

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	7 dicembre 2007	173-188	2008
--------------------	--------------------------------	-----------------	---------	------

TOMMASO COLONNA (*), LUCA BIANCONI (*), LEONARDO FORCONI (**)
& FABIO MANTOVANI (*)

STUDIO DI POTENZIALI ACQUIFERI MEDIANTE INDAGINI GEOELETTRICHE NEL VILLAGGIO DI ITIGI (SINGIDA - TANZANIA)

Abstract - TOMMASO COLONNA, LUCA BIANCONI, LEONARDO FORCONI & FABIO MANTOVANI - Study of potential groundwaters by geoelectrical imaging surveys at Itigi village (Singida - Tanzania).

The resistivity method is a tool routinely applied for mapping the water saturation in a porous subsoil. We performed ten geoelectrical imaging surveys at the Itigi village (Singida - Tanzania) with the aim to localize the «best point» for the drilling of a new water well. The lack of fresh water is the most important problem of this area, that is one of the poorest of Tanzania. The regional geology is well-characterized by neogenic succession outcrops that cover precambrian bedrock (various groups, migmatite complex) by alluvial cemented coverage, constituted by debris materials cemented by limestone or kneaded by silt-sanded layers. The vegetation is characterized by typical bush with unfathomable brambles. The ground is generally coarse-grained sandy, with colour from hazel to dark-brown. The placement of ten survey lines was planned step by step, because the lack of detailed geological and topographic knowledge prevents to arrange them in advance. All the 2D and 3D electrical resistivity tomography show the superficial deposits (maximum depth about 30 meter) and a well recognizable granite bedrock characterized by uncertain discontinuities. The potential saturated levels in the superficial deposits have been studied considering the rocks parameters (porosity and cementing factor) and the water conductivity, that is particularly high (more than 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) in the whole region. By using the Archie's law we estimate the water saturation of potentially exploitable groundwaters. In July 2007 we indicated a 'best point' for the excavation of the well and in September 2007 the drilling confirmed a saturated level at the depth indicated in the previous study (20-35 meter).

(*) Centro di GeoTecnologie - Università di Siena - via Vetri Vecchi 34, I-52027 - San Giovanni Valdarno (AR) - colonna3@unisi.it; bianconi10@unisi.it; fabio.mantovani@unisi.it.

(**) Via Copernico, I-50063, Figline Valdarno (FI) - rouge2000@libero.it.

The excavated well is the most productive of the area (3.5 l/s): it confirmed the worst quality of the water (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH = 7.7) and the geological setting of the area.

Key words: ERT, 2D resistivity models, 3D resistivity model, Archie, Saturation, Groundwater.

Riassunto - TOMMASO COLONNA, LUCA BIANCONI, LEONARDO FORCONI & FABIO MANTOVANI - Studio di potenziali acquiferi mediante indagini geoelettriche nel villaggio di Itigi (Singida - Tanzania).

Nell'ambito della collaborazione tra il Centro di GeoTecnologie (Università degli Studi di Siena) e C.PP.S. water project nel maggio 2007 sono state realizzate indagini geoelettriche nel villaggio di Itigi (Regione di Singida - Tanzania centrale) con lo scopo di minimizzare il rischio di perforazione finalizzate alla captazione d'acqua. Il contesto ambientale è caratterizzato da un'estesa savana, con vegetazione costituita da arbusti e cespugli di rovi. In 10 giorni sono stati realizzati 10 stendimenti elettrici con un set di 48 elettrodi che hanno permesso di ottenere 15 tomografie elettriche. L'intera campagna di misura è stata supportata da rilievi GPS e triangolazioni a terra riferite a punti noti che hanno permesso di ricostruire un'elementare carta della zona in ambiente GIS. La geologia dell'area è caratterizzata da estesi affioramenti neogenici che ricoprono come coltre alluvionale s.l. un substrato precambrico costituito da complessi migmatitici. All'interno dei depositi superficiali sono state registrate zone con valori di resistività relativamente bassi. Questi potenziali livelli saturi sono stati studiati attraverso la legge di Archie: in corrispondenza dell'acquifero potenzialmente più produttivo è stato indicato un punto di perforazione, successivamente realizzata al termine della stagione secca. Lo scavo del pozzo ha confermato esattamente le ipotesi emerse dallo studio: è stato intercettato un livello saturo ad una profondità compresa tra 20 e 35 metri dal piano di campagna. Il pozzo è stato predisposto per un regime di esercizio d'estrazione pari a 3.5 litri/secondo. Grazie alla stratigrafia emersa dallo scavo ed alcune informazioni raccolte durante e dopo la perfezione è stato possibile realizzare una revisione critica dello studio che comunque si è rivelato efficace per gli scopi prefissati.

Parole chiave: Modelli 2D e 3D di resistività, Tomografie elettriche, Archie, Saturazione, Acquifero.

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro nasce dalla collaborazione tra il Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena e C.PP.S. water project, operante da anni in Tanzania nel settore della cooperazione internazionale. Il lavoro è stato effettuato presso il villaggio di Itigi (Tanzania) nella regione di Singida, a circa 170 Km a Nord-Ovest di Dodoma (Fig. 1). Il villaggio è noto in tutta la regione poiché ospita il St. Gaspar Hospital che da oltre 20 anni offre un valido servizio di assistenza sanitaria alla popolazione di tutta la regione, una delle più povere ed arretrate del paese.

All'interno della struttura ospedaliera sono presenti sei pozzi per la captazione di acqua che fanno fronte al fabbisogno di tutte le attività dell'ospedale e ai bisogni della popolazione locale. La recente espansione del villaggio ha richiesto la progettazione di nuovi pozzi: sono state pertanto pianificate indagini



Fig. 1 - Inquadramento geografico dell'area di studio.

geoelettriche mirate a minimizzare il rischio di perforazione finalizzate alla captazione d'acqua.

2. CONTESTO GEOLOGICO AMBIENTALE

Dalle informazioni disponibili non risulta alcun rilevamento geologico pregresso nella zona oggetto di studio e non si dispone di una cartografia geologica di dettaglio. Partendo da considerazioni su scala regionale e dall'osservazione diretta compiuta durante i rilievi geoelettrici, l'area in questione può essere inserita in un contesto caratterizzato da vastissimi affioramenti di una successione neogenica che ricopre come coltre alluvionale s.l. un substrato precambrico (Gruppi vari) costituito da complessi migmatitici.



Fig. 2 - Area di lavoro in prossimità del S. Gaspar Hospital. Sullo sfondo si nota la pompa eoliana operativa all'interno del plesso ospedaliero.

La morfologia della zona è piuttosto piatta e si attesta ad una quota di circa 1300m: dalla pianura emergono sporadiche colline dove affiorano inselberg granitici a testimonianza del Basamento ormai eroso. Al di sopra delle rocce del Basamento giacciono direttamente i Depositi Superficiali con spessore variabile costituiti da Coltri alluvionali formate da materiale detritico grossolano cementato da calcare e Depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi. Le stratigrafie emerse dai pochi sondaggi realizzati nell'area hanno confermato questo quadro geologico ed hanno escluso la presenza di livelli argillosi nel sottosuolo.

Il contesto ambientale è caratterizzato da un'estesa savana: sono presenti suoli estremamente secchi, generalmente sabbiosi a grana grossa, di colore da marrone chiaro a rosso bruno con un elevato grado di cementazione (Fig. 2).

3. DATI ED IMPOSTAZIONE DEL LAVORO

L'area nella quale si sono svolte le indagini geofisiche corrisponde ad un quadrilatero (400 m x 180 m) posto al confine Sud-Est dell'area dell'ospedale.

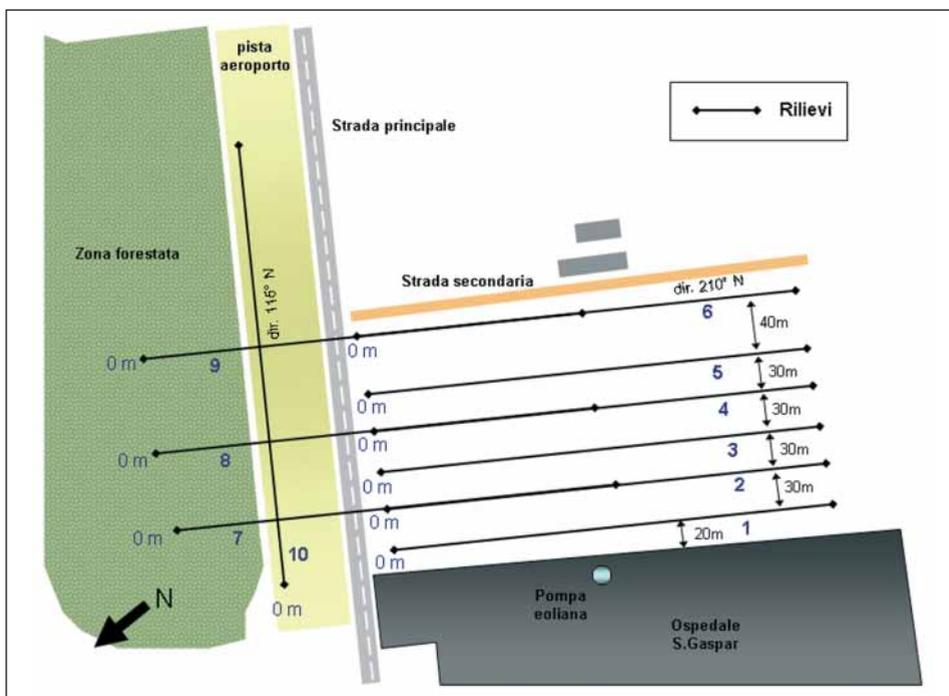


Fig. 3 - Il posizionamento dei rilievi all'esterno del S. Gaspar Hospital. Tutti gli stendimenti hanno una lunghezza di 470 metri. I rilievi 7, 8 e 9 sono sovrapposti rispettivamente per 235 metri ai rilievi 2, 4 e 6. Per i primi 9 stendimenti il primo elettrodo si trova a NE, mentre per il decimo stendimento (ortogonale ai precedenti) si trova a NO.

L'assenza di una cartografica di dettaglio, le scarse informazioni geologiche dell'area, le lacunose informazioni stratigrafiche dei pozzi limitrofi e la necessità di operare su un'area potenzialmente vastissima ha suggerito di pianificare in corso d'opera il posizionamento degli stendimenti alla luce delle evidenze emerse dai modelli di resistività.

La Fig. 3 mostra uno schema essenziale della localizzazione degli stendimenti: per la realizzazione di essa sono stati utilizzati dei punti di riferimento fissi sul campo. A completamento delle informazioni cartografiche sono state acquisite le coordinate geografiche relative a ciascun rilievo mediante acquisizione GPS.

All'interno dell'area indagata si colloca un pozzo scavato a mano fino ad una profondità di circa 10 metri: durante il periodo del rilievo geofisico questo pozzo è risultato completamente secco. I pozzi all'interno del perimetro ospedaliero hanno produttività variabili e sono caratterizzati da un grado di salinità che richiede un impianto di osmosi per il trattamento e potabilizzazione dell'acqua.

Il sondaggio più prossimo all'area di lavoro è derivato da una perforazione pregressa realizzata per la messa in funzione di un pozzo con pompa eolica all'interno del perimetro dell'ospedale (Fig. 2). La presenza di edifici nelle immediate vicinanze del pozzo non hanno permesso una taratura dei valori di resistività mediante la realizzazione di un sondaggio elettrico verticale.

4. METODOLOGIA

Nei 10 giorni di rilievi di campagna sono stati realizzati 10 stendimenti elettrici utilizzando un georesistivometro ABEM Terrameter SAS 1000 ed un set di 48 elettrodi in acciaio con spaziatura interelettrodica di 10 m. Per tutti i rilievi è stato utilizzato un metodo di acquisizione Wenner-Schlumberger. In alcune zone sono state riscontrate elevate resistenze di contatto: inumidendo il terreno attorno all'elettrodo la problematica è stata facilmente risolta. Per ciascun rilievo meno del 4% delle misure è risultato affetto da un errore di acquisizione superiore al 10%: questo ha permesso di invertire più del 96% delle misure di resistività apparente raccolte per ciascuna pseudosezione.

L'elaborazione delle misure mediante software di inversione Res2Dinv (Gecom Software) ha permesso di ottenere tomografie elettriche con risoluzione spaziale congeniale per lo studio di eventuali livelli saturi. Concatenando le misure di diversi rilievi è stato possibile realizzare piante di resistività attraverso il software di inversione Res3Dinv. Questo processo ha portato alla creazione di un modello numerico di resistività 2D e $\frac{1}{2}$, successivamente visualizzato ed elaborato attraverso il software RockWorks (RockWare).

La fase di interpretazione ha previsto un accurato studio degli spessori indagati con particolare attenzione a possibili discontinuità presenti nel basamento granitico ed alle zone a maggior saturazione localizzate all'interno dei depositi superficiali. Si è quindi deciso di analizzare i modelli di resistività utilizzando la legge di Archie stimolati da alcune condizioni particolarmente favorevoli a questo approccio: la componente argillosa nell'assetto geologico locale è completamente assente e il grado di salinità delle acque di falda nell'intera regione presenta valori mediamente molto elevati. Tutti i pozzi in un raggio di 3 km prelevano acqua con conducibilità non inferiori a 2500 μ Siemens/cm, rendendo indispensabile l'utilizzo di impianti per l'osmosi. Queste condizioni al contorno sono prossime alle ipotesi ideali per cui la legge di Archie risulta efficace nello studio della saturazione dei terreni attraverso misure di resistività.

Il risultato di questa analisi ha permesso di localizzare un «best point» idoneo per la perforazione, realizzata 4 mesi dopo l'indagine geoelettrica. Le stratigrafie emerse dal sondaggio ed i parametri idraulici del pozzo hanno consentito uno studio a posteriori dei modelli di resistività.

5. RISULTATI ED ANALISI DEI DATI

Il primo prodotto ottenuto dai rilievi geoelettrici è costituito da 10 sezioni di resistività (Fig. 4) la cui interpretazione in chiave geologica risulta agevole e compatibile con le informazioni a disposizione.

Tutte le tomografie evidenziano chiaramente i Depositi Superficiali: questa copertura ha uno spessore variabile che raramente supera i 30 m ed è caratterizzata da valori di resistività inferiori a 250 Ωm . All'interno di questo layer si trovano «sacche» di resistività con valori inferiori a 50 Ωm , che segnalano un contenuto maggiore di acqua.

In tutti i modelli di resistività è evidente il Basamento granitico caratterizzato da valori di resistività superiori a 250 Ωm ; questi valori sono compatibili con quelli presenti in letteratura. In molte aree questo Basamento appare notevolmente compatto e poco fratturato come testimoniano valori di resistività maggiori di 1000 Ωm omogeneamente diffusi. È possibile riconoscere uno strato intermedio che separa il Basamento dai Depositi Superficiali, caratterizzato da valori di resistività compresi tra 250 Ωm e 1000 Ωm che aumentano gradualmente all'aumentare della profondità: si tratta probabilmente di una fascia di spessore variabile formata da granito alterato o meno compatto.

In fase di elaborazione dei dati in campagna ci si è resi conto che la tomografia 3 presentava una significativa discontinuità di resistività lungo l'asse centrale della sezione, caratterizzata da valori compresi tra 100 e 600 Ωm . Con l'obiettivo di indagare un'eventuale linea di debolezza del Basamento sono stati pianificati due ulteriori stendimenti paralleli (rilievo 2 e 4) distanti 30 m dal rilievo 3. I modelli di resistività ottenuti hanno confermato solo in parte questa ipotesi: la discontinuità verticale nelle tomografie 2 e 4 risulta decisamente più debole e sembra rastremarsi proseguendo in direzione SE-NO.

Le tomografie 3, 4, 5 e 6 presentano una zona caratterizzata da valori di resistività inferiori a 250 Ωm (LR1 ⁽¹⁾ in Fig. 5) lungo una fascia compresa tra 310 e 340 m, che raggiunge una profondità massima di 40 metri. La caratteristica forma a «goccia» sembra suggerire la presenza di un volume potenzialmente saturo posizionato tra i Depositi Superficiali ed il Basamento granitico. Nonostante queste indicazioni, le prime 6 tomografie hanno evidenziato Depositi Superficiali generalmente più ricchi di acqua nella zona più settentrionale. La profondità di queste «sacche» di resistività inferiore a 50 Ωm è perfettamente compatibile con la profondità media del livello statico dei pozzi attivi all'interno dell'ospedale. In particolare la tomografia 1 distante appena 30 m dalla pompa eoliana evidenzia un significativo layer a bassa resistività ad una profondità compresa tra 10 e 25 m.

⁽¹⁾ LR: low resistivity.

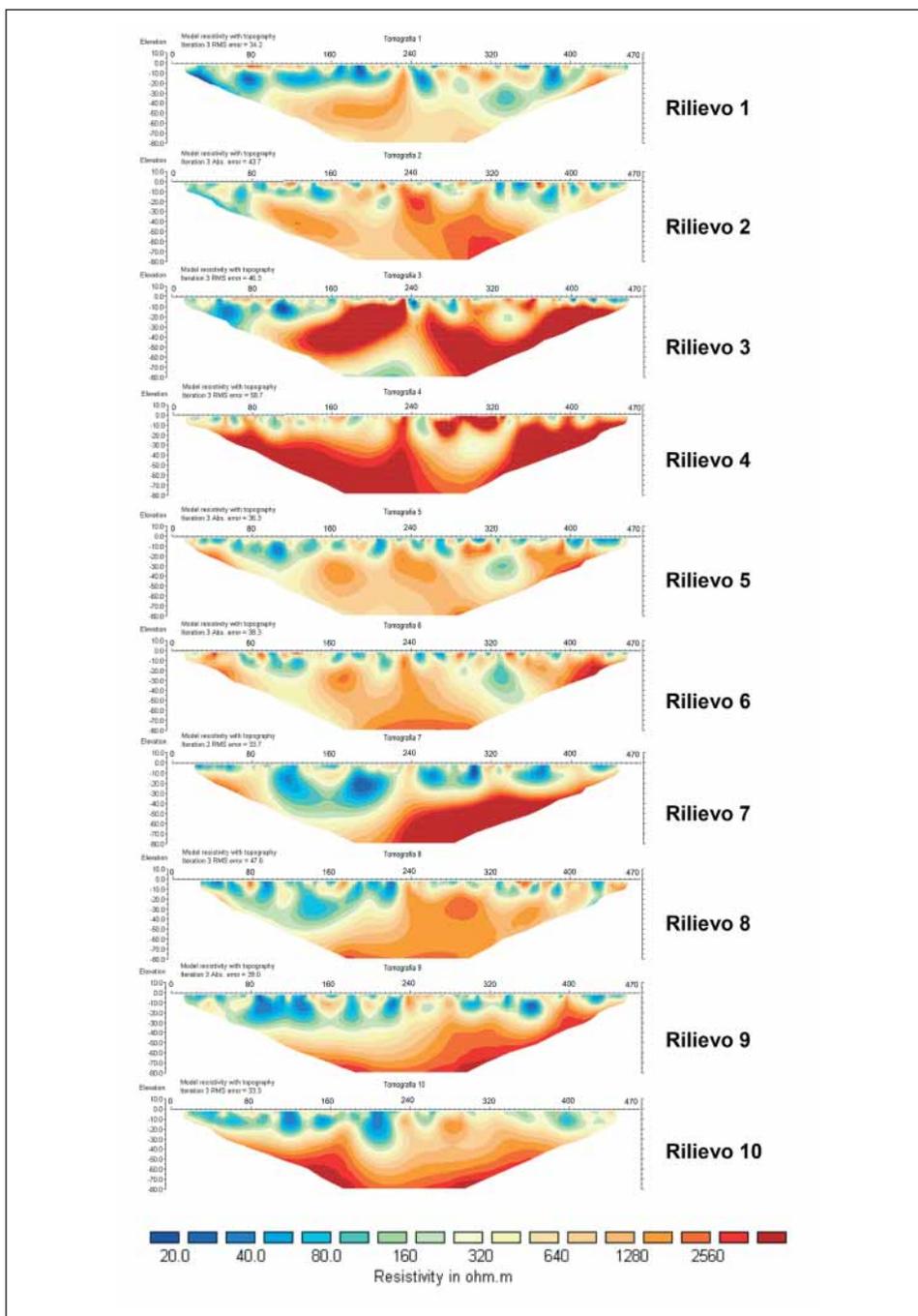


Fig. 4 - Quadro completo delle tomografie elettriche realizzate.

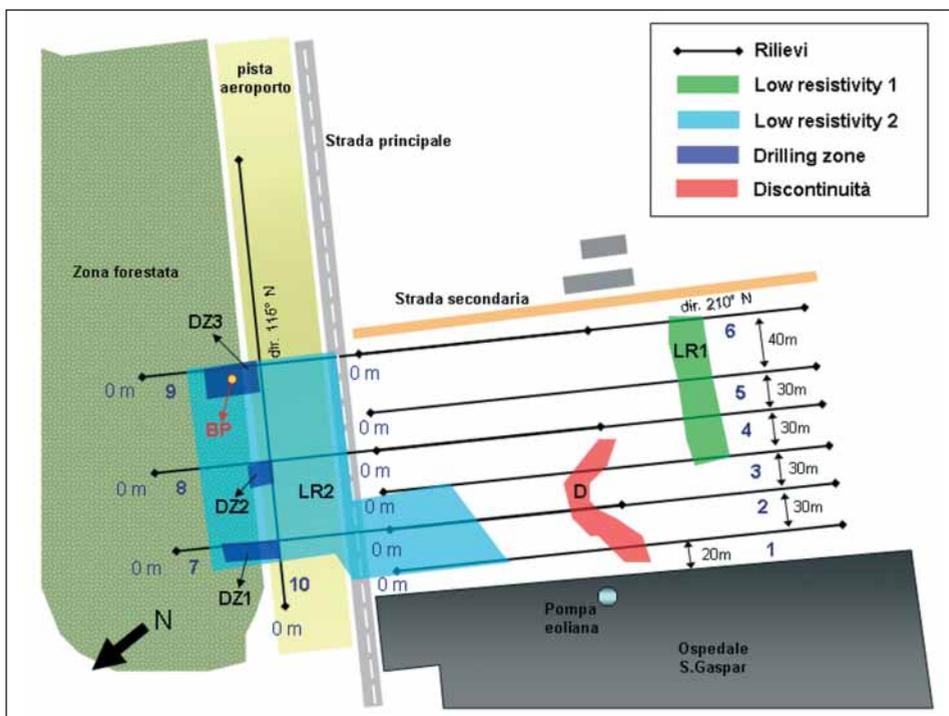


Fig. 5 - Quadro d'unione delle principali evidenze geoelettriche. In rosso (D) un'incerta linea di debolezza del Basamento granitico a profondità elevata (60-80 m). In verde una zona (LR1) potenzialmente satura all'interno dei Depositi Superficiali, ritenuta troppo vulnerabile e superficiale per la captazione. In azzurro una vasta area (LR2) in cui lo spessore dello strato granitico alterato aumenta: le aree DZ sono candidate per una perforazione e nel punto BP è stato posizionato il pozzo.

Queste considerazioni hanno suggerito di pianificare gli ultimi 4 stendimenti più a nord-est rispetto ai precedenti, nell'area occupata dalla pista dell'aeroporto e dalla strada. Le tomografie 7, 8 e 9 mettono in luce chiaramente un'area LR2 (Fig. 5) in cui il tetto del Basamento granitico sembra abbassarsi con un conseguente inspessimento dei depositi superficiali, i quali presentano valori di resistività generalmente bassi. Questo assetto si ritrova anche nell'unica tomografia (10) avente direzione NO-SE, ortogonale a tutte le altre: l'abbassamento del basamento e le ampie aree a bassa resistività ($< 250 \Omega\text{m}$) sono confermate.

All'interno dell'area LR⁽²⁾ si distinguono chiaramente 3 zone circoscritte (DZ1 - DZ2 - DZ3 in Fig. 5) caratterizzate da resistività particolarmente basse

(²) DZ: drilling zone.

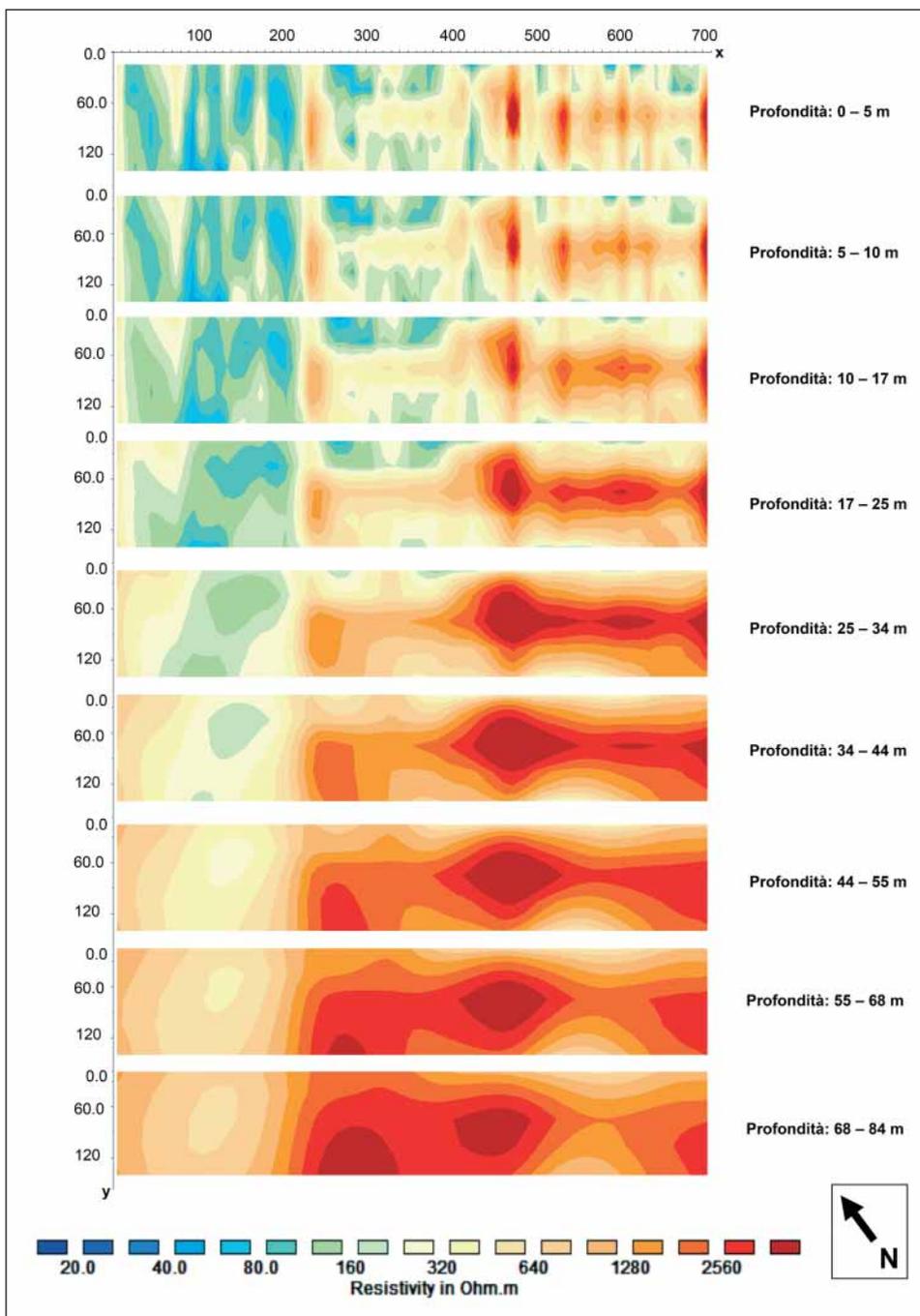


Fig. 6 - Le piante di resistività ottenute dalla concatenazione delle prime nove tomografie.

(< 40 Ωm): la probabilità di incontrare livelli saturi ad una profondità compresa tra 10 m e 40 m è elevata. Queste aree sono state indicate ai tecnici di CPPS come «potential drilling zone». Pur non avendo a disposizione elementi sufficienti per valutare la produttività e la dipendenza dalla stagionalità è stato indicato come best point (BP) per la captazione un punto all'interno della DZ3.

Attraverso un processo di concatenazione dei primi 9 rilievi è stato prodotto un modello 2D $\frac{1}{2}$ dal quale sono state ricavate 9 piante di resistività a diverse profondità (Fig. 6). La rappresentazione in pianta consente di apprezzare meglio alcuni dettagli già messi in luce dalle sezioni. In particolare si nota lo spessore più consistente del livello saturo in corrispondenza della zona DZ3, la quale rientra in una fascia in cui lo strato di alterazione si presenta con un potenza maggiore. Va altresì segnalato che, a causa della distribuzione irregolare degli stendimenti, la rappresentazione in pianta evidenzia geometrie distorte (soprattutto a bassa e media profondità) generate dal processo di inversione e dal successivo processo di interpolazione: l'affidabilità del modello è pertanto minore rispetto a quella delle sezioni e serve solo per fornire una rappresentazione qualitativa della distribuzione dei valori di resistività.

La visualizzazione tridimensionale dei modelli di resistività (Fig. 7) mette in luce chiaramente l'andamento del Basamento granitico e lo spessore dei Depositi Superficiali. Tagliando i valori di resistività inferiori a 250 Ωm si apprezza la distribuzione dei depositi sabbiosi che potenzialmente ospitano acquiferi superficiali. Togliendo i valori di resistività inferiori a 1000 Ωm appare evidente la geometria del Basamento granitico, con l'abbassamento del tetto in corrispondenza della zona LR2.

Con la finalità di minimizzare il rischio minerario, prima della realizzazione della perforazione in corrispondenza della zona DZ3 si è cercato di studiare il grado di saturazione S in relazione alla resistività ρ della roccia utilizzando la legge di Archie:

$$S = \sqrt[n]{a \frac{\rho_0}{\rho} \frac{1}{\Phi^m}}$$

dove i parametri m (fattore di cementazione), Φ (porosità), a (fattore legato alla geometria dei pori), ρ_0 (resistività dell'acqua presente nei pori) e n (esponente di saturazione) ⁽³⁾ vanno studiati tenendo in considerazione l'assetto geologico. Poiché i depositi neogenici di quest'area possono essere considerati rocce sedimentarie da moderatamente a ben cementate, la costante di proporzionalità a può variare entro un range di 0.6-0.7: per il nostro studio è stata posta $a = 0.65$.

Tutte le informazioni raccolte sul sito indagato sembrano confermare l'ipotesi che con l'aumento della profondità la frazione sabbioso-ghiaiosa ed il grado

⁽³⁾ In questo lavoro non viene discusso il range di variabilità di n , che si assume essere pari a 2.

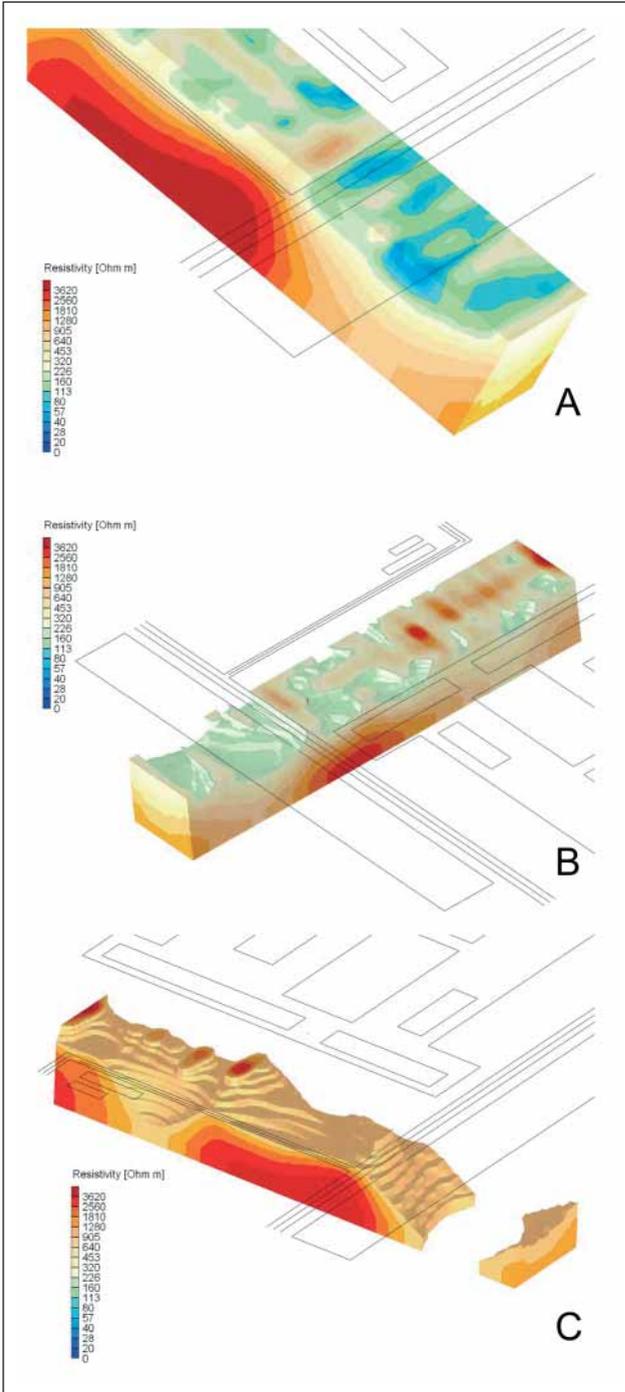


Fig. 7 - Modelli tridimensionali di resistività. Il modello A mostra un dettaglio della zona più settentrionale dell'area indagata. Il modello B è stato ottenuto tagliando tutti i valori di resistività inferiori a 250 Ωm , mentre il modello C eliminando i valori inferiori a 1000 Ωm .

di alterazione del Basamento granitico diminuiscono: questo ha permesso di assumere un incremento del fattore di cementazione m ed una diminuzione della porosità Φ all'aumentare della profondità. La funzione di saturazione è stata pertanto studiata con tre coppie di valori (Φ, m) (tab. 1).

Φ	0.35	0.30	0.25
m	1.7	1.9	2.1

Tab. 1 - Indice di cementazione e porosità utilizzati per la stima del grado di saturazione.

Tutti i pozzi all'interno del St. Gaspar Hospital emungono acqua di pessima qualità da acquiferi ospitati all'interno dei Depositi superficiali: la conducibilità media misurata è $2500 \mu\text{Siemens/cm}$. Il grafico in Fig. 8 mostra il grado di saturazione in funzione della resistività della roccia, per le tre coppie di valori (Φ, m) riportati in tab. 1. Si osserva che i valori di resistività della roccia compatibili con la completa saturazione aumentano con l'aumentare della profondità variando da $15 \Omega\text{m}$, per gli strati più superficiali, meno cementati e più porosi a $48 \Omega\text{m}$ per

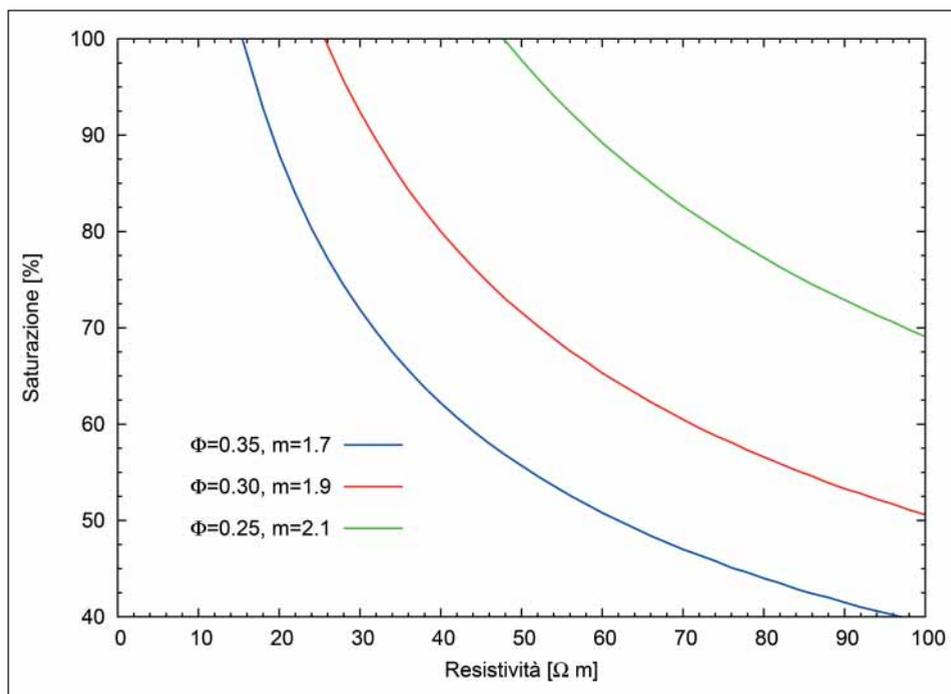


Fig. 8 - Rapporto tra grado di saturazione (%) e resistività apparente (Ωm) in relazione ai diversi indici di cementazione considerati. Il range di valori di resistività compreso all'interno della fascia rossa coincide con una saturazione assunta del 100%.

gli strati più profondi, più cementati e meno porosi. L'incertezza sul fattore a legato alla geometria dei pori introduce un errore sulla stima della resistività corrispondente a completa saturazione di circa l'8%.

Al termine di quest'analisi preliminare alla perforazione del pozzo nell'area DZ3, i valori di resistività registrati nella tomografia 9 tra il metro 80 ed il metro 135 fino ad una profondità di circa 30 sono compatibili con un livello saturo se si assume che i Depositi Superficiali siano molto cementati e caratterizzati da una porosità relativamente bassa. Queste considerazioni hanno spinto a privilegiare l'area DZ3 come la miglior candidata ad una perforazione, che, in caso di successo, avrebbe potuto attingere da un bacino saturo con un raggio d'influenza non inferiore a 70 metri.

6. LO SCAVO DEL POZZO

Lo scavo del pozzo in corrispondenza del Best Point indicato nella relazione tecnica è avvenuto nel settembre 2007, 4 mesi dopo l'indagine geoelettrica. Per la perforazione sono state utilizzate aste della lunghezza di 3 metri: al di sotto di un livello superficiale di circa 3 metri, prevalentemente sabbioso e debolmente argilloso, è stato intercettato uno strato sabbioso molto cementato che ha raggiunto i 21 metri di profondità. Il livello saturo, costituito da materiale sabbioso incoerente, è stato registrato da 21 a 42 metri di profondità; al di sotto di questo livello la perforazione ha incontrato roccia granitica parzialmente alterata. Lo scavo del pozzo è stato interrotto a 43 metri di profondità. La scarsa strumentazione a disposizione e le difficoltà di comunicazione con i tecnici locali hanno impedito di raccogliere ulteriori informazioni circa la porosità e la granulometria dei campioni estratti.

Dalle prove di portata è stato registrato un livello dinamico di 17 metri, mentre il livello statico dell'acqua si è assestato a 15 metri di profondità, ad un livello leggermente più alto dello strato saturo segnalato in fase di esportazione. Il pozzo è stato predisposto per un regime di esercizio d'estrazione pari a 3.5 litri/secondo: si tratta del pozzo più produttivo del villaggio di Itighi e del S. Gaspar Hospital. La qualità dell'acqua estratta, caratterizzata da un conducibilità molto elevata (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ed un pH debolmente basico (7.7), è simile a quella di tutti gli altri pozzi limitrofi.

7. CONCLUSIONI

Le evidenze stratigrafiche raccolte durante e dopo la perforazione del pozzo hanno sostanzialmente confermato le previsioni dello studio realizzato attraverso

so le tomografie elettriche. La campagna di misure di resistività compiuta nel villaggio di Itigi (Regione di Singida - Tanzania centrale) ha pertanto raggiunto lo scopo di minimizzare il rischio minerario in fase di perforazione per la ricerca d'acqua ed ha fornito preziose informazioni di natura geofisica, geologica ed idrogeologica.

- Da 10 rilievi è stato possibile realizzare sezioni, piante e modelli 3D di resistività che descrivono in modo coerente tra loro l'assetto geologico dell'area, costituito da Depositi Superficiali, un sottostante substrato alterato ed il Basamento granitico.
- Se si tiene conto che l'acquifero è stato intercettato al termine della stagione secca ad una profondità relativamente alta e che le tomografie evidenziano chiaramente uno strato saturo che si estende per parecchie decine di metri, si può affermare che il pozzo è poco vulnerabile ad inquinamenti ambientali superficiali e si candida per essere indipendente da penurie stagionali.
- Alla profondità di circa 40 metri la tomografia 9 presenta un deciso innalzamento dei valori di resistività ($> 250 \Omega\text{m}$), in corrispondenza dei quali la perforazione ha incontrato il Basamento granitico alterato.
- Assumendo una conducibilità dell'acqua pari a $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ (sostanzialmente confermata dal successivo prelievo), per avere una saturazione elevata nell'area indagata, lo studio attraverso la legge di Archie aveva previsto la presenza di una roccia con un grado di cementazione elevato ($m \geq 2.1$) ed una porosità non elevata ($\Phi \leq 0.25$). Queste caratteristiche sono state riscontrate in fase di perforazione
- L'attestazione del livello statico a 15 metri di profondità si colloca all'interno dell'area caratterizzata dai più bassi ($\rho < 50 \Omega\text{m}$) valori di resistività dell'intera tomografia 9. Non si esclude che la zona satura compresa tra 20 e 40 metri di profondità presenti valori di resistività più elevati ($50 \Omega\text{m} < \rho < 250 \Omega\text{m}$) a causa di una difficoltà di modellazione nel processo di inversione
- La stima del grado di saturazione nell'area della perforazione in funzione dei valori di resistività, dei parametri (Φ, m, a) delle rocce intercettate e della conducibilità dell'acqua potrà essere estesa in futuro ad altre zone per scavi di ulteriori pozzi.

8. BIBLIOGRAFIA

- ARCHIE G.E., 1942 - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Trans., AIME, (1942), v. 146, p. 54-62.
- FRAILEY S. M. & ASQUITH G.B., 1988 - Simultaneous Calculation of Archie Parameters m, n , and a , *Publications- West Texas Geological Society*, 2002, ISSU 111, pp. 177-192.

- LOKE M. & BARKER R., 1996 - Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44 (1996), pp. 131-152.
- REYNOLDS J., 1998 - *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Ed. Wiley, John and Sons, Inc.
- KELLER G.V., 1987 - Keller, Rock and mineral properties, physical laws, electromagnetic induction and rock properties. *Electromagn Meth Appl Geophys-Theory*, 1 (1987), pp. 13-48.
- OSIENSKY J.L., & WILLIAMS R.E., 1995 - Finite-Difference Simulation of the Application of Electrical Flow Through Conductive Contaminant Plumes. *Mine Water and The Environment*, International Mine Water Association, Vol. 14, pp. 39-56.