

## Modellistica geologica e idrogeologica tridimensionale per la valutazione quali-quantitativa delle risorse idriche sotterranee.

Patrizia Fenza <sup>(a)</sup>, Cristina Buttau <sup>(a)</sup>, Stefania Da Pelo <sup>(a)</sup>, Giorgio Ghiglieri <sup>(a)</sup>

(a) Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università di Cagliari, Via Trentino 51 – 09127 Cagliari, Italia

### Riassunto

La gestione delle Risorse Idriche Sotterranee (RIS) richiede strumenti modellistici efficienti per la valutazione delle risorse disponibili e per la definizione del bilancio idrico. La valenza di tali strumenti dipende dall'accuratezza del modello concettuale geologico e idrogeologico. Nell'ambito di un progetto di ricerca volto alla valutazione delle RIS di acquiferi strategici della Sardegna, si sta testando una metodologia per lo studio quanti-qualitativo della risorsa idrica sotterranea, basata sull'utilizzo della modellistica tridimensionale geologica e idrogeologica. Scopo della ricerca è fornire uno strumento per la gestione della RIS, applicabile in diversi contesti idrogeologici, anche con lo scopo di dare supporto conoscitivo agli enti di gestione, in relazione alle risorse disponibili e alla dinamica degli acquiferi. L'area di applicazione è l'acquifero poroso delle alluvioni quaternarie della Valle del Cixerri. La Valle, situata nella Sardegna Sud-Occidentale, è una sinclinale orientata Est-Ovest legata alla tettonica terziaria, bordata da rilievi metamorfici paleozoici e colmata da formazioni sedimentarie terziarie e da alluvioni quaternarie.

La metodologia può essere sintetizzata in 3 fasi principali.

La prima ha previsto la realizzazione di un *Geodatabase* (DB) che è stato usato per la catalogazione delle informazioni geologiche e idrogeologiche (carte e sezioni geologiche, log geofisici e di pozzi, quote piezometriche, caratteristiche idrogeologiche e geochimiche, etc.).

Durante la seconda fase è stato ricostruito il modello geologico 3D dell'acquifero quaternario. I dati raccolti nel DB sono stati validati e utilizzati per la realizzazione di sezioni geologiche ortogonali e parallele all'asse della piega. L'interpolazione degli orizzonti dell'alluvionale rappresentato nelle sezioni ha permesso di ricostruire la superficie del *bottom* delle alluvioni.

La terza fase, attualmente in fase di attuazione, prevede la realizzazione di un modello 3D idrogeologico e la stima del volume dell'acquifero. Il modello sarà realizzato utilizzando la superficie di separazione delle alluvioni dalle formazioni sottostanti ottenuta dal modello geologico 3D e implementato con i dati idrogeologici rilevati *ex-novo*.

### Abstract

Management of groundwater systems requires efficient modeling tools to evaluate the available resources and to define the water balance. The value of these instruments depends on the accuracy of geological and hydrogeological conceptual model. As part of a research project aimed at assessing Groundwater Resources in strategic aquifers of Sardinia, it was tested a methodology for quantitative and qualitative study of groundwater resources, based on the use of three-dimensional geological and hydrogeological modeling. The aim of this research is to provide a tool to support the decision-making process in water resources management and assessment, applicable in different hydrogeological settings. . The pilot study area is the porous Quaternary alluvial aquifer of the Cixerri Valley. The valley, located in the South-Western Sardinia, is an East-West oriented syncline linked to the tertiary tectonics, bordered by Paleozoic metamorphic and sedimentary formations and filled by tertiary and quaternary alluvial.

The methodology can be summarized in three main phases.

The first involved the construction of a Geodatabase (DB), where geological and hydrogeological data (geological maps and cross sections, geophysical data, wells and borehole logs, piezometric levels, hydrogeological parameters and geochemical features) were cataloged

During the second phase a 3D geological model of the shallow Cixerri aquifer has been built. The data collected in the DB were validated and used for the construction of geological sections orthogonal and parallel to the fold axis. The interpolation of alluvial horizons of each sections help us to create the bottom surface of the alluvial aquifer.

The third phase, currently being implemented, involves the construction of a hydrogeological 3D model and the estimation of the volume of the aquifer.

### **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. L'acquifero del Cixerri è caratterizzato da un'elevata vulnerabilità intrinseca dovuta principalmente alla presenza di un acquifero caratterizzato da bassa soggiacenza e alla diffusione di inquinanti derivanti da attività antropiche (agricoltura, aziende zootecniche e urbanizzato diffuso).

Per uno studio quanti-qualitativo della risorsa idrica sotterranea è necessario avere una visione di insieme del sistema acquifero: geometria, caratteristiche idrogeologiche e geochemica.

Al fine di raggiungere in modo corretto gli obiettivi della ricerca, si è considerato necessario applicare un approccio multidisciplinare, indirizzato all'integrazione di differenti dati quali strutture geologiche, stratigrafia, dati geologici e idrogeologici utilizzando un sistema GIS.

Negli ultimi decenni, lo sviluppo di software per la visualizzazione 3D 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). Contemporaneamente si sono sviluppate applicazioni della modellistica geologica tridimensionale al campo idrogeologico (Ross et al., 2005; Jiménez-Martínez et al., 2012; Zhu e al., 2012; Cox et al., 2013; Di Maio et al., 2014), in cui i dati geologici sono stati integrati da dati idrogeologici, idrogeochimici e geofisici (Da Pelo et al. 2015, 2016; Ghiglieri et al., 2016).

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.

Obiettivo principale di questo studio è applicare una metodologia innovativa per sviluppare un modello geologico strutturale e idrogeologico tridimensionale dell'area del Cixerri, integrando informazioni idrogeologiche e geochemiche, al fine di ricostruire la geometria e il campo di moto dell'acquifero. 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, implementato con i dati geochemici, sarà la base del futuro modello numerico di flusso e trasporto, strumento fondamentale per valutare la dispersione dei contaminanti nelle acque sotterranee.

### **Area di studio**

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 della evoluzione tettonica dell'Oligocene Superiore-Pleistocene: Bacino di Narcao e il bacino del Cixerri. La depressione del Cixerri è stata precedentemente interpretata come un *graben* delimitato da faglie sin-sedimentarie oloceniche (Cocozza, Schafer, 1974; Pala et al., 1976; Cherchi, Montadert, 1982). Sulla base di queste 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 - ? Aquitaniano, 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 sinclinale è bordata dalle formazioni sedimentarie del basamento paleozoico. Nella valle del Cixerri affiorano quattro formazioni: i "Calcari a macroforaminiferi", il "Miliolitico" Auct., il "Lignitifero" Auct. e la "Formazione del Cixerri". Queste formazioni diminuiscono di spessore, fino a scomparire, procedendo da Ovest verso Est (Figura 1).

Al di sopra, in discordanza stratigrafica, si trovano le andesiti dell'Oligocene superiore e diverse formazioni sedimentarie (es. Formazione di Ussana). A colmare la piana si trovano depositi alluvionali terrazzati di età quaternaria (Pleistocene e Olocene). Questi rappresentano l'acquifero principale della valle del Cixerri. Esso è limitato a Nord, Ovest e Sud dai rilievi del basamento paleozoico scistoso-metamorfico e ad est da un limite geomorfologico, noto come "Soglia di Siliqua", che divide la valle del Cixerri dal *semigraben* del Campidano (Funedda et al., 2009).

I depositi alluvionali terrazzati quaternari sono costituiti da sabbie, ghiaie e hanno uno spessore di circa 10-20 metri. Il fiume principale della piana è il fiume Cixerri, un tempo il più importante affluente del Flumini Mannu, è a oggi un fiume dotato di una foce autonoma, la sua lunghezza è di 50,6 Km e il suo bacino idrografico si estende per 534,7 Km<sup>2</sup> (Funedda et al. 2009) (Figura 1).

L'acquifero alluvionale della Valle del Cixerri è delimitato lateralmente dalle formazioni Paleozoiche e limitato a letto dalla formazione del Cixerri, caratterizzata da una permeabilità che varia da bassa a molto bassa (Casmèz, 1984). Lo spessore della falda freatica è di circa 10 metri e la soggiacenza media è di 2,4 m dal piano di campagna. La direzione del flusso principale dell'acquifero è da Ovest verso Est, inoltre l'andamento delle curve piezometriche evidenzia che la falda alimenta il fiume Cixerri, che coincide con l'asse di drenaggio principale dell'acquifero (Fenza et al., 2016).

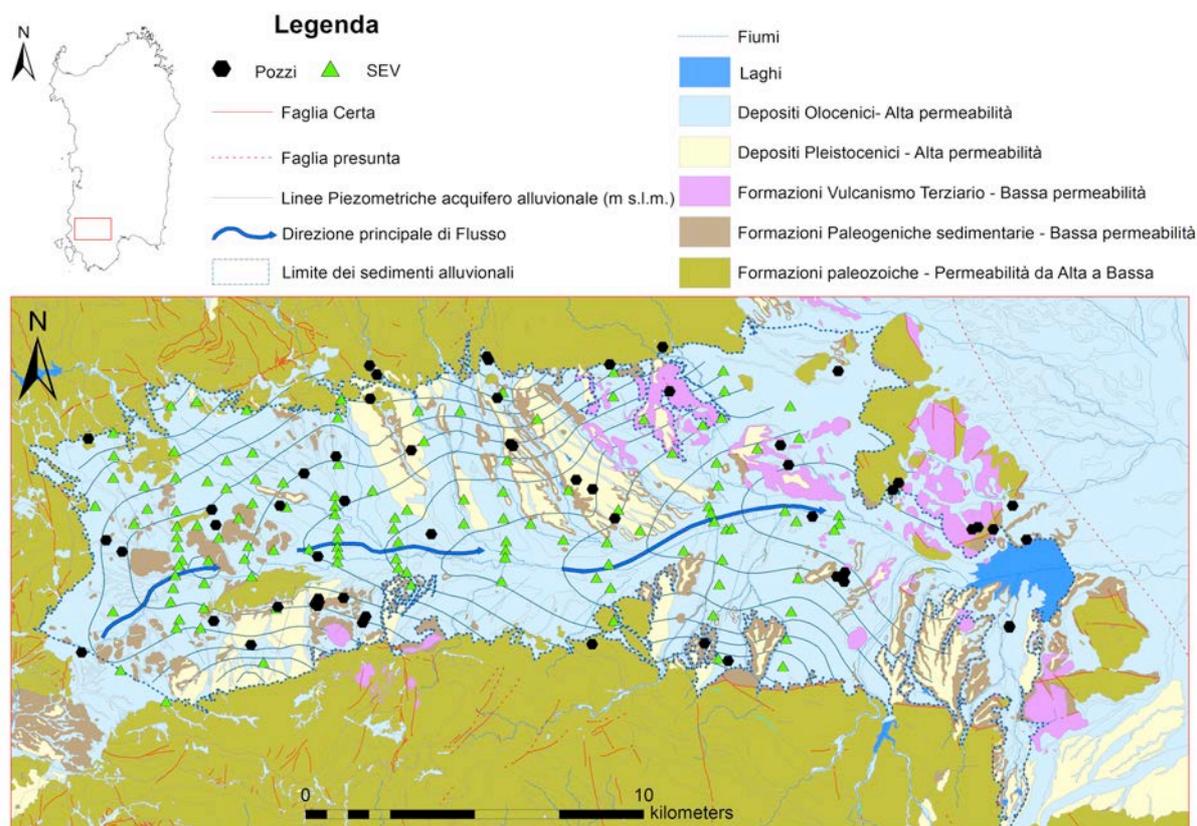


Figura 1 - Carta geologica semplificata della Valle del Cixerri, con ubicazione dei pozzi e dei SEV utilizzati per la realizzazione del modello 3D

## Materiali e metodi

Al fine di realizzare un accurato modello geologico 3D, è stato necessario sviluppare una metodologia che tenesse conto della varietà dei dati disponibili e che integrasse i dati di differente origine. Il flusso di lavoro che descrive la metodologia è riportato in Figura 2.

### Creazione Database

Nella prima fase del lavoro si è sviluppato di un *geodatabase* utile a contenere tutti i dati (strutturali, stratigrafici, geochimici, idrogeologici) necessari per la realizzazione del modello tridimensionale. Questo consente di catalogare ordinatamente i dati di *input*, ma anche di eseguire facilmente modifiche e l'aggiornamento del modello con l'immissione di nuovi dati.

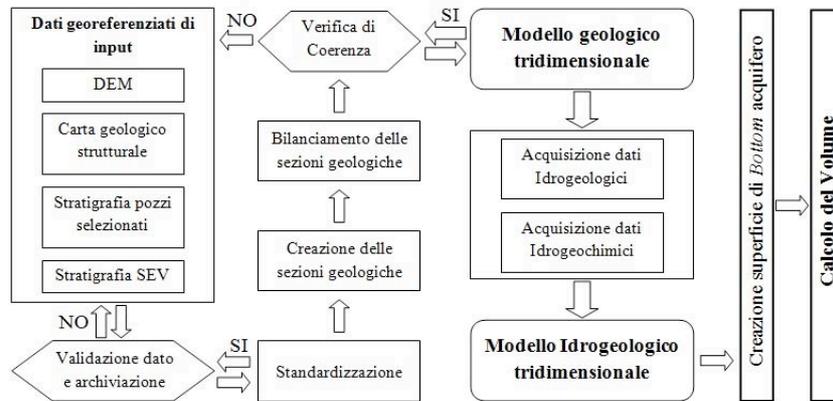


Figura 2 - Metodologia per la realizzazione del modello idrogeologico 3D (Da Pelo et al, 2016; Ghiglieri et al., 2016 modificato)

Ogni dato, prima dell'inserimento all'interno del DB è stato soggetto a validazione. Questa procedura si è basata su un processo di verifica dei dati, correzione di dati incompleti o errati, standardizzazione delle litologie e accorpamento delle stesse aventi caratteristiche litologiche simili e caratteristiche idrogeologiche tali da potersi ritenersi un medesimo acquifero. La validazione è stata realizzata in accordo con i criteri e le strategie proposte da Ross et al. (2005) e Chesnaux et al. (2011).

### Interpretazione dei Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)

Per la ricostruzione del modello geologico tridimensionale sono stati utilizzati dati geofisici e nello specifico Sondaggi Elettrici Verticale (SEV), realizzati nel 1996 dall'Università di Sassari per il lavoro "Studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna" - II fase (Prog. Cassa 25/96). I SEV sono stati effettuati mediante stendimento di Schlumberger con separazione variabile tra gli elettrodi AB (AB <= 1000 m; AB = 1500-2000 m; AB = 3000 m). I valori di resistività apparente ricavati dalle curve di resistività sono stati riprocessati utilizzando il software SEVDos, ottenendo per ogni punto di sondaggio una colonna elettrostratigrafica in cui è riportata la profondità (m) e la resistività  $\rho$  (Ohm\*m) dei singoli strati. Dall'interpretazione dei valori di resistività, è stata desunta la litologia, ottenendo per ogni singola colonnina elettrostratigrafica un log stratigrafico (Figura 3). L'associazione della litologia/resistività ha tenuto conto della stratigrafia dei pozzi situati vicino ad ogni SEV, della geologia di superficie e dei valori di resistività riportati in letteratura (Casmez, 1984).

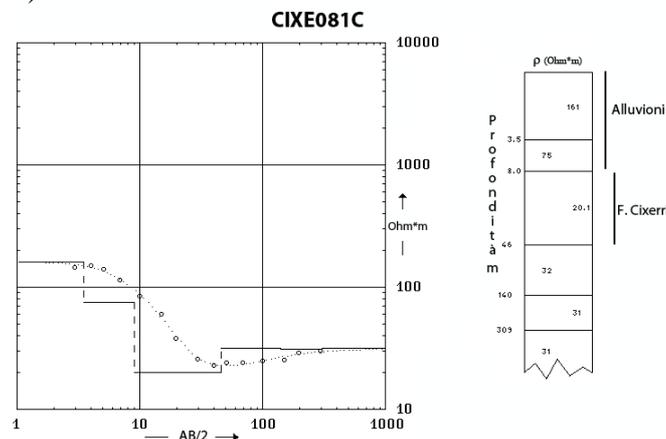


Figura 3 - Curva resistività apparente e interpretazione SEV CIXE081C

### Sviluppo del Modello geologico.

Il modello geologico tridimensionale dell'area del Cixerri è stato realizzato utilizzando il *software* di modellazione 3D MOVE di Midland Valley ([www.mve.com/software/move](http://www.mve.com/software/move)).

Per la realizzazione del modello sono stati utilizzati dati di superficie e di profondità. I dati di superficie includono carte geologiche (RAS, 2008; ISPRA, 2014) e il Modello Digitale del Terreno SAR, a passo 10m, realizzato dall'amministrazione Regionale della Sardegna (RAS, <http://www.sardegna.geoportale.it>) utilizzando le estensioni *3D Analyst* e *Spatial Analyst* del *software* ArcGIS 10.0 ESRI, Redmond, USA). I dati di profondità erano essenzialmente *log* stratigrafici di pozzi e di Sondaggi Elettrici Verticali (SEV) (Casmez, 1984, RAS, 2009).

I dati di superficie e di profondità sono stati digitalizzati e implementati in ambiente GIS, impiegando il *software* ArcGIS, al fine di eseguire elaborazioni spaziali necessarie per l'ottimizzazione dei dati utili per la realizzazione del modello 3D. Sono stati così selezionati i pozzi che intercettavano l'acquifero oggetto di studio e fornivano informazioni utili alla delineazione della superficie di *bottom* dei sedimenti alluvionali quaternari.

La realizzazione del modello è stata articolata in tre fasi fondamentali:

1. Elaborazione di 30 sezioni geologiche
2. Realizzazione superfici 3D
3. Calcolo volume

Fase 1) La prima fase del lavoro consiste nell'importare all'interno di MOVE la superficie DEM, i limiti geologici e le informazioni strutturali desunte dalla carta geologica e i dati stratigrafici riportati nei *log* dei pozzi (53) e ricavati dall'interpretazione dei SEV (125). Sono state realizzate delle sezioni parallelamente e perpendicolarmente alle strutture principali (26 orientate N-S e 4 W-E) (Figura 4), per la digitazione del *bottom* delle alluvioni quaternarie è stata interpretata la cartografia di superficie, integrata con le stratigrafie riportate nei sondaggi, opportunamente proiettati sulla sezione, tramite l'apposito *tool* di MOVE.

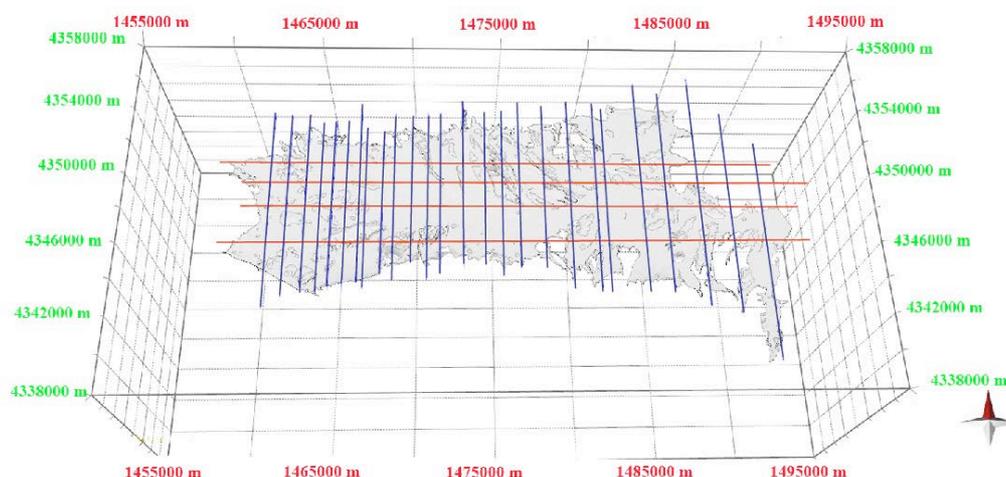


Figura 4 Sezioni geologiche utilizzate per la realizzazione del modello 3D

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 le superfici 3D, si è effettuata la validazione degli orizzonti creati, verificando l'effettiva coincidenza nei punti di intersezione delle sezioni e soprattutto che ad una esattezza geometrica corrispondesse un'altrettanta correttezza geologica.

Fase 2) Gli orizzonti realizzati su ogni singola sezione, sono stati interpolati tramite la funzione '*Delauney Triangulation*' basata su punti di controllo; la superficie così ottenuta rappresenta il limite di separazione tra alluvioni e basamento.

Fase 3) La superficie di separazione alluvioni-basamento e il DEM sono stati utilizzati per ottenere il volume dei depositi alluvionali presenti nella porzione di acquifero modellizzato utilizzando la funzione di MOVE 3D "Volume Builder Tool" e l'algoritmo "create Volume between horizons".

Le superfici di *top* e di *bottom*, utilizzate per calcolo del volume, sono state preliminarmente perfezionate al fine di eliminare gli affioramenti delle litologie, non sede di acquifero, eventualmente presenti.

### Acquisizione dei dati idrogeologici

La campagna di acquisizione dei dati idrogeologici effettuata a giugno 2016 ha previsto la determinazione della permeabilità, porosità e infiltrazione efficace, mediante analisi *in situ* e in laboratorio. Nello specifico sono prelevati 18 campioni di sedimento all'interno della piana del Cixerri, ad una profondità variabile tra 0.40 e 2 m, sui quali è stata effettuata la analisi granulometrica. 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 1  $\Phi$ . I valori di porosità sono stati calcolati usando la seguente equazione empirica (Vukovic e Soro, 1992):

$$n=0.255(1+0.83^U) \quad [1]$$

dove U è il coefficiente di uniformità ed è dato da

$$U=d_{60}/d_{10} \quad [2]$$

$d_{60}$  e  $d_{10}$  dimensione dei grani corrispondente, rispettivamente, al 60% e al 10% di peso passante attraverso i setacci.

La porosità efficace ( $n_e$ ) è stata stimata a partire dalla porosità totale (Water Supply Paper, USGS), 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 ( $n$ ).

### Risultati

Il modello geologico 3D, realizzato utilizzando log stratigrafici di pozzi e SEV, e bilanciato con sezioni geologiche orientate N-S e E-W, 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) rappresentata in figura 5. Come si può vedere in figura la superficie si approfondisce da Ovest verso Est e dai bordi della piana verso il centro, con quote che variano tra i 314 m e i 23 m s.l.m. Lo spessore medio delle alluvioni desunto dalle elaborazione di dati risultanti dalla modellazione geologica è di circa 4 m. Dalla ricostruzione ottenuta si è stimato un volume totale di circa 650 milioni di mc.

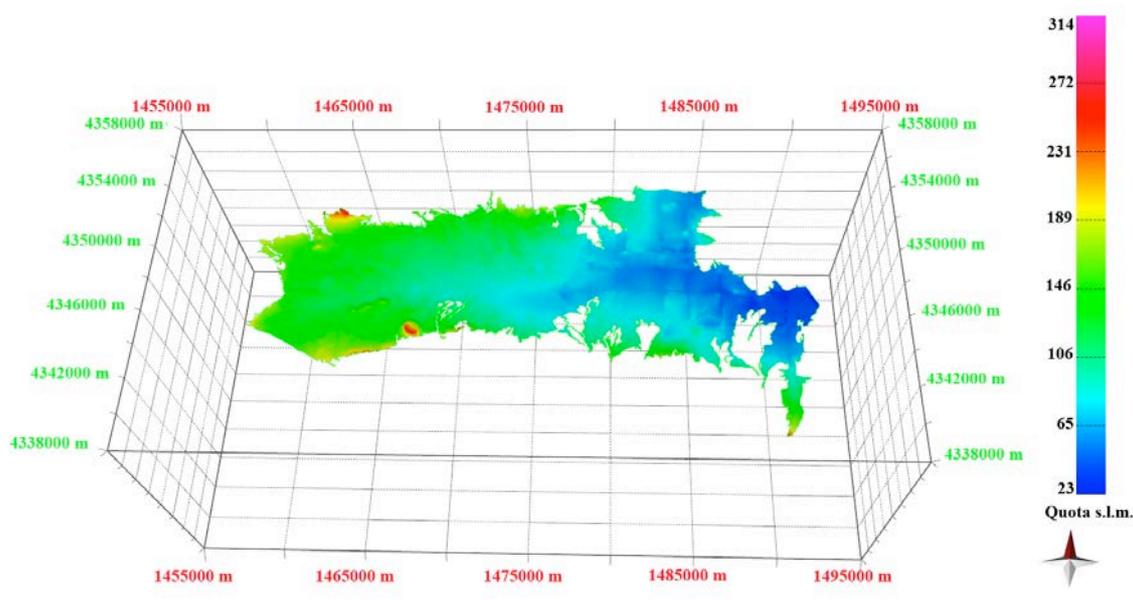


Figura 5 - Superficie di Bottom dell'acquifero alluvionale desunta dal Modello geologico 3D.

Nella figura 6 sono riportati i risultati delle analisi eseguite in laboratorio, i valori della porosità variano tra il 26% e il 34%. I sedimenti risultano compresi tra ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose scarsamente assortite. La porosità efficace ( $n_e$ ) varia tra un minimo di 23.4 e un massimo di 30.6 % con un valore medio pari a 25 %.

Il volume delle acque potenzialmente immagazzinabili nella piana del Cixerri, calcolato integrando il modello geologico 3D e il volume dei pori è di circa 160 milioni di mc.

ID	X	Y	Z	Descrizione	d <sub>10</sub>	d <sub>60</sub>	U	n	n <sub>e</sub>
			m.s.l.m.		mm	mm		%	%
CIXS1	1461704.32	4350925.79	160	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.276	4.295	15.58	27	24.3
CIXS2	1466118.47	4351446.64	140	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.114	0.549	57.23	26	23.4
CIXS3	1484360.59	4351577.88	116	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.122	7.929	65.03	26	23.4
CIXS4	1479971.78	4353658.62	157	Sabbia ghiaiosa scarsamente assortita	0.089	1.534	17.3	27	24.3
CIXS5	1476051.04	4353435.50	190	Sabbia ghiaiosa scarsamente assortita	0.096	2.865	29.97	26	23.4
CIXS6	1474440.85	4351652.72	173	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.659	6.106	9.26	30	27
CIXS6bis	1466634.95	4350227.98	177	Sabbia ghiaiosa scarsamente assortita	0.11	3.108	28.27	26	23.4
CIXS7bis	1464453.58	4346226.01	184	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	1.452	16.972	11.69	28	25.2
CIXS8	1462129.54	4347232.43	191	Ghiaia scarsamente assortita	2.779	16.769	6.03	34	30.6
CIXS9	1465031.61	4344976.16	212	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.224	16.724	74.62	26	23.4
CIXS11	1465026.18	4345014.66	212	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.425	5.797	13.65	28	25.2
CIXS12	1469649.17	4349008.20	154	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.289	14.596	50.51	26	23.4
CIXS13	1473299.69	4346942.29	148	Sabbia ghiaiosa scarsamente assortita	0.096	1.659	17.24	27	24.3
CIXS14	1477053.09	4348696.42	123	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.234	3.167	13.55	28	25.2
CIXS15	1484013.46	4345470.86	131	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.303	16.069	53.07	26	23.4
CIXS16	1485577.94	4347176.89	101	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.639	17.44	27.28	26	23.4
CIXS17	1483386.39	4349273.01	56	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.187	4.122	22.05	26	23.4
CIXS18	1472718.78	4351692.40	151	Ghiaia sabbiosa scarsamente assortita	0.966	11.155	11.55	28	25.2

Figura 6 - Tabella riepilogo valori di porosità ( $n$ ) calcolata da Vukovic e Soro (1992) e porosità efficace ( $n_e$ ).

## Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un approccio multidisciplinare per la creazione di un modello geologico e idrogeologico tridimensionale della Piana del Cixerri. L'uso combinato di dati geologici di superficie e profondi e dati idrogeologici, ha permesso di ricostruire la superficie di letto delle alluvioni quaternarie sede dell'acquifero non confinato. La valutazione del volume efficace ha permesso di stimare la quantità d'acqua potenzialmente immagazzinabile nell'acquifero.

La modellazione tridimensionale idrogeologica, fornendo indicazioni quanti-qualitative della risorsa idrica sotterranea, risulta un efficace strumento di dialogo tra specialisti, gestori e usufruttori, non necessariamente esperti in materia.

La fase successiva, attualmente in fase di elaborazione, prevederà la realizzazione di un modello di trasporto, volto alla valutazione della dispersione dei contaminanti nelle acque sotterranee. Il modello verrà implementato con le superfici create con la modellazione 3D e con i dati idrogeologici rilevati *ex-novo*.

## Bibliografia

- Carmignani L., Funedda A., Oggiano G., Pasci S. (2004), "Tectono –sedimentary evolution of south west Sardinia in the Paleogene:Pyrenaic a Apenninic Dinamic", *Geodinamica Acta*,17:4, 275-287, DOI: 10.3166/ga.17.275-287.
- Casmez (1984), "Studio organico delle risorse idriche sotterranee della Sardegna - II fase - Sulcis-Cixerri", Università degli Studi di Sassari, Cassa per il Mezzogiorno (Prog. Cassa 25/96)-Sassari
- Cherchi A., Montadert L. (1982), "The Oligo-Miocene rift of Sardinia and the early history of the Western Mediterranean basin", *Nature*, London, 298: 736-739.
- Chesnaux R., Lambert M., Walter J., Fillastre U., Hay M., Rouleau A., Daigneault R., Moisan 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. doi:10.1016/j.cageo.2011.04.013

- Cocoza T., Schafer K. (1974), "Cenozoic graben tectonics in Sardinia". In: A. Cherchi (Ed.): «Paleogeografia del terziario sardo nell'ambito del Mediterraneo occidentale» *Rend. Sem. Fac. Sc. Univ. Cagliari*, 43 (suool.): 145-162, Cagliari 23-27 Luglio 1973.
- 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, 56–72
- Da Pelo S., Ghiglieri G., Buttau C., Cuzzocrea C., Carletti A., Biddau R., Fenza P., Arras C., Funedda A., Cidu R. (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, pp. 300-303. DOI: 10.3301/ROL.2015.125
- Da Pelo S., Ghiglieri G., Buttau C., Biddau R., Cuzzocrea C., Funedda A., Carletti A., Vacca S., Cidu R. (2016), "3D hydrogeological modelling supported by geochemical mapping as an innovative approach for management of aquifers applied to the Nurra district (Sardinia, Italy)", *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Accepted manuscript.
- 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 Societa Geologica Italiana*, in press.
- Folk R. L., 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphiliûs, Austin.
- Funedda A., Carmignani L., Pasci S., Patta E.D., Uras V., Conti P, Sale V.(2009), "Note Illustrative della Carta geologica d'Italia 1:50.000 ‘Foglio 556 - Assemini’", *Servizio Geologico d'Italia*, Roma, p 192.
- Ghiglieri G., Carletti A., Da Pelo S., Cocco F., Funedda A., Loi A., Manta, F., 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, pp. 103-114. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.014
- 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*, Vol.10, N°1, 49-62.
- Krumbein W.C. (1934), "Size frequency distributions of sediments", *Journal of sedimentary Research*, 4(2).
- 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)", *Boll. Soc. Geol. It.*, Roma, 95: 705-724.
- 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.
- RAS - Regione Autonoma della Sardegna (2008) - "Carta Geologica di base della Sardegna in scala 1:25.000" <http://www.sardegnageoportale.it/index.php?xsl=1598&s=291549&v=2&c=8831&t=1>
- RAS - Regione Autonoma della Sardegna (2009). "Rete di monitoraggio qualitativa e quantitativa delle acque sotterranee al fine della definizione dello stato ambientale dei corpi idrici significativi ai sensi del D. Lgs 152/06" fase 3 Progetto POR – Asse I misura 1.7. Azione C., Cagliari.
- 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, 690–707. doi:10.1007/s10040-004-0365-x.
- Vukovic M., Soro A. (1992), "Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-size Composition", *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado.
- 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, doi:10.1016/j.enggeo. 2011.12.001