

*Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale*

# I° Congresso Nazionale

## ATTI

*Campus Universitario, Chieti*

*19-20 Febbraio 2003*

## GLI EFFETTI ANTROPICI E CLIMATICI SULLA DISPONIBILITÀ DELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA PIANA IONICO-LUCANA

POLEMIO M.

*C.N.R. Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica - Sezione di Bari*

DRAGONE V.

*C.N.R. Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica - Sezione di Bari*

**RIASSUNTO:** Il caso di studio è costituito dalla Piana di Metaponto, posta lungo la costa ionica della Basilicata. L'area è soggetta ad un intenso sviluppo agricolo e turistico, condizionato, in virtù delle sempre più frequenti siccità, dalla disponibilità di risorse idriche sotterranee.

Lo studio stratigrafico ed idrogeologico ha utilizzato un originale database relazionale contenente dati georeferenziati di 1130 perforazioni.

Gli acquiferi studiati sono prevalentemente costituiti da depositi marini terrazzati, depositi alluvionali e da dune costiere. La falda idrica sotterranea circola generalmente in pressione nella piana costiera ed è condizionata, nel suo flusso, dalle incisioni fluviali, dal mare e, tra i fattori antropici, prevalentemente dall'agricoltura.

In tale situazione, sono state analizzate lunghe serie cronologiche di dati piezometrici (dal 1927 al 1984, utilizzando 60 pozzi di misura), termometrici, pluviometrici e di deflusso fluviale. Il regime piezometrico nonché le escursioni piezometriche sono state caratterizzate. Il ricorso ai metodi di autocorrelazione e crosscorrelazione nonché lo studio del carattere tendenziale di ciascuna variabile temporale, hanno permesso di caratterizzare le modificazioni della disponibilità di acque sotterranee, in relazione alle specifiche condizioni idrogeologiche, e di accertare l'esistenza di relazioni tra le variazioni piezometriche e quelle della piovosità, della temperatura e del deflusso fluviale.

*Termini chiave: Acquiferi porosi, serie storiche, modificazioni climatiche, risorse idriche*

**ABSTRACT:** *Anthropic and climatic effects on groundwater availability of ionian-lucanian coastal plain*

The paper deals with the groundwater availability along the Ionian coastal plain (Southern Italy), between the mouths of Sinni and Bradano Rivers. Subjected to intense agricultural and tourism activities, the availability of the tapped groundwater is seriously important for the economic growth of this coastal area, especially due to the increasing frequency of droughts.

The stratigraphical and hydrogeological set-up of the area as the geochemical features of the groundwater arise from the data analysis of 1130 boreholes, widespread over the whole area and from 1.3 up to 423 meters deep. The aquifers of the area could be distinguished in two types. The former encloses aquifers constituted by marine terraced deposits and alluvial river valleys

deposits. The latter includes that one of the coastal plain deposits. It is the most interesting for practical utilisation and it is considered in the paper.

The analysis of long time series is based on piezometric data (1927 to 1984), monitored by 60 wells, temperature, rainfall and river discharge data. The piezometric regimen and the maximum piezometric variation are characterised. The trend analysis, the autocorrelation and the crosscorrelation were applied to all variables. As a result, the modification of groundwater availability was characterised considering the spatial variation of the hydrogeological conditions. The relationships existing between rainfall, temperature, river discharge variations and piezometric surface height.

*Key words: Porous media, time series, climate changes, groundwater resources*

### INTRODUZIONE

Lo studio svolto riguarda la Piana di Metaponto, territorio posto nella regione Basilicata, lungo la costa ionica, ricadente nella porzione terminale dei bacini imbriferi dei fiumi Sinni, Agri, Cavone, Basento e Bradano (Fig. 1). Trattasi di un'area di pianura in passato estesamente paludosa e malsana. Oggi le paludi sono praticamente scomparse a seguito della bonifica, attuata a partire dalla seconda metà del secolo scorso. L'area è soggetta ad un intenso sviluppo economico connesso al turismo e ad una sempre più pregiata agricoltura. Entrambi i tipi di attività richiedono la continua ed ingente disponibilità di acqua. Tali risorse idriche, in particolare durante i sempre più frequenti periodi siccitosi, sono garantiti dal copioso ricorso alle acque sotterranee. L'attività di ricerca descritta da questa nota, volta a caratterizzare sia i caratteri evolutivi della disponibilità di risorse idriche sotterranee sia la complessità dei fattori determinanti la porzione del ciclo idrologico di pertinenza delle acque sotterranee, riprende precedenti esperienze di ricerca si concretizza in approccio stocastico applicato ad un quadro di dettagliate conoscenze fisiche, geostratigrafiche ed idrogeologiche

(Morel-Sytoux, 1988; Polemio, 1994) è parte integrante di un progetto finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito V Programma Quadro (1998-2002).

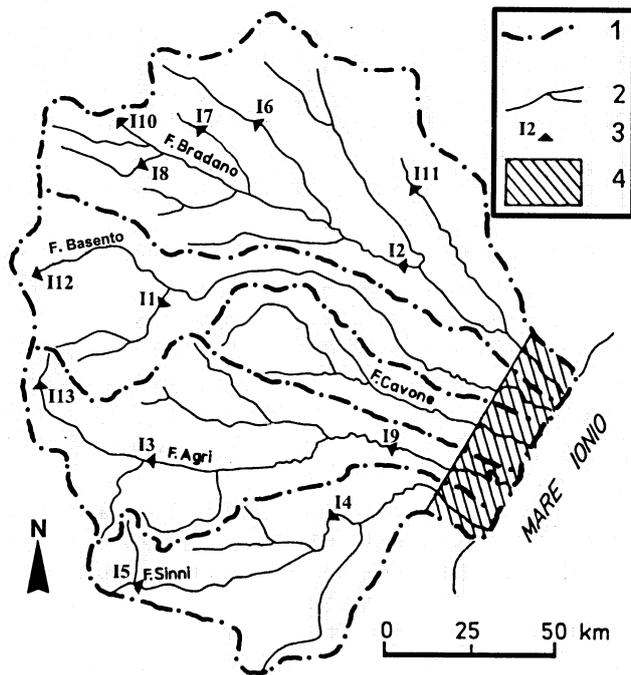


Fig. 1 – Area di studio, bacini imbriferi e opere di invaso e derivazione. 1) Limite di bacino imbrifero, 2) reticolo idrografico, 3) diga o traversa, 4) area di studio. *Study area, main rivers, dams and main tapping works: 1) catchment boundary; 2) main drainage network; 3) dams and 4) study area.*

Il progetto, dal titolo *Crystallisation technologies for prevention of salt water intrusion*, prevede la sperimentazione di un'originale tecnologia di cristallizzazione controllata. Il fine è di realizzare, in acquiferi costieri, barriere fisiche per la prevenzione dell'intrusione marina.

La caratterizzazione geologica e idrogeologica degli acquiferi (POLEMIO *et al.*, 2002a) e quella chimico-fisica delle acque sotterranee (POLEMIO *et al.*, 2002b) unitamente all'individuazione degli effetti delle modificazioni naturali e non del ciclo idrologico sulla disponibilità delle risorse idriche sotterranee, sono state perseguite, in tale contesto, al fine di effettuare la scelta ottimale del sito sperimentale italiano nonché la dettagliata valutazione, con tecniche numeriche, dell'intervento sperimentale previsto. La ricerca è quindi finalizzata alla definizione di nuove tecnologie per contrastare gli effetti dell'intrusione marina. Trattasi di un fenomeno particolarmente dannoso in ampie porzioni delle pianure costiere dell'Italia meridionale, dove, nel tempo, si sono concentrate le popolazioni nonché le attività agricole e industriali più pregiate, tutte utenze che richiedono acqua di buona qualità.

Tale fenomeno di degrado qualitativo è

particolarmente temibile in quanto spesso si manifesta con un lento ma progressivo deterioramento, difficilmente apprezzabile per l'uomo comune in quanto manifesta le sue conseguenze nel corso di alcuni decenni (POLEMIO & LIMONI, 2001). Tra le principali cause, il calo della ricarica e il sovrasfruttamento delle falde idriche sotterranee, fenomeni nel seguito considerati in merito alla Piana di Metaponto. La nota caratterizza il complesso di relazioni esistenti tra i corpi idrici superficiali e sotterranei in un'area che si estende per circa 40 km lungo la costa e per 6 km verso l'interno. Si analizzano, con tecniche statistiche, le relazioni esistenti tra precipitazioni meteoriche, temperature atmosferiche, deflussi fluviali e quote piezometriche, utilizzando lunghe serie storiche di dati. Le serie coprono un intervallo ampio diversi decenni, durante l'intero ventesimo secolo. Si è cercato di operare ad una scala "regionale", considerando anche gli effetti derivanti dalla costruzione di numerose dighe e traverse all'interno dei bacini idrografici sottesi dai fiumi che solcano la piana. Trattasi di opere di sbarramento finalizzate, ad eccezione di una, alla derivazione di risorse idriche (Fig. 1, Tab. 1). Si noti che quelle realizzate tra queste opere sono state ultimate principalmente tra gli anni '60 e '70. Le restanti due sono state realizzate negli anni '80. La destinazione dell'acqua degli invasi è per la maggior parte irrigua e potabile, tranne il Camastra, il Pertusillo, e Marsico Nuovo, che sono utilizzati anche a scopo industriale. L'unico invaso impiegato nell'uso della produzione elettrica è Masseria Nicodemo, gestita dall'Enel. Sulla base di questo studio e delle altre ricerche svolte nell'area (Polemio *et al.*, 2002 a, b, c), emerge così che la falda idrica sotterranea della piana costiera è condizionata dalla modesta soggiacenza, dalle profonde incisioni fluviali con foce sul mare Ionio e dai relativi deflussi idrici, dall'infiltrazione naturale e non, dovuta quest'ultima all'intensa irrigazione, dagli efflussi provenienti da altri corpi idrici sotterranei, dalla presenza del mare nonché dall'uso intenso nei mesi estivi della risorsa idrica sotterranea.

## GEOLOGIA E INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'area di studio ricade nella parte meridionale dell'avanfossa appenninica, nota come Fossa Bradanica (Ciaranfi *et al.*, 1979; Tropeano *et al.*, 2002). La fossa è colmata da una successione sedimentaria, potente alcuni chilometri, all'interno della quale si distinguono, dall'alto verso il basso, le seguenti formazioni (Fig. 2).

I depositi marini terrazzati (Pleistocene Medio-Sup.), che costituiscono i rilievi collinari, affiorano diffusamente nell'area di studio e sono costituiti da sabbie, conglomerati e limi. Le formazioni delle Sabbie di Monte Marano e del Conglomerato di Irsina (Pleistocene Inf.-Medio), costituite essenzialmente da sabbie e conglomerati, affiorano all'esterno dell'area di studio, in prossimità del limite nord-occidentale.

TAB. 1 Caratteristiche delle opere di sbarramento e derivazione poste a monte dell'area di studio. AC) Anno in cui termina la costruzione, BIS) bacino imbrifero sotteso, VOL) volume di invaso secondo la vigente normativa, EI) Ente per lo sviluppo dell'irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia e Lucania, CBBM Consorzio di Bonifica Bradano e Metaponto, CBAVA Consorzio di Bonifica dell'Alta Val d'Agri. *Characteristics of barrages or dams for water river located upstream of the study area. AC) End construction year ; BIS) catchment area , VOL) artificial lake capacity; EI) EI body, CBBM) CBBM body, CBAVA) CBAVA body.*

| N.  | Nome            | AC   | Ente gestore | BIS (km <sup>2</sup> ) | Uso                       | VOL (Mm <sup>3</sup> ) | Esercizio        |
|-----|-----------------|------|--------------|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| I1  | Camastra        | 1962 | EI           | 350                    | Irriguo, industr., potab. | 28.9                   | Sperimentale     |
| I2  | S. Giuliano     | 1959 | CBBM         | 1361                   | Irriguo                   | 107.77                 | normale          |
| I3  | Pertusillo      | 1963 | EI           | 530                    | Irriguo, industr., potab. | 159.2                  | limitato         |
| I4  | Monte Cotugno   | 1972 | EI           | 804                    | Irriguo, potabile         | 556                    | Sperimentale     |
| I5  | Mass. Nicodemo  |      | Enel         |                        | Idroelettrico             | 15.15                  | normale          |
| I6  | Serra del Corvo | 1974 | EI           | 267                    | Irriguo, potabile         | 42,65                  | Sperimentale     |
| I7  | Genzano         | 1978 | EI           | 36.2                   | Irriguo, potabile         | 57,6                   | Non in esercizio |
| I8  | Acerenza        | 1984 | EI           | 142                    | Irriguo, potabile         | 47                     | Non in esercizio |
| I9  | Gannano         |      | CBBM         |                        | Irriguo                   | 2,72                   | normale          |
| I10 | Zaffiro         |      |              |                        | Irriguo                   | 0,03                   | In studio        |
| I11 | Altamura        |      |              |                        | Irriguo                   | 1,5                    | In costruzione   |
| I12 | Pignola         |      |              |                        | Industriale               | 6,5                    | In costruzione   |
| I13 | Marsico Nuovo   | 1983 | CBAVA        | 26                     | Irriguo, industr., potab. | 5,85                   | Sperimentale     |

La Formazione delle Argille subappennine (Pliocene Sup.-Plietocene Medio), di natura pelitica, chiude la successione e costituisce il substrato dell'intera area.

Le valli fluviali e la piana costiera di Metaponto sono coperte da depositi prevalentemente alluvionali ma anche di transizione e marini.

Infine si distinguono in affioramento sabbie di spiaggia e dune costiere, depositi sabbiosi che costituiscono, lungo la costa attuale, una fascia pressoché continua, larga circa un chilometro.

Dall'analisi delle stratigrafie e delle analisi granulometriche, sono state distinte alcune unità litologiche (Polemio et al., 2002a) (Fig. 3). Dall'alto, si distinguono nei depositi marini terrazzati tre unità litologiche: ciottoli in matrice sabbiosa, localmente cementati, con frequenti livelli argillosi o sabbiosi; sabbie, con frequenti livelli argillosi, ghiaiosi o arenitici, e argille o argille limose.

Nella piana costiera, dall'alto, si distinguono 4 unità litologiche: argille; sabbie, con lenti argillose, argilloso-limose, ghiaie o ciottoli talvolta cementati; argille e quindi nuovamente sabbie. La gran parte delle perforazioni più profonde, realizzate per approvvigionamento idrico, raggiungono solo l'unità argillosa: il suo spessore è spesso incerto, al più pari a circa 30 m. Ancora meno caratterizzata la sottostante unità sabbiosa.

Ai fini pratici l'unità sabbiosa superficiale ha maggiore interesse in quanto costituisce l'acquifero superficiale della piana costiera. La massima potenza di questa unità è di alcune decine di metri. Il suo letto è al di sopra del livello del mare solo lontano dalla costa.

La situazione litologica e strutturale comporta che l'area possa essere schematizzata, dal punto di vista idrogeologico, in estrema sintesi, in due tipi principali di acquiferi.

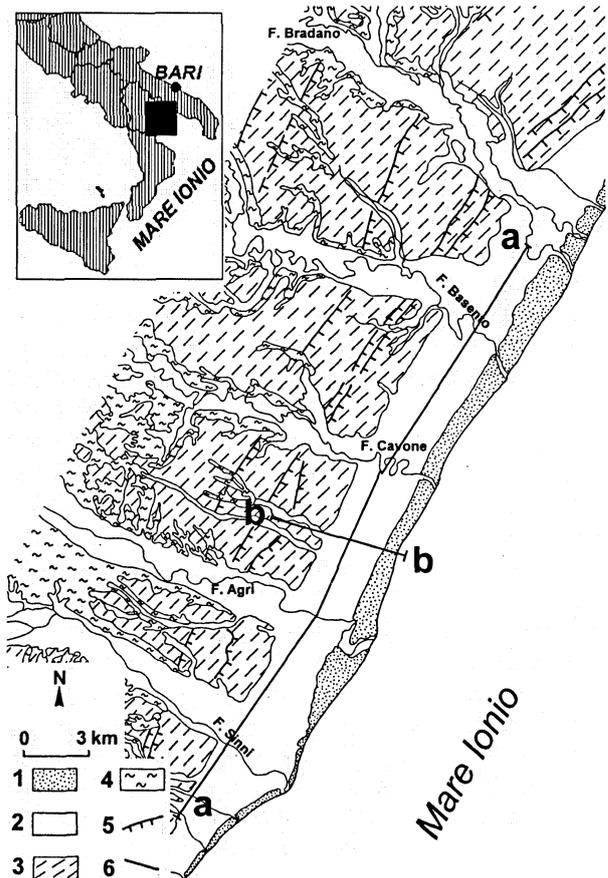


Fig. 2 - Carta geologica schematica (Polemio et al 2002a, semplificata): 1) Dune e spiaggia; 2) Depositi alluvionali marini e di transizione; 3) Depositi marini terrazzati; 4) Argille subappennine; 5) scarpata dei terrazzi marini; 6) asse sezione.

*Schematic geological map of the study area (Polemio et al 2002a, simplified): 1) coastal deposits; 2) alluvial, transitional and marine deposits; 3) marine terraces; 4) Argille (Clay) subappennine Formation; 5) marine terraced scarps; 6) lithological sections lines.*

TAB. 1 Caratteristiche delle opere di sbarramento e derivazione poste a monte dell'area di studio. AC) Anno in cui termina la costruzione, BIS) bacino imbrifero sotteso, VOL) volume di invaso secondo la vigente normativa, EI) Ente per lo sviluppo dell'irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia e Lucania, CBBM Consorzio di Bonifica Bradano e Metaponto, CBAVA Consorzio di Bonifica dell'Alta Val d'Agri. *Characteristics of barrages or dams for water river located upstream of the study area. AC) End construction year ; BIS) catchment area , VOL) artificial lake capacity; EI) EI body, CBBM) CBBM body, CBAVA) CBAVA body.*

| N.  | Nome            | AC   | Ente gestore | BIS (km <sup>2</sup> ) | Uso                       | VOL (Mm <sup>3</sup> ) | Esercizio        |
|-----|-----------------|------|--------------|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| I1  | Camastra        | 1962 | EI           | 350                    | Irriguo, industr., potab. | 28.9                   | Sperimentale     |
| I2  | S. Giuliano     | 1959 | CBBM         | 1361                   | Irriguo                   | 107.77                 | normale          |
| I3  | Pertusillo      | 1963 | EI           | 530                    | Irriguo, industr., potab. | 159.2                  | limitato         |
| I4  | Monte Cotugno   | 1972 | EI           | 804                    | Irriguo, potabile         | 556                    | Sperimentale     |
| I5  | Mass. Nicodemo  |      | Enel         |                        | Idroelettrico             | 15.15                  | normale          |
| I6  | Serra del Corvo | 1974 | EI           | 267                    | Irriguo, potabile         | 42,65                  | Sperimentale     |
| I7  | Genzano         | 1978 | EI           | 36.2                   | Irriguo, potabile         | 57,6                   | Non in esercizio |
| I8  | Acerenza        | 1984 | EI           | 142                    | Irriguo, potabile         | 47                     | Non in esercizio |
| I9  | Gannano         |      | CBBM         |                        | Irriguo                   | 2,72                   | normale          |
| I10 | Zaffiro         |      |              |                        | Irriguo                   | 0,03                   | In studio        |
| I11 | Altamura        |      |              |                        | Irriguo                   | 1,5                    | In costruzione   |
| I12 | Pignola         |      |              |                        | Industriale               | 6,5                    | In costruzione   |
| I13 | Marsico Nuovo   | 1983 | CBAVA        | 26                     | Irriguo, industr., potab. | 5,85                   | Sperimentale     |

La Formazione delle Argille subappennine (Pliocene Sup.-Plietocene Medio), di natura pelitica, chiude la successione e costituisce il substrato dell'intera area.

Le valli fluviali e la piana costiera di Metaponto sono coperte da depositi prevalentemente alluvionali ma anche di transizione e marini.

Infine si distinguono in affioramento sabbie di spiaggia e dune costiere, depositi sabbiosi che costituiscono, lungo la costa attuale, una fascia pressoché continua, larga circa un chilometro.

Dall'analisi delle stratigrafie e delle analisi granulometriche, sono state distinte alcune unità litologiche (Polemio et al., 2002a) (Fig. 3). Dall'alto, si distinguono nei depositi marini terrazzati tre unità litologiche: ciottoli in matrice sabbiosa, localmente cementati, con frequenti livelli argillosi o sabbiosi; sabbie, con frequenti livelli argillosi, ghiaiosi o arenitici, e argille o argille limose.

Nella piana costiera, dall'alto, si distinguono 4 unità litologiche: argille; sabbie, con lenti argillose, argilloso-limose, ghiaie o ciottoli talvolta cementati; argille e quindi nuovamente sabbie. La gran parte delle perforazioni più profonde, realizzate per approvvigionamento idrico, raggiungono solo l'unità argillosa: il suo spessore è spesso incerto, al più pari a circa 30 m. Ancora meno caratterizzata la sottostante unità sabbiosa.

Ai fini pratici l'unità sabbiosa superficiale ha maggiore interesse in quanto costituisce l'acquifero superficiale della piana costiera. La massima potenza di questa unità è di alcune decine di metri. Il suo letto è al di sopra del livello del mare solo lontano dalla costa.

La situazione litologica e strutturale comporta che l'area possa essere schematizzata, dal punto di vista idrogeologico, in estrema sintesi, in due tipi principali di acquiferi.

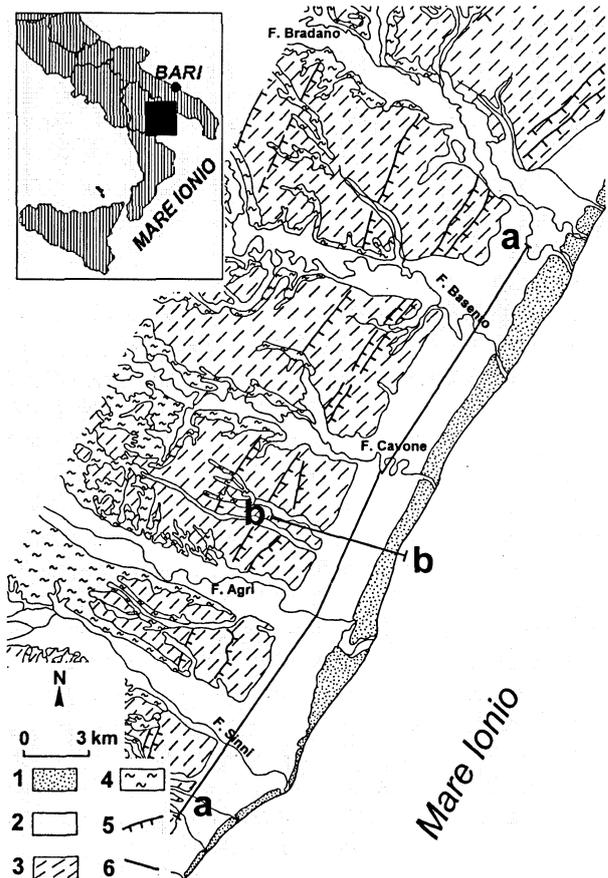


Fig. 2 – Carta geologica schematica (Polemio et al 2002a, semplificata): 1) Dune e spiaggia; 2) Depositi alluvionali marini e di transizione; 3) Depositi marini terrazzati; 4) Argille subappennine; 5) scarpata dei terrazzi marini; 6) asse sezione.

*Schematic geological map of the study area (Polemio et al 2002a, simplified): 1) coastal deposits; 2) alluvial, transitional and marine deposits; 3) marine terraces; 4) Argille (Clay) subappennine Formation; 5) marine terraced scarps; 6) lithological sections lines.*

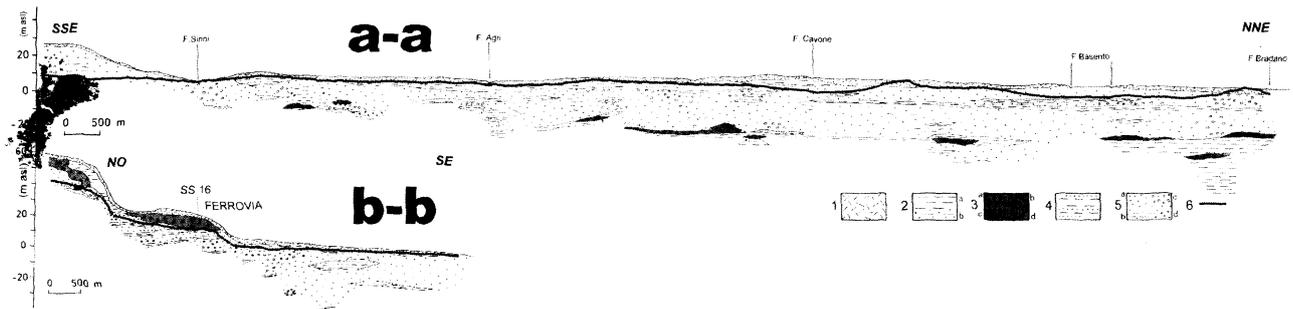


Fig. 3 – Sezione litologica schematica (Polemio et al 2002a): 1) suolo; 2) argille o argille limose (a) e localmente argille sabbiose (b); 3) ciottoli (a) in una matrice sabbiosa (b) or argillosa (c) oppure localmente cementati (d); 4) sabbie con livelli argillosi; 5) sabbie o sabbie limose (a), localmente sabbie argillose (b) o con ghiaie (c), localmente arenarie (d); 6) superficie piezometrica (m slm).

*Schematic lithological sections (Polemio et al 2002a, simplified): 1) soil; 2) clays or silty clays (yellow, brown, grey; a) and locally sandy clays (b); 3) pebbles (a) in a sandy (b) or clayey matrix (c); pebbles locally cemented (d); 4) grey sands with clayey strata; 5) grey or yellow sands and silty sands (a), locally clayey sands (b) or with gravels (c), locally sandstone strata (d); 6) piezometric surface (m a.s.l.).*

Il primo tipo, disposto all'interno del territorio, include più acquiferi costituiti dai depositi marini terrazzati e dai depositi alluvionali giacenti nelle valli fluviali. Per quanto potrebbero essere ulteriormente suddivisi, questi acquiferi sono accomunati dalla circostanza che ciascuno interrompe la continuità degli adiacenti, essendo così impedito l'accumulo di risorse ingenti.

Utilizzando i dati relativi ad oltre 800 pozzi, è stato elaborato l'andamento della superficie piezometrica (Fig. 4); emerge così che gli acquiferi hanno anche in comune la direzione principale di flusso idrico, orientata, in prima approssimazione, verso la costa ionica. Infine, sono gli unici a dar vita a delle sorgenti (Fig. 5).

La conducibilità idraulica degli acquiferi costituiti dai terrazzi marini è peraltro generalmente maggiore di quella degli acquiferi alluvionali delle valli fluviali. Tra questi ultimi l'unica eccezione è costituita dall'acquifero del F. Sinni, in passato molto ricco in virtù di una copiosa alimentazione garantita dalle perdite d'alveo, drasticamente ridotta dalle derivazioni effettuate dalla diga di M. Cotugno. Si consideri, a tale proposito, che buona parte delle sorgenti censite lungo la valle Sinni (SIMN, 1937) sono oramai scomparse (Fig. 5).

Il secondo tipo include unicamente l'acquifero della piana costiera, che si estende per circa 40 lungo la costa e per alcuni chilometri tra il mare e l'affioramento dei depositi marini terrazzati. E' l'acquifero più interessante per la captazione di acque sotterranee, non tanto per la conducibilità idraulica, non tanto alta (in media pari a  $2,3 \cdot 10^{-4}$  m/s), ma per la sua estensione, potenza e continuità lungo l'intera piana, laddove si concentrano la gran parte delle potenziali utenze. Per tale ragione, nel seguito, si darà risalto alle conoscenze emerse per quest'ultimo acquifero.

L'acquifero costiero è generalmente multistrato. Il più superficiale strato acquifero, l'unico diffusamente sfruttato e caratterizzato, è costituito da un uno strato sabbioso, in cui il flusso idrico sotterraneo avviene diffusamente in pressione grazie all'effetto di strati

argillosi presenti sia a letto che a tetto. L'assenza del tetto argilloso si osserva a luoghi, come in prossimità del Fiume Basento e in alcune aree in adiacenza della costa. In ogni caso la soggiacenza è bassa, in genere inferiore a 7-10 m.

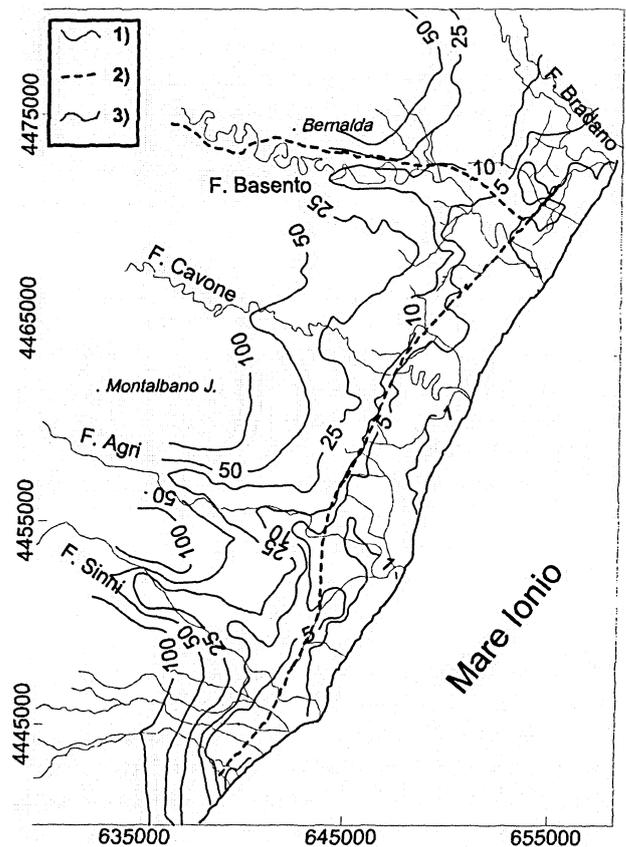


Fig. 4 - Carta Piezometrica dell'area di studio. 1) Reticolo idrografico, 2) Linea ferroviaria, 3) Isopieziche (m slm).  
 Piezometric map. 1) Main drainage network, 2) Railway, 3) piezometric contour line (m asl).

L'acquifero costiero è alimentato dagli acquiferi del primo tipo, posti a monte, in particolare dalle acque sotterranee provenienti dai depositi dei terrazzi marini (Fig. 4). Allo stesso tempo, come mostrato dalle figure 3 e 4, gli alvei fluviali nella piana costiera sono tanto incisi da tagliare per intero gli strati affioranti a bassa permeabilità mentre la superficie piezometrica soggiace altimetricamente alla corrente fluviale, circostanze che rendono possibile una copiosa ricarica fluviale.

La ricarica diretta è da ritenersi invece modesta, sia per le piogge efficaci molto basse, come si dirà, sia per la scarsa incidenza su queste delle infiltrazioni, in virtù del diffuso affioramento di terreni a bassa permeabilità.

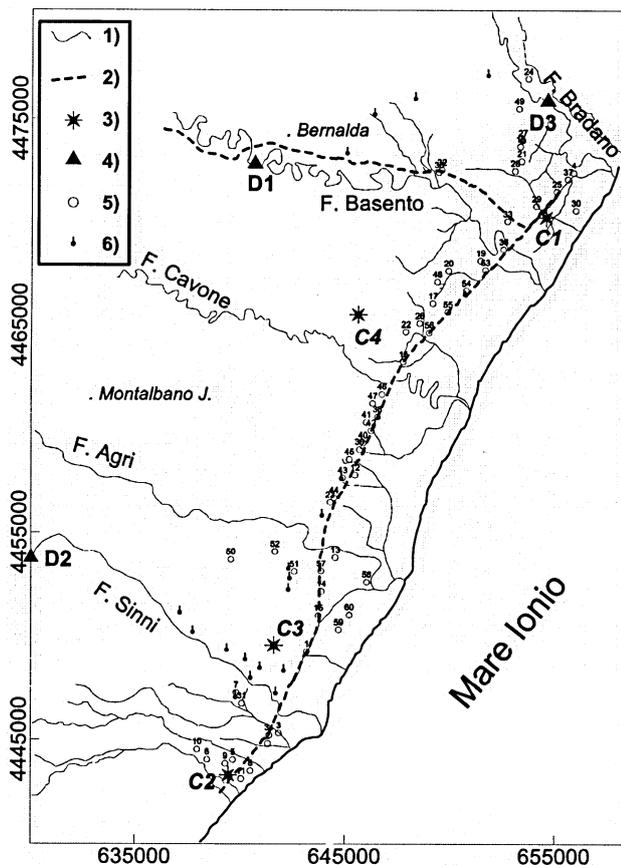


Fig. 5 – Stazioni di misura pluviometriche, termometriche, idrometriche e piezometriche (Cfr. Tabella 2). 1) Reticolo idrografico, 2) Linea ferroviaria, 3) stazione pluviometrica o termopluviometrica, 4) stazioni idrometrica fluviale, 5) stazione piezometrica, 6) sorgente (censita dal SIMN, 1937). *Rainfall, thermometric, river discharge and piezometric gauges (See Table 2). 1) Main drainage network, 2) Railway, 3) rain and temperature gauge, 4) river discharge gauge, 5) piezometric gauge, 6) spring (according to SIMN, 1937).*

#### DESCRIZIONE ED ANALISI PRELIMINARE DEI DATI

Sono stati raccolti i dati mensili costituenti serie cronologiche pluviometriche, termometriche, idrometriche e piezometriche; a tal fine si è fatto

riferimento ai dati pubblicati dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN, 1923-2000) (Tabb. 2-3, Fig. 5).

In particolare, sono stati raccolti i dati inerenti le quote piezometriche medie mensili di 60 pozzi. Tali stazioni piezometriche hanno iniziato a funzionare non prima del 1927; dal 1941 al 1950 e, purtroppo, dal 1985 in poi, non sono disponibili dati piezometrici. Il numero massimo di anni di esercizio di una singola stazione piezometrica è 41. Sulla base delle dettagliate conoscenze acquisite per il tramite della banca dati costituita (POLEMIO 2002 a, b, c), valorizzate dal ricorso a tecniche GIS e dallo studio idrogeologico svolto, a ciascun pozzo piezometrico considerato sono state associate le più probabili caratteristiche idrogeologiche e le modalità di flusso idrico sotterraneo. Inoltre, tra quelle disponibili, sono state selezionate le stazioni termopluviometriche e idrometriche che hanno operato in prossimità dei pozzi in studio, raccogliendo ed analizzando serie di dati riguardanti l'altezza mensile di precipitazione, la temperatura atmosferica e il deflusso fluviale. Gli indicatori statistici descrittivi, riportati dalle tabelle 2 e 3, si riferiscono all'anno solare.

Le quattro stazioni pluviometriche hanno un periodo di funzionamento di 60 anni circa. La piovosità media annua è compresa tra 536 e 586 mm, in ogni caso molto bassa. La piovosità annua minima registrata è relativa alla "stazione, tipo di serie" "C1,P", pari a 236 mm, verificatasi nel 1922, la massima è relativa alla C4,P, pari a 1106 mm, caduti nel 1946.

I dati della temperatura atmosferica sono stati rilevati in tre stazioni, per un periodo piuttosto disomogeneo, da un minimo di 26 ad un massimo di 56 anni. La temperatura atmosferica media annua è compresa tra 16,2 e 16,8 °C.

Nell'anno medio, la piovosità annua è inferiore a 600 mm mentre la temperatura annua è quasi pari a 17 °C. L'intera Piana di Metaponto è quindi caratterizzata da condizioni climatiche sfavorevoli all'accumulo delle risorse idriche. Utilizzando il tradizionale metodo di Thornthwaite e Mather, risulta per la stazione C1, assunta una capacità di ritenzione di 100 mm, che la piovosità efficace annua è pari a 101 mm, distribuiti da dicembre a marzo. Secondo la classificazione climatica di Thornthwaite, il clima è semiarido.

Le portate fluviali medie annue sono risultate comprese tra 4,7 e 20,7 m<sup>3</sup>/s. La portata minima assoluta è stata registrata dalla stazione D2 del F. Bradano (1,3 m<sup>3</sup>/s) e quella massima dalla stazione D1 del F. Basento (35,2 m<sup>3</sup>/s). Tale massimo si riferisce al 1929, anno per cui non sono disponibili dati per le restanti stazioni. Negli anni di funzionamento comune, dal '51 al '71, è stato il 1959 a registrare i massimi deflussi. Si noti che non sono disponibili dati, almeno in prossimità della foce, per i fiumi Agri e Cavone nonché dal 1972 non vi è alcun dato disponibile. Determinando le medie aritmetiche mensili per ciascuna serie storica, sono stati determinati i regimi caratteristici della Piana di Metaponto (Fig. 6).

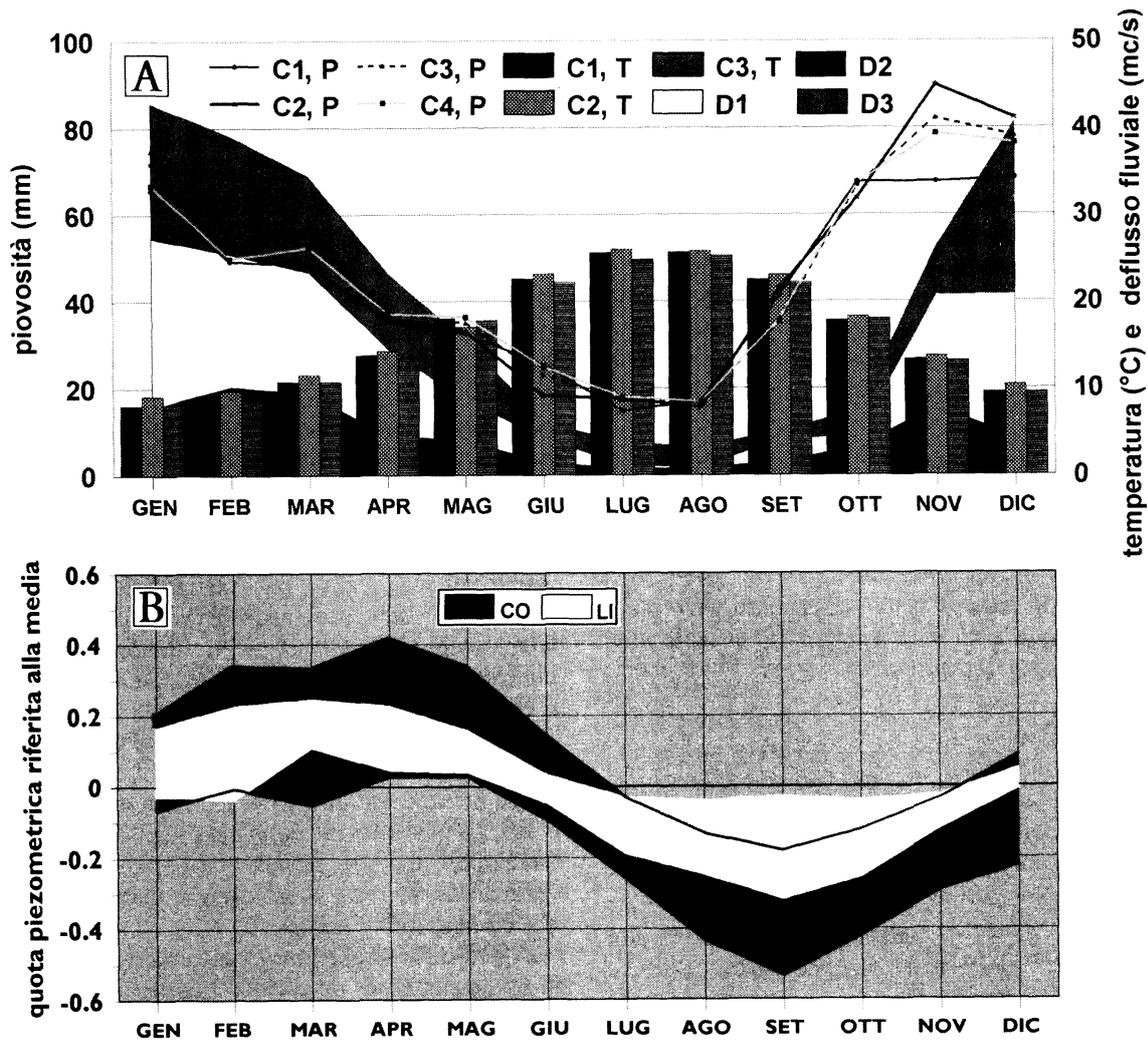


Fig. 6 – Regimi termopluviometrico, di deflusso fluviale e piezometrico. Diagramma A: stazioni da C1 a C4, pluviometriche (P) e termometriche (T); stazioni da D1 a D3 di deflusso fluviale. Diagramma B: fuso definito dai regimi piezometrici dei pozzi in falda confinata (CO) e libera (LI). *Rainfall, temperature, river discharge and piezometric regimens. A diagram: gauges C1 to C4, rainfall (P) and temperature (T) type; gauges D1 to D3 of river discharge. B Diagram: piezometric regimens area of confined (CO) and phreatic (LI) wells.*

Il regime delle precipitazioni, di tipo marittimo, ha il minimo a luglio o agosto e il massimo a novembre. Il regime delle temperature, di tipo moderato, presenta temperature minime a gennaio e massime a luglio o agosto. Il regime termopluviometrico risulta assolutamente omogeneo nell'area di studio, visti i modesti scostamenti registrati di mese in mese tra le quattro stazioni disponibili.

Le portate fluviali misurate dalle stazioni sui fiumi Basento, Bradano e Sinni hanno mostrato un regime sostanzialmente regolare, con un minimo ad agosto e un massimo a gennaio o febbraio. Il regime idrometrico relativo al Bradano (D1) appare meno regolare e dissimile dai restanti due. Tutti i regimi idrometrici mostrano inoltre un andamento stagionale molto simile a quello pluviometrico, denotando una relazione significativa tra piogge e portate fluviali, le cui variazioni seguono con un ritardo variabile da zero a 2 mesi quelle pluviometriche, al

passare dalla stagione arida estiva a quella umida invernale.

Per evidenziare le peculiarità del regime piezometrico e rimuovere l'effetto altimetrico, le quote piezometriche non sono state riferite al livello medio del mare ma alla quota piezometrica media annua del pozzo stesso (Fig. 6). Si è dovuto rinunciare a determinare un'unica curva media, rappresentativa del regime di tutta la falda, in quanto è risultato che le curve relative a ciascuna stazione descrivono regimi sostanzialmente di due tipi: il primo è relativo al gruppo di pozzi più numeroso, quello la cui falda risulta confinata, il secondo raccoglie invece i pozzi interessati da flusso idrico sotterraneo freatico. Questi due tipi sono rappresentativi del 90% dei pozzi considerati. I due tipi sono molto simili, in quanto presentano un unico minimo, principalmente nel mese di settembre e secondariamente ad ottobre, ed un unico massimo, da febbraio ad aprile. In termini di differenze, si osservi che

il massimo per i pozzi in pressione sembra arrivare con un minimo ritardo, non più di un mese. Inoltre, come già osservato da POLEMIO & RICCHETTI (1991), il regime piezometrico per i pozzi in pressione è caratterizzato da maggiori escursioni e da andamenti dello stesso costituito da spezzate, bruscamente raccordate in prossimità dei

valori estremi. Laddove si osservano condizioni freatiche dell'acquifero superficiale, il regime è risultato con minori escursioni e con un andamento sostanzialmente sinusoidale, ovvero con pendenze delle curve definite dal regime variabili con notevole continuità.

TAB. 2 - Caratteristiche delle stazioni termopluviometriche e idrometriche. C) Stazione pluviometrica o termopluviometrica, D) Stazione fluviale. AI) anno inizio osservazioni, AF) anno fine osservazioni, NA) numero anni di rilevazione, MIN, MED, MAX, SQM rispettivamente pari al valore minimo, medio, massimo e allo scarto quadratico medio annuo. *Characteristics of Rainfall, thermometric, river discharge and piezometric gauges. C) rain and temperature gauge, D) river discharge gauge, AI) beginning of observations' year, AF) end of observations' year, NA) number of survey years, MIN, MED, MAX, SQM respectively minimum, mean, maximum and standard deviation.*

| Codice | Stazione        | Parametro                    | AI   | AF   | NA | MIN    | MED    | MAX     | SQM    |
|--------|-----------------|------------------------------|------|------|----|--------|--------|---------|--------|
| C1     | Metaponto       | Pioggia (mm)                 | 1918 | 1981 | 64 | 236,00 | 535,55 | 927,00  | 148,66 |
|        |                 | Temperatura (°C)             | 1926 | 1981 | 56 | 15,1   | 16,40  | 18,3    | 0,70   |
| C2     | Nova Siri Scalo | Pioggia (mm)                 | 1931 | 2000 | 67 | 266,60 | 560,41 | 1099,00 | 172,85 |
|        |                 | Temperatura (°C)             | 1936 | 1987 | 48 | 14,6   | 16,80  | 18,9    | 0,90   |
| C3     | Policoro        | Pioggia (mm)                 | 1923 | 1988 | 64 | 314,60 | 586,00 | 954,00  | 140,59 |
|        |                 | Temperatura (°C)             | 1960 | 1986 | 27 | 15,4   | 16,20  | 17,4    | 0,5    |
| C4     | S. Basilio      | Pioggia (mm)                 | 1924 | 1976 | 53 | 290,20 | 560,66 | 1106,00 | 164,04 |
| D1     | Menzena         | Deflusso (m <sup>3</sup> /s) | 1929 | 1971 | 28 | 4,8    | 13,00  | 39,9    | 6,4    |
| D2     | Tavole Palatine | Deflusso (m <sup>3</sup> /s) | 1951 | 1971 | 21 | 1,34   | 4,68   | 11,79   | 3,77   |
| D3     | Valsinni        | Deflusso (m <sup>3</sup> /s) | 1951 | 1971 | 21 | 10,94  | 20,65  | 35,22   | 5,62   |

TAB. 3 - Caratteristiche delle stazioni piezometriche. AI) anno inizio osservazioni, AF) anno fine osservazioni, NA) numero anni rilevati, QM) quota piezometrica media del pozzo (m slm), MEM) massima escursione mensile (m), CA1) e CA2) coefficiente di regressione rispettivamente relativi al periodo 1927-1940 e 1951-1984 (m/anno). *Piezometric gauges characteristics. AI) beginning of observations' year, AF) end of observations' year, NA) number of survey years, QM) mean piezometric height (m asl), MEM) maximum monthly range (m), regression coefficient CA1) 1927 to 1940 and CA2) 1951-1984 (m/year).*

| N. | AI   | AF   | NA | QM    | MEM   | CA1    | CA2    | N. | AI   | AF   | NA | QM    | MEM   | CA1    | CA2    |
|----|------|------|----|-------|-------|--------|--------|----|------|------|----|-------|-------|--------|--------|
| 1  | 1937 | 1952 | 6  | 2,36  | 1,41  |        |        | 31 | 1931 | 1952 | 12 | 7,51  | 3,23  | -0,062 |        |
| 2  | 1931 | 1984 | 41 | 2,42  | 1,78  | -0,006 | -0,005 | 32 | 1928 | 1969 | 32 | 10,80 | 1,84  | -0,026 | -0,030 |
| 3  | 1931 | 1971 | 31 | 2,58  | 1,96  | 0,018  | -0,025 | 33 | 1931 | 1969 | 29 | 1,19  | 2,13  | -0,042 | -0,008 |
| 4  | 1931 | 1969 | 27 | 0,93  | 1,86  | -0,006 | 0,004  | 34 | 1931 | 1984 | 40 | 2,83  | 2,45  | -0,013 | -0,014 |
| 5  | 1932 | 1951 | 10 | 4,86  | 3,99  | -0,099 |        | 35 | 1929 | 1961 | 24 | 8,92  | 3,63  | 0,033  | 0,039  |
| 6  | 1931 | 1951 | 9  | 5,91  | 7,67  |        |        | 36 | 1927 | 1960 | 24 | 0,97  | 2,06  | -0,009 | 0,052  |
| 7  | 1931 | 1931 | 1  | 19,63 | 0,61  |        |        | 37 | 1929 | 1956 | 17 | 0,95  | 1,57  | -0,002 | 0,098  |
| 8  | 1931 | 1952 | 12 | 2,28  | 1,29  | 0,014  |        | 38 | 1931 | 1969 | 29 | 6,23  | 3,31  | -0,060 | 0,140  |
| 9  | 1931 | 1963 | 19 | 6,87  | 6,39  |        |        | 39 | 1931 | 1956 | 15 | 9,39  | 1,77  | 0,039  |        |
| 10 | 1931 | 1938 | 7  | 12,91 | 14,71 |        |        | 40 | 1931 | 1969 | 28 | 6,35  | 1,71  | -0,018 |        |
| 11 | 1931 | 1940 | 10 | 2,80  | 1,34  | -0,022 |        | 41 | 1931 | 1969 | 28 | 6,60  | 3,23  | -0,060 | 0,176  |
| 12 | 1931 | 1936 | 6  | 10,07 | 1,67  |        |        | 42 | 1931 | 1969 | 29 | 6,64  | 1,83  | -0,006 | 0,019  |
| 13 | 1937 | 1952 | 6  | 2,67  | 0,66  |        |        | 43 | 1931 | 1964 | 24 | 9,71  | 2,62  | -0,004 | 0,138  |
| 14 | 1937 | 1952 | 6  | 2,33  | 0,81  |        |        | 44 | 1931 | 1969 | 29 | 12,17 | 4,65  | -0,219 | 0,027  |
| 15 | 1937 | 1952 | 6  | 1,92  | 1,40  |        |        | 45 | 1931 | 1969 | 29 | 11,98 | 11,43 | -0,007 | -0,041 |
| 16 | 1935 | 1936 | 2  | 5,68  | 0,51  |        |        | 46 | 1931 | 1956 | 16 | 7,23  | 3,01  | -0,065 |        |
| 17 | 1935 | 1969 | 25 | 6,39  | 3,49  | -0,025 | 0,025  | 47 | 1931 | 1963 | 22 | 14,54 | 4,48  | -0,236 | 0,127  |
| 18 | 1951 | 1969 | 19 | 6,07  | 1,55  |        | 0,022  | 48 | 1935 | 1968 | 24 | 5,88  | 1,60  | 0,010  | -0,010 |
| 19 | 1935 | 1963 | 19 | 2,69  | 4,03  |        | 0,131  | 49 | 1933 | 1969 | 32 | 10,60 | 3,15  | 0,005  |        |
| 20 | 1935 | 1940 | 6  | 4,96  | 2,50  |        |        | 50 | 1937 | 1952 | 6  | 30,08 | 1,31  |        |        |
| 21 | 1928 | 1969 | 32 | 4,47  | 2,77  | 0,009  | 0,046  | 51 | 1937 | 1952 | 6  | 21,18 | 0,62  |        |        |
| 22 | 1935 | 1937 | 3  | 13,72 | 1,00  |        |        | 52 | 1936 | 1952 | 6  | 10,57 | 2,10  |        |        |
| 23 | 1927 | 1938 | 8  | 13,06 | 4,91  |        |        | 53 | 1935 | 1969 | 25 | 2,59  | 1,91  | 0,108  | 0,002  |
| 24 | 1928 | 1938 | 11 | 11,77 | 1,67  | -0,039 |        | 54 | 1935 | 1964 | 20 | 3,75  | 1,52  |        | 0,028  |
| 25 | 1931 | 1940 | 10 | 1,20  | 1,52  |        |        | 55 | 1935 | 1974 | 31 | 4,43  | 2,70  |        | 0,006  |
| 26 | 1935 | 1963 | 18 | 5,93  | 1,83  |        | 0,065  | 56 | 1935 | 1974 | 31 | 5,22  | 3,11  |        | 0,057  |
| 27 | 1929 | 1969 | 32 | 3,83  | 2,10  | -0,003 | 0,008  | 57 | 1937 | 1952 | 6  | 1,57  | 0,86  |        |        |
| 28 | 1927 | 1969 | 33 | 4,42  | 2,46  | 0,070  | 0,028  | 58 | 1937 | 1940 | 4  | 0,82  | 1,08  |        |        |
| 29 | 1929 | 1969 | 32 | 1,56  | 1,95  | -0,005 | -0,009 | 59 | 1937 | 1952 | 6  | 0,85  | 1,52  |        |        |
| 30 | 1933 | 1961 | 19 | 0,52  | 2,34  |        | 0,088  | 60 | 1937 | 1952 | 6  | 1,05  | 1,07  |        |        |

I restanti pozzi hanno mostrato un regime piezometrico diverso, talvolta irregolare. Trattasi di pozzi comunque poco significativi in quanto, a secondo dei casi, sono posti fuori dalla piana costiera, vicini alle aree urbanizzate o interessati da un numero di anni di rilievo molto basso.

L'escursione piezometrica nell'anno medio, cioè descritta dai singoli regimi piezometrici, è risultata compreso tra 0,1 m e 4,8 m. In realtà, se si escludono i pozzi 5, 6, 9 e 10, posti nell'interno rispetto a Nova Siri scalo, tale massimo scende a 1,0 m.

La massima escursione piezometrica mensile, ovvero la differenza tra il massimo e il minimo assoluto mensile di ciascun pozzo, è compresa tra 0,5 e 14,7 m. Trascurando nuovamente i pozzi 5, 6, 9 e 10, l'escursione massima scende a 4,9 m. Dal punto di vista spaziale, tale variabile sembra crescere dalla costa verso l'interno e al crescere della distanza dai principali corsi d'acqua. In ogni caso, l'escursione massima cresce, anche se non molto, al crescere del numero di anni di misura. I minimi piezometrici assoluti si sono verificati negli ultimi anni '30, ma poche stazioni erano funzionanti, tra il 1938 e il 1939 e, i più numerosi, tra il 1952 e il 1954, quando lo sfruttamento della falda era notevole come conseguenza della riforma fondiaria e dell'assenza di adduzioni per usi agricoli di risorse esterne; tali minimi si sono verificati tra agosto e settembre, più raramente tra ottobre e novembre. I massimi piezometrici mensili si sono verificati nel 1931, 1940 e nei primi mesi del 1960, periodo questo preceduto da circa 3 mesi di precipitazioni intense e da portate fluviali record, queste ultime causa di catastrofiche inondazioni; tali massimi si sono verificati generalmente tra gennaio ed aprile e più frequentemente tra febbraio e marzo. Si consideri peraltro che la rete di monitoraggio piezometrico è ormai inattiva da circa 20 anni e che mancano dati da correlare con le recenti ed attuali siccità.

#### CARATTERI TENDENZIALI DELLE SERIE STORICHE

La notevole quantità di dati storici, se pur non molto recenti, ha permesso di valutare la variabilità e l'evoluzione nel tempo della disponibilità delle risorse idriche sotterranee. In particolare, si è cercato di caratterizzare lo stato quantitativo delle acque sotterranee, esprimendo una semplice tendenza al miglioramento o peggioramento, utilizzando le quote piezometriche annue. La tendenza evolutiva è stata espressa attraverso il calcolo della regressione lineare.

La stessa procedura è stata poi applicata alle serie termopluviometriche e idrometriche, per evidenziare eventuali relazioni. Si è proceduto al calcolo dei trend delle serie storiche, determinando, tra l'altro, il coefficiente angolare, detto coefficiente di regressione, della retta di regressione lineare, in altre parole la retta che meglio interpola i punti costituenti ciascuna serie storica.

Per quanto attiene alle serie piezometriche, i coefficienti di regressione sono riportati relativamente a due distinti intervalli di tempo, dal 1927 al 1940 e dal 1951 al 1984, utilizzando pozzi con almeno 10 anni di funzionamento (Tab. 3).

Nel periodo 1927-1940 si evidenzia che un 80 % dei pozzi hanno determinato un coefficiente negativo, che comporta una tendenza diffusa al calo piezometrico, in media pari a circa 5 cm l'anno. Nello stesso periodo le serie pluviometriche mostrano un trend leggermente crescente, quelle termometriche nulla di significativo mentre quelle di deflusso non sono praticamente disponibili. Si noti che in quegli anni la falda idrica sotterranea era l'unica risorsa praticamente disponibile per l'uso irriguo.

Non essendo ancora iniziato il grande sfruttamento delle risorse idriche superficiali, tali preliminari risultati evidenziano che tale falda idrica sotterranea, soggetta a crescente sfruttamento, abbia mostrato segni di degrado quantitativo.

Nel periodo dal 1951 al 1984 (dal 1980 solo due pozzi sono disponibili) il trend si inverte, il 75 % dei pozzi mostra un trend crescente. Tutto ciò accade nonostante sia le precipitazioni sia i deflussi fluviali mostrino trend decrescenti nello stesso periodo. Per quanto i diverse tipi di serie disponibili si sovrappongano solo parzialmente, è evidente che nella seconda metà del secolo scorso è prevalso l'effetto dell'irrigazione con acque derivate dalle dighe, circostanza che ha indotto sia notevoli eccessi irrigui sia ad abbandonare i pozzi, in gran numero realizzati fino a i primi anni '50. Dal punto di vista termopluviometrico, l'unica stazione disponibile fino al 2000 è la C2. Il coefficiente di correlazione per la serie C2,P è pari a  $-2,11$  mm/anno ed è praticamente nullo, pur se positivo, per la serie C2,T. In sostanza, a fronte di modestissime e trascurabili incrementi di temperatura, comunque non benefici in termini di bilancio idrologico, si riscontra un calo pluviometrico sull'area che è di 211 mm in 100 anni, pari al 38% della piovosità media attuale. Tale dato è evidentemente da correlare alla recente siccità, del 1989-1991, e quella in corso dal 2000. Quest'ultima ha già causato la perdurante scarsa disponibilità di acque invasate presso le principali dighe regionali, inducendo le utenze, in particolare quelle irrigue, a riprendere lo sfruttamento intensivo della falda idrica sotterranea, perforando sempre nuovi pozzi. In sostanza, la fase attuale assomiglia a quanto accadeva nella prima parte del secolo scorso. L'andamento delle portate fluviali, misurate in pratica dal 1951 al 1971, risulta in netto decremento, registrando un coefficiente di regressione che è compreso tra 0,2 e 0,3  $m^3/(s \text{ anno})$ , pari a circa 10  $Mm^3$  ogni anno, per i tre fiumi soggetti a misure. I dati disponibili relativi all'entità dei prelievi dalle dighe, le erogazioni, sono relativi a periodi recenti, che poco o affatto si sovrappongono a quelli finora discussi. Per tale ragione il trend di tali variabili non viene descritto.

**L'AUTOCORRELAZIONE PIEZOMETRICA E LA  
DIPENDENZA DALLE ALTRE SERIE STORICHE**

La discussione della dipendenza dal tempo dei fenomeni piezometrici e il confronto del trend piezometrico con quello delle restanti variabili caratterizzanti il ciclo idrologico, ha fornito interessanti conoscenze ma non in merito all'esistenza di relazioni a breve termine tra quanto accaduto e quanto accadrà. In effetti, in campo idrologico e idrogeologico la manifestazione quantitativa di un dato fenomeno o variabile, quale la quota piezometrica, non dipende solo dal tempo ma anche da valori che la variabile stessa od altre, a questa evidentemente correlabili, hanno assunto in precedenza. Nel primo caso si può rilevare un carattere della variabile prescelta che è chiamato persistenza, che consiste nella capacità della variabile di assumere valori nel tempo poco diversi dai precedenti. La persistenza può essere quantificata mediante un indicatore statistico quale il coefficiente di autocorrelazione.

Il coefficiente rappresenta l'effetto esercitato sul valore assunto da una variabile al tempo  $i$ -esimo dai valori assunti dalla stessa variabile al tempo  $i-k$ , dove  $k$  si esprime nell'unità di tempo prescelta ed è noto come ritardo (*lag*) (Maione & Moisello (1993). Nel secondo caso si valuta la possibile relazione esistente tra due variabili mediante il calcolo del coefficiente di crosscorrelazione. Detto coefficiente esprime l'effetto esercitato sul valore di una variabile detta principale al tempo  $i$ -esimo dai valori assunti da un'altra variabile detta secondaria al tempo  $i-k$ , dove  $k$  esprime nell'unità di tempo prescelta il ritardo (*lag*).

Per effettuare l'analisi di autocorrelazione e di crosscorrelazione si è passati dalle variabili annuali a quelle mensili. La figura 7 rappresenta l'andamento di due tra le più lunghe serie piezometriche disponibili nonché le corrispondenti serie termopluviometriche, di deflusso fluviale oltre all'idrogramma delle erogazioni, cioè dei volumi sottratti al bacino idrografico dalla diga I1, ubicata lungo un affluente del F. Basento.

Si è reso necessario selezionare le serie migliori per continuità e durata non inferiore ad un decennio; infine sono state selezionate 13 serie, cioè 13 pozzi, e nell'ambito di queste serie sono state considerati 28 casi di studio, ottenuti individuando da 2 a 3 intervalli di tempo in cui ciascuna serie non presenta lacune.

Il calcolo dell'autocorrelazione è stato effettuato fino a un ritardo di 12 mesi, dato che i fenomeni studiati hanno ciclicità il cui periodo principale non si estende oltre l'anno. E' risultato che l'autocorrelazione massima, con valori prossimi ad uno, si raggiunge con ritardo pari a un mese nonché che decresce progressivamente all'aumentare del ritardo. L'autocorrelazione è priva di significato in tutti i casi per un ritardo maggiore di 6 mesi (regione di indipendenza temporale delle serie). La Tabella 4 riporta il minimo coefficiente di autocorrelazione significativo (CA) e il corrispondente numero di mesi di ritardo. Si noti che la falda idrica

mostra un rilevante effetto memoria, che si avverte da 2 a 6 mesi e che nei 28 casi di studio CA non è sceso mai al di sotto di 0,3 ed è spesso risultato ben maggiore. La massima memoria, pari a 6 mesi, si associa a pozzi in pressione.

Lo studio dell'autocorrelazione è stato effettuato sui restanti tipi di variabili temporali. La piovosità si comporta come una variabile aleatoria, assolutamente priva di autocorrelazione. La temperatura e il deflusso conservano una modesta memoria, al più quantificabile in uno e due mesi rispettivamente.

Per l'analisi di crosscorrelazione o di correlazione incrociata si è associato ad ogni stazione piezometrica la più significativa stazione pluviometrica, termometrica e, se esistente, di deflusso fluviale (Tab. 4).

TAB. 4 – Sintesi dei risultati dell'analisi di autocorrelazione e crosscorrelazione. Per ogni serie piezometrica selezionata, nel periodo di riferimento (PR), si riporta nella colonna (CA) il minimo coefficiente di autocorrelazione significativo e il corrispondente numero di mesi di ritardo nonché, per ciascuna delle stazioni significative (SS), rispettivamente pluviometriche (P), termometriche (T), e di deflusso fluviale (D), in valore assoluto il massimo coefficiente di crosscorrelazione e il corrispondente numero di mesi di ritardo. *Synthetic results of autocorrelation and crosscorrelation analyses. For each selected piezometric series, in the period of reference (PR), the minimum autocorrelation coefficient and the corresponding lag (months) is reported by column (CA); for each significant gauge (SS), of rainfall (P), thermometric (T) and river discharge type respectively, the maximum crosscorrelation coefficient (as absolute value) and the lag (months) is reported too*

| N  | PR        | CA     | SS     | P      | T       | D      |
|----|-----------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 2  | 1931-1940 | 0,51/2 | C2, D3 | 0,48/1 |         |        |
| 2  | 1951-1975 | 0,39/3 | C2, D3 | 0,39/1 | -0,52/1 | 0,6/1  |
| 2  | 1979-1984 | 0,48/2 | C2, D3 | 0,37/1 | -0,44/1 |        |
| 3  | 1931-1940 | 0,5/2  | C2, D3 | 0,47/1 | -0,72/1 |        |
| 3  | 1951-1971 | 0,45/3 | C2, D3 | 0,4/2  | -0,62/1 | 0,67/1 |
| 4  | 1931-1940 | 0,42/3 | C2, D3 | 0,13/2 | -0,26/4 |        |
| 4  | 1951-1969 | 0,32/4 | C2, D3 | 0,32/3 | -0,45/1 | 0,29/1 |
| 21 | 1927-1940 | 0,76/6 | C4     | 0,23/4 |         |        |
| 21 | 1951-1969 | 0,76/6 | C4     |        |         |        |
| 27 | 1927-1940 | 0,46/4 | C1, D2 | 0,27/2 | -0,39/2 |        |
| 27 | 1951-1969 | 0,29/4 | C1, D2 | 0,31/2 | -0,46/1 | 0,37/1 |
| 28 | 1927-1940 | 0,37/5 | C1, D2 | 0,18/2 | 0,42/1  | 0,25/1 |
| 28 | 1951-1969 | 0,47/6 | C1, D2 | 0,22/2 | -0,24/2 |        |
| 32 | 1928-1940 | 0,33/3 | C1, D1 | 0,31/1 | -0,59/1 |        |
| 32 | 1951-1969 | 0,39/6 | C1, D1 | 0,19/2 | -0,34/1 | 0,3/1  |
| 34 | 1931-1940 | 0,39/3 | C1     | 0,44/2 | -0,61/1 |        |
| 34 | 1951-1975 | 0,53/3 | C1     | 0,43/1 | -0,45/2 |        |
| 34 | 1979-1984 | 0,55/2 | C1     | 0,45/1 | -0,72/1 |        |
| 36 | 1927-1940 | 0,61/3 | C1, D1 | 0,24/1 | -0,43/2 |        |
| 36 | 1951-1960 | 0,46/3 | C1, D1 | 0,31/3 | -0,47/1 | 0,64/1 |
| 45 | 1931-1940 | 0,68/6 | C3     | 0,11/2 |         |        |
| 45 | 1951-1969 | 0,92/6 | C3     | 0,12/3 | -0,31/2 |        |
| 53 | 1935-1940 | 0,4/3  | C3     | 0,35/3 |         |        |
| 53 | 1951-1969 | 0,52/3 | C3     | 0,43/1 |         |        |
| 55 | 1935-1940 | 0,41/3 | C3, D3 | 0,3/3  | -0,33/2 | 0,57/1 |
| 55 | 1951-1975 | 0,65/2 | C3, D3 | 0,33/1 |         |        |
| 56 | 1935-1940 | 0,74/4 | C3, D3 | 0,18/3 |         | 0,34/1 |
| 56 | 1951-1975 | 0,49/3 | C3, D3 | 0,21/1 |         |        |

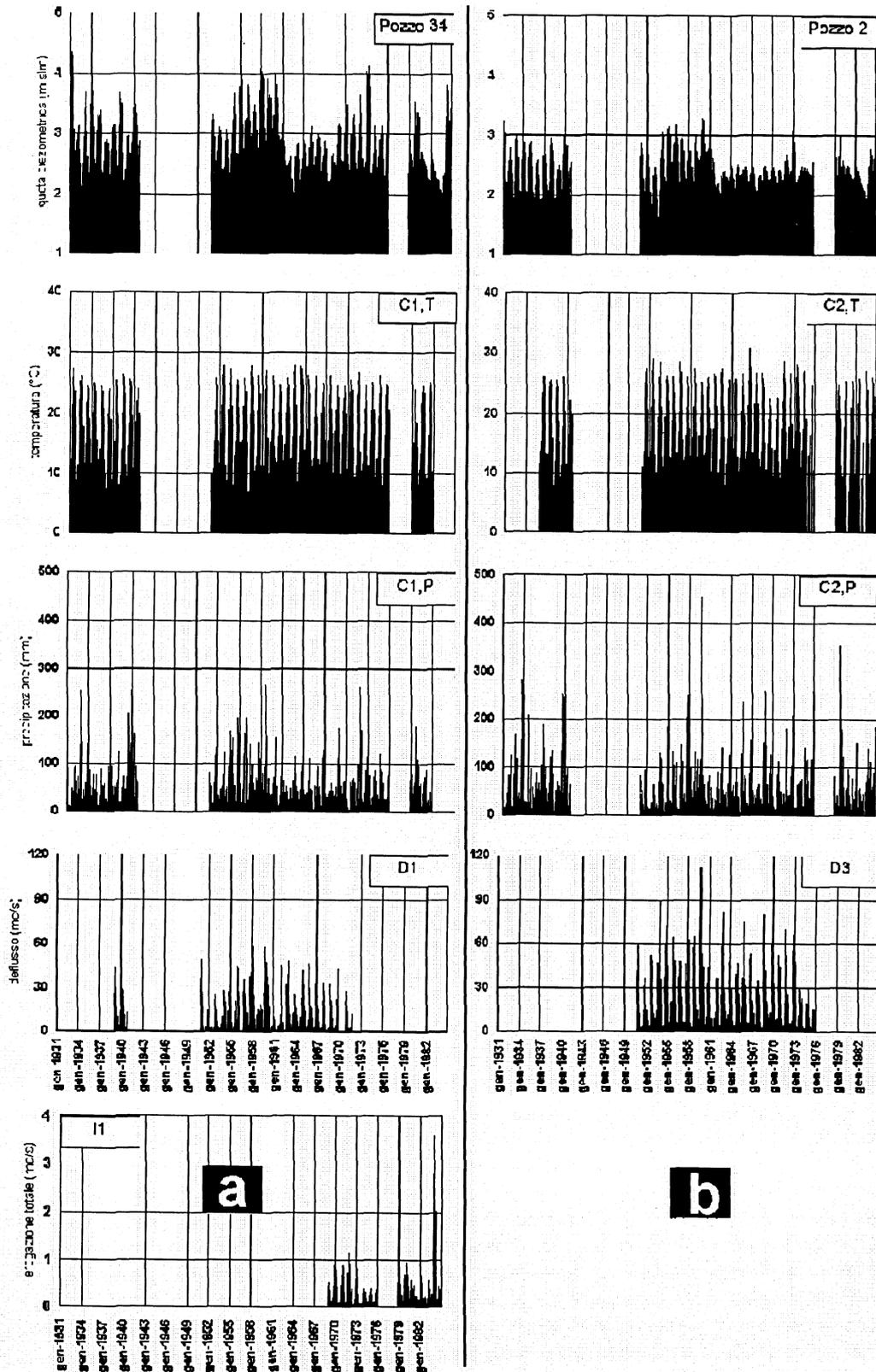


Fig. 7 – Confronto grafico tra serie storiche mensili. a) Serie piezometrica 34 a confronto con quella termica e pluviometrica C1, di deflusso D1 e con quando derivato dall'invaso I1. b) Serie piezometrica 2 a confronto con quella termica e pluviometrica C2 e di deflusso D3. *Comparison between time series. a) Piezometric time series of well 34 vs. thermometric and rainfall C1 series, D1 river discharge and intake from I1 dam. b) piezometric time series of well 2 vs. thermometric and rainfall C2 series and, D3 river discharge.*

La crosscorrelazione tra serie piezometriche e pluviometriche ha mostrato che il segnale di entrata, costituito dalla piovosità, è molto modulato dall'acquifero, il cui volume efficace provoca una "uscita", l'oscillazione piezometrica, con un ritardo fino a 4 mesi. In ogni caso, l'effetto delle variazioni della piovosità su quelle della piezometria si risente generalmente nei due mesi successivi ed è comunque molto inferiore a quanto correntemente immaginabile. Tale circostanza è stata peraltro evidenziata da altri studi svolti nella stessa o in aree vicine, caratterizzate da un clima semiarido (POLEMIO e RICCHETTI, 1991, POLEMIO et al. 1991).

Il coefficiente di crosscorrelazione massimo, tra quelli determinati tra i diversi casi di studio, è inferiore a 0,5; lo stesso coefficiente è in media pari a circa 0,3; il minimo assoluto è pari a 0,11.

Nel caso della temperatura, il più significativo coefficiente di crosscorrelazione, determinato quale massimo in valore assoluto, è risultato sempre negativo. Statisticamente ciò significa che la relazione è inversa, all'aumentare della temperatura la quota piezometrica decresce. Notevole è che i coefficienti di crosscorrelazione per la temperatura siano i massimi, in valore assoluto, per tutti i casi di studio rispetto alle crosscorrelazioni con piogge e deflusso fluviale.

Come già emerso nel caso dell'acquifero superficiale del Tavoliere (POLEMIO et al. 1999), che presenta numerose affinità con il caso in studio, tra queste di certo il clima semiarido e la modesta soggiacenza, il parametro temperatura è quello che meglio "giustifica" la variabilità piezometrica. Questo sia perché la temperatura meglio di altri parametri riassume il regime idrologico, in particolare per quanto attiene al regime annuo delle piogge efficaci e dell'evapotraspirazione reale, ma anche perché condiziona l'operato umano in quanto di certo i prelievi di acque sotterranee, quasi del tutto a fini irrigui nell'area, si accentuano al crescere della temperatura, in estate, e quasi si annullano allo scendere della stessa, nella stagione invernale. L'effetto delle variazioni termiche si sente fino a due mesi, solo eccezionalmente fino a 4.

L'impulso determinato dal deflusso fluviale provoca invece una risposta rapida, ritardata di un solo mese e non più. Il coefficiente di crosscorrelazione è compreso tra 0,25 e 0,67 ed è in media pari a 0,45.

Tale risultato è particolarmente rilevante se si considera che l'effetto delle variazioni del deflusso fluviale e quindi delle altezze della corrente idrica sul fondo alveo di certo è molto sensibile alla distanza del pozzo dal reticolo idrografico. In ogni caso, il deflusso fluviale "spiega" più della piovosità la variabilità piezometrica.

Questi risultati permettono da una parte di rileggere quanto emerso in merito ai caratteri tendenziali delle serie storiche, dall'altra dimostrano l'importanza di due tipi di serie storiche, quello dei deflussi fluviali e quello delle erogazioni dovute alle dighe, per cui purtroppo si dispone di pochissimi dati.

## CONCLUSIONI

Le serie storiche piezometriche considerate hanno mostrato caratteri tendenziali variabili in funzione dei principali interventi antropici capaci di modificare il ciclo idrologico. La piovosità annua in calo significativo, la temperatura annua appena crescente e il deflusso fluviale annuo in forte calo, non forniscono ragioni di ottimismo in relazione alla disponibilità di risorse idriche sotterranee nella Piana di Metaponto.

Le variazioni piezometriche mensili sono risultate in forte autocorrelazione e dimostrano un rilevante effetto memoria, che si risente fino a 6 mesi.

La temperatura e il deflusso fluviale mensili determinano in modo rilevante le variazioni piezometriche dei due mesi successivi. Meno influente è risultata, anche se per un tempo fino a quattro mesi, la piovosità.

Preoccupante quindi il quadro emerso in termini di degrado quantitativo delle risorse idriche sotterranee della Piana di Metaponto, in particolare alla luce del crescente emungimento in atto in virtù della siccità e in considerazione della crescente derivazione di acque fluviali.

## BIBLIOGRAFIA

- CIARANFI N., MAGGIORE M., PIERI P., RAPISARDI L., RICCHETTI G., & WALSH N. (1979) - *Considerazioni sulla neotettonica della Fossa bradanica*. Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR, (251), 73-95.
- DOGLIONI C., TROPEANO M., MONGELLI F., & PIERI P. (1996) - *Middle-Late Pleistocene uplift of Puglia: an "anomaly" in the Apenninic foreland*. Mem. Soc. Geol. It., (52), 457-468.
- MAIONE U. & MOISELLO U. (1993) - *Statistica per l'Idrologia*, La Goliardica Pavese.
- MOREL-SYTOUX H.J. (1988) - *Soil-aquifer-stream interactions- A reductionist attempt toward physica-stochastic integration*. Journal of Hydrology, 102, P. 355-379.
- PADILLA BENITEZ A. (1990) - *Los modelos matematicos aplicados al analisis de los acuíferos karsticos*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias.
- POLEMIO M. (1994) - *Il regime della falda costiera ionica di Metaponto*. Atti del III Conv. dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica «Il ruolo dei fluidi nei problemi di Ingegneria geotecnica», Mondovì, Vol. 1, 135-149.
- POLEMIO M., DI CAGNO M. & DRAGONE V. (1999). *Effetti antropici e naturali sul degrado quantitativo delle acque sotterranee del Tavoliere*. Pubbl. GNDCI n. 2011, Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Editrice, Bologna, 1999, 4, 143-152.
- POLEMIO M., LIMONI P.P. (2001) - *L'evoluzione dell'inquinamento salino delle acque sotterranee della Murgia e del Salento*. Mem. Soc. Geol. It, 56, 327-331.
- POLEMIO M., LIMONI P.P., MITOLO D. & SANTALOAIA F. (2002a) - *Characterisation of ofonion-lucanian coastal plain aquifer. XXXII IAH & ALHSUD Congress, Mar della Plata, Argentina, 21-25 October 2002, in corso di stampa.*
- POLEMIO M., LIMONI P.P., MITOLO D. & SANTALOAIA F. (2002b) - *Characterisation of ofonion-lucanian coastal aquifer and*

- seawater intrusion hazard*. 17<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting, 6 to 10 May 2002b, Delft, Netherlands in corso di stampa.
- POLEMIO M., DRAGONE V., LIMONI P.P., MITOLO D. AND SANTALOIA F. (2002c) - *Extended report of CNR-CERIST unit on deliverables: first year of activity. European research project "CRYSTECHSALIN"*.
- RADINA B. (1956) - *Alcune considerazioni geoidrologiche sulla fascia costiera jonica compresa fra i fiumi Bradano e Sinni*. *Geotecnica*, 1, 3-11.
- SIMN (1927-2000) - *Annali Idrologici*. Parte I e II, Sezione Idrografica di Catanzaro, Roma.
- SIMN (1937) – *Le sorgenti italiane. Elenco e descrizione: Lucania*. Pubblicazione n. 14 del SIMN, Sezione di Catanzaro, Vol. V, Roma.
- TROPEANO M., SABATO L., & PIERI P. (2002) - *Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough, southern Italy*. In: Jones S.J. & Frostick L.E. (eds) *Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences*, Vol. 191, Geological Society of London, Special Publications, 55-79, London.