

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	4 dicembre 2014	51-69	2016
--------------------	--------------------------------	-----------------	-------	------

PAOLO BAGGIO ⁽¹⁾ & MARIO NALDI ⁽²⁾

MODALITÀ DI INTERPRETAZIONE DI ALCUNI MODELLI GEOELETTRICI APPLICATI ALLA RICERCA E CAPTAZIONE DI SORGENTI E POZZI IN AMBITO MONTANO

Abstract - PAOLO BAGGIO & MARIO NALDI - Interpretation of geoelectrical models for the finding and catchment of mountain springs and wells.

This paper deals with the interpretation of geoelectrical models applied for water source location and catchment design in alpine region. Compared with medical imaging, which investigates anomalies or differences of a reference model, the geophysical imaging has clear limits of the interpretation due to the lack of information about the geological reference model. In order to overcome the ambiguity of interpretation, we have applied for some case studies a cross check analyses of geological, geophysical and hydrogeological data. The comparison among different parameters (like the attribution of a geophysical body to a potential lithology typical of the site study, or like the comparison between the permeability conditions and the degree of saturation) has led to some hydrogeological “models” typical of mountain region. Moreover, it offers a key-learning tool in the catchment design of source and wells.

Key words: Geoelectrical models - Hydrogeological interpretation - Source and well catchment - Mountain region.

Riassunto - PAOLO BAGGIO & MARIO NALDI - Modalità di interpretazione di alcuni modelli geoelettrici applicati alla ricerca e captazione di sorgenti e pozzi in ambito montano.

Il presente articolo illustra e descrive le modalità di interpretazione di alcuni modelli geoelettrici applicati alla ricerca e captazione di sorgenti e pozzi in ambito montano. A differenza della diagnostica medica per immagini (*medical imaging*), che valuta delle anomalie o differenze rispetto ad un modello di riferimento noto e per il quale si rilevano delle variazioni di forma o di valore del parametro fisico, la geofisica per immagini (*geophysical imaging*) presenta, in fase interpretativa, dei chiari limiti legati all'assenza di un modello geologico di riferimento. Per superare tale ambiguità interpretativa, su alcuni

⁽¹⁾ Studio di Geologia Paolo Baggio, Borgata Gai 13, 10040 Rubiana (TO); baggiopao@libero.it.

⁽²⁾ Techgea Srl, Via Modigliani 26/a, 10137 Torino; info@techgea.eu.

casi di studio si è applicata un'analisi incrociata di dati geofisici, geologici e idrogeologici. Il confronto tra più fattori (quali l'attribuzione di un corpo geofisico a una possibile litologia tipica del sito, oppure il confronto tra le condizioni di permeabilità e il grado di saturazione) ha permesso di definire alcuni "modelli" tipici di situazioni idrogeologiche montane e di ottimizzare le modalità di captazione di sorgenti e pozzi.

Parole chiave: Modelli geoelettrici - Interpretazione idrogeologica - Captazione di pozzi e sorgenti - Ambiente montano.

1. PREMessa

L'individuazione di nuove fonti idropotabili negli ambiti alpini rientra in quelle casistiche di studio in cui risulta indispensabile un approccio multidisciplinare di analisi, che identifichi in modo accurato il Modello Geologico di Riferimento (MGR) da cui si ricava uno specifico Modello Idrogeologico di Riferimento (MIR). I modelli MGR e il MIR dipendono dall'analisi e dall'interpretazione di una realtà estremamente complessa, dove i diversi elementi che la compongono sono in relazione reciproca e interagiscono fra loro ("ambiti conoscitivi" o "sistemi"). I principali sistemi conoscitivi di interesse per lo studio dell'areale di nuove fonti idropotabili nei settori alpini sono:

- ricostruzione della sequenza litostratigrafica delle formazioni quaternarie e del substrato relativo;
- la caratterizzazione geologica e idrogeologica dei volumi di terreno presenti nell'ambito delle profondità di interesse;
- la ricostruzione dell'assetto geologico strutturale e, soprattutto, la natura dei principali lineamenti tettonici regionali (faglie e contatti tettonici);
- l'analisi dell'assetto geomorfologico dell'area;
- la ricostruzione di possibili scenari evolutivi sulla base dell'analisi delle trasformazioni storiche del reticolo idrico principale e dei maggiori eventi meteo-idrologici recenti;
- l'individuazione dell'assetto della circolazione idrica superficiale e sue relazioni con la circolazione profonda;
- l'individuazione della distribuzione delle sorgenti e la valutazione della portata totale erogata dalle stesse;
- l'analisi dei vari complessi idrogeologici e l'individuazione dei limiti/contatti idrogeologici;
- l'analisi idrochimica degli acquiferi presenti.

La definizione degli elementi relativi ai diversi ambiti conoscitivi è resa possibile dall'applicazione di metodologie di studio specifiche che consentono l'acquisizione di una vasta e diversificata serie di dati riassumibili in:

- indagini dirette di “*terreno*” (rilevamenti geologici e geomorfologici, censimento punti d’acqua, ecc.);
- indagini in “*ufficio*” (fotointerpretazione, reperimento bibliografia e archivistica, ecc.);
- programmazione e realizzazione di un piano di indagini geofisiche mirate;
- programmazione e realizzazione di indagini geognostiche e idrogeologiche pilota o captazioni modello.

Come illustrato in questa breve nota tecnica mediante alcuni casi esemplificativi, è estremamente importante il passaggio dal MGR ad un corretto MIR, programmando con accuratezza il processo di acquisizione dei dati. Alle indagini preliminari di rilevamento in sito e di quelle di reperimento dati e di fotointerpretazione, deve seguire una attenta programmazione di appropriate indagini geofisiche, la cui progettazione è fondamentale per ottenere dati utili per la ricostruzione concettuale della configurazione spaziale nel sottosuolo delle caratteristiche litostratigrafiche e idrogeologiche. Più in dettaglio:

- nel caso di depositi sciolti (alluvionali, glaciali, ecc.) è importante l’individuazione di livelli e lenti ghiaiose potenzialmente ospitanti uno o più acquiferi produttivi, sfruttabili in continuità per tutto il ciclo idrogeologico;
- nel caso di ammassi rocciosi, è importante l’individuazione dei sistemi di fratturazione più favorevoli alla presenza di circuiti idrici perenni.

I MIR presenti in contesto alpino risultano più articolati e complessi rispetto a quelli di pianura. Sulla base delle esperienze maturate dagli scriventi, i MIR in ambito alpino possono essere raggruppati in modo esemplificativo nei seguenti quattro schemi idrogeologici (MEULI & WEHRLE, 2001):

- sorgenti di immagazzinamento (modello «backstowing»);
- sorgente di contatto (modello «gravity contact»);
- sorgente lungo frattura (modello «fracture and tubular spring»);
- sorgente artesianiana (modello «artesian spring»).

2. MODELLO «BACKSTOWING»

Le sorgenti di risalita sono caratterizzate dalla presenza di una barriera impermeabile che ostacola il deflusso sotterraneo dell’acqua e ne consente la risalita in superficie. La «barriera» può essere costituita da:

- elementi tettonici (faglie) che costituiscono una barriera impermeabile o che mettono a contatto litotipi a differente permeabilità;
- elementi morfologici che modellano il substrato lapideo in modo tale da creare

i presupposti per l'accumulo d'acqua (backstowing) con risalita dell'acqua in corrispondenza della risalita del substrato lapideo.

2.1 Esempio 1 - Ricerche idriche per potenziamento impianto idrico ad uso idropotabile a servizio di una borgata alpina (Piemonte Nordoccidentale)

L'approvvigionamento idropotabile della borgata alpina in oggetto è garantito da n. 3 emergenze per gravità collocate alla quote di 2.000÷2.100 m s.l.m. in corrispondenza di un esteso ripiano morfologico con portate molto discontinue durante tutto l'anno idrogeologico. Questo sistema idropotabile è tipico dei settori montani dove si evidenzia, a livello di dato medio, un surplus rispetto al consumo "locale" nel periodo primaverile e una riduzione di disponibilità in periodi di magra con picchi di massima richiesta idropotabile.

Basandosi su una previsione di maggiore richieste di erogazione di acqua potabile, e sulla scorta delle periodiche difficoltà di erogazioni di acqua potabile collocate prevalentemente sempre nel periodo invernale, si è reso necessario individuare la presenza di circuiti idrici integrativi più stabili degli attuali, con la finalità di rispondere alle esigenze di gestione di pianificazione. In considerazione dei consumi legati a turismo invernale, il fabbisogno di incremento sono stati stimati in circa 90 m³/g (portata di circa 1 l/s).

2.1.1 Ubicazione

Il settore oggetto di ricerca idrica è situato in corrispondenza del versante vallivo della Alta valle di Susa sul versante idrografico destro del T. Ripa, tra gli abitati di Cesana T.se e Sestriere (a monte dell'abitato di Champlas du Col) in corrispondenza del piano Armudeus, a una quota altimetrica di 1850 m s.l.m. (Fig. 1). L'area risulta sub pianeggiante, a forma di catino largo circa 500 m, dove sul lato Sud è presente la Strada Regionale n° 23 che compie una serie di tornanti prima di attraversare il sottostante abitato di Champlas du Col. Sul lato Ovest la conca è bordata dal Rio Champlas tributario del Torrente Ripa.

2.1.2 Modello geologico di riferimento (MGR)

L'area di ricerca si colloca all'interno di un dissesto gravitativo profondo (DGPV, dissesto gravitativo di Champlas du Col), impostato nella zona superiore nell'unità dei calcescisti marmorei e marmi impuri del Complesso del Lago Nero (unità permeabile per fratturazione), che risulta geometricamente sovrapposta agli scisti filladici di Cerogne-Ciantiplagna (unità impermeabile).

La superficie di contatto tra le unità dei calcescisti marmorei e quella degli scisti filladici mantiene una giacitura inclinata verso ovest, con una componente secondaria verso nord che determina, nei confronti del pendio, un assetto a reggi-poggio.

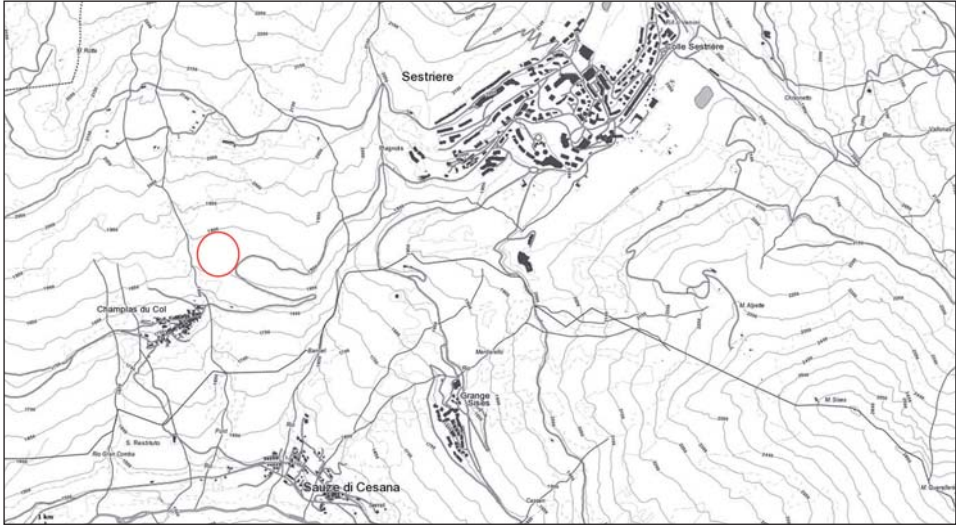


Fig. 1 - Ubicazione area di indagine ESEMPIO 1 (cerchio rosso).

La particolare configurazione morfologica del versante (alternanza di aree pianeggianti e in contropendenza) e la presenza di litotipi acquiferi e impermeabili, crea i presupposti per la presenza di fenomeni di accumulo di acqua sotterranea di tipo «backstowing», che alimentano numerose e piccole sorgenti coalescenti con ambienti umidi di tipo palustre come è il caso dell'area in esame.

2.1.3 *Indagini geofisiche*

Al fine di ottenere una verifica dell'andamento spaziale del sottosuolo, è stato programmato un rilievo geoelettrico con la realizzazione di tre sezioni geoelettriche multielettrodo (Fig. 2): due stendimenti sono stati disposti in direzione ortogonale all'asse di massima pendenza del versante (ERT2 ed ERT3) in modo da intercettare i possibili flussi idrici sotterranei e definire litostratigraficamente le geometrie delle unità dei depositi detritici. Lo stendimento ERT1 è stato posizionato parallelamente all'asse di massima pendenza in modo da incrociare le due sezioni ERT2 ed ERT3 e ottenere una verifica tridimensionale.

Tutte le sezioni sono state realizzate utilizzando 48 elettrodi con interasse pari a 3 m, con stendimenti di lunghezza di 141 metri, che hanno consentito di raggiungere una profondità d'indagine pari a 25÷30 metri (in posizione centrale). I risultati dell'indagine hanno evidenziato (si veda il modello di resistività elettrica di Fig. 2): 1) un elettrostrato resistivo (800÷2000 ohm m, colori da giallo a rosso) collocato nella porzione di versante più acclive e limitato verso il pianoro sottostante (compatibile con materiali detritici asciutti di limitato spessore); 2) un secondo elettrostrato

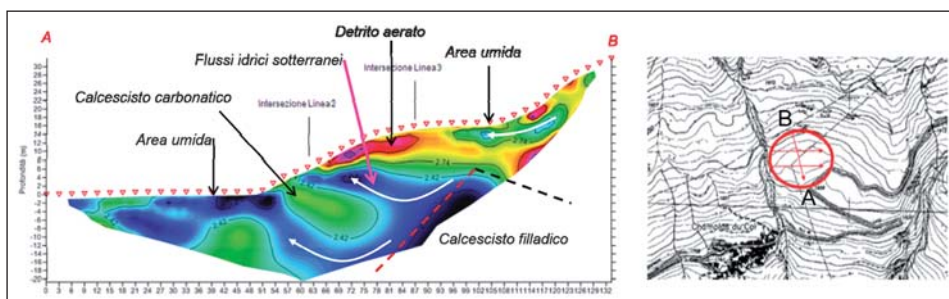


Fig. 2 - Ubicazione linee geoelettriche e sezione tomografica in asse al versante (linea A-B).

caratterizzato da resistività medio-bassa (50÷500 ohm m, colori da nero a verde) il quale evidenzia al suo interno anisotropie laterali legate verosimilmente alla maggior/minore fratturazione degli ammassi rocciosi e ai fluidi circolanti (compatibile con l'ammasso roccioso disarticolato con flussi idrici canalizzati).

2.1.4 Modello idrogeologico di riferimento (MIR) e perforazione di due pozzi pilota

Sulla base dei risultati dell'indagine geoelettrica è stato possibile affinare localmente l'assetto litostratigrafico del sottosuolo, evidenziando la presenza di variazione litologica all'interno dei materiali scistosi con la presenza alla base di litotipi maggiormente conduttivi.

La porzione alta del versante è risultata poco interessante, poiché contraddistinta da valori di resistività compatibili con materiali detritici asciutti di modeste dimensioni.

All'interno dei materiali scistosi (calcescisti) è stata localizzata con buona precisione la presenza di una concentrazione di flussi canalizzati, posizionati nei primi 10-12 metri dal p.c., riconducibile al circuito idrico potenzialmente sfruttabile.

Al fine di convalidare i risultati del rilievo geoelettrico, nonché fornire le informazioni sulla potenzialità dell'acquifero fratturato, sono stati realizzati due piezometri (pozzi pilota) di piccolo diametro trivellati a carotaggio continuo in corrispondenza delle potenziali zone di risalita idrica individuate (denominati pozzi pilota SH-P1 e SH-P2, si veda la sezione di Fig. 3). Nel piezometro SH-P1 è stata rinvenuta una alimentazione localizzata a partire da circa -10,30 m dal p.c. contraddistinta da un flusso canalizzato nei calcescisti marmorei, confermando quanto già ipotizzato con il rilievo geoelettrico. L'acquifero è artesiano, con un livello piezometrico che rapidamente si è stabilizzato a -6,3 m da p.c.

Per quanto riguarda il piezometro SH-P2 l'alimentazione proviene da un livello compreso tra -6 m circa fino a -3,7 m dal p.c. L'acquifero incontrato ha una pressione inferiore a quella rilevata in SH-P1, con livello che rapidamente si ristabilizzava a circa -3,0 m da p.c., quota questa poco al di sopra dei rigurgiti evidenziati fino a -3,7 m.

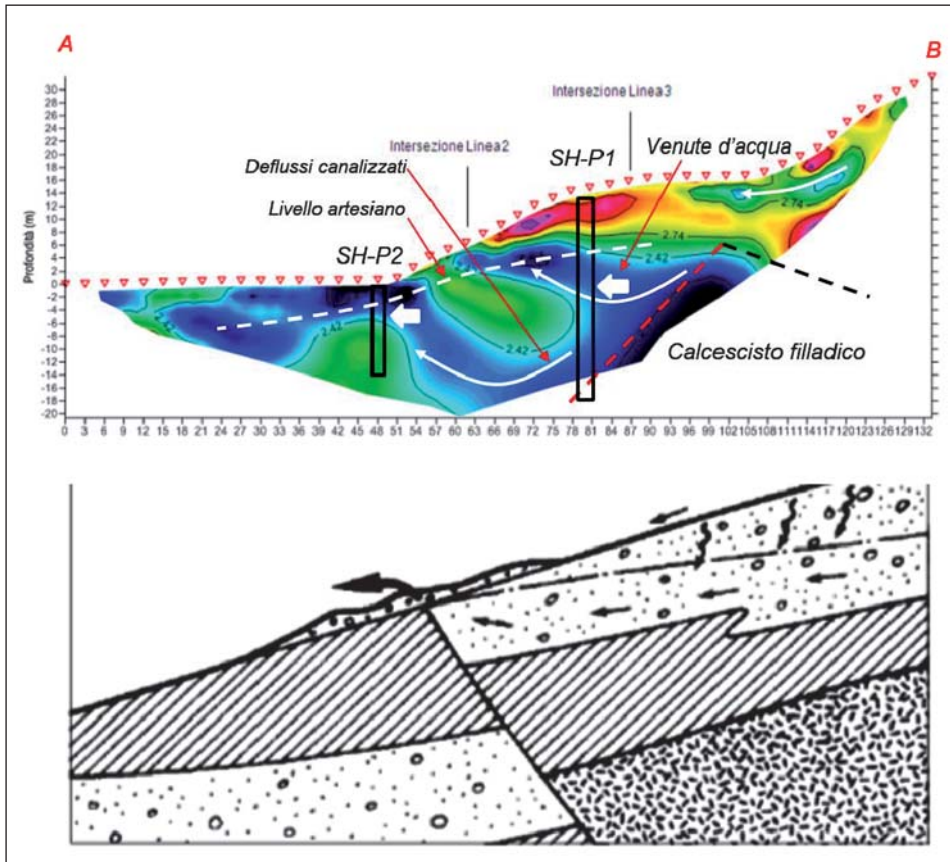


Fig. 3 - Posizione pozzi pilota e confronto con schema di sorgenti “backstopping” (da SKAT, 2001).

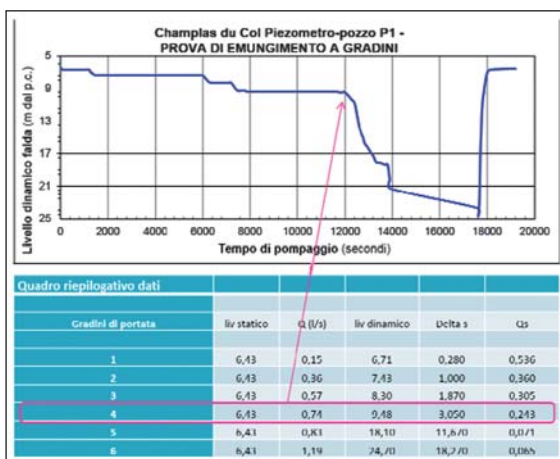


Fig. 4 - Diagramma di portata del pozzo pilota P1 (prova a scalini).

Le prove di pompaggio a gradini (Fig. 4) nel SH-P1 hanno evidenziato una produttività estiva di circa 0.7 l/s, con drastica riduzione a portate superiori (svuotamento pozzo). La risalita del livello è risultata pressoché immediata dopo il fermo pompaggio, a conferma della captazione di un deflusso canalizzato.

L'individuazione precisa del circuito idrico e il suo sfruttamento già con il pozzo pilota (SH-P1), ha consentito di ottimizzare al meglio le risorse economiche del gestore idrico integrato. Con il quadro conoscitivo così delineato verrà realizzata in futuro una definitiva captazione a grande scala mediante una serie di pozzi drenanti orizzontali senza l'utilizzo di elettropompe sommerse.

2.2 Esempio 2 - Ricerche idriche per l'incremento di portata di una sorgente alpina (Bursa, Turchia)

L'area in esame è posta in un contesto alpino, all'interno di un circo glaciale, caratterizzato, alla base, da un'area pianeggiante (ad una quota di circa 1.600 m s.l.m.) e da un rilievo collinare che crea una contropendenza. Al piede del versante emerge una sorgente (captata) e numerose piccole venute che determinano un impaludamento dell'area pianeggiante (Fig. 5).

Per aumentare la portata disponibile (con una portata minima e sempre disponibile di 10 l/s) è stato eseguito uno studio idrogeologico e geofisico di dettaglio, con progettazione e realizzazione delle opere di captazione finali.

2.2.1 Modello idrogeologico di riferimento (MIR)

Trattandosi di sito localizzato in un'area remota e priva di dati bibliografici, il modello geologico di riferimento si basa esclusivamente sui dati di rilevamento geologico e sulla Carta Geologica a scala 1:250.000 del Servizio Geologico della Turchia (MTA). Come evidenziato nello schema semplificato di Fig. 5, il modello idrogeologico di riferimento prevede: 1) un deflusso canalizzato nel detrito morenico a contatto con il substrato lapideo (granito); 2) la risalita dell'acqua nell'area pianeggiante per risalita morfo-tettonica del substrato (sbarramento determinato dalla cresta lapidea in granito). Sono state censite n° 4 sorgenti, denominate SK1÷SK4; la sorgente SK1 è captata e utilizzata (con portate variabili da oltre 10 l/s fino al completo prosciugamento in periodo tardo-estivo), mentre le sorgenti SK2, SK3 e SK4 sono delle emergenze idriche nell'area pianeggiante che determinano impaludamento e zone umide (non utilizzabili).

2.2.2 Indagini geofisiche

In considerazione del modello idrogeologico di riferimento, sono state tracciate n° 3 sezioni geoelettriche trasversali al presunto deflusso idrico sotterraneo di cui due sezioni geoelettriche a monte della sorgente principale SK1 e una sezione geoelettrica a monte delle sorgenti SK2÷SK4 (Fig. 6). Tutte le sezioni sono state

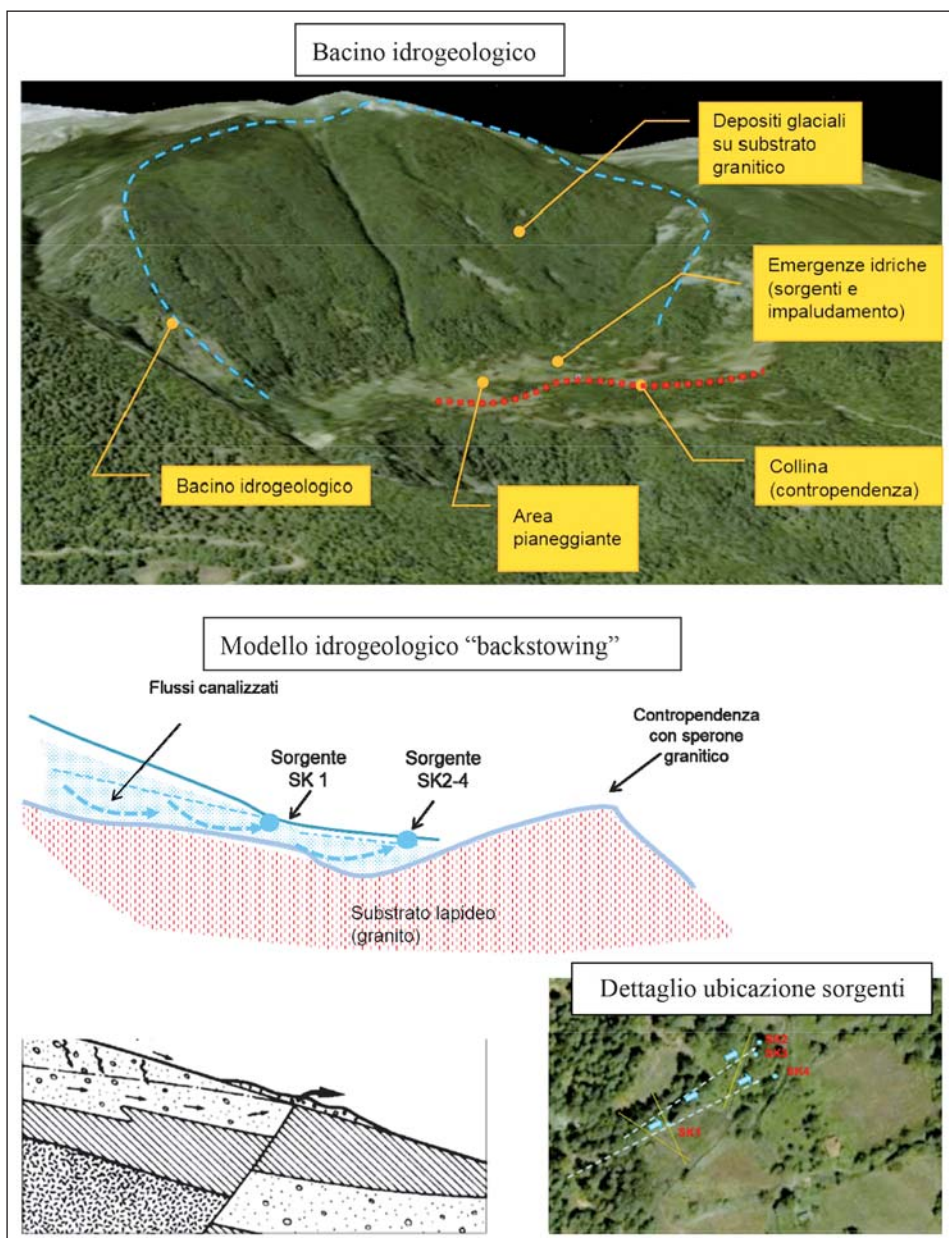


Fig. 5 - Schema modello idrogeologico sorgenti SK1-SK4.

realizzate utilizzando 24 elettrodi con interasse pari a 3 m, con stendimenti di lunghezza di 69 metri, che hanno consentito di raggiungere una profondità d'indagine pari a 10÷12 metri (in posizione centrale). La sezione A-B a monte della sorgente SK1 ha evidenziato un evidente canale di deflusso sotterraneo (ghiaie e depositi grossolani saturi, con resistività elettrica di 200-300 ohm m), delimitato alla base dal substrato granitico e al tetto dai depositi grossolani asciutti (alta resistività elettrica, valori maggiori di 800 ohm m). La sezione C-D a monte delle sorgenti SK2+SK4 evidenzia, invece, la presenza di uno spartiacque interrato (uno sperone roccioso) che divide il deflusso canalizzato in due direzioni di alimentazione delle sorgenti SK2 e SK3 (alimentate dal canale principale) e la sorgente SK4 (alimentata dal canale secondario). Come rilevabile dalle sezioni geoelettriche, la base di scorrimento del canale sotterraneo è posta a circa 8-10 m di profondità dal piano campagna, e per tale ragione gran parte dell'acqua di scorrimento non viene captata dalla sorgente SK1 (molto superficiale, con camera di raccolta d'acqua a circa -2 m di profondità).

2.2.3 Progettazione e realizzazione opera di captazione

Sulla base del Modello Idrogeologico definito con le indagini geologiche e geofisiche è stato progettato e realizzato un sistema di captazione a trincea (Fig. 7) in grado di drenare il deflusso idrico principale sia in profondità (con scavo fino a circa 6 m da piano campagna) e sia lateralmente (con un'estensione della trincea di circa 10 m). L'intervento di captazione è stato eseguito nel periodo di secca (fine estate - inizio autunno) e ha consentito di ottenere una portata media costante di circa 14-15 l/s.

3. MODELLO «GRAVITY CONTACT»

Le sorgenti per gravità sono caratterizzate dalla presenza di un livello impermeabile basale che consente il deflusso canalizzato dell'acqua. Le sorgenti gravitative emergono al contatto tra profilo topografico e livello impermeabile e sono tra le sorgenti più diffuse in contesto montano. I principali fattori che condizionano la circolazione idrica sotterranea sono strettamente legati alle caratteristiche composizionali delle litologie dei depositi presenti, le relative permeabilità, l'assetto geologico-strutturale del substrato roccioso locale e il suo andamento planoaltimetrico.

Queste sorgenti sono caratterizzate da una *permeabilità per porosità* (anche detta permeabilità primaria), tipica delle rocce porose, le quali contengono numerosi piccoli vuoti intergranulari tra loro comunicanti.

I depositi quaternari indifferenziati all'interno dei fondo valle alpini risultano pertanto i principali serbatoi idrici sotterranei che potrebbero presentare localmente notevole produttività se il contesto locale lo consente.

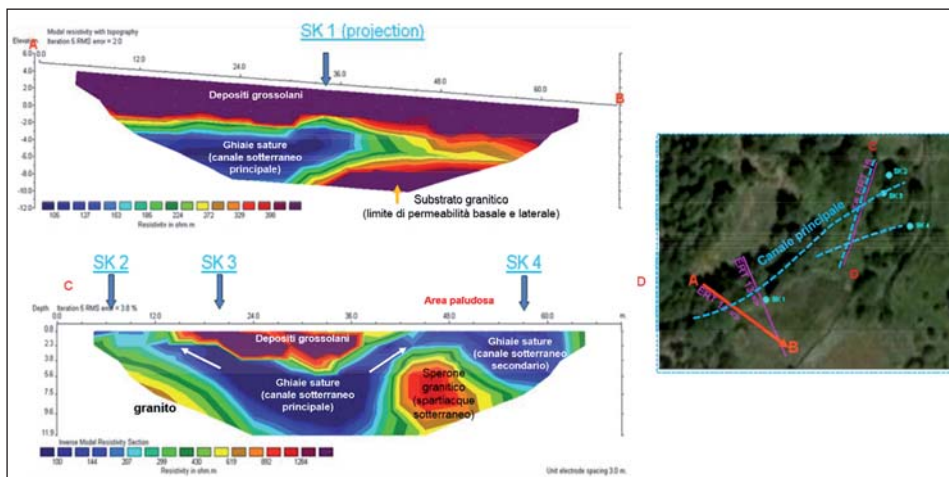


Fig. 6 - Sezioni geoelettriche A-B e C-D con interpretazione idrogeologica dei deflussi di acqua sotterranea.

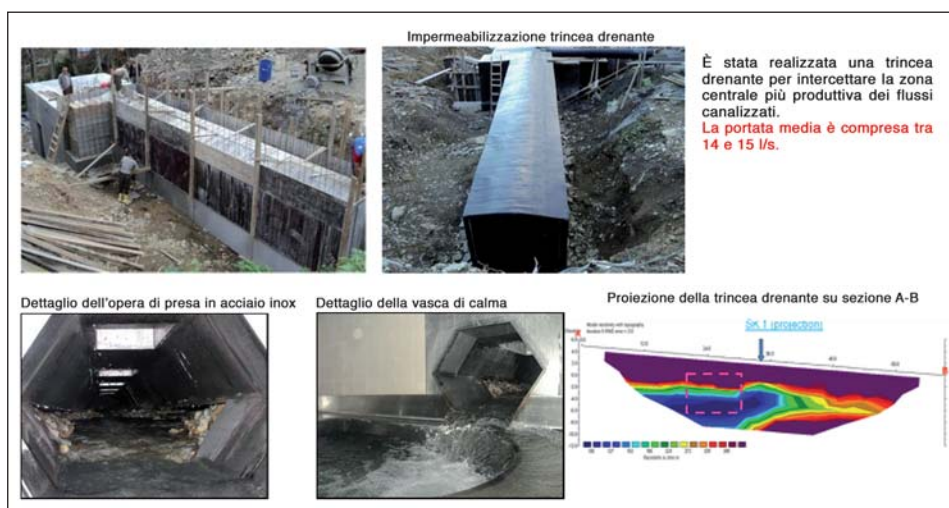


Fig. 7 - Realizzazione opera di captazione.

Generalmente i principali punti da ricercare nei fondo valle tramite pozzi si pongono in prossimità di drenaggio superficiale che ne rappresentano la principale fonte alimentare in subalveo.

È comunque da tenere presente che in generale i prelievi di subalveo sono accomunati da alcune problematiche da correlare perlopiù al corso d'acqua che li alimenta e alle aree limitate sulle quali a volte sono costretti a insistere.

In contesti del genere l'alimentazione è vincolata dal drenaggio montano presente, dalle variazioni delle sue portate nell'arco dell'anno solare, dal regime pluviometrico alpino e dall'innevamento invernale, dalla presenza di altri emungimenti nella zona, ecc.

La produttività potenziale dell'acquifero prescelto potrà avere un andamento stagionale in parte legato all'alimentazione del drenaggio superficiale vicino, risultando in genere minore nei periodi di magra invernali ed estivi. Risulta pertanto importante individuare le variazioni deposizionali favorevoli, trovando i settori a maggiore permeabilità.

3.1 Esempio 3 - Ricerche idriche per impianto idrico di soccorso ed emergenza ad uso idropotabile a servizio di un comune montano (località non citabile - Italia)

3.1.1 Descrizione generale

L'attuale sistema acquedottistico del comune montano in oggetto è caratterizzato da una serie di sorgenti, la principale delle quali è collocata ad una quota 1063 m s.l.m. in prossimità del torrente di fondovalle.

Visto l'attuale sistema di erogazione esistente, ipotizzando di far fronte al periodo di calo invernale ed estivo di portata delle emergenze sorgive e constatata la pericolosità potenziale che fenomeni di piena torrentizia possano compromettere il corretto approvvigionamento idropotabile, si è resa necessaria l'individuazione di una nuova fornitura di "emergenza" e di "soccorso" all'esistente.

Il settore oggetto di ricerca idrica è stato individuato in corrispondenza del fondovalle ad una quota compresa tra 1.150 m e 1.200 m s.l.m. nella parte media alta del bacino in presenza di un restringimento della sezione valliva, in posizione potenzialmente ottimale per eventuali futuri sfruttamenti ad uso idropotabile, nonché in area protetta dalla dinamica torrentizia tipica dell'aree montane del genere.

3.1.2 Inquadramento geologico

L'area in esame presenta un assetto geologico e idrogeologico complesso, caratterizzato da un'incisione torrentizia sul substrato lapideo nel primo tratto di monte, cui fa seguito, in un secondo tratto, una re-incisione in depositi di tipo alluvionale e glaciale di spessore ignoto. Il torrente, che scorre sul substrato lapideo, tende a scomparire sui depositi sciolti, con una dinamica sotterranea ignota che alimenta alcune sorgenti di fondovalle. Più in dettaglio: 1) il substrato lapideo è caratterizzato da una successione omogenea di micascisti e gneiss minuti. Nei micascisti si trovano localmente intercalate masse allungate di metabasiti (anfiboliti), e livelli di scisti nerastri lucenti, intensamente laminati e a tessitura milonitica. 2) La copertura del tratto mediano vallivo è costituito da depositi glaciali caratterizzati da *till* di ablazione di esigua potenza poggianti direttamente sul substrato roccioso (parte alta del torrente) cui fanno seguito i depositi alluvionali reincisi dal torrente, caratterizzati

da granulometria prevalentemente grossolana costituita da ciottoli e blocchi eterometrici con scarsa o assente matrice ghiaioso-sabbiosa. I depositi fluvio-torrentizi recenti formano terrazzi fluviali sub-pianeggianti, coperti da vegetazione prativa o arbustiva-arborea. Si tratta di depositi *clast-supported* costituiti da clasti eterometrici, di dimensioni da centimetriche a plurimetriche, poligenici (gneiss, micascisti e metabasiti), con grado di arrotondamento da basso a medio, immersi in una matrice siltoso sabbiosa.

3.1.3 *Modello idrogeologico preliminare*

Sulla base di dati bibliografici si ritiene che la sequenza stratigrafica locale sia caratterizzata da una prima copertura detritica di fondovalle poggianti su depositi glaciali con potenza di un centinaio di metri prima di incontrare il substrato roccioso. In prima analisi, in base al quadro conoscitivo, si prevede che sia il deflusso torrentizio del tratto di monte (che tende a scomparire al contatto con i depositi alluvionali) e, più in generale, il drenaggio dei versanti vallivi, alimentino un acquifero di cospicuo spessore immagazzinato all'interno di corpi detritici grossolani di origine fluvio-glaciale e/o glaciale.

3.1.4 *Indagine geofisica*

Per caratterizzare il Modello Idrogeologico del sito in esame è stato realizzato un rilievo geoelettrico mediante il tracciamento di una sezione geoelettrica multielettrodo lungo un allineamento di circa 500 m disposto parallelamente al tracciato torrentizio e appena a valle del tratto torrentizio sospeso su roccia. Scopo dell'indagine è duplice: 1) individuare lo spessore del corpo detritico alluvionale, ovvero la profondità del substrato lapideo basale; 2) indagare per una profondità di 80-100 m le caratteristiche litostratigrafiche della copertura quaternarie e, in particolare, identificare la presenza di livelli e lenti ghiaiose potenzialmente ospitanti uno o più acquiferi.

Come osservabile nella Fig. 8 il modello tomografico di resistività elettrica risultante mette in evidenza i seguenti aspetti: 1) in corrispondenza di un tratto del fondovalle indagato si è osservata una dispersione del torrente, che alimenta un potenziale flusso idrico preferenziale a partire dalla profondità di 30÷50 m; 2) al centro dello stendimento, alla profondità di -70 m, si è rilevata una resistività di 2.000÷2.500 ohm m (colori giallo e arancio) interpretabile come substrato roccioso gneissico. L'andamento morfologico della superficie individuata risulta compatibile con la possibile presenza di una soglia glaciale modellata sul substrato roccioso locale che rappresenta una struttura idrogeologica importante ai fini della produttività dell'acquifero; i depositi saturi presentano valori di resistività decisamente più bassi dei depositi asciutti (500÷1.000 ohm m contro valori di oltre 2000 ohm m), ma si tratta comunque di valori di resistività elevati in senso assoluto. Ciò porta a ritenere che i depositi di copertura siano costituiti da prevalenti depositi grossolani, caratterizzati da permeabilità medio-elevata.

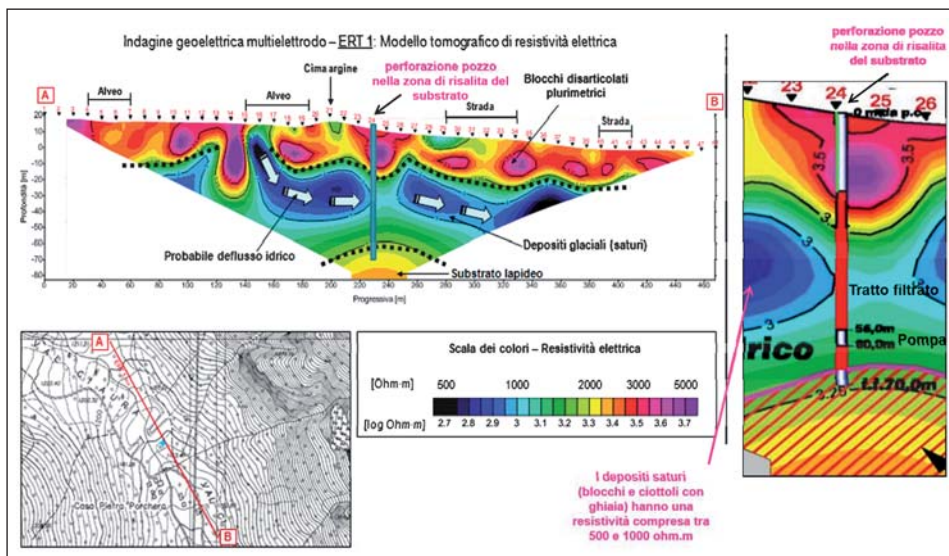


Fig. 8 - Sezione geoelettrica profonda per caratterizzazione di un acquifero montano.

3.1.5 Progettazione e realizzazione dell'opera di captazione (pozzo pilota)

Sulla base delle indagini geologiche e geofisiche è stato progettato e realizzato un pozzo pilota (diametro di perforazione di 250 mm e posa di tubazione da 168 mm di diametro esterno fino 70 m di profondità, con trivellazione a rotoperussione ad aria). I risultati della perforazione (Fig. 9) hanno pienamente confermato il modello idrogeologico definito con le indagini geoelettriche. Infatti, nei primi 20-25 metri sono presenti depositi torrentizi con blocchi disarticolati plurimetrici insaturi, a cui segue un potente spessore di depositi glaciali-fluvioglaciali saturi fino a profondità poco superiori a 70 m, oltre il quale si è intercettato il substrato lapideo (base dell'acquifero). I risultati conseguiti dalla perforazione e relative analisi hanno permesso di constatare come il flusso canalizzato di subalveo alimenti una falda di elevate caratteristiche di permeabilità e immagazzinamento. Successive prove di portata hanno evidenziato come la portata richiesta (10÷12 l/s) determini abbassamenti minimi del livello dinamico (< 0.5 m).

4. MODELLO «FRACTURE AND TUBULAR SPRING»

Le sorgenti di frattura sono caratterizzate dalla risalita di acqua in pressione generalmente lungo intersezioni di fratture o faglie, con allargamento di tipo carsico o per dilavamento della zona di faglia (milonite cataclastica). Generalmente non

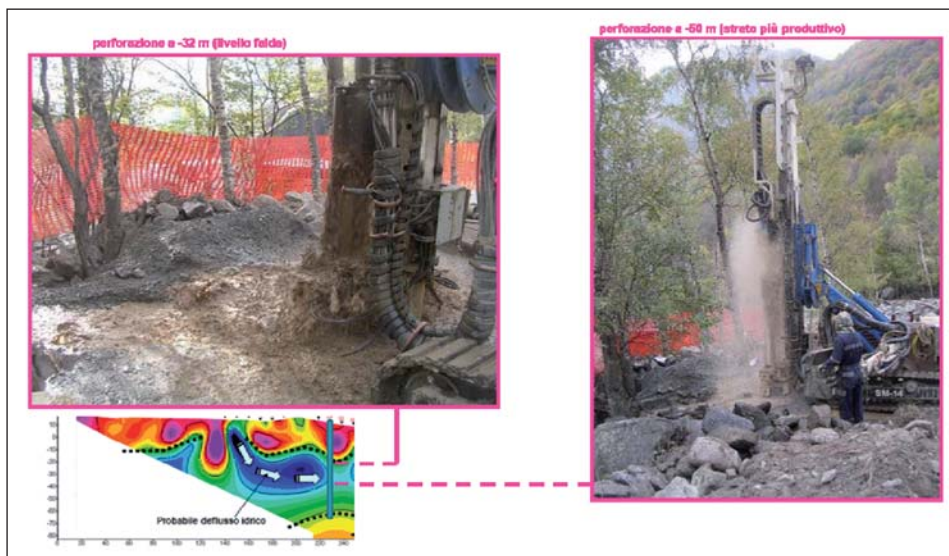


Fig. 9 - Realizzazione di un pozzo pilota in acquifero montano.

sono collegate a una falda (reticolo di fratture) ma a singole strutture idroconduttrici che determinano la fuoriuscita di sorgenti in zone di substrato lapideo con sottile copertura detritica. Nonostante si tratti di meccanismi di risalita complessi, con lunghi percorsi sotterranei derivanti da fratture idroconduttrici tra loro collegate, sono tipologie di sorgenti molto diffuse in ambienti geologici maturi (ambienti di scudo).

4.1 Esempio 4 - Ricerche idriche per uno stabilimento di acque minerali (località non citabile - Brasile)

Per incrementare la produzione di acqua minerale in vista dei futuri giochi olimpici 2016 è stato eseguito uno studio idrogeologico supportato da indagini geofisiche di un sito localizzato nella regione di San Paolo. Lo stabilimento dispone di un solo pozzo produttivo; sono stati perforati in passato 5 pozzi profondi (oltre 100 m) e due piezometri, con esito tuttavia negativo.

4.1.1 Inquadramento geologico

L'area in esame è posta in una depressione morfologica nella regione di San Paolo (Brasile), caratterizzata da una sottile copertura di suolo argilloso su substrato di scisti quarzitic/gneiss. Tale circostanza favorisce il ruscellamento a scapito dell'infiltrazione sotterranea, e rende difficoltosa la formazione di acquiferi sfruttabili con pozzi. Come riportato in precedenza, lo stabilimento dispone di un solo pozzo produttivo (di



Fig. 10 - Localizzazione area di indagine e posizione delle perforazioni eseguite.

cui non si hanno dati stratigrafici) e i successivi tentativi di perforazione profonda (oltre 100 m) hanno evidenziato roccia massiva priva di fratture idroconduttrici (Fig. 10). Sulla base dei dati disponibili non è possibile definire un modello geologico e idrogeologico, salvo prevedere la presenza di fratture isolate con risalita e fuoriuscita localizzata di acqua in superficie.

4.1.2 Indagini geofisiche

In assenza di indicazioni sui principali sistemi di fratturazione o sulla presenza di strutture idrogeologiche sotterranee, è stata progettata un'indagine geoelettrica con copertura dell'area disponibile attorno allo stabilimento allo scopo di evidenziare la presenza di fratture idroconduttrici per il posizionamento di un nuovo pozzo produttivo. Il rilievo geofisico ha previsto il tracciamento di linee perimetrali allo

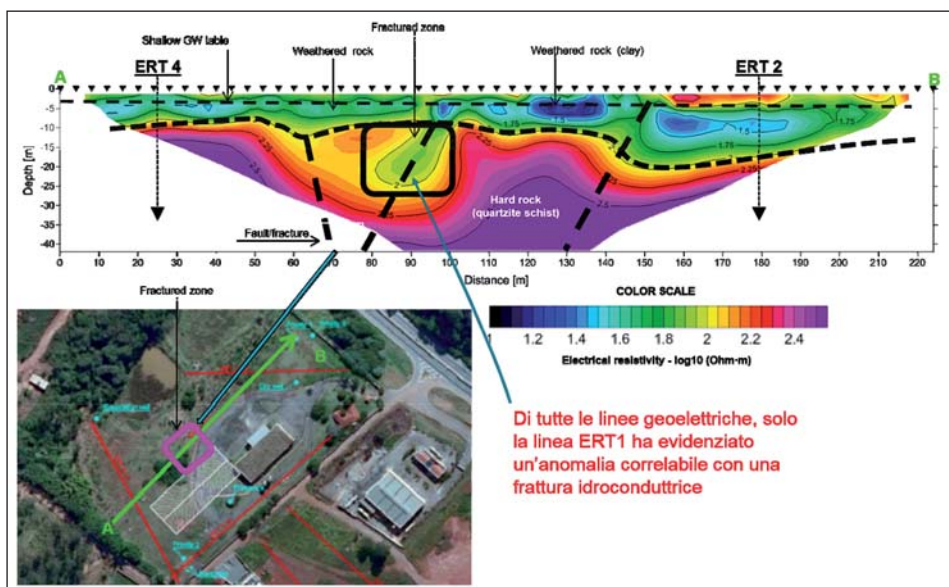


Fig. 11 - Ubicazione linee geoelettriche (linee rosse) e sezione geoelettrica con discontinuità correlabile a frattura idroconduttrice.

stabilimento con un elevato numero di elettrodi (60/80) e spaziatura minima (1 o 2 m), si veda Fig. 11.

Di tutte le linee geoelettriche, solo la linea ERT1 (sezione A-B) ha evidenziato una discontinuità del substrato lapideo correlabile con una frattura idroconduttrice (Fig. 11), mentre in tutte le altre linee geoelettriche si è rilevato un substrato compatto e privo di discontinuità (come confermato indirettamente dagli esiti negativi delle perforazioni). Più in dettaglio, come illustrato in Fig. 11, si rileva la presenza di uno strato di copertura (suolo eluviale argilloso) cui fa seguito un substrato di scisti quarziticci piuttosto massivi e dotati di resistività elettrica medio-alta (oltre 500-600 ohm m). La zona di discontinuità presenta valori di resistività elettrica decisamente più bassi (inferiori a 100 ohm m) e, soprattutto, una morfologia stretta e allungata correlabile con una zona di fratturazione potenzialmente idroconduttrice.

4.1.3 Progettazione e realizzazione dell'opera di captazione (pozzo pilota)

Sulla base delle indagini geologiche e geofisiche è stato progettato e realizzato un pozzo pilota ubicato nel centro della discontinuità. A seguito del continuo franamento delle pareti, e dopo aver accertato l'abbondante presenza d'acqua, si è preferito spostare la perforazione su un lato esterno della zona fratturata, sia per evitare il collasso del foro e sia per ridurre la torbidità dell'acqua (si veda il modello

idrogeologico di Fig. 12). La perforazione a lato della zona fratturata ha consentito di intercettare la frattura idroconduttrice; la realizzazione di una videoispezione in fase di perforazione ha consentito di accertare l'appartenenza alla tipologia di sorgenti tubulari, con evidenza della risalita di acqua in superficie. Gli esiti della prova di pompaggio di lunga durata hanno evidenziato una portata estraibile in continuità di oltre 30 m³/h, con abbassamenti di falda inferiori a 1 m.

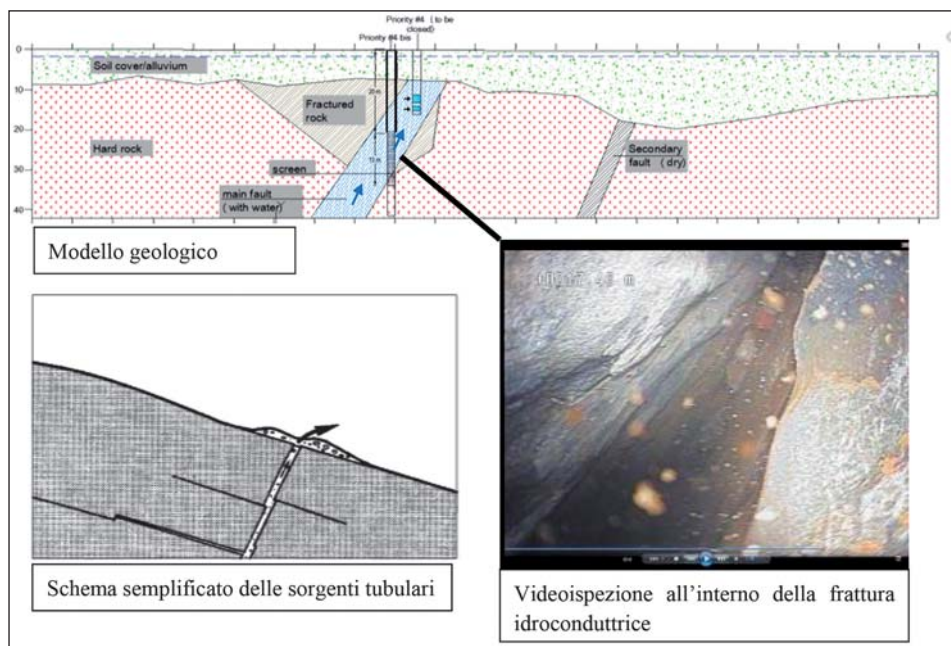


Fig. 12 - Ricostruzione geologica, videoispezione e classificazione della tipologia di sorgente tubulare.

5. CONCLUSIONI

I casi di studio presentati nelle pagine precedenti hanno evidenziato l'importanza dell'approccio integrato tra differenti metodi di indagine geologica, idrogeologica e geofisica, onde pervenire ad un modello del sottosuolo realistico e affidabile. L'integrazione tra dati geologici e modelli geoelettrici 2D e 3D conduce ad una progettazione mirata dei sistemi di captazione d'acqua, con localizzazione di pozzi nei punti più idonei per gli aspetti quantitativi e qualitativi dell'acqua sotterranea, e alla progettazione di captazione di sorgenti nei punti di miglior protezione naturale e maggiore produttività.

BIBLIOGRAFIA

- AUKEN E. & CHRISTIANSEN A.V., 2004 - Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics* 69, pp. 752-761.
- LLERA F.J., SATO M., NAKATSUKA K. & YOKOYAMA H., 1990 - Temperature dependence of the electrical resistivity of water-saturated rocks. *Geophysics* 55, pp. 576-585.
- MCNEILL J.D., 1990 - Use of electromagnetic methods for groundwater studies, in *Geotechnical and Environmental Geophysics*, edited by S.H. WARD, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa OK, vol. I, pp. 191-218.
- MEULI CH. & WEHRLE K., 2001 - "Spring Catchment". Pubblicato da SKAT (SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management) nella serie "Drinking Water Supply".
- PAGANO G., MENGHINI A. & FLORIS S., 2003 - Electrical tomography and TDEM prospection in the Chianciano thermal basin (Siena, Italy), *Annals of Geophysics* 46, pp. 501-512.
- SLATER L.D. & LESMES D., 2002 - IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics* 67, DOI:10.1190/1.1451353.
- SORENSEN K.I., EFFERSO F. & AUKEN E., 2001 - A hydrogeophysical investigation of the island of Drejo, *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 6, pp. 109-124.
- TAYLOR K., WIDMER M. & CHESLEY M., 1992 - Use of transient electromagnetics to define local hydrogeology in an arid alluvial environment. *Geophysics* 57, pp. 343-352.

