

Serie storiche piezometriche delle unità idrogeologiche pugliesi: regime piezometrico, effetti climatici ed antropici^(*)

M. Polemio⁽¹⁾, V. Dragone⁽¹⁾

Riassunto. Si analizzano dati piezometrici mensili, raccolti dal 1965, di numerosi pozzi ubicati in Puglia. L'applicazione di metodi statistici alle serie storiche piezometriche ha permesso la caratterizzazione del regime, il calcolo del trend e delle componenti cicliche, stagionali ed accidentali, nonché di studiare le relazioni con i dati termometrici e pluviometrici.

[Parole chiave: *acque sotterranee, sovrasfruttamento, degrado quantitativo, serie storiche, risorse idriche*]

Abstract. *This work is based on data acquisition and analysis of chronology sequences of piezometric, rainfall and thermometric data of Apulian aquifers. Methods of time series analysis are used. This approach has allowed characterising the piezometric regime and trend related to the natural recharge variation.*

[Key words: *groundwater, time series, overexploitation, water resources*]

1. INTRODUZIONE

Le acque sotterranee della Puglia, da quattro decenni ad oggi, hanno costituito un riferimento importante per lo sviluppo regionale in campo civile, agricolo, ed industriale. Ciò è conseguenza della modestissima disponibilità di risorse idriche superficiali, che la regione possiede soltanto nel Tavoliere.

L'inquinamento salino delle risorse idriche sot-

terranee della Puglia, in particolare di quelle contenute nei calcari del Mesozoico e poggianti su acqua marina d'intrusione del continente, è ormai fenomeno noto e largamente studiato (COTECCHIA, 1977). L'evoluzione di tale forma d'inquinamento, così come la riduzione progressiva delle disponibilità effettive dell'acquifero dolce, sono conseguenza immediata della mancanza di tutela delle risorse idriche sotterranee (COTECCHIA, 1991). È evidente che per tali acquiferi, di tipo costiero, esiste un forte legame tra l'avanzamento della contaminazione salina e l'abbassamento dei livelli piezometrici per eccesso di sfruttamento (POLEMIO & LIMONI, 1998).

Nonostante il gran numero di pozzi già presenti nella regione, la cui stima, nel 1992, era di circa 90.000, i consumi idrici, di qualsiasi tipo, continuano a crescere al di là di ogni previsione. Su tale stima pesa molto la difficoltà di valutare l'uso irriguo: in tale settore si risente particolarmente dell'abusivismo, che regola da decenni la trivellazione di pozzi da parte del privato (COTECCHIA & POLEMIO, 1997).

Il ricorso a pratiche produttive industriali, agricole e zootecniche dannose per l'ambiente, in particolare per le acque sotterranee, e l'abusivo o poco scrupoloso smaltimento di acque reflue sul suolo e nel sottosuolo, hanno causato estesi e non più trascurabili fenomeni d'inquinamento antropico. Gran parte del territorio pugliese è ad elevato grado di vulnerabilità nei confronti del rilascio sul suolo e nel sottosuolo di corpi idrici inquinanti. Data la natura carsica della regione, tali acque reflue, nella gran parte dei casi, raggiungono le risorse idriche sotterranee (COTECCHIA & TULIPANO, 1989).

Scopo del presente lavoro è analizzare gli effetti, in termini quantitativi, che le attività antropiche, unitamente all'azione dei processi naturali, hanno svolto sulle acque sotterranee pugliesi. Tali acque

^(*) Pubblicazione n. 2015 del Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche, U.O.4.14 (CNR-CERIST, BARI), responsabile Prof. Ing. Vincenzo Cotecchia.

⁽¹⁾ CNR-CERIST, Via Orabona 4, 70100, Bari, E-mail: polemio@area.ba.cnr.it.

costituiscono, infatti, almeno per quanto attiene a quelle di migliore qualità, ancora oggi rinvenibili lontano dalla costa (COTECCHIA & POLEMIO, 1998), una risorsa che potrebbe risultare strategica, se destinata a fornire acqua di qualità, da gestire in vista di fabbisogni futuri di emergenza, in particolare in relazione al rischio di nuove siccità.

Il presente studio si basa sull'analisi di serie cronologiche di dati, principalmente piezometrici, ma anche pluviometrici e termometrici. Sono state raccolte numerose serie di dati idrologici mensili, da un complesso di 39 stazioni piezometriche (REGIONE PUGLIA, 1983) e termopluviometriche del SIMN (Sezione Autonoma di Bari) (tab. 1). L'analisi dei dati è stata condotta con tecniche tipiche delle serie storiche, secondo modalità nel seguito descritte. Sono stati così evidenziati alcuni caratteri degli acquiferi, il regime piezometrico, i rapporti intercorrenti tra piogge e variazioni piezometriche nonché gli aspetti tendenziali, negli ultimi 30 anni, delle variazioni piezometriche registrate, seguendo ed ampliando un approccio positivamente sperimentato in acquiferi porosi (POLEMIO, 1994). Il quadro così delineato fornisce elementi fondamentali per definire procedure di gestione della risorsa idrica sotterranea, in previsione di un uso integrativo e/o alternativo. Allo stesso tempo, l'esperienza condotta persegue il fine, dal punto di vista metodologico, di stabilire procedure statistiche, facilmente utilizzabili a seguito di aggiornamenti della banca dati, per individuare i caratteri tendenziali del degrado qualitativo e i fattori che lo determinano.

2. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Le unità idrogeologiche della regione Puglia sono quattro: Gargano, Tavoliere, Murgia e Salento, in fig. 1 sono rappresentate così come definite dal Piano di Risanamento delle Acque (REGIONE PUGLIA, 1983). Per una più dettagliata caratterizzazione delle quattro unità idrogeologiche, qui brevemente delineata, si rimanda, per brevità, alla nota di COTECCHIA & POLEMIO (1999) e alla relativa bibliografia.

Eccetto il Tavoliere, le restanti unità idrogeologiche hanno in comune alcuni aspetti. Sono caratterizzate da ampi e potenti acquiferi con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico. Gli acquiferi, interessati da fenomeni carsici, hanno un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, e mostrano, a luoghi, un'elevata permeabilità.

Sia nel Gargano che nella Murgia, la circolazione idrica sotterranea è in pressione, eccetto lungo una

Tabella 1. Caratteristiche dei pozzi selezionati. Nome pozzo (W), quota sul piano campagna (QPC, m s.l.m.), numero di dati disponibili (N) e periodo nonché coefficiente angolare della retta del trend piezometrico (CA, m/mese).

| W | QPC | N | Dal | al | CA |
|----|-----|-----|-------|-------|---------|
| 3 | 166 | 44 | 10/75 | 11/96 | -0.0026 |
| 5 | 21 | 217 | 01/57 | 05/77 | -0.0662 |
| 9 | 20 | 68 | 09/73 | 10/96 | -0.0064 |
| 10 | 70 | 46 | 06/75 | 10/96 | -0.0031 |
| 11 | 27 | 61 | 09/73 | 10/96 | -0.0004 |
| 14 | 40 | 157 | 12/65 | 10/95 | -0.0014 |
| 15 | 173 | 48 | 05/75 | 10/96 | -0.0376 |
| 17 | 361 | 24 | 11/95 | 01/97 | -0.1310 |
| 19 | 26 | 64 | 09/73 | 11/96 | -0.0136 |
| 20 | 16 | 62 | 09/73 | 12/78 | -0.0020 |
| 21 | 7 | 46 | 03/73 | 11/96 | -0.0045 |
| 22 | 3 | 59 | 09/73 | 01/79 | 0.0006 |
| 25 | 245 | 66 | 09/73 | 01/97 | -0.0057 |
| 26 | 25 | 63 | 10/73 | 11/96 | -0.0004 |
| 27 | 49 | 66 | 10/73 | 11/97 | -0.0030 |
| 28 | 8 | 57 | 10/73 | 01/79 | -0.0047 |
| 29 | 66 | 52 | 09/73 | 12/78 | -0.0020 |
| 30 | 10 | 57 | 09/73 | 11/96 | -0.0008 |
| 31 | 29 | 17 | 01/78 | 11/96 | -0.0009 |
| 32 | 23 | 59 | 10/73 | 10/96 | -0.0008 |
| 33 | 19 | 67 | 10/73 | 11/96 | -0.0017 |
| 34 | 35 | 63 | 10/73 | 11/96 | -0.0011 |
| 35 | 13 | 55 | 10/73 | 11/96 | -0.0025 |
| 36 | 87 | 61 | 09/73 | 10/96 | -0.0048 |
| 37 | 92 | 46 | 06/75 | 11/96 | -0.0013 |
| 38 | 47 | 61 | 09/73 | 11/96 | -0.0031 |
| 39 | 22 | 45 | 07/75 | 11/96 | -0.0015 |
| 40 | 40 | 54 | 09/73 | 12/78 | -0.0046 |
| 41 | 26 | 59 | 09/73 | 11/96 | -0.0010 |
| 42 | 42 | 309 | 01/65 | 05/91 | 0.0002 |
| 43 | 53 | 95 | 07/68 | 01/96 | -0.0012 |
| 44 | 55 | 95 | 09/73 | 05/91 | -0.0048 |
| 45 | 73 | 61 | 09/73 | 12/78 | 0.0002 |
| 46 | 7 | 61 | 09/73 | 10/96 | -0.0022 |
| 47 | 20 | 49 | 11/73 | 11/78 | 0.0021 |
| 49 | 7 | 108 | 01/69 | 01/96 | -0.0003 |
| 52 | 49 | 61 | 10/73 | 12/78 | 0.0030 |
| 53 | 41 | 52 | 09/73 | 01/95 | -0.0121 |
| 54 | 488 | 155 | 05/75 | 02/89 | -0.0143 |

ristretta fascia costiera. Le quote piezometriche massime sono elevate, pari a circa 50 m s.l.m. nel caso del Gargano e 200 m s.l.m. nel caso della Murgia.

Nel Salento la circolazione idrica sotterranea è prevalentemente freatica. L'unità idrogeologica del Salento è caratterizzata quindi da un'estesa falda

idrica sotterranea, denominata «profonda» per distinguerla da altre numerose falde idriche rinvenibili in acquiferi poco potenti ed estesi, generalmente affioranti. La falda idrica profonda del Salento raggiunge quote piezometriche di pochi metri al di sopra del livello del mare (al massimo 4÷5 m s.l.m.).

L'unità idrogeologica del Tavoliere è caratterizzata da un acquifero poroso la cui circolazione idrica sotterranea, a letto limitata da una formazione argillosa potente alcune centinaia di metri, avviene in condizioni freatiche nella parte più interna del territorio e in pressione più a valle, fino alla costa. La superficie piezometrica della falda idrica superficiale si rinviene ad una quota massima di circa 300 m s.l.m., nelle zone più interne. Solo nei pressi della costa l'acquifero è abbastanza profondo da permettere l'intrusione marina.

3. ANALISI DEI DATI

Lo studio condotto si è basato sull'analisi di lunghe serie di rilievi piezometrici. I rilievi sono

relativi a 39 pozzi, selezionati tra quelli citati dal PRA (Piano di Risanamento delle Acque) della Regione Puglia (1983) (tab. I e fig. 1). Alcuni dei pozzi selezionati sono oggi parte integrante della rete di monitoraggio della Regione Puglia, gestita dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria di Puglia, Lucania e Irpinia (COTECCHIA & POLEMIO, 1998). Le serie cronologiche piezometriche mensili contengono in media almeno 7 anni solari completi, a partire dal 1965. Le misure sono disponibili regolarmente per il periodo 1973-1978; alcune serie si spingono fino al 1991; per alcuni pozzi si dispone di un'ulteriore serie cronologica, recente ma molto breve, riguardante gli anni 1996 e 1997 (tab. I). Le lacune della durata pari o minore a 3 mesi sono state colmate mediante il calcolo di funzioni non lineari di regressione, generalmente del quarto grado.

Sono state considerate, infine, le serie di dati mensili riguardanti l'altezza di precipitazione e la temperatura atmosferica, misurate nelle stazioni più significative per ciascun pozzo, in base a considerazioni idrogeologiche.

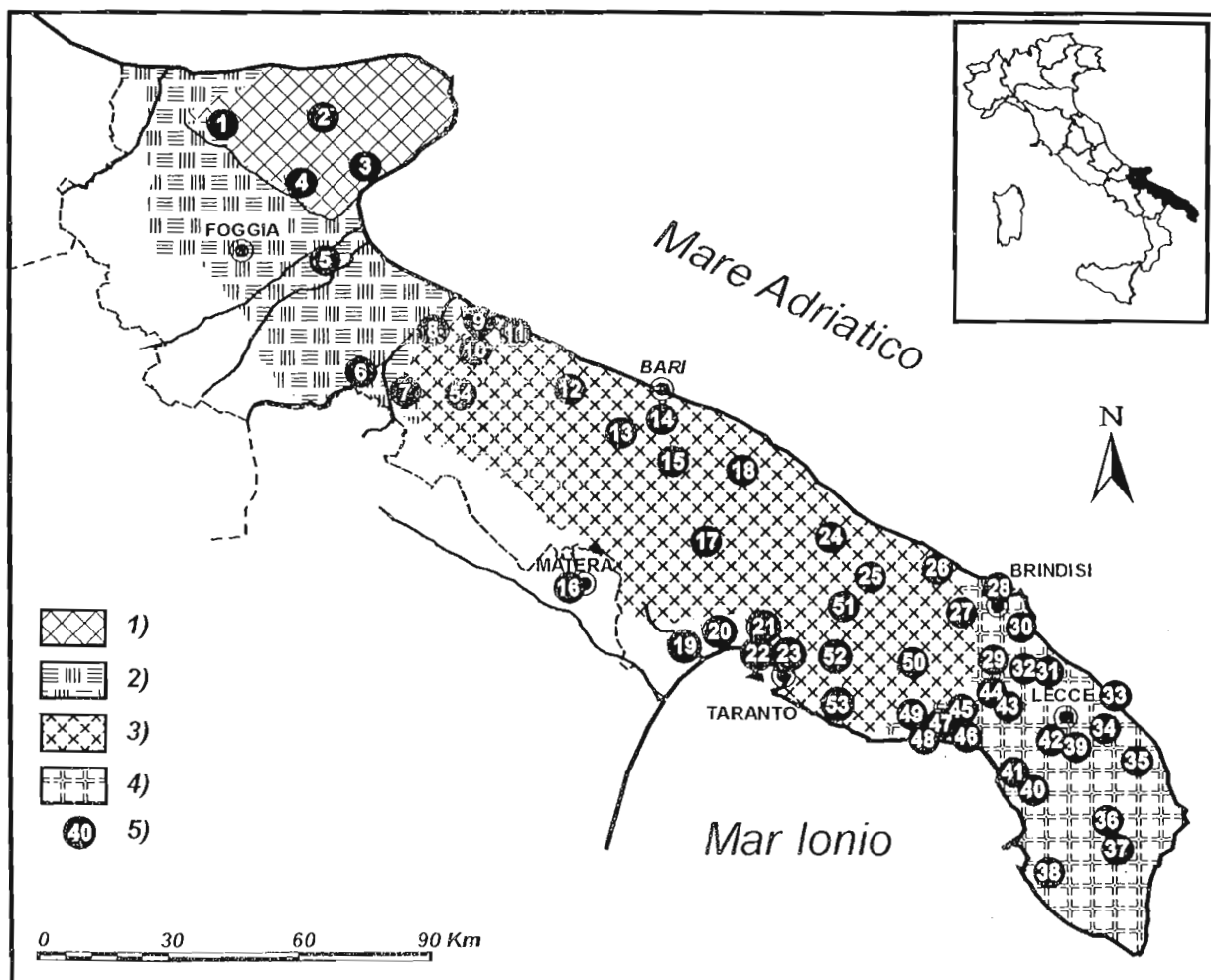


Figura 1. Unità idrogeologiche e pozzi (REGIONE PUGLIA, 1983). 1) Gargano, 2) Tavoliere, 3) Murgia, 4) Salento, 5) pozzi.

Da una prima elaborazione delle serie storiche piezometriche è stato possibile individuare il carattere tendenziale o, più brevemente, il trend delle quote piezometriche, mediante il calcolo della retta di regressione. Per quantificare il trend piezometrico si può fare riferimento al coefficiente angolare CA della retta di regressione, che ha evidenziato, per la maggior parte dei pozzi, un valore negativo, che comporta una tendenza diffusa, sia pure lentissima in alcuni casi, al calo piezometrico (tab. 1).

I quattro valori positivi di CA sono ubicati tra Murgia e Salento, sono generalmente bassi e relativi a pozzi molto vicini alla costa. I minori decrementi piezometrici tendenziali si osservano in Salento, a cui si associa generalmente un coefficiente angolare CA maggiore di $-0,001$ m/mese. Procedendo dal Salento verso la Murgia, CA decresce. I valori minimi si osservano nell'interno della Murgia, in particolare di quella sudorientale, dove si registrano le massime quote piezometriche, con valori di CA minori di $-0,02$ m/mese. Si noti, a questo proposito, che un CA pari a $-0,02$ m/mese equivale a un calo piezometrico di 12 m in 50 anni. Nella Murgia, come anche per le altre unità idrogeologiche, il CA si approssima a zero, come naturale, procedendo dall'interno verso la costa. Per il Gargano si osservano situazioni intermedie tra Murgia e Salento; il numero limitato di pozzi disponibili non permette di approfondire l'argomento. L'unico pozzo disponibile del Tavoliere conferma la drammatica tendenza al calo piezometrico di tale unità idrogeologica, come, con maggiore dettaglio, segnalato da altri studi (POLEMIO et al., 1999). Il minimo valore di CA è posto nel cuore della Murgia, in una zona di spartiacque sotterraneo tra quanto fluisce verso il mare Adriatico o verso lo Ionio.

In base alla disponibilità di dati piezometrici consecutivi per almeno 4 anni completi, sono state selezionate 14 stazioni piezometriche. Il regime delle falde idriche interessate da questi pozzi è stato caratterizzato disponendo da un minimo di 4 a un massimo di 27 anni di rilievi. I regimi mostrano caratteri differenziabili per unità idrogeologica, come appare in alcuni grafici in cui, per ciascun pozzo la quota piezometrica mensile è stata riferita alla quota media, in modo da enfatizzare i caratteri della ciclicità stagionale e rimuovere l'effetto della differente quota media (figg. 2 e 3). In particolare, per le stazioni di misura collocate nel Gargano (pozzi 2 e 4), per quanto diverso sia il regime, si osservano i massimi tra maggio e giugno e i minimi tra settembre e dicembre. I pozzi situati nell'unità idrogeologica della Murgia (14, 25, 54) hanno descritto un regime

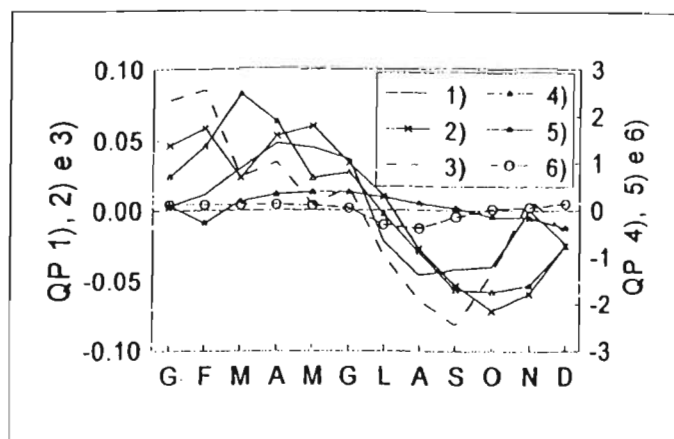


Figura 2. Regime della falda idrica sotterranea. Pozzi della Murgia: 1) 9, 3) 25, 4) 54, 6) 14. Pozzi del Gargano 2) 4 e 5) 2. QP = quota piezometrica riferita alla media (m).

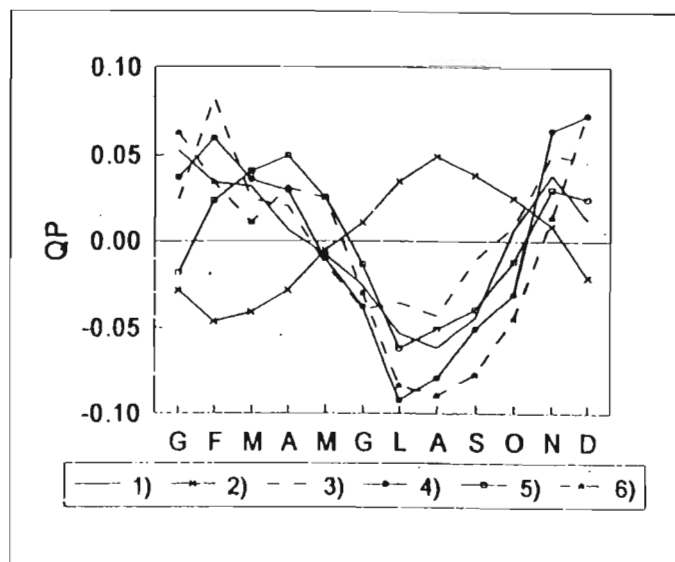


Figura 3. Regime della falda idrica sotterranea dei pozzi del Salento QP = quota piezometrica riferita alla media (m). Pozzo 1) 34, 2) 42, dal 1965 al 1979, 3) 43, 4) 44, 5) 49, 6) 42 dal 1980 al 1991.

simile, fondamentalmente con un solo massimo in febbraio o marzo e un solo minimo tra luglio e settembre, ma con variazioni piezometriche mensili notevolmente diverse da pozzo a pozzo. Più omogeneo è risultato il regime della falda salentina (34, 42, 43, 44, 49), le cui curve possono ricondursi ad un unico andamento, con massimi tra novembre e marzo e minimi in corrispondenza dei mesi di luglio e agosto. Della famiglia di curve salentine solo quella del pozzo 42 ha mostrato un comportamento anomalo e non giustificabile, allo stato delle conoscenze, in particolare dal 1965 al 1979, per il quale periodo il regime segnala massimi nel mese di agosto e minimi in febbraio. Nel periodo di osservazione successivo, dal 1980 al 1991, ha mostrato un comportamento del

tutto simile alle altre stazioni appartenenti alla stessa unità idrogeologica. Abbastanza regolare risulta il regime descritto dall'unico pozzo ubicato nel Tavoliere, il cui andamento mostra massimi in corrispondenza di dicembre e minimi in corrispondenza di agosto, coerentemente con quanto noto (POLEMIO et al., 1999). Si noti, non considerando il Tavoliere, che le escursioni piezometriche nell'anno medio sono maggiori nella Murgia, con valori tra 0,17 e 4,22 m, e minori nel Salento, con valori tra 0,10 e 0,16 m.

Il regime pluviometrico, in ogni zona considerata, è risultato simile, con minimi in luglio e agosto e massimi tra novembre e febbraio. Lo stesso può dirsi per la temperatura, che descrive ovunque un regime con massimi in luglio e agosto e minimi tra novembre e febbraio. Se ne deduce che i tempi di risposta alle variazioni termopluviometriche sono rapidi per il Salento, un mese o due al massimo, meno per la Murgia e massimi per il Gargano, non meno di tre mesi, in relazione alle stazioni considerate.

Successivamente sono state ulteriormente selezionate nove serie di dati, ritenute più idonee alle successive elaborazioni in virtù della loro maggiore continuità e durata, tale da permettere un'analisi cronologica più accurata.

Nel seguito si rappresentano i risultati conseguiti solo su tre serie storiche inerenti i pozzi n. 14, 42 e 54, rispettivamente ubicati nei pressi di Bari e Andria, per l'unità idrogeologica della Murgia, e di Copertino, per quella del Salento. Tali pozzi sono stati selezionati per la rappresentazione grafica finale per la notevole lunghezza e continuità del periodo d'osservazione disponibile.

Si è proceduto alla decomposizione dei dati grezzi o naturali disponibili, in altre parole i dati misurati, in componenti, secondo il tipico approccio dell'analisi delle serie storiche. Il singolo dato rilevato, detto anche grezzo, X della serie X_t , con t indice cronologico o temporale, si considera come una funzione matematica che esprime, in modo deterministico, le componenti tendenziali, cicliche, stagionali nonché accidentali o residuali della serie storica studiata. Le singole componenti contribuiscono, nel caso delle serie piezometriche, secondo un modello additivo, in altre parole, definiscono la serie grezza per sovrapposizione degli effetti. Il pregio sostanziale della scomposizione, la semplicità concettuale delle sue ipotesi e la metodologia utilizzata per separare le componenti, permettono di giungere ad una loro completa specificazione. La detrendizzazione e destagionalizzazione è stata realizzata tramite il metodo, introdotto dal Bureau of Census degli Stati Uniti, noto come CENSUS X-II (ALVARO, 1992). A tal

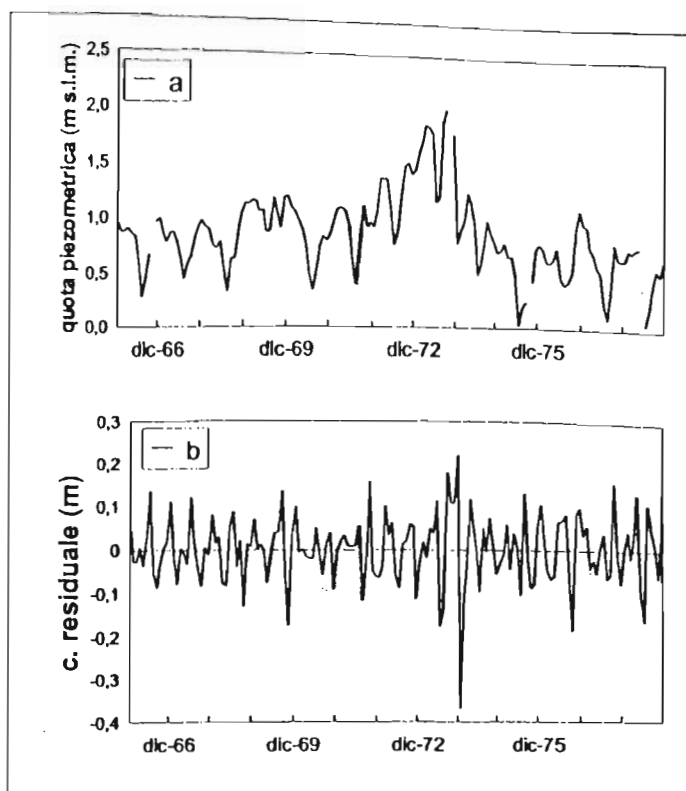


Figura 4. Serie storiche del pozzo 14 (Murgia). a) naturale, b) residuale.

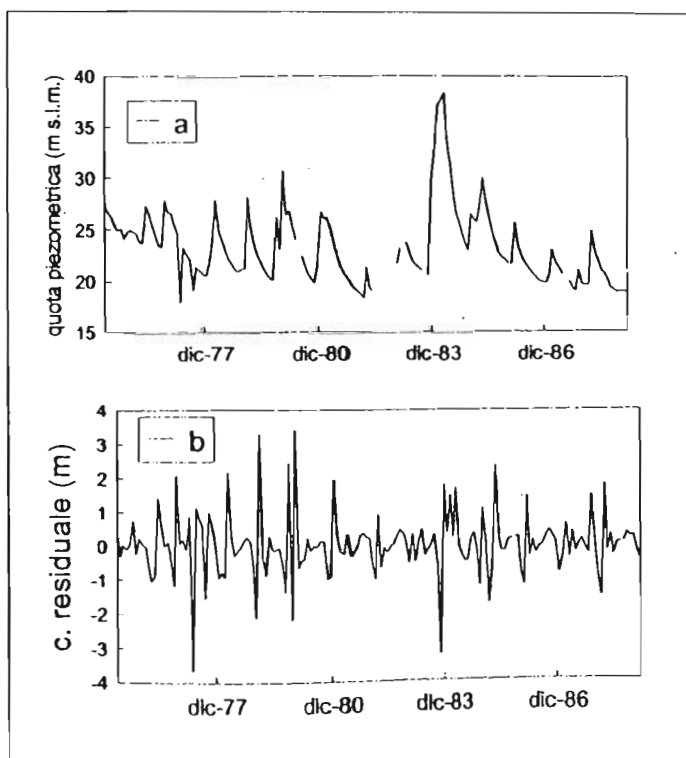


Figura 5. Serie storiche del pozzo 54 (Murgia). a) naturale, b) residuale.

fine, prima sono state calcolate le componenti tendenziali, cicliche e stagionali, poi queste sono state sottratte alla serie grezza. Tale procedura ha generato nuove serie di dati, dette residuali o irrego-

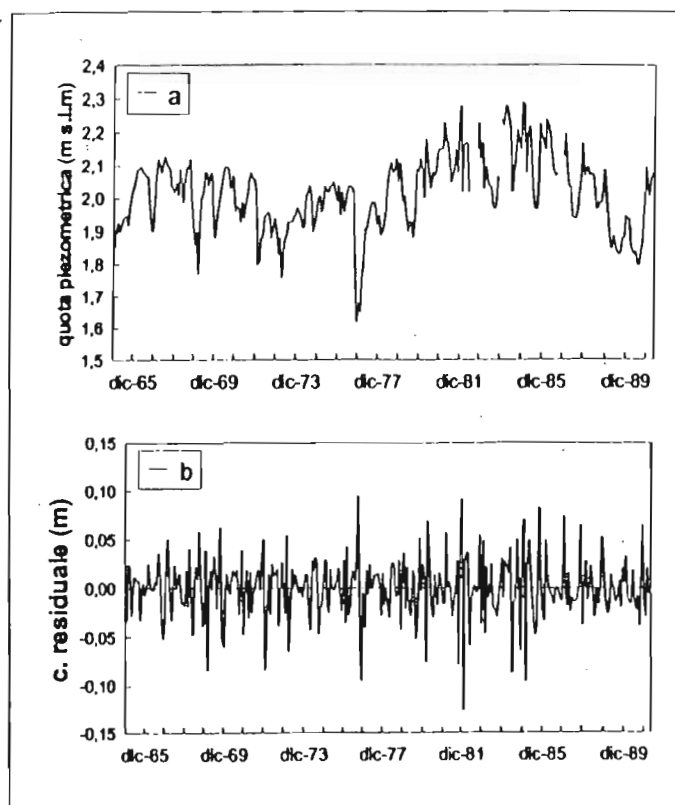


Figura 6. Serie storiche del pozzo 42 (Salento). a) naturale, b) residuale.

lari, caratterizzate dalla proprietà della stazionarietà. Alcuni esempi dei risultati conseguiti dall'applicazione del suddetto metodo sono rappresentati dalle fig. 4-6, in cui si rappresenta, per brevità solo per tre pozzi, la serie naturale e la serie detrendizzata e destagionalizzata, detta residuale. Le serie costituite dai residui sono di notevole interesse nell'analisi delle serie storiche poiché forniscono informazioni sul contributo alla variabilità piezometrica non dovuto a fenomeni sistematici, quali quelli tendenziali ciclici e stagionali, generalmente più facilmente caratterizzabili e prevedibili. Il contributo della componente residua dovrebbe essere, proprio per come la stessa è definita, accidentale o casuale. Il controllo sulla natura realmente accidentale della serie residuale è stato effettuato mediante il cosiddetto test del χ^2 . Tale test è di tipo non parametrico, in quanto non presuppone alcuna ipotesi sulla distribuzione della variabile casuale. Detto test opera sulla successione dei segni, in termini di permanenze e variazioni, permettendo di accertare la casualità dei residui e quindi la loro indipendenza. Il confronto tra il valore empirico del test e quello teorico è stato effettuato, con esito positivo, ad un livello di significatività pari a 0,01.

Il passo successivo alla scomposizione dei dati delle serie in componenti è stato il calcolo della funzione di autocorrelazione $\rho(k)$ definita come il

coefficiente di correlazione lineare fra le variabili casuali X_t e X_{t+k} , al variare del numero intero k , definito ritardo o sfasamento temporale (*lag*). La funzione di autocorrelazione così definita è data da:

$$\rho(k) = E\left(\frac{X_t - \mu}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{X_{t+k} - \mu}{\sigma}\right) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)}$$

dove:

$$\mu = E(X_t)$$

è la media dei dati osservati;

$$\sigma = \sqrt{E(X_t - \mu)^2}$$

è lo scarto quadratico medio;

$$\gamma(k) = E(X_t - \mu) \cdot (X_{t+k} - \mu)$$

è la covarianza tra la serie al tempo t e la stessa con uno sfasamento temporale k .

Nei correlogrammi (figg. 7-9) sono riportati i valori dei coefficienti di autocorrelazione, esplicitati per valori positivi di k . I coefficienti di autocorrelazione mostrano un andamento progressivamente decrescente, a partire da valori prossimi all'unità. Ciò dimostra che la falda idrica sente un rilevante effetto memoria, che si avverte fino a 3-4 mesi. In altre parole, la piezometria di un dato mese dipende fortemente da quella dei mesi precedenti, in modo significativo e decrescente all'aumentare del ritardo fino a 3-4 mesi. L'autocorrelazione piezometrica ha dato risultati molto simili per tutti i pozzi della

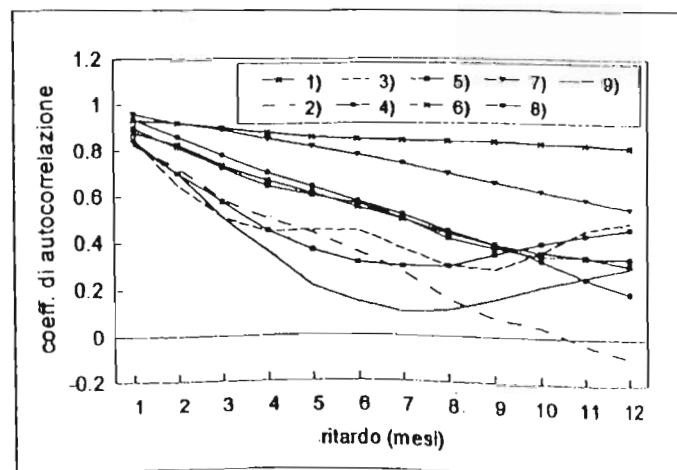


Figura 7. Correlogramma della quota piezometrica dei pozzi. Pozzo: 1) 5, 2) 9, 3) 14, 4) 25, 5) 42, 6) 43, 7) 44, 8) 49 e 9) 54.

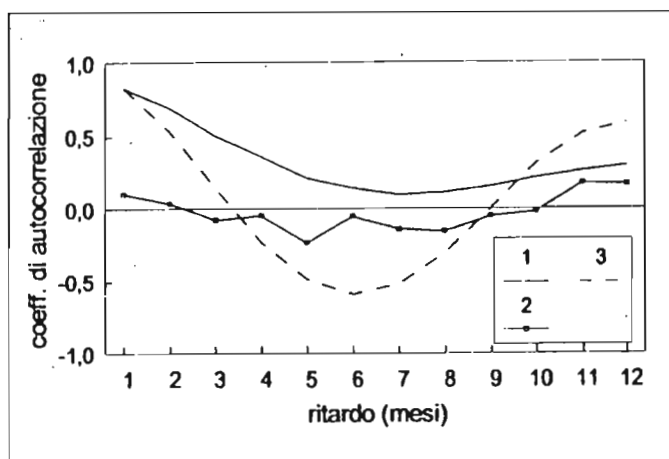


Figura 8. Correlogramma della quota piezometrica (1) del pozzo 54 (Murgia), (2) della pioggia e (3) della temperatura della stazione di Castel del Monte.

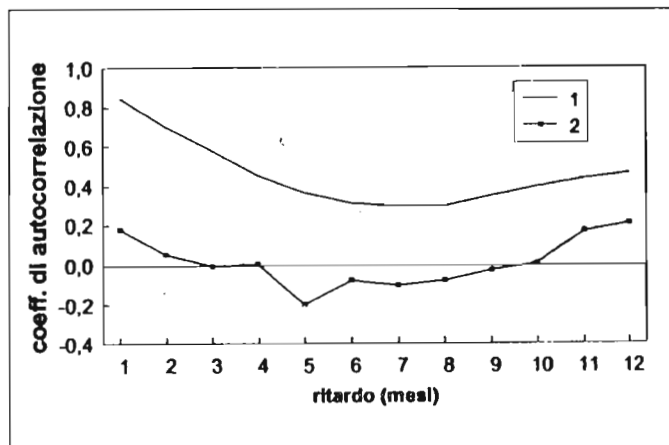


Figura 9. Correlogramma della quota piezometrica (1) del pozzo 42 (Salento) e (2) della pioggia della stazione di Copertino.

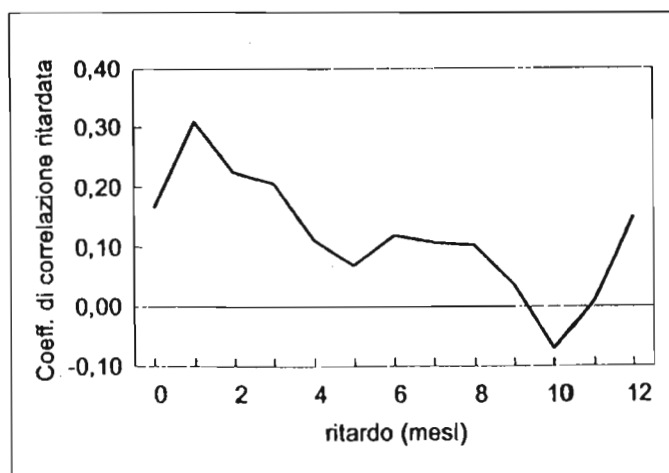


Figura 10. Cross-correlazione tra la quota piezometrica del pozzo 14 (Murgia) e la pioggia della stazione di Bari.

Murgia e del Salento, ben rappresentati dalle figg. 8-9. Per il Salento l'effetto memoria, il persistere di una buona autocorrelazione, moderatamente decrescen-

te, è più rilevante: anche per le durate di 4 mesi si hanno coefficienti di autocorrelazione maggiori di 0,5, cosa che non accade per la Murgia. Ciò è dovuto alle migliori caratteristiche dell'unità idrogeologica salentina. Si noti, infine, che ovunque la piovosità non risulta autocorrelata, essendo una variabile sostanzialmente casuale (figg. 8-9), e che ovunque la temperatura, di converso, mostra una buona autocorrelazione, che si inverte in sei mesi, come attendibile ed emerso in altri casi (POLEMIO et al., 1999) (fig. 8).

Le relazioni tra le variabili piezometriche e quelle climatiche sono state studiate tramite la cross-correlazione cioè tramite l'analisi della correlazione tra le suddette variabili, considerate due per volta, con sfasamenti temporali variabili da 1 a 12 mesi. In particolare, la serie del pozzo 14 mostra una correlazione ritardata con la serie pluviometrica, registrata presso la stazione di Bari, particolarmente significativa per un ritardo di 1 mese (fig. 10). Per il pozzo 54, posto sempre nella Murgia, i valori di cross-correlazione evidenziano una correlazione massima (0,362) tra la quota piezometrica e la pioggia per un ritardo di 2 mesi; tra la quota piezometrica e la temperatura la migliore correlazione è minore e si registra con un ritardo di 4 mesi (fig. 11). Il diverso valore del ritardo più significativo registrato nei due casi della Murgia è sicuramente giustificabile in virtù della notevole diversità di soggiacenza, nel primo caso esprimibile in decine di metri, nel secondo in centinaia di metri. La circostanza che anche le variazioni termiche risultino significative, anche se in modo limitato, è dovuta alla natura del clima, non certo umido. In

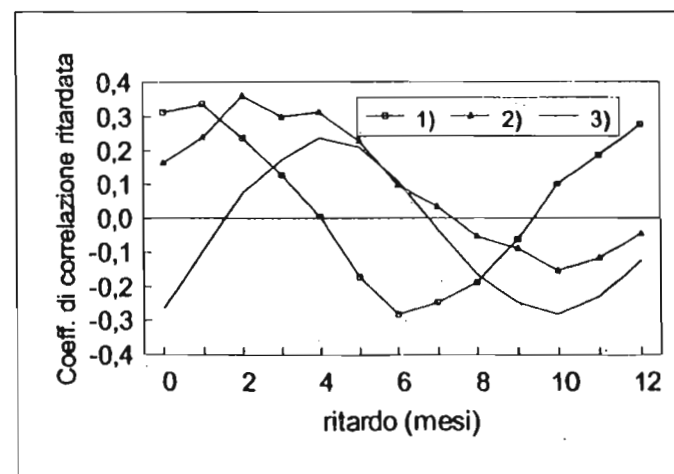


Figura 11: Cross-correlazione relativa al pozzo 54 (Murgia) e alla stazione termopluviometrica di Castel del Monte. 1) Tra pioggia e temperatura, 2) tra quota piezometrica e pioggia, 3) tra quota piezometrica e temperatura.

queste condizioni climatiche, la temperatura è significativa per due diversi fenomeni: il primo, assolutamente naturale, è l'evapotraspirazione, che «regola» la disponibilità di piogge efficaci ai fini dell'infiltrazione, l'altro, derivato dal precedente ma di natura antropica, è legato al deficit idrico estivo, dovuto principalmente alle alte temperature, che, in virtù delle prevalenti attività agricole, viene compensato mediante diffusi emungimenti dalla falda. Il confronto tra piovosità e temperatura mostra che le due variabili sono tra loro correlabili, e che tale correlazione si inverte circa ogni sei mesi, con notevole regolarità.

Il pozzo 42 mostra una correlazione ritardata con la pioggia, misurate dalla stazione di Copertino, particolarmente bassa. Si deve quindi ritenere che le variazioni piezometriche in tael pozzo siano condizionate da altri fattori; visto quanto finora emerso dall'analisi della serie storica relativa al pozzo 42 e

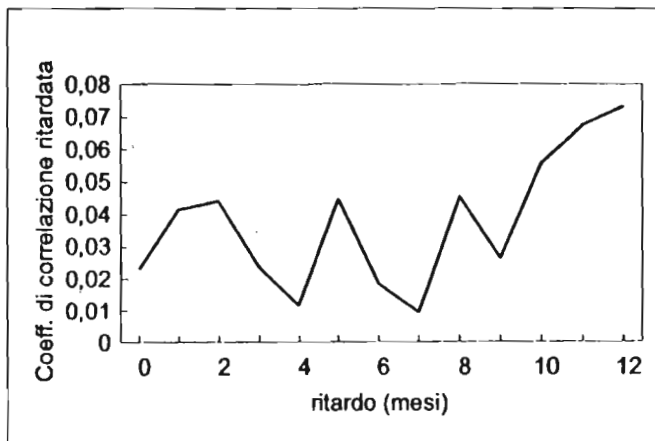


Figura 12. Cross-correlazione tra la quota piezometrica del pozzo 42 (Salento) e la pioggia della stazione di Copertino.

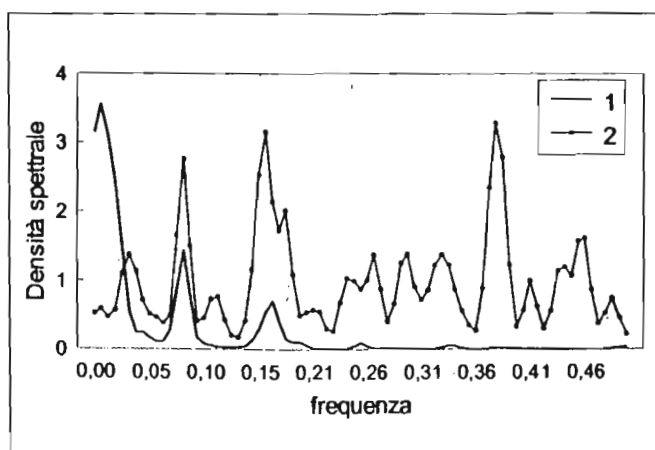


Figura 13. Densità spettrale 1) piezometrica del pozzo 14 (Murgia) e 2) pluviometrica di Bari per 10^{-3} .

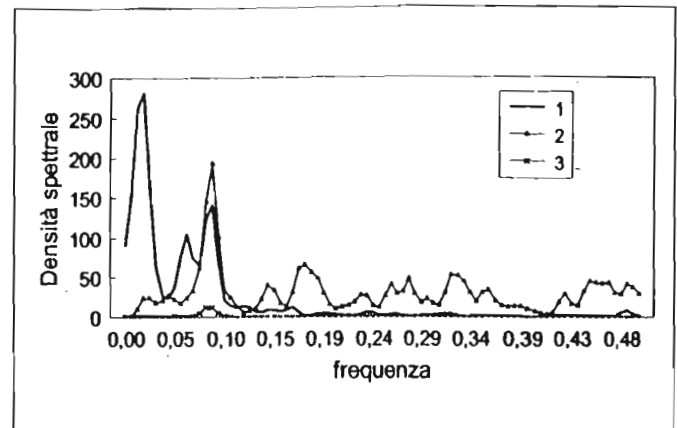


Figura 14. Densità spettrale 1) piezometrica del pozzo 54 (Murgia), 2) pluviometrica per 10^{-1} e 3) termometrica di Castel del Monte per 10^{-1} .

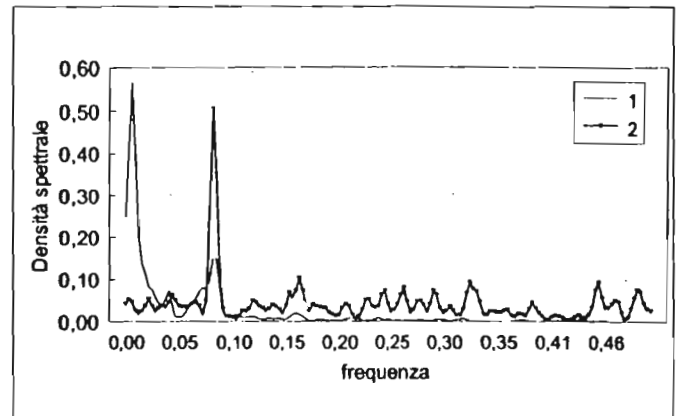


Figura 15. Densità spettrale 1) piezometrica del pozzo 42 (Salento) e 2) pluviometrica di Copertino per 10^{-5} .

quanto noto sull'idrogeologica dell'area, questi fattori non possono che essere di natura antropica.

Lo studio dell'effetto regolatore ed attenuatore che gli acquiferi svolgono sugli impulsi esterni, siano essi naturali o antropici, è stato effettuato studiando le serie storiche nel campo della frequenza (POLEMIO, 1994), considerando la funzione $\psi(\omega)$, detta densità spettrale:

$$\psi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho(k) \cos \omega k \right]$$

con $-\pi < \omega < \pi$. L'analisi spettrale, fondata appunto sullo studio della densità spettrale, studia il processo generatore della serie storica mediante l'individuazione di componenti periodiche di natura stocastica, attribuendo a ciascuna frequenza un contributo della varianza totale del processo (PICCOLO & GIUSTI, 1984).

Esaminando i diagrammi selezionati (figg. 13-

15); per quanto attiene alla piovosità, si osserva una notevole significatività delle frequenze basse, a ciclo annuale e solo secondariamente semestrale, legata evidentemente alla natura e regolarità del regime pluviometrico. Analogo comportamento si riscontra nell'andamento della temperatura. L'unica eccezione emerge nel caso della pluviometria a Bari (fig. 13), in cui si osserva un picco nel campo delle alte frequenze, pari ad un periodo di circa 3 mesi.

In termini piezometrici tutti i pozzi presentano un interessante massimo della densità spettrale per frequenze molto basse, che corrispondono a cicli il cui periodo è risultato tra 7 e 14 anni. Si noti che per frequenze maggiori di 0.0833 1/mese, le densità spettrali piezometriche praticamente si annullano; in questo caso si parla, significativamente di rumore bianco, in altre parole, di un rumore di fondo. In pratica, l'enorme capacità di regolazione degli acquiferi carbonatici della Murgia e del Salento attenuano qualsiasi «segnale» esterno o entrante, quale la piovosità, la cui densità spettrale è significativa anche nel campo delle alte frequenze, la temperatura nonché un qualsiasi effetto antropico, restituendo un segnale in uscita, la variazione piezometrica, che è apprezzabile solo nel campo delle basse frequenze.

La densità spettrale di tutte le serie residuali, non rappresentata per brevità e risultate accidentali per quanto già detto, sono apparse significative solo per frequenze alte, a testimoniare dell'efficace rimozione degli effetti tendenziali, ciclici e stagionali. Si nota, infine, che il periodogramma pluviometrico dei residui è, in ciascun caso, del tutto simile a quello piezometrico residuale. Quest'ultimo appare, approssimativamente, traslato verso minori frequenze ed attenuato. Tale comportamento ci permette di ritenere che la componente residuale delle serie piezometriche è sostanzialmente dovuta alla natura della componente residuale pluviometrica.

5. CONCLUSIONI

Mediante l'utilizzo di metodi di statistica delle serie storiche è stato possibile evidenziare alcuni caratteri degli acquiferi pugliesi, quali il regime piezometrico, i rapporti intercorrenti tra precipitazioni meteoriche, temperatura atmosferica e variazioni piezometriche.

Lo studio del regime della falda idrica sotterranea ha evidenziato una diversità di comportamento tra le diverse unità idrogeologiche.

La ricostruzione degli aspetti tendenziali, negli ultimi 30 anni, delle variazioni piezometriche ha

mostrato un sensibile abbassamento della quota piezometrica in tutte le unità idrogeologiche, con valori più accentuati per le aree interne della Murgia.

Per quanto riguarda gli aspetti strettamente idrogeologici, evidenziati dal presente studio, è possibile fare le seguenti osservazioni: la piezometria è influenzata dalle precipitazioni, con «intensità» e ritardo variabile ma generalmente significativo; la temperatura mostra di avere un ruolo minore ma non trascurabile nel determinare la variabilità piezometrica, aspetto questo di un certo rilievo se si pensa al progressivo riscaldamento a cui sembra destinata la superficie terrestre. Tutti gli acquiferi considerati mostrano un effetto memoria notevole, in alcuni casi molto rilevante, effetto imputabile alle buone caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi considerati, che modulano notevolmente qualsiasi impulso esterno che sia di breve durata.

Gli elementi raccolti segnalano un progressivo depauperamento delle falde idriche proprio dove si concentrano le acque sotterranee di migliore qualità. Le porzioni più pregiate delle falde idriche pugliesi dovrebbero essere viste, al contrario, come una potenziale riserva idrica da utilizzare quale risorsa integrativa in particolari condizioni di emergenza, così come verificatosi, in modo caotico e disorganizzato, sul finire degli anni '80, per fronteggiare l'emergenza idrica per siccità. Si rende necessaria, quindi, una politica gestionale delle risorse idriche sotterranee che consenta agli acquiferi di accumulare acque sotterranee nei periodi umidi, in cui abbondano le acque di superficie, per restituirle nei periodi aridi, svolgendo una funzione di compenso pluriennale.

BIBLIOGRAFIA

ALVARO G. (1992) - *Contabilità nazionale e statistica economica. Analisi delle serie storiche: Metodo Census x-11*. Cacucci editore, Bari.

COTECCHIA V. & POLEMIO M. (1999) - *Apulian groundwater (Southern Italy) salt pollution monitoring network*. 15th Salt Water Intrusion Meeting, Ghent, Belgium, 1998, Flemish Journal of Natural Science, Ghent, Belgium, 197-204.

COTECCHIA V. (1977) - *Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina)*. Quad. Ist. Ric. Acque, Roma, XX: 345 pp.

COTECCHIA V. (1991) - *Strategie progettuali e gestionali delle risorse idriche*. MEDIT, Rivista di economia, agricoltura e ambiente, 2, III: 40-55.

COTECCHIA V., POLEMIO M. (1997) - *L'inquinamento e il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee pugliesi*. VI Workshop del Progetto Strategico «Clima, Ambiente e

Territorio nel Mezzogiorno», Dicembre 1995, Taormina, I, 447-484.

COTECCHIA V., POLEMIO M. (1998) - *The hydrogeological survey of Apulian groundwater (Southern Italy): salinization, pollution and over-abstraction*. Proc. Int. Conf. on «Hydrology in a changing environment», British Hydrological Society, Exeter, 6-10 July, 1998 United Kingdom, John Wiley & Sons, II, 129-136.

COTECCHIA V., TULIPANO L., (1989) - *Le emergenze a mare, individuate anche con tecniche di telerilevamento, come vettori di carichi inquinanti dagli acquiferi carbonatici e carsici pugliesi all'ambiente costiero*. CNR, I Workshop del Progetto Strategico «Clima, ambiente e territorio nel Mezzogiorno»; Taormina, 11-12 dicembre 1989.

PICCOLO D., GIUSTI M. (1984) - *Metodi statistici per l'analisi economica: analisi della densità spettrale*.

POLEMIO M. & LIMONI P.P. (1995) - *L'evoluzione dell'inquinamento salino delle acque sotterranee della Murgia e del Salento*. Atti del VI Conv. Naz. dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Ottobre 1998, Chieti, Mem. della Società Geologica, in corso di stampa.

POLEMIO M. (1994) - *Il regime della falda costiera ionica di Metaponto*. Convegno sul tema: «Il ruolo dei fluidi nei problemi di ingegneria geotecnica», Mondovì (Cuneo) 1994.

POLEMIO M., DI CAGNO M, DRAGONE V. (1999) - *Effetti antropici e naturali sul degrado quantitativo delle acque sotterranee del Tavoliere*. 3° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio, ottobre 1999.

REGIONE PUGLIA (1983) - *Piano di risanamento delle acque*. BUR n. 132/83, L.R. del 19/12/83 n. 24.