

# Le acque sulfuree nel contesto idrogeologico dell'area di Torre Mozza di Ugento ( Penisola salentina, Puglia )

G. C. Calò – R. Tinelli\*

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari  
Fax : +39 080 5963675 E-mail : r.tinelli@poliba.it

\*Autore di riferimento

## Riassunto

La perforazione di un pozzo profondo nei pressi di Torre Mozza di Ugento ha consentito di rilevare la presenza, al di sotto di uno spesso banco di argille, di acque sulfuree che andavano così ad aggiungersi a quelle della falda superficiale, della falda profonda ed a quelle marine di intrusione continentale.

Questo conferiva all'area di Torre Mozza un carattere di particolare interesse idrogeologico il cui studio ha richiesto, a causa della sua complessità, un attento e dettagliato esame degli elementi morfostrutturali che, coniugato con quelli su natura, chimismo ed idraulica delle acque sotterranee, ha consentito di definire dettagliatamente l'assetto idrogeologico dell'intera area.

Si è potuto così constatare come le acque della falda superficiale non abbiano origine diversa da quelle della falda profonda, ma che anzi siano proprio le stesse; la presenza delle acque superficiali, infatti, è solo da imputare ad un fattore meccanico costituito dal banco argilloso che, sbarrando il deflusso a mare della falda profonda, lo divide generando un flusso superficiale nelle calcareniti sovrastanti il banco ed uno profondo al di sotto dello stesso.

Le acque sulfuree, invece, sono risultate essere acque marine di origine profonda, ipotermali, a contenuto salino superiore a quello del mar Jonio e risultano localizzate in un'area molto limitata del basamento carbonatico mesozoico.

Quest'ultimo, inoltre, a causa delle intense vicissitudini tettoniche subite, si presenta disarticolato in vari settori caratterizzati da una propria evoluzione paleogeografica e geomorfologica.

E ciò, unitamente alla potente copertura miocenica ed alla pressione prodotta dalle coltri appenniniche sull'avampaese apulo, induce sulle acque sulfuree carichi idraulici, variabili da settore a settore, ma sempre superiori a quelli della falda principale.

Le correlazioni emerse, poi, fra i caratteri morfostrut-

turali dell'area e l'andamento dei principali parametri chimico-fisici ed idraulici della falda fanno ritenere che la risalita delle acque sulfuree avvenga attraverso le stesse faglie che hanno originato nei calcari le incisioni dei cosiddetti canali e che i successivi eventi tettonici hanno poi occultato sotto le argille.

Lo studio di queste acque è risultato di notevole interesse in quanto ha consentito di rilevare, sul versante ionico dell'avampaese apulo, situazioni idrogeologiche simili a quelle riscontrate sul versante adriatico, dove nel pozzo S. Nazario di Poggio Imperiale (Gargano) ed in quelli di S. Cesarea Terme (Salento) si riscontra la risalita di acque ipotermali sulfuree di origine profonda.

L'analogia idrodinamica di queste situazioni con quella di Torre Mozza, ha avvalorato ulteriormente l'ipotesi, già avanzata in letteratura, circa l'esistenza di fluidi caldi e profondi che risalgono in superficie, attraverso il substrato calcareo prepliocenico, sotto la pressione prodotta dalla convergenza delle coltri appenniniche sull'avampaese apulo.

*Parole chiave:* Falda – Acquifero costiero – Acque connate – Acque sulfuree

*Keywords :* Groundwater – Coastal aquifer – Connate water – Sulfur water

## Abstract

*A deep borehole near Torre Mozza di Ugento has allowed to survey the presence of sulfur waters under a thick bank of clays, which adds to shallow groundwater, deep groundwater and intruding seawater.*

*This made the Torre Mozza area of particular interest, and its study, because of its complexity, required an accurate and detailed investigation of the morphostructural elements which, related to others concerning nature, chemism, and hydraulics of groundwaters, has produced a detailed hydrogeological picture of the whole area.*

*This way one can ascertain that shallow aquifer has the same origin as deep aquifer, in fact they are the same waters.*

*For, the presence of shallow water is only due to a mechanical factor of the clay bank which, by hindering discharge of deep aquifer into the sea, divides it thus generating a shallow flow into calcarenites located above the bank and a deep one below.*

*Conversely, sulfur water turns out to be deep-origin, hypothermal seawater with salt content higher than the Jonian sea one, and it is localised in a very small area of the Mesozoic carbonate basement.*

*This last, owing to intense tectonic events, appears disjoined in various sectors which are characterised by a paleogeographic and geomorphologic evolution of its own. And this, together with the very thick Miocene top and the pressure produced by Appennine sheets on the Apulian foreland, entails hydraulic heads on sulfur waters, which vary from sector to sector but are always higher than the main groundwater ones.*

*Correlations among morphostructural features in the area and the trend of the main hydraulic parameters of groundwater, let one assume that the up-flowing of sulfur water takes place by means of faults which originated the so called "canaloni" grooves into limestones, and later tectonic events hid them under clays.*

*The study of these waters proved to be of great interest because they enabled the determination of hydrological situations, of the Jonian slope of the Apulian foreland, similar to those found at the Adriatic slope, where deep origin hypothermal sulfur waters go up in the S. Nazario di Poggio Imperiale (Gargano) well and in those of S. Cesarea Terme (Salento).*

*The hydrodynamic analogy of these situations and the considerable chemical-physical closeness of S. Cesarea Terme waters to those of Torre Mozza, has further strengthened the hypothesis, already put forward in the literature, about the presence of warm and deep fluid which go up to the surface, through the pre-Pliocene calcareous substratum, under the pressure produced by the convergence of Appennine sheets on the Apulian foreland.*

## **Premessa**

E' abbastanza frequente nel Salento imbattersi in lenti di acque sulfuree, quando si eseguono perforazioni di pozzi che interessano terreni miocenici sovrapposti ai calcari cretacei.

Solitamente si tratta di piccole venute il cui tenore in solfuri è presumibilmente dovuto all'azione di batteri solfato-riduttori presenti nei livelli di lignite intrappolati alla base dei sedimenti miocenici che, in seguito a fenomeni tettonici, sono venuti a contatto con le acque

marine fossili realizzando un habitat termosalino ottimale per il loro sviluppo. Questo fa sì che tali fenomeni, quando sono localizzati nell'entroterra, risultino molto modesti mentre, se localizzati nei depositi sottomarini, risultano cospicui e perenni come nel caso delle sorgenti ipotermali di S. Cesarea Terme (Calò & Tinelli, 1995) o della sorgente di S. Nazario sul versante nord del Gargano (Maggiore & Mongelli, 1991; Maggiore et al., 1994); in quest'ultimo caso, però, qui a risalire lungo i sistemi di faglie che interessano il substrato, non sono le acque marine, ma quelle calde e salmastre intrappolate sotto la potente coltre dei terreni pliocenici dell'avanfossa.

Sono situazioni queste che hanno avuto carattere di unicità per tutta la Puglia, fino a quando non ci si è imbattuti nelle acque sulfuree di Torre Mozza, una località disposta, simmetricamente a S. Cesarea Terme, nella parte bassa del litorale jonico; un rinvenimento del tutto fortuito, favorito dalla perforazione di un pozzo per la captazione di acque marine di intrusione continentale presso il laghetto di bonifica Spunderati Nord, che si è però subito rilevato di grande interesse. E' parso subito, infatti, che questo rinvenimento potesse rappresentare una conferma dell'ipotesi, già avanzata in letteratura, circa l'esistenza di fluidi caldi e profondi che risalgono in superficie, attraverso il substrato calcareo preprioceno, sotto la pressione prodotta dalla convergenza delle coltri appenniniche sull'avampaese apulo (Pagliarulo, 1996; Maggiore & Pagliarulo, 1999).

Di fatto, con tale rinvenimento, l'area di Torre Mozza assumeva un carattere di grande interesse idrogeologico, oltre che di notevole complessità, alla cui definizione si è pervenuti attraverso una attenta correlazione delle informazioni desunte da un puntuale studio multidisciplinare.

## **Lineamenti geologici regionali**

L'area di Torre Mozza (Fig.1) si colloca all'estremità meridionale della piattaforma apulo garganica in un tipico ambiente di avampaese, caratterizzato dalla presenza di un basamento carbonatico mesozoico di circa 6000 metri di spessore, a luoghi ricoperto da depositi trasgressivi di età terziaria e/o quaternaria.

L'assetto strutturale, condizionato dalla presenza di numerosi sistemi di faglie dirette con prevalente direzione NW-SE, presenta una regolare alternanza di rilievi morfo-strutturali (localmente detti Serre) e depressioni tettoniche.

I rilievi strutturali sono di norma evidenziati dalla presenza in affioramento delle rocce calcareo-dolomitiche del basamento mesozoico; al contrario le depressioni tettoniche, ove tale basamento è dislocato a varia profondità nel sottosuolo, sono costantemente ricoperte

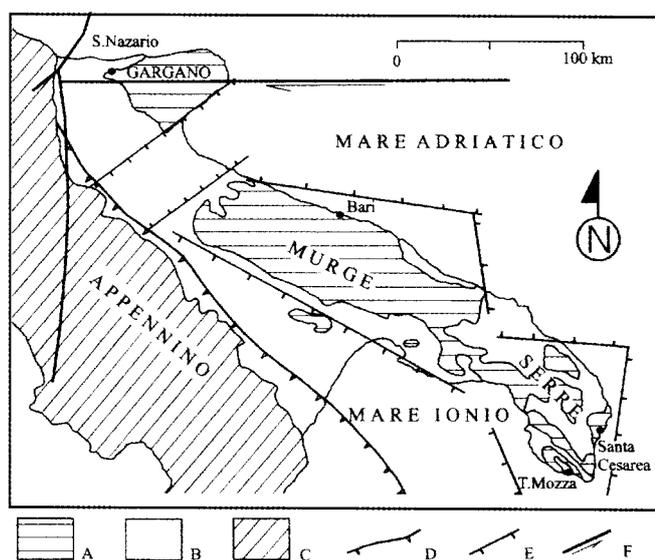


Fig. 1 - Schema geologico dell'Italia meridionale:  
 A) successione carbonatica dell'avampaese;  
 B) successione terrigena plio-pleistocenica dell'avanfossa;  
 C) successioni appenniniche;  
 D) fronte sepolto dell'alloctono;  
 E) faglia diretta;  
 F) faglia trascorrente.

da formazioni di età più recente.

Ed il tutto in stretta correlazione con gli eventi che hanno segnato la storia geologica del Salento.

Un'importante fase deformativa tardo-cretacica, infatti, provocò il sollevamento generalizzato e l'emersione dal mare dell'intero territorio salentino per un'estensione probabilmente maggiore dell'attuale: in questa fase il basamento calcareo subì delle lievi deformazioni che si palesarono con la formazione di una serie di pieghe ad ampio raggio di curvatura e con asse di allungamento in direzione NW-SE.

Quindi, il basamento subì un generale riassetto, dominato da un'intensa tettonica disgiuntiva con formazione di numerosi sistemi di faglie dirette che disarticolano il basamento suddividendolo in vari settori, ognuno dei quali ha poi seguito una sua propria evoluzione paleogeografica e geomorfologica.

Alcuni settori rimasero in posizione topografica più elevata rispetto a quelli adiacenti (strutture tipo Horst), altri furono variamente ribassati, trasformandosi in vere e proprie depressioni tettoniche (strutture tipo Graben).

Durante il Terziario ed il Quaternario il territorio fu interessato da ulteriori cicli di sollecitazioni, sia deformative che tensionali, che accentuarono una evoluzione morfo-strutturale differenziata, contribuendo a creare una successione paleogeografica di notevole complessità.

Le oscillazioni di quota del livello marino ed i movimenti relativi delle aree continentali determinarono, infatti, il ciclico susseguirsi di numerose ingressioni marine, che interessarono particolarmente le zone topo-

grafiche più depresse del Salento.

Le aree invase dal mare, di volta in volta differenti, acquisirono le caratteristiche di bacini di sedimentazione subsidenti e furono, pertanto, interessate da vari e diversificati cicli deposizionali dalle caratteristiche litostratigrafiche e sequenziali differenti, da zona a zona, in funzione della batimetria e del grado di evoluzione dei singoli bacini.

### Caratteri morfo-strutturali dell'area in esame

L'area in esame, compresa fra i villaggi Robinson e Marini in agro di Ugento, si estende alle pendici degli altopiani costieri noti come Serre salentine e presenta una fascia litorale, costituita da spiagge sabbiose alternate a tratti di costa rocciosa bassa, delimitata nell'entroterra da cordoni di dune, in parte attuali ed in parte fossili, di modesta altezza (Fig. 2).

Le zone retrodunali, invece, sono caratterizzate dalla presenza di depressioni sottostanti il livello marino (bacini), in comunicazione tra di loro e con il mare tramite canali a marea.

Tali zone, una volta occupate da vaste paludi costiere (paduli), sono state, nel recente passato, risanate da importanti opere di bonifica che le hanno completamente recuperate alle attività umane.

Alle spalle dei bacini di bonifica, verso l'entroterra, si innalzano le ripide scarpate delle Serre salentine solcate, a luoghi, da profonde incisioni (canaloni); fra le Serre e la piana litorale è presente, poi, una stretta e lievemente ondulata striscia di depositi colluviali, costituiti principalmente da terre rosse.

I termini litologici di età mesozoica affioranti sui rilievi delle Serre sono localmente riferibili alla formazione dei "Calcari di Melissano" (Cretaceo sup.), unità costituita in prevalenza da calcari microcristallini biancastri o grigi, con intercalati livelli bioclastici a Rudiste ed orizzonti dolomitizzati di aspetto sub-cristallino o saccharoide e di colore grigio-marroncino o nocciola.

In corrispondenza della zona costiera, il basamento calcareo mesozoico risulta invece dislocato da sistemi di faglie dirette sub-verticali, orientate prevalentemente in direzione NW-SE, a profondità oscillanti tra gli 80 ed i 100 metri rispetto al p.c., ove giace ricoperto da depositi di età più recente.

La piana costiera, infatti, a causa dei notevoli ribassamenti, ha subito vari eventi di ingressione marina, acquistando in più fasi le caratteristiche di un bacino di sedimentazione subsidente; attualmente essa ospita una potente successione (circa 100 metri di spessore) di depositi di origine marina, di età compresa tra il Pliocene ed il Quaternario (Fig. 3).

I terreni più superficiali sono costituiti da limi sabbiosi e/o argillosi bruno-nerastri, di chiara origine palustre.

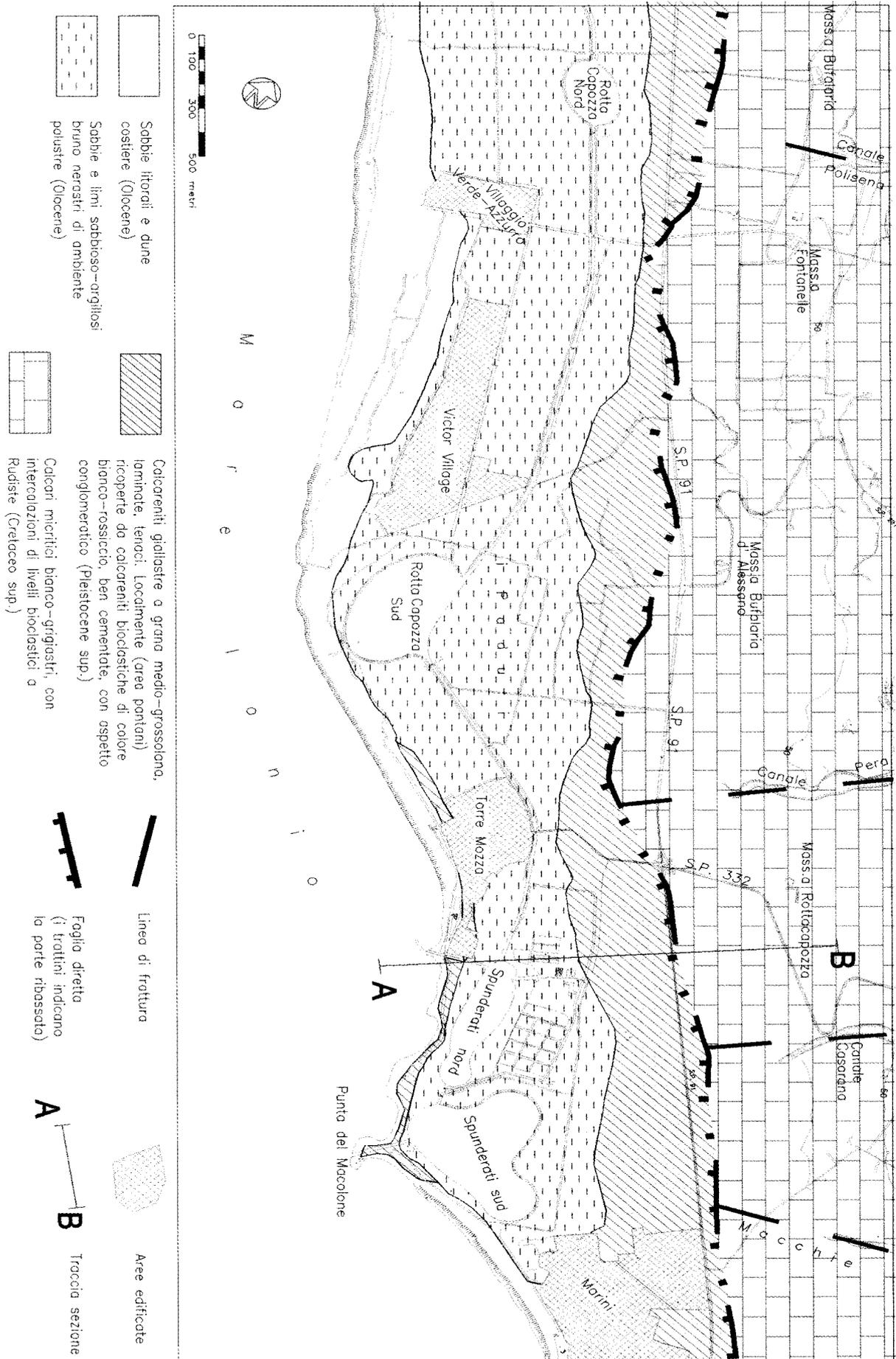


Fig. 2 - Carta idrogeologica dell'area di Torre Mozza

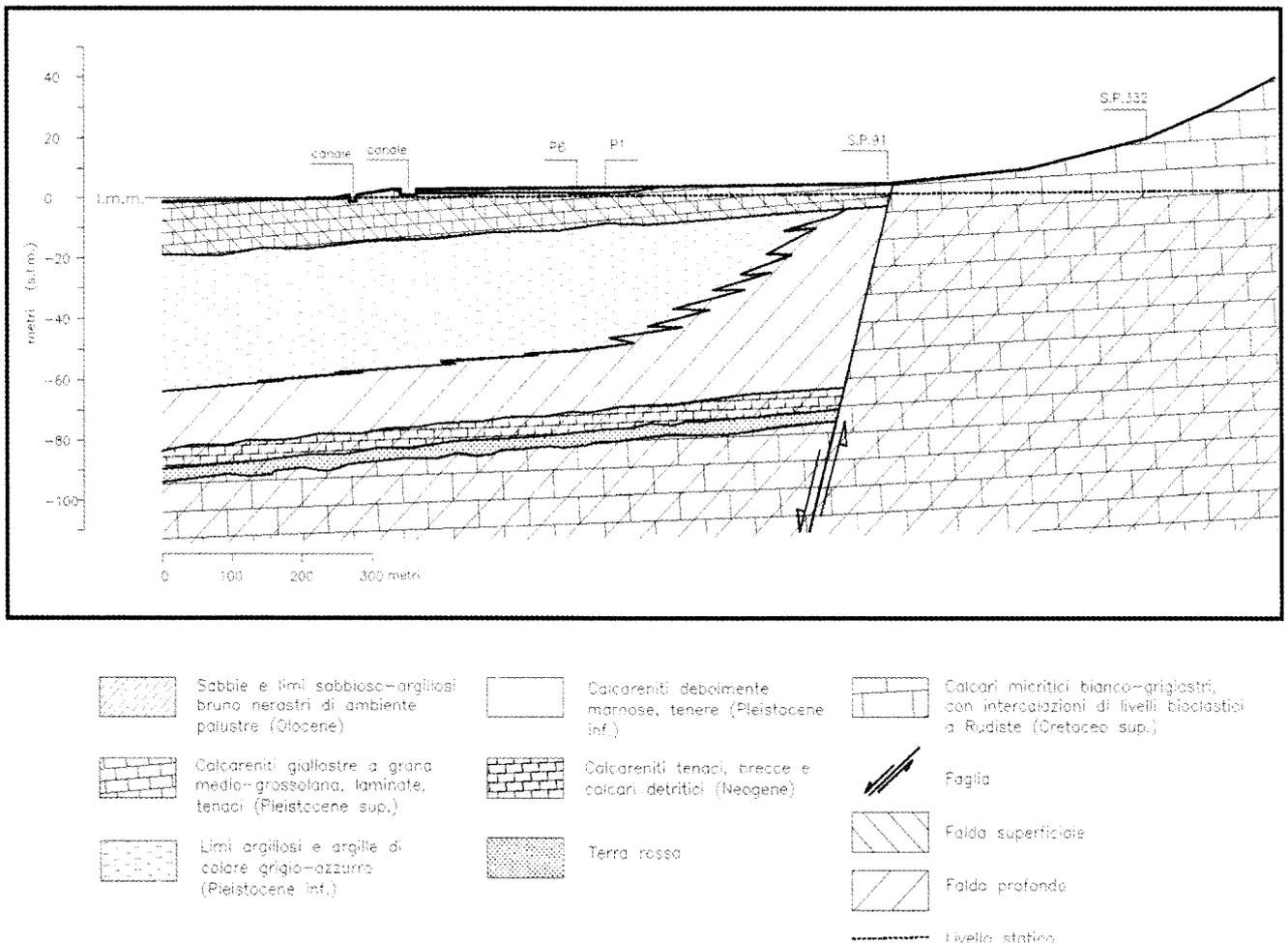


Fig. 3 - Sezione idrogeologica.

con abbondanti percentuali di sostanza organica. Si tratta di depositi di età recente (Olocene) aventi, in corrispondenza delle aree più depresse, uno spessore massimo di alcuni metri.

Al di sotto dei depositi palustri, o talora direttamente in affioramento, si rinviene una successione di calcareniti riferibili al Pleistocene superiore ed avente una potenza di circa 7-10 metri.

In particolare la successione, che è direttamente osservabile lungo il canale di bonifica presente nell'area, è ascrivibile a due distinti cicli sedimentari di età post-santerniana.

Il livello inferiore è rappresentato da calcareniti giallastre a grana medio-grossolana, a laminazione ondulata-incrociata tipica di strutture tipo ripples prodotte da correnti trattive su fondali poco profondi, mentre quello superiore è costituito da calcareniti bioclastiche di colore bianco-rossiccio, ben cementate, contenenti clasti che conferiscono localmente alla successione un aspetto conglomeratico.

Il carattere trasgressivo di questo livello è testimoniato dalla presenza, a letto, di un livello di terra rossa di

spessore decimetrico; sulla base della ricostruzione della variazione della linea di costa (Cotecchia et al., 1969) questi depositi sono riferibili ad un intervallo di tempo tra 40.000 e 20.000 anni fa (Neortotireniano).

I livelli calcarenitici giacciono al di sopra di una potente successione, riferibile al Pleistocene inferiore, di sedimenti prevalentemente sabbioso-limoso-argillosi: si tratta di una sequenza di circa 60 metri costituita, nella parte alta, da limi sabbiosi giallo-grigiastri passanti inferiormente a limi sabbioso-argillosi ed argille limose di colore grigio-azzurro o verdastro.

I depositi argillosi poggiano su di un livello, riferibile al Pleistocene inferiore e di spessore variabile tra i 15 ed i 30 metri, di calcareniti debolmente marnose grigio-chiaro, piuttosto tenere e con abbondanti macrofossili, alternate a livelli di sabbie limose dello stesso colore, molto addensate e con locali passaggi a limi argillosi grigiastri.

Sotto i depositi sabbioso-calcarenitici è stato trovato localmente un livello, di spessore e caratteristiche assai variabili sia in senso orizzontale che verticale, costituito da calcareniti grigio-nocciola, spesso fortemente dia-

genizzate e tenaci, alternate a brecce calcaree, calcari detritici o brecciati, conglomerati a matrice limosa, alla cui base è presente un discreto orizzonte di terra rossa. Al di sotto di questi litotipi di difficile datazione (Neogene), si trova il substrato calcareo-dolomitico mesozoico, costituito da litotipi prettamente calcarei riferibili alla formazione dei "Calcarei di Melissano" (Cretaceo sup.) precedentemente descritta. I calcari mesozoici appaiono localmente interessati da evidenti fenomeni di dissoluzione carsica.

## Lineamenti idrogeologici

I caratteri litologici delle diverse unità, le loro giaciture ed i rapporti di posizione, fanno sì che nel Salento la circolazione idrica sotterranea si espliciti attraverso più livelli, il più consistente dei quali è localizzato in corrispondenza dei calcari del Cretaceo (falda di base o profonda).

Ulteriori livelli idrici si rinvencono nei depositi della copertura post-cretacea, sia miocenica che plio-pleistocenica; si tratta di falde superficiali riferite agli "acquiferi superiori", così denominati perché posti sopra l'acquifero di base.

La falda profonda, che si rinviene con continuità su quasi tutto il territorio salentino, è alimentata principalmente dalle acque meteoriche che si infiltrano nel sottosuolo ed è sostenuta alla base dalle acque marine di

invasione continentale; in tutto il Salento, inoltre, è caratterizzata dalla presenza di modesti carichi idraulici, che raggiungono valori massimi di 3-4 metri sul l.m.m. solo nelle zone più interne.

A partire da tali aree il livello piezometrico della falda si abbassa progressivamente, con cadenti piezometriche molto basse (0.1 – 2.5 ‰), verso le fasce costiere, ove tende a raccordarsi con il livello marino; il mare infatti costituisce il livello base della circolazione ed il serbatoio finale nel quale si riversano, in forma concentrata e/o diffusa, le acque di falda.

La circolazione prevalentemente a pelo libero, i bassi carichi idraulici e le modeste cadenti piezometriche denotano, inoltre, una permeabilità dell'acquifero carbonatico mesozoico mediamente assai elevata, imputabile essenzialmente a fessurazione e carsismo.

La presenza delle falde superficiali, di contro, è sempre circoscritta ad aree di estensione variabile ubicate nelle zone morfologicamente o strutturalmente depresse, ove si possono rinvenire anche più livelli idrici, spesso indipendenti, essendo i vari acquiferi separati da orizzonti impermeabili.

A volte questo schema viene ulteriormente complicato, lungo le fasce costiere, dalla presenza di strati impermeabili che rompono l'omogeneità del deflusso della falda profonda.

Situazione, quest'ultima, che caratterizza proprio l'area in esame, dove la presenza del banco di argille modi-

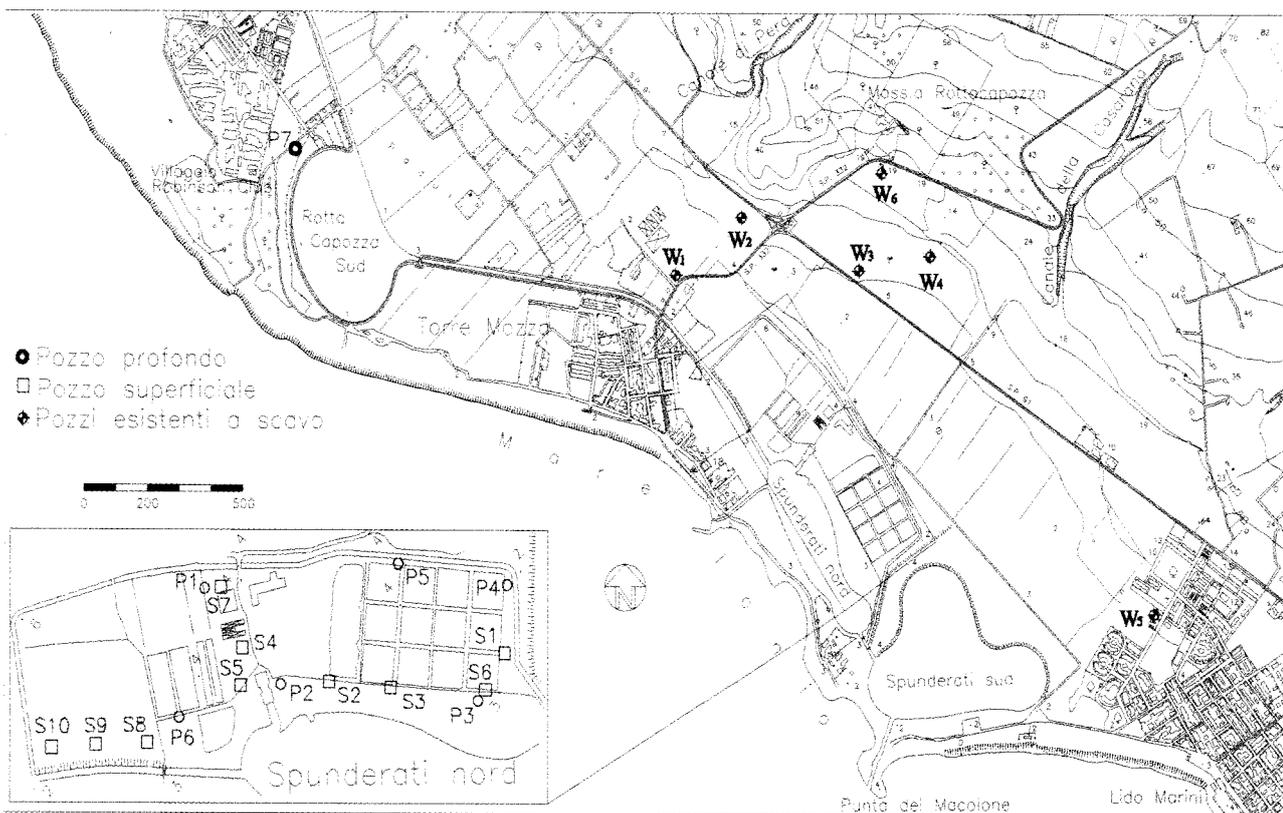


Fig. 4 - Ubicazione dei pozzi trivellati nell'area di pertinenza dell'impianto ittico.

fica il deflusso delle acque di falda convogliandolo, come si vedrà in seguito, in direzioni differenti.

Le acque degli strati più superficiali proseguono normalmente il loro deflusso a mare invadendo l'acquifero calcarenitico soprastante il banco argilloso e dando, così, origine ad una falda superficiale totalmente alimentata dalle acque sotterranee più dolci; le acque degli strati più profondi defluiscono a mare attraverso le calcareniti sottostanti il banco delle argille; infine, le acque salate di intrusione continentale si ritrovano intrappolate nel substrato calcareo, in un habitat che può modificare anche sostanzialmente le caratteristiche chimico-fisiche. E' una situazione idrogeologica complessa, la cui definizione è stata possibile grazie alla disponibilità, oltre che dei pozzi a scavo presenti nella zona, anche di una serie di pozzi perforati a ridosso del bacino Spunderati Nord ed attestati in parte nell'acquifero superficiale calcarenitico ed in parte in quello profondo calcareo (Fig. 4). Per facilità di lettura, in cartografia, questi ultimi sono stati indicati rispettivamente con riferimento alfanumerico Sn e Pn, mentre i pozzi a scavo richiamati nel testo sono stati indicati con la sigla Wn; tutti gli altri pozzi utilizzati nelle indagini sono indicati solo con un cerchietto pieno.

## Indagini sulla falda superficiale

I rilievi eseguiti hanno evidenziato un andamento delle isofreatiche (Fig. 5) che sposa chiaramente il passaggio litologico dai calcari alle calcareniti.

Fintanto che la falda circola nei calcari, infatti, mantiene una cadente molto bassa, pari a circa lo 0.02%, ed un carico abbastanza elevato che si abbatte, poi, rapidamente nell'acquifero calcarenitico, passando da 70 a 20 cm con un gradiente idraulico pari a circa lo 0.2%, a testimonianza di una permeabilità notevolmente inferiore a quella dei calcari.

Quindi, raggiunto un nuovo equilibrio idrodinamico, la falda defluisce con il rimanente carico verso i canali di bonifica che, funzionando a marea, rappresentano il livello base della sua circolazione.

L'andamento delle isofreatiche mostra, anche, evidenti direttrici di deflusso in corrispondenza dei bacini di bonifica Spunderati Nord e Sud e Rottacapozza Sud; il che, in uno con l'evoluzione stratigrafica dell'area, fa ritenere molto probabile che queste direttrici siano state dettate dall'andamento delle stesse faglie, ortogonali alla linea di costa, che hanno originato le incisioni che solcano le scarpate dei calcari.

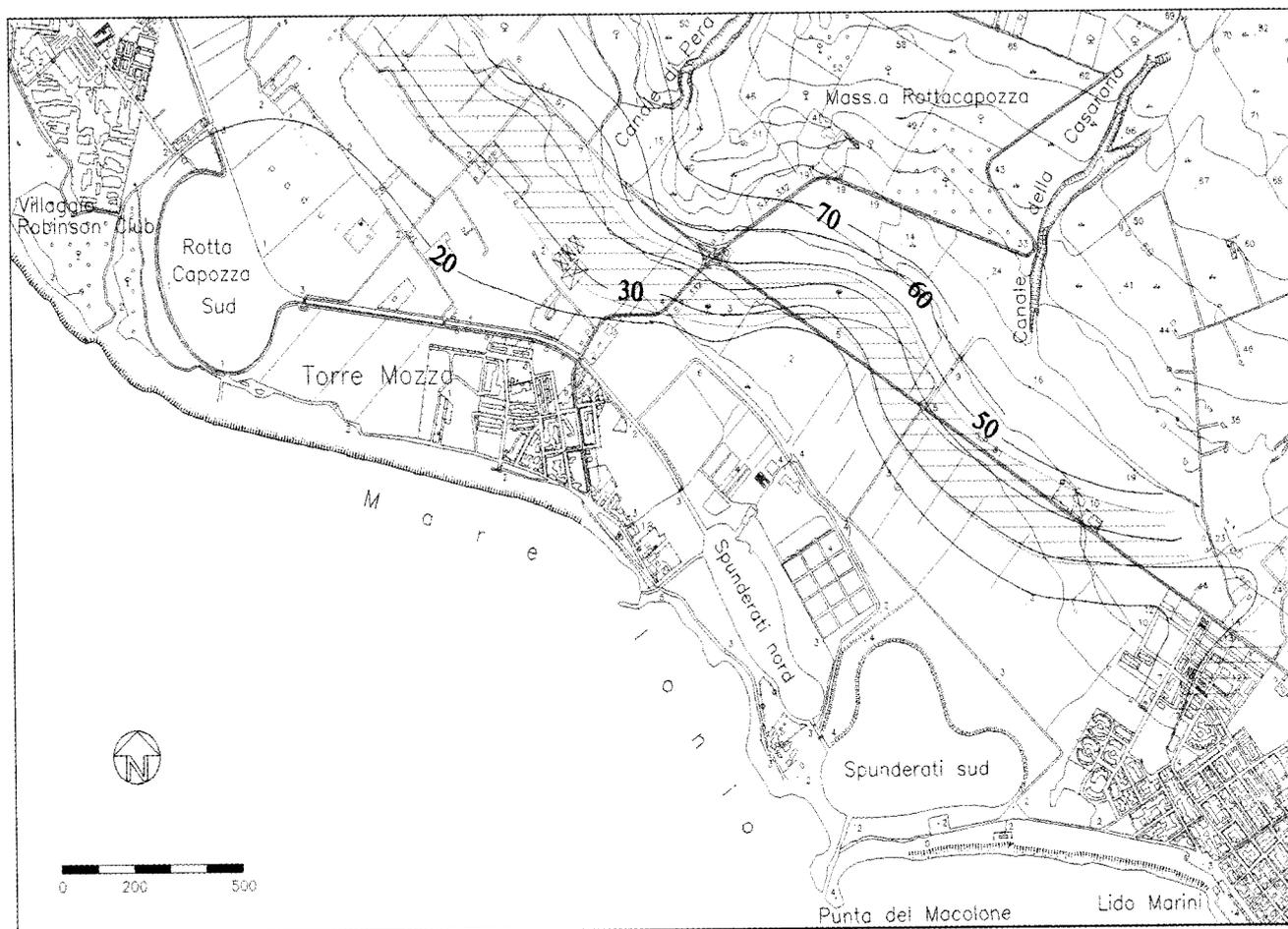


Fig. 5 - Andamento medio della superficie freatica in settembre con evoluzione spaziale (area a tratteggio) della isofreatica 40 cm s.l.m. nell'anno idrologico.

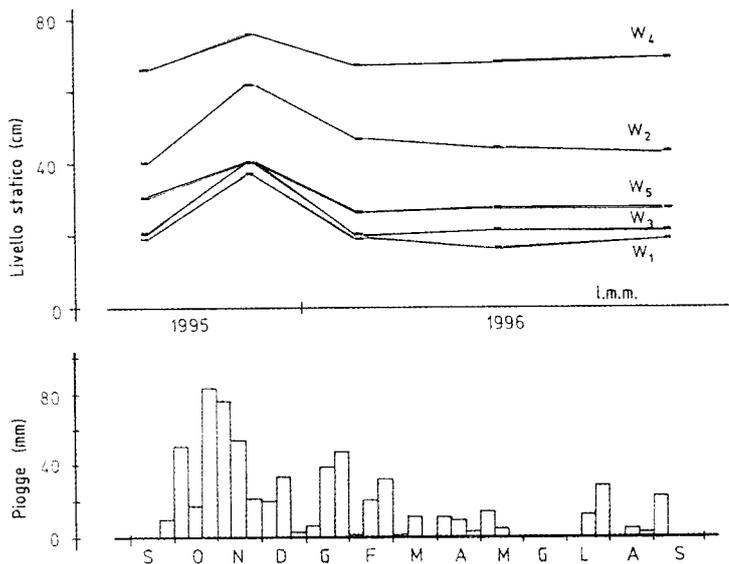


Fig. 6 - Oscillazioni del livello statico registrate nei pozzi W1, W2, W3, W4 e W5 in relazione alle precipitazioni.

Una volta verificatosi lo sprofondamento dei calcari, si è avuta la sedimentazione delle argille e, quindi, del primo strato delle calcareniti; su queste ultime, tuttavia, è continuato il ruscellamento delle acque meteoriche, convogliate dai canali lungo la direzione delle faglie

stesse, creando così dei solchi o degli avvallamenti colmati, poi, con la sedimentazione del secondo ed ultimo strato di calcareniti.

Si sono così create delle vere e proprie direttrici di deflusso, a tutt'oggi, ancora perfettamente attive.

I rilievi periodici del livello idrico, inoltre, hanno evidenziato come la superficie freatica, nel corso dell'anno idrologico, subisca delle escursioni alquanto modeste condizionate notevolmente dal regime pluviometrico.

Con riferimento al livello reale del mare, infatti, la fig. 5 mostra per l'isofreatica 40 cm un arretramento medio di circa 200 metri fra il periodo di maggiore piovosità (ottobre-dicembre) e quello primaverile di massimo sfruttamento, denotando così un regime idrologico pressoché costante imputabile solo ad una alimentazione continua da parte della falda profonda.

Considerazione, peraltro, pienamente confermata dall'andamento dei livelli idrici nei pozzi a scavo (Fig. 6).

Smaltiti rapidamente gli incrementi di carico legati alle precipitazioni, infatti, i pozzi attestati nelle calcareniti (W1, W2 e W3) mostrano una notevole costanza del livello statico a testimonianza di un'alimentazione con-

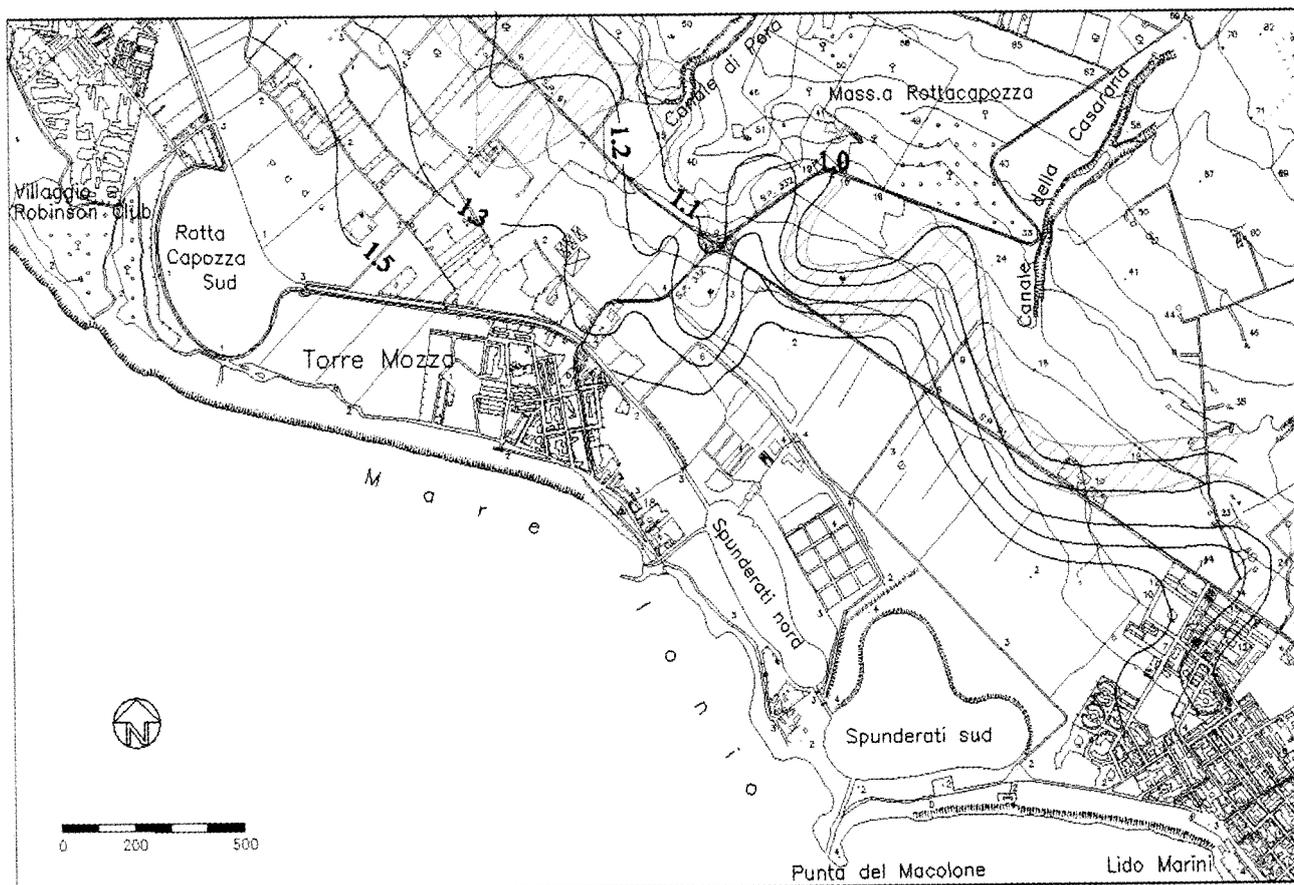


Fig. 7 - Distribuzione media del contenuto salino in settembre con evoluzione spaziale (area a tratteggio) della isoalina 1.00 g/l nell'anno idrologico.

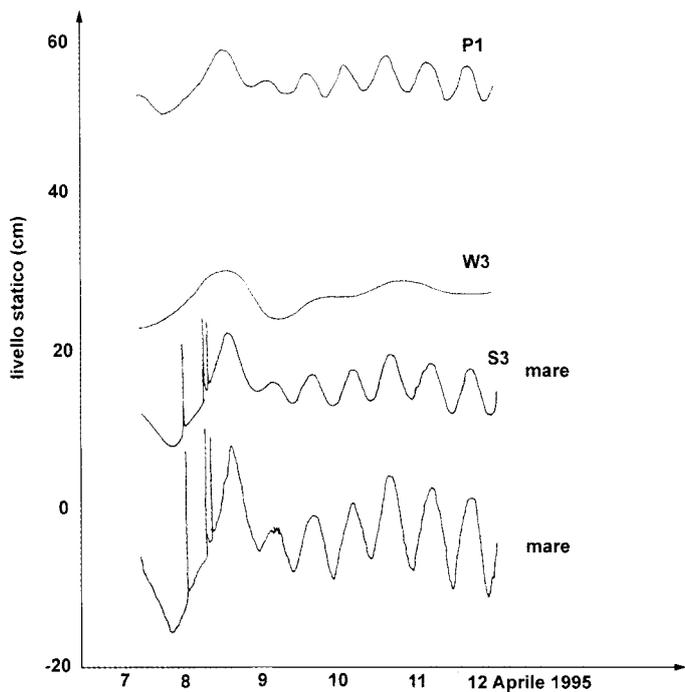


Fig. 8 - Oscillazioni del livello statico registrate nei pozzi P1, W3 e S3 e nel bacino Spunderati Nord

tinua e di un sfruttamento irriguo con essa compatibile; mostrano, cioè, un comportamento del tutto simile a quello riscontrabile nei pozzi attestati nei calcari (W4 e W5) ed alimentati direttamente dalla falda profonda sui quali, ovviamente, gli effetti delle precipitazioni risultano di gran lunga meno sensibili.

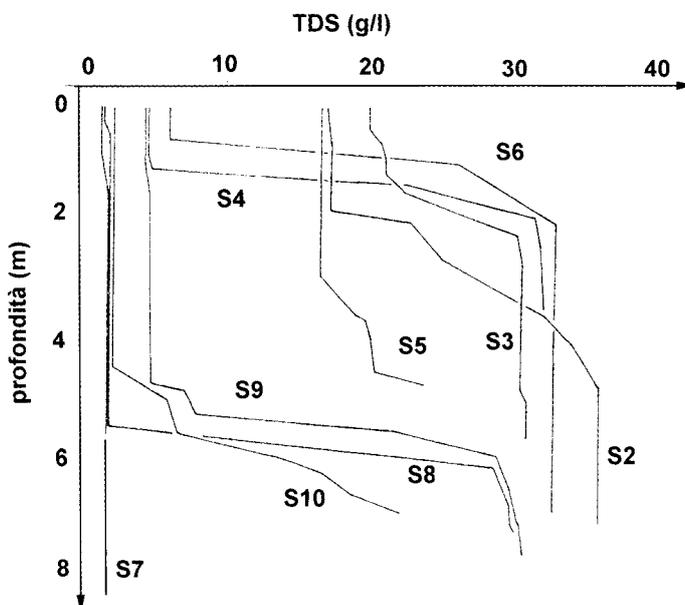


Fig. 9 - Carotaggi salini registrati in alcuni pozzi superficiali in fase di alta marea.

La distribuzione del contenuto salino (Fig. 7) nelle acque della falda superficiale ha mostrato lo stesso andamento delle isofreatiche, confermando così in pieno le considerazioni già fatte sulla presenza di alcune direttrici di deflusso preferenziale convergenti verso i bacini di bonifica. La carta delle isoaline evidenzia chiaramente anche il basso contenuto salino di queste acque nonostante la vicinanza del mare e la buona comunicabilità delle formazioni evidenziata dalla notevole correlazione fra le oscillazioni del livello marino e quelle delle falde (Fig. 8); ciò trova giustificazione proprio nell'esistenza del substrato argilloso su cui poggia la falda superficiale, che impedisce la contaminazione dal basso da parte delle acque marine di invasione continentale.

Tale contaminazione si verifica, infatti, solo per ingressione laterale attraverso la calcareniti e, pertanto, risulta fortemente limitata come dimostra anche il modesto arretramento della isoalina 1.0 g/l nell'arco dell'anno idrologico (Fig. 7), chiaramente determinato dalla coincidenza della stagione irrigua con il periodo di magra dell'alimentazione.

L'effetto del contenimento dal basso dell'intrusione marina è ben evidente anche attraverso i carotaggi salini che denotano una stratificazione molto netta in cui si distinguono chiaramente le acque dolci da quelle salate (Fig. 9).

Questi carotaggi, eseguiti tutti in fase di alta marea, consentono di delineare bene anche la dinamica con cui evolvono i rapporti fra acque di mare ed acque di falda. Come già detto, i canali ed i bacini di bonifica costituiscono un serbatoio di espansione attraverso il quale le oscillazioni di marea si trasmettono, sia pur con piccoli ritardi nelle zone più interne, su tutto il fronte della falda senza, tuttavia, interferire con la qualità delle sue acque.

Mentre, infatti, in fase di bassa marea canali e bacini sono invasi dalle acque di falda, in fase di alta marea le acque marine invadono solo i bacini ed i tratti dei canali ad essi più prossimi; questi ultimi, cioè, di fatto assumono la funzione di serbatoi di accumulo delle acque dolci drenate dalla falda.

Questo fa sì che la contaminazione per intrusione laterale, quindi, si verifichi quasi esclusivamente lungo il fronte interno dei bacini (pozzi S2, S3 e S5), mentre lungo i canali è praticamente nulla o molto modesta, come dimostrano appunto i carotaggi di Fig. 9 ed il contenuto costante della salinità registrato poco prima (S7-a) e subito dopo (S7-b) una prova di portata eseguita sul pozzo S7 (Tab. 1).

Di fatto, le maree, agendo sui carichi idraulici, finiscono con l'incidere solo sui deflussi, che vengono quasi totalmente annullati in fase di alta marea.

Le analisi condotte sui campioni di acque prelevati

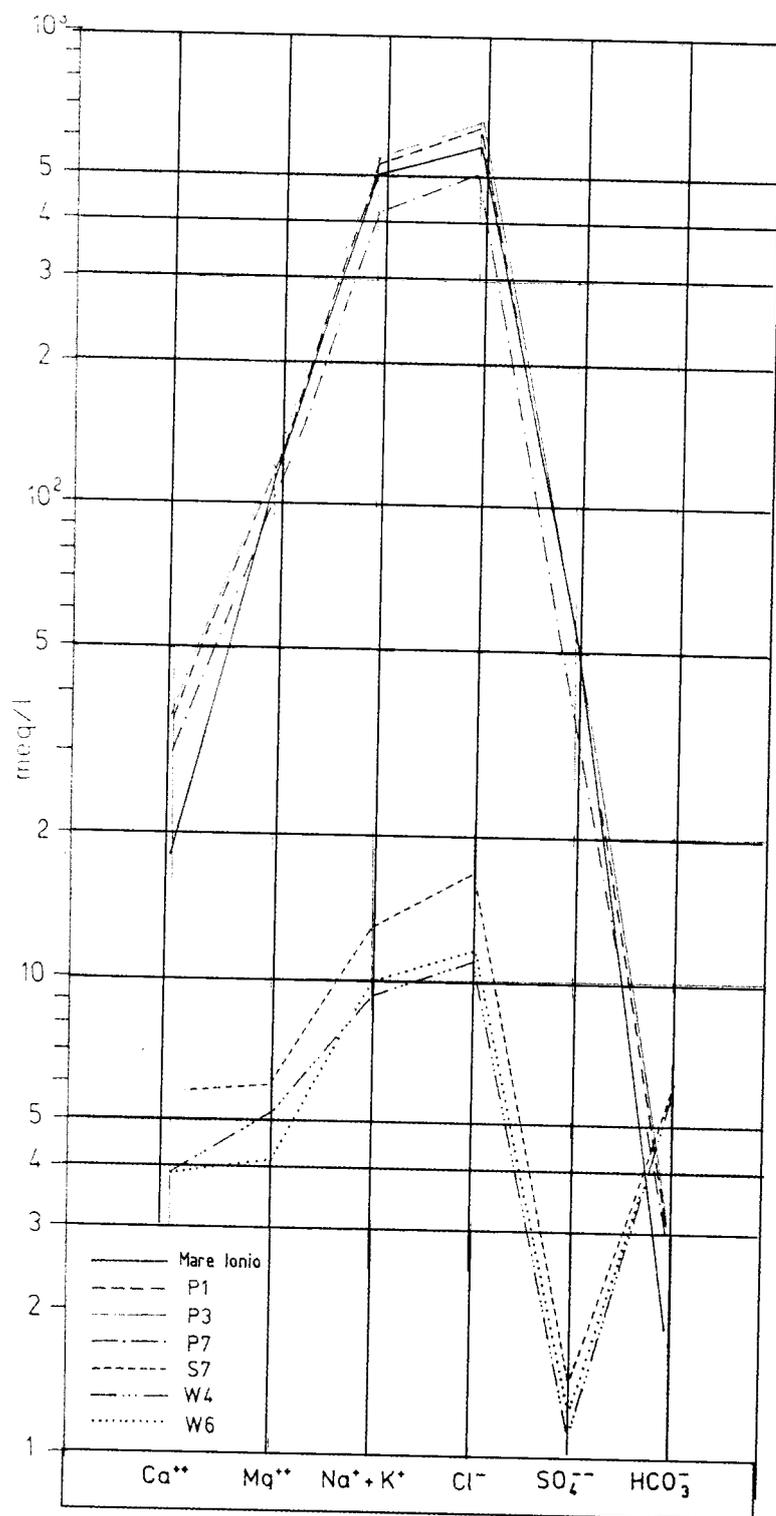


Fig. 10 - Diagramma di Scholler relativo ai campioni della Tabella I.

nei pozzi S7, W4 e W5 hanno anche consentito di caratterizzare la composizione chimica e di poterne verificare la perfetta familiarità (Fig. 10) con quella delle acque superficiali della falda profonda prelevate dal pozzo W6, ubicato nell'interno a circa 2 Km dal mare.

Si tratta, in entrambi i casi, di acque dolci miscelate con acque di origine marina, come denota chiaramente la prevalenza di ioni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$ .

Infine, per quanto attiene la temperatura di queste acque di falda, si è riscontrata una costante influenza su di essa della temperatura dell'aria e del mare. Infatti, su tutti i pozzi, gli strati più alti della falda hanno registrato oscillazioni periodiche annue della temperatura che, in funzione della loro distanza dal piano campagna, denotano escursioni variabili da  $2^\circ\text{C}$  a  $10^\circ\text{C}$ .

Depurando tali valori da questo effetto aria, si sono quindi determinati i valori minimi e massimi che la temperatura delle acque assume in funzione del solo effetto mare e, per interpolazione, l'andamento della loro distribuzione stagionale, riportato in fig. 11, che mostra in maniera chiara gli effetti della temperatura del mare sulla falda.

Procedendo dalla costa verso l'interno, infatti, le isoterme mostrano gradienti termici stagionali opposti: positivi con i minimi invernali, negativi con i massimi estivi; e tanto, in virtù del flusso termico ciclico tra il mare e le acque di falda (Carlin et al., 1973), originato dalla forte escursione della temperatura marina, che passa dagli  $11^\circ\text{C}$  in gennaio ai  $26^\circ\text{C}$  in agosto, in contrasto con quella molto contenuta delle acque di falda, che oscilla fra i  $17^\circ\text{C}$  ed i  $18^\circ\text{C}$ .

Inoltre, l'andamento delle isoterme mostra delle profonde saccature che evidenziano molto bene le vie di preferenziale deflusso in cui l'ingressione marina è più pronunciata a causa della maggiore permeabilità dell'acquifero; maggior permeabilità evidenziata anche dall'infittirsi delle isoterme, dovuto alla maggiore mobilità delle acque sotterranee che hanno meno tempo per porsi in equilibrio termico con l'acquifero.

In definitiva tutte le informazioni raccolte attraverso le carte tematiche (isofreatiche, isoaline ed isoterme) hanno evidenziato come le vie di preferenziale deflusso delle acque superficiali non sono altro che l'ideale prosecuzione, nei depositi calcarenitici, delle faglie ortogonali alla linea di costa, che hanno generato i canali. Successivamente allo sprofondamento della fascia costiera del basamento calcareo, infatti, i canali hanno continuato a con-

giungere le acque meteoriche sui depositi miocenici, man mano che si sedimentavano, sempre lungo le tracce delle faglie ormai sommerse, provocando così nel primo strato delle calcareniti quegli avvallamenti per erosione, successivamente colmati dal secondo ed ultimo strato di calcareniti più porose, cui si deve la maggior permeabilità.

Pozzo	Prof. Camp. m	Livellostatico m	Ca <sup>++</sup> meq/l	Mg <sup>++</sup> meq/l	Na <sup>++</sup> meq/l	K <sup>+</sup> meq/l	Cl <sup>-</sup> meq/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> meq/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	S <sup>-2</sup> meq/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> meq/l	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> meq/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	TDS <sub>110°C</sub> g/l	T °C
S <sub>3</sub>	0,5	0,13	16,457	84,774	406,243	7,909	443,072	49,305	4,88	< 6E-5	< 6E-5	< 3E-4	0,099	32,00	ind.
S <sub>7-a</sub>	0,5	0,17	5,716	5,982	12,614	0,294	16,719	1,471	6,139	< 6E-5	ind.	ind.	ind.	1,47	18,2
S <sub>7-b</sub>	0,5	0,16	5,845	5,894	12,353	0,299	17,007	1,471	6,139	< 6E-5	ind.	ind.	ind.	1,49	18,3
W <sub>4</sub>	0,5	0,69	3,922	5,062	9,007	0,284	11,144	1,165	6,201	ind.	ind.	ind.	ind.	1,09	18,9
W <sub>5</sub>	0,5	0,27	4,412	4,798	11,918	0,307	14,573	1,578	6,221	ind.	ind.	ind.	ind.	1,33	19,1
W <sub>6</sub>	0,5	0,95	3,922	4,236	9,439	0,286	11,502	1,233	6,021	ind.	ind.	ind.	ind.	1,12	18,4
W <sub>7</sub>	0,5	0,13	5,712	4,766	10,071	0,286	10,581	2,141	7,586	ind.	< 6E-5	< 3E-4	0,289	1,11	18,2
Mar Jonio	500	0	17,895	113,534	504,945	8,852	593,197	61,861	1,881	ind.	ind.	ind.	ind.	40,21	ind.
P <sub>1</sub> -giu'95	140	0,86	33,932	114,967	519,769	14,322	621,486	61,421	2,999	2,01	0,032	< 3E-4	0,039	48,31	22,1
P <sub>1</sub> -set'95	140	0,85	33,433	114,311	517,594	13,939	621,034	60,795	2,917	2,62	0,031	< 3E-4	0,035	48,22	22,2
P <sub>1</sub> -nov'95	140	0,85	34,431	113,902	487,152	13,042	620,471	54,761	2,902	2,63	0,032	< 3E-4	0,094	44,01	22,4
P <sub>1</sub> -mar'96	140	0,86	34,932	114,967	491,497	13,274	622,444	78,601	3,001	2,52	0,032	< 3E-4	0,094	45,12	22,2
P <sub>2</sub>	100	0,72	29,943	120,392	510,228	13,789	629,021	58,712	3,002	1,02	< 6E-5	< 3E-4	< 8E-4	43,01	21,9
P <sub>3</sub>	138	1,31	35,968	120,362	529,159	14,299	652,591	60,908	3,108	3,52	ind.	ind.	ind.	42,68	22,2
P <sub>4</sub>	140	0,81	34,872	116,699	513,098	13,868	628,932	60,009	2,901	2,04	0,013	< 3E-4	< 8E-4	42,88	21,8
P <sub>5</sub>	140	0,88	34,251	114,665	504,122	13,068	621,478	58,009	2,702	0,53	0,013	< 3E-4	< 8E-4	43,26	22,1
P <sub>6</sub>	130	0,76	33,478	112,032	492,544	13,312	607,199	56,672	2,888	3,02	0,014	< 3E-4	< 8E-4	43,24	22,5
P <sub>7</sub>	120	1,53	30,332	102,798	407,898	6,235	500,403	43,649	2,929	< 6E-05	< 6E-05	< 3E-4	0,148	33,51	22,2

Tab. I - Analisi chimiche eseguite sui campioni d'acqua prelevati in mare ed in falda.

### Indagini sulla falda profonda

Dalle indagini condotte sui pozzi profondi Pi, trivellati a ridosso del bacino Spunderati Nord ed attestati nei calcari, è emersa con chiarezza un'anomala distribuzione dei carichi idraulici (Tab. 1) che si presentano non solo disomogenei, variando dai 70 ai 160 cm sul livello mare, ma anche notevolmente più alti dei 10-15 cm ipotizzabili vista l'estrema vicinanza della linea di costa e l'andamento delle isofreatiche.

Molto probabilmente le cause di questa anomalia sono da imputare alla pressione che la convergenza delle coltri appenniniche verso l'avampaese apulo provoca sui fluidi profondi, provocandone la risalita attraverso il substrato carbonatico pre-pleiocenico (Pagliarulo, 1996).

I fluidi profondi soggetti a queste pressioni, infatti, tendono a risalire lungo la struttura a gradoni del substrato ed a mescolarsi alle acque di falda; laddove, poi, si verificano favorevoli condizioni strutturali e tettoniche emergono sotto forma di sorgenti ipotermali sulfuree, come nel caso delle sorgenti di S. Nazario e di S. Cesarea Terme (Maggiore e Mongelli, 1991; Calò e Tinelli, 1995).

Nel nostro caso, invece, il sistema di fratture attraverso il quale questi fluidi risalgono è stato completamente occluso dal banco argilloso, che ne ha impedito l'emergenza spontanea, fintanto che la perforazione dei pozzi non ha ripristinato la continuità idraulica.

Naturalmente, proprio questa contingenza geologica e la notevole eterogeneità dello stato fessurativo hanno finito col suddividere l'acquifero calcareo in tanti piccoli settori saturi di acque di falda con diverso carico idraulico, ma uguale matrice geochemica, eccezion fatta per quelle del pozzo P7, come mostrano le analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati dopo due ore di pompaggio continuo (Tab. 1).

L'elemento saliente che emerge dalla lettura dei dati relativi alle acque di questi pozzi, infatti, è proprio l'elevata omogeneità dei parametri chimico-fisici e la costante presenza dei solfuri; questo fa sì che le si possano classificare come acque marine ipotermali profonde con un tenore salino leggermente superiore a quello del mare di riferimento, il mar Jonio, dovuto alla maggior capacità di solubilizzare i sali indotta dall'ipotermalismo e dai lunghi tempi di residenza.

La familiarità di queste acque emerge ancor più chiara dal diagramma di fig.10 che, peraltro, evidenzia molto bene anche la diversa natura delle acque del pozzo P7.

Queste ultime, infatti, oltre che prive di solfuri, denotano anche una più alta incidenza sia degli ioni Ca<sup>+</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, a fronte di un più basso valore del TDS, che dei solfati rispetto a quelli del mar Jonio; si tratta, in pratica, delle tipiche acque della zona di transizione, ovvero di acque marine di invasione continentale miscelate con acque dolci di falda, come appare ancor più evidente dai carotaggi termo-salini eseguiti prima di ripristinare l'isolamento della falda superficiale e riportati in Fig. 12.

Superato il banco argilloso, infatti, mentre la perforazione del pozzo P7 ha intercettato, come prevedibile, le acque salmastre proprie della zona di transizione, le perforazioni degli altri pozzi hanno intercettato direttamente acque sulfuree ipotermali a contenuto salino maggiore di quello del mare; tanto le une quanto le altre, comunque, con carichi idraulici molto alti che ne facilitano la risalita.

Ne consegue, così, un andamento a gradoni dei carotaggi termo-salini caratterizzato da una sottile interfaccia che separa nettamente le acque sulfuree profonde da quelle superficiali. Nei pozzi P2, P4 e P5 questa interfaccia si presenta con un gradino salino molto ampio a testimonianza di un chiaro equilibrio fra le portate delle

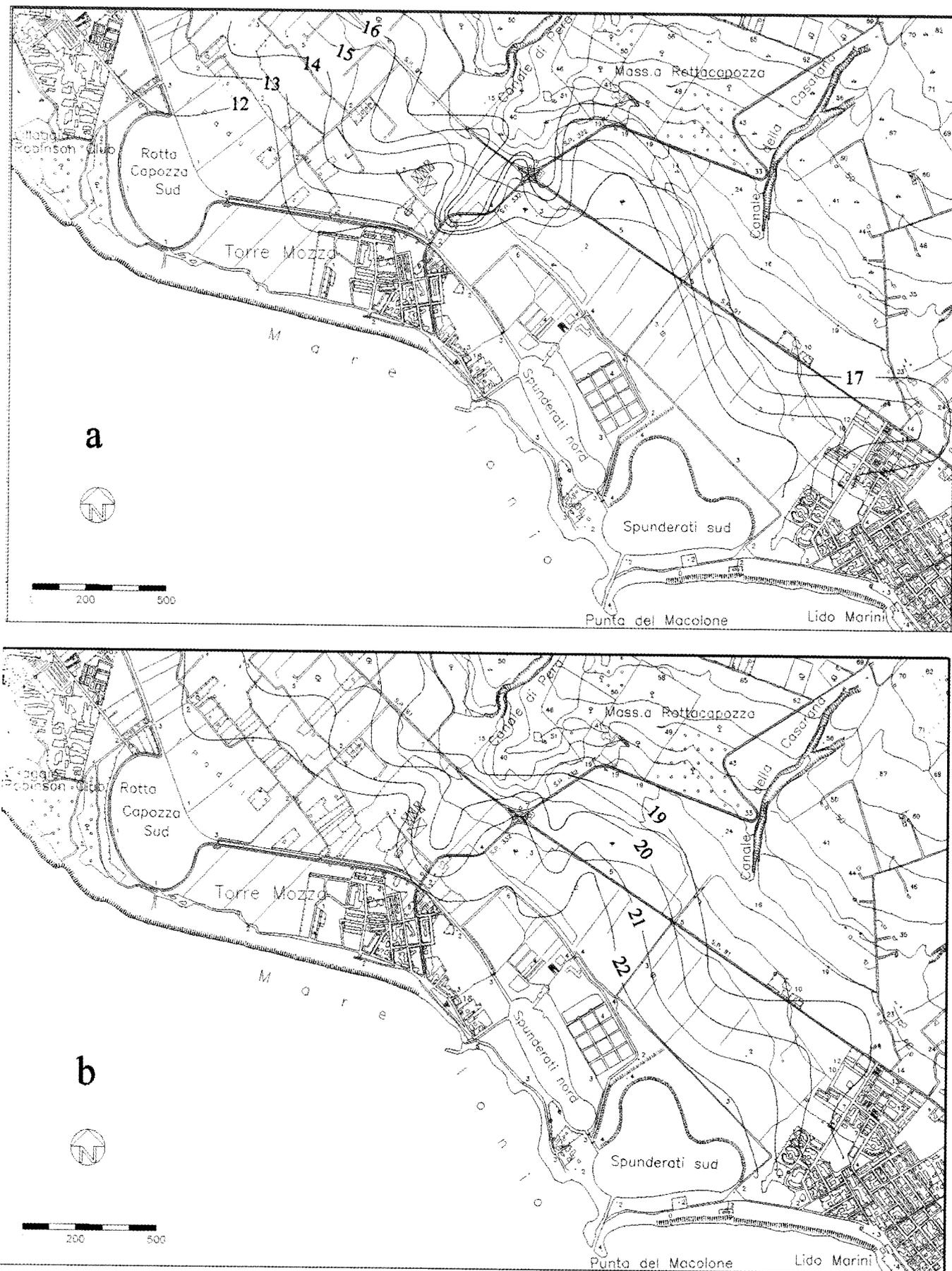


Fig. 11 – Distribuzione media della temperatura delle acque di falda in inverno (a) ed estate (b).

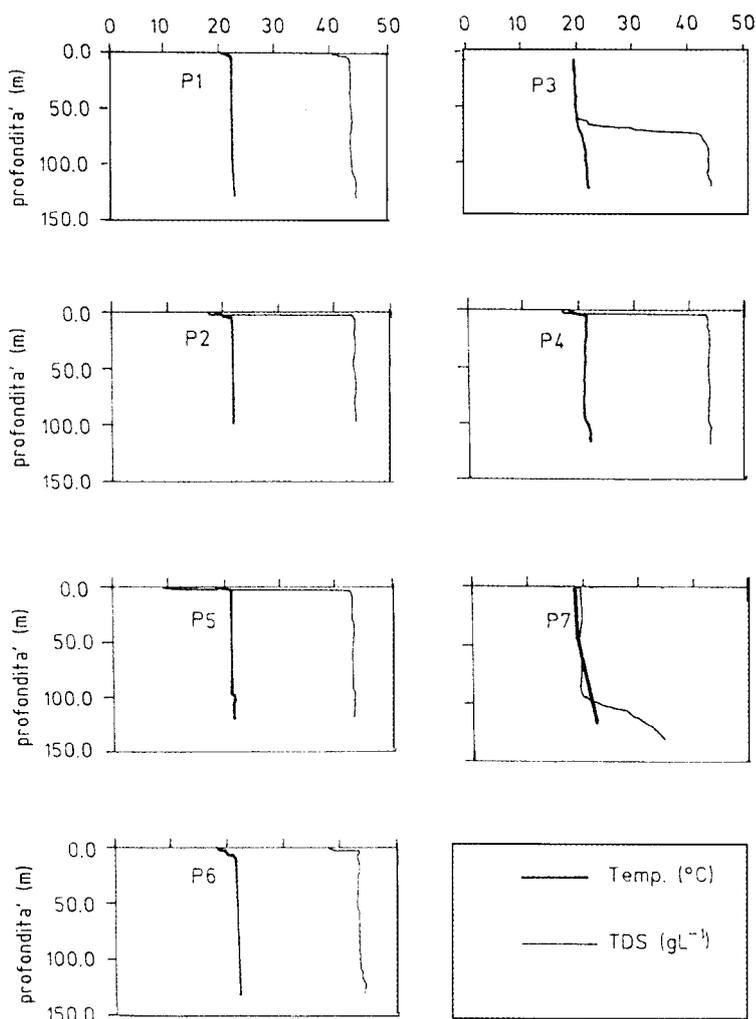


Fig. 12 - Carotaggi termosalinari relativi ai pozzi P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7.

acque sulfuree profonde e quelle dolci superficiali che, pur inquinate dalle prime, evidenziano molto bene la loro presenza; nei pozzi P1 e P6, di contro, tale gradino è molto contenuto a dimostrazione di uno squilibrio fra le portate decisamente a favore delle acque sulfuree, che mascherano quasi totalmente le altre.

Considerazioni analoghe mostrano anche i carotaggi termici, se pure in maniera meno evidente visto il minore scarto fra le temperature delle due acque.

Da queste tipologie si discosta alquanto solo il carotaggio del P3, che mostra una zona di transizione abbastanza ampia e molto traslata verso il basso, imputabile solo ad una notevole consistenza della portata della falda superficiale in grado di contrastare molto efficacemente la pur cospicua risalita delle acque sulfuree.

Se ne deduce che, nell'ambito della falda superficiale, il pozzo P3 intercetta evidentemente una zona di forte drenaggio e ad alta permeabilità, quale potrebbe essere una via di preferenziale deflusso,

come sembra indicare anche l'elevato contenuto salino (circa 15 g/l) delle acque della falda superficiale.

Una via di preferenziale deflusso, infatti, se per un verso favorisce il deflusso, di contro facilita anche l'intrusione marina, innescando così una salinizzazione spinta delle acque dolci.

Queste considerazioni sono, peraltro, ampiamente confermate dai dati delle prove di pompaggio che, proprio per i pozzi P1, P3 e P6, denotano non solo le maggiori portate specifiche (Fig. 13) ma anche i più alti contenuti in solfuri.

Una tale coincidenza ci porta a ritenere che gli habitat favorevoli alla solforizzazione vadano localizzati nelle aree a maggior permeabilità; aree che, nello specifico, potrebbero essere costituite dalle stesse faglie che hanno originato i canali e che, sprofondando con i calcari lungo la fascia costiera, sono state poi sommerse dalle argille.

Nelle fratture create da tali faglie, infatti, possono essersi facilmente accumulati quei depositi lignitici e calcarenitici ricchi di sostanza organica che, a contatto diretto con le acque marine, ne hanno provocato l'arricchimento in idrogeno solforato per riduzione dei solfati, così come riscontrato per le acque di S. Cesarea (Calo & Tinelli, 1995).

Il grado di perennità di queste acque, infine, è stato testato eseguendo campionamenti sistematici durante un intero anno idrologico sulle acque emunte dal pozzo P1 che, per esigenze industriali, era costantemente in funzione con una portata di 42 l/sec.

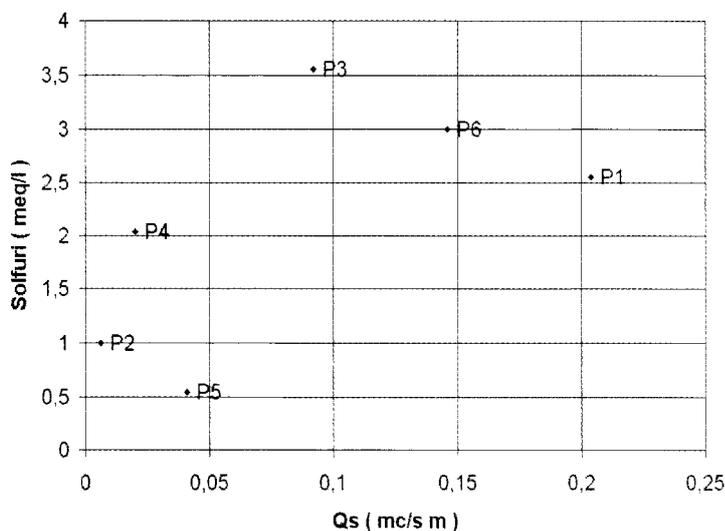


Fig. 13 - Relazione fra portate specifiche e contenuto in solfuri.

I dati raccolti (Tab. 1) denotano una generale costanza nella composizione chimica e nel contenuto in solfuri delle acque che, peraltro, evidenziano solo un discreto aumento della salinità nel periodo estivo; coincidendo tale periodo con quello irriguo, questo fenomeno potrebbe configurarsi come una conseguenza dei forti emungimenti operati sulla falda profonda che favoriscono, indirettamente, una maggior risalita delle acque sulfuree.

La mancanza di una più lunga serie di osservazioni, tuttavia, impedisce un'analisi più approfondita.

In definitiva, l'area interessata dalla presenza delle acque sulfuree risulta molto limitata e circoscritta all'intorno dei due bacini Spunderati laddove, cioè, l'andamento delle carte delle isofreatiche, delle isoaline e delle isoterme lascia ipotizzare, con buona approssimazione, la presenza sommersa delle faglie che hanno originato i canali nei retrostanti rilievi calcarei.

## Conclusioni

Le indagini condotte sull'area circostante Torre Mozza hanno consentito una ricostruzione dettagliata della complessa situazione idrogeologica esistente e la definizione di alcuni aspetti peculiari, finora ignorati.

E' così emerso che lo strato delle argille sabbiose presente fra i Villaggi Robinson e Marini costituisce un banco del tutto impermeabile, che ostruisce completamente il normale deflusso delle acque della falda profonda; queste, per poter superare tale ostacolo, sono costrette a scindersi in tre differenti corpi idrici:

- un primo, costituito dai livelli più superficiali che proseguono il loro deflusso attraverso le calcareniti soprastanti il banco argilloso, dando così vita ad una falda superficiale di acque dolci di modesta entità;

- un secondo, costituito dai livelli idrici intermedi delle acque salmastre, convogliato in pressione nelle calcareniti presenti al di sotto del banco argilloso;

- ed infine un terzo, nel sottostante substrato calcareo, caratterizzato prevalentemente dalle acque marine di intrusione continentale intrappolate, di fatto, nei volumi dislocati a varie profondità dai movimenti tettonici.

Laddove lo stato fessurativo lo consente, poi, i calcari sono invasi da acque ancor più profonde, ipotermali e sulfuree, con contenuto salino superiore a quello del mar Jonio. Sono fluidi caldi e profondi che risalgono attraverso il substrato carbonatico sotto la pressione prodotta dalla convergenza delle coltri appenniniche verso l'avampaese apulo; questo fa sì che il carico idraulico delle acque intrappolate sotto il banco argilloso risulti maggiore di quello delle acque della falda profonda circostante.

Dalle indagini è emerso anche che la risalita di questi fluidi dovrebbe avvenire attraverso le stesse faglie che

hanno originato nei calcari in affioramento le incisioni dei cosiddetti canali e che i successivi eventi tettonici, con lo sprofondamento della fascia costiera dei calcari, hanno poi completamente occultato sotto le argille.

La temperatura e la salinità elevate, la presenza dei solfuri ed il notevole carico idraulico, in definitiva, consentono di associare questa situazione idrogeologica a quella delle sorgenti di S. Nazario e di S. Cesarea Terme; sorgenti, cioè, di acque ipotermali sulfuree la cui natura di fluidi profondi risalenti attraverso le fratture del substrato carbonatico è pienamente acclarata.

## Bibliografia

**Carlin F., Magri G. & Mongelli F.(1973).** *Temperatura delle acque sotterranee della Penisola Salentina. Geol. Appl. Idrogeol., VIII (II): 155-198.*

**Calò G.C. & Tinelli R.(1995).** *Systematic hydrogeological study of a hypothermal spring (S. Cesarea Terme, Apulia), Italy. J. Hydrol., 165: 185-205.*

**Cotecchia V., Dai Pra G. & Magri G.(1969).** *Oscillazioni tirreniane e oloceniche del livello mare nel golfo di Taranto, correlate da datazioni col metodo del radiocarbonio. Geol. Appl. Idrogeol., IV: 93-147.*

**Maggiore M. & Mongelli F.(1991).** *Hydrogeothermal model of ground water supply to San Nazario Spring (Gargano, Southern Italy). Proc. International Conference on Environmental Changes in Karst Areas, Padova 27 Sept. 1991; Quad. Dip. Geografia, 13, 307-324.*

**Maggiore M., Nuovo G. & Pagliarulo P.(1996).** *Caratteristiche idrogeologiche e principali differenze idrochimiche delle falde sotterranee del Tavoliere di Puglia. Mem. Soc. Geol. It., 51 (12), 669-684.*

**Maggiore M. & Pagliarulo P.(1999).** *Groundwater vulnerability and pollution sources in the Apulian Region (Southern Italy). In: Proc. 2nd Symposium "Protection of groundwater from pollution and seawater intrusion" Bari, Editor Maggiore M., 9-20.*

**Pagliarulo P.(1996).** *Migrazione di fluidi profondi nel substrato prepliocenico dell'avanfossa appenninica (Bacino pugliese e lucano). Mem. Soc. Geol. It., 5 (10), 659-668.*

venite a visitarci su



[www.acquesotterranee.com](http://www.acquesotterranee.com)