

Banca dati idrogeologica TANGRAM[®]: strumento per elaborazioni quantitative di dati per la valutazione delle acque sotterranee

The hydrogeological well database TANGRAM[®]: a tool for data processing to support groundwater assessment

Tullia Bonomi, Letizia Fumagalli, Marco Rotiroti, Alberto Bellani, Angelo Cavallin

Riassunto: Presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca (DISAT-UNIMIB), è stato ideato, sviluppato e implementato un software per la gestione dei pozzi idrici denominato TANGRAM[®]. Il suo sviluppo è iniziato in DOS nel 1989 e attraverso varie versioni si è giunti fino a quella attuale disponibile on-line all'indirizzo www.TANGRAM.samit.unimib.it. La banca dati TANGRAM[®] permette l'archiviazione, la codifica e l'elaborazione di tutti i dati relativi ai pozzi idrici, come le informazioni amministrative, le caratteristiche costruttive e idrauliche, i logs stratigrafici, i livelli d'acqua misurati e i quantitativi concessi e prelevati. Attualmente, la banca dati contiene più di 39.200 pozzi situati in Lombardia (90%), Piemonte (9%) e Valle d'Aosta (1%).

Il programma nasce dall'esigenza di archiviare e gestire una notevole quantità di dati, che devono essere normalizzati, estratti ed elaborati per esigenze scientifiche e gestionali. TANGRAM[®] è infatti nato come strumento di ricerca ma è stato sviluppato in modo da essere utile anche alla gestione dei pozzi idrici per le pubbliche amministrazioni. Consente infatti sia l'estrazione di tutti i dati amministrativi, costruttivi, piezometrici e idraulici secondo criteri geografici, territoriali, e amministrativi, sia elaborazioni complesse sulle stratigrafie codificate. Alcuni Enti lo usano regolarmente come strumento operativo per la gestione dei loro dati (Provincia di Brescia e ARPA Valle d'Aosta).

Un aspetto scientifico innovativo del database è l'estrazione quantitativa dei dati stratigrafici. Tutti i livelli sono codificati con

Parole chiave: banca dati per pozzi, stratigrafie, acque sotterranee.

Keywords: well database, stratigraphic logs, groundwater.

Tullia BONOMI ✉
Letizia FUMAGALLI
Marco ROTIROTI
Angelo CAVALLIN

Università degli Studi di Milano-Bicocca
Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra
Piazza della Scienza 1, 20126 Milano (MI)
tullia.bonomi@unimib.it

Alberto BELLANI
Geodesign
Via D. Alighieri 63, 22070 Rovello Porro (CO)

Ricevuto: 29 maggio 2014 / Accettato: 30 giugno 2014
Pubblicato online: 31 luglio 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2014

codici alfa-numeric di 8 cifre ed è l'operatore, nell'aggiornare la banca dati, che compone il codice interpretando la descrizione di ogni livello stratigrafico. Le estrazioni avvengono secondo un criterio di pesi in base alla posizione dei termini litologici nel codice e sono il punto di partenza per analisi successive bidimensionali e tridimensionali delle distribuzioni spaziali dei termini tessuturali e dei valori di conducibilità idraulica, associati alle litologie. Tali ricostruzioni sono utili in numerose applicazioni idrogeologiche quali la modellazione per il calcolo delle fasce di rispetto, per la ricostruzione delle dinamiche di flusso e trasporto, e per la realizzazione dei piani di cava.

Nel lavoro si riporta un esempio relativo alla distribuzione del materiale grossolano, medio e fine nei primi 80 m di profondità in un'area di studio situata nella Provincia di Brescia.

Abstract: *At the Department of Earth and Environmental Sciences of the University of Milano-Bicocca (DISAT-UNIMIB), a hydrogeological well database, called TANGRAM[®], has been developed and published on line at www.TANGRAM.samit.unimib.it, developing an earlier 1989 DOS version. This package can be used to store, display, and process all data related to water wells, including administrative information, well characteristics, stratigraphic logs, water levels, pumping rates, and other hydrogeological information. Currently, the database contains more than 39.200 wells located in the Italian region of Lombardy (90%), Piedmont (9%) and Valle d'Aosta (1%).*

TANGRAM[®] has been created both as a tool for researches and for public administration's administrators who have projects in common with DISAT-UNIMIB. Indeed, transferring wells data from paper into TANGRAM[®] offers both an easier and more robust way to correlate hydrogeological data and a more organized management of the administrative information. Some Administrations use TANGRAM[®] regularly as a tool for wells data management (Brescia Province, ARPA Valle Aosta). An innovative aspect of the database is the quantitative extraction of stratigraphic data. In the part of the software intended for research purposes, all well logs are translated into 8-digit alphanumeric codes and the user composes the code interpreting the description at each stratigraphic level. So the stratigraphic well data can be coded, then quantified and processed. This is made possible by attributing a weight to the digits of the code for textures. The program calculates the weighted percentage of the chosen lithology, as related to each individual layer. These extractions are the starting point for subsequent hydrogeological studies: well head protection area, reconstruction of the dynamics of flow, realization of the quarry plans and flux and transport hydrogeological models. The results of a two-dimensional distribution of coarse, medium and fine sized material in the first 80 meters of depth are presented here for a study area located within the Province of Brescia (Italy).

Introduzione

L'evoluzione delle banche dati

Una banca dati è uno strumento per strutturare e sistematizzare un patrimonio informativo e renderlo più facilmente consultabile da parte degli utenti. L'esigenza di strutturare dati idrologici e idrogeologici in forma organizzata attraverso l'uso di banche dati, è sentita da oltre un ventennio (vedere per esempio, Newell et al., 1990; Barazzuoli et al., 1999) anche se con obiettivi che sono cambiati nel tempo. Una banca dati può avere l'obiettivo minimale di permettere l'organizzazione di dati originariamente non collegati tra loro, in modo funzionale ad un preciso studio e/o necessità o può essere utilizzata per gestire e visualizzare in modo appropriato tematismi idrogeologici (Gogu et al., 2001) e/o idrologici (Nigrelli et al., 2013; Alkema et al., 2000) in un ambiente GIS (Geographic Information System). Un'ulteriore evoluzione nel loro utilizzo, è rappresentata dalla creazione di banche dati che non costituiscano solamente un contenitore organizzato per uno scopo specifico, ma siano uno strumento dinamico, aggiornabile, e quindi possano diventare uno strumento di riferimento per l'Ente preposto alla gestione dei dati. In questa linea si inseriscono le proposte di collegamento di banche dati, contenenti dati georeferenziati, con applicazioni web-gis per definire scenari di rischio e supportare i piani di intervento e di gestione della Protezione civile (Frigerio et al., 2013; Blahut et al., 2011).

Ci sono anche interessanti proposte di gestire singole banche dati in un modo standardizzato, al fine di garantire la loro aggiornabilità nel tempo e facilitare la collaborazione tra gruppi di ricerca diversi (De Dreuzy et al., 2006). In questi casi lo scopo è quello di migliorare l'efficienza e la qualità della ricerca, non tanto di dare origine ad un servizio rivolto ad enti pubblici e soggetti privati, che invece è l'intento, per esempio, di un servizio geologico. Molti servizi geologici nazionali stanno infatti centralizzando i dati geologici e quelli delle acque sotterranee in Spatial Data Infrastructures – SDIs, all'interno dei quali le banche dati costituiscono uno degli elementi essenziali. Questi dati sono disponibili su richiesta o via interfaccia Web, come per esempio il Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI, 2008), il portale nazionale delle acque sotterranee in Francia (ADES 2008), o the Ground Water Atlas of the United States del Servizio Geologico statunitense (US Geological Survey, 2000).

La gestione dei dati idrogeologici attraverso l'uso di banche dati permette di avere dati (quantitativi e qualitativi) sul lungo periodo, spesso provenienti da fonti e tipologie molto diverse (e.g., archivi, campagne e reti di monitoraggio). Le serie storiche sono elementi necessari sia da un punto di vista gestionale che da un punto di vista scientifico, per esempio per la taratura dei modelli idrogeologici. Modelli di gestione delle acque sotterranee e superficiali raggiungono infatti elevati gradi di applicabilità e affidabilità, con stretta valenza territoriale, quando sono supportati da banche dati locali o nazionali che consentono adeguate calibrizioni e costanti aggiornamenti (Feinstein et al., 2010).

La banca dati idrogeologica TANGRAM® (www.TAN-

GRAM.samit.unimib.it) qui presentata è un applicativo web per la gestione dei dati amministrativi, tecnici e stratigrafici dei pozzi idrici. La caratteristica principale che la differenzia da altre banche dati idrogeologiche, per quanto riguarda gli aspetti scientifici, è la normalizzazione dei dati stratigrafici secondo tabelle di riferimento standardizzate e l'utilizzo di una codifica per le descrizioni stratigrafiche con conseguente possibilità di fare analisi quantitative mediante un motore di analisi collocato all'interno del database stesso. Inoltre, a differenza di altri applicativi, è nata con il duplice scopo di supportare la ricerca scientifica e di fornire alle amministrazioni pubbliche uno strumento aggiornato e dinamico per organizzare i propri dati e poterli fornire, in modo strutturato, ai numerosi privati che ne fanno loro richiesta. Inoltre, proprio per il suo utilizzo sia da parte di Enti pubblici che utenti privati, TANGRAM® è stato inquadrato da UNIMIB in un contesto giuridico che ne norma il suo uso.

Accessibilità dei dati

È ampiamente condivisa la necessità di avere sequenze storiche di dati per cogliere i processi che stanno alla base di un fenomeno fisico, avere dati aggiornati per fare valutazioni temporalmente riferite e ben distribuiti sul territorio, per riuscire ad estendere le informazioni da un dato puntuale ad una valutazione areale con il minor grado di incertezza possibile.

La necessità di una banca dati per organizzare le informazioni relative a pozzi idrici è sentita da tutti gli Enti che operano sul territorio, pubblici e privati (e.g., Regioni, Province, ARPA, Comuni, Enti Gestori e Studi Professionali), con gradi diversi di complessità e sensibilità. Spesso però è un tema che non riesce a raccogliere convergenze di interessi e finanziamenti adeguati e si assiste quindi ad una parcellizzazione delle informazioni e alla conseguente non condivisione dei dati, anche se la messa a disposizione di dati ai cittadini o ad altre amministrazioni pubbliche è tema ben normato e consolidato (Codice dell'Amministrazione Digitale, D.L. 235/2010). Qualunque dato trattato da una pubblica amministrazione deve essere reso accessibile e fruibile ai cittadini e alle altre amministrazioni in funzione dei compiti istituzionali di quest'ultime. Le modalità di accesso e fruibilità di tali dati sono disciplinate da apposite "convenzioni-quadro" aperte all'adesione di tutte le amministrazioni interessate (Art. 38, D.L. 235/2010; D.L. 14/3/2013, n. 33 e 35).

Oggi le linee guida a livello comunitario in tema di standardizzazione dei dati spaziali sono fornite dalla direttiva 2007/2/EC del 14 marzo 2007: INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe* - Infrastruttura per l'Informazione Territoriale in Europa) direttiva che definisce "i requisiti per la creazione e l'aggiornamento di metadati per i set di dati territoriali, le serie di set di dati territoriali e i servizi di dati territoriali". Di particolare valenza a questo riguardo la pubblicazione di un editor online (<http://inspire-geportal.ec.europa.eu/editor/>) per la compilazione di metadati territoriali secondo le specifiche delineate dalla direttiva. Sul fronte nazionale da segnalare la pubblicazione da parte dell'Agenzia per l'Italia Digitale del Repertorio Nazionale dei Dati Territo-

riali (RNDDT - <http://www.rndt.gov.it/>), portale per la ricerca attraverso i metadati dei “dati territoriali, e relativi servizi, disponibili presso le Pubbliche Amministrazioni”, in fase di sviluppo.

L'accessibilità deve però essere coniugata con la tutela dei diritti sull'ideazione, la realizzazione e l'implementazione di una banca dati, aspetti che sono ben definiti e normati, dalla legge 22 aprile 1941 n. 633, “Protezione del diritto d'autore e di altri diritti connessi al suo esercizio”, integrata e modificata dal D.L. 6 maggio 1999, n. 169, che ha applicato la Direttiva 96/9/CE e ha introdotto disposizioni sulla tutela giuridica delle banche dati. La loro tutela giuridica passa attraverso due tipi di privative: da un lato, si riconosce all'autore delle nuove creazioni l'esclusiva del diritto d'autore, dall'altro si riconosce al costituente un diritto sui generis. Il costituente è quel soggetto, persona fisica, o giuridica, che si fa carico degli investimenti necessari alla creazione della banca dati. La tutela sui generis accordatagli, è concettualmente svincolata da quella del diritto d'autore, ed è intesa come tutela della struttura e dell'architettura di sistema, oltre che del codice e delle funzioni proprie della banca dati.

Banca dati idrogeologica TANGRAM®

Il processo di generazione di una banca dati prevede tre parti fondamentali: l'ideazione, la realizzazione e l'implementazione. La banca dati idrogeologica TANGRAM® è un sistema informativo ideato, realizzato e implementato dall'Università Milano-Bicocca (Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra, DISAT-UNIMIB) in colla-

borazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, IDPA, Milano). Il suo sviluppo è iniziato nel 1989 con una versione in DOS (Bonomi et al., 1995), sviluppato poi in Visual Basic su base MsAccess è infine portato in ambiente Windows. Il sistema è quindi progressivamente evoluto nel sistema in uso oggi: una banca dati gestita da SQL Server, sviluppata in ambiente .NET per la parte web e con server ospitati presso i data center di UNIMIB e resa disponibile on-line all'indirizzo www.TANGRAM.samit.unimib.it (Fig. 1).

La banca dati, inizialmente, non era nata a fini amministrativi ma per scopi scientifici ed è sempre stata focalizzata alla qualificazione e valorizzazione degli aspetti idrogeologici relativi ai pozzi, in virtù della difficoltà indicata in premessa di avere informazioni organizzate e standardizzate. Il sistema informativo si è poi evoluto dinamicamente con le necessità della ricerca, soprattutto in campo modellistico, ove si richiedono dati piezometrici e idrogeologici che siano rappresentativi della variabilità territoriale e con serie temporali significative, e con quelle degli Enti con cui si collabora, diventando così uno strumento utile anche per le amministrazioni pubbliche.

L'implementazione è frutto di numerosi progetti di ricerca con gli Enti Territoriali che hanno cercato di sopperire alle difficoltà di cui sopra, appoggiandosi a realtà esterne che potessero organizzare, standardizzare e normalizzare i dati dei pozzi con criteri scientifici.

Il sistema informativo non è commercializzato in alcuna forma e la proprietà dei dati rimane degli Enti che li hanno forniti, e solo UNIMIB (autore e costituente) può consentirne

Pozzi	Riepilogo
Dati amministrativi	Dati amministrativi
Caratteristiche tecniche	Dati tecnici
Stratigrafie	Quadro riassuntivo
Piezometrie	Cartografia
Prove idrauliche	Provincia
Scheda pozzo	Singolo comune
Prelievi	Area utente
Consumi	Dati autorizzati
Concessioni	Accesso ai dati
Istat	Privati
Regioni e Province	Informazioni
Comuni per Provincia	Registrazione nuovo utente
Ricerca Comuni	Accesso ai dati
Province in Tangram ed enti titolari dei dati	
Alessandria: Provincia	Lodi: Arpa LO
Aosta: Arpa Valle d'Aosta	Mantova: Provincia
Asti: Provincia	Milano: Provincia e Cap
Bergamo: Provincia e Arpa BG	Novara: Provincia
Biella: Provincia	Pavia: Provincia e Arpa PV
Brescia: Provincia	Sondrio: Provincia
Como: Provincia	Torino: Provincia
Cremona: Provincia e Arpa CR	Varese: Provincia
Cuneo: Provincia	Vercelli: Provincia
Lecco: Provincia e Arpa LC	
39291 pozzi in banca dati	

Fig. 1 - Homepage della banca dati idrogeologica TANGRAM® (www.TANGRAM.samit.unimib.it).

Fig. 1 - TANGRAM® wells database homepage (www.TANGRAM.samit.unimib.it).

l'accesso, previa autorizzazione degli Enti stessi.

L'accesso alla banca dati è strutturato in modo che gli utenti non abilitati che accedono alla pagina web, possano visualizzare le informazioni necessarie per contattare gli autori, quali sono gli enti pubblici che hanno fornito i dati presenti nella banca dati e l'ubicazione di tutti i pozzi georeferenziati. Gli utenti abilitati possono invece visualizzare i dati in due modalità: se altri enti pubblici con i quali sono attivi progetti di collaborazione, hanno l'accesso ai dati del comune e/o della provincia di pertinenza e possono estrarli liberamente secondo le proprie esigenze, utilizzando i criteri previsti nella banca dati (amministrativi, territoriali, temporali); se enti pubblici senza collaborazioni in corso o utenti privati devono contattare gli autori o direttamente gli Enti proprietari, indicando quali sono i comuni di interesse e i motivi della richiesta, e una volta autorizzati, possono scaricare i file relativi ai dati amministrativi, idraulici, stratigrafici, piezometrici in formato Excel. Per la sola provincia di Brescia, per la quale sono caricati oltre 10.000 pozzi, è attiva una procedura on line che, compilato il modulo di richiesta, avvia automaticamente la richiesta di autorizzazione. Tale modulo è attivabile per qualunque altra provincia con la quale vi sia una collaborazione scientifica attiva.

Qualunque utente registrato può accedere alle statistiche presenti nella home page e conoscere la suddivisione dei pozzi inseriti per ciascuna provincia, ripartiti tra pubblici e privati, georeferenziati e con stratigrafia. A maggio 2014 sono stati inseriti 39.291 pozzi ubicati nelle regioni Lombardia (90%), Piemonte (9%) e Valle d'Aosta (1%), con la distribuzione provinciale riportata in Tabella 1. La significativa differenza è legata alla tipologia di raccolta dati: per il Piemonte sono stati raccolti in tre anni solo i dati dei pozzi georeferenziati e con stratigrafia, mentre per la Lombardia, la raccolta ha interessato tutti i dati presenti negli archivi cartacei, in 20 anni, così come per la Valle d'Aosta.

Per alcune province l'aggiornamento è continuo, perché sono in atto collaborazioni scientifiche (Aosta e Brescia), per altre invece non vi è ancora stata possibilità di aggiornare i dati e quindi non vi sono i dati relativi agli ultimi anni di nuove concessioni. L'anno di aggiornamento per provincia è riportato nella quarta colonna di Tabella 1.

Struttura della banca dati

Lo sviluppo della banca dati ha seguito i classici modelli che sono adottati per lo sviluppo di sistemi RDBMS complessi (Relational Database Management System; Codd, 1969, 1970): la definizione di entità vincolate da relazioni e relazioni estese (Entity Relationship; Chen, 1976; Enhanced Entity Relationship; Teorey et al., 1986), la normalizzazione dei dati (Data Normalization; Codd, 1971, 1972a, 1972b) e il disegno di interrogazioni su esempio come guida alla selezione dei dati (Query By Example; Zloof, 1975). Se il modello relazionale definisce le entità che costituiscono la banca dati e le relazioni tra di esse, la normalizzazione dei dati riduce la complessità degli stessi permettendo di individuare una forma semplice, o normale, di relazione tra di essi. In una struttura normalizzata, in

Tab. 1 - Numero di pozzi e anno di aggiornamento dei dati, suddivisi per regione e provincia, contenuti nella banca dati TANGRAM®.

Tab. 1 - Location of wells (Region and Province), number of wells in each location, and year in which the data were updated, in the database TANGRAM®.

Regione	Provincia	n° pozzi	Anno aggiornamento
Lombardia	BERGAMO	5080	2005
Lombardia	BRESCIA	9874	2014
Lombardia	COMO	1134	2005
Lombardia	CREMONA	2169	2013
Lombardia	LECCO	381	2005
Lombardia	LODI	4368	2005
Lombardia	MANTOVA	973	2010
Lombardia	MILANO	7673	2005
Lombardia	PAVIA	703	2005
Lombardia	SONDRIO	504	2013
Lombardia	VARESE	2450	2005
Piemonte	ALESSANDRIA	759	2005
Piemonte	ASTI	69	2005
Piemonte	BIELLA	285	2005
Piemonte	CUNEO	389	2005
Piemonte	NOVARA	518	2005
Piemonte	TORINO	937	2005
Piemonte	VERCELLI	523	2005
Valle d'Aosta	AOSTA	502	2014

luogo di tabelle che ospitano i dati nel loro formato originale (i.e., complesso) si tende a scomporre l'informazione in classi elementari/autonome che verranno successivamente utilizzate per l'inserimento di nuovi dati e l'aggiornamento di quelli esistenti. Questa impostazione, oltre a permettere un flusso dei dati più lineare e fornire una struttura più snella del sistema, che migliora le prestazioni complessive del DBMS, viene a costituire anche una guida per l'operatore chiamato all'aggiornamento dei dati e dunque offre un contributo importante all'integrità e alla consistenza complessiva della banca dati stessa.

La parte di RDBMS è composta da un sistema strettamente relazionale nel quale la tabella principale contiene i dati amministrativi, avente il codice pozzo come chiave primaria (Fig. 2) e che costituisce il modulo primario. Per l'assegnazione dei codici pozzo viene seguito lo standard definito dalla Provincia di Milano per il Sistema Informativo Falda (Rosti, 1992): un codice alfanumerico di 10 caratteri costituito per i primi 6 dal codice Istat del Comune (3 caratteri per il codice regionale e 3 caratteri per quello comunale), più un numero progressivo, identificativo del pozzo, che può variare tra 0001 e 9999.

Il modulo principale contiene la descrizione delle caratteristiche del pozzo che si riferiscono alla proprietà, all'utenza, alla localizzazione e posizione (indirizzo, quote e coordinate), tipologia e profondità, allo stato (attivo, abbandonato, cementato con date di riferimento). Ad essa sono correlate le 5 tabel-

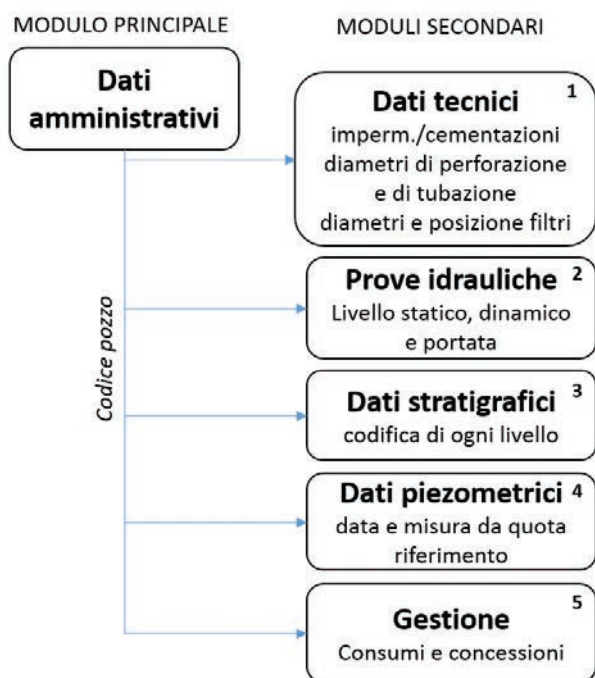


Fig. 2 - Modello concettuale schematico del TANGRAM®.

Fig. 2 - Simplified conceptual model of TANGRAM®.

le secondarie (moduli secondari in Fig. 2), con una relazione uno a molti gestita da vincoli di integrità referenziale. Le tabelle secondarie contengono il dettaglio:

1. delle caratteristiche tecniche e costruttive del pozzo (diametri di discesa, diametri di rivestimento, profondità dei livelli cementati, dei livelli filtrati e dei livelli impermeabilizzati),
2. delle prove idrauliche,
3. della sua caratterizzazione geologica (stratigrafie),
4. della sua caratterizzazione idrogeologica (piezometrie)
5. della sua gestione (consumi e dati concessioni).

La componente geografica è gestita, nella tabella sistemi di coordinate, nei tre sistemi di riferimento principali in uso in Italia: Gauss Boaga (EPSG: 3003), UTM fuso 32 ed. 50 (EPSG: 23032) e UTM fuso 32 WGS84 (EPSG: 32632) e i dati possono essere inseriti ed esportati in uno qualsiasi dei sistemi di riferimento elencati. La cartografia è su base Google Maps all'interno della quale sono disponibili le tre opzioni che il sistema offre all'utente: mappa stradale, rilievo e ripresa aerea.

La selezione dei dati può essere effettuata su base geografica (selezione per area rettangolare) o tramite una query sulle diverse tabelle d'archivio. A tale proposito il programma offre alcune preselezioni per le richieste più frequenti di estrazione dei dati, viene in ogni caso lasciata all'utente la possibilità di modificare liberamente la composizione del dataset da estrarre.

I dati estratti sono forniti in formato solo testo (.txt) o MS Excel (.xls) per l'acquisizione da parte degli applicativi più diffusi e le elaborazioni successive da parte dell'utente.

Tratto distintivo della banca dati TANGRAM®, dalle sue origini, è l'attenzione posta alla standardizzazione e normalizzazione dei dati, in particolare per quanto riguarda la caratte-

rizzazione geologica del pozzo. Lessici di riferimento guidano l'operatore nelle fasi di inserimento dati, i controlli sono attivi su tutte le voci principali di descrizione del sondaggio, più significativamente, i singoli livelli stratigrafici sono interpretati dall'operatore sulla base di dizionari standard, con lemmi di definizione per i componenti tessiturali principali, gli aggettivi litologici, lo stato e i colori.

È offerta all'utente la possibilità della visualizzazione della stratigrafia originale del pozzo in formato pdf.

La quota del pozzo, presente nella tabella principale, può essere inserita secondo 3 diverse tipologie: da documento cartaceo, da DTM (quotando i pozzi esternamente alla banca dati e specificando in essa il DTM utilizzato), da GPS; è inoltre prevista la possibilità di inserire la quota di riferimento, ove esiste, rispetto alla quale il programma calcola il carico idraulico dati i valori di profondità della falda.

Mantenimento della banca dati nel tempo

Condizione necessaria perché la banca dati possa essere uno strumento utile per la ricerca ma anche per le amministrazioni, è che la struttura concettuale e l'organizzazione informatica siano in continua evoluzione e subiscano un costante aggiornamento.

Nell'arco dei 25 anni in cui la banca dati è stata sempre aggiornata e implementata, i problemi legati alla realizzazione di TANGRAM® sono stati sia tecnici che legati all'aggiornamento dei dati.

Perché la banca dati potesse continuare ad essere uno strumento utile è stato necessario che fosse in grado di dialogare, nel tempo, con i diversi sistemi web e strumenti GIS in continua evoluzione, che avesse una denominazione dei campi, una loro tipologia (alfanumerica, numerica, testo, etc.) e una struttura relazionale che supportasse la veloce evoluzione dei sistemi di gestione delle informazioni. Si sono quindi sempre utilizzate le migliori tecnologie disponibili, in modo da avere uno strumento in grado di risultare sempre competitivo senza integrarlo in altri sistemi che lo avrebbero potuto snaturare.

Da un punto di vista dei dati da inserire nella banca dati, le principali difficoltà sono state: a) l'introduzione del sistema di riferimento internazionale WGS84 (EPSG: 32632), b) la quotatura dei pozzi e c) la presenza di pozzi multitubatura. L'introduzione del nuovo sistema di riferimento, al quale la banca dati è stata rapidamente adattata, ha comportato l'inserimento di moduli di conversione dai principali sistemi di riferimento usati in Italia, Gauss Boaga (EPSG: 3003) e UTM fuso 32 ed. 50 (EPSG: 23032), a UTM fuso 32 WGS84. L'introduzione dei sistemi GPS per l'identificazione delle coordinate spaziali ha determinato l'inserimento di campi appositi per dati quotati con queste modalità, come il punto di riferimento per le misure piezometriche o il piano campagna. Per la presenza di pozzi multitubatura sono state introdotte nuove tabelle, in relazione uno a molti con il modulo 3 delle stratigrafie, in modo da consentire l'inserimento di un'unica colonna stratigrafica a cui sono associate differenti caratteristiche costruttive, idrauliche e piezometriche, in funzione della tubazione di riferimento.

Il mantenimento di TANGRAM[®] nel tempo è attualmente garantita in vari modi: 1) gli Enti proprietari dei dati possono continuare ad utilizzare il programma anche allo scadere di una collaborazione scientifica per un tempo illimitato, 2) UNIMIB garantisce il supporto della banca dati su propri server, 3) l'aggiornamento nel tempo è garantito per gli Enti con i quali vi siano convenzioni attive, 4) esiste la possibilità di usare il programma per scopi di ricerca, per le strutture che collaborano con il gruppo di idrogeologia di UNIMIB.

Utilizzi principali della banca dati

I possibili utilizzi di TANGRAM[®], in quanto archivio codificato, standardizzato e normalizzato, per la gestione dei pozzi idrici sono numerose:

- **gestione amministrativa:** per ogni comune è possibile conoscere immediatamente quanti e quali pozzi sono presenti, la suddivisione tra quelli pubblici e quelli privati, attivi, non attivi e tutte le informazioni ad essi collegate;
- **informativa singolo pozzo:** nella pagina principale della banca dati è possibile generare un report completo per ciascun pozzo con dati amministrativi, stratigrafici, idraulici, tecnici, di prelievo;
- **georeferenziazione dei pozzi:** i pozzi, anche se identificati all'origine con sistemi di coordinate diverse, dialogano nella banca dati;
- **dati stratigrafici:** è possibile estrarre ogni singola stratigrafia o riunite per comune, in forma di testo e in formato grafico e sono tra loro standardizzate;
- **trend piezometrici:** è possibile realizzare direttamente dalla banca dati grafici dei dati piezometrici inseriti, modificando direttamente con il mouse la scala temporale di rappresentazione (da giornaliera a annuale).

Oltre a queste funzionalità, l'utilizzo della banca dati a fini di ricerca, è principalmente rivolto alle elaborazioni per la ricostruzione:

- areale della distribuzione delle percentuali tessiturali derivanti dalla stratigrafie, su un intervallo di profondità scelto dall'utente;
- tridimensionale delle percentuali tessiturali derivanti dalle stratigrafie, all'interno di superficie definite dall'utente;
- della superficie piezometrica dai dati estratti dalla banca dati.

Modulo stratigrafico

Nel modulo secondario stratigrafico vengono inserite le informazioni stratigrafiche relative ai pozzi al fine di standardizzarle, normalizzarle e codificarle. La funzione di questo modulo è duplice: alle amministrazioni consente di avere tutti i dati standardizzati e normalizzati e di poter quindi confrontare tra loro tutti i dati dei loro archivi, mentre per scopi di ricerca è la codifica che riveste il ruolo principale perché consente l'estrazione quantitativa dei profili stratigrafici e, di conseguenza, la loro elaborazione quantitativa.

I singoli livelli stratigrafici con le relative profondità (centimetriche) e definizioni stratigrafiche, sono convertiti attraverso

so un opportuno sistema di codifica che traduce le descrizioni litologiche in codici alfanumerici. La colonna stratigrafica codificata può essere visualizzata graficamente unitamente alle quote sul livello del mare, le profondità in metri dei diversi intervalli e loro descrizione tessiturale.

Più dettagliatamente, il codice alfa-numerico si compone di 8 caratteri, di cui i primi 4 si riferiscono al litotipo predominante e gli altri 4 al litotipo presente in percentuale minore. In entrambi i casi l'identificazione del litotipo è prevista mediante l'uso di un sostantivo (trovanti, ciottoli, conglomerato, ghiaia, sabbia, arenaria, limo, argilla), un aggettivo (ciottoloso, ghiaioso, sabbioso, limoso, argilloso), l'indicazione di uno stato (compatto, alterato, etc.) ed un colore (giallo, rossastro, grigio, etc.) (Bonomi, 2009). L'ordine di inserimento dei singoli codici assegna al codice un peso che viene quantificato in fase di estrazione dei dati. Le posizioni che corrispondono ad una quantificazione sono la prima (sostantivo principale), la seconda (primo aggettivo), la quinta (secondo sostantivo) e la sesta (secondo aggettivo). Gli altri codici sono solo descrittivi (colore e stato). Ne consegue per ogni singolo livello stratigrafico una specifica codifica; ad esempio il livello ghiaia sabbiosa grigia con limo compatto, viene codificato dal codice: G80GL0C0.

I pesi corrispondenti alle possibili combinazioni sono definiti da una tabella precostituita, strutturata sulla base delle indicazioni della Società Geotecnica Italiana che attribuiscono, per esempio peso 100 quando vi è un solo sostantivo (ghiaia), 70 e 30 quando vi è un sostantivo ed un aggettivo (es. ghiaia sabbiosa), 40, 25 e 25 quando vi sono due sostantivi e un aggettivo (es. ghiaia sabbiosa con limo). Le combinazioni possibili sono 8.

L'inserimento di tali informazioni risulta pratico e veloce perché all'interno dello stesso sistema TANGRAM[®] è già presente un archivio secondario, che comprende i termini ed i codici ad essi associati da utilizzare per effettuare la conversione, ma è comunque necessario che l'inserimento e l'aggiornamento venga effettuato da personale competente che sappia interpretare le stratigrafie in modo adeguato.

Il dato stratigrafico codificato nella banca dati viene estratto in termini percentuali delle selezioni granulometriche scelte dall'utente. Una selezione molto utile ai fini idrogeologici è la suddivisione tra materiale grossolano, medio e fine. Con questa selezione vengono estratti dalla banca dati, in un unico raggruppamento, i materiali grossolani quali trovanti, ciottoli, conglomerato e ghiaia e gli aggettivi relativi quali ciottoloso e ghiaioso; in un secondo raggruppamento rientrano i materiali a granulometria media, quali sabbia e arenaria, e l'aggettivo relativo sabbioso; nel terzo raggruppamento il materiale fine come limo, argilla, torba, e relativi aggettivi limoso, argilloso e torboso (Bonomi et al. 2001, 2007). La percentuale, per ogni raggruppamento e riferita ad ogni singolo livello di ogni pozzo, è calcolata come media pesata dei codici stratigrafici utilizzati, rispetto all'intervallo di profondità scelto dall'utente. In Figura 3 è riportato un esempio di estrazione del dato stratigrafico codificato, ad intervalli di 1 metro, riferito a termini grossolani, medi e fini.

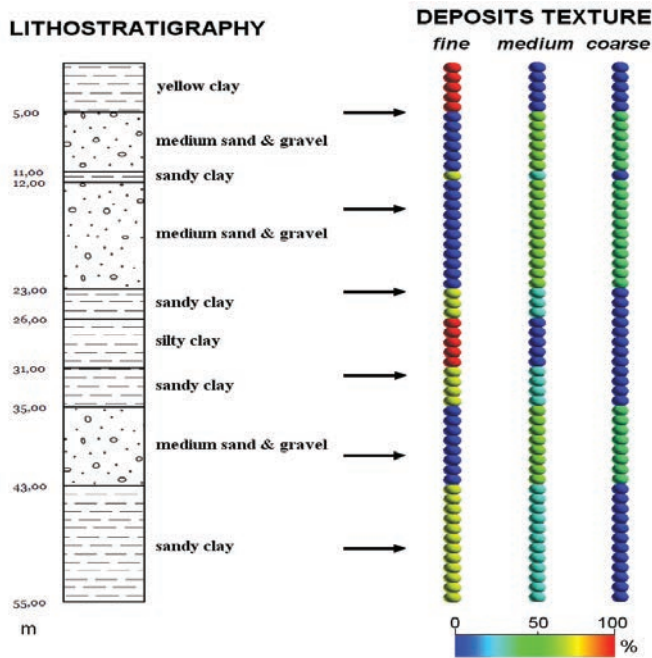


Fig. 3 - Esempio dell'estrazione in percentuale dei termini tessiturali fini (argille, limi e torbe), medi (sabbie) e grossolani (ghiaie e ciottoli) ogni metro.

Fig. 3 - Example of extraction percentage of fine-grained deposits (clays, silts, peats), medium-grained deposits (sands) and coarse-grained deposits (gravels, pebbles) with a range of 1 m.

Esempio: Provincia di Brescia

Nell'ambito di collaborazioni scientifiche con la Provincia di Brescia, settore Ambiente Ufficio Usi delle Acque, è stata sviluppata una capillare raccolta ed archiviazione dati relative alle concessioni dal 1959 al 2011. L'organizzazione, la normalizzazione e la codifica dei dati hanno portato alla archiviazione nella banca dati TANGRAM®, di 9874 pozzi. Sono stati archiviati tutti i dati cartacei disponibili dall'inizio delle concessioni nel 1959, lavori quali quello di Chiarini (2006), che aveva organizzato alcune centinaia di pozzi in un foglio Excel, nonché una specifica tesi di laurea sull'argomento (De Santis, 2009). Tra tutti i pozzi storici inseriti, quelli ancora attivi sono 9400. I pozzi abbandonati possono però essere utili punti di misura e/o controllo quantitativo e qualitativo della falda, nel caso di problematiche ambientali. Dall'analisi dei dati inseriti si è stimato che, nel decennio dal 2001 al 2010, ogni anno siano stati concessi da 100 a 140 nuovi pozzi.

Tra i 9874 pozzi archiviati 805 sono pubblici e 9069 privati, 9010 sono georeferenziati mentre 3309 posseggono il dato stratigrafico.

In Figura 4 è rappresentata la distribuzione dei 207 comuni dell'intera provincia di Brescia, in funzione del numero di pozzi che vi ricadono. È interessante notare come i 38 comuni che non hanno punti di prelievo da pozzi sono localizzati principalmente nelle aree montane dove l'approvvigionamento è legato alle sorgenti, mentre 9 comuni hanno più di 200

pozzi. Ad eccezione del comune di Brescia, altri 7 comuni sono ubicati in un'area posta a sud-est della pianura bresciana ed 1 a sud-ovest (Orzinuovi) dove sono presenti acquiferi confinati sovrapposti, con falde ad elevata pressione, e quindi con una notevole facilità di estrazione. La principale fonte di approvvigionamento idrico dei comuni è quindi rappresentata dai pozzi che, negli anfiteatri morenici benacense e sebino, sono integrati da captazioni di acqua lacustre e da alcune sorgenti di esigua portata.

Per quanto riguarda la quota, solo raramente presente sul cartaceo, si è proceduto ad una quotatura in automatico mediante proiezione su DTM (Digital Terrain Model), utilizzando il DTM della Regione Lombardia con risoluzione 20 m in aree montane e 250 m in aree di pianura. In queste aree sono stati utilizzati i dati desunti dalla tesi di dottorato Marchetti, 1992, che aveva eseguito un rilievo geomorfologico di dettaglio, con ricostruzione delle isoipse ad intervallo metrico.

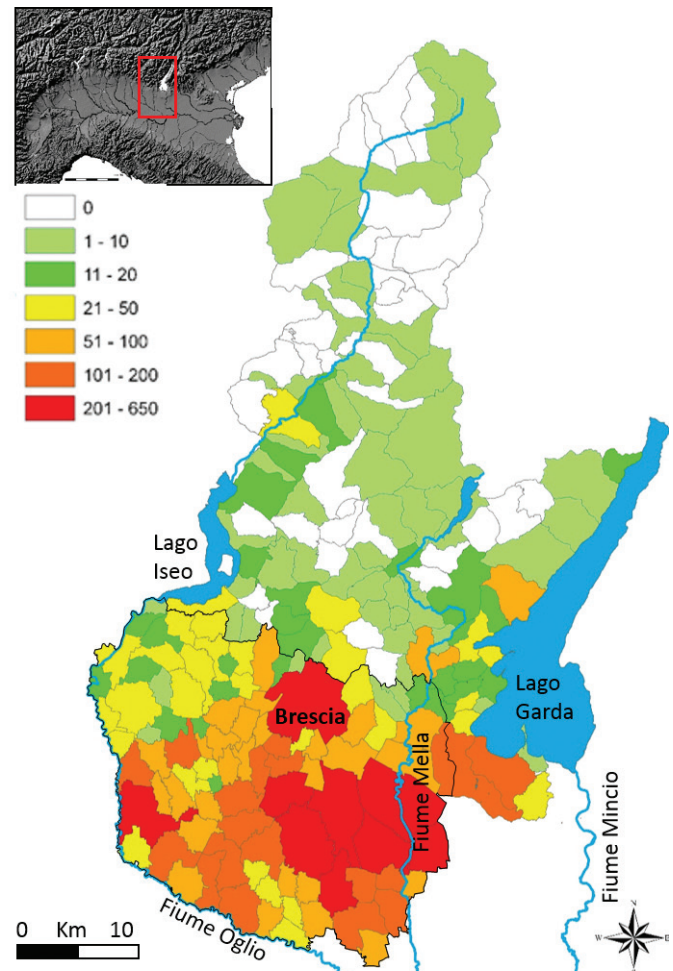


Fig. 4 - Distribuzione del numero di pozzi per comune in provincia di Brescia presenti nella banca dati. La linea nera indica la zona di pianura.

Fig. 4 - Distribution of wells in the Brescia Province. The black line represents the boundary of the plain area.

Ricostruzioni bidimensionali delle distribuzioni tessiturali

Si riporta una elaborazione relativa alla sola area di pianura della provincia di Brescia, situata in Pianura Padana e in sponda sinistra del fiume Po, delimitata a Sud e ad Ovest dal Fiume Oglio, ad Est dal Fiume Chiese e dal sistema morenico benacense, e a Nord dai primi rilievi prealpini e dall'anfiteatro morenico del Lago di Iseo (Fig. 4), all'interno della quale ricadono 103 comuni.

Nella pianura bresciana, da un punto di vista idrogeologico, si riconoscono variazioni tessiturali sia arealmente sia in profondità. Da Nord verso Sud, passando dall'alta alla media e alla bassa pianura, si riscontra una graduale diminuzione della granulometria, da depositi prevalentemente ghiaioso-sabbiosi, conglomeratici nelle zone apicali dei conoidi, a depositi più fini (Denti et al., 1988; Scesi, 1985). I depositi della media pianura sono prevalentemente sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi, con intercalazioni sabbiose-limose-argillose. I depositi della bassa pianura sono sabbioso-limosi, con intercalazioni sabbiose o ghiaiose e orizzonti limoso-argillosi. Nell'alta pianura i depositi ghiaioso-sabbiosi contengono una falda libera con uno spessore che, lungo il margine pedalepino, supera i 100 m, mentre nella fascia di passaggio dall'alta alla media pianura si riduce a qualche decina di metri; dove la granulometria dei depositi diminuisce, i livelli limoso-argillosi assumono spessori ed estensioni più continui dando origine a falde semiconfinare che diventano, a scala comunale, completamente confinate nei depositi sabbioso-limosi meridionali della bassa pianura. In quest'ultimo ambito gli acquiferi sono essenzialmente tipo multifalda, con orizzonti acquiferi separati da livelli a bassa o nulla permeabilità.

L'analisi numerica dei dati stratigrafici contenuti nella banca dati TANGRAM@ permette di quantificare tali passaggi litologici e di verificare spazialmente e in profondità la distribuzione dei depositi nel sottosuolo, dovuti ai principali agenti modellanti, di cui i più importanti in quest'area sono di tipo fluviale e fluvio-glaciale. Inoltre consente una mappatura quantitativa delle numerose eterogeneità litologiche sia verticali che orizzontali, così determinanti nella storia dell'idrogeologia e per la realizzazione dei modelli idrogeologici di flusso ed in particolare di trasporto (De Marsily et al., 2005).

Dalla banca dati sono state estratte le percentuali tessiturali dei termini grossolani, medi e fini nei primi 80 metri di sottosuolo. Analizzando le correlazioni spaziali tra le percentuali estratte e la latitudine, si osserva un'evidente correlazione positiva per quanto riguarda i termini grossolani ($R=0.804$), una antagonista negativa per i termini fini ($R=-0.701$) ed una negativa meno evidente per i termini medi ($R=-0.586$) (Bonomi et al., 2004) (Fig. 5). Invece per una ricostruzione quantitativa in profondità, sono state estratte le percentuali dei medesimi termini grossolani, medi e fini alla profondità di 20 m, 40 m, 60 m e 80 m dal piano campagna. Dal dato puntuale sono state ricostruite, mediante tecniche geostatistiche di kriging, carte tematiche bidimensionali della distribuzione spaziale di tali termini (Fig. 6); per l'interpolazione è stata usata una griglia di 500 m di lato, un variogramma

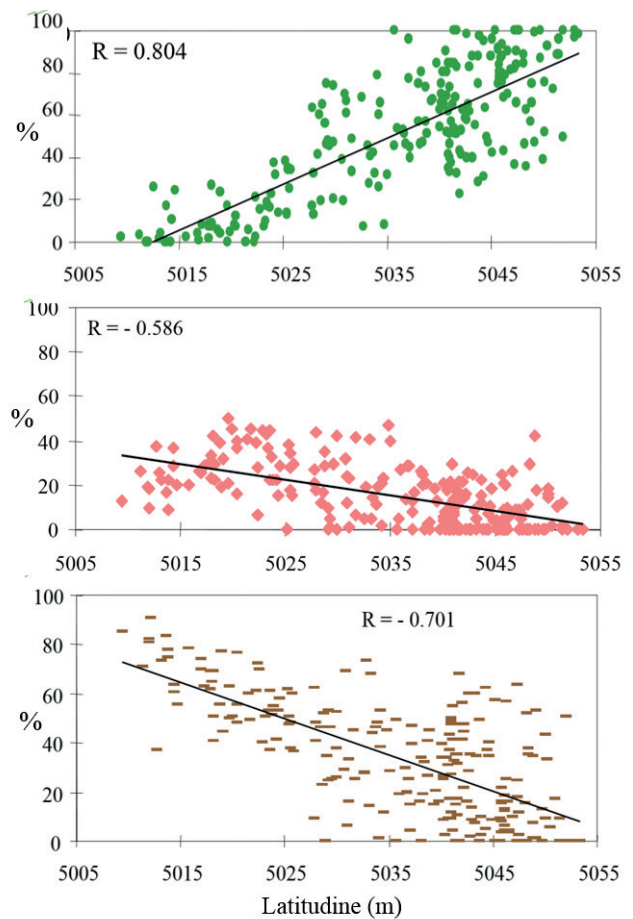


Fig. 5 - Correlazione tra le percentuali dei termini grossolani (alto), medi (centro) e fini (basso) rispetto alla coordinata piana Nord (km).

Fig. 5 - Correlation between the percentage of coarse (up), medium (centre) and fine (down) material respect to the coordinate plain Nord (km).

lineare con un effetto *nugget* variabile dai termini grossolani, medi e fini, rispettivamente, da 60, 70 e 90. Il numero di punti disponibili, andando in profondità, diminuisce da 2139 pozzi con stratigrafia, per la carta da 0 a 20 m, a 1525 pozzi per quella da 60 a 80 m, secondo la distribuzione riportata in tabella 2. In tutte le elaborazioni, è stata tolta la parte superficiale della stratigrafia qualora vi fossero percentuali superiori al 10% di materiale di riporto, terreno vegetale o avampozzo. Ne risulta che il maggior numero di pozzi disponibili è tra 20 e 40 m (2613) e non nella porzione più superficiale.

Tab. 2 - Numero di pozzi con stratigrafia utilizzati per elaborare le carte delle distribuzioni tessiturali.

Tab. 2 - Number of wells with stratigraphic logs used to develop maps of percentage distributions.

Profondità (m)	n° pozzi con stratigrafia
0-20	2139
20-40	2613
40-60	2122
60-80	1525

Dall'analisi delle carte tematiche riportate in Figura 6, possiamo definire tre fasce in cui suddividere il territorio della Pianura Bresciana.

Nella fascia a Nord (alta pianura) i termini grossolani, corrispondenti ai depositi ghiaiosi, ghiaiosi-sabbiosi e conglomeratici, presentano valori quasi sempre superiori al 40%, raggiungendo anche il 100% in corrispondenza degli scaricatori del Lago d'Iseo, ad Ovest, e del Lago di Garda, ad Est, diminuendo poi andando verso sud. In profondità, appare ancora evidente la distinzione tra la porzione ad ovest e quella ad est della pianura, con una zona centrale in cui i termini grossolani sono inferiori al 40%. Appare anche evidente il comportamento del Fiume Oglio che, nel tratto più a nord, ha depositato materiale grossolano in accordo con la maggiore capacità di trasporto, mentre nel tratto più a valle ha depositato materiale di tipo sabbioso prima e argilloso poi. I termini sabbiosi sono praticamente inesistenti e quelli argillosi sono

presenti solo nella zona più settentrionale della pianura, fino a 60 m di profondità, per poi aumentare nella zona centrale, tra i depositi degli scaricatori ad Ovest e a Est.

La fascia centrale (media pianura), è caratterizzata da una progressiva diminuzione dei termini grossolani e dalla comparsa dei termini medi, con una presenza accentuata significativamente solo in una porzione centrale della pianura in cui la percentuale raggiunge valori compresi tra i 70 e 80%, e dai termini fini, che raggiungono valori percentuali anche molto elevati nella zona centrale della pianura.

La fascia a Sud (bassa pianura) è caratterizzata da una assenza totale di materiale grossolano, e da una maggiore presenza di tessiture fini che tendono ad aumentare anche andando in profondità, con valori che arrivano anche al 100%, dando origine alle falde semiconfiniate di cui sopra.

In questa porzione della pianura padana, è evidente come le tessiture antagoniste siano i termini grossolani e fini.

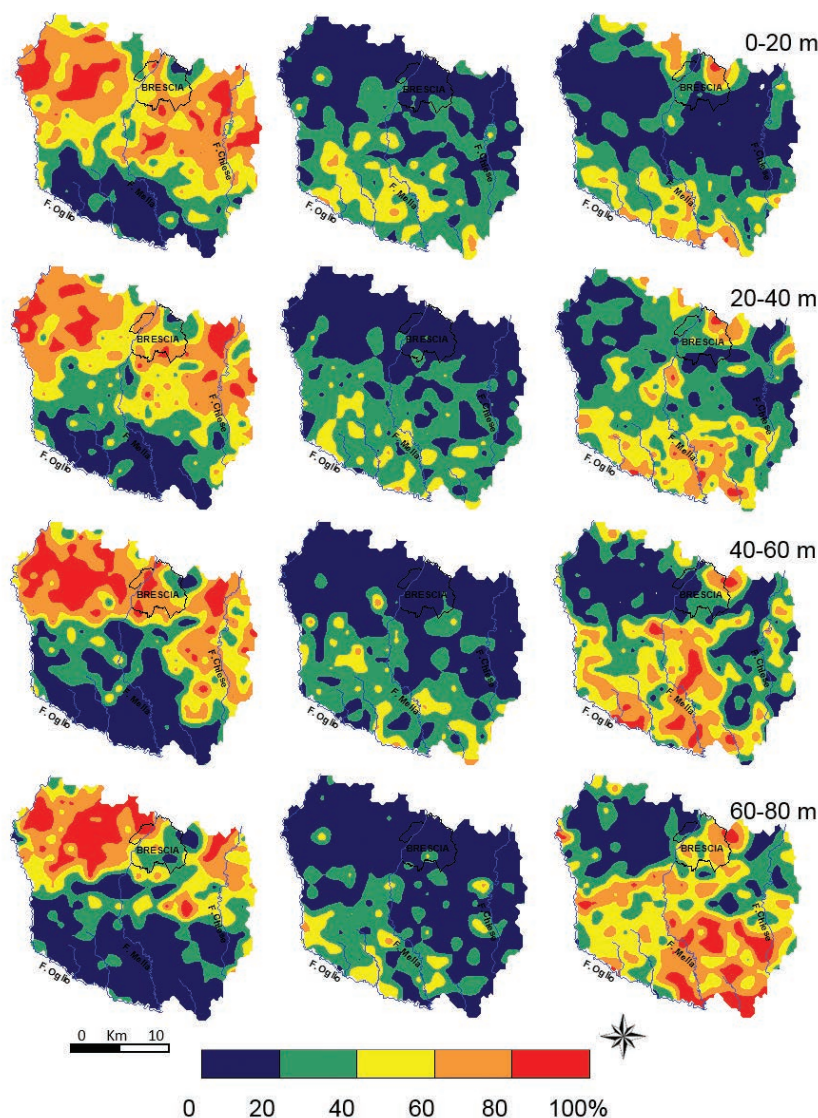


Fig. 6 - Distribuzione percentuale dei termini grossolani (sinistra), medi (centro) e fini (destra), nell'area di pianura della provincia di Brescia (indicata dalla linea nera in figura 4). Dall'alto in basso: tra 0 e 20 m, tra 20 e 40 m, tra 40 e 60 m, tra 60 e 80 m di profondità.

Fig. 6 - Percentage distribution of coarse (left), medium (middle) and fine (right) material in the plan of the Brescia Province (indicated with black line in figure 4). From top to bottom: between 0 and 20 m, between 20 and 40 m, between 40 and 60 m, between 60 and 80 m depth.

Conclusioni

La creazione di un unico database per pozzi idrici, permette l'avvio di un processo di organizzazione dell'informazione, sulla base della quale sarà successivamente possibile completarlo dei dati mancanti o aggiornarlo con l'inserimento di tutti i dati relativi ai pozzi delle nuove concessioni. Tale organizzazione presenta numerosi vantaggi nella gestione dei dati:

- sono omogeneizzati e standardizzati, quindi tra loro confrontabili;
- sono consultabili più facilmente e velocemente;
- possono essere facilmente utilizzati per elaborazioni quantitative e qualitative;
- sono inseriti in rete e quindi, su autorizzazione e modalità definite dagli Enti proprietari, possono essere messi a disposizione di un vasto numero di possibili utilizzatori;
- possono essere elaborati numerosi dati stratigrafici contemporaneamente, in modo quantitativo;
- sono aggiornabili mantenendo sempre i riferimenti con i sistemi adottati da altri Enti (CUI Catasto Utenze Idriche Regione Lombardia, RIAL Risorse Idriche ARPA Lombardia, etc.).

L'aspetto scientificamente innovativo della banca dati è sicuramente la codifica dei singoli livelli stratigrafici in un codice numerico che permette di fare elaborazioni quantitative. I dati stratigrafici, estratti da TANGRAM[®] possono infatti essere utilizzati per una ricostruzione quantitativa dettagliata delle caratteristiche tessiturali degli acquiferi presenti nel sottosuolo. Mediante elaborazioni bi e tridimensionali è possibile studiare in modo più approfondito e preciso l'andamento dei corpi geologici del sottosuolo, per a) valutare le potenzialità idriche degli acquiferi, b) quantificare la tessitura del non saturo e del saturo, quali parametri fondamentali per la definizione della vulnerabilità degli acquiferi e nella valutazione dei piani cava e c) impostare modelli idrogeologici di flusso e trasporto, con la finalità anche gestionale di definire nuove modalità, non solo amministrative ma anche idrogeologiche, per la concessione di nuovi pozzi.

Si sottolinea che la raccolta ed organizzazione dei dati non sono mai esaustive e devono essere costantemente aggiornate, sia per quanto riguarda la realizzazione di nuovi pozzi che di pozzi esistenti ma non ancora inseriti nella banca dati.

Ringraziamenti: Si ringrazia la Provincia di Brescia che ha finanziato lo studio tramite una collaborazione scientifica con DISAT-UNIMIB, in particolare l'Arch. Gianfranco Comincini del settore Ambiente Ufficio Usi delle Acque.

BIBLIOGRAFIA

- ADES (2008). ADES groundwater national portal. <http://www.ades.eaufrance.fr>.
- Alkema D., Gnomeletti D., Cavallin A., Fabbri A., Zanchi A.M., De Amicis M., Bonomi T., De Francesch F., Moltrèr A., Tomasi L. (2000). Integrated datasets, GIS and 3-D system analysis for environmental impact assessment in a large alpine valley north of Trento (Italy). In 19. Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) (pp.54-62). Amsterdam: ISPRS.
- Barazzuoli P., M. Bouzelboudjen S. Cucini L. Kiraly P. Menicori, Saleolini M. (1999). Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy): Database design for groundwater management. *Environmental Geology* 39 (2): 123-143 - doi: 10.1007/s002540050443.
- Blahut J., Poretti I., Sterlacchini S., De Amicis M. (2011). Database of Geo-hydrological Disasters for Civil Protection Purposes. *Natural Hazards* 60 (3): 1065-1085. doi:10.1007/s11069-011-9893-6
- Bonomi T. (2009). Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: application to the Milan plain. *Computers & Geosciences* 35: 134-145. doi: 10.1016/j.cageo.2007.09.006
- Bonomi T., Cavallin A., Stelluti G. (2001). 3-D aquifer characteristics analysis using a well database and Gocad. In *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics* (pp. 89-92). Wallingford: IAHS Press.
- Bonomi T., Cavallin A., De Amicis M. (1995). Un database per pozzi: TANGRAM[®] "A well database: TANGRAM". *Quaderni Geologia Applicata* (S3) 461-3.465.
- Bonomi T., Canepa P., Del Rosso F. (2007). Modelli tessiturali tridimensionali in acquiferi eterogenei "Three-dimensional textural models in heterogeneous aquifers". *Rendiconti della Società Geologica Italiana* 4: 19-22.
- Bonomi T., Cavallin A., Marchetti M., Sironi S (2004). 3-D geology and geomorphology in the Brescia plain. In: Pasquarè G., Venturini C., Groppelli G. (eds), *Mapping Geology in Italy*. p. 77-84, Firenze: SELCA.
- CGDI (2008) The Canadian geospatial data infrastructure. <http://www.geoconnections.org>.
- Chiarini D. (2006). Studio idrogeologico della pianura bresciana "Hydrogeological study of Brescia Province". Assessorato all'ambiente e ecologia. Attività estrattive ed energia. Provincia di Brescia.
- Chen P. P. S. (1976). The entity-relationship model—toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)* 1.1: 9-36. doi:10.1145/320434.320440
- Codd E. F. (1969). Derivability, Redundancy, and Consistency of Relations Stored in Large Data Banks. *IBM Research*. doi:10.1145/1558334.1558336
- Codd E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM* 13 (6): 377-387. doi:10.1145/362384.362685
- Codd E. F. (1971). Normalized data base structure: A brief tutorial. *Proceedings of the 1971 ACM SIGFIDET (SIGMOD) Workshop on Data Description, Access and Control*. ACM, 1971 doi:10.1145/1734714.1734716
- Codd E. F. (1972a). Relational completeness of data base sublanguages. *IBM Corporation*.
- Codd E. F. (1972b). Further normalization of the data base relational model. *Data base systems* 6: 33-64.
- De Dreuzy J.R., Bodin J.b, Le Grand H.c, Davy P.a, Boulanger D.c, Battais A.a, Bour O.a, Gouze P.d, Porel G. (2006). General database for ground water site information. *Ground Water* 44 (5): 743-748. doi:10.1111/j.1745-6584.2006.00220.x
- De Marsily G., Delay E., Gongalves J., Renard Ph., Teles V., Violette S. (2005). Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal* 13: 161-183. doi:10.1007/s10040-004-0432-3
- De Santis D. (2009). Organizzazione ed archiviazione delle informazioni dei pozzi per acqua della Provincia di Brescia, con l'uso di una banca dati idrogeologica. Tesi di laurea, Università degli Studi di Milano-Bicocca.

- Denti E., Lauzi S., Sala P., Scesi L. (1988). Studio idrogeologico della pianura bresciana compresa tra i Fiumi Oglio e Chiese "Hydrogeological study of the Brescia plain between the rivers Oglio and Chiese". In Francani V., Zuppi. G. (eds) Studi Idrogeologici sulla Pianura Padana. Vol. 4, 1-35. Litotipografia Grafiche Somalia Snc, Milano.
- Feinstein D.T., Hunt R.J., Reeves H.W. (2010). Regional groundwater-flow model of the Lake Michigan Basin in support of Great Lakes Basin water availability and use studies. US Geological Survey Scientific Investigations Report 01/2010; 2010(5109):379.
- Frigerio I., Roverato S., De Amicis M. (2013). A Proposal for a Geospatial Database to Support Emergency Management. *Journal of Geographic Information System* 5: 396-403.
- Gogu RC, Carabin G, Hallet V, Peters V, Dassargues A (2001) GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. *Hydrogeology Journal* 9: 555-569 - doi: 10.1007/s10040-001-0167-3.
- Marchetti M. (1992). Geomorfologia ed evoluzione recente della Pianura Padana centrale a nord del fiume Po "Geomorphology and recent evolution of the central Po Plain, north of the river Po". Tesi di Dottorato, IV ciclo, Dip. Di Scienze della Terra Milano, 164 pp.
- Newell C.J., Hopkins L.P., Bedient P.B. (1990). A hydrogeologic database for groundwater modeling. *Ground Water* 28 (5): 703-714. - doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb01986.x
- Nigrelli G., Chiarle M., Nuzzi A., Perotti L., Torta G., Giardino M. (2013). A web-based, relational database for studying glaciers in the Italian Alps. *Computers & Geosciences* 51: 101-107. doi:10.1016/j.cageo.2012.07.027
- Rosti G. (1992). Il Sistema Informativo Falda della Provincia di Milano. Funzioni, operatività, prospettive "Groundwater Information System of the Province of Milan. Functions, operations, prospects". Provincia di Milano, U.O. Tecnica Progetti Speciali, Milano.
- Scesi L. (1985). Lineamenti geologici e idrogeologici della pianura pedemontana bresciana compresa tra i fiumi Mella e Chiese "Geological and hydrogeological features of the piedmont Brescia plain between the rivers Mella and Chiese". In Francani V., Zuppi. G. (eds) Studi Idrogeologici sulla Pianura Padana. Vol. 1, 57-82. Litotipografia Grafiche Somalia Snc, Milano.
- Teorey T.J., Yang D., Fry J.P. (1986). A logical design methodology for relational databases using the extended entity relationship model. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 18 (2): 197-222. doi:10.1145/7474.7475
- US Geological Survey (USGS) (2000). Ground water atlas of the United States. United States Geological Survey.
- Zloof M. (1975). Query by example. Proceedings of the May 19-22, 1975, National Computer Conference and Exposition. ACM doi:10.1147/sj.164.0324.