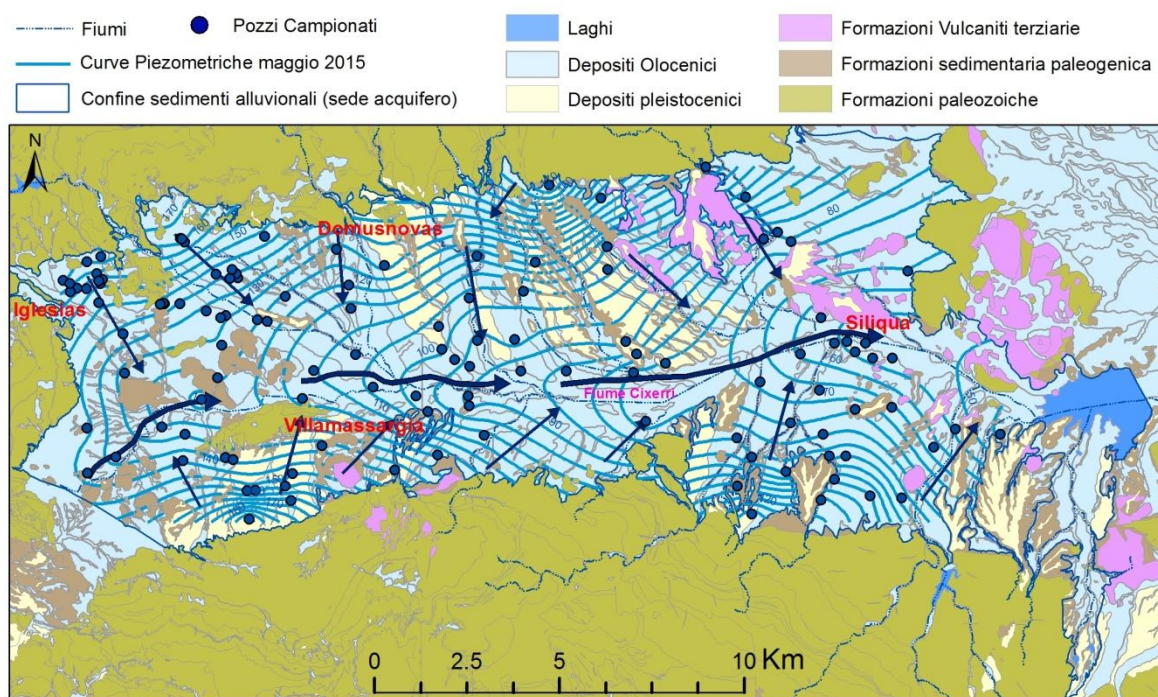


Figura 35 - Carta Piezometrica maggio 2015

Le curve piezometriche nei tre differenti periodi dell'anno (Maggio e Dicembre 2015, Aprile 2016) (Figure Figura 35, Figura 36 e Figura 37) non mostrano grandi variazioni, è visibile un lieve innalzamento delle piezometriche durante il rilievo di dicembre, con un successivo abbassamento nel rilievo di aprile. Il campionamento di dicembre risulta effettuato in periodo

di magra, infatti durante il rilevamento in campagna si sono trovati diversi pozzi completamente asciutti.

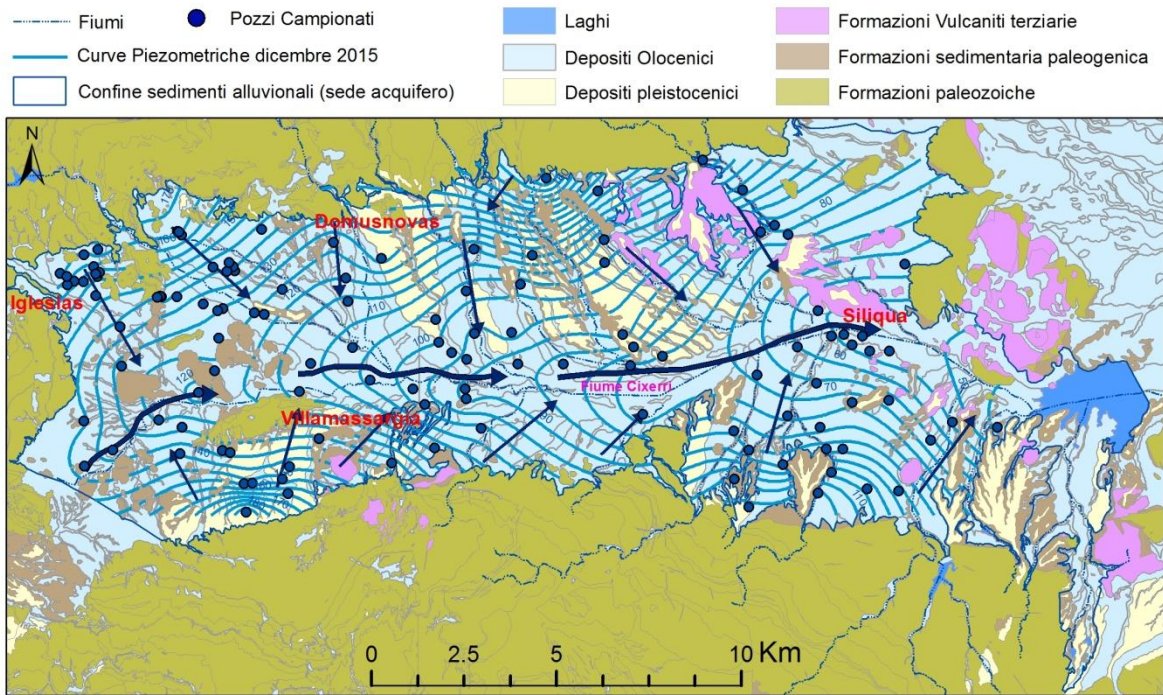


Figura 36 - Carta piezometrica dicembre 2015

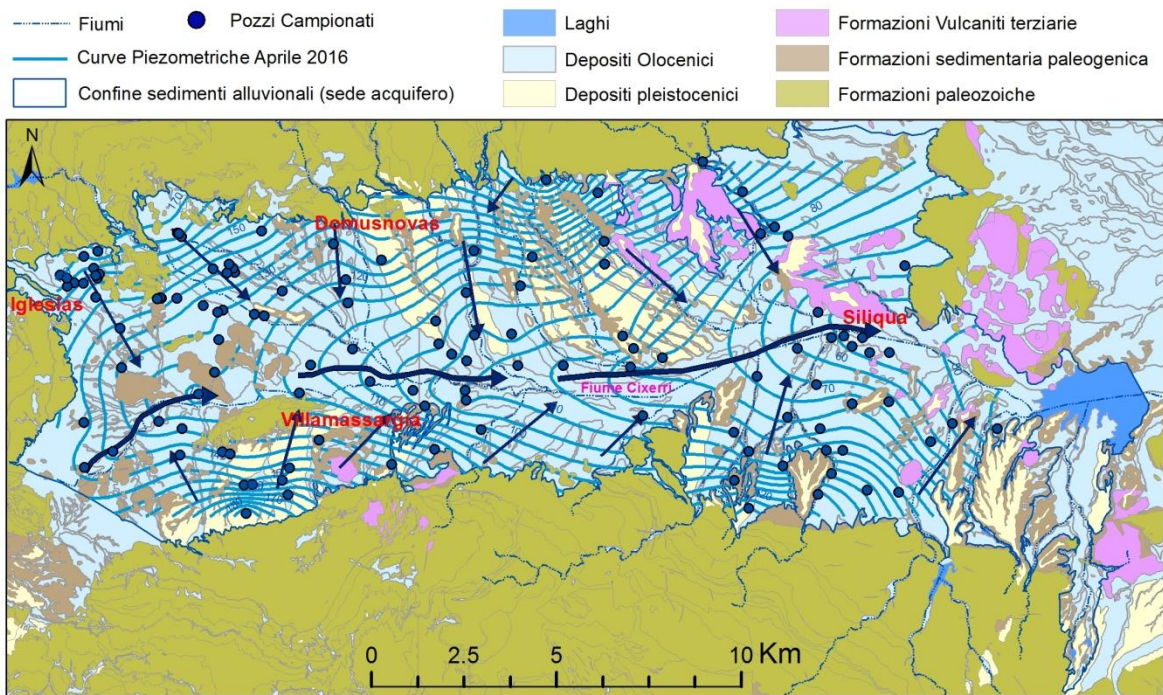


Figura 37 - Carta Piezometrica aprile 2016

Questo trend è ben visibile nel Grafico 4, relativo alla frequenza della soggiacenza durante le tre campagne piezometriche, da cui emerge inoltre che nella piana del Cixerri la profondità della falda è inferiore ai 4 m (85 % delle misure di soggiacenza ricade nelle prime 4 classi di frequenza). Tra maggio e dicembre si verifica un generale abbassamento della falda, tra dicembre ed aprile si ha una generale inversione di tendenza, tranne nella zona di Siliqua dove rimane sempre costante o in parziale abbassamento.

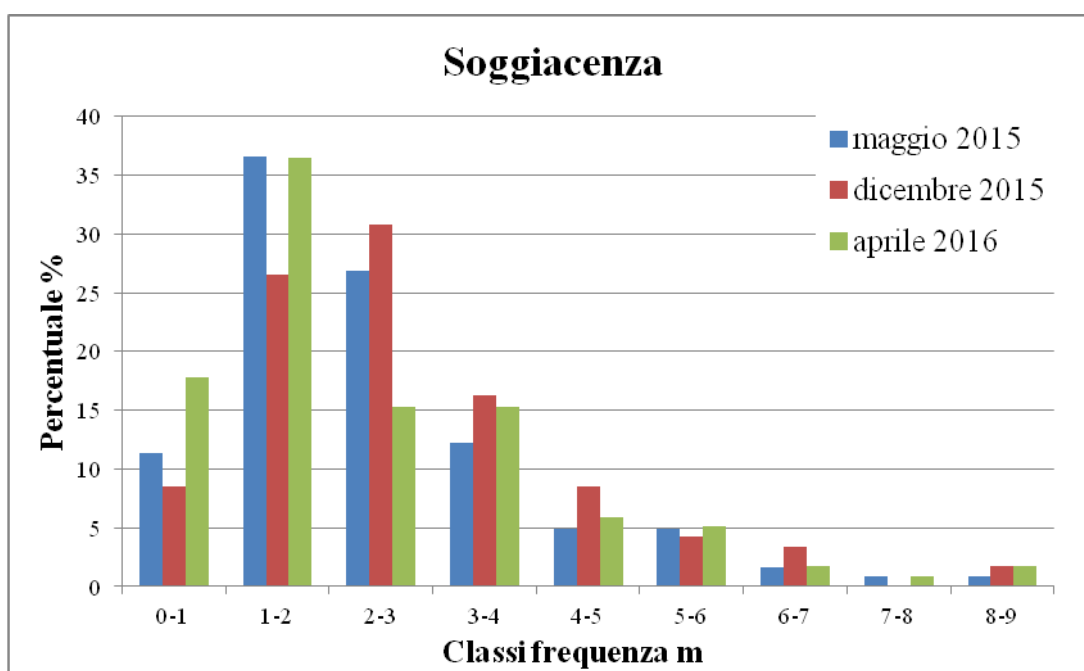


Grafico 4 - Classi di frequenza della soggiacenza

Nella Tabella 12 è riportato un riepilogo statistico dei valori di soggiacenza e di conducibilità elettrica acquisiti durante le tre diverse campagne piezometriche. I valori di soggiacenza variano tra un valore minimo di 0.3 m e un valore massimo di 8.6 m. I valori minimi nei tre periodi sono rimasti costanti, mentre i valori massimi risultano meno elevati a maggio, periodo di piena della falda, con valori simili per dicembre e aprile ad indicare una minore ricarica dell'acquifero. Anche i valori di media e mediana evidenziano una variazione del livello della falda nei tre diversi periodi di campionamento, e nello specifico un aumento rispettivamente 0.30 e 0.50 m nel periodo di dicembre 2015.

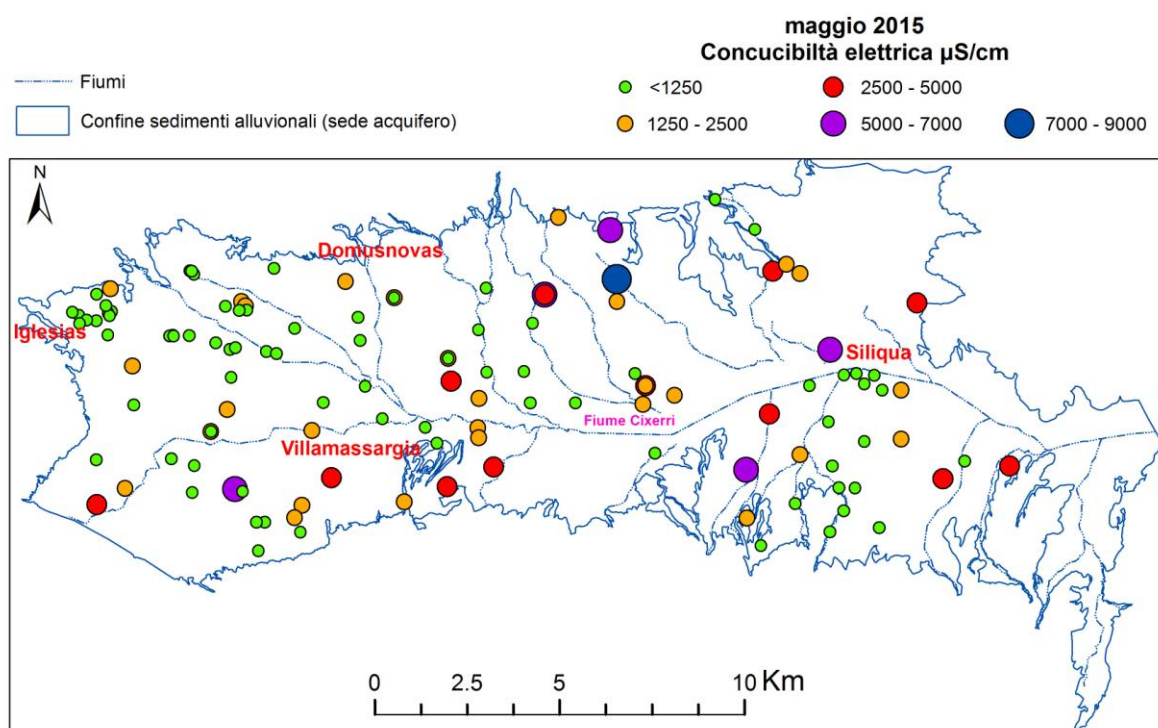
	Soggiacenza			Conducibilità elettrica		
	Maggio 2015	Dicembre 2015	Aprile 2016	Maggio 2015	Dicembre 2015	Aprile 2016
<b>Minimo</b>	0.38	0.3	0.28	307	320	437
<b>Massimo</b>	8.23	8.81	8.72	8740	8900	9310
<b>Media</b>	2.52	2.85	2.50	1297	1526	1493



	Soggiacenza			Conducibilità elettrica		
	Maggio 2015	Dicembre 2015	Aprile 2016	Maggio 2015	Dicembre 2015	Aprile 2016
<b>Dev. Standard</b>	1.45	1.59	1.70	1207	1432	1376
<b>Mediana</b>	2.08	2.53	1.94	841	960	957
<b>n. Totale</b>	123	117	118	118	116	117

Tabella 12 - Riepilogo statistico valori soggiacenza e conducibilità per le 3 campagne piezometriche

Nella Tabella 12 i valori di conducibilità elettrica mostrano un trend positivo da maggio a dicembre 2015, valori che poi si mantengono costanti, o di poco inferiori, nella media e mediana, ma superiori nel minimo e massimo, nel campionamento di aprile 2016.



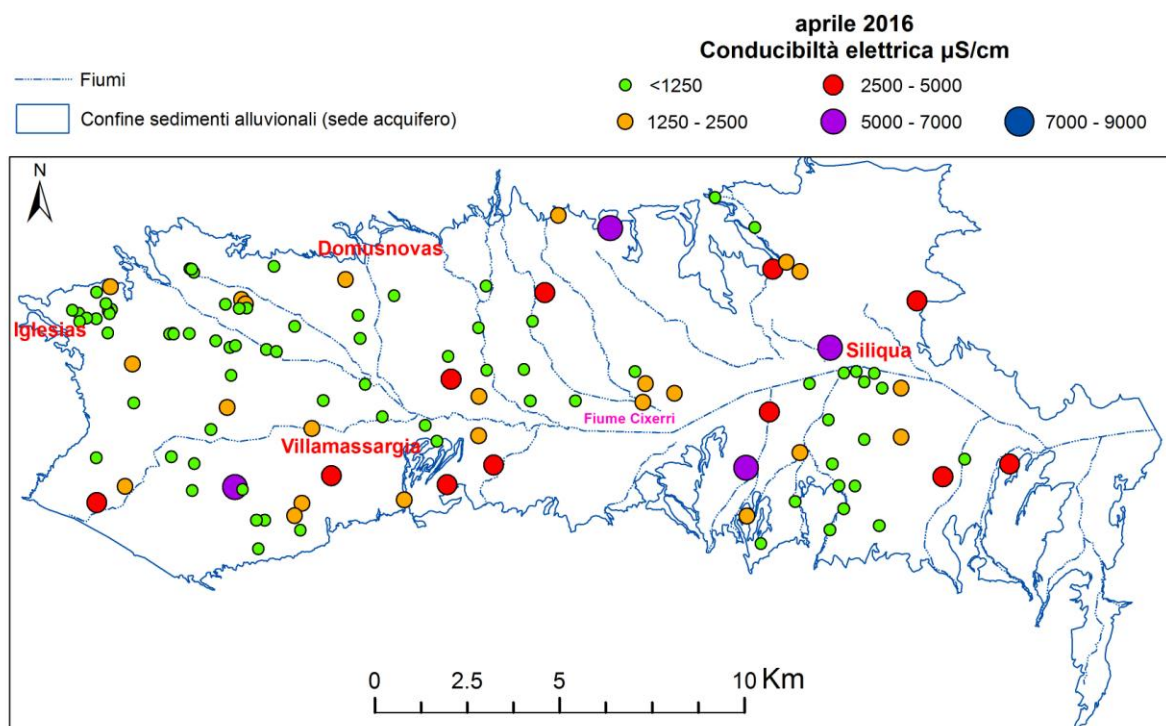
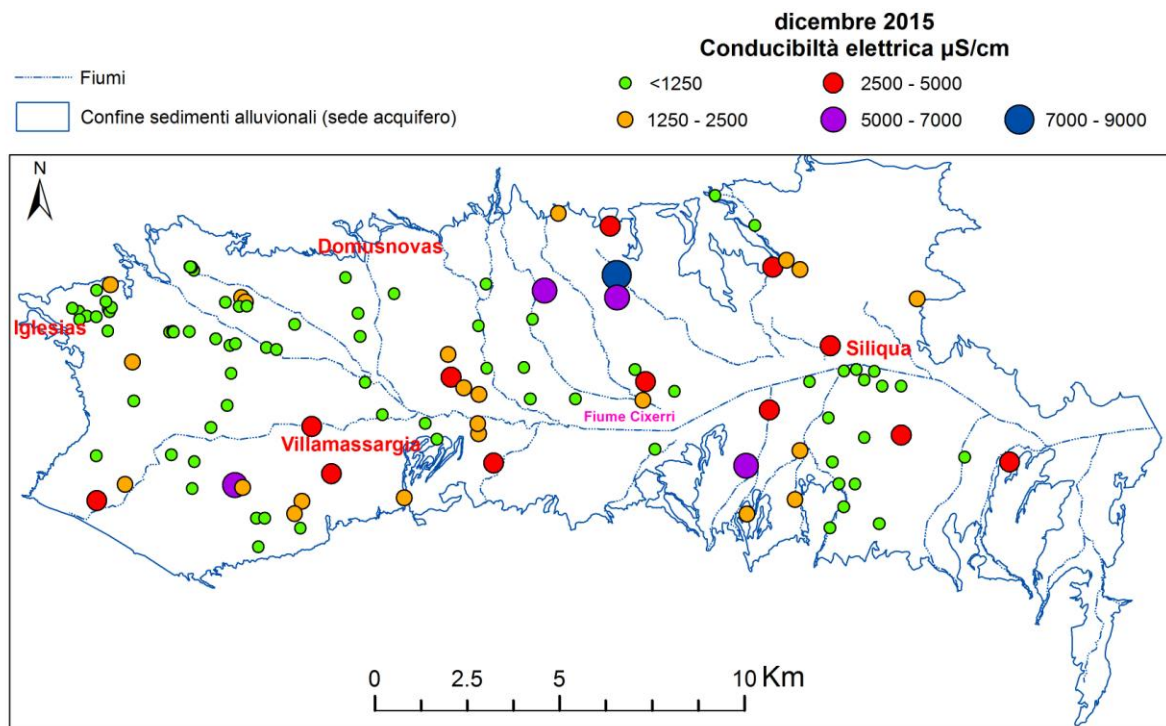
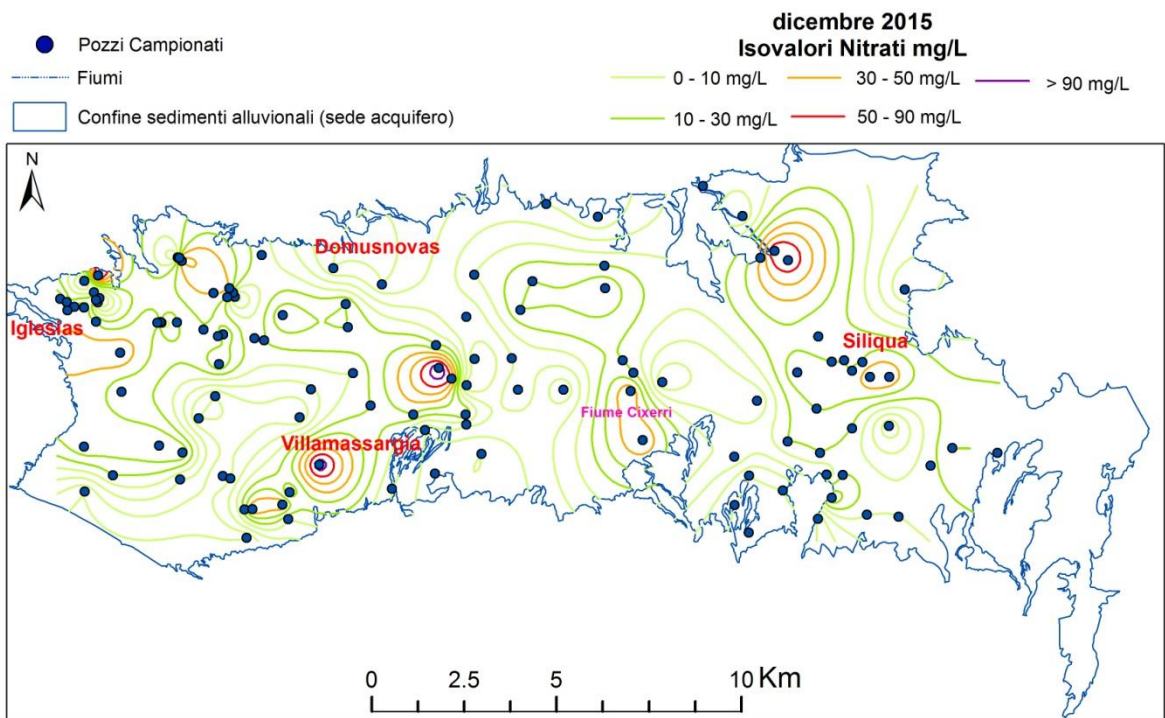
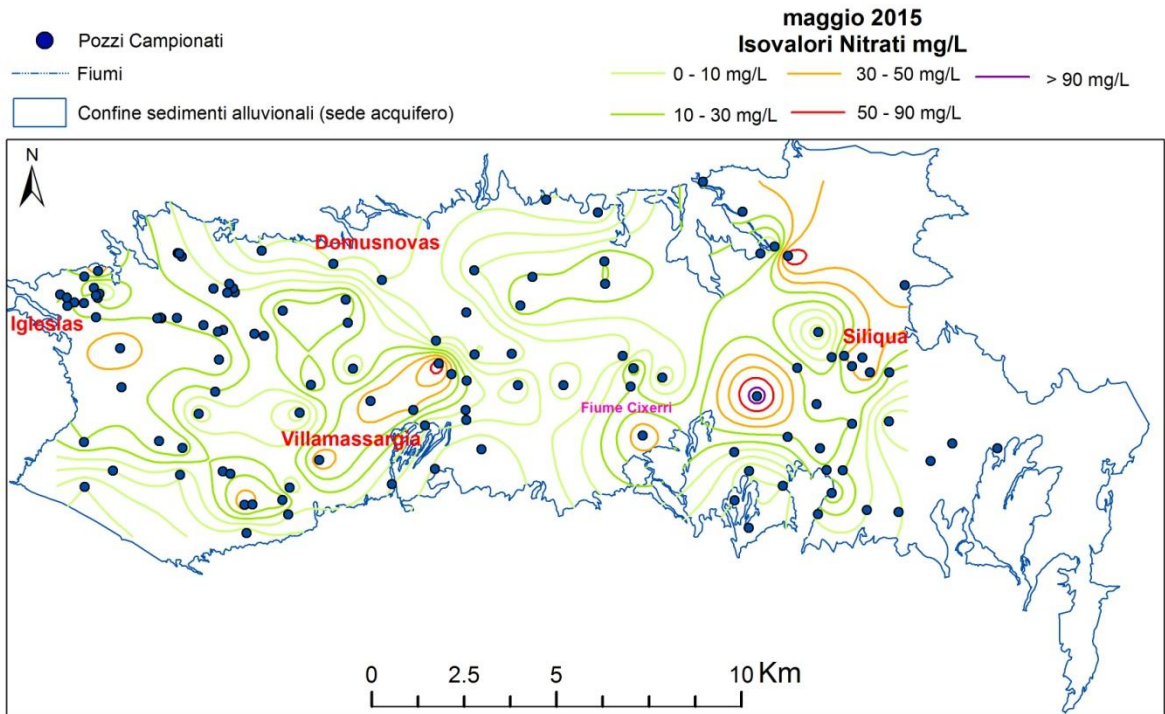
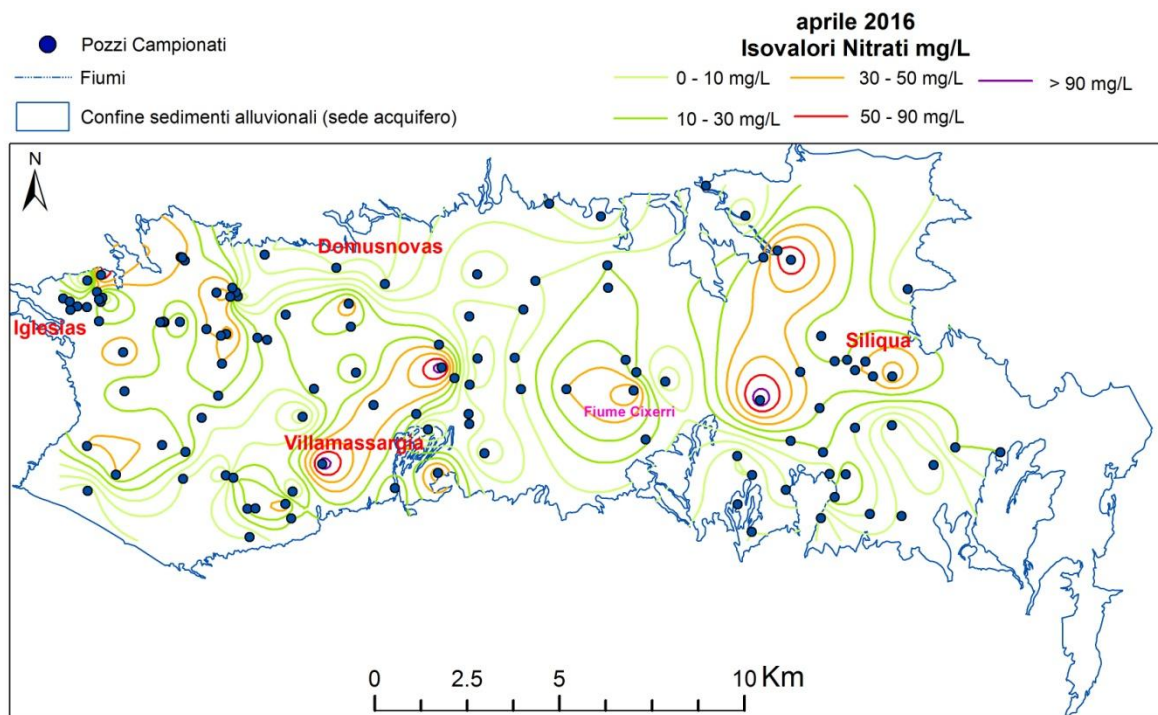


Figura 38 - Carte di isoconducibilità elettrica per i periodi di maggio e dicembre 2015 e aprile 2016.

Analizzando i valori di conducibilità elettrica (Figura 38) risulta che le acque a più alta salinità si trovano a SW, ad Est e nella fascia centro orientale della piana.





**Figura 39 - Carte di isovalori di Nitrato (NO<sub>3</sub>) per i periodi di maggio e dicembre 2015 e aprile 2016.**

Analizzando le carte di isovalori del nitrato durante i tre diversi campionamenti (dati completi riportati in Appendice 2) (Figura 39), si può evidenziare un aumento dei valori che supera i 50 mg/L, valore limite di concentrazione consentito dalla legge per le acque potabili (D.Lgs. 31/2001). La loro distribuzione all'interno della piana non sembra essere legata a fonti di inquinamento diffuso o a un trasporto del contaminante lungo le direzioni di flusso a partire dai centri di pericolo, ma sembra legato prevalentemente a situazioni locali (un'azienda zootecnica, reflui domestici a monte del pozzo). Questo è più evidente nella Figura 40, in cui sono stati messi in relazione le concentrazioni di nitrati e i centri di pericolo, quali aziende agricole e zootecniche, fosse settiche, etc..

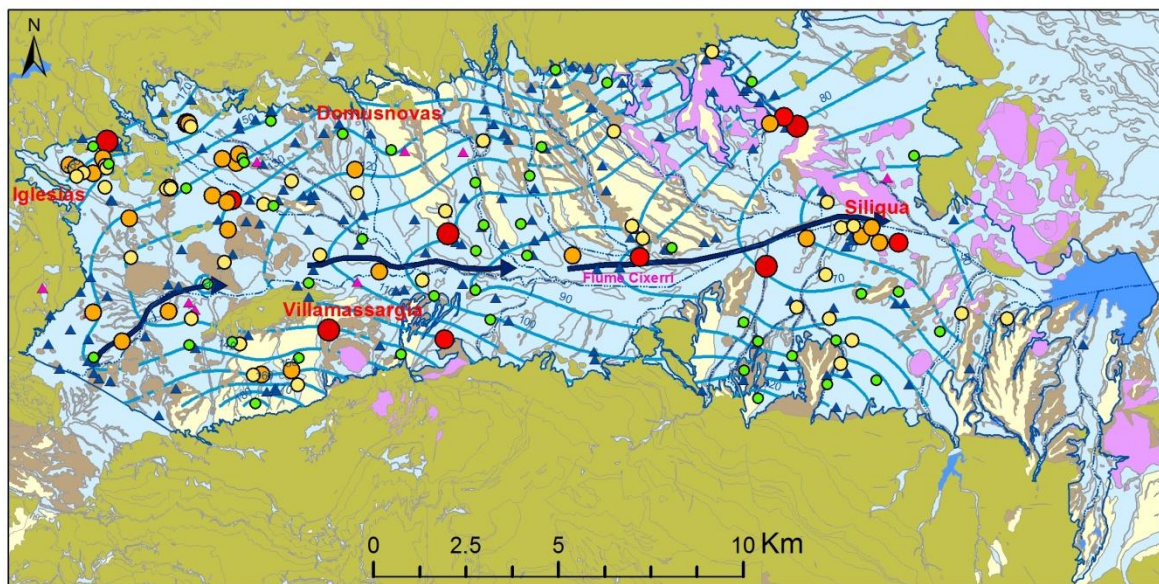
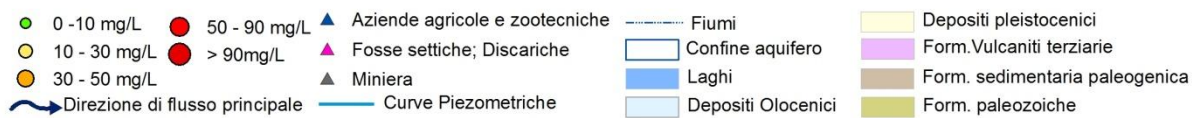


Figura 40 - Relazione tra concentrazione di Nitrati e centri di pericolo (modificato Fenza, et al., 2016b)

- **Censimento Centri di pericolo (CDP)**

I centri di pericolo (CDP), rilevati durante le campagne piezometriche, sono stati cartografati in ambiente GIS, per metterli in relazione con i valori di nitrato acquisiti durante il campionamento. In totale sono stati rinvenuti 167 CDP puntuali (Tabella 13).

N.	CDP	Quantità
1	Aziende zootecniche	107
2	Aziende agricole	13
3	Serre	35
4	Maneggi	3
5	Depuratori	6
6	Discariche	3

**Tabella 13 - Centri di pericolo della Piana del Cixerri**

Tra i CDP areali si segnala la zona industriale di Iglesias, il pascolo diffuso, le attività agricole ampiamente sviluppate all'interno della Piana del Cixerri, oltre agli insediamenti urbani e soprattutto all'edificato diffuso.

#### *Attività zootecniche*

Il potenziale inquinamento delle attività zootecniche dipende soprattutto dalle specie allevate, dal tipo ed entità di allevamento, dalla quantità di deiezioni prodotte e dai metodi di smaltimento. Benché le maggiori quantità di inquinanti si abbiano negli allevamenti di bovini e suini, anche le aziende intensive di ovini e caprini sono potenziali fonti di contaminazione. Nella piana del Cixerri gli allevamenti zootecnici sono prevalentemente di tipo ovino, ma non mancano allevamenti di caprini, bovini e anche suini. Le aziende sono generalmente di tipo semi-estensivo e predomina l'allevamento ovino da latte, con il ricorso sistematico al pascolamento per tutto o per gran parte dell'anno. I reflui zootecnici, stoccati nelle aziende, vengono utilizzati per la concimazione organica dei campi.

#### *Attività agricole*

Come si evince dalla tabella di seguito riportata la piana del Cixerri è caratterizzata prevalentemente da seminativi, superfici regolarmente arate, in cui vengono coltivati cereali, leguminose, colture foraggere, etc., in generale colture utili per l'alimentazione del bestiame (Tabella 14).

Diverse pratiche agronomiche quali la concimazione, il diserbo, i trattamenti anticrittogamici e antiparassitari, possono generare una contaminazione diffusa delle risorse idriche, apportando una considerevole quantità di composti inquinanti.

<b>N</b>	<b>Tipologia</b>	<b>kmq</b>
1	Seminativi	131
2	Vigneti	3
3	Uliveti	2
4	Prati	6
5	Frutteti	1.2
6	Orti	0.02

**Tabella 14 - Attività agricole piana del Cixerri**

Una ricerca condotta in Sardegna, nella piana di Arborea, ha evidenziato che i fenomeni di inquinamento da nitrati nelle acque di falda sono spesso causati da concimazioni irrazionali, eseguite in suoli molto permeabili con irrigazioni eccessive (Aru A. 2003).

#### *Insedimenti civili*

Gli insediamenti urbani costituiscono un aggregato di CDP diversi, tanto più attivi tanto più è alta la concentrazione di abitanti (Civita, 2005). Gli impatti principali sono quelli legati agli impianti di fognatura, impianti di trattamento e scarichi, soprattutto nelle aree extra urbane, dove non esiste una rete fognaria, e dove vengono utilizzati sistemi di smaltimento in loco (fosse settiche, pozzi neri).

Questi sistemi di smaltimento, non costituiscono una fonte di pericolo, se posizionati correttamente, se adeguatamente dimensionati e se sottoposti regolarmente a manutenzione, ma il loro potenziale di inquinamento diventa preoccupante quando il numero di installazioni supera la naturale capacità di abbattimento del suolo (non più di 10 sistemi puntuali per km<sup>2</sup>) (Civita, 2005).

Nella piana del Cixerri possiamo affermare che l'inquinamento della falda è dovuto a tre fattori principali, quali: il pascolo brado e le attività zootecniche disseminate in tutto il territorio, le attività agricole diffuse e le numerose case sparse esistenti nella zona, non collegate alla rete fognaria, che per lo smaltimento dei reflui civili utilizzano fosse settiche e pozzi neri.

### 3.1.4 Caratterizzazione dei sedimenti

- *Analisi granulometriche*

Dalla analisi in laboratorio dei campioni prelevati nella piana del Cixerri si sono ottenuti i seguenti risultati. Come mostrato in Tabella 15 dall'analisi granulometrica si è appurato che il 47% dei depositi alluvionali è costituito da sabbia ghiaiosa scarsamente classata con fini, il 29% da ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini, il 12% (2 vs 17) da Ghiaia scarsamente classata con fini e un ulteriore 12% da silt sabbioso ghiaioso scarsamente classato con fini.

Nella Tabella 15 sono inoltre riportati i risultati delle analisi eseguite in laboratorio, si può notare come il valore della porosità, misurata mediante la formula di Vukovic e Soro (1992) è pari al 26%. Quelle ricavate in laboratorio, come rapporto tra volume dei vuoti su volume totale, sono invece rappresentate da valori più elevati, variano infatti tra il 28 % e il 60% con un valore medio di 44%. Questo è dovuto verosimilmente alla quota di prelievo del campione, che in questo caso è compresa tra 0-15 cm.

Per il calcolo della porosità efficace si è pertanto deciso di utilizzare i dati di porosità acquisiti con le analisi granulometriche. I sedimenti risultano compresi tra ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose scarsamente assortite. Il valore della porosità efficace ( $n_e$ ), stimata a partire dalla porosità totale (Water Supply Paper, USGS; Johnson, 1967)), è pari al 23.4%, valore inferiore al 10% della porosità ( $n$ ).

In Appendice 3 sono riportate le curve granulometriche per ogni campione e le percentuali di ghiaia, sabbia, silt e argilla che li costituiscono.

Utilizzando i risultati delle curve granulometriche sono stati ricavati i valori di conducibilità idraulica, estrapolate mediante le diverse formule empiriche, descritte nel capitolo precedente. Nello specifico sono state utilizzate le formule di Kozeny-Carman (secondo Urumovic & Urumovic, 2014), di Terzaghi, di Sauerbrei, di Zamarin, di Barr, di Alyamani and Sen e di Krumbein and Monk (Tabella 16). Gli altri metodi empirici, descritti nel capitolo precedente, sono risultati inapplicabili, in quanto non sono adatti per il calcolo della permeabilità di sedimenti, quali quelli campionati per questo studio.

La conducibilità idraulica calcolata con i metodi di Terzaghi e Barr è sempre dello stesso ordine di grandezza, e in quasi tutti i casi inferiore rispetto agli altri metodi. Il metodo di Alyamani and Sen è sensibile alla forma della curva granulometrica e risulta molto più accurato per i campioni gradati (Odong, 2007). Osservando i risultati possiamo appurare come i valori di conducibilità ottenuti con il metodo Kozeny-Carman, calcolati tramite il valore della media geometrica della dimensione dei grani, al posto del valore del diametro



efficace  $d_{10}$ , secondo Urumovic & Urumovic (2014), sono risultati i più in linea con le caratteristiche granulometriche dei sedimenti analizzati. Valori simili si sono ottenuti con il metodo di Alyamani and Sen, ampiamente testato su campioni ben assortiti.

Gli altri metodi di Sauerbrei, di Zamarin e di Krumbein and Monk, mostrano sempre valori più bassi e non in linea con quelli del metodo Kozeny-Carman, che invece mostra valori in linea con i dati di letteratura (CASMEZ, 1984).

In letteratura (Musavi-jahro, 2012) per campioni classificati come ghiaia sabbiosa e sabbia ghiaiose le formule empiriche, maggiormente rappresentative per il calcolo della conducibilità idraulica, sono quelle di USBR, Slitcher e Terzaghi. Nel calcolo dei campioni della piana del Cixerri, il metodo USBR è risultato non applicabile, mentre i metodi di Slitcher e Terzaghi sono quelli che hanno dato valori identici per tutti i campioni, benchè risultano i metodi che hanno dato i valori più bassi. Il metodo di Terzaghi è adatto per il calcolo della conducibilità idraulica su campioni di grana grossa (Hussain & Nabi, 2016).

ID	X	Y	Z	Descrizione	d <sub>10</sub>	d <sub>60</sub>	U	Densità secca	Peso specifico secco	n	n	ne
			m.s.l.m.		mm	mm		g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	Lab		
CIXS1	1461704	4350926	160	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	3.388	1939	1.79	2.701	41	26	23.4
CIXS2	1466118	4351447	140	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	2.082	1250	2.05	2.639	28	26	23.4
CIXS3	1484361	4351578	116	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	3.538	2024	1.352	2.592	48	26	23.4
CIXS4	1479972	4353659	157	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	0.118	67				26	23.4
CIXS5	1476051	4353436	190	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	0.182	100				26	23.4
CIXS6bis	1466635	4350228	177	Silt sabbioso ghiaioso scarsamente classata con fini	0.002	0.118	73				26	23.4
CIXS7bis	1464454	4346226	184	Ghiaia scarsamente classata con fini	0.011	16.283	1516				26	23.4
CIXS8	1462130	4347232	191	Ghiaia scarsamente classata con fini	0.013	16.120	1284	1.136	2.528	55	26	23.4
CIXS9	1465032	4344976	212	Ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini	0.002	13.547	7064	1.411	2.598	46	26	23.4
CIXS11	1465026	4345015	212	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	3.060	1700				26	23.4
CIXS12	1469649	4349008	154	Ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini	0.105	13.411	128	1.496	2.63	46	26	23.4
CIXS13	1473300	4346942	148	Silt sabbioso ghiaioso scarsamente classato con fini	0.002	0.063	41	1.685	2.663	37	26	23.4
CIXS14	1477053	4348696	123	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	0.731	392	1.63	2.706	40	26	23.4
CIXS15	1484013	4345471	131	Ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini	0.007	12.344	1658	1.636	2.553	36	26	23.4
CIXS16	1485578	4347177	101	Ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini	0.010	16.816	1656				26	23.4
CIXS17	1483386	4349273	56	Sabbia Ghiaiosa scarsamente classata con fini	0.002	1.977	1048				26	23.4
CIXS18	1472719	4351692	151	Ghiaia sabbiosa scarsamente classata con fini	0.008	8.141	969	1.058	2.638	60	26	23.4

Tabella 15 - Riepilogo valori delle analisi granulometriche e di porosità (n) calcolata con Vukovic e Soro (1992) e porosità efficace (n<sub>e</sub>)

	<b>Metodo</b>	Kozeny-Carman (m/sec)	Terzaghi (m/sec)	Sauerbrei (m/sec)	Zamarin (m/sec)	Barr (m/sec)	Alyamani and Sen (m/sec)	Krumbein and Monk (m/sec)
	<b>Campi di applicazione</b>	secondo Urumovic & Urumovic, 2014	Sabbia ghiaiosa	Sabbia e argilla sabbiosa	Sabbia grossolana non aventi frazioni con $d < 0.00025$ mm	Non specificate	Non specificate	Sabbia naturale con distribuzione dei grani log-normale
		Sabbia grossolana		D <sub>17</sub> < 0.5 mm				
<b>Nome campione</b>	Profondità di prelievo materiale m							
CIXS1	0-1	1.07E-03	4.76E-09	2.11E-07	1.90E-07	3.64E-09	1.73E-03	5.85E-06
CIXS2	0-1	2.62E-04	4.33E-09	7.38E-08	1.58E-07		1.38E-04	1.09E-06
CIXS3	0.10-0.20	1.01E-03	4.77E-09	2.70E-07	2.14E-07	4.11E-09	1.12E-03	5.85E-06
CIXS4	0.10-0.25	3.48E-05	4.88E-09	6.29E-08		4.21E-09	2.28E-06	2.98E-07
CIXS5	0.30-0.50	9.35E-05	5.20E-09	9.32E-08		4.49E-09	4.40E-06	5.63E-07
CIXS6bis	0.50-0.70	1.59E-05	4.06E-09	1.05E-08		3.51E-09	1.39E-06	
CIXS7bis	0.50-0.70	1.27E-02	1.80E-07	3.26E-06	7.48E-07	1.55E-07	1.15E-01	
CIXS8	0.60-0.70	1.46E-02	2.46E-07	4.96E-06	8.73E-07	2.12E-07	1.11E-01	
CIXS9	1.10-1.20	4.91E-03	5.73E-09	1.14E-06	3.23E-07	4.95E-09	2.01E-02	
CIXS11	0-1	1.32E-03	5.05E-09	4.37E-07	2.47E-07	4.36E-09	1.92E-03	9.53E-06
CIXS12	2-2.40	3.75E-02	1.72E-05	1.61E-04	4.72E-06	1.48E-05	5.19E-02	
CIXS13	0.90-1	8.07E-06	3.83E-09	5.72E-09		3.30E-09	8.85E-07	
CIXS14	0.90-1	8.63E-05	5.41E-09	1.16E-07		4.67E-09	1.94E-05	1.09E-06
CIXS15	1.80-2	5.83E-03	8.64E-08	1.07E-06	5.54E-07	7.46E-08	4.37E-02	
CIXS16	0.90-1	1.43E-02	1.61E-07	2.64E-06	6.83E-07	1.39E-07	1.94E-01	
CIXS17	1-1.10	1.10E-03	5.55E-09	9.06E-07	2.99E-07	4.79E-09	7.86E-04	1.05E-05
CIXS18	1-1.10	3.04E-02	1.10E-07	3.48E-04	5.28E-07	9.49E-08	1.84E-02	

**Tabella 16 - Riepilogo dati di conducibilità idraulica ricavati tramite diverse formule empiriche basate sull'equazione di Vukovic e Soro (1992).**

- **Prove di infiltrazione**

Le prove di infiltrazione eseguite nel mese di giugno 2016 hanno evidenziato valori di infiltrazione abbastanza bassi, compresi tra 3.33E-06 e 2.08E-04 (Tabella 17).

	Campione	Coord X GB	Coord Y GB	Quota	Capacità infiltrazione (m/s)
1	CIXS1	1461704.3	4350925.8	160	6.17E-06
2	CIXS3	1484360.6	4351577.9	116	2.08E-04
3	CIXS8	1462129.5	4347232.4	191	4.00E-05
4	CIXS9	1465031.6	4344976.2	212	3.33E-05
5	CIXS12	1469649.2	4349008.2	154	3.33E-06
6	CIXS13	1473299.7	4346942.3	148	1.67E-05
7	CIXS14	1477053.1	4348696.4	123	7.17E-05
8	CIXS15	1484013.5	4345470.9	131	4.50E-05
9	CIXS18	1472718.8	4351692.4	151	2.90E-04

**Tabella 17 - riepilogo valori prove di infiltrazione**

Analizzando i valori di infiltrazione permanente e quelli di conducibilità idraulica ricavati dalle analisi granulometriche si può notare come le prove di infiltrazione abbiano fornito valori molto più bassi, in generale di un ordine di grandezza rispetto a quelli ricavati in laboratorio. Questo è sicuramente dovuto alle differenti quote di prelievo del materiale per le analisi di laboratorio e l'esecuzione delle prove, inoltre va segnalato che spesso le prove sono state eseguite in luoghi soggetti a pascolamento bestiame, causa di fenomeni di costipamento del suolo.

Inoltre va precisato che l'infiltrometro a doppio anello misura maggiormente le componente verticale del tensore della conducibilità idraulica, che di solito è caratterizzata da valori più bassi rispetto alle componenti orizzontali, dovuta alla stratificazione dei sedimenti.

### 3.1.5 Stima del bilancio idrogeologico e potenzialità dell'acquifero

La quantificazione della ricarica degli acquiferi riveste un ruolo importante nella pianificazione e gestione della risorsa idrica sotterranea, soprattutto sul degrado quantitativo della stessa (Civita, 2005). Per valutare la ricarica attiva è necessario effettuare un bilancio idrogeologico globale, stimando gli afflussi e deflussi di un sistema acquifero, sia naturali che artificiali, quando possibile, di un determinato intervallo di tempo di riferimento (una anno o range di 20-30 anni). Le quantità risultanti dal bilancio sono espresse come portate in mc/anno o come spessori mm/anno.

L'acquifero delle alluvioni quaternarie del Cixerri ha uno sviluppo areale di 220.20 kmq, e uno spessore medio di 3-4 m. Avendo già indicazioni sul volume potenzialmente immagazzinabile nell'acquifero, dal modello idrogeologico tridimensionale, si è deciso di stimare la ricarica media annua dell'acquifero, tenendo conto dei soli apporti e deflussi naturali. Non si è pertanto tenuto conto dei prelievi dalla falda e dei quantitativi di acqua immessi per irrigazione.

Il bilancio idrogeologico totale è regolato dalla seguente equazione:

$$P = ETR + R + I$$

Per il calcolo del bilancio si è partiti dai dati di precipitazione media annua e dai dati di temperatura, relativi al ventennio 1989-2009 (Tabella 18 Tabella 19, 20) e al 2013, al 2014 e al 2015.

Dati pluviometrici 1989- 2009													
Nome	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot.
Decimomannu (Vivaio)	36.3	41.6	31.5	55.0	21.9	13.1	4.8	7.5	41.2	48.6	110.1	67.4	479.0
Iglesias	64.3	109.7	49.6	82.5	34.2	21.9	1.6	9.0	48.7	78.8	97.6	102.8	671.3
S.Giovanni Domusnovas	69.3	67.3	56.6	84.7	38.0	21.3	3.7	13.0	48.6	75.8	106.3	119.8	704.4
Siliqua	50.4	51.6	34.9	66.7	30.2	22.6	5.2	9.0	47.6	60.2	88.1	88.1	554.6
Terraseu	64.3	69.2	49.0	94.5	29.9	19.5	4.4	8.5	47.9	78.8	104.1	176.8	568.9
Vallermosa	58.2	47.0	39.1	61.0	26.9	14.4	3.2	13.6	43.1	57.9	74.3	83.1	521.8
Villamassargia	58.8	58.2	50.3	82.6	33.1	19.8	1.9	9.0	46.2	73.5	89.8	103.0	593.6

Tabella 18 - Media mensile e annuale dati pluviometrici ventennio 1989-2009

La pluviometria media per il ventennio 1989-2009 nell'area di studio, misurata con il metodo dei Topoietti è pari a 686.3 mm/anno.

Sulle stesse stazioni, nello stesso ventennio, sono stati acquisiti i dati di temperatura medi mensili, utilizzati per il calcolo della Evapotraspirazione reale calcolata con il metodo di Turc. La temperatura media e la temperatura media corretta con i dati di pluviometria dell'area, misurate sempre con il metodo dei topoieti sono rispettivamente 17.2 e 14,3 °C (Tabella 21).

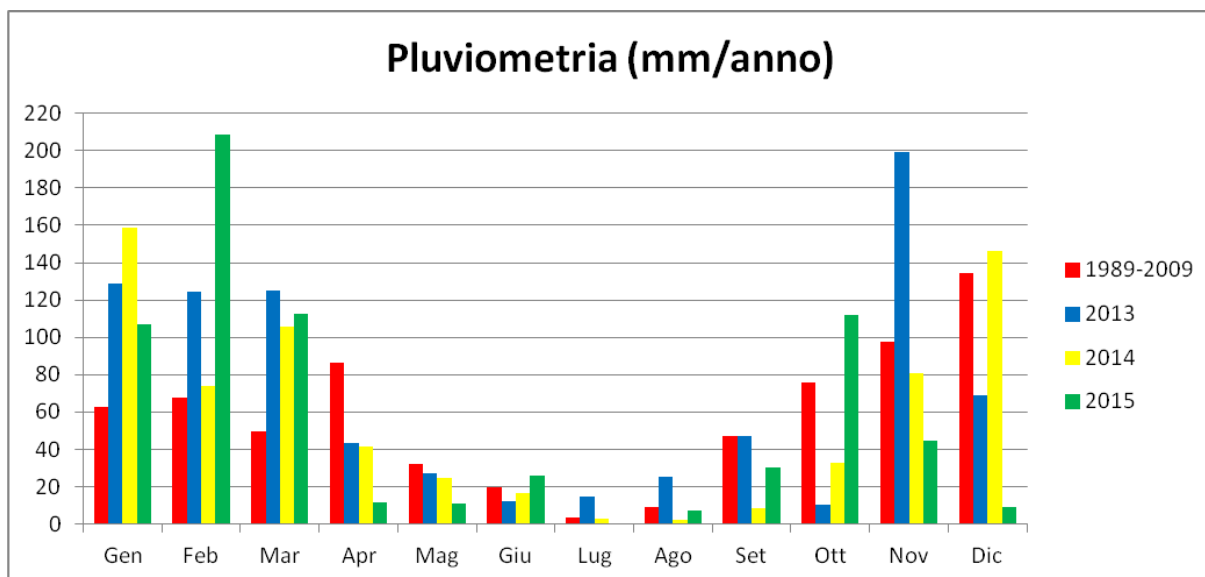


Grafico 5 - Grafico delle pluviometrie medie mensili per gli anni di riferimento

Dati Temperatura 1989- 2009													
Nome	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Media
Decimomannu (Vivaio)	9.1	9.6	12.4	14.0	18.7	22.9	26.5	26.3	22.3	18.5	13.9	10.7	17.1
Iglesias	9.4	9.6	11.9	13.7	18.3	22.4	25.5	26.1	22.1	18.5	13.8	10.5	16.8
S.Giovanni Domusnovas	9.4	9.8	11.8	13.7	18.2	22.5	25.6	26.0	22.1	18.4	13.7	10.4	16.9
Siliqua	8.9	9.7	12.5	14.2	18.9	23.3	26.7	27.3	23.1	19.1	14.2	10.4	17.5
Terraseu	9.3	9.5	11.9	13.8	18.1	22.7	25.8	25.7	21.8	18.5	13.6	10.1	16.7
Vallermosa	9.7	10.1	12.4	14.5	19.1	23.5	26.5	26.1	23.2	19.5	14.0	10.7	17.4
Villamassargia	10.5	10.8	12.9	14.8	19.6	23.9	26.8	27.1	23.2	19.9	14.8	11.6	18.0

Tabella 19 - Dati temperatura stazioni termometriche di riferimento anni 1989-2009

Dati Temperatura corretta 1989- 2009													
Nome	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Media
Decimomannu (Vivaio)	0.8	0.7	0.8	1.7	0.9	0.6	0.3	0.5	2.0	1.9	2.8	1.6	14.4
Iglesias	1.0	1.0	0.9	1.7	0.9	0.7	0.1	0.3	1.7	2.3	1.9	1.7	13.7
S.Giovanni Domusnovas	0.9	0.9	0.8	1.7	0.9	0.7	0.2	0.5	1.4	2.0	2.0	1.8	13.8
Siliqua	0.8	0.8	0.8	1.7	1.1	0.8	0.3	0.5	2.0	2.0	2.1	1.6	14.5
Terraseu	0.9	0.9	0.8	1.9	0.6	0.6	0.2	0.3	1.4	1.5	2.1	1.9	13.2
Vallermosa	1.1	0.8	0.9	1.8	1.0	0.6	0.2	0.7	2.0	2.0	2.0	1.7	14.8
Villamassargia	1.1	0.9	0.9	2.0	1.0	0.7	0.1	0.4	1.6	2.2	2.1	2.0	15.0

Tabella 20 - Dati temperatura corretta stazioni termometriche di riferimento anni 1989-2009

Dati Area bacino anni 1989- 2009													
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot/ media
Precipitazioni	62.7	67.9	49.8	86.7	32.1	19.7	3.2	9.4	47.3	75.6	97.6	134.4	686.3
Temperature	9.7	10.0	12.3	14.1	18.7	23.1	26.1	26.3	22.4	19.0	14.1	10.7	17.2
Temperature corrette	0.9	1.0	0.9	1.8	0.9	0.7	0.1	0.4	1.6	2.1	2.0	2.0	14.3

**Tabella 21 - Dati di precipitazione, temperatura e temperatura corretta relativi all'intero bacino riferiti agli anni 1989-2009**

Dati Area bacino anno 2013													
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot/ media
Precipitazioni	128.9	124.4	125.0	43.6	27.2	12.2	15.0	25.6	47.2	10.6	199.1	69.1	828.0
Temperature	9.2	7.1	11.2	14.4	16.1	20.2	25.5	25.5	21.4	20.7	12.5	10.3	16.2
Temperature corrette	1.4	1.1	1.7	0.8	0.5	0.3	0.5	0.8	1.2	0.3	3.0	0.9	12.4

**Tabella 22 - Dati di precipitazione, temperatura e temperatura corretta relativi all'intero bacino per l'anno 2013**

Dati Area bacino anno 2014													
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot/ media
Precipitazioni	158.6	73.8	105.9	41.4	25.0	16.5	2.8	2.1	8.6	32.8	80.5	146.4	694.4
Temperature	10.2	10.6	10.7	14.3	16.9	22.6	23.7	25.1	23.5	20.5	15.9	10.2	17.0
Temperature corrette	2.3	1.1	1.6	0.9	0.6	0.5	0.1	0.1	0.3	1.0	1.8	2.2	12.5

**Tabella 23 - Dati di precipitazione, temperatura e temperatura corretta relativi all'intero bacino per l'anno 2014**

Dati Area bacino anno 2015													
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Tot/ media
Precipitazioni	106.9	208.8	112.4	11.6	10.8	26.2	0.5	7.3	30.3	111.9	44.8	8.9	680.5
Temperature	9.3	8.0	11.3	14.3	19.4	22.8	27.5	25.9	22.5	18.2	14.3	11.6	17.1
Temperature corrette	1.5	2.5	1.9	0.2	0.3	0.9	0.0	0.3	1.0	3.0	0.9	0.2	12.6

**Tabella 24 - Dati di precipitazione, temperatura e temperatura corretta relativi all'intero bacino per l'anno 2015**

Per il ventennio 1989-2009 la evapotraspirazione misurata con la formula di Turc, utilizzando la temperatura corretta, per l'area di studio è pari a 537.9 mm/anno. Dalla differenza tra precipitazioni e evapotraspirazione reale si ottiene il valore delle precipitazioni efficaci (PE), che nel bacino del Cixerri sono pari a 148.4 mm/anno, che corrispondono al deflusso idrico globale (Tabella 25).

$$P - ETR = PE$$

<b>Anno</b>	<b>P (mm/anno)</b>	<b>ETR (mm/anno)</b>	<b>PE (mm/anno)</b>
1989-2009	686.3	537.9	148.4
2013	828.0	548.2	279.8
2014	694.4	510.2	184.1
2015	680.5	506.4	174.1

**Tabella 25 - Riepilogo Precipitazione, Evapotraspirazione reale e precipitazione efficace relativa agli anni di riferimento**

$$PE = R + I = D$$

Il deflusso idrico globale è dato dalla somma dei deflussi superficiali (R) e di quelli sotterranei (I):

$$D = R + I$$

R = ruscellamento superficiale, ossia la quantità d'acqua che scorre sulla superficie del suolo andando ad alimentare l'idrografia superficiale;

I = infiltrazione; quantità d'acqua che si infila nel sottosuolo.

Per il calcolo dell'infiltrazione efficace, e pertanto della ricarica attiva, si è utilizzata la metodologia descritta nel capitolo precedente, e descritta dalla seguente equazione:

$$I_{\text{eff}} = PE \chi \quad (\text{mm/anno})$$

$I_{\text{eff}}$  = infiltrazione efficace annua (mm/anno)

PE = precipitazione efficace annua (mm/anno)

$\chi$  = coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.)

Quest'ultimo consente di definire la percentuale di acqua che si infila tenendo conto delle caratteristiche litologiche del complesso idrogeologico, in quanto il bacino in esame è caratterizzato da una scarsa copertura di suolo e da roccia affiorante. Di seguito sono riportati i coefficienti di infiltrazione potenziale (c.i.p.) di ciascun litotipo del complesso idrogeologico, utilizzato nell'area di studio sono di seguito riportati (Tabella 26).



<b>Affioramento</b>	<b>Superfici (mq)</b>	<b>C.i.p</b>
Centri Abitati	4213014	0.3
Depositi antropici	224748	0.3
Alluvioni recenti	165900884	0.8
Alluvioni Antiche	22772701	0.8
Formazione del Cixerri	15943480	0.2
Vulcaniti Terziarie	5035240	0.6
Metamorfico Paleozoico	6099687	0.2

**Tabella 26 - Coefficienti di infiltrazione Potenziale (c.i.p.) per ciascun litotipo presenti nell'area di studio**

L'infiltrazione efficace per l'acquifero risulta pari a 107.9 mm/anno, da cui otteniamo, tramite la equazione di seguito riportata, il valore del ruscellamento superficiale (Tabella 27).

$$PE - I_{\text{eff}} = R$$

<b>Anno</b>	<b>PE (mm/anno)</b>	<b>R (mm/anno)</b>	<b>I<sub>eff</sub> (mm/anno)</b>
1989-2009	148.4	40.5	107.9
2013	279.8	76.4	203.4
2014	184.1	50.2	133.9
2015	174.1	47.5	126.6

**Tabella 27 - Precipitazione efficace, Ruscellamento e infiltrazione efficace relativa agli anni di riferimento**

Nella tabella sottostante sono stati riportati i valori annui di ciascun parametro del bilancio idrogeologico, per i diversi periodi di riferimento considerati.

Si può notare che i valori di precipitazione del 2014-2015 sono in linea con la serie ventennale, mentre il 2013 risulta ben al di sopra della media con un incremento di circa 140 mm/anno. I valori di precipitazione efficace, infiltrazione e ruscellamento sono sempre superiori alla media, questo è dovuto ad un valore di evapotraspirazione reale inferiore.

<b>Elementi del bilancio (mm/anno)</b>	<b>1989-2009 (media - annua)</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
Precipitazione totale	686.3	828.0	694.4	680.5
Evapotraspirazione reale	537.9	548.2	510.2	506.4
Precipitazione efficace	148.4	279.8	184.1	174.1
Infiltrazione efficace	107.9	203.4	133.9	126.6
Ruscellamento superficiale	40.5	76.4	50.2	47.5

**Tabella 28 - Valori medi annui degli elementi presi in considerazione per il bilancio idrogeologico**

Il bilancio idrogeologico ci permette di valutare le riserve regolatrici ossia i volumi idrici rinnovabili che annualmente costituiscono la ricarica attiva dell'acquifero.

La ricarica totale dell'intero bacino, che ha un'area di circa 220 kmq, è di circa 24 milioni di mc nel ventennio 1989 - 2009 e di circa 10 milioni di mc in più nel triennio 2013-2015, dove si ha una media di 34 milioni di mc (Tabella 29).

Periodo	Riserve regolatrici nel bacino idrogeologico (mc)	Riserve regolatrici nelle alluvioni bacino idrogeologico (mc)
1989-2009	23758344	20357768
2013	44795045	38383447
2014	29473795	25255156
2015	27872828	23883338

**Tabella 29 - Riserve regolatrici totali relative ai tre periodi di riferimento**

### 3.1.6 Campagna idrogeochimica

Nella Tabella 30 sono riassunte le statistiche dei risultati dell'indagine idrogeochimica, effettuata a Luglio 2015, divisi tra acque sotterranee e superficiali (in Appendice 4 i dati completi). Le acque sotterranee mostrano una salinità (TDS) compresa tra 0.3 e 3.2 g/L, mentre le acque superficiali hanno valori di salinità mediamente inferiore rispetto alle acque sotterranee, varianti tra 0.5 e 0.9 g/L; questo indica un arricchimento in minerali dovuto sia alla dissoluzione delle rocce ad opera della circolazione idrica sia dell'inquinamento antropico. Il pH delle acque sotterranee varia tra 6.5 e 8.27, con un valore medio di 7.19, mentre quello delle acque superficiale, risulta più alcalino, tra 7.62 e 8.42, con un valore medio di 8.04.

I valori del potenziale redox indicano in generale condizioni ossidanti ( $E_h = 0,3$  a  $0,5$  V) per tutte le acque sia sotterranee che superficiali, tranne per il campione CIX 36 che indica condizioni riducenti ( $E_h = -28$  V). Le acque sotterranee hanno concentrazioni mediane più alte, rispetto alle acque superficiali, di tutti gli elementi maggiori, tranne del potassio.

La concentrazione del nitrato varia tra 0 mg/L, misurata nel campione CIX 36 avente condizioni riducenti, ad un valore massimo di 153 mg/L, con una media che si attesta su 29 mg/L, nelle acque sotterranee. Le acque superficiali invece mostrano valori di nitrato molto più basse ( $NO_3 = 0.5 - 17$  mg/L). In generale la concentrazione di nitrati ha superato il valore di soglia, definito per legge, di 50 mg/L in circa il 10-20% dei campioni raccolti.

Quasi tutti i campioni di acque sotterranee (14 vs 15) e di acque superficiali (4 vs 6), hanno superato invece il limite di 500  $\mu\text{g/L}$  di  $NO_2$  (D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.). Tale inquinamento è dovuto verosimilmente alle attività antropiche. Nel diagramma Eh/pH (Grafico 6) si possono individuare diversi gruppi di acque; tutte indicano la provenienza da un ambiente ossidante, tranne il CIX36 che indica un ambiente riducente.

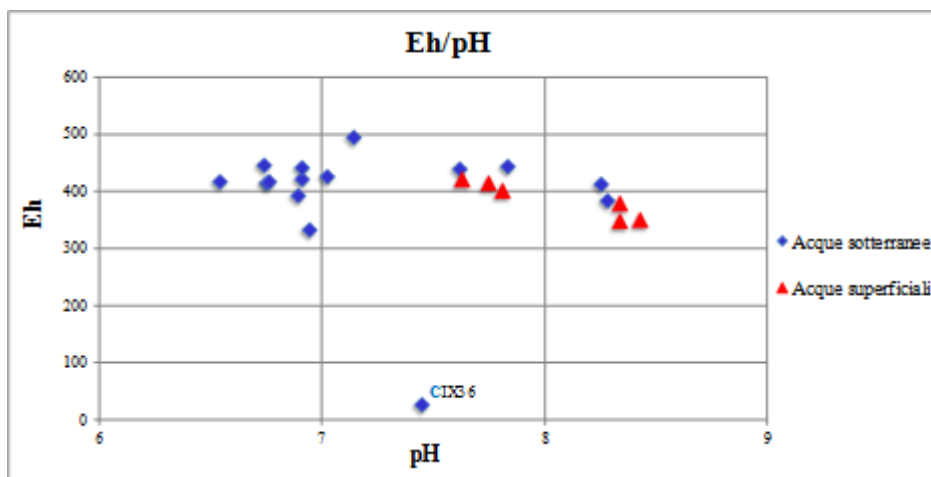


Grafico 6 - Diagramma Eh/pH

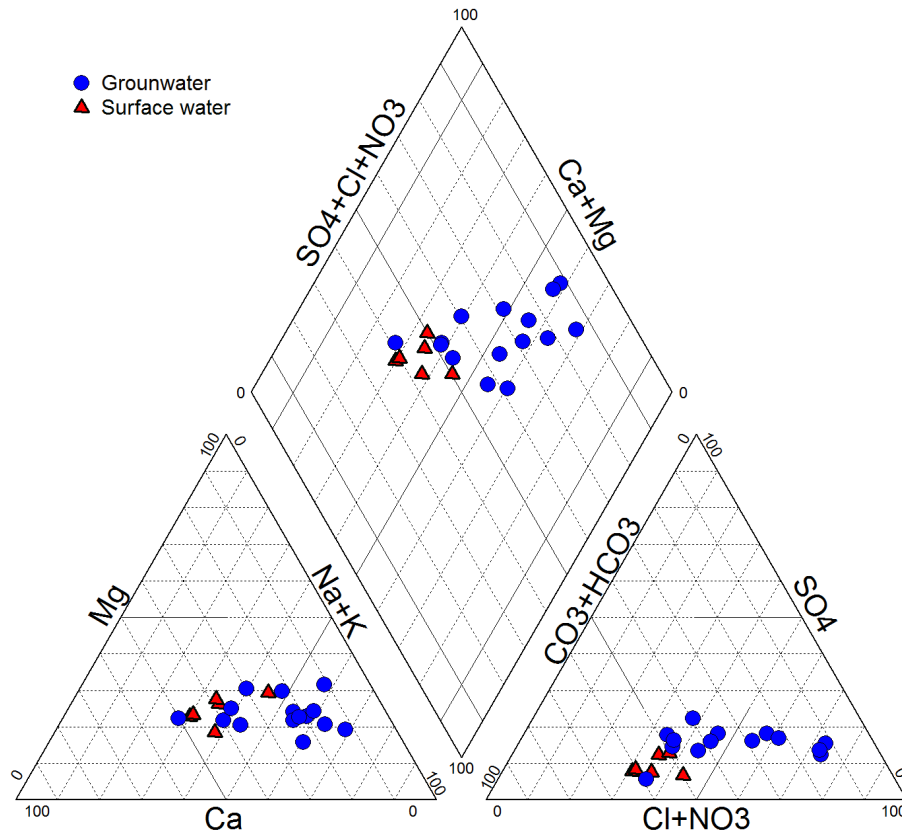
	T	pH	Eh	Conducibilità	TDS	Ca	Mg	K	Na	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Br
Acque sotterranee	°C		mV	mS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
N.	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Minimo	20.4	6.53	28	0.46	285	16.3	11.5	1.4	53.5	74.7	77.4	33.4	0.0	8.9	0.31
Massimo	27.8	8.27	495	5.03	3155	169.4	203.5	25.3	742.7	617.6	1328.4	344.1	153.4	20.8	10.67
Media	23.7	7.19	395	2.05	1350	88.8	61.5	8.4	265.2	338.1	425.1	149.3	28.6	13.4	2.31
Mediana	23.5	6.93	418	1.57	1207	90.9	42.5	5.6	157.1	344.7	204.2	106.7	18.3	12.5	1.14
Dev. Standard	2.2	0.56	108	1.50	905	42.7	52.4	7.8	238.5	140.9	430.3	102.8	40.0	3.6	2.98
25 percentile	22.2	6.82	404	1.03	731	66.0	31.4	2.9	84.1	295.4	124.9	80.7	5.1	10.4	0.52
75 percentile	24.8	7.53	441	2.37	1500	109.3	70.4	10.4	323.1	404.0	459.6	196.5	32.5	15.3	2.33
varianza	5	0.31	11568	2	818531	1827	2747	60	56876	19852	185138	10564	1598	13	8.85
asimmetria	0.6	1.0	-3.2	1.10	1	0.1	1.7	1.3	1.2	-0.1	1.4	0.8	2.5	0.7	2.09
Curtosi	-0.5	-0.2	11	0.00	-0.01	0.1	3.0	0.2	0.0	0.5	0.5	-0.5	6.9	-0.4	4.06
Acque superficiali															
N.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Minimo	25.4	7.62	350	0.63	467	59.2	15.2	3.2	42.2	242.5	69.2	24.3	0.5	7.0	0.31
Massimo	32.0	8.42	422	1.22	859	82.4	44.3	17.3	119.2	373.3	189.2	66.2	17.1	12.4	1.25
Media	28.2	8.04	387	0.87	618	66.5	26.9	7.6	68.5	289.3	110.2	39.6	5.9	9.4	0.54
Mediana	27.9	8.07	392	0.82	579	62.5	24.3	6.8	63.2	272.8	99.3	33.8	4.2	9.2	0.43
Dev. Standard	2.6	0.36	32	0.23	157	9.0	11.6	5.2	28.7	52.0	44.9	17.2	5.8	2.2	0.35
25 percentile	26.0	7.76	359	0.68	494	60.8	18.0	4.2	47.4	249.9	77.7	26.4	3.3	7.7	0.37
75 percentile	29.9	8.33	413	1.01	713	69.9	34.0	7.9	76.4	317.3	125.2	50.3	5.7	10.7	0.45
varianza	7	0.1	1000	0.05	24611	82	134	27	822	2707	2020	294	34	5	0.13
asimmetria	0.4	-0.1	-0.3	0.62	0.7	1.4	0.6	1.7	1.2	0.9	1.2	0.8	1.9	0.3	2.32
Curtosi	-1.5	-2.9	-2.2	-1.02	-1.0	1.1	-1.3	3.2	1.5	-0.4	1.3	-1.0	4.1	-1.9	5.53

Acque sotterranee	F	NO2	NH4	Sr	Li	U	Mo	Cu	B	Ag	Zn	Al	Cd
	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
N	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Minimo	0.09	0.1	<0.001	0.1	5	<0.03	<1	1	34	<0.03	11	<3	<0.2
Massimo	2.4	9	<0.001	1871	459	28	4.5	11	595	0.1	152	8	1
Media	0.593	3.053		501.940	43.467	4.286	2.750	4.133	140.533	0.065	47.2	6	0.463
Mediana	0.4	1.3		253	11	2	2.75	3	79	0.065	35	6	0.3
Dev. Standard	0.60	3.20		526.68	115.23	7.46	2.47	3.48	151.77	0.03	41.65	2.83	0.33
25 percentile	0.215	0.7		212	7	0.43	1.875	1.5	63.5	0.0525	15	5	0.3
75 percentile	0.65	3.4		514.5	21.5	4	3.625	6.5	133.5	0.0775	67.5	7	0.475
varianza	0.36	10.23		277387.47	13276.84	55.65	6.13	12.12	23033.98	0.00	1734.89	8	0.111
asimmetria	2.289	1.181		1.756	3.842	3.087		1.066	2.489	0.000	1.352		1.391
Curtosi	5.774	-0.011		2.623	14.826	10.211		0.002	5.967	0.912	1.367		-0.047
Acque superficiali													
N.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Minimo	0.2	0.0	<0.001	99.0	4.0	0.4	<1	1.0	45.0	<0.03	8.0	<3	<0.2
Massimo	0.4	1.3	10.4	270.0	6.0	1.0	<1.1	3.0	114.0	0.05	123.0	8.0	0.5
Media	0.3	0.7		149.8	4.8	0.8		2.0	64.7	0.1	41.2	5.7	0.4
Mediana	0.3	0.7		130.5	5.0	0.8		2.0	59.0	0.1	26.0	5.0	0.4
Dev. Standard	0.1	0.4		61.7	0.8	0.2		0.6	25.4		43.2	2.1	0.1
25 percentile	0.3	0.5		118.5	4.3	0.7		2.0	49.0	0.1	13.8	4.5	0.3
75 percentile	0.4	0.9		148.5	5.0	0.9		2.0	63.8	0.1	47.3	6.5	0.4
varianza	0.0	0.2		3801.4	0.6	0.0		0.4	645.9		1864.6	4.3	0.0
asimmetria	-0.3	-0.1		2.0	0.3	-0.8		0.0	1.9		1.8	1.3	
Curtosi	-0.1	0.5		4.3	-0.1	0.1		2.5	4.1		3.2		

Acque sotterranee	Sb	Te	Ba	Tl	Pb	As	Rb	Co	V	Cr	Fe	Mn	Ni
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
N.	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Minimo	<0.1	<0.04	31	<0.03	<0.4	<0.4	0.3	0.08	<2	<0.7	<21	<4	1
Massimo	0.6	0.06	384	0.11	25	1.9	15	0.4	9	2	701	365	3
Media	0.275	0.052	97	0.051	2.9	0.954	3.5	0.152	6.750	1.533	394.5	95.8	1.7
Mediana	0.200	0.05	71	0.04	0.55	0.85	2	0.133	6.5	1.6	394.5	40	2
Dev. Standard	0.176	0.008	90.9	0.0	6.837	0.411	3.871	0.100	1.708	0.503	433.456	125.285	0.724
25 percentile	0.175	0.05	57.5	0.032	0.325	0.675	1.5	0.075	5.75	1.3	241.25	11.5	1
75 percentile	0.325	0.06	91.5	0.05	0.8	1.1725	3	0.19	7.5	1.8	547.75	134.5	2
varianza	0.031	7E-05	8256	0.001	46.749	0.169	15.0	0.010	2.9	0.3	187884.5	15696.4	0.5
asimmetria	1.05	-0.512	2.686	1.980	3.062	1.190	2.295	1.257	0.753	-0.586		1.421	0.628
Curtosi	0.111	-0.612	7.602	4.201	9.577	1.161	5.425	1.385	0.343			0.725	-0.654
Acque superficiali													
N.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Minimo	0.2	<0.04	83	<0.03	1.3	0.8	2	0.12	<2	<0.7	<21	<4	1
Massimo	0.7	<0.04	155	0.09	5.9	2.5	5	0.3	<2	<1	193	65	2
Media	0.39		113.17	0.06	3.08	1.27	3.50	0.22			92.75	38	1.22
Mediana	0.375		99.5	0.05	2.15	0.95	3.5	0.22			62	39	1
Dev. Standard	0.196		30.380	0.023	1.884	0.653	1.378	0.093			67.019	18.815	0.402
25 percentile	0.225		95.25	0.05	2	0.9	2.25	0.133			57	35	1
75 percentile	0.4875		136	0.07	4.325	1.375	4.75	0.3			97.75	39	1.225
varianza	0.038		922.967	0.001	3.550	0.427	1.9	0.009			4491.583	354	0.16
asimmetria	0.63		0.81	1.73	0.93	1.80	0.00	-0.02			1.97	0.13	2.03
Curtosi	-0.58		-1.67		-1.27	3.00	-2.30	-3.28			3.89	1.86	4.07

Tabella 30 - Riassunto statistico dei principali parametri idrogeochimici delle acque sotterranee e superficiali (Luglio 2015)

Il diagramma di Piper (Grafico 7) mostra che le acque superficiali e quelle sotterranee a bassa salinità, hanno una composizione alcalino-calcica, mentre le acque sotterranee con una salinità maggiore di 1.3 g/L, hanno una composizione cloruro-sodica; da notare che all'aumentare della salinità aumenta il contenuto di solfato (SO<sub>4</sub>).



**Grafico 7 - Diagramma di Piper delle acque superficiali e sotterranee della Piana del Cixerri**

Quanto emerso dal diagramma di Piper è visibile anche dal diagramma di Stiff (Grafico 8), dove si nota come le acque a minore salinità presentano facies a bicarbonati prevalenti, bilanciate in calcio (colonna a sx) tranne i primi due campioni (CIX 58 e CIX 117), che nonostante la bassa salinità presentano una facies cloruro sodica, come le acque sotterranee con salinità maggiore di 1.3 g/L (colonna a dx).

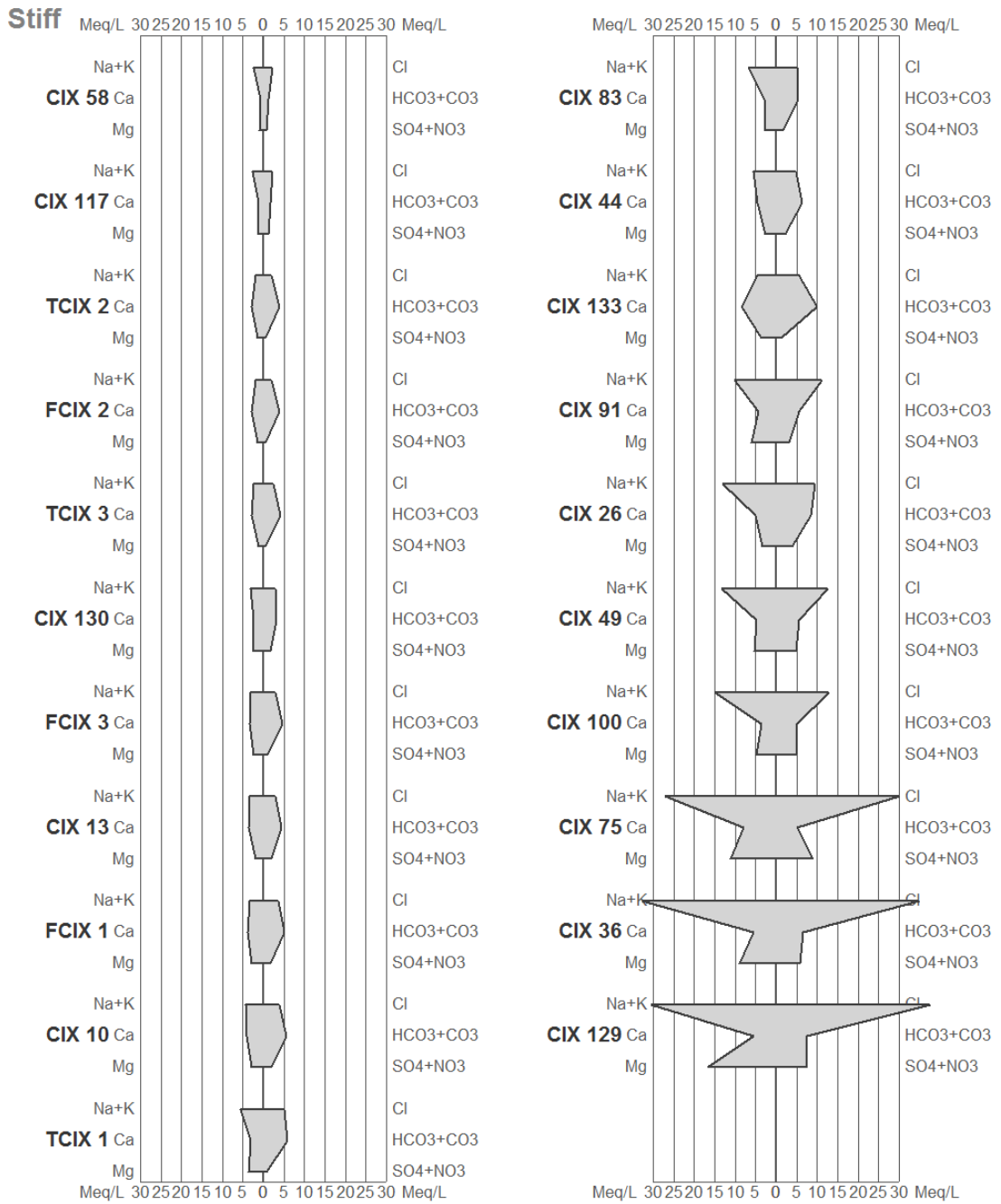


Grafico 8 - Diagramma di Stiff



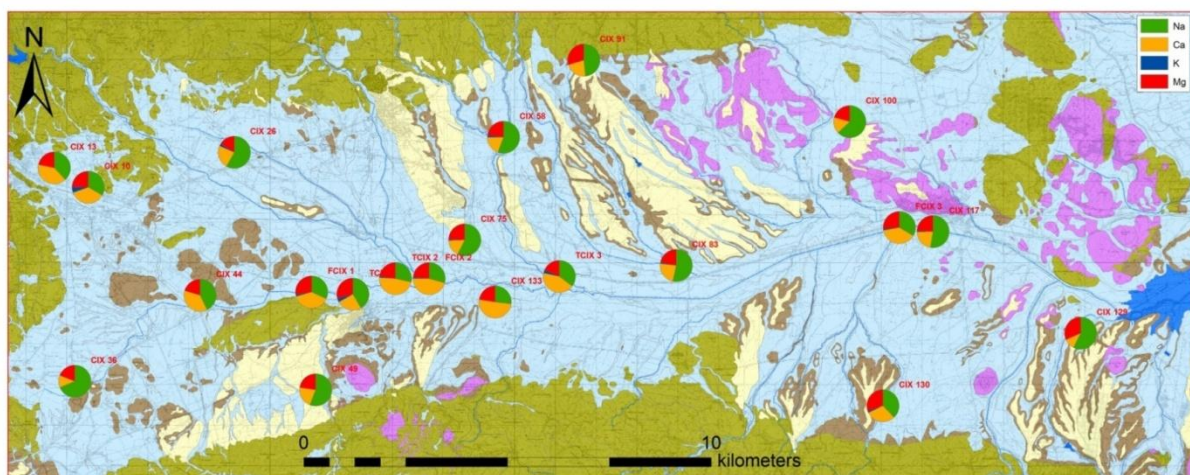


Figura 41 - Ripartizione dei cationi nei punti campionati

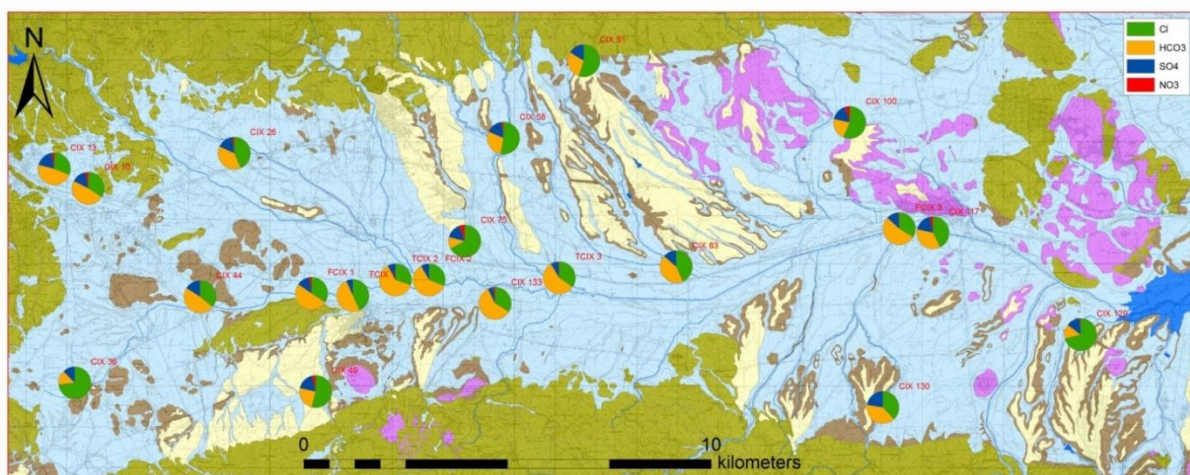


Figura 42 - Ripartizione degli anioni nei punti campionati

Nelle carte sopra riportate (Figura 41/Figura 42) sono stati plottati all'interno della piana i digramma a torta dei principali cationi e anioni. Si può notare che i campioni di acque sotterranee situati a nord ovest della piana e quelli delle acque superficiali lungo il corso d'acqua mostrano una minore mineralizzazione e una composizione bicarbonato calcica, mentre le acque a mineralizzazione e conducibilità più elevata sono presenti, lungo i bordi e nella zona orientale della piana, hanno una composizione cloruro sodica.

Il rapporto Na/Cl (Grafico 9), delle acque sotterranee e superficiali, indica valori simili a quelli dell'acqua di mare diluita ( $Na/Cl=0.86 \text{ meq/L}$ ), da ciò si evince l'importante contributo delle piogge. I campioni che presentano valori di sodio superiori al cloro indicano uno scambio ionico in cui il Ca e il Mg sono stati sostituiti da Na, indicando che queste acque si trovano in formazioni alcaline di origine vulcanica o ignee o metamorfiche (Chiesa, 1988). L'eccesso di cloro rispetto al sodio, si trova prevalentemente nelle acque superficiali e nei

campioni a salinità più elevata, che potrebbe dovuto a processi di scambio, tipici dell'acqua salina, ma anche essere causato dallo spandimento di fertilizzanti.

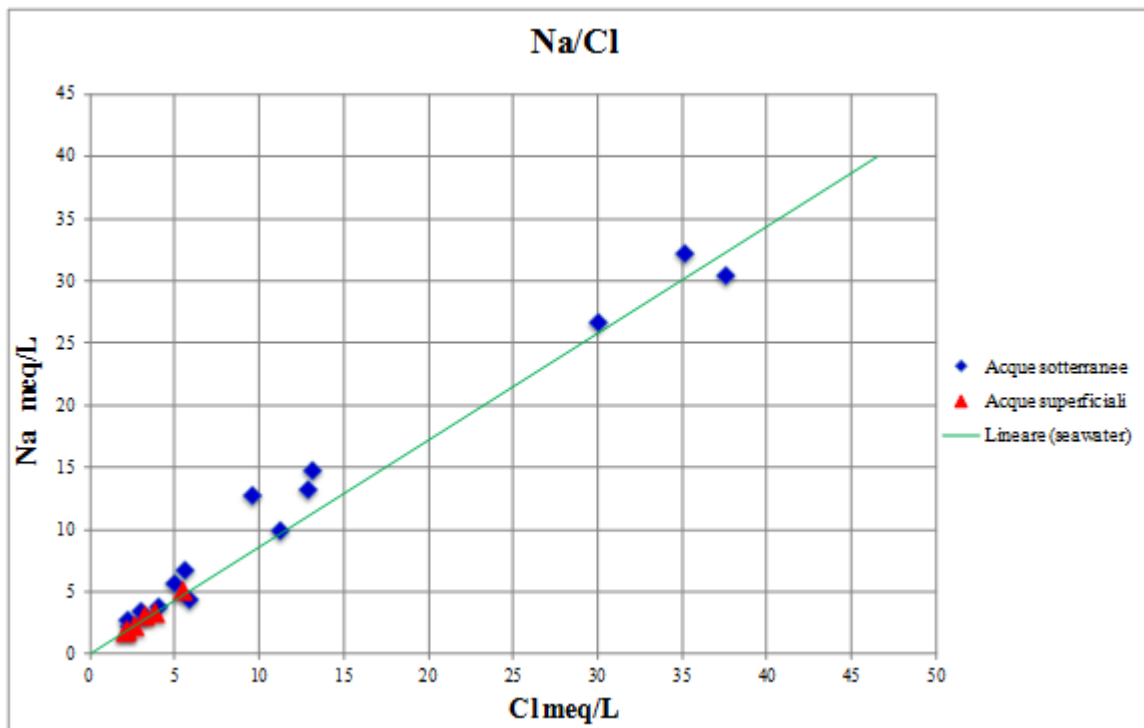


Grafico 9 - Rapporto Na/Cl delle acque della piana del Cixerri

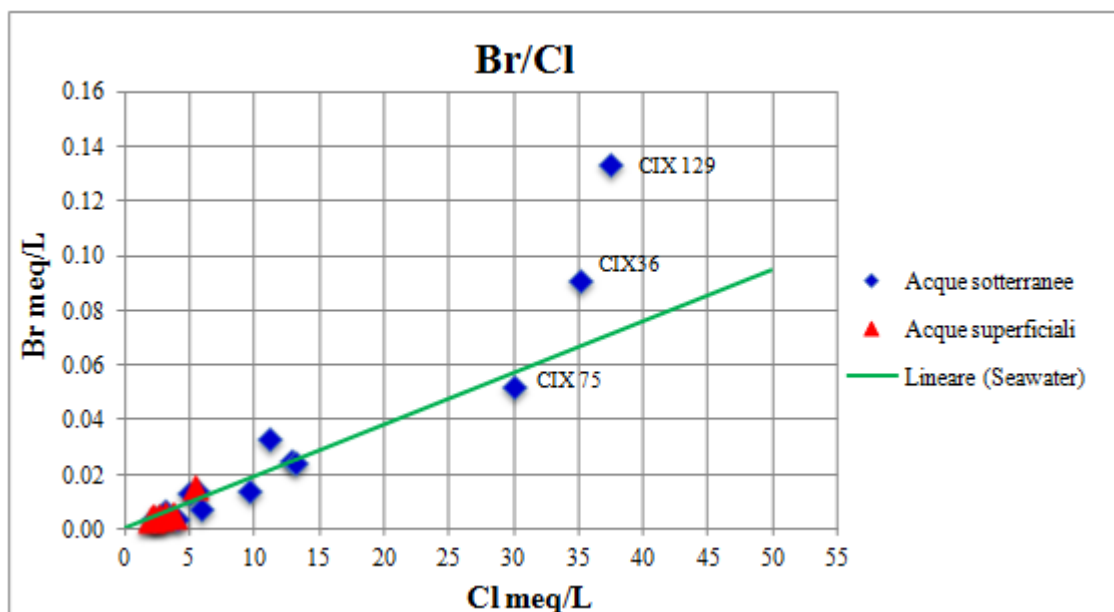


Grafico 10 - Rapporto Br/Cl delle acque della piana del Cixerri

Osserviamo come il rapporto Br/Cl (Grafico 10) è analogo a quello dell'acqua di mare per la maggior parte dei campioni, gli unici che mostrano un andamento differente sono il CIX 36 e il CIX 129, che hanno un rapporto Br/Cl, più elevato rispetto all'acqua di mare. La

diminuzione del rapporto Br/Cl potrebbe essere imputato a scarichi o ad effluenti zootecnici (Nassery & Kayhomayoon, 2013).

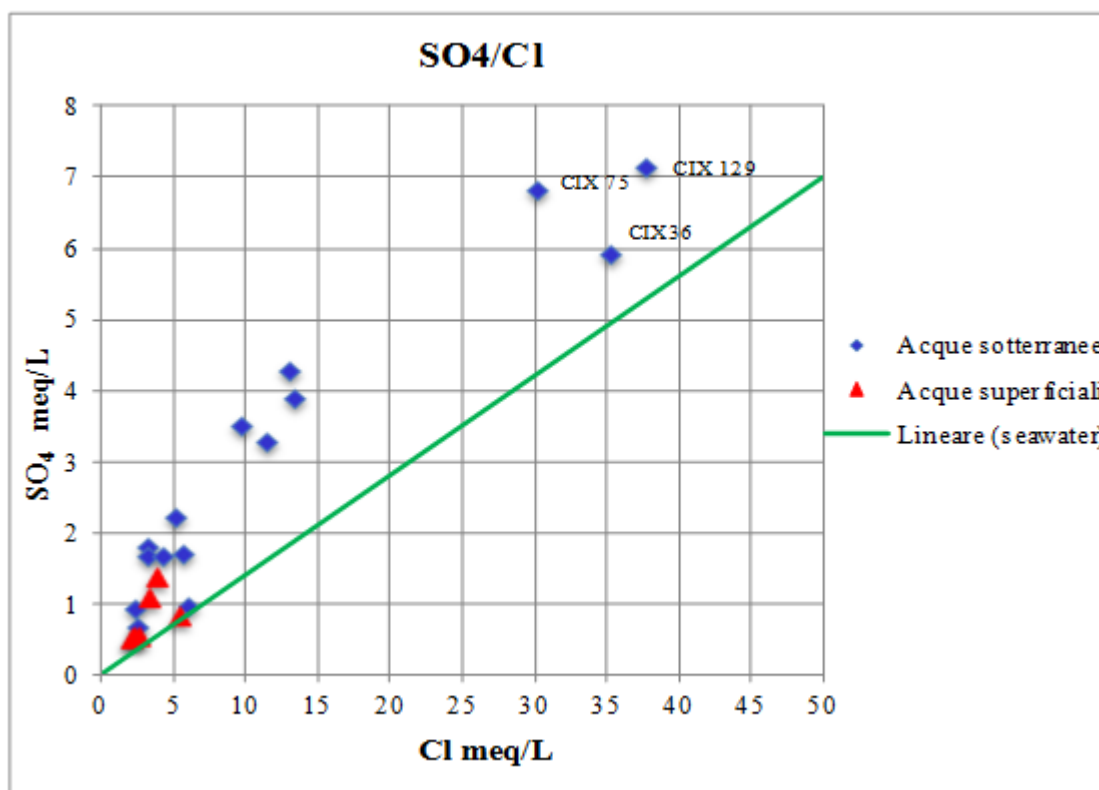


Grafico 11 - Diagramma SO<sub>4</sub>/Cl

Dal rapporto solfato cloro si evince che

Dal diagramma Cl/SO<sub>4</sub> (Grafico 11) si nota una correlazione tra i due ioni, all'aumentare del cloro si ha un aumento del Solfato, ma non si evince una corrispondenza con la retta di diluizione dell'acqua mare. I campioni risultano tutti arricchiti in solfato; pertanto l'origine del solfato è da attribuire a processi di scambio ionico e interazione acqua-roccia.

Nelle acque un rapporto  $Ca/Ca+SO_4 = 0.5$  (CIX 36, CIX 49, CIX 58, CIX 75, CIX 100) indica la dissoluzione del gesso, valori superiori a 0.5 indicano che la sorgente del calcio, oltre che dal gesso, deriva da calcite e dolomite e dai silicati. Tenori di  $Ca/Ca+SO_4$  inferiori 0.5 indicano la precipitazione della calcite (CIX 129) (Nassery & Kayhomayoon, 2013) (Grafico 12).

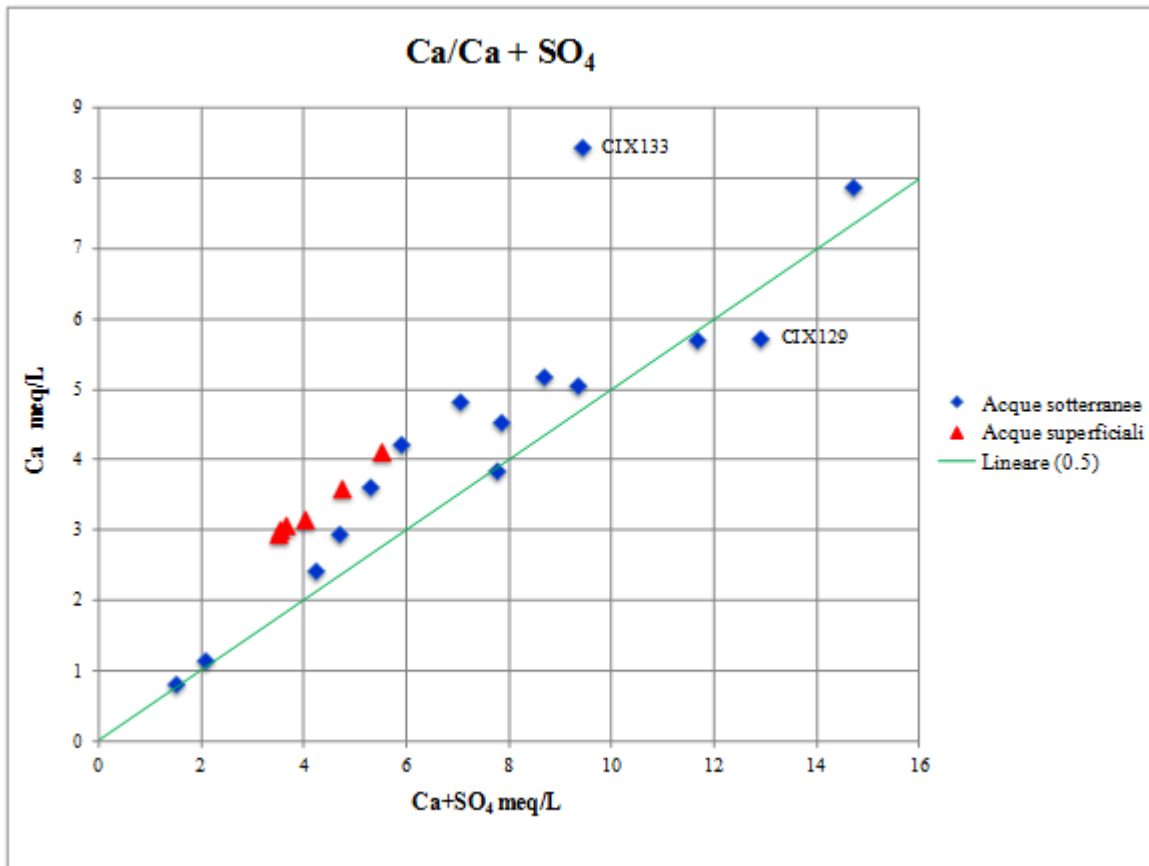


Grafico 12 - Diagramma Ca/Ca+SO<sub>4</sub>

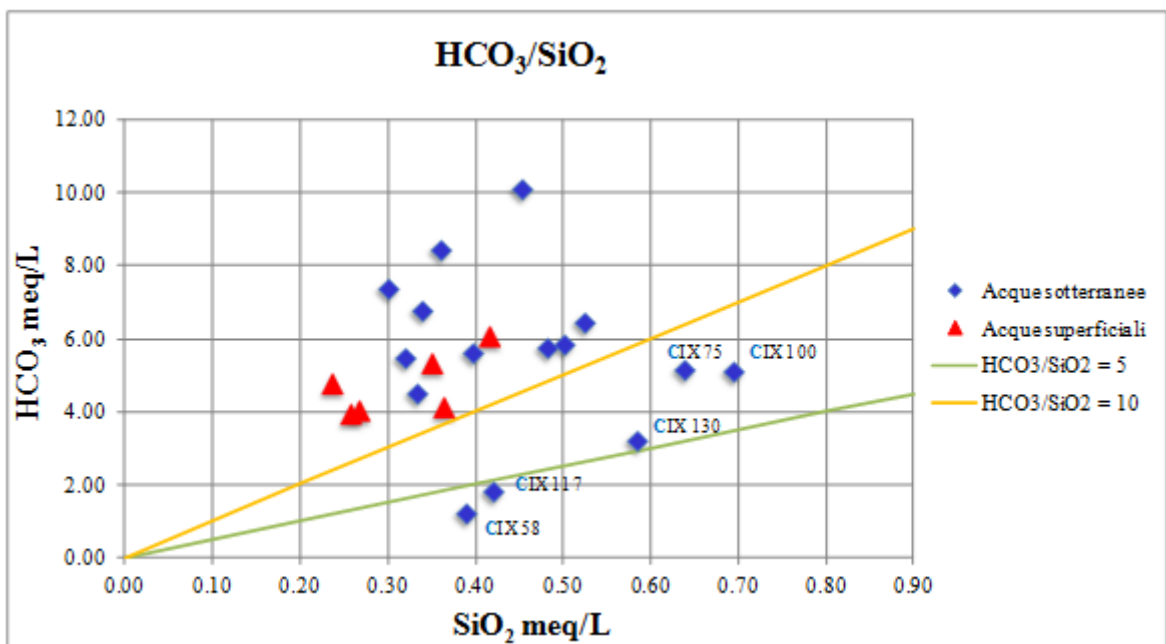


Grafico 13 -Diagramma HCO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>

Il diagramma HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> vs SiO<sub>2</sub> (Grafico 13) indica se le acque hanno circolato in litologie silicee o carbonatiche. Un rapporto < 5 indica una disgregazione delle silice, pertanto

dimostra che le acque hanno circolato in acquiferi ricchi in silice, un rapporto  $> 10$  indica invece la disgregazione di carbonati e pertanto che le acque hanno circolato in litologie carbonatiche (Hounslow, 1995). Il diagramma mostra che solo due campioni (CIX 58, CIX 117) derivano dalla disgregazione dei silicati, tre campioni (CIX 130, CIX 100, CIX 75) non mostrano nessun trend specifico. Tutti gli altri campioni di acque sotterranee e tutte le acque superficiali derivano invece dalla disgregazione di rocce carbonatiche.

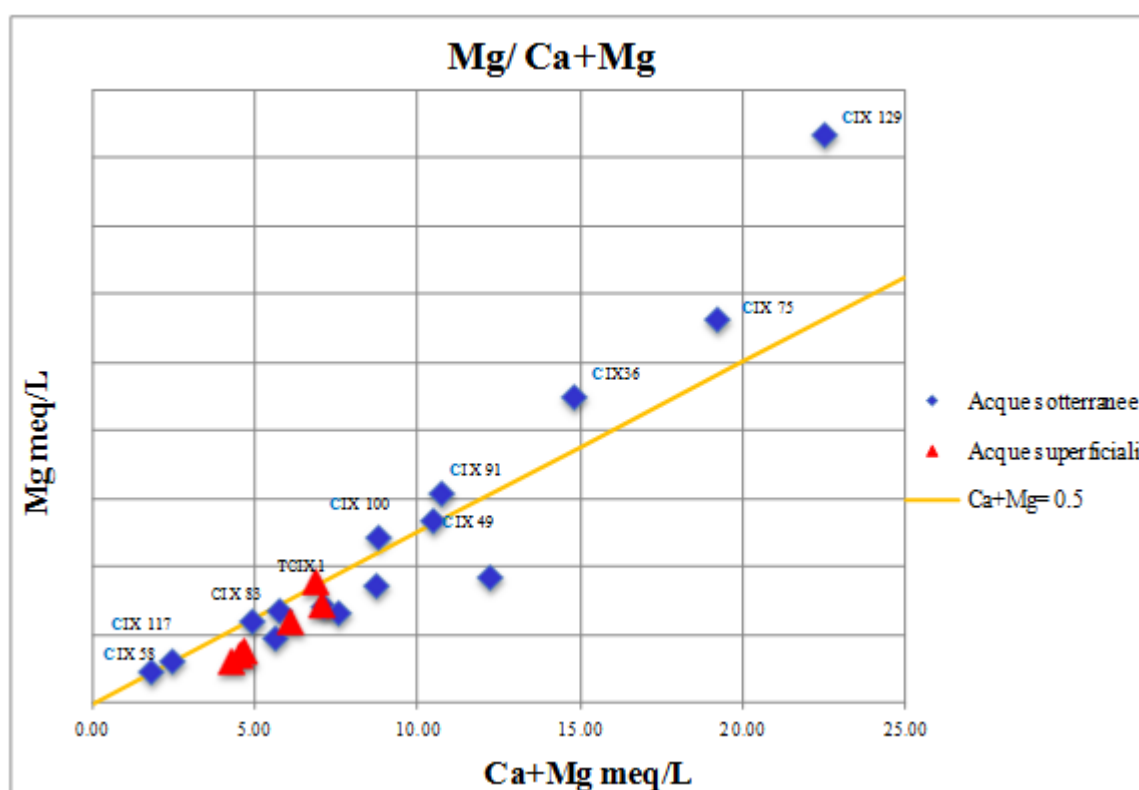


Grafico 14 - Diagramma Mg/Ca+Mg

Con il diagramma Mg/Ca+Mg (Grafico 14) è possibile discriminare la tipologia di rocce silatiche e carbonatiche che hanno influenzato la composizione delle acque. Nello specifico le acque aventi un rapporto  $HCO_3/SiO_2 < 5$  e  $Mg/Ca+Mg > 0.5$  indicano che le acque derivano dalla disgregazione di minerali ferromagnesiaci (CIX 58, CIX 117). Per le acque derivanti dalla disgregazione delle rocce carbonatiche ( $HCO_3/SiO_2 > 10$ ) si distinguono tre differenti valori:

$Mg/Ca+Mg=0.5$  acque derivanti dalla disgregazione della dolomite (TCIX1, CIX 83, CIX 49)

$Mg/Ca+Mg < 0.5$  acque derivanti dalla disgregazione del calcare dolomitico

$Mg/Ca+Mg > 0.5$  acque derivanti dalla dissoluzione della dolomite, precipitazione della calcite o dalla contaminazione con acqua di mare (CIX 36, CIX 91, CIX 129). Per i tre campioni (CIX 130, CIX 100, CIX 75) che non mostrano nessun trend specifico, non è possibile definire la tipologia di rocce che hanno influenzato il chimismo delle acque.

L'analisi della speciazione, eseguita con il programma PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999), si è focalizzata prevalentemente sull'analisi dei seguenti elementi: Al, Fe, Mn, Zn, Cd, Cu, Ni, Pb. I risultati, riportati in Appendice 5, mostrano che:

- Con l'aumentare del pH diminuiscono le specie chimiche in soluzione;
- Con l'aumento del pH diminuisce la percentuale di metalli come specie libere in soluzione.

Inoltre, in base al comportamento assunto in soluzione, è stato possibile suddividere gli elementi esaminati in tre gruppi.

- Al, Fe: a pH superiori a 7, si trovano esclusivamente legati allo ione  $\text{OH}^-$ , all'abbassarsi del pH l'alluminio inizia a legarsi anche a  $\text{F}^-$ , mentre il Fe appare come ione libero e/o legato ad  $\text{HCO}_3^-$ .

Essendo la speciazione del Fe sensibilmente legata alle variazioni di Eh, nel campione CIX 36 che ha un basso valore di Eh ( 0,028 V), il Fe non risulta legato all' $\text{OH}^-$ , ma è presente come ione libero e subordinatamente legato a  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ .

- Mn, Zn, Cd: sono gli elementi che si riscontrano più facilmente in soluzione come ioni liberi, oppure legati allo ione carbonato. A pH vicini a 8 la percentuale legata a  $\text{CO}_3^{2-}$  supera quella dello ione libero, questo vale soprattutto per Mn e Zn, il Cd tende invece a formare composti con il  $\text{Cl}^-$ ,
- Cu, Ni, Pb: si legano principalmente con lo ione carbonato e subordinatamente con lo ione bicarbonato. All'aumentare del valore di pH il Cu tende a formare composti con lo ione  $\text{OH}^-$  anche in percentuali superiori al 70%.

L'indice di saturazione della calcite e della dolomite per le acque sotterranee mostra una correlazione con i valori di pH: per valori compresi tra 6.5 e 6.8 le acque risultano sottosature, pertanto tali minerali tendono ad essere disciolti; per pH tra 6.9 e 7.4, calcite e dolomite risultano all'equilibrio, mentre per valori più basici le soluzioni risultano sovrasature rispetto a calcite e dolomite che tendono a precipitare. Gli indici di saturazione della fluorite e del gesso in tutti i campioni hanno valori inferiori allo zero, indicando è possibile che una dissoluzione e un eventuale trasporto di tali elementi lungo le direzioni di flusso della falda acquifera.

Nella Tabella 31 sono stati confrontati i valori di alcuni anioni e cationi con in valori soglia indicati dalla legislazione italiana ed europea per le acque superficiali e sotterranee. Per le acque superficiali destinate a produzione di acqua potabile i parametri per la classificazione dello stato qualitativo delle acque sono indicati dal D.Lgs. 152/2006 (tabella 1/A dell'allegato 2 alla

Parte III), mentre per le acque sotterranee i valori soglia di contaminazione sono indicati nel D.Lgs. 30/2009 (tabelle 2 e 3 dell'allegato 3). Per l'uranio, non essendo compreso dalla normativa nazionale tra i parametri misurati per il calcolo dello stato qualitativo, si fa riferimento ai limiti per la salute fissati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) che fissa il valore limite di presenza di uranio nell'acqua potabile prima in 15 µg/l e successivamente in 30 µg/l.

Dai risultati sopra riportati si può notare un superamento della conducibilità in 2 vs 6 campioni di acque superficiali e in 3 vs 15 di acque sotterranee. I valori di cloro vengono superati in 7 vs 15 campioni di acque sotterranee, ed il solfato in 3 vs 15 campioni sempre di acque sotterranee. Nelle sole acque sotterranee si evidenzia che il limite di fluoro e di ferro viene superato in 1 vs 15 campioni, il limite di Manganese in 3 vs 15, il valore di piombo in 2 vs 15 e infine il valore limite dell'uranio viene superato su un campione su 15.

Per quanto riguarda il nitrato si può osservare che il valore limite viene superato nelle sole acque sotterranee in 3 casi su 15, di cui in un caso (CIX 75) il valore rilevato supera di tre volte il valore soglia. Tutti i campioni di acque sotterranee, tranne uno (CIX 44), superano i valori soglia per il contenuto in NO<sub>2</sub> per le acque sotterranee che in base alla norma (D.Lgs. 30/2009) deve essere inferiore ai 500 µg/L; la presenza di nitriti nell'acqua è riconducibile a fenomeni di contaminazione antropica.

Sempre per le specie azotate segnaliamo il campione TCIX 3 con un contenuto di NH<sub>4</sub> di circa 10 mg/L, superiore di 20 volte il valore soglia (0.5 mg/L).

Camp.	Conduc. µS/cm	Cl mg/L	SO <sub>4</sub> mg/L	NO <sub>3</sub> mg/L	NO <sub>2</sub> mg/L	NH <sub>4</sub> mg/L	F mg/L	Fe µg/l	Mn µg/l	Pb µg/l	U µg/l
TCIX 2	629	69	24	3	0.5	<0.01	0.3	58	37	5.9	0.7
FCIX 2	665	74	27	4	0.5	<0.01	0.4	54	33	5.1	0.8
TCIX 3	742	89	26	5	<0,1	10.4	0.4	193	63	2.3	0.4
FCIX 3	905	109	54	6	0.8	<0.01	0.3	< 21	37	2.05	1.03
FCIX 1	1041	131	66	17	0.9	<0.01	0.2	< 21	<4	1.3	0.9
TCIX 1	1223	189	40	0.45	1.3	<0.01	0.3	66	11.8	2	0.6
CIX 58	463	81	33	6	0.5	<0.01	0.7	< 21	39	0.4	<0.03
CIX 117	580	77	45	11	0.5	<0.01	0.2	< 21	<4	0.2	0.05
CIX 130	805	109	87	0.8	0.7	<0.01	0.4	88	54	0.4	0.3
CIX 13	918	105	81	18	0.7	<0.01	0.5	< 21	<4	10	0.4
CIX 10	1145	141	81	22	1	<0.01	0.4	< 21	<4	0.8	1.7
CIX 83	1240	195	83	6	1.3	<0.01	0.6	< 21	32.2	0.3	5.6
CIX 44	1280	175	107	2	0.07	<0.01	0.1	< 21	365	0.5	1.2
CIX 133	1565	204	47	19	1.2	<0.01	0.09	< 21	255	0.6	3.7
CIX 91	1912	396	159	4	3.2	<0.01	0.5	< 21	<4	0.3	3.2
CIX 26	2030	338	168	28	3.4	<0.01	0.8	< 21	6	24.8	7.3
CIX 49	2320	455	206	54	3.4	<0.01	0.2	< 21	9	0.8	0.5
CIX 100	2420	465	187	68	3.4	<0.01	0.3	< 43	12	1.1	1.7
CIX 75	4500	1064	328	153	8.4	<0.01	0.2	< 53	40	0.7	1.54
CIX 36	4600	1244	285	<0.1	9	<0.01	2.4	701	189	0.3	0.3
CIX 129	5030	1328	344	37	9	<0.01	1.4	< 53	<11	0.1	28
Valori soglia acque sotterranee *	2500 µS/cm	250 mg/L	250 mg/L	50 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L	1.5 mg/L	200 µg/l	50 µg/l	10 µg/l	15 - 30 µg/l
Valori soglia acque superficiali **	1000 µS/cm	200 mg/L	250 mg/L	50 mg/L		4 mg/L	1.7 mg/L	2000 µg/l	1000 µg/l	50 µg/l	

**Tabella 31 - Riepilogo stato qualitativo delle acque**  
\* (D.Lgs. 30/2009 tabelle 2 e 3 dell'allegato 3) \*\* (D.Lgs. 152/2006 tabella 1/A dell'allegato 2 alla Parte III)



- **Analisi statistiche: Analisi delle componenti principali (PCA)**

L'analisi statistica multivariata è stata effettuata attraverso l'Analisi delle Componenti Principali per distinguere le diverse famiglie di acque sotterranee.

Nella PCA degli elementi maggiori LogNormale (Tabella 32, 33 e Figura 43) la PC1 è direttamente correlata con Br, NO<sub>3</sub>, Cl, Na, SO<sub>4</sub>, Mg, CE, TDS, HCO<sub>3</sub>, K, SiO<sub>2</sub>, e inversamente correlata a Eh, Temperatura e pH.

La PC2 è correlata positivamente con Eh, NO<sub>3</sub> e in bassa percentuale con SiO<sub>2</sub>. Invece è correlata negativamente con T, pH, CE, TDS, Mg, Na, Cl, Br e in scarsa misura con Ca, K, SO<sub>4</sub>.

Elementi	PC 1	PC 2
T	-0.019211	-0.02337
pH	-0.0017946	-0.01419
Eh	-0.079286	0.22863
Conducibilità $\mu$ S/m	0.2818	-0.0813
TDS mg/L	0.26737	-0.09514
Ca mg/L	0.16019	-0.02756
Mg mg/L	0.29056	-0.13133
K mg/L	0.081263	-0.02453
Na mg/L	0.36925	-0.11554
HCO <sub>3</sub> mg/L	0.11541	-0.08217
Cl mg/L	0.38107	-0.1352
SO <sub>4</sub> mg/L	0.32602	-0.04027
NO <sub>3</sub> mg/L	0.40142	0.88006
SiO <sub>2</sub> mg/l	0.039787	0.00399
Br mg/L	0.40233	-0.31335
<b>Eigenvalue</b>	<b>1.10879</b>	<b>0.273262</b>
<b>% variance</b>	<b>66.635</b>	<b>16.422</b>

Tabella 32 - Valori elementi maggiori per ogni componente, percentuale varianza e autovalori per i PC identificati

Quadrante 1	Quadrante 2	Quadrante 3	Quadrante 4
CIX 26	CIX 36	CIX 44	CIX 10
CIX 49	CIX 91	CIX 83	CIX 13
CIX 75	CIX 129	CIX 130	CIX 58
CIX 100		<b>TCIX 1</b>	CIX 117
CIX 133			<b>TCIX 2</b>
			<b>TCIX 2</b>
			<b>FCIX 1</b>
			<b>FCIX 2</b>
			<b>FCIX 3</b>

Tabella 33 - Ripartizione dei campioni nei quadranti PCA



## ***4 Discussioni***

L'acquifero delle alluvioni quaternarie del Cixerri, ha una superficie totale di circa 190 kmq, è costituito da sedimenti alluvionali caratterizzati prevalentemente da ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose. Presenta uno spessore medio di circa 3.5 m e un volume totale delle alluvioni, calcolato dal modello geologico 3D, pari a 700 milioni di mc.

È bordato dai rilievi metamorfici paleozoici a nord, ovest e sud, mentre ad est è separato dall'acquifero alluvionale del campidano dalla Soglia di Siliqua. Il letto è costituito prevalentemente dalla Formazione del Cixerri, avente permeabilità molto bassa e in alcune zone poggia sulle metamorfite paleozoiche e sulle vulcaniti terziarie.

Dalle campagne idrogeologiche risulta che la direzione di flusso è da ovest verso est e dai bordi della piana al centro. Oltre ad avere una ricarica laterale ha anche una ricarica zenitale. La falda alimenta il rio Cixerri. L'asta fluviale del rio coincide con l'asse di drenaggio principale.

La permeabilità ha un valore medio di  $0.7 \times 10^{-2}$  in modo specifico varia tra valori  $0.4 \times 10^{-1}$  nei livelli più ghiaiosi e  $0.8 \times 10^{-5}$  nei livelli più siltosi. I valori di infiltrazione permanente risultano tutti inferiori rispetto alla permeabilità ricavata in laboratorio, questo probabilmente dipende dalla diversa profondità di prelievo del sedimento, legata pertanto ad una maggiore costipazione dei livelli superficiali delle alluvioni, punto in cui sono state effettuate le prove di infiltrazione.

Avendo un valore di porosità efficace media dei sedimenti della piana pari a 23.4% si è stimato che il volume totale delle acque potenzialmente immagazzinabili nell'acquifero è pari a circa 168.000.000 mc.

Il bilancio idrogeologico della serie storica (1989-2009) mostra che il 78% delle precipitazioni totali viene allontanato come evapotraspirazione e del 22 % di precipitazioni efficaci 3/4 si infiltra e un quarto va ad alimentare l'idrologia superficiale. L'analisi dei dati pluviometrici degli ultimi 3 anni mostra un 2013 molto piovoso di cui 34% sono precipitazioni efficaci, mentre i valori di precipitazione rilevati tra 2014 e il 2015 mostrano che solo il 27 % sono precipitazioni efficaci e questi sono valori più in linea con la media .

L'indagine idrogeochimica ha messo in evidenza che le acque sotterranee mostrano una salinità (TDS) compresa tra 0.3 e 3.2 g/L, mentre le acque superficiali hanno valori di salinità mediamente inferiori rispetto alle acque sotterranee, varianti tra 0.5 e 0.9 g/L; questo perchè abbiamo un arricchimento in minerali dovuto alla dissoluzione delle rocce ad opera della circolazione idrica.

Il pH delle acque sotterranee varia tra 6.53 e 8.27, con un valore medio di 7.19, mentre quello delle acque superficiali, risulta essere un valore medio di 8.04. più alcalino compreso tra 7.62 e 8.42

Dalle analisi degli elementi maggiori risulta che le acque superficiali e quelle sotterranee a bassa salinità, hanno una composizione alcalino-calcica, mentre le acque sotterranee con una salinità maggiore di 1.3 g/L, hanno una composizione cloruro-sodica; da notare che all'aumentare della salinità aumenta il contenuto di solfato ( $\text{SO}_4$ ).

Il rapporto Na/Cl, delle acque superficiali e sotterranee, indica valori simili a quelli dell'acqua di mare diluita ( $\text{Na/Cl}=0.86$  meq/L), si allineano sulla retta di diluizione dell'acqua di mare a testimonianza che il contributo principale delle acque di falda proviene dalle acque meteoriche che hanno interagito con le litologie presenti nella zona. Dai rapporti  $\text{Ca/Ca+SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$  e  $\text{Mg/Ca+Mg}$  risulta che solo due campioni hanno interagito con rocce silicee, mentre gli altri campioni mostrano un arricchimento in calcio, derivante dall'interazione dell'acqua con il gesso e in maggior misura da calcite e dolomite contenuta nelle rocce.

La concentrazione di nitrati ha superato il valore di soglia di 50 mg/L in circa il 10-20% dei campioni raccolti. Quasi tutti i campioni di acque sotterranee (14 vs 15) e di acque superficiali (4 vs 6), hanno superato il limite di 500  $\mu\text{g/L}$  di  $\text{NO}_2$  (D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.). La contaminazione da nitrati è associata alle attività antropiche, quali l'agricoltura, l'allevamento o le fosse settiche. L'inquinamento da nitrati non sembra collegato al flusso dell'acqua, ma è un effetto puntuale.

Per stimare la mobilità degli elementi chimici e perciò dei contaminanti nelle acque sotterranee è stata studiata la speciazione ossia la ripartizione caratteristica tra le varie distinte specie chimiche in soluzione. L'indice di saturazione della calcite e della dolomite per le acque sotterranee mostra una correlazione con i valori di pH: per valori compresi tra 6.5 e 6.8 le acque risultano sottosature, pertanto tali minerali tendono ad essere disciolti; per pH tra 6.9 e 7.4, calcite e dolomite risultano all'equilibrio, mentre per valori più basici le soluzioni risultano sovrasature rispetto a calcite e dolomite che tendono a precipitare. Gli indici di saturazione della fluorite e del gesso in tutti i campioni hanno valori inferiori allo zero, indicando che è possibile una dissoluzione e un eventuale trasporto di tali elementi lungo le direzioni di flusso della falda acquifera.

## ***5 Conclusioni***

Nel presente lavoro di tesi è stato presentato un approccio multidisciplinare utile per una corretta gestione delle risorse idriche, volto a determinare le caratteristiche quantitative e qualitative della stessa. Un'attenzione particolare inoltre è stata rivolta alla valutazione e alla stima della contaminazione da nitrati.

Lo studio iniziale sulla bibliografia esistente ha permesso di inquadrare la tematica e di cercare una metodologia in grado di fornire una conoscenza globale del sistema acquifero: caratteristiche geologiche, geometria delle formazioni sede dell'acquifero, proprietà idrogeologiche e geochimiche.

A tal scopo si è scelto di usare una metodologia basata sulla creazione di un modello geologico e idrogeologico tridimensionale. La metodologia sviluppata è stata applicata all'acquifero freatico delle alluvioni quaternarie della Piana del Cixerri, nella Sardegna sud occidentale.

Il lavoro di tesi ha previsto una complessa e lunga fase di raccolta dei dati, geologici e idrogeologici, sia esistenti sia acquisiti ex novo, oltre ad una fase di elaborazione degli stessi, spesso utilizzando differenti tecniche.

L'uso combinato di dati geologici di superficie e di profondità e dati geofisici ha permesso di ricostruire la superficie di letto delle alluvioni quaternarie, sede dell'acquifero non confinato. Il modello geologico 3D realizzato con il software 3D MOVE ha fornito informazioni sul volume totale delle alluvioni quaternarie della valle del Cixerri. L'implementazione del modello geologico con i dati di porosità efficace ha permesso di quantificare la capacità di immagazzinamento dell'acquifero. Grazie ai dati pluviometrici e termometrici sono state inoltre calcolate le riserve regolatrici dell'acquifero del Cixerri, sia per il ventennio 1989-2009 che per il triennio 2013-2014-2015.

Il monitoraggio della soggiacenza della falda, effettuata in tre differenti periodi, a scala complessiva di acquifero evidenzia come la falda superficiale sia dipendente dalla stagionalità; le direzioni principali di flusso vanno da Ovest verso Est; la falda alimenta il Rio Cixerri.

Una fase importante del lavoro di dottorato è stata l'acquisizione dei dati di permeabilità, durante la quale sono stati testati differenti metodi, in situ e in laboratorio. I dati litologici raccolti in campo durante l'acquisizione dei dati di permeabilità, hanno confermato e integrato le conoscenze riguardanti l'acquifero. I depositi alluvionali sono costituiti prevalentemente da sabbia ghiaiosa scarsamente classata con fini e da ghiaia sabbiosa scarsamente classata con

fini e in minor misura da ghiaia scarsamente classata con fini e da silt sabbioso ghiaioso scarsamente classato con fini.

Il campionamento delle acque sotterranee e superficiali ha fornito un quadro sullo stato qualitativo dell'acquifero, in particolare il chimismo delle acque sotterranee ha evidenziato la prevalente composizione cloruro- sodica delle stesse, soprattutto nei campioni a salinità più elevata e una composizione bicarbonato-calcica per i campioni di acque sotterranee a minore salinità e per le acque superficiali. In generale chimismo delle acque sotterranee conferma come il contributo principale delle acque di falda proviene dalle acque meteoriche, con interazioni acqua roccia ben definite. Risulta infatti che la maggior parte dei campioni hanno mostrato una influenza da sedimenti carbonatico-dolomitici e solo parzialmente da gesso e silicati.

L'analisi dei nitrati e il censimento dei centri di pericolo ha evidenziato il carattere puntuale della contaminazione, non riscontrando un permanere dell'inquinamento lungo le direzioni di flusso della falda. Le maggiori concentrazioni sono state riscontrate nei pozzi presenti all'interno delle aziende e nelle vicinanze di agglomerati urbani non serviti alla rete fognaria.

Tutte queste conoscenze sono state integrate in un modello idrogeologico concettuale che garantisce una visione globale dell'acquifero al fine di valutarne lo stato quantitativo e qualitativo. Il presente lavoro ha pertanto fornito la base conoscitiva per una successiva realizzazione di un modello numerico di flusso e trasporto e per la sua calibrazione con le osservazioni di campo raccolte e con i dati idrogeologici rilevati *ex-novo*.

I risultati della ricerca potranno essere di supporto agli enti di gestione e controllo delle risorse idriche per la loro corretta gestione e permetterà di individuare possibili azioni di mitigazione della contaminazione da nitrati nelle acque sotterranee e superficiali.

## 6 Bibliografia

- Alyamani M. S. & Sen Z. (1993). Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-Size Distribution Curves. *Ground Water*, 31(4), 551–555. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00587.x>
- Anderson M. P., Woessner W. W. & Hunt R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Balia R., Ardaù F., Barrocu G., Gavaudo E. & Ranieri G. (2009). Assessment of the Capoterra coastal plain (southern Sardinia, Italy) by means of hydrogeological and geophysical studies. *Hydrogeology Journal*, 17(4), 981–997. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0405-z>
- Balia R., Gavaud E., Ardaù F. & Ghiglieri G. (2003). Case History Geophysical approach to the environmental study of a coastal plain, 68(5), 1446–1459.
- Barca S. (1973). Sedimentologia e paleogeografia della formazione continentale oligocenica di Funtanazza (Sardegna sud-occidentale). *Boll. Soc. Natur. Napoli*, (82), 107 – 126.
- Borraccini F., De Donatis M., D'AMBROGI C. & Pantaloni M. (2004). Il Foglio 280-Fossombrone 3D: un progetto pilota per la cartografia geologica nazionale alla scala 1: 50.000 in tre dimensioni. *Bollettino Della Societ{à} Geologica Italiana*, 123(3), 319–331.
- Brangi M. L. O., Mannai C. L., Testa M. A. & Uras G. A. (2010). Assessment of Groundwater Vulnerability to Nitrate Contamination in the surficial aquifer of the Rio Cixerri Plain (South Sardinia, Italy), 1(3), 23–33. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2010-01.O-02>
- Canter L. W. (1996). *Nitrates in Groundwater*. Taylor & Francis.
- Carmignani L., Funedda A., Oggiano G. & Pasci S. (2004). Tectono-sedimentary evolution of southwest Sardinia in the Paleogene: Pyrenaic or Apenninic Dynamic? *Geodinamica Acta*, 17(4), 275–287. <https://doi.org/10.3166/ga.17.275-287>
- Carrara E., Rapolla A. & Roberti N. (1992). Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici. (Liguori, p. 292).
- Carrier W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), 1054–1056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:11\(1054\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054))
- CASMEZ. (1984). *Studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna - II fase - Sulcis-Cixerri* (Vol. IV). Sassari: Università degli Studi di Sassari, Cassa per il Mezzogiorno (Prog. Cassa 25/96).
- Cey E. E., Rudolph D. L., Parkin G. W. & Aravena R. (1998). Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology*, 210(1–4), 21–37. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00172-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00172-3)
- Chen X. (2000). Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy. *Environmental Geology*, 39(12), 1317–1324. <https://doi.org/10.1007/s002540000172>
- Chen X. (2007). Hydrologic connections of a stream–aquifer–vegetation zone in south-central Platte River valley, Nebraska. *Journal of Hydrology*, 333(2–4), 554–568. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.020>

- Cheng C. & Chen X. (2007). Evaluation of methods for determination of hydraulic properties in an aquifer–aquitard system hydrologically connected to a river. *Hydrogeology Journal*, 15(4), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0135-z>
- Cherchi A. & Montadert L. (1982). The Oligo – Miocene rift of Sardinia and the early history of the Western Mediterranean basin. *Nature*, 298, 736–739.
- Chesnaux R., Lambert M., Walter J., Fillastre U., Hay M., Rouleau A., ... Germaneau D. (2011). Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems : Application to the Saguenay – Lac-St . -Jean region , Canada. *Computers & Geosciences*, 37, 1870–1882. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.013>
- Chiesa G. (1988). Inquinamento delle acque sotterranee. *Ed Hoepli*.
- Chilès J.-P., Aug C., Guillen A. & Lees T. (2004). Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method. In *Proceedings of International Symposium on Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Perth, Australia* (Vol. 22, p. 24).
- Civita M. (2005). Idrogeologia applicata e ambientale (p. 794). CEA.
- Civita M. & De Maio M. (2000). SINTACS R5 a new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination. *Pitagora Editrice, Bologna*, 226.
- Cocco F. (2014). Plio-pleistocene tectonic evolution of Southern Sardinia.
- Cocozza T. & Schafer K. (1974). Cenozoic graben tectonics in Sardinia. *Paleogeografia Del Terziario Sardo Nell'ambito Del Mediterraneo Occidentale*, 43(1).
- Cox M. E., Hillier J., Foster L. & Ellis R. (1996). Effects of a rapidly urbanising environment on ground water, Brisbane, Queensland, Australia. *Hydrogeology Journal*, 4(1).
- Cox M. E., James A., Hawke A. & Raiber M. (2013). Groundwater Visualisation System (GVS): A software framework for integrated display and interrogation of conceptual hydrogeological models, data and time-series animation. *Journal of Hydrology*, 491(1), 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.023>
- Da Pelo S., Ghiglieri G., Buttau C., Biddau R., Funedda A., Carletti A., ... Cidu R. (2016). Coupling of 3D hydrogeological modelling and geochemical mapping as an innovatiDaPelo S., Ghiglieri G., Buttau C., Biddau R., Funedda A., Carletti A., ... Cidu R. (2016). Coupling of 3D hydrogeological modelling and geochemical mapping as an innovative appr. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, (Accepted manuscript).
- Da Pelo S., Ghiglieri G., Cuzzocrea C., Carletti A., Fenza P. & Arras C. (2015). 3D hydrogeological modelling supported by geochemical mapping as an innovative approach for management of aquifers applied to the Nurra district (Sardinia, Italy). *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 35, 300–303. <https://doi.org/10.3301/ROL.2015.125>
- De Rienzo F., Oreste P. & Pelizza S. (2008). Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology*, 96(3), 187–204.
- Delaunay B. (1934). Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii I Estestvennyka Nauk*, 7(793–800), 1–2.
- Devlin J. F. (2015). HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis. *Hydrogeology Journal*, 23(4), 837–844. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1255-0>



- Di Maio R., Fabbrocino S., Forte G. & Piegari E. (2014). A three-dimensional hydrogeological–geophysical model of a multi-layered aquifer in the coastal alluvial plain of Sarno River (southern Italy). *Hydrogeology Journal*, 22(3), 691–703. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1087-8>
- Fadda A., Ottelli L., Perna G. & Carbosulcis. (1994). *Il bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniere*. EdiSar.
- Fenech C., Rock L., Nolan K., Tobin J. & Morrissey A. (2012). The potential for a suite of isotope and chemical markers to differentiate sources of nitrate contamination: A review. *Water Research*, 46(7), 2023–2041. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.044>
- Fenza P., Buttau C., Da Pelo S. & Ghiglieri G. (2016). Modellistica geologica e idrogeologica tridimensionale per la valutazione quali-quantitativa delle risorse idriche sotterranee . In Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali (Ed.), *ASITA 2016 - XX Conferenza Nazionale ASITA* (pp. 405–412). Cagliari. Retrieved from <http://atti.asita.it/ASITA2016/Pdf/100.pdf>
- Fenza P., Da Pelo S., Buttau C., Podda F., Orrù C. & Ghiglieri G. (2016). Hydrogeological and hydrogeochemical modelling in the freatic aquifer of the Cixerri plain (Sardinia, Italy). *Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana*, 41, 54–57. <https://doi.org/10.3301/ROL.2016.91>
- Ferrara C., Murru M. & Cristini A. (1995). Considerazioni paleoclimatiche sull’Eocene del Sulcis (Sardegna sud-occidentale). In *Atti Museo Geol. Paleont. Monfalcone, Quad. Spec.*, (pp. 39–49). Roma.
- Franceschelli M., Gattiglio M., Pannuti F. & Fadda S. (1992). Illite crystallinity in pelitic rocks from external nappe zone of the Hercynian chain of Sardinia (Italy). In L. Carmignani & F. P. Sassi (Eds.), *Contributions to the Geology of Italy with special reard to the Paleozoic Basements: IGCP Project No. 276, Newsletter:5* (pp. 127–135).
- Funedda A., Carmignani L., Pasci S., Patta E. D., Uras V., Conti P. & Sale V. (2009). Note illustrative della carta geologica d’Italia alla scala 1:50.000 foglio 556 Assemini. *ISPRA*, 192. Retrieved from <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/sardegna.html>
- Galera C., Bennis C., Moretti I. & Laurent J. (2003). Construction of coherent 3D geological blocks, 29, 971–984. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00085-2)
- Ghiglieri G., Barbieri G. & Vernier A. (2006). *Studio sulla gestione sostenibile delle risorse idriche: dall’analisi conoscitiva alle strategie di salvaguardia e tutela*. (ENEA, Ed.).
- Ghiglieri G., Barbieri G., Vernier A., Carletti A., Demurtas N., Pinna R. & Pittalis D. (2009). Potential risks of nitrate pollution in aquifers from agricultural practices in the Nurra region, northwestern Sardinia, Italy. *Journal of Hydrology*, 379(3–4), 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.020>
- Ghiglieri G., Carletti A., Da Pelo S., Cocco F., Funedda A., Loi A., ... Pittalis D. (2016). Three-dimensional hydrogeological reconstruction based on geological depositional model: A case study from the coastal plain of Arborea (Sardinia, Italy). *Engineering Geology*, 207, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.014>
- Gibert O., Pomierny S., Rowe I. & Kalin R. M. (2008). Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). *Bioresource Technology*, 99(16), 7587–7596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.012>
- Grassi S., Cortecchi G. & Squarci P. (2007). Groundwater resource degradation in coastal plains: The example of the Cecina area (Tuscany – Central Italy). *Applied Geochemistry*,

- 22(11), 2273–2289. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.04.025>
- Green W. H. & Ampt G. A. (1911). Studies in soil physics, part I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, (4), 1–24.
- Hack R., Orlic B., Ozmutlu S., Zhu S. & Rengers N. (2006). Three and more dimensional modelling in geo-engineering. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 143–153.
- Haise H. R., Donnan W. W., Phelan J. T., Lawhon L. F. & Shockley D. G. (1956). The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. In *Agricultural Research Service and Soil Conservation Service - USDA* (Vol. 41). Washington DC: Agricultural Research Service and Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300011572#.WD1KnjAUilc.mendeley>
- Hinkle S. R. & Tesoriero A. J. (2014). Nitrogen speciation and trends, and prediction of denitrification extent, in shallow US groundwater. *Journal of Hydrology*, 509, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.048>
- Hosono T., Tokunaga T., Kagabu M. & Nakata H. (2013). The use of d 15 N and d 18 O tracers with an understanding of groundwater flow dynamics for evaluating the origins and attenuation mechanisms of nitrate pollution. *Water Research*, 47(8), 2661–2675. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.020>
- Hounslow A. (1995). *Water quality data: analysis and interpretation*. CRC press.
- Hussain F. & Nabi G. (2016). Empirical Formulae Evaluation for Hydraulic Conductivity Determination Based on Grain Size Analysis, 3(3), 26–32.
- Hvorslev M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. *U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin*(36), 1–50.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). (2010). Portale del Servizio Geologico Italiano - Archivio nazionale delle indagini del sottosuolo (Legge 464/1984). Retrieved from <http://sgi.isprambiente.it/geoportal/catalog/content/project/indagini464.page>
- Jarvis K. E., Gray A. L. & Houk R. S. (1992). *Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*. Glasgow: Blackie & Sons LTD.
- Jiménez-Martínez J., Candela L., García-Aróstegui J. L. & Aragón R. (2012). A 3D geological model of Campo de Cartagena, SE Spain: Hydrogeological implications. *Geologica Acta*, 10(1), 49–62. <https://doi.org/10.1344/105.000001703>
- Johnson A. I. (1967). *Specific yield: compilation of specific yields for various materials*. US Government Printing Office.
- Jones T. A. (1988). Modeling geology in three dimensions. *Geobyte;(United States)*, 3(1).
- Kaiser H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187–200.
- Karanasios E., GS H., Xu Z., GM C. & Siniossoglou S. (2010). A phosphorylation-regulated amphipathic helix controls the membrane translocation and function of the yeast phosphatidate phosphatase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(41), 17539–17544.
- Kasenow M. (2002). Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis. In Water Resources Publications (Ed.), *Water Resources Publications*. Littleton, Colorado.

- Kaufmann O. & Martin T. (2008). 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*, 34(3), 278–290.
- Kelly S. E. & Murdoch L. C. (2003). Measuring the Hydraulic Conductivity of Shallow Submerged Sediments. *Ground Water*, 41(4), 431–439. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02377.x>
- Kennedy C. D., Genereux D. P., Mitasova H., Corbett D. R. & Leahy S. (2008). Effect of sampling density and design on estimation of streambed attributes. *Journal of Hydrology*, 355(1–4), 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.018>
- Köhne J. M., Júnior J. A., Köhne S., Tiemeyer B., Lennartz B. & Kruse J. (2011). Double-ring and tension infiltrometer measurements of hydraulic conductivity and mobile soil regions. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 41(3), 336–347. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.11376>
- Krumbein W. C. (1934). Mineral Deposits. Waldemar Lindgren. *The Journal of Geology*, 42(4), 445. <https://doi.org/10.1086/624188>
- Landon M. K., Rus D. L. & Harvey F. E. (2001). Comparison of Instream Methods for Measuring Hydraulic Conductivity in Sandy Streambeds. *Groundwater*, 39(6), 870–885. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02475.x>
- Lawley R. & Garcia-Bajo M. (2009). The National Superficial Deposit Thickness Model.(Version 5).
- Lemon A. M. & Jones N. L. (2003). Building solid models from boreholes and, 29, 547–555. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00051-7)
- Loi A. & Dabard M. P. (1997). Zircon typology and geochemistry in the palaeogeographic reconstruction of the Late Ordovician of Sardinia (Italy). *Sedimentary Geology*, 112(3–4), 263–279. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(97\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(97)00038-9)
- MacCormack K. E., Brodeur J. J. & Eyles C. H. (2013). and algorithm selection on the accuracy of 3D subsurface models using synthetic grid models of varying complexity, 71–88. <https://doi.org/10.1007/s10109-011-0160-x>
- Marinoni O. (2003). Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach. *Engineering Geology*, 69(1–2), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00246-6)
- Mastrocicco M., Colombani N., Castaldelli G. & Jovanovic N. (2011). Monitoring and modeling nitrate persistence in a shallow aquifer. *Water, Air, and Soil Pollution*, 217(1–4), 83–93. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0569-8>
- Minet E., Coxon C. E., Goodhue R., Richards K. G., Kalin R. M. & Meier-Augenstein W. (2012). Evaluating the utility of 15N and 18O isotope abundance analyses to identify nitrate sources: A soil zone study. *Water Research*, 46(12), 3723–3736. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.004>
- Musavi-jahro S. H. (2012). Determination of hydraulic conductivity applying empirical formulae and physical modeling, 65(5), 15–21.
- Mussett A. E., Khan M. A. & Lucchi F. R. (2003). *Esplorazione del sottosuolo. Una introduzione alla geofisica applicata*. Zanichelli. Retrieved from <https://books.google.it/books?id=4-bTngEACAAJ>
- Nassery H. R. & Kayhomayoon Z. (2013). Source of salinity in the groundwater of Lenjanat Plain, Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 413–427.

<https://doi.org/10.1007/s12665-012-1746-4>

- Nolan B. T. & Hitt K. J. (2006). Vulnerability of shallow groundwater and drinking-water wells to nitrate in the United States. *Environmental Science and Technology*, 40(24), 7834–7840. <https://doi.org/10.1021/es060911u>
- Nordstrom D. K. (1977). Thermochemical redox equilibria of ZoBell's solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(12), 1835–1841. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90215-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90215-0)
- Odong J. (2007). Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of American Science*, 3(3), 54–60. Retrieved from [http://www.engineerspress.com/pdf/IJAE/2013-01/a1\\_IJAE-133101\\_.pdf](http://www.engineerspress.com/pdf/IJAE/2013-01/a1_IJAE-133101_.pdf)
- Padovani L. & Trevisan M. (2002). *I nitrati di origine agricola nelle acque sotterranee [Nitrates of agricultural origin in groundwater]. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Pitagora Editrice, Bologna.*
- Pala A., Pecorini G. & Porcu A. (1976). Struttura idrogeologica della soglia di Siliqua tra la Fossa del Campidano e la Fossa del Cixerri (Sardegna meridionale). *Bollettino Della Società Geologica Italiana*, 95(03–04), 705–724.
- Parkhurst B. D. L. & Appelo C. a J. (1999). User's Guide To PHREEQC (version 2) — a Computer Program for Speciation, and Inverse Geochemical Calculations. *Exchange Organizational Behavior Teaching Journal, D(Version 2)*, 326. <https://doi.org/Rep.99-4259>
- Perrin M., Zhu B., Rainaud J.-F. & Schneider S. (2005). Knowledge-driven applications for geological modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47(1), 89–104.
- Raiber M., White P. A., Daughney C. J., Tschirter C., Davidson P. & Bainbridge S. E. (2012). Three-dimensional geological modelling and multivariate statistical analysis of water chemistry data to analyse and visualise aquifer structure and groundwater composition in the Wairau Plain, Marlborough District, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 436–437, 13–34. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.045>
- RAS (Regione Autonoma della Sardegna). (2008). Carta Geologica della Sardegna. Retrieved from <http://www.sardegnaoportale.it/index.php?xsl=1598&s=291549&v=2&c=8831&t=1>
- RAS (Regione Autonoma della Sardegna). (2009). I corpi idrici sotterranei significativi della Regione Sardegna: loro qualità ambientale e rischio di non raggiungimento degli obiettivi di cui al D. Lgs. 152/06 (Fase 3). *Fase 3 – Allegato 1 – Titolo 16- Progetto POR – Asse I Misura 1.7. Azione C.*, (Cap 16).
- RAS (Regione Autonoma della Sardegna). (2011). Modello Digitale del Terreno, passo 10m. Retrieved from <http://www.sardegnaoportale.it/index.php?xsl=1598&s=161573&v=2&c=8936&t=1>
- Robertson W. D., Stempvoort D. R. Van, Roy J. W., Brown S. J., Spoelstra J., Schiff S. L. & Rudolph D. R. (2016). Use of an Artificial Sweetener to Identify Sources of Groundwater Nitrate Contamination, 54(4), 579–587. <https://doi.org/10.1111/gwat.12399>
- Ross M., Parent M. & Lefebvre R. (2005). 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 13(5–6), 690–707. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0365-x>

- Royse K. R., Rutter H. K. & Entwisle D. C. (2009). Property attribution of 3D geological models in the Thames Gateway, London: new ways of visualising geoscientific information. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(1), 1–16.
- Sacco D. & Offi M. (2007). Groundwater Nitrate Contamination Risk Assessment: A Comparison of Parametric Systems and Simulation Modelling. *American Journal of ...*, 3(3), 117–125. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2007.117.125>
- Santoro M. (1970). *Sulla applicabilit{à} della formula di Turc per il calcolo della evapotraspirazione effettiva in Sicilia*. Istituto di Idraulica della Universit{à} di Palermo.
- Smirnoff A., Boisvert E. & Paradis S. J. (2008). Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins. *Computers & Geosciences*, 34(2), 127–143. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.008>
- Song J., Chen X., Cheng C., Wang D., Lackey S. & Xu Z. (2009). Feasibility of grain-size analysis methods for determination of vertical hydraulic conductivity of streambeds. *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.043>
- Springer A. E., Petroustson W. D. & Semmens B. A. (1999). Spatial and Temporal Variability of Hydraulic Conductivity in Active Reattachment Bars of the Colorado River, Grand Canyon. *Ground Water*, 37(3), 338–344. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01109.x>
- Stille H. (1939). Bemerkungen betreffend die “Sardische” Faultung und den Ausdruck “Ophiolitisch”. *Z. Dt. Geol. Ges.*, 91, 771–773.
- Taricco M. (1924). Il bacino lignitifero di Gonnesa (Provincia di Cagliari). *Boll. R. Uff. Geol. Ital.*, 49(9), 1–14.
- Todd D. K. & Mays L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Tremblay T., Nastev M. & Lamothe M. (2010). Grid-based hydrostratigraphic 3D modelling of the Quaternary sequence in the Ch{à}teauguay River watershed, Quebec. *Canadian Water Resources Journal*, 35(4), 377–398.
- Turc L. (1954). The water balance of soils. Relation between precipitation, evaporation and flow. In *Annales agronomiques* (Vol. 5, pp. 491–569).
- Turner A. K. (2006). Challenges and trends for geological modelling and visualisation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 109–127.
- Uma K. O., Egboka B. C. E. & Onuoha K. M. (1989). New statistical grain-size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers. *Journal of Hydrology*, 108, 343–366. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90293-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90293-X)
- Urumović K. & Urumović Sr K. (2014). The effective porosity and grain size relations in permeability functions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(6), 6675–6714.
- Velthof G. L., Lesschen J. P., Webb J., Pietrzak S., Miatkowski Z., Pinto M., ... Oenema O. (2014). Science of the Total Environment The impact of the Nitrates Directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000 – 2008, 469(3), 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.058>
- Vukovic M. & Soro A. (1992). Determination of Hydraulic Conductivity of Resources, Porous Media from Grain-Size Composition. In *Water Resources Publications* (p. 83). Littleton, Colorado.
- Wakida F. T. & Lerner D. N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate : a

- review and case study, *39*, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.026>
- Wu Q., Xu H. & Zou X. (2005). An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration, *31*, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.005>
- Wycisk P., Hubert T., Gossel W. & Neumann C. (2009). High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. *Computers & Geosciences*, *35*(1), 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.001>
- Xue D., Botte J., De Baets B., Accoe F., Nestler A., Taylor P., ... Boeckx P. (2009). Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater. *Water Research*, *43*(5), 1159–1170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.048>
- Zheng C., Bennett G. D. & others. (2002). *Applied contaminant transport modeling* (Vol. 2). Wiley-Interscience New York.
- Zhu L., Zhang C., Li M., Pan X. & Sun J. (2012). Building 3D solid models of sedimentary stratigraphic systems from borehole data: An automatic method and case studies. *Engineering Geology*, *127*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.12.001>

## **Ringraziamenti**

Si ringrazia la Provincia di Sassari per l'opportunità di crescita professionale concessami.

Si ringraziano il Professor Giorgio Ghiglieri, la Dottoressa Stefania Da Pelo e la Dottoressa Cristina Buttau per il costante supporto scientifico e morale, per i preziosi consigli e la continua disponibilità avuti durante i tre anni di Dottorato.

Ringrazio tutti i colleghi e i tecnici del dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche di Cagliari, in particolare Salvatore Vacca, che in questi anni sono diventati soprattutto amici, che mi hanno aiutato nelle giornate trascorse in campagna per la raccolta dati e hanno allietato le ore passate insieme.

Un ringraziamento a tutte le persone che hanno fatto parte della mia vita in questi anni di dottorato.

Un ringraziamento speciale va a mio marito e alla mia famiglia per il sostegno morale.

## Appendice 1

Log stratigrafici elaborati dai Sondaggi elettrici verticali (SEV)

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
1	CIXE041C	1475060.2	4352450.1	131.89	124.28	7.61	Alluvioni quaternarie	AQ
1	CIXE041C	1475060.2	4352450.1	124.28	85.30	38.98	Formazione Cixerri	FCIX
1	CIXE041C	1475060.2	4352450.1	85.30	51.89	33.41	Vulcaniti terziarie	VT
2	CIXE042C	1474859.1	4349315.3	89.41	86.18	3.23	Alluvioni quaternarie	AQ
2	CIXE042C	1474859.1	4349315.3	86.18	-60.70	146.88	Formazione Cixerri	FCIX
2	CIXE042C	1474859.1	4349315.3	-60.70	-244.25	183.55	Vulcaniti terziarie	VT
2	CIXE042C	1474859.1	4349315.3	-244.25	-260.59	16.34	Basamento paleozoico	MP
3	CIXE043C	1475512.9	4352366.3	128.40	-361.37	489.77	Formazione Cixerri	FCIX
4	CIXE044C	1475714.0	4351762.8	114.80	-480.47	595.27	Formazione Cixerri	FCIX
4	CIXE044C	1475714.0	4351762.8	-480.47	-495.20	14.73	Basamento paleozoico	MP
5	CIXE045C	1475982.2	4350321.1	94.44	93.23	1.21	Alluvioni quaternarie	AQ
5	CIXE045C	1475982.2	4350321.1	93.23	-121.51	214.74	Formazione Cixerri	FCIX
5	CIXE045C	1475982.2	4350321.1	-121.51	-135.56	14.05	Basamento paleozoico	MP
6	CIXE046C	1476418.1	4349818.2	95.00	-50.37	145.37	Formazione Cixerri	FCIX
6	CIXE046C	1476418.1	4349818.2	-50.37	-65.00	14.63	Basamento paleozoico	MP
7	CIXE047C	1475831.4	4348829.1	81.76	80.12	1.64	Alluvioni quaternarie	AQ
7	CIXE047C	1475831.4	4348829.1	80.12	-2.31	82.43	Formazione Cixerri	FCIX
7	CIXE047C	1475831.4	4348829.1	-2.31	-79.07	76.76	Basamento paleozoico	MP
8	CIXE048C	1476015.8	4347504.7	77.09	-46.53	123.62	Formazione Cixerri	FCIX
8	CIXE048C	1476015.8	4347504.7	-46.53	-314.73	268.2	Basamento paleozoico	MP
9	CIXE049C	1476233.7	4352316.0	119.08	-445.60	564.68	Formazione Cixerri	FCIX
10	CIXE050C	1477323.4	4353841.5	137.17	131.97	5.2	Alluvioni quaternarie	AQ
10	CIXE050C	1477323.4	4353841.5	131.97	24.49	107.48	Formazione Cixerri	FCIX
10	CIXE050C	1477323.4	4353841.5	24.49	-12.83	37.32	Basamento paleozoico	MP
11	CIXE051C	1477306.6	4353120.7	114.00	108.63	5.37	Alluvioni quaternarie	AQ
11	CIXE051C	1477306.6	4353120.7	108.63	58.27	50.36	Formazione Cixerri	FCIX



N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
11	CIXE051C	1477306.6	4353120.7	58.27	-123.23	181.5	Basamento paleozoico	MP
12	CIXE052C	1477222.8	4352349.5	99.05	34.69	64.36	Vulcaniti terziarie	VT
13	CIXE053C	1477491.0	4351997.5	94.30	-15.76	110.06	Vulcaniti terziarie	VT
14	CIXE054C	1477541.3	4350757.0	87.55	-553.94	641.49	Formazione Cixerri	FCIX
15	CIXE055C	1477558.1	4350036.1	84.08	34.14	49.94	Formazione Cixerri	FCIX
16	CIXE055C	1477558.1	4350036.1	34.14	-210.34	244.48	Basamento paleozoico	MP
16	CIXE056C	1477457.5	4349734.4	85.00	83.43	1.57	Alluvioni quaternarie	AQ
16	CIXE056C	1477457.5	4349734.4	83.43	18.42	65.01	Formazione Cixerri	FCIX
16	CIXE056C	1477457.5	4349734.4	18.42	-132.61	151.03	Basamento paleozoico	MP
17	CIXE057C	1476837.2	4349315.3	89.18	-31.05	120.23	Formazione Cixerri	FCIX
17	CIXE057C	1476837.2	4349315.3	-31.05	-177.51	146.46	Basamento paleozoico	MP
18	CIXE058C	1477122.2	4348762.0	75.08	69.63	5.45	Alluvioni quaternarie	AQ
18	CIXE058C	1477122.2	4348762.0	69.63	-77.34	146.97	Formazione Cixerri	FCIX
18	CIXE058C	1477122.2	4348762.0	-77.34	-94.92	17.58	Basamento paleozoico	MP
19	CIXE060C	1477172.5	4348108.2	76.12	58.32	17.8	Alluvioni quaternarie	AQ
19	CIXE060C	1477172.5	4348108.2	58.32	-235.22	293.54	Formazione Cixerri	FCIX
20	CIXE061C	1476803.7	4347705.9	75.32	72.33	2.99	Alluvioni quaternarie	AQ
20	CIXE061C	1476803.7	4347705.9	72.33	23.25	49.08	Formazione Cixerri	FCIX
20	CIXE061C	1476803.7	4347705.9	23.25	-74.11	97.36	Basamento paleozoico	MP
21	CIXE062C	1477222.8	4347404.2	75.05	71.24	3.81	Alluvioni quaternarie	AQ
21	CIXE062C	1477222.8	4347404.2	71.24	-81.82	153.06	Formazione Cixerri	FCIX
21	CIXE062C	1477222.8	4347404.2	-81.82	-94.95	13.13	Basamento paleozoico	MP
22	CIXE063C	1477323.4	4346415.1	99.64	98.74	0.9	Alluvioni quaternarie	AQ
22	CIXE063C	1477323.4	4346415.1	98.74	-22.23	120.97	Basamento paleozoico	MP
23	CIXE064C	1478211.9	4352433.4	110.16	102.43	7.73	Alluvioni quaternarie	AQ
23	CIXE064C	1478211.9	4352433.4	102.43	60.17	42.26	Vulcaniti terziarie	VT
24	CIXE065C	1479217.7	4352249.0	90.00	7.54	82.46	Vulcaniti terziarie	VT
25	CIXE066C	1479050.1	4351427.5	83.96	80.26	3.7	Alluvioni quaternarie	AQ
25	CIXE066C	1479050.1	4351427.5	80.26	-473.84	554.1	Vulcaniti terziarie	VT

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
26	CIXE067C	1478698.0	4350606.1	80.00	-415.98	495.98	Formazione Cixerri	FCIX
27	CIXE068C	1478094.5	4349114.1	75.61	74.45	1.16	Alluvioni quaternarie	AQ
27	CIXE068C	1478094.5	4349114.1	74.45	-157.37	231.82	Formazione Cixerri	FCIX
27	CIXE068C	1478094.5	4349114.1	-157.37	-497.49	340.12	Basamento paleozoico	MP
28	CIXE070C	1479167.4	4349499.7	69.63	-141.47	211.1	Formazione Cixerri	FCIX
28	CIXE070C	1479167.4	4349499.7	-141.47	-160.37	18.9	Basamento paleozoico	MP
29	CIXE071C	1479385.3	4348510.6	67.87	66.79	1.08	Alluvioni quaternarie	AQ
29	CIXE071C	1479385.3	4348510.6	66.79	-68.77	135.56	Formazione Cixerri	FCIX
29	CIXE071C	1479385.3	4348510.6	-68.77	-82.13	13.36	Basamento paleozoico	MP
30	CIXE072C	1480558.8	4353891.8	101.45	99.06	2.39	Alluvioni quaternarie	AQ
30	CIXE072C	1480558.8	4353891.8	99.06	77.01	22.05	Formazione Cixerri	FCIX
30	CIXE072C	1480558.8	4353891.8	77.01	-371.18	448.19	Basamento paleozoico	MP
31	CIXE073C	1480592.4	4353288.3	96.75	95.32	1.43	Alluvioni quaternarie	AQ
31	CIXE073C	1480592.4	4353288.3	95.32	74.28	21.04	Formazione Cixerri	FCIX
31	CIXE073C	1480592.4	4353288.3	74.28	-317.45	391.73	Vulcaniti terziarie	VT
32	CIXE074C	1480508.5	4352483.7	83.40	76.05	7.35	Alluvioni quaternarie	AQ
32	CIXE074C	1480508.5	4352483.7	76.05	-14.52	90.57	Vulcaniti terziarie	VT
33	CIXE075C	1479955.3	4352265.7	79.98	76.38	3.6	Alluvioni quaternarie	AQ
33	CIXE075C	1479955.3	4352265.7	76.38	-92.47	168.85	Vulcaniti terziarie	VT
34	CIXE076C	1480408.0	4351494.6	72.76	-60.10	132.86	Formazione Cixerri	FCIX
34	CIXE076C	1480408.0	4351494.6	-60.10	-258.72	198.62	Vulcaniti terziarie	VT
35	CIXE077C	1480357.7	4351142.5	70.00	65.96	4.04	Alluvioni quaternarie	AQ
35	CIXE077C	1480357.7	4351142.5	65.96	-97.92	163.88	Formazione Cixerri	FCIX
36	CIXE078C	1480408.0	4350455.2	67.35	66.07	1.28	Alluvioni quaternarie	AQ
36	CIXE078C	1480408.0	4350455.2	66.07	-15.24	81.31	Formazione Cixerri	FCIX
36	CIXE078C	1480408.0	4350455.2	-15.24	-371.13	355.89	Vulcaniti terziarie	VT
37	CIXE079C	1480123.0	4349834.9	64.17	56.82	7.35	Alluvioni quaternarie	AQ
37	CIXE079C	1480123.0	4349834.9	56.82	-179.90	236.72	Formazione Cixerri	FCIX
38	CIXE080C	1480190.0	4349633.8	63.62	60.23	3.39	Alluvioni quaternarie	AQ

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
38	CIXE080C	1480190.0	4349633.8	60.23	-132.55	192.78	Formazione Cixerri	FCIX
39	CIXE081C	1480290.6	4349382.3	64.08	56.12	7.96	Alluvioni quaternarie	AQ
39	CIXE081C	1480290.6	4349382.3	56.12	-244.42	300.54	Formazione Cixerri	FCIX
40	CIXE082C	1480642.7	4349147.6	65.60	54.29	11.31	Alluvioni quaternarie	AQ
40	CIXE082C	1480642.7	4349147.6	54.29	-189.48	243.77	Formazione Cixerri	FCIX
41	CIXE083C	1480810.3	4349181.1	65.58	56.02	9.56	Alluvioni quaternarie	AQ
41	CIXE083C	1480810.3	4349181.1	56.02	-66.79	122.81	Formazione Cixerri	FCIX
42	CIXE084C	1480525.3	4348242.4	74.72	72.10	2.62	Alluvioni quaternarie	AQ
42	CIXE084C	1480525.3	4348242.4	72.10	-83.44	155.54	Formazione Cixerri	FCIX
42	CIXE084C	1480525.3	4348242.4	-83.44	-95.28	11.84	Basamento paleozoico	MP
43	CIXE085C	1480441.5	4347504.7	79.93	76.08	3.85	Alluvioni quaternarie	AQ
43	CIXE085C	1480441.5	4347504.7	76.08	25.06	51.02	Formazione Cixerri	FCIX
43	CIXE085C	1480441.5	4347504.7	25.06	-87.30	112.36	Basamento paleozoico	MP
44	CIXE086C	1480257.1	4346582.7	88.33	85.84	2.49	Alluvioni quaternarie	AQ
44	CIXE086C	1480257.1	4346582.7	85.84	71.70	14.14	Formazione Cixerri	FCIX
44	CIXE086C	1480257.1	4346582.7	71.70	-220.56	292.26	Vulcaniti terziarie	VT
45	CIXE087C	1480408.0	4345291.9	113.73	110.21	3.52	Alluvioni quaternarie	AQ
45	CIXE087C	1480408.0	4345291.9	110.21	-223.02	333.23	Vulcaniti terziarie	VT
46	CIXE088C	1481564.7	4351561.6	84.00	80.14	3.86	Alluvioni quaternarie	AQ
46	CIXE088C	1481564.7	4351561.6	80.14	-294.92	375.06	Formazione Cixerri	FCIX
47	CIXE089C	1482537.0	4352835.7	73.99	68.87	5.12	Alluvioni quaternarie	AQ
47	CIXE089C	1482537.0	4352835.7	68.87	59.27	9.6	Formazione Cixerri	FCIX
47	CIXE089C	1482537.0	4352835.7	59.27	-159.84	219.11	Vulcaniti terziarie	VT
48	CIXE090C	1482805.2	4351880.2	65.00	56.51	8.49	Alluvioni quaternarie	AQ
48	CIXE090C	1482805.2	4351880.2	56.51	-1174.57	1231.08	Formazione Cixerri	FCIX
49	CIXE091C	1482537.0	4350740.2	69.30	-273.67	342.97	Vulcaniti terziarie	VT
50	CIXE092C	1482587.3	4350220.5	66.95	24.89	42.06	Vulcaniti terziarie	VT
51	CIXE093C	1482386.1	4349700.8	55.17	47.94	7.23	Alluvioni quaternarie	AQ
51	CIXE093C	1482386.1	4349700.8	47.94	3.80	44.14	Formazione Cixerri	FCIX

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
52	CIXE094C	1482721.4	4349399.1	59.43	50.77	8.66	Alluvioni quaternarie	AQ
52	CIXE094C	1482721.4	4349399.1	50.77	-262.26	313.03	Formazione Cixerri	FCIX
53	CIXE095C	1482939.3	4348443.5	67.27	-54.89	122.16	Formazione Cixerri	FCIX
54	CIXE096C	1482771.7	4347689.1	80.01	76.34	3.67	Alluvioni quaternarie	AQ
54	CIXE096C	1482771.7	4347689.1	76.34	-31.69	108.03	Formazione Cixerri	FCIX
55	CIXE097C	1482570.5	4346700.1	90.00	80.46	9.54	Alluvioni quaternarie	AQ
55	CIXE097C	1482570.5	4346700.1	80.46	-59.48	139.94	Formazione Cixerri	FCIX
55	CIXE097C	1482570.5	4346700.1	-59.48	-70.00	10.52	Basamento paleozoico	MP
56	CIXE098C	1482419.6	4345878.6	105.00	69.78	35.22	Alluvioni quaternarie	AQ
56	CIXE098C	1482419.6	4345878.6	69.78	-100.24	170.02	Formazione Cixerri	FCIX
56	CIXE098C	1482419.6	4345878.6	-100.24	-130.24	30	Basamento paleozoico	MP
57	CIXE099C	1482319.1	4345057.2	128.76	125.20	3.56	Alluvioni quaternarie	AQ
57	CIXE099C	1482319.1	4345057.2	125.20	59.04	66.16	Formazione Cixerri	FCIX
57	CIXE099C	1482319.1	4345057.2	59.04	-160.42	219.46	Basamento paleozoico	MP
58	CIXE100C	1484297.2	4349700.8	52.49	-154.26	206.75	Formazione Cixerri	FCIX
59	CIXE101C	1483978.7	4349566.7	51.06	48.14	2.92	Alluvioni quaternarie	AQ
59	CIXE101C	1483978.7	4349566.7	48.14	-72.25	120.39	Formazione Cixerri	FCIX
60	CIXE102C	1483995.5	4349315.3	51.81	46.07	5.74	Alluvioni quaternarie	AQ
60	CIXE102C	1483995.5	4349315.3	46.07	-148.94	195.01	Formazione Cixerri	FCIX
61	CIXE103C	1483844.6	4349130.9	54.54	46.68	7.86	Alluvioni quaternarie	AQ
61	CIXE103C	1483844.6	4349130.9	46.68	-73.28	119.96	Formazione Cixerri	FCIX
62	CIXE385C	1464215.1	4352841.5	190.96	188.03	2.93	Alluvioni quaternarie	AQ
62	CIXE385C	1464215.1	4352841.5	188.03	-50.71	238.74	Basamento paleozoico	MP
63	CIXE386C	1464986.2	4352975.6	192.48	188.51	3.97	Alluvioni quaternarie	AQ
63	CIXE386C	1464986.2	4352975.6	188.51	101.71	86.8	Basamento paleozoico	MP
64	CIXE387C	1464315.7	4351483.6	154.30	145.20	9.1	Alluvioni quaternarie	AQ
64	CIXE387C	1464315.7	4351483.6	145.20	-132.73	277.93	Basamento paleozoico	MP
65	CIXE388C	1464366.0	4350695.7	145.59	132.06	13.53	Alluvioni quaternarie	AQ
65	CIXE388C	1464366.0	4350695.7	132.06	95.57	36.49	Formazione Cixerri	FCIX

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
65	CIXE388C	1464366.0	4350695.7	95.57	-3.58	99.15	Basamento paleozoico	MP
66	CIXE389C	1464382.7	4349706.6	134.75	130.15	4.6	Alluvioni quaternarie	AQ
66	CIXE389C	1464382.7	4349706.6	130.15	89.91	40.24	Formazione Cixerri	FCIX
66	CIXE389C	1464382.7	4349706.6	89.91	44.75	45.16	Basamento paleozoico	MP
67	CIXE390C	1464399.5	4349237.2	130.05	128.36	1.69	Alluvioni quaternarie	AQ
67	CIXE390C	1464399.5	4349237.2	128.36	-21.31	149.67	Basamento paleozoico	MP
68	CIXE391C	1464399.5	4348918.7	127.63	106.53	21.1	Alluvioni quaternarie	AQ
68	CIXE391C	1464399.5	4348918.7	106.53	45.60	60.93	Formazione Cixerri	FCIX
68	CIXE391C	1464399.5	4348918.7	45.60	27.63	17.97	Basamento paleozoico	MP
69	CIXE392C	1464433.0	4348616.9	125.42	122.29	3.13	Alluvioni quaternarie	AQ
69	CIXE392C	1464433.0	4348616.9	122.29	-12.30	134.59	Formazione Cixerri	FCIX
70	CIXE393C	1464550.4	4348231.4	123.97	111.31	12.66	Alluvioni quaternarie	AQ
70	CIXE393C	1464550.4	4348231.4	111.31	-27.90	139.21	Formazione Cixerri	FCIX
70	CIXE393C	1464550.4	4348231.4	-27.90	-36.03	8.13	Basamento paleozoico	MP
71	CIXE394C	1464449.8	4348080.5	123.11	119.36	3.75	Alluvioni quaternarie	AQ
71	CIXE394C	1464449.8	4348080.5	119.36	18.91	100.45	Formazione Cixerri	FCIX
71	CIXE394C	1464449.8	4348080.5	18.91	-613.79	632.7	Basamento paleozoico	MP
72	CIXE395C	1464349.2	4347778.7	122.13	116.05	6.08	Alluvioni quaternarie	AQ
72	CIXE395C	1464349.2	4347778.7	116.05	-87.46	203.51	Formazione Cixerri	FCIX
72	CIXE395C	1464349.2	4347778.7	-87.46	-97.87	10.41	Basamento paleozoico	MP
73	CIXE396C	1464282.2	4347393.2	125.14	117.10	8.04	Alluvioni quaternarie	AQ
73	CIXE396C	1464282.2	4347393.2	117.10	-29.81	146.91	Formazione Cixerri	FCIX
74	CIXE397C	1464215.1	4346990.8	132.20	126.51	5.69	Alluvioni quaternarie	AQ
74	CIXE397C	1464215.1	4346990.8	126.51	-189.21	315.72	Formazione Cixerri	FCIX
75	CIXE398C	1464298.9	4346739.4	134.19	23.59	110.6	Formazione Cixerri	FCIX
76	CIXE399C	1464466.6	4346454.4	136.24	132.99	3.25	Alluvioni quaternarie	AQ
76	CIXE399C	1464466.6	4346454.4	132.99	69.69	63.3	Formazione Cixerri	FCIX
77	CIXE400C	1464382.7	4346202.9	140.78	136.32	4.46	Alluvioni quaternarie	AQ
77	CIXE400C	1464382.7	4346202.9	136.32	90.76	45.56	Formazione Cixerri	FCIX

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
77	CIXE400C	1464382.7	4346202.9	90.76	-722.39	813.15	Basamento paleozoico	MP
78	CIXE401C	1464397.0	4345013.2	165.19	-22.09	187.28	Formazione Cixerri	FCIX
78	CIXE401C	1464397.0	4345013.2	-22.09	-24.81	2.72	Basamento paleozoico	MP
79	CIXE402C	1465301.8	4350585.3	140.83	125.63	15.2	Alluvioni quaternarie	AQ
79	CIXE402C	1465301.8	4350585.3	125.63	-7.17	132.8	Formazione Cixerri	FCIX
79	CIXE402C	1465301.8	4350585.3	-7.17	-19.17	12	Basamento paleozoico	MP
80	CIXE403C	1465000.2	4349267.7	130.00	127.33	2.67	Alluvioni quaternarie	AQ
80	CIXE403C	1465000.2	4349267.7	127.33	120.69	6.64	Formazione Cixerri	FCIX
80	CIXE403C	1465000.2	4349267.7	120.69	30.00	90.69	Basamento paleozoico	MP
81	CIXE404C	1465873.3	4351204.4	141.38	135.34	6.04	Alluvioni quaternarie	AQ
81	CIXE404C	1465873.3	4351204.4	135.34	-296.23	431.57	Formazione Cixerri	FCIX
82	CIXE405C	1465857.5	4350378.9	136.67	130.30	6.37	Alluvioni quaternarie	AQ
82	CIXE405C	1465857.5	4350378.9	130.30	25.63	104.67	Formazione Cixerri	FCIX
83	CIXE406C	1465635.2	4348902.6	127.91	124.26	3.65	Alluvioni quaternarie	AQ
83	CIXE406C	1465635.2	4348902.6	124.26	108.91	15.35	Formazione Cixerri	FCIX
83	CIXE406C	1465635.2	4348902.6	108.91	-470.04	578.95	Basamento paleozoico	MP
84	CIXE407C	1465333.6	4348219.9	125.01	121.28	3.73	Alluvioni quaternarie	AQ
84	CIXE407C	1465333.6	4348219.9	121.28	17.72	103.56	Formazione Cixerri	FCIX
84	CIXE407C	1465333.6	4348219.9	17.72	-24.99	42.71	Basamento paleozoico	MP
85	CIXE408C	1465206.6	4347537.3	124.10	121.70	2.4	Alluvioni quaternarie	AQ
85	CIXE408C	1465206.6	4347537.3	121.70	82.25	39.45	Formazione Cixerri	FCIX
85	CIXE408C	1465206.6	4347537.3	82.25	-25.90	108.15	Basamento paleozoico	MP
86	CIXE409C	1465190.7	4346807.0	131.71	129.37	2.34	Alluvioni quaternarie	AQ
86	CIXE409C	1465190.7	4346807.0	129.37	112.23	17.14	Formazione Cixerri	FCIX
86	CIXE409C	1465190.7	4346807.0	112.23	-750.04	862.27	Basamento paleozoico	MP
87	CIXE410C	1465095.5	4346203.8	143.62	138.46	5.16	Alluvioni quaternarie	AQ
87	CIXE410C	1465095.5	4346203.8	138.46	91.68	46.78	Formazione Cixerri	FCIX
87	CIXE410C	1465095.5	4346203.8	91.68	-331.82	423.5	Basamento paleozoico	MP
88	CIXE411C	1465413.0	4345410.0	159.14	-17.80	176.94	Formazione Cixerri	FCIX

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
88	CIXE411C	1465413.0	4345410.0	-17.80	-174.37	156.57	Basamento paleozoico	MP
89	CIXE412C	1466460.7	4352712.6	161.29	152.89	8.4	Alluvioni quaternarie	AQ
89	CIXE412C	1466460.7	4352712.6	152.89	69.05	83.84	Basamento paleozoico	MP
90	CIXE413C	1466635.3	4351442.6	137.57	134.63	2.94	Alluvioni quaternarie	AQ
90	CIXE413C	1466635.3	4351442.6	134.63	-22.40	157.03	Formazione Cixerri	FCIX
91	CIXE414C	1466730.6	4350648.8	131.42	127.15	4.27	Alluvioni quaternarie	AQ
91	CIXE414C	1466730.6	4350648.8	127.15	-74.42	201.57	Formazione Cixerri	FCIX
92	CIXE415C	1466635.3	4349934.4	127.98	124.53	3.45	Alluvioni quaternarie	AQ
92	CIXE415C	1466635.3	4349934.4	124.53	0.92	123.61	Formazione Cixerri	FCIX
92	CIXE415C	1466635.3	4349934.4	0.92	-141.90	142.82	Basamento paleozoico	MP
93	CIXE416C	1466222.6	4349489.9	131.99	130.38	1.61	Alluvioni quaternarie	AQ
93	CIXE416C	1466222.6	4349489.9	130.38	75.20	55.18	Formazione Cixerri	FCIX
93	CIXE416C	1466222.6	4349489.9	75.20	-19.36	94.56	Basamento paleozoico	MP
94	CIXE417C	1466508.3	4348648.6	120.10	117.08	3.02	Alluvioni quaternarie	AQ
94	CIXE417C	1466508.3	4348648.6	117.08	52.71	64.37	Formazione Cixerri	FCIX
94	CIXE417C	1466508.3	4348648.6	52.71	-29.90	82.61	Basamento paleozoico	MP
95	CIXE418C	1466397.2	4348267.5	120.25	117.91	2.34	Alluvioni quaternarie	AQ
95	CIXE418C	1466397.2	4348267.5	117.91	-98.30	216.21	Formazione Cixerri	FCIX
96	CIXE419C	1466603.6	4347743.7	115.73	113.83	1.9	Alluvioni quaternarie	AQ
96	CIXE419C	1466603.6	4347743.7	113.83	-0.10	113.93	Basamento paleozoico	MP
97	CIXE421C	1466679.0	4345979.6	145.00	78.02	66.98	Formazione Cixerri	FCIX
97	CIXE421C	1466679.0	4345979.6	78.02	-444.26	522.28	Basamento paleozoico	MP
98	CIXE422C	1466960.1	4345169.3	166.37	155.58	10.79	Alluvioni quaternarie	AQ
98	CIXE422C	1466960.1	4345169.3	155.58	-27.21	182.79	Formazione Cixerri	FCIX
99	CIXE423C	1467654.7	4351039.7	125.00	-175.04	300.04	Formazione Cixerri	FCIX
99	CIXE423C	1467654.7	4351039.7	-175.04	-260.33	85.29	Basamento paleozoico	MP
100	CIXE424C	1467538.9	4350543.6	124.69	120.92	3.77	Alluvioni quaternarie	AQ
100	CIXE424C	1467538.9	4350543.6	120.92	-288.68	409.6	Formazione Cixerri	FCIX
101	CIXE425C	1467638.1	4349816.0	123.02	116.67	6.35	Alluvioni quaternarie	AQ

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
101	CIXE425C	1467638.1	4349816.0	116.67	-883.69	1000.36	Formazione Cixerri	FCIX
102	CIXE426C	1467257.8	4348526.2	115.97	113.61	2.36	Alluvioni quaternarie	AQ
102	CIXE426C	1467257.8	4348526.2	113.61	-139.90	253.51	Formazione Cixerri	FCIX
103	CIXE427C	1467323.9	4346773.3	130.00	128.97	1.03	Alluvioni quaternarie	AQ
103	CIXE427C	1467323.9	4346773.3	128.97	124.35	4.62	Formazione Cixerri	FCIX
103	CIXE427C	1467323.9	4346773.3	124.35	-120.54	244.89	Basamento paleozoico	MP
104	CIXE428C	1468299.6	4348559.3	112.81	105.32	7.49	Alluvioni quaternarie	AQ
104	CIXE428C	1468299.6	4348559.3	105.32	-77.70	183.02	Formazione Cixerri	FCIX
104	CIXE428C	1468299.6	4348559.3	-77.70	-187.19	109.49	Basamento paleozoico	MP
105	CIXE429C	1468299.6	4346889.1	130.80	60.41	70.39	Formazione Cixerri	FCIX
105	CIXE429C	1468299.6	4346889.1	60.41	-646.02	706.43	Basamento paleozoico	MP
106	CIXE430C	1468564.2	4346029.2	160.60	145.96	14.64	Formazione Cixerri	FCIX
106	CIXE430C	1468564.2	4346029.2	145.96	-114.26	260.22	complesso vulcanico	VT
106	CIXE430C	1468564.2	4346029.2	-114.26	-114.26		Basamento paleozoico	MP
107	CIXE431C	1468679.9	4345500.0	164.75	82.46	82.29	Formazione Cixerri	FCIX
107	CIXE431C	1468679.9	4345500.0	82.46	14.75	67.71	Basamento paleozoico	MP
108	CIXE432C	1469258.7	4353040.6	144.38	142.04	2.34	Alluvioni quaternarie	AQ
108	CIXE432C	1469258.7	4353040.6	142.04	45.40	96.64	Basamento paleozoico	MP
109	CIXE433C	1469159.5	4352494.9	135.64	118.34	17.3	Alluvioni quaternarie	AQ
109	CIXE433C	1469159.5	4352494.9	118.34	-91.27	209.61	Basamento paleozoico	MP
110	CIXE435C	1469176.0	4351105.9	123.30	118.42	4.88	Alluvioni quaternarie	AQ
110	CIXE435C	1469176.0	4351105.9	118.42	-172.22	290.64	Formazione Cixerri	FCIX
111	CIXE436C	1469076.8	4350146.8	115.01	111.51	3.5	Alluvioni quaternarie	AQ
111	CIXE436C	1469076.8	4350146.8	111.51	19.80	91.71	Formazione Cixerri	FCIX
111	CIXE436C	1469076.8	4350146.8	19.80	-0.86	20.66	Vulcaniti terziarie	VT
112	CIXE437C	1469076.8	4349849.1	114.41	108.57	5.84	Alluvioni quaternarie	AQ
112	CIXE437C	1469076.8	4349849.1	108.57	-8.31	116.88	Formazione Cixerri	FCIX
112	CIXE437C	1469076.8	4349849.1	-8.31	-35.59	27.28	Vulcaniti terziarie	VT
113	CIXE438C	1469060.3	4349601.1	116.64	115.62	1.02	Alluvioni quaternarie	AQ



N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
113	CIXE438C	1469060.3	4349601.1	115.62	-28.40	144.02	Formazione Cixerri	FCIX
113	CIXE438C	1469060.3	4349601.1	-28.40	-33.36	4.96	Vulcaniti terziarie	VT
114	CIXE439C	1469176.0	4349171.1	111.53	108.12	3.41	Alluvioni quaternarie	AQ
114	CIXE439C	1469176.0	4349171.1	108.12	-328.74	436.86	Formazione Cixerri	FCIX
114	CIXE439C	1469176.0	4349171.1	-328.74	-451.52	122.78	Vulcaniti terziarie	VT
115	CIXE440C	1469142.9	4348890.0	110.83	102.53	8.3	Alluvioni quaternarie	AQ
115	CIXE440C	1469142.9	4348890.0	102.53	-78.74	181.27	Formazione Cixerri	FCIX
115	CIXE440C	1469142.9	4348890.0	-78.74	-89.17	10.43	Vulcaniti terziarie	VT
116	CIXE441C	1469142.9	4348625.4	109.99	98.30	11.69	Alluvioni quaternarie	AQ
116	CIXE441C	1469142.9	4348625.4	98.30	10.16	88.14	Formazione Cixerri	FCIX
117	CIXE442C	1469176.0	4348410.4	108.73	89.96	18.77	Alluvioni quaternarie	AQ
117	CIXE442C	1469176.0	4348410.4	89.96	-108.96	198.92	Formazione Cixerri	FCIX
118	CIXE443C	1469142.9	4348178.9	110.51	96.98	13.53	Alluvioni quaternarie	AQ
118	CIXE443C	1469142.9	4348178.9	96.98	31.39	65.59	Formazione Cixerri	FCIX
118	CIXE443C	1469142.9	4348178.9	31.39	20.51	10.88	Basamento paleozoico	MP
119	CIXE444C	1469043.7	4346740.2	128.96	87.75	41.21	Formazione Cixerri	FCIX
119	CIXE444C	1469043.7	4346740.2	87.75	36.61	51.14	Vulcaniti terziarie	VT
119	CIXE444C	1469043.7	4346740.2	36.61	-152.41	189.02	Basamento paleozoico	MP
120	CIXE445C	1470184.7	4350312.1	114.10	110.52	3.58	Alluvioni quaternarie	AQ
120	CIXE445C	1470184.7	4350312.1	110.52	-419.06	529.58	Formazione Cixerri	FCIX
121	CIXE446C	1471210.0	4349733.3	109.82	105.76	4.06	Alluvioni quaternarie	AQ
121	CIXE446C	1471210.0	4349733.3	105.76	-166.01	271.77	Formazione Cixerri	FCIX
122	CIXE447C	1470846.2	4349501.8	105.83	100.20	5.63	Alluvioni quaternarie	AQ
122	CIXE447C	1470846.2	4349501.8	100.20	-151.74	251.94	Formazione Cixerri	FCIX
123	CIXE448C	1470813.1	4349171.1	104.57	96.74	7.83	Alluvioni quaternarie	AQ
123	CIXE448C	1470813.1	4349171.1	96.74	-111.72	208.46	Formazione Cixerri	FCIX
124	CIXE449C	1470945.4	4348774.2	100.13	96.39	3.74	Alluvioni quaternarie	AQ
124	CIXE449C	1470945.4	4348774.2	96.39	-267.38	363.77	Formazione Cixerri	FCIX
125	CIXE450C	1470879.3	4348278.1	98.68	93.24	5.44	Alluvioni quaternarie	AQ

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
125	CIXE450C	1470879.3	4348278.1	93.24	-233.36	326.6	Formazione Cixerri	FCIX
126	CIXE451C	1470945.4	4347997.0	99.09	86.87	12.22	Alluvioni quaternarie	AQ
126	CIXE451C	1470945.4	4347997.0	86.87	-338.61	425.48	Formazione Cixerri	FCIX
127	CIXE452C	1471193.5	4347881.3	98.74	97.75	0.99	Alluvioni quaternarie	AQ
127	CIXE452C	1471193.5	4347881.3	97.75	-110.45	208.2	Formazione Cixerri	FCIX
127	CIXE452C	1471193.5	4347881.3	-110.45	-121.26	10.81	Vulcaniti terziarie	VT
128	CIXE453C	1471325.8	4347500.9	99.93	97.90	2.03	Alluvioni quaternarie	AQ
128	CIXE453C	1471325.8	4347500.9	97.90	51.66	46.24	Formazione Cixerri	FCIX
128	CIXE453C	1471325.8	4347500.9	51.66	39.17	12.49	Vulcaniti terziarie	VT
129	CIXE454C	1471243.1	4346641.0	127.81	120.37	7.44	Formazione Cixerri	FCIX
129	CIXE454C	1471243.1	4346641.0	120.37	71.54	48.83	Vulcaniti terziarie	VT
129	CIXE454C	1471243.1	4346641.0	71.54	-54.16	125.7	Basamento paleozoico	MP
130	CIXE455C	1471391.9	4353553.3	138.23	-627.33	765.56	Basamento paleozoico	MP
131	CIXE456C	1471524.2	4352693.4	123.26	121.54	1.72	Alluvioni quaternarie	AQ
131	CIXE456C	1471524.2	4352693.4	121.54	-140.74	262.28	Formazione Cixerri	FCIX
132	CIXE457C	1471706.1	4351783.9	123.26	104.21	19.05	Alluvioni quaternarie	AQ
132	CIXE457C	1471706.1	4351783.9	104.21	-440.33	544.54	Formazione Cixerri	FCIX
133	CIXE458C	1471772.2	4351072.8	115.00	-258.51	373.51	Formazione Cixerri	FCIX
134	CIXE459C	1472781.0	4352693.4	125.07	121.37	3.7	Alluvioni quaternarie	AQ
134	CIXE459C	1472781.0	4352693.4	121.37	-94.16	215.53	Formazione Cixerri	FCIX
134	CIXE459C	1472781.0	4352693.4	-94.16	-174.93	80.77	Basamento paleozoico	MP
135	CIXE460C	1472880.2	4350047.5	110.23	109.08	1.15	Alluvioni quaternarie	AQ
135	CIXE460C	1472880.2	4350047.5	109.08	87.31	21.77	Formazione Cixerri	FCIX
136	CIXE461C	1472880.2	4349319.9	94.48	93.22	1.26	Alluvioni quaternarie	AQ
137	CIXE461C	1472880.2	4349319.9	93.22	-399.40	492.62	Formazione Cixerri	FCIX
137	CIXE461C	1472880.2	4349319.9	-399.40	-405.52	6.12	Basamento paleozoico	MP
138	CIXE462C	1474087.4	4353751.7	94.48	78.62	15.86	Formazione Cixerri	FCIX
138	CIXE462C	1474087.4	4353751.7	78.62	-17.44	96.06	Basamento paleozoico	MP
139	CIXE463C	1474037.7	4353239.1	150.90	140.03	10.87	Alluvioni quaternarie	AQ

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
139	CIXE463C	1474037.7	4353239.1	140.03	-230.40	370.43	Formazione Cixerri	FCIX
140	CIXE464C	1474004.7	4352246.9	125.26	-231.26	356.52	Formazione Cixerri	FCIX
141	CIXE465C	1474170.0	4351205.1	118.73	116.53	2.2	Alluvioni quaternarie	AQ
141	CIXE465C	1474170.0	4351205.1	116.53	-120.74	237.27	Formazione Cixerri	FCIX
142	CIXE466C	1474037.7	4350279.0	99.54	96.41	3.13	Alluvioni quaternarie	AQ
142	CIXE466C	1474037.7	4350279.0	96.41	-153.90	250.31	Formazione Cixerri	FCIX
142	CIXE466C	1474037.7	4350279.0	-153.90	-160.46	6.56	Basamento paleozoico	MP
143	CIXE467C	1474054.3	4349485.3	95.35	94.13	1.22	Alluvioni quaternarie	AQ
143	CIXE467C	1474054.3	4349485.3	94.13	-135.32	229.45	Formazione Cixerri	FCIX
143	CIXE467C	1474054.3	4349485.3	-135.32	-154.65	19.33	Vulcaniti terziarie	VT
144	CIXE469C	1474137.0	4348790.8	90.62	87.15	3.47	Alluvioni quaternarie	AQ
144	CIXE469C	1474137.0	4348790.8	87.15	-21.17	108.32	Formazione Cixerri	FCIX
145	CIXE469C	1474137.0	4348790.8	-21.17	-59.38	38.21	Basamento paleozoico	MP
146	CIXE470C	1474120.4	4348526.2	85.61	80.46	5.15	Alluvioni quaternarie	AQ
146	CIXE470C	1474120.4	4348526.2	80.46	-18.90	99.36	Formazione Cixerri	FCIX
146	CIXE470C	1474120.4	4348526.2	-18.90	-34.39	15.49	Vulcaniti terziarie	VT
147	CIXE471C	1474103.9	4348311.2	84.98	80.78	4.2	Alluvioni quaternarie	AQ
148	CIXE471C	1474103.9	4348311.2	80.78	-30.69	111.47	Formazione Cixerri	FCIX
149	CIXE472C	1473955.1	4347848.2	85.77	-246.57	332.34	Formazione Cixerri	FCIX
149	CIXE472C	1473955.1	4347848.2	-246.57	-264.23	17.66	Basamento paleozoico	MP
150	CIXE473C	1474004.7	4347600.1	87.02	80.33	6.69	Alluvioni quaternarie	AQ
150	CIXE473C	1474004.7	4347600.1	80.33	-273.44	353.77	Formazione Cixerri	FCIX
151	CIXE474C	1474203.1	4347236.3	91.86	-240.46	332.32	Formazione Cixerri	FCIX
152	CIXE475C	1474070.8	4346872.5	96.03	-92.94	188.97	Formazione Cixerri	FCIX
152	CIXE475C	1474070.8	4346872.5	-92.94	-103.97	11.03	Vulcaniti terziarie	VT
153	CIXE476C	1474153.5	4346144.9	105.00	96.71	8.29	Formazione Cixerri	FCIX
153	CIXE476C	1474153.5	4346144.9	96.71	-444.78	541.49	Basamento paleozoico	MP
154	CIXE477C	1462515.5	4352029.0	181.12	174.91	6.21	Alluvioni quaternarie	AQ
154	CIXE477C	1462515.5	4352029.0	174.91	-30.63	205.54	Basamento paleozoico	MP

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
155	CIXE478C	1462532.0	4351351.0	158.49	157.35	1.14	Alluvioni quaternarie	AQ
155	CIXE478C	1462532.0	4351351.0	157.35	102.33	55.02	Formazione Cixerri	FCIX
155	CIXE478C	1462532.0	4351351.0	102.33	102.33		Basamento paleozoico	MP
156	CIXE479C	1462515.5	4350689.5	147.72	144.95	2.77	Alluvioni quaternarie	AQ
156	CIXE479C	1462515.5	4350689.5	144.95	100.58	44.37	Formazione Cixerri	FCIX
156	CIXE479C	1462515.5	4350689.5	100.58	-295.99	396.57	Basamento paleozoico	MP
157	CIXE480C	1463441.5	4350441.5	138.63	133.80	4.83	Alluvioni quaternarie	AQ
157	CIXE480C	1463441.5	4350441.5	133.80	54.43	79.37	Formazione Cixerri	FCIX
157	CIXE480C	1463441.5	4350441.5	54.43	-11.37	65.8	Basamento paleozoico	MP
158	CIXE481C	1461986.3	4349846.2	148.79	146.86	1.93	Alluvioni quaternarie	AQ
158	CIXE481C	1461986.3	4349846.2	146.86	102.36	44.5	Formazione Cixerri	FCIX
158	CIXE481C	1461986.3	4349846.2	102.36	-84.57	186.93	Basamento paleozoico	MP
159	CIXE482C	1463524.2	4349763.5	134.40	133.38	1.02	Alluvioni quaternarie	AQ
159	CIXE482C	1463524.2	4349763.5	133.38	108.10	25.28	Formazione Cixerri	FCIX
159	CIXE482C	1463524.2	4349763.5	108.10	-102.53	210.63	Basamento paleozoico	MP
160	CIXE483C	1463127.3	4349317.0	135.16	133.05	2.11	Alluvioni quaternarie	AQ
160	CIXE483C	1463127.3	4349317.0	133.05	27.25	105.8	Formazione Cixerri	FCIX
160	CIXE483C	1463127.3	4349317.0	27.25	-14.84	42.09	Basamento paleozoico	MP
161	CIXE484C	1462118.6	4348804.4	145.00	57.09	87.91	Formazione Cixerri	FCIX
161	CIXE484C	1462118.6	4348804.4	57.09	-64.41	121.5	Basamento paleozoico	MP
162	CIXE485C	1463110.8	4348705.2	130.00	-65.85	195.85	Formazione Cixerri	FCIX
162	CIXE485C	1463110.8	4348705.2	-65.85	-80.00	14.15	Basamento paleozoico	MP
163	CIXE486C	1462250.9	4347845.3	139.98	102.75	37.23	Formazione Cixerri	FCIX
163	CIXE486C	1462250.9	4347845.3	102.75	78.31	24.44	Basamento paleozoico	MP
164	CIXE487C	1463160.4	4347812.2	129.89	101.51	28.38	Formazione Cixerri	FCIX
164	CIXE487C	1463160.4	4347812.2	101.51	-33.67	135.18	Basamento paleozoico	MP
165	CIXE488C	1462532.0	4346935.8	137.57	67.77	69.8	Formazione Cixerri	FCIX
165	CIXE488C	1462532.0	4346935.8	67.77	-462.29	530.06	Basamento paleozoico	MP
166	CIXE489C	1462504.5	4346697.6	137.65	136.57	1.08	Alluvioni quaternarie	AQ

N.	ID_SEV	Coordinata_X	Coordinata_Y	Top m slm	Bottom m slm	Spessore	Litologia	Sigla
166	CIXE489C	1462504.5	4346697.6	136.57	-81.35	217.92	Formazione Cixerri	FCIX
166	CIXE489C	1462504.5	4346697.6	-81.35	-92.35	11	Basamento paleozoico	MP
167	CIXE490C	1462570.6	4345996.5	135.09	101.66	33.43	Formazione Cixerri	FCIX
167	CIXE490C	1462570.6	4345996.5	101.66	-154.42	256.08	Basamento paleozoico	MP
168	CIXE491C	1463258.5	4345626.1	144.88	0.76	144.12	Formazione Cixerri	FCIX
168	CIXE491C	1463258.5	4345626.1	0.76	-15.12	15.88	Basamento paleozoico	MP
169	CIXE492C	1462293.0	4345339.9	146.76	47.13	99.63	Formazione Cixerri	FCIX
169	CIXE492C	1462293.0	4345339.9	47.13	-93.74	140.87	Basamento paleozoico	MP
170	CIXE493C	1462729.4	4344938.1	146.07	144.61	1.46	Alluvioni quaternarie	AQ
170	CIXE493C	1462729.4	4344938.1	144.61	-11.81	156.42	Formazione Cixerri	FCIX
170	CIXE493C	1462729.4	4344938.1	-11.81	-346.77	334.96	Basamento paleozoico	MP
171	CIXE494C	1465126.0	4344486.4	180.42	10.38	170.04	Formazione Cixerri	FCIX
171	CIXE494C	1465126.0	4344486.4	10.38	-77.32	87.7	Basamento paleozoico	MP
172	CIXE495C	1464076.8	4344013.2	189.11	177.36	11.75	Alluvioni quaternarie	AQ
172	CIXE495C	1464076.8	4344013.2	177.36	156.74	20.62	Formazione Cixerri	FCIX
172	CIXE495C	1464076.8	4344013.2	156.74	39.11	117.63	Basamento paleozoico	MP
173	CIXE548C	1461396.7	4344300.6	131.26	128.50	2.76	Alluvioni quaternarie	AQ
173	CIXE548C	1461396.7	4344300.6	128.50	116.79	11.71	Formazione Cixerri	FCIX
173	CIXE548C	1461396.7	4344300.6	116.79	-379.17	495.96	Basamento paleozoico	MP

## Appendice 2

Risultati delle tre campagne piezometriche (Maggio 2015, Dicembre 2015, Aprile 2016).

Id Pozzo	Coordinate		Quota	Prof. . PC	Maggio 2015					Dicembre 2015					Aprile 2016				
					Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3
	Est	Nord	m slm	m	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L
Cix1	1469405	4349235	109.9	4.5	108.2	23.5	7.2	1140	3-5	108.0	16.3	6.9	743	5-10	108.2	19.0	6.8	783	5-10
Cix2	1471035	4348123	98.2	3.6	97.4	19.5	6.9	1240	30-50	97.1	17.8	7.0	1180	20-30	97.3	18.7	6.8	1195	20-30
Cix3	1462498	4351150	153.3	4.8	150.7	19.4	6.4	755	10	150.9	16.8	7.2	955	0-1	151.3	16.7	7.1	714	10-20
Cix4	1462508	4351871	171.1	7.1	168.8	17.6	6.7	1955	50	169.1	17.7	7.4	2220	<120	170.3	16.5	7.4	1661	90-120
Cix5	1462394	4351420	162.4	7.1	159.5	18.7	6.6	307	3-5	159.9	18.0	7.6	320	3-5	160.4	16.8	7.3	556	50-70
Cix6	1461487	4351236	169.6	6.1	166.3	17.7	5.9	749	10-20	167.1	19.6	6.9	607	30-50	167.3	16.5	7.1	639	30-50
Cix7	1462545	4351259	155.0	5.0	153.0	17.3	6.4	1124	1-3	152.7	20.3	7.4	787	0-1	153.5	17.3	7.4	999	1-3
Cix8	1462456	4351213	155.1	7.1	151.6	16.2	6.5	800	20-30	151.3	16.2	7.1	962	30-50	152.4	18.9	6.8	867	20-30
Cix9	1462125	4351008	155.0	3.2	152.3	16.2	7.1	863	20	152.6	18.9	7.4	854	30-50	153.4	17.9	7.3	920	30-50
Cix10	1462451	4350626	147.9	5.7	146.1	18.9	6.8	815	20-30	146.4	19.2	7.6	952	20-30	146.3	19.1	7.5	957	20-30
Cix11	1461870	4351024	159.2	5.2	157.3	19.4	6.2	718	10-20	158.0	18.8	7.3	878	20-30	158.0	18.0	7.2	896	20-30
Cix12	1461684	4350929	160.0	7.4	157.5	17.4	6.1	705	30-50	157.5	19.0	7.4	797	20-30	158.3	19.0	7.2	823	20-30
Cix13	1461665	4351155	164.4	6.7	162.3	19.4	7.0	901	30-50	162.3	20.2	7.3	912	10-20	162.5	16.3	7.0	927	30-50
Cix15	1462136	4351729	169.7	9.2	164.4	18.1	6.6	701		163.2	17.4	7.8	763	0-1	164.3	17.3	7.5	907	0-1
Cix16	1464229	4350601	145.6	6.6	143.6	19.1	6.7	598		143.2	17.3	7.8	597	5-10	143.7	17.7	7.5	652	10-20
Cix17	1464199	4350612	146.1	4.3	143.9	18.9	6.1	952		143.8	16.7	7.5	839	20-30	144.6	17.1	7.5	995	30-50
Cix18	1464114	4350596	145.7	10.1	142.9	17.7	6.4	762		139.7	16.1	7.6	878	30-50	143.5	17.4	7.2	841	20-30
Cix19	1464645	4350604	147.5	9.9	139.3	18.4	6.2	668		138.7	18.4	6.8	661	10-20	139.4	18.2	6.9	661	10
Cix20	1465362	4350414	140.0	9.8	133.7	18.2	6.0	636		131.9	15.0	6.6	597	30	132.0	18.9	6.5	629	30-50
Cix21	1465893	4350284	135.9	8.1	130.4	17.4	6.1	688		129.5	18.1	6.5	706	30-50	129.9	19.5	6.5	760	70-90
Cix22	1465750	4350230	136.8	7.9	131.1	16.5	6.3	797		130.3	15.4	6.8	720	20-30	130.5	19.9	6.7	788	30-50
Cix23	1466206	4351299	140.3	5.4	139.4	15.9	6.9	800		140.0	17.0	7.2	923	0-1	139.9	14.6	7.0	903	0-1
Cix24	1466168	4351410	141.0	4.2	139.9	18.6	7.1	1258		140.4	17.3	7.2	1673	5-10	140.5	19.1	7.3	1514	5-10
Cix25	1466002	4351291	141.6	10.6	139.6	19.5	6.5	777		139.8	18.7	7.2	924	20-30	140.0	19.8	7.3	867	50-70

Id Pozzo	Coordinate		Quota	Prof. PC	Maggio 2015					Dicembre 2015					Aprile 2016				
					Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3
	Est	Nord	m slm	m	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L
Cix26	1466065	4351529	142.0	9.7	141.1	20.8	7.2	1938		141.2	18.0	7.5	2270	30-50	141.1	18.5	7.7	2330	30-50
Cix27	1465628	4351402	143.6	5.1	141.6	19.0	6.8	706		141.7	19.3	7.4	807	30-50	141.7	17.1	7.4	825	50-70
Cix28	1464773	4352264	164.9	4.0	163.8	19.6	6.8	915		163.8	17.6	7.3	942	50-70	164.3	18.3	7.3	1077	20-30
Cix29	1464665	4352359	168.7	3.8	167.7	18.1	6.8	558		167.4	14.5	7.8	563	1-3	167.6	18.9	7.5	832	50-70
Cix30	1464674	4352360	168.6	4.1	167.2	15.4	6.7	589		167.2	13.6	7.7	557	1-3	167.5	18.3	7.6	837	70-90
Cix31	1464709	4352350	168.0	7.5	166.8	18.9	6.6	784		166.3	17.6	7.4	845	70	167.0	18.3	7.5	807	30-50
Cix32	1463107	4349789	139.9	8.0	138.7	19.7	7.5	1698	50-70	139.1	15.3	7.8	1464	50-70	139.2	17.6	7.4	1479	50-70
Cix34	1462128	4347256	143.4	3.8	141.8	19.0	7.3	759	20-30	141.1	18.3	7.8	936	30-50	142.6	18.2	7.6	930	30-50
Cix35	1462910	4346473	135.0	3.8	133.3	18.0	7.1	1020	3-5	132.4	17.0	8.1	1646	10-20	133.3	16.8	7.6	1750	30-50
Cix36	1462145	4346040	138.6	6.1	137.4	18.5	6.8	4410	0-1	136.6	18.0	7.6	4400	0-1	137.5	18.2	7.5	4520	0-1
Cix39	1464725	4346362	140.0	7.4	139.6	18.0	6.3	885	5	139.6	16.8	7.0	1025	3-5	139.7	16.1	7.0	1035	3-5
Cix40	1464163	4347280	126.5	3.6	124.8	18.3	7.1	498	30-50	124.4	18.9	7.8	698	30-50	124.7	16.8	7.4	696	30-50
Cix41	1464790	4347089	130.0	3.5	129.5	16.7	6.7	888	30-50	128.9	19.4	7.0	955	30	129.2	17.3	7.0	934	20-30
Cix42	1465782	4349481	131.4	4.6	129.6	18.6		554	30-50	128.6	17.8	7.7	649	30-50	129.9	17.7	7.4	684	30-50
Cix43	1465675	4348610	127.3	3.4	126.0	20.1	7.4	1491	10-20	123.8	18.3	7.9	1071	0-1	126.1	16.3	7.8	2230	20
Cix44	1465233	4348017	120.9	3.6	117.6	19.1	6.1	1372	1-3	117.7	18.1	7.3	1115	0-1	117.6	17.8	7.1	1095	5-10
Cix45	1463147	4348736	130.0	3.7	128.1	20.5	7.0	939	20-30	128.0	18.3	7.2	1168	10-20	128.8	17.1	7.2	1101	10-20
Cix46	1467690	4346025	150.0	9.0	144.7	20.4	6.7	1102	3-5	143.6	18.8	7.5	1790	5-10	143.8	20.4	7.6	1841	1-3
Cix47	1467657	4345292	164.0	6.0	162.4	20.6	6.2	608	5-10	159.8	17.7	8.0	840	5-10	162.4	18.9	7.8	709	10-20
Cix48	1466524	4344788	189.3	8.8	186.7	18.5	6.0	744	1-3	185.7	17.3	7.7	751	0-1	185.7	20.6	7.4	737	3-5
Cix49	1467500	4345684	150.0	6.1	147.4	17.6	6.1	1084	30-50	146.0	16.6	7.4	1786	50-70	146.3	18.6	7.2	1724	50-70
Cix50	1466467	4345560	150.9	4.9	149.1	19.5	6.3	1192	50	148.1	18.3	7.3	1114	10-20	148.5	20.1	7.3	1011	20-30
Cix51	1466686	4345567	150.3	6.0	148.8	17.3	5.5	1124	30-50	147.5	15.0	6.9	1028	50-70	147.6	17.2	7.0	1029	± 50
Cix52	1466935	4352427	151.1	6.3	148.5	18.7	6.7	700	0-1						149.7	16.5	6.6	648	0-1
Cix53	1468878	4352072	129.6	6.3	127.9	18.9	7.6	956	0-1	126.0	17.1	7.6	1030	0-1	127.7	16.3	7.4	1284	0-1
Cix54	1466737	4350174	128.6	4.0	125.7	22.1	7.3	786	5-10	125.3	16.8	7.2	853	5-10	125.7	17.1	7.0	843	10-20
Cix55	1467004	4350123	125.0	4.1	123.0	21.9	7.1	729	5-10	122.7	15.4	7.2	800	10-20	123.1	16.7	7.2	823	5-10
Cix56	1467502	4350801	125.0	2.9	124.0	21.1	6.6	573	30-50	124.3	15.9	7.0	589	30-50	124.5	16.9	6.9	568	20-30
Cix57	1470188	4351634	133.2	7.3	132.2	22.0	7.7	1427	0-1	132.2	15.0	7.3	1172	0-1	132.5	19.8	7.5	1134	0-1

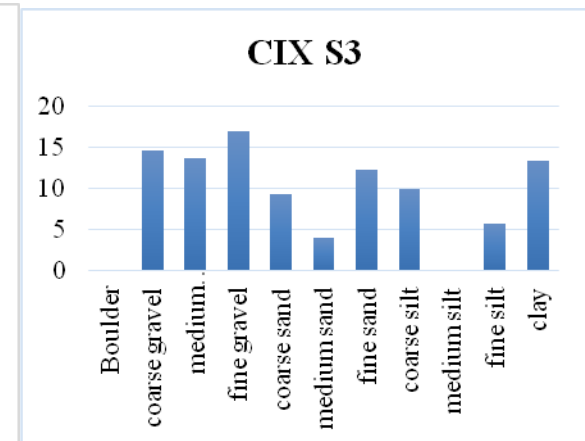
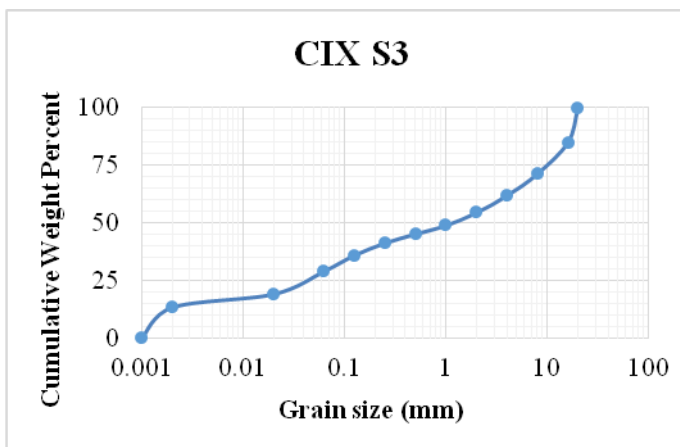
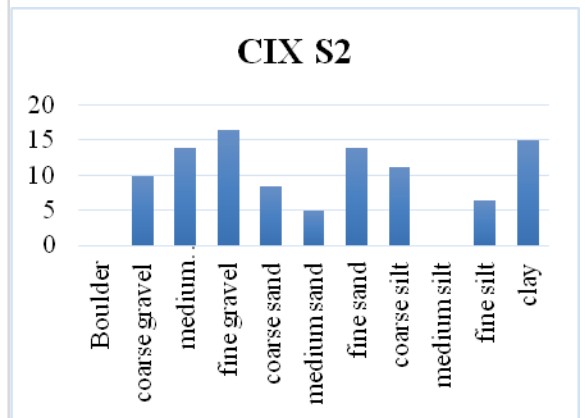
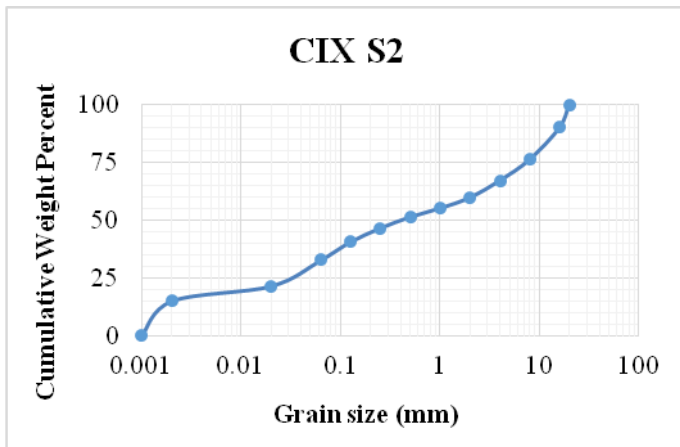
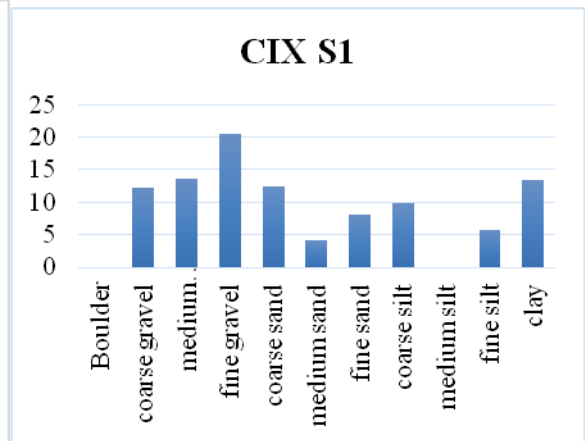
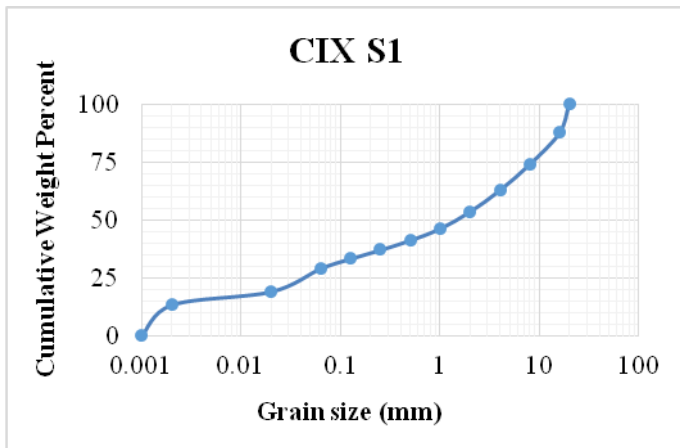
Id Pozzo	Coordinate		Quota	Prof. PC	Maggio 2015					Dicembre 2015					Aprile 2016				
					Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3
	Est	Nord	m slm	m	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L
Cix58	1472684	4351895	117.9	3.6	116.4	22.5	6.1	431	5-10	115.1	14.0	7.3	463	5-10	116.5	18.8	6.6	477	10-20
Cix61	1474260	4351719	123.0	7.5	122.2	22.7	7.4	5880		121.5	15.9	7.3	6530	20-30	122.1	16.4	8.6	3840	5-10
Cix62	1469214	4351103	123.5	6.4	120.1	19.7	---	752	30-50	120.5	16.9	7.0	855	20-30	121.1	20.2	7.3	792	50-70
Cix63	1469268	4350474	117.4	4.6	113.1			677		113.5	14.9	7.3	852	20-30	113.7	21.2	7.2	798	20-30
Cix65	1468268	4348800	114.3	4.1	110.3	19.8	6.7	863	30-50						110.7	20.4	6.7	981	20-30
Cix66	1467961	4348045	114.6	4.0	112.5	20.1	6.8	2070	0-1	112.1	17.6	7.1	3430	0-1	113.3	17.2	6.9	1347	0-1
Cix67	1470464	4346118	134.2	5.2	133.4	20.9	7.3	2240	3-5	132.9	18.8	7.4	1811	3-5	133.4	18.8	7.3	1917	5-10
Cix68	1468497	4346768	135.1	5.7	132.5	21.5	7.2	1077	50-70	131.2	17.1	7.7	2830	>120	131.8	19.7	7.7	2840	>120
Cix69	1469878	4348360	104.5	4.4	103.0	19.8	6.9	816	50-70	102.9	18.1	7.2	868	20-30	102.8	18.9	6.7	866	50-70
Cix70	1471351	4347701	99.1	2.9	97.7	20.3	7.6	799	3-5	97.1	16.0	7.8	371	1-3	97.5	15.8	7.7	437	0-1
Cix71	1472882	4347058	102.9	7.3	101.7	20.4	7.9	2750	0-1	101.5	16.6	8.3	2630	0-1	101.4	17.7	8.3	2770	0-1
Cix72	1473939	4350945	106.2	6.1	103.2	19.5	7.2	661	20-30	102.0	16.4	7.3	958	20-30	104.2	16.0	7.5	608	3-5
Cix73	1472477	4350760	104.3	4.2	102.3	22.4	7.2	511	0-1	102.3	16.4	7.1	522	1-3	102.3	15.5	7.2	447	1
Cix74	1471656	4349991	103.9	3.6	102.6	23.4	8.2	1857	1-3	101.9	16.0	7.9	1484	10-20	102.9	15.8	7.1	1137	20-30
Cix75	1471732	4349372	104.5	5.9	101.0	21.2	7.3	2190	90-120	100.1	18.0	7.3	2840	120	101.1	17.2	6.2	3490	>120
Cix76	1472077	4349090	100.3	5.8	97.7					97.8	19.4	7.7	1416	70-90		19.4	7.7		
Cix77	1472487	4348906	95.0	3.5	93.1	22.8	7.5	2390	10-20	93.4	18.0	7.5	2080	0-1	93.7	16.8	6.8	2410	1
Cix78	1472697	4349617	96.7	3.6	93.8	23.5	6.9	620	0-1	93.8	17.5	6.9	605	0-1	93.8	16.3	7.0	496	0-1
Cix79	1473874	4348786	88.1	3.2	86.3	25.8	7.3	1154	10-20	86.6	16.8	7.4	938	5-10	86.8	16.2	6.8	923	5-10
Cix80	1473701	4349635	98.7	4.0	97.7	23.4	7.2	567	0-1	97.6	17.6	7.4	1172	3-5	97.9	17.4	6.7	1138	5-10
Cix81	1475098	4348791	85.2	5.0	83.8	24.3	6.9	625	0-1	82.8	24.3	6.9	625	0-1	84.0	16.3	6.6	773	30-50
Cix83	1476922	4348748	75.8	4.2	74.0	21.6	7.8	1283	10-20	74.3	14.9	7.6	2010	50-70	74.5	16.6	5.7	2350	70
Cix84	1477247	4347432	75.1	4.6	72.1	21.1	6.9	705	50-70	72.1	16.9	7.1	1102	50-70		16.9	7.1		
Cix85	1476997	4349250	85.0	3.4	84.0	20.1	8.1	3270	30-50	84.0	17.4	7.6	2580	10-20	84.1	16.9	5.8	2140	20
Cix86	1476706	4349584	95.0	5.7	92.5	20.7	7.7	435	1-3	92.2	17.5	7.8	489	10-20	92.2	17.9	5.6	520	20-30
Cix87	1476225	4351525	108.4	6.6	106.6	21.2	7.9	2070	20-30	105.6	17.5	7.5	6850	30-50		17.5	7.5		
Cix88	1476212	4352134	109.9	6.7	109.2	21.8	7.3	8740	20-30	108.9	18.2	7.3	8900	10-20	108.6	16.7	7.4	9310	5-10
Cix91	1474638	4353799	178.9	5.0	176.5	22.1	6.9	1813	0-1	176.1	17.8	7.1	1990	1-3	174.8	19.2	7.5	2120	1-3
Cix92	1474638	4353802	178.9	5.2	176.4					176.0	16.8	7.2	1980		175.7	18.0	7.3	2000	----

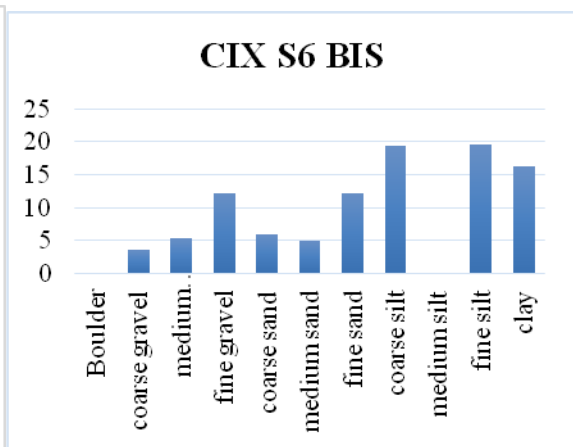
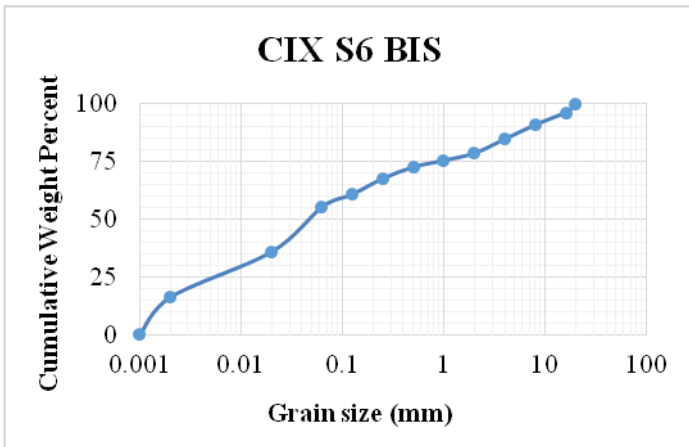
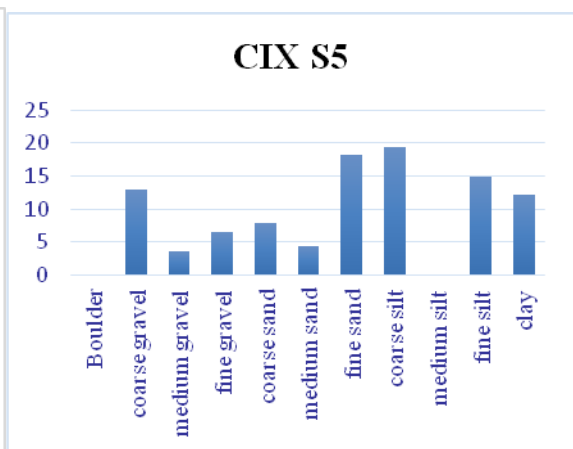
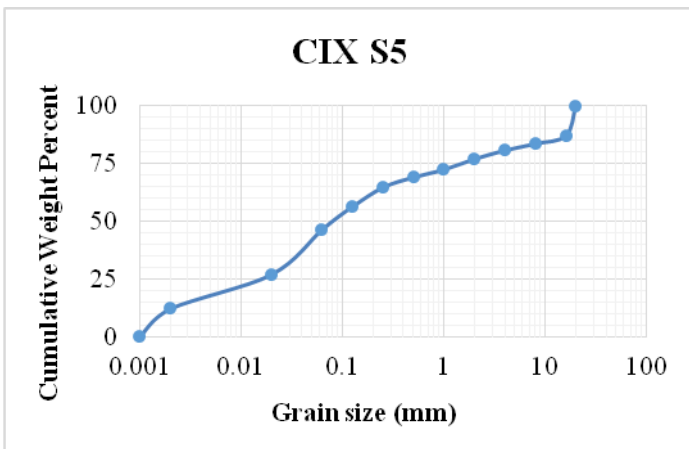
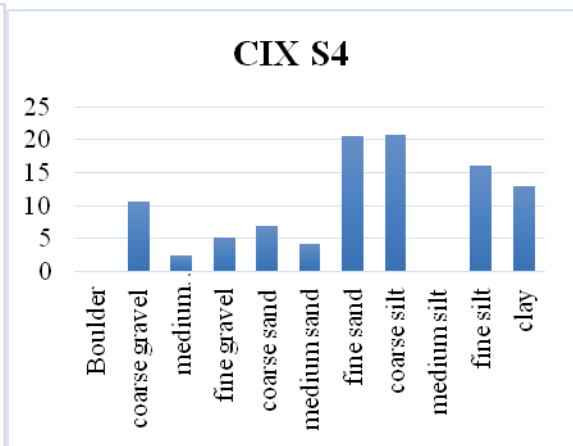
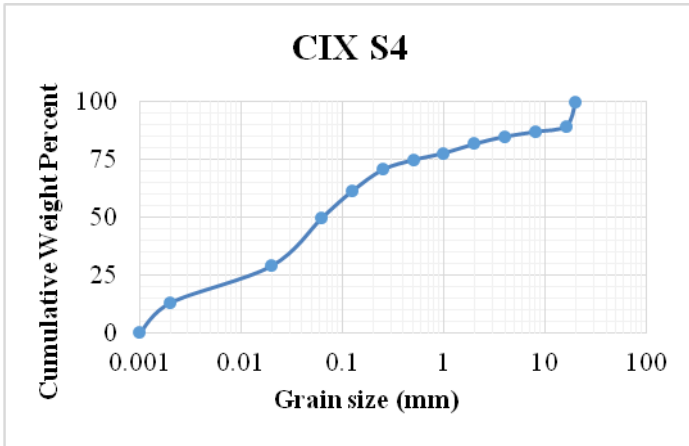


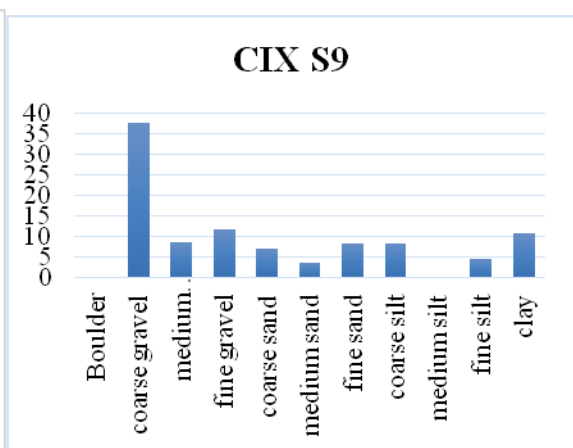
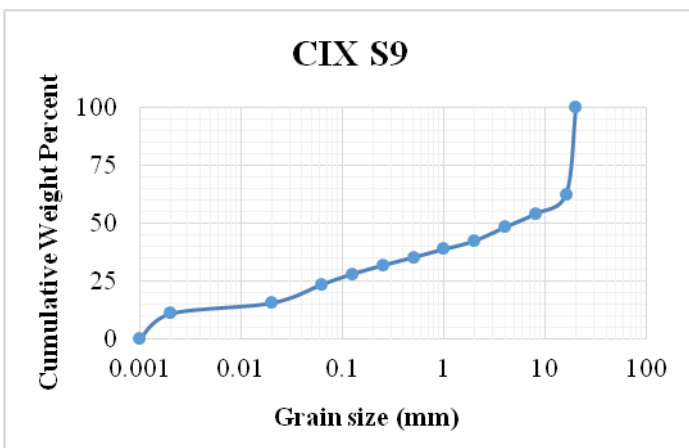
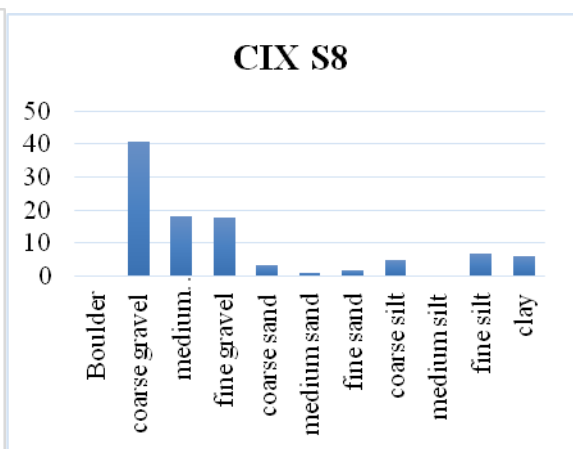
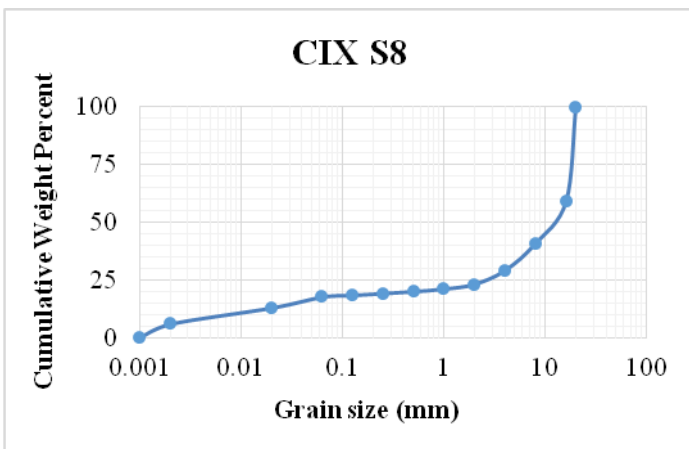
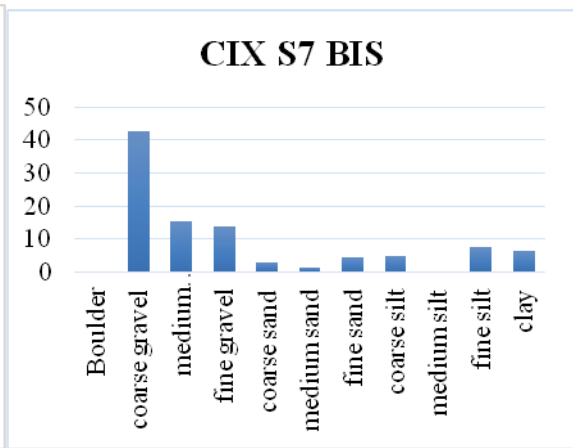
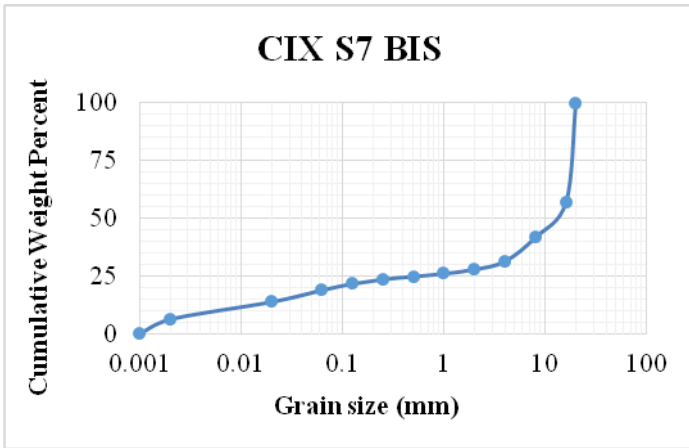
Id Pozzo	Coordinate		Quota	Prof. PC	Maggio 2015					Dicembre 2015					Aprile 2016				
					Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3
	Est	Nord	m slm	m	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L
Cix93	1476034	4353457	143.2	4.8	141.1	22.2	7.8	2510	0-1	138.9	15.8	7.8	3230	0-1	141.8		7.6	5710	0-1
Cix94	1478876	4354287	130.4	6.4	125.8	22.3	7.5	648	20-30	125.6	18.7	7.7	780	5-10	126.2	18.5	7.1	973	10-20
Cix95	1477778	4348992	75.0	2.9	74.0	23.0	7.4	930	1-3	74.4	15.9	7.6	974	0-1	74.4	16.3	----	1352	1-3
Cix97	1480436	4352350	80.9	11.6	77.5	22.3	7.7	2710	30-50	77.0	17.3	7.6	2620	30-50	77.8	17.4	7.9	2590	30-50
Cix98	1479951	4353476	104.9	7.8	102.4	22.2	7.0	648	3-5	102.7	19.3	7.0	1142	1-3	102.0	18.2	6.9	582	1-3
Cix99	1480812	4352538	86.2	6.2	81.4	22.7	6.8	1484	90-120	83.1	19.4	6.9	1500	90-120	83.3	18.6	7.0	1402	70
Cix100	1481175	4352287	84.1	6.2	79.5	22.8	6.8	1756	70-90	78.7	20.2	6.9	2120	90-120	78.6	21.2	6.9	2340	90
Cix101	1484340	4351490	66.1	17.6	64.8	23.7	7.7	1693	5-10	63.3	19.4	7.6	2350	0-1	62.7	21.1	7.7	2630	3-5
Cix105	1481995	4350226	58.9	4.7	57.0	25.0	9.0	563	0-1	55.5	16.1	7.4	4830	10-20	55.7	19.5	7.5	5310	10
Cix106	1482360	4349546	59.7	3.6	56.1	22.0	6.6	588	5-10	55.9	16.4	6.9	571	20-30	56.4	15.9	6.7	538	20-30
Cix107	1481432	4349253	64.6	6.3	59.3	22.1	6.7	701	20-30	60.1	18.7	7.0	666	30-50	60.0	19.9	6.9	665	30-50
Cix108	1480343	4348487	70.7	4.7	69.0	21.9	7.3	3210	>120	68.9	22.6	7.3	3175	>120	69.0	16.3	7.4	3590	>120
Cix109	1480122	4346466	87.5	4.5	85.7	23.5	8.2	15230	0-1	84.6	17.9	7.5	20000	0-1	84.9	15.4	7.7	20000	0-1
Cix110	1479720	4346979	87.5	4.9	84.7	21.4	7.8	3760	5-10	84.2	19.7	7.3	6136	5-10	84.6	15.7	7.5	6610	0-1
Cix111	1479733	4345680	110.0	5.3	107.3	21.7	7.4	760	1-3	106.9	21.6	7.5	1712	0-1	106.8	17.0	7.8	1370	1-3
Cix112	1480117	4344926	135.0	10.7	127.8	24.2	7.6	663	0-1						126.3	21.4	7.3	575	0-1
Cix113	1481042	4346070	90.5	3.7	88.4	23.2	7.9	657	0-1	88.5	16.9	7.7	1412	0-1	88.8	21.0	7.7	1071	3-5
Cix114	1482044	4347084	84.0	5.8	79.5	23.4	7.3	605	30-50	78.1	16.0	7.7	590	10-20	78.4	19.0	7.3	632	10-20
Cix115	1481948	4348275	69.3	5.0	66.8	22.0	6.8	476	20	65.6	21.4	7.5	517	20-30	65.4	19.4	6.9	538	20-30
Cix116	1482915	4347748	76.6	9.5	74.5	23.2	7.6	1162	20-30	74.1	19.2	7.6	971	10-20	74.0	21.5	7.6	892	5-10
Cix117	1482696	4349584	57.2	5.1	53.9	22.0	6.7	573	30-50	53.4	17.6	7.1	527	20-30	53.3	17.0	6.8	525	20-30
Cix118	1482915	4349302	58.2	5.4	54.2	21.6	6.8	521	30-50	54.0	20.8	7.0	632	20-30	53.8	22.3	6.9	672	30-50
Cix119	1483188	4349536	55.8	5.2	51.5	22.8	6.7	908	50-70	51.5	19.5	6.9	769	20-30	51.2	20.9	6.8	710	30
Cix120	1483395	4349132	56.4	4.4	53.6	23.3	7.1	1057	50-70	53.4	19.5	7.1	931	50-70	53.5	19.6	7.3	971	50
Cix121	1483915	4349135	54.2	5.0	51.8	22.3	6.9	627	10-20	50.8	17.5	6.8	1197	50-70	50.7	19.0	6.8	1265	70
Cix122	1482659	4346490	94.1	7.5	90.1	22.7	6.8	580	10-20	88.1	18.2	7.2	590	10-20	88.7	19.3	6.8	631	20-30
Cix123	1482359	4345868	105.0	3.4	103.2	22.1	6.7	661	30-50	103.0	18.4	7.0	755	30-50	103.1	17.6	6.7	807	20-30

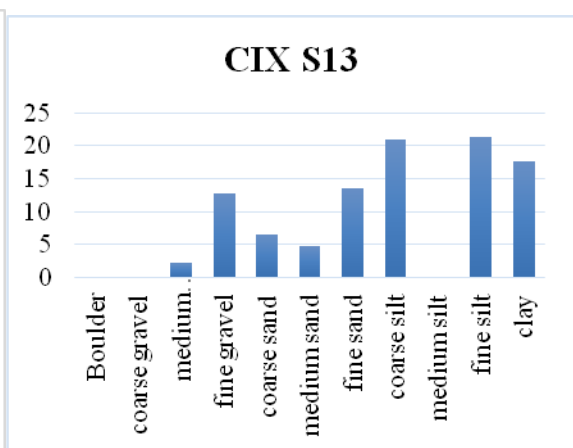
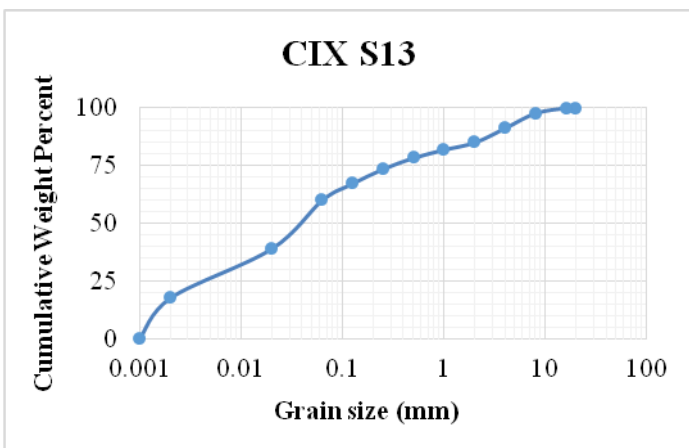
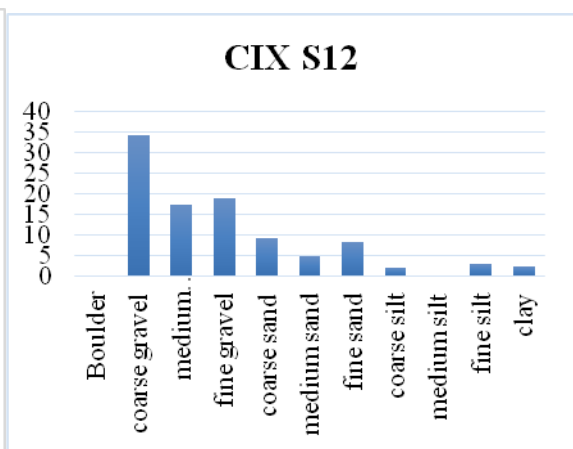
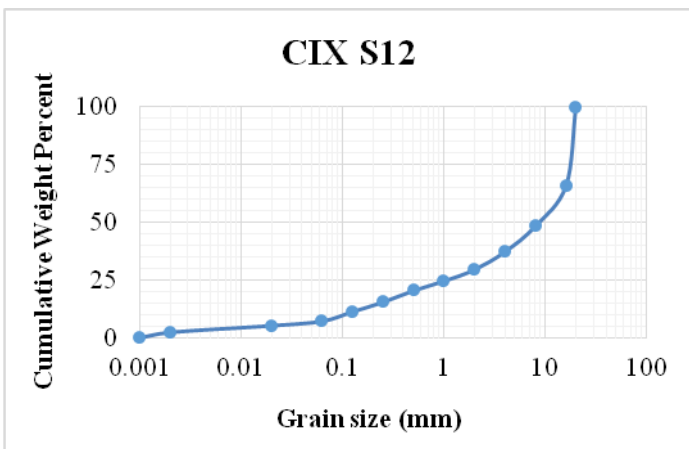
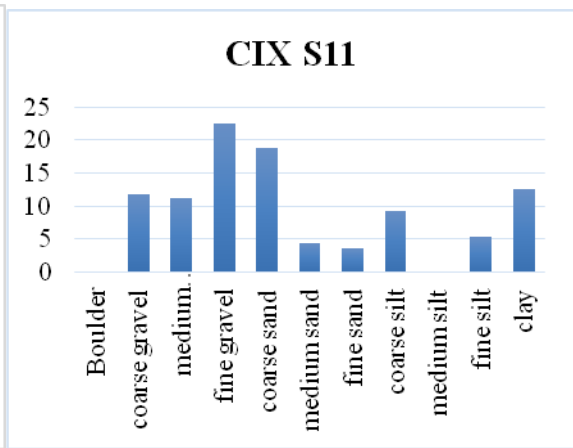
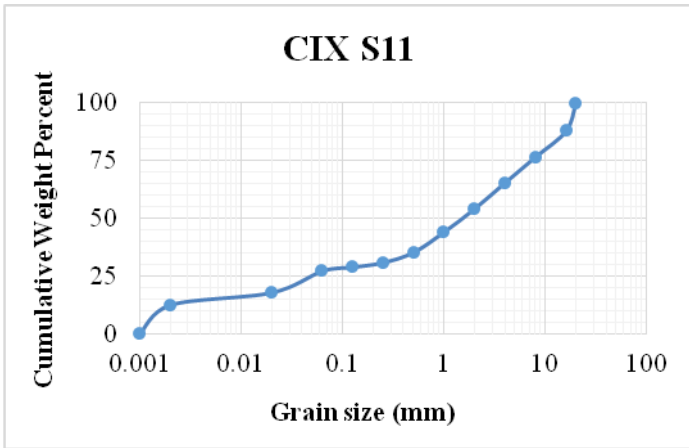
Id Pozzo	Coordinate		Quota	Prof. PC	Maggio 2015					Dicembre 2015					Aprile 2016				
					Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3	Quota piezometrica	T	pH	Conduci- bilità	NO3
	Est	Nord	m slm	m	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L	m slm	°C		µS/cmq	mg/L
Cix124	1483913	4347811	69.3	6.7	65.9	22.1	7.4	2290	0-1	67.5	16.8	7.3	3370	0-1	67.4	19.2	7.2	2490	0-1
Cix125	1483315	4345417	108.0	6.7	106.0	21.1	7.2	980	5-10	103.7	17.9	7.6	1020	5-10	103.5	20.6	7.9	1088	5-10
Cix126	1484170	4345360	90.1	2.6	87.7														
Cix127	1485039	4346735	65.0	3.8	61.6										61.9	17.9		3710	0-1
Cix128	1485626	4347218	57.9	6.1	54.3	20.9	7.3	819		54.3	15.3	7.4	818	20-30	54.2	17.7	7.4	819	10-20
Cix129	1486846	4347081	45.3	3.4	43.7	21.5	7.9	4890		43.5	16.6	7.7	4580	20-30	43.7	17.3	7.8	4250	10-20
Cix130	1481985	4345300	119.0	4.3	116.8	21.0	7.0	741		116.6	15.7	7.2	750	0-1	116.7	20.0	7.4	807	0-1
Cix131	1482222	4346499	90.1	4.6	87.7	20.1	7.1	789		87.6	19.5	7.0	1086	3-5	87.9	20.1	7.1	1085	3-5
Cix132	1481167	4347395	76.4	5.2	74.5	21.3	7.7	1422		73.7	20.2	8.1	1501	10-20	73.6	19.5	8.8	1521	20
Cix133	1472471	4347847	94.6	6.7	89.2	22.2	6.9	1458		88.7	18.9	7.4	1534	3-5	89.1	18.6	7.1	1579	3
Cix134	1472453	4348117	92.9	5.3	89.3	20.4	7.0	1382		88.7	20.7	7.1	1298	20-30					
Cix135	1471627	4346525	125.7	7.7	119.3	21.7	7.7	2080							120.7	18.2		2570	70-90
Cix136	1465883	4346459	134.4	6.8	132.9	22.8	8.2	5520		132.1	16.3	7.9	5240	0-1	133.9	18.1	7.6	5050	0-1
Cix137	1466092	4346395	135.0	3.2	133.5	21.8	7.6	1192		133.5	17.9	7.5	1655	1-3	134.0	17.9	7.6	816	5

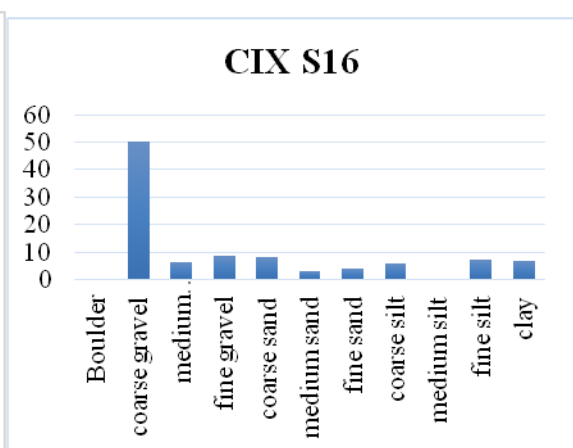
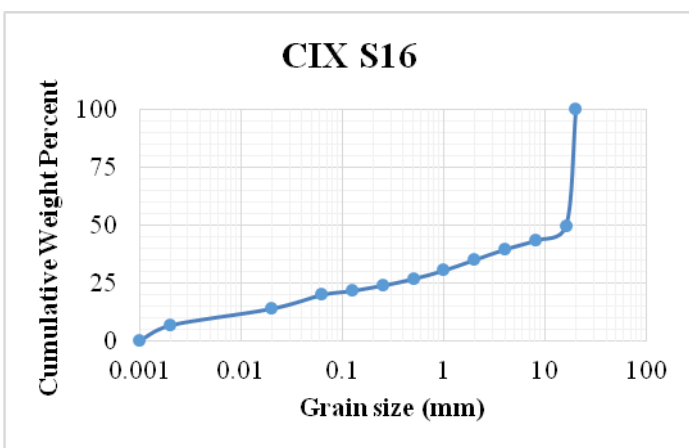
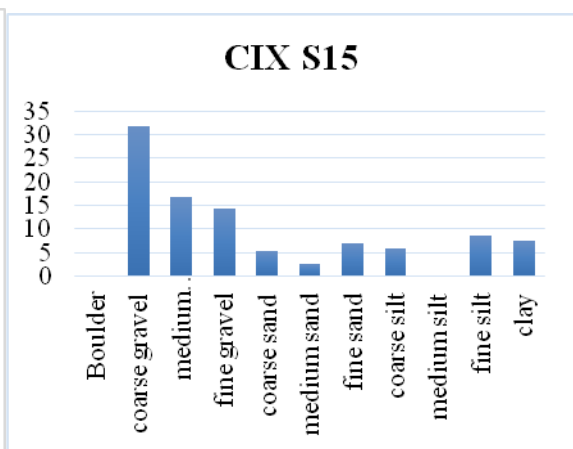
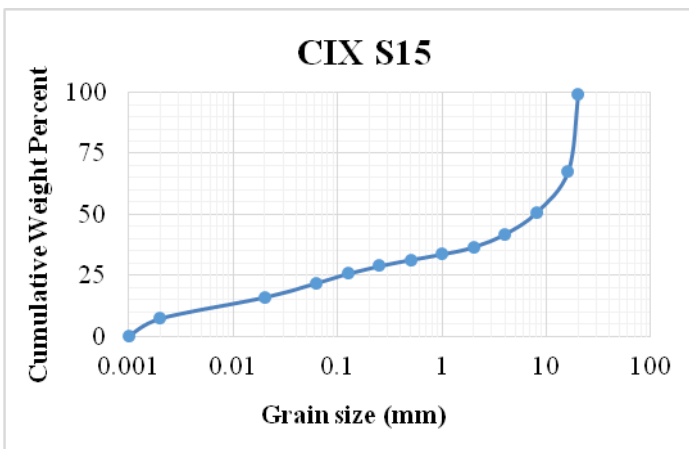
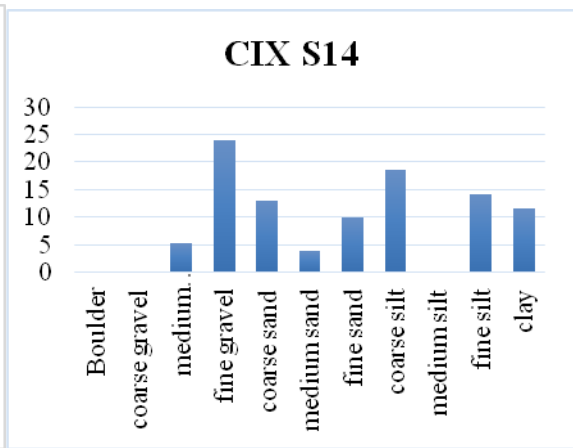
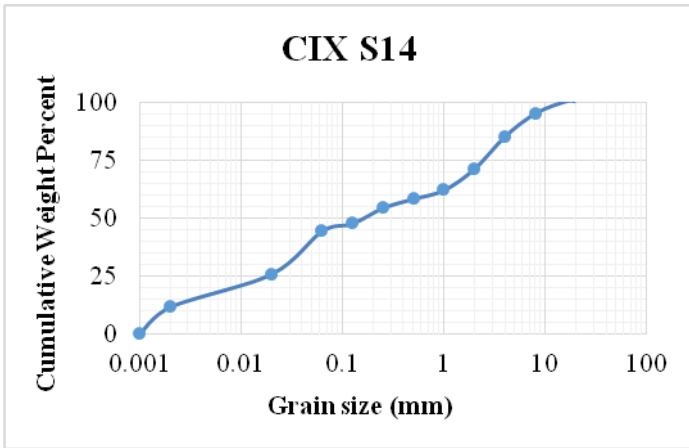
# Appendice 3

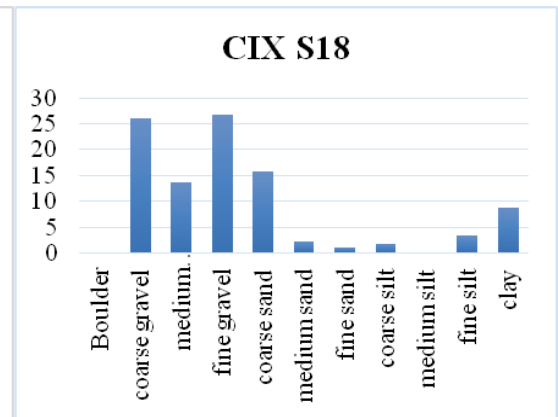
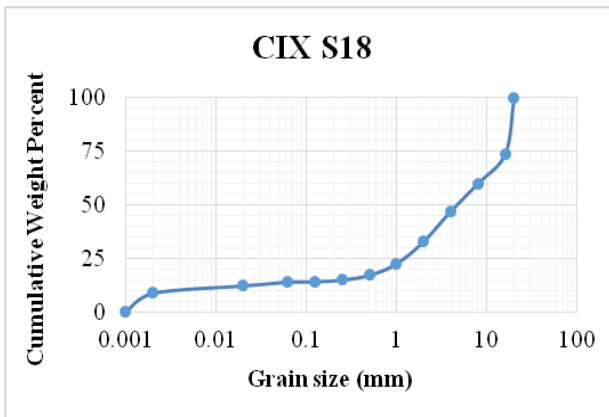
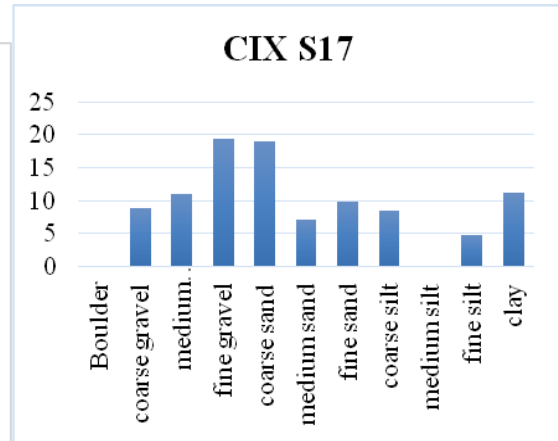
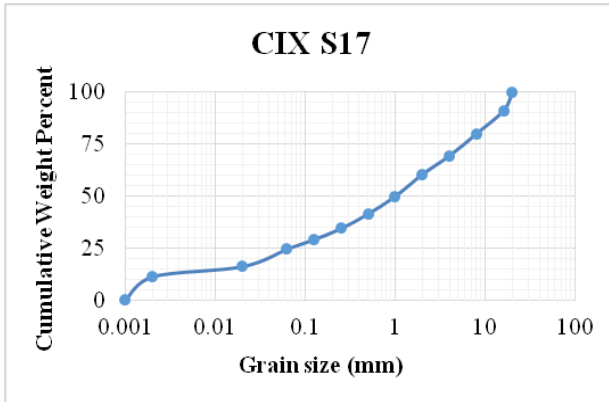














## Appendice 4

Risultati campagna geochimica sulle acque sotterranee e superficiali eseguita a luglio 2015

Campione	X GB	Y GB	Tipologia	Data	T acqua	T aria	pH	Eh	EC	TDS	O2	Ca	Mg	K	Na	HCO3	Cl	SO4	NO3	SiO2	Br
					°C	°C		mV	mS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
CIX 58	1472680.911	4351902.89	Pozzo	31/07/15	24	29.4	6.7	416	0.46	285	5.6	16	12	3.5	54	75	81	33	5.7	12	0.3
CIX 117	1482692.027	4349582.667	Pozzo	31/07/15	27	39	6.5	418	0.58	351	4.6	23	15	2.4	63	112	77	45	10.7	13	0.3
TCIX 2	1470830.788	4348427.155	Fiume	31/07/15	25	30	7.7	416	629	467	5	61	18	3.2	42	243	69	24	3.1	8	0.3
FCIX 2	1470853.947	4348423.702	Fiume	31/07/15	26	30	7.8	404	665	487	5	62	19	3.7	45	249	74	27	3.8	8	0.4
TCIX 3	1474044.919	4348474.629	Fiume	31/07/15	27	34	7.6	422	742	516	3	59	15	7.8	55	253	89	26	4.6	11	0.4
CIX 130	1481991.276	4345296.765	Pozzo	31/07/15	27	38	6.9	333	0.81	564	1.4	49	30	5.7	71	196	109	87	0.8	17	0.6
FCIX 3	1482394.657	4349683.767	Fiume	31/07/15	32	37	8.33	381	905	642	6	72	30	5.8	72	293	109	54	6	7	0.45
CIX 13	1461664.994	4351148.655	Pozzo	29/07/15	23	28	7.8	445	0.92	651	6.4	73	24	2	80	277	105	81	18.3	10	0.5
FCIX 1	1467968.624	4348096.551	Fiume	29/07/15	29	34	8.42	351	1041	737	6	82	36	8	78	325	130	66	17	10	0.45
CIX 10	1462482.919	4350671.34	Pozzo	29/07/15	22	30	7.1	495	1.15	812	2	85	35	25	88	345	141	81	22	12	0.3
TCIX 1	1468983.992	4348037.887	Fiume	29/07/15	30	34	8.33	350	1223	859	4	63	44	17	119	373	189	40	0.45	12	1.25
CIX 83	1476921.863	4348745.636	Pozzo	29/07/15	24	34	7.6	439	1.24	879	3.8	59	34	7	157	335	196	83	5.9	10	1.1
CIX 44	1465232.821	4348017.248	Pozzo	29/07/15	22	33	6.9	423	1.28	955	3.4	97	33	2.4	131	394	176	107	2	16	1.1
CIX 133	1472473.477	4347850.384	Pozzo	29/07/15	22	34	6.9	393	1.57	1207	1.8	169	46	6.5	103	618	204	47	19	14	0.6
CIX 91	1474647.978	4353799.517	Pozzo	31/07/15	24	40	6.9	443	1.91	1327	3.4	91	75	4	231	357	396	159	4.4	15	2.6
CIX 26	1466067.93	4351531.679	Pozzo	29/07/15	25	27	8.3	386	2.03	1495	5	104	43	20	294	517	338	168	28	11	1.2
CIX 49	1468067.308	4345687.131	Pozzo	29/07/15	20	33	7	427	2.32	1505	3.4	101	66	4.7	305	353	455	206	64	14	2
CIX 100	1481177.114	4352288.525	Pozzo	31/07/15	24	39	6.8	418	2.42	1471	1.8	77	60	7	341	514	465	187	69	21	2
CIX 75	1471727.302	4349374.403	Pozzo	29/07/15	22	34	6.7	447	4.5	2654	3.2	158	138	21	615	316	1064	328	153	19	4.17
CIX 36	1462154.433	4345899.608	Pozzo	29/07/15	23	32	7.4	28	4.6	2935	1	115	111	14	743	414	1244	285	0	10	7
CIX 129	1486850.824	4347084.194	Pozzo	31/07/15	28	37	8.2	414	5.03	3155	4.6	115	203	1.4	703	451	1328	344	37	9	11

Campione	X	Y	Tipologia	Data	F	NO2	NH4	Sr	Bi	Li	U	Be	Mo	Cu	B	Ag	Zn	Al	Cd
					mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
CIX 58	1472680.911	4351902.89	Pozzo	31/07/2015	0.7	0.6	<0.001	0.1	<0.1	5	<0.03	<0.1	<1	11	34	<0.03	97	<3	0.3
CIX 117	1482692.027	4349582.667	Pozzo	31/07/2015	0.2	0.5	<0.001	131	<0.1	7	<0.03	<0.1	<1	4	56	<0.03	19	<3	<0.2
TCIX 2	1470830.788	4348427.155	Fiume	31/07/2015	0.3	0.5	<0.001	118	<0.1	4	0.8	<0.1	<1.1	2	45	<0.03	123	<3	0.45
FCIX 2	1470853.947	4348423.702	Fiume	31/07/2015	0.4	0.5	<0.001	120	<0.1	4	0.8	<0.1	<1.1	2	47	<0.03	52	<3	0.3
TCIX 3	1474044.919	4348474.629	Fiume	31/07/2015	0.4	0	10.4	99	<0.1	5	0.4	<0.1	<1.1	1	55	<0.03	12	5	<0.2
CIX 130	1481991.276	4345296.765	Pozzo	31/07/2015	0.4	0.7	<0.001	197	<0.1	24	0.3	<0.1	<1	1	60	<0.03	12	<3	<0.2
FCIX 3	1482394.657	4349683.767	Fiume	31/07/2015	0.3	0.8	<0.001	141	<0.1	5	1	<0.1	<1	2	63	<0.03	8	<3	<0.2
CIX 13	1461664.994	4351148.655	Pozzo	29/07/2015	0.5	0.7	<0.001	240	<0.1	6	0.43	<0.1	<1	3	63	<0.03	35	8	0.3
FCIX 1	1467968.624	4348096.551	Fiume	29/07/2015	0.2	0.9	<0.001	151	<0.1	6	0.9	<0.1	<1.1	2	64	0.05	33	8	<0.2
CIX 10	1462482.919	4350671.34	Pozzo	29/07/2015	0.4	0.9	<0.001	227	<0.1	10	2	<0.1	<1	6	124	<0.03	23	<3	0.3
TCIX 1	1468983.992	4348037.887	Fiume	29/07/2015	0.3	1.3	<0.001	270	<0.1	5	0.6	<0.1	<1	3	114	<0.03	19	4	<0.2
CIX 83	1476921.863	4348745.636	Pozzo	29/07/2015	0.6	1.3	<0.001	247	<0.1	7	6	<0.1	1	3	102	<0.03	14	<3	<0.2
CIX 44	1465232.821	4348017.248	Pozzo	29/07/2015	0.14	0.1	<0.001	253	<0.1	16	0.15	<0.1	<1.1	2	79	<0.03	53	<3	<0.2
CIX 133	1472473.477	4347850.384	Pozzo	29/07/2015	0.09	1.2	<0.001	65	<0.1	7	4	<0.1	<1	2	145	<0.03	36	<3	0.3
CIX 91	1474647.978	4353799.517	Pozzo	31/07/2015	0.54	3.2	<0.001	495	<0.1	19	3	<0.1	<1	1	103	<0.03	50	<3	<0.2
CIX 26	1466067.93	4351531.679	Pozzo	29/07/2015	0.8	3.4	<0.001	534	<0.1	11	7	<0.1	<1	7	64	0.06	152	4	1
CIX 49	1468067.308	4345687.131	Pozzo	29/07/2015	0.2	3.4	<0.001	448	<0.1	16	0.5	<0.1	<1	1	77	0.03	16	<3	<0.2
CIX 100	1481177.114	4352288.525	Pozzo	31/07/2015	0.3	3.4	<0.001	461	<0.1	9	2	<0.1	<1	7	71	<0.03	94	<3	0.3
CIX 75	1471727.302	4349374.403	Pozzo	29/07/2015	0.23	8.4	<0.001	916	<0.1	30	2	<0.1	<1	11	143	0.1	82	<3	1
CIX 36	1462154.433	4345899.608	Pozzo	29/07/2015	2.4	9	<0.001	1871	<0.1	459	0.34	<0.1	<1	1	595	<0.03	14	<3	<0.2
CIX 129	1486850.824	4347084.194	Pozzo	31/07/2015	1.4	9	<0.001	1444	<0.1	26	28	<0.1	4.5	2	392	0.07	11	<3	0.2

Campione	X	Y	Tipologia	Data	Sb	Te	Ba	Tl	Pb	Ga	As	Se	Rb	Co	V	Cr	Fe	Mn	Ni
					µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
CIX 58	1472680.911	4351902.89	Pozzo	31/07/2015	0.2	<0.04	35	<0.03	<0.4	<0.02	0.6	<10	1	0.16	<2	<1	<21	40	3
CIX 117	1482692.027	4349582.667	Pozzo	31/07/2015	<0.1	<0.04	77	<0.03	0.4	<0.02	<0.4	<10	0.3	0.04	<2	<1	<21	<4	1
TCIX 2	1470830.788	4348427.155	Fiume	31/07/2015	0.45	<0.04	155	0.05	5.9	<0.02	0.9	<10	2	0.12	<2	<1	58	39	1
FCIX 2	1470853.947	4348423.702	Fiume	31/07/2015	0.5	<0.04	148	0.05	5	<0.02	0.9	<10	2	0.13	<2	<0.7	54	35	1
TCIX 3	1474044.919	4348474.629	Fiume	31/07/2015	0.2	<0.04	83	<0.03	2.3	<0.02	1.5	<10	5	0.3	<2	<0.7	193	65	1.3
CIX 130	1481991.276	4345296.765	Pozzo	31/07/2015	0.1	<0.04	218	<0.03	0.4	<0.02	0.7	<10	2	0.12	<2	<1	88	58	1
FCIX 3	1482394.657	4349683.767	Fiume	31/07/2015	0.7	<0.04	94	<0.03	2	<0.02	2.5	<10	3	0.3	<2	<0.7	<21	39	1
CIX 13	1461664.994	4351148.655	Pozzo	29/07/2015	0.2	<0.04	77	0.05	10	0.02	0.9	<10	3	0.05	<2	<1	<21	<4	1
FCIX 1	1467968.624	4348096.551	Fiume	29/07/2015	0.3	<0.04	100	0.09	1.3	0.03	0.8	<10	5	0.14	<2	<0.7	<21	<4	2
CIX 10	1462482.919	4350671.34	Pozzo	29/07/2015	0.6	<0.04	71	0.05	0.8	<0.02	0.5	<10	6	0.08	<2	<0.7	<21	<4	1
TCIX 1	1468983.992	4348037.887	Fiume	29/07/2015	0.2	<0.04	99	<0.03	2	<0.02	1	<10	4	0.3	<2	<0.7	66	12	1
CIX 83	1476921.863	4348745.636	Pozzo	29/07/2015	0.2	<0.04	62	0.037	0.3	<0.02	1.4	<10	3	0.07	<2	<0.7	<21	34	1
CIX 44	1465232.821	4348017.248	Pozzo	29/07/2015	0.3	<0.04	66	<0.03	0.5	<0.02	1.3	<10	1	0.3	<2	<1	<21	365	2
CIX 133	1472473.477	4347850.384	Pozzo	29/07/2015	0.4	<0.04	384	0.03	0.6	<0.02	0.9	<10	2	0.4	<2	<1	<21	268	3
CIX 91	1474647.978	4353799.517	Pozzo	31/07/2015	0.1	<0.04	54	<0.03	0.3	<0.02	<0.4	<10	2	0.07	<2	<1	<21	<4	1
CIX 26	1466067.93	4351531.679	Pozzo	29/07/2015	0.6	0.05	98	0.11	25	<0.02	1.13	<10	9	0.133	<2	<0.7	<21	6	2
CIX 49	1468067.308	4345687.131	Pozzo	29/07/2015	0.3	<0.04	88	<0.03	0.8	<0.02	0.8	<10	2	0.12	<2	<0.7	<21	10	2
CIX 100	1481177.114	4352288.525	Pozzo	31/07/2015	<0.1	0.04	31	<0.03	1	<0.02	<0.4	<10	1	0.134	7	<0.7	<43	13	1
CIX 75	1471727.302	4349374.403	Pozzo	29/07/2015	0.1	0.06	95	0.03	0.7	<0.02	0.75	<10	3	0.24	6	1	<53	44	2
CIX 36	1462154.433	4345899.608	Pozzo	29/07/2015	<0.1	0.06	61	<0.03	0.3	<0.02	0.57	<10	15	0.22	5	2	701	211	2
CIX 129	1486850.824	4347084.194	Pozzo	31/07/2015	0.2	0.05	38	<0.03	0.1	<0.02	1.9	<10	2	0.15	9	1.6	<53	5	2

## Appendice 5

	CIX 58	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.74	M/l	5.48E-08	2.27E-03	3.53E-05	SO4-2	3.85E-07	1.22E-03	4.26E-06	9.20E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		72		28			---				
Fe	1.97E-07	1	99									
Mn	7.28E-07	88		1	2	3	2	7				
Na												
Zn	1.48E-06	83				3	4	10				
Cd	2.58E-09	81		13		4		2				
Cu	1.73E-07	32	16			1	36	15				
Ni	5.79E-08	37				1	57	5				
Pb	1.69E-09	18	2	1		2	65	13				

	CIX 117	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.53		4.40E-08	2.18E-03	1.21E-05	4.09E-04	3.86E-07	1.81E-03	3.88E-06	1.73E-04		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		90		10							
Fe	1.97E-07	3	97									
Mn	3.64E-08	85		1		3	1	10				
Zn	2.91E-07	79				4	3	13				
Cd	8.90E-10	80		12		5		3				
Cu	6.30E-08	34	7			2	36	22				
Ni	1.02E-08	37				2	54	7				
Pb	9.66E-10	18	1	1		2	60	18				

	TCIX 2	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.74		6.26E-07	1.95E-03	1.74E-05	2.08E-04	1.32E-05	3.84E-03	3.88E-06	5.02E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		100									
Fe	1.04E-06		100									
Mn	6.92E-07	57				1	28	14				
Zn	1.88E-06	33	2			1	53	11				
Cd	4.01E-09	80		10		2		7				
Cu	3.15E-08	1	55				43	2				
Ni	1.88E-08	2					97	1				
Pb	2.84E-08	1	1				97	2				

	FCIX 2	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.8		7.36E-07	2.08E-03	2.16E-05	2.33E-04	1.79E-05	3.92E-03	4.51E-06	6.12E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		100									
Fe	9.67E-07		100									
Mn	6.37E-07	54				1	32	13				
Zn	7.96E-07	29	3			1	57	10				
Cd	2.49E-09	79		11		2	1	7				
Cu	3.15E-08	1	58				40	1				
Ni	1.53E-08	2					98	1				
Pb	2.46E-08	1	1				97	2				

	TCIX 3	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.62		5.37E-07	2.52E-03	1.95E-05	2.25E-04	1.09E-05	4.01E-03	5.01E-06	7.47E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	1.85E-07		100									
Fe	3.46E-06		100									
Mn	1.18E-06	60				1	24	15				
Zn	1.84E-07	37	2			1	46	13				
Cd	8.90E-10	78		13		2		7				
Cu	1.58E-08	2	46				50	3				
Ni	1.70E-08	3					96	1				
Pb	1.11E-08	1	1				96	2				

	CIX 130	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.93		1.10E-07	3.07E-03	1.95E-05	7.35E-04	1.78E-06	3.14E-03	7.01E-06	1.29E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		99		1							
Fe	1.58E-06	8	90					2				
Mn	1.06E-06	76		1		5	5	14				
Zn	1.84E-07	66	1			5	11	17				
Cd	8.90E-10	74		14		7		5				1
Cu	1.58E-08	14	14			1	57	14				
Ni	1.88E-08	14				1	81	4				
Pb	1.98E-09	6	1	1		1	82	10				

	FCIX3	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	8.33		4.00E-06	3.09E-03	1.63E-05	4.36E-04	6.78E-05	4.30E-03	5.64E-06	9.81E-05		
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		100									
Fe	1.97E-07		100									
Mn	7.10E-07	28				1	64	7				
Zn	1.23E-07	6	4				87	2				
Cd	8.90E-10	71	2	14		4	2	6				1
Cu	3.15E-08		79				21					
Ni	1.70E-08						99					
Pb	9.90E-09		1				99					

	CIX 13	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.82		6.27E-07	2.95E-03	2.53E-05	6.84E-04	1.78E-05	4.36E-03	6.01E-06	2.95E-04	6.92E-10	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	2.97E-07		100									
Fe	1.97E-07		100									
Mn	3.64E-08	52				3	31	13				
Zn	5.36E-07	28	2			2	58	10				
Cd	2.23E-09	73		13		6	1	7				
Cu	4.72E-08	1	58				40	1				
Ni	1.53E-08	2					98	1				
Pb	4.83E-08	1	1				97	2				

	FCIX 1	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH			3.94E-06	3.68E-03	9.48E-06	5.33E-04	8.78E-05	4.70E-03	5.64E-06	2.76E-04	1.52E-10	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	2.97E-07		100									
Fe	1.97E-07		100									
Mn	7.29E-08	24				1	68	7				
Zn	5.05E-07	4	4				90	2				
Cd	1.07E-09	69	1	15		4	2	6				2
Cu	3.15E-08		81				19					
Ni	2.73E-08						100					
Pb	6.28E-09		1				99					

	CIX 10	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.13		1.24E-07	3.98E-03	2.21E-05	6.62E-04	4.67E-06	5.49E-03	3.88E-06	3.54E-04	3.15E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		99		1							
Fe	1.97E-07		100									
Mn	3.64E-08	66		1		3	10	21				
Zn	8.11E-07	52	1	0		3	21	23				
Cd	2.94E-09	71		17		5		8				
Cu	9.45E-08	7	16				65	12				
Ni	1.88E-08	7					90	3				
Pb	3.86E-09	3	1				88	8				



	TCIX 1	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	8.33		3.59E-06	5.34E-03	1.69E-05	3.23E-04	8.71E-05	5.49E-03	1.57E-05	7.26E-06	1.15E-10	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	1.48E-07		100									
Fe	1.18E-06		100									
Mn	2.19E-07	25				1	66	8				
Zn	2.91E-07	5	3			0	90	2				
Cd	8.91E-10	65	1	21		2	2	7				2
Cu	4.73E-08		75				25					
Ni	2.39E-08						99					
Pb	9.57E-09						99					

	CIX 83	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.61		4.17E-07	5.52E-03	3.27E-05	7.02E-04	1.42E-05	5.32E-03	1.43E-05	9.52E-05	1.13E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.56E-08		100								0	
Fe	1.97E-07		100									
Mn	6.19E-07	56		1		3	24	17				
Zn	2.14E-07	34	1			2	48	14				
Cd	8.91E-10	66		21		5		7				
Cu	4.73E-08	2	40				55	3				
Ni	1.36E-08	2					96	1				
Pb	1.50E-09	1	1				96	3				

	CIX 44	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.9		7.10E-08	4.96E-03	7.90E-06	8.77E-04	3.19E-06	6.31E-03	1.34E-05	2.99E-05	6.87E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.57E-08		99		1							
Fe	1.97E-07	1	99									
Mn	6.65E-06	66		1		4	6	23				
Zn	3.52E-07	55				4	14	27				
Cd	8.91E-10	67		19		6		8				
Cu	3.15E-08	10	8			1	62	19				
Ni	3.24E-08	10				1	84	5				
Pb	2.27E-09	4				1	82	12				

	CI X 133	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.88		7.00E-08	5.77E-03	4.74E-06	3.53E-04	4.89E-06	9.68E-03	7.39E-06	3.04E-04	2.79E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.57E-08		100									
Fe	1.97E-07	2	96					1				
Mn	4.88E-06	60		1		1	8	30				
Zn	5.51E-07	47				1	17	34				
Cd	3.03E-09	66		20		2		11				
Cu	3.15E-08	7	6	1			66	21				
Ni	5.12E-08	7					87	6				
Pb	2.90E-09	3					83	13				

	CIX 91	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.9		8.31E-08	1.12E-02	2.85E-05	1.23E-03	3.18E-06	5.68E-03	3.31E-05	7.15E-05	9.35E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	3.71E-08		95		5							
Fe	1.97E-07		100									
Mn	3.65E-08	69		2		5	5	20				
Zn	7.66E-07	58		1		5	12	24				
Cd	8.91E-10	56		33		6		5				
Cu	1.42E-07	11	9			1	61	18				
Ni	1.88E-08	12				1	83	5				
Pb	1.50E-09	5	1	1		1	81	12				

	CIX 26	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	8.27		2.20E-06	9.55E-03	4.01E-05	1.38E-03	1.05E-04	7.70E-03	1.45E-05	4.44E-04	4.60E-10	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	1.49E-07		100									
Fe	1.97E-07		100									
Mn	1.09E-07	25		1		2	64	10				
Zn	2.33E-06	4	2				91	2				
Cd	9.36E-09	55	1	28		7	2	7				2
Cu	1.10E-07		67				33					
Ni	3.58E-08						99					
Pb	1.20E-07						99	1				

	CIX 49	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.01		8.46E-08	1.28E-02	1.05E-05	1.65E-03	3.84E-06	5.58E-03	2.52E-05	8.72E-04	8.90E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	3.71E-08		100		1							
Fe	1.97E-07		100									
Mn	1.82E-07	68		2		5	6	19				
Zn	2.45E-07	57		1		6	14	22				
Cd	8.91E-10	53		35		7	0	5				
Cu	3.15E-08	10	13			1	61	15				
Ni	3.58E-08	10				1	84	4				
Pb	3.87E-09	4	1	1		1	83	10				

	CIX 100	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.75		6.34E-08	1.31E-02	1.48E-05	1.52E-03	2.05E-06	4.99E-03	2.46E-05	1.11E-03	1.63E-08	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	3.71E-08		96		4							
Fe	3.77E-07	1	98									
Mn	2.37E-07	71		2		6	4	18				
Zn	1.44E-06	62		1		7	8	22				
Cd	2.67E-09	53		36		7		4				
Cu	1.10E-07	16	6			2	53	22				
Ni	2.39E-08	17				1	75	6				
Pb	5.46E-09	7	1	2		2	74	15				

	CIX 75	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	6.73			3.01E-02	1.21E-05	2.37E-03	2.05E-06	4.92E-03	5.23E-05	2.48E-03	2.20E-08	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	3.72E-08		90		10							
Fe	4.85E-07	1	99									
Mn	8.03E-07	72		4		6	3	15				
Zn	1.26E-06	65		2		8	6	19				
Cd	1.07E-08	39		53		5		3				
Cu	1.74E-07	20	6	1		2	48	24				
Ni	4.10E-08	22		1		2	69	7				
Pb	3.24E-09	9	1	5		3	67	16				

	CIX 36	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	7.44		2.82E-07	3.52E-02	1.24E-04	2.19E-03	1.41E-05	6.42E-03	9.16E-05		4.04E-09	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.58E-08		99		1	0						
Fe	1.26E-05	67		2		5	5	21				
Mn	3.85E-06	60		4		5	15	16				
Zn	2.15E-07	42	1	2		5	34	16				1
Cd	8.92E-10	35		56		4		3				1
Cu	1.58E-08			100								
Ni	3.49E-08	4					93	2				
Pb	1.55E-09	2	1	1			92	4				

	CIX 129	Lz-	OH-	Cl-	F-	SO4-	CO3-	HCO3-	Br	NO3	HSO4	OHCl
pH	8.24		2.69E-06	3.76E-02	7.50E-05	2.37E-03	9.96E-05	6.28E-03	1.34E-04	6.05E-04	7.56E-10	
		Me2+	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL	MeL
Me	M/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Al	5.58E-08		100									
Fe	4.85E-07		100									
Mn	9.13E-08	34		2		3	53	9				
Zn	1.69E-07	7	2			1	87	3				1
Cd	2.23E-09	33	0	56		4	1	3				3
Cu	3.16E-08		70				30					
Ni	2.77E-08	1					99					
Pb	5.33E-10		1				99	1				

NOME	pH	si_Calcite	si_Dolomite	si_Fluorite	si_Gesso
CIX 58	6.74	-1.6145	-3.0397	-1.9263	-2.5979
CIX 117	6.53	-1.4771	-2.7564	-2.7783	-2.3652
TCIX 2	7.74	0.4302	0.6791	-2.0551	-2.2757
FCIX 2	7.8	0.506	0.8599	-1.8708	-2.2275
TCIX 3	7.62	0.333	0.4492	-1.9913	-2.2649
CIX 130	6.93	-0.5716	-0.9864	-2.1212	-1.8669
FCIX 3	8.33	1.179	2.4006	-2.1918	-1.9528
CIX 13	7.82	0.5602	0.9616	-1.6794	-1.7458
FCIX1	8.42	1.3018	2.6398	-2.5992	-1.8374
CIX 10	7.13	0.0104	-0.0454	-1.7607	-1.7265
TCIX 1	8.33	1.1785	2.62	-2.2517	-2.1838
CIX 83	7.61	0.3336	0.7522	-1.5983	-1.8661
CIX 44	6.9	-0.1278	-0.4133	-2.6113	-1.575
CIX 133	6.88	0.2615	0.2701	-2.8628	-1.7684
CIX 91	6.9	-0.2251	-0.2013	-1.6505	-1.5339
CIX 26	8.27	1.3277	2.6247	-1.3108	-1.4592
CIX 49	7.01	-0.1397	-0.1768	-2.4353	-1.3881
CIX 100	6.75	-0.5033	-0.7766	-2.3026	-1.5359
CIX 75	6.73	-0.3481	-0.4479	-2.2984	-1.1768
CIX 36	7.44	0.3476	1.0023	-0.4151	-1.3568
CIX 129	8.24	1.1814	2.9987	-1.03	-1.3676