

F. BALDACCI (*)

STRUTTURA E PIEZOMETRIA DEL «1° ACQUIFERO ARTESIANO IN GHIAIE» DELLA PIANURA PISANA

Riassunto - Il 1° Acquifero artesiano in Ghiaie della Pianura pisana fa parte di una struttura multistrato, a sua volta inserita in un «sistema aperto» rispetto ai bacini idrogeologici dei Fiumi Arno e Serchio; del suddetto acquifero multistrato confinato, che costituisce il recapito terminale del sistema (prima della scarica a mare), sono conosciute le condizioni piezometriche medie, relative ai mesi di Ottobre 1984, 1985 e 1986.

La disponibilità di nuovi dati, rilevati separatamente nel 1° Acquifero artesiano in Ghiaie nei mesi di Maggio e di Agosto 1994, consente ora di ricostruirne una specifica superficie piezometrica; sono state inoltre avanzate alcune ipotesi sui suoi limiti areali e sulla geometria della sua superficie sommitale. Vengono infine svolte alcune considerazioni circa gli effetti delle pronunciate depressioni piezometriche antropogeniche sulla subsidenza e sulla intrusione marina, suggerendo alcuni interventi di ricarica artificiale, per ovviare ai rischi di tali gravi danni ambientali.

Parole chiave - Pianura alluvionale costiera, carte idrogeologiche, acquiferi confinati, depressioni piezometriche chiuse, intrusione marina, subsidenza, ricarica artificiale.

Abstract - Piezometric conditions of the 1° Acquifero artesiano in Ghiaie in the Pisa Plain. The Pisa Plain Aquifer System (Sap) has been defined as an "open system aquifer" with respect to the hydrogeological basins of the Rivers Arno and Serchio. The Sap circulation, before reaching the sea, discharges the waters into a «confined multistrata aquifer» (Amc). The so called 1° Acquifero artesiano in Ghiaie is the main exploited aquifer of the Amc; this one includes an overlying main aquifer named 1° Acquifero artesiano in Sabbie. The general Amc piezometric conditions have been previously illustrated in a map realized on the mean data of October 1984, 1985 and 1986.

The availability of new data recorded in May and August 1994 only for the 1° Acquifero artesiano in Ghiaie allows now a new piezometric reconstruction. Furthermore some remarks about the borders of the aquifer system, the geometry of the top of gravels and its recharge modality have been developed.

The effects of some deep piezometric depressions, caused by pumping wells, have been evaluated; also the sea water intrusion and subsidence effects have been considered and some possible interventions (i.e. artificial water recharge) to reduce the environmental problems have been proposed.

Key words - Alluvial coastal plain, hydrogeological maps, confined aquifers, extensive and local drawdown, sea water intrusion, subsidence, artificial groundwater recharge.

1. PREMESSA

Nel sottosuolo della Pianura pisana, che comprende sia strati acquiferi che acquicludi e acquitardi, ha sede una complessa struttura idrogeologica composta, oltre che da discontinui livelli freatici superficiali, da un Acquifero multistrato confinato (Amc), così definito e descritto nelle sue varie caratteristiche litostratigrafiche, idrauliche, piezometriche ed idrochimiche da Baldacci et al. (1994). Gli stessi autori hanno identificato l'Amc come il recapito terminale, prima della scarica a mare, di un sistema acquifero regionale denominato Sistema Acquifero della Pianura pisana (Sap); di questo «sistema aperto», verso i bacini idrogeologici dei Fiumi Arno e Serchio, gli autori hanno inoltre elaborato bilanci d'acqua relativi alle varie aree di alimentazione dell'Amc. Nello stesso lavoro, a carattere generale, i dati disponibili non avevano consentito una separazione piezometrica tra i due principali orizzonti acquiferi componenti l'Amc che, in ordine di sovrapposizione dall'alto verso il basso, sono i seguenti:

1° Acquifero artesiano in Sabbie
1° Acquifero artesiano in Ghiaie

L'acquisizione di nuovi dati piezometrici (Agosto 1994), relativi al solo acquifero «artesiano» inferiore, consente ora di ricostruirne la specifica superficie virtuale che viene presentata in questa nota, con allegata anche la «Carta della permeabilità» delle rocce del Sap (vedi tavola f.t.), per la cui illustrazione si rimanda alla pubblicazione sopracitata.

2. INQUADRAMENTO FISIOGRAFICO

Nella pianura costiera che prende nome dalla Città di Pisa (vedi Fig. 1 e Tavola f.t.) confluiscono i due importanti sistemi idrografici dell'Arno e del Serchio, fiumi attualmente indipendenti tra loro¹ e da gran parte di quelli originati dai rilievi che delimitano la pianura stessa; è da notare infatti che nella Pianura pisana le aree di drenaggio di questi due corsi d'acqua sono confinate entro i loro argini artificiali ad eccezione, per l'Arno, del bacino del Torrente Zambra (Valle di Calci) e di alcuni torrenti minori, che scendono dalla terminazione sud-orientale dei Monti Pisani.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, Via S. Maria, 53, Pisa.

Lavoro eseguito nell'ambito dei Programmi del CNR - Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino, con il contributo finanziario dell'Amministrazione Provinciale di Pisa.

¹ Si ricorda che un antico tracciato del Fiume Serchio (Paleoserchio) affluiva all'Arno attraverso la Valle di Bientina.

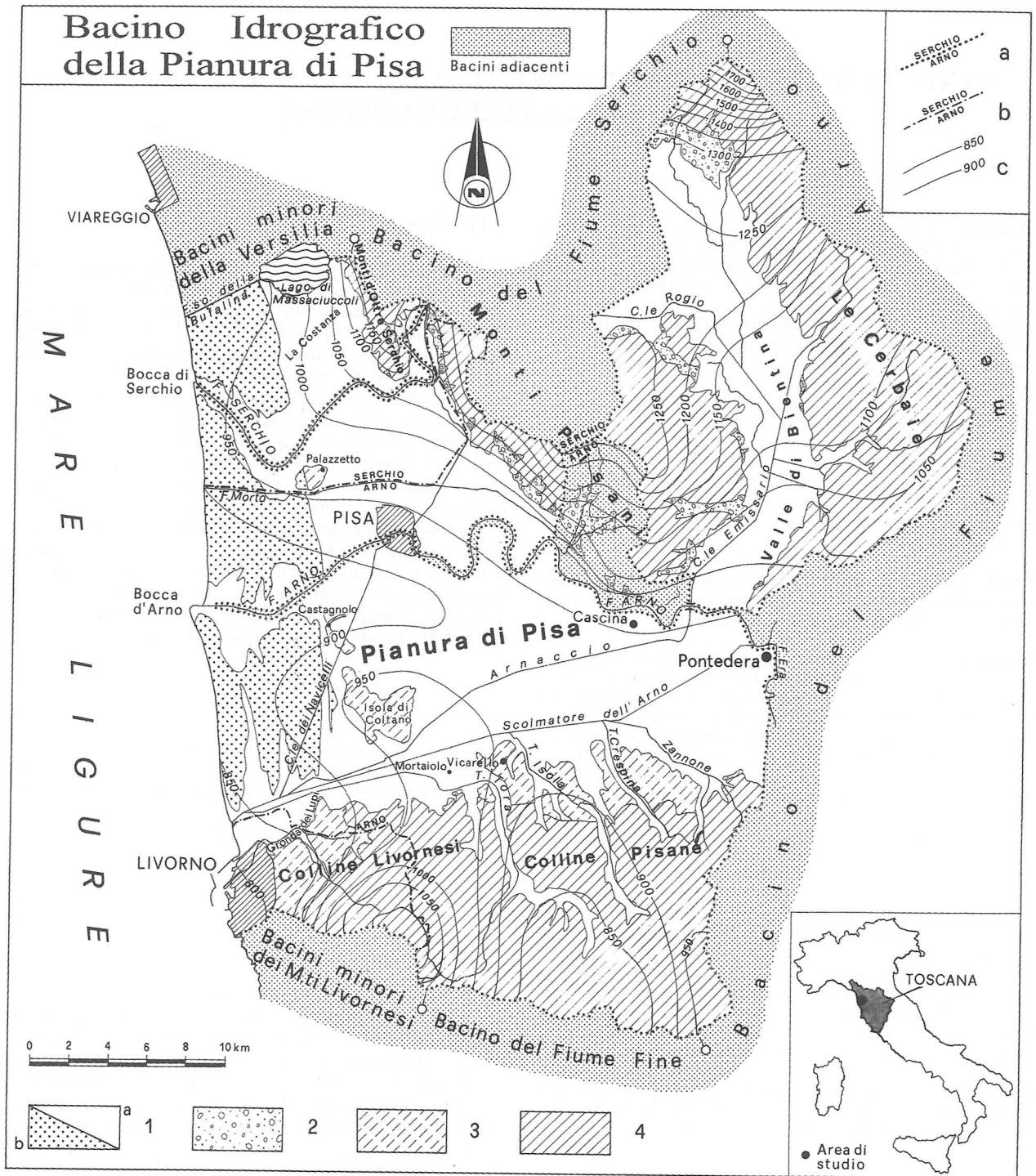


Fig. 1 - Inquadramento fisiografico e precipitazioni annuali medie del periodo 1951-1980. Legend: 1a. Depositi alluvionali prevalentemente limo-argillosi o sabbiosi-limosi; 1b. Depositi eolici delle dune e dei lidi litoranei; 2. Depositi alluvionali dei coni di deiezione e/o terrazzani; 3. Depositi eolici e fluvio-colluviali; 4. Successioni post-orogenetiche dei Monti Pisani, delle Cerbaie-Colline di Montecarlo (Lucca) e delle Colline livornesi-pisane; a) Limite dei sistemi idrografici e delle Autorità di Bacino dell'Arno e del Serchio; b) Limite delle Autorità di Bacino; c) Isoiete.

Si configurano in tal modo altre aree di drenaggio, naturale ed artificiale, in parte fraposte ai corsi dell'Arno e del Serchio, ma da essi indipendenti, che possiamo nel loro insieme definire come «Bacino idrografico della Pianura di Pisa» (vedi preced. Fig. 1).

La Pianura pisana, di forma nell'insieme trapezoidale, si restringe notevolmente dalla costa verso l'interno, fino alla sezione di confluenza della Valle di Bientina in quella dell'Arno; su questo lato, posto a circa 28 km dalla costa, la piatta superficie alluvionale raggiunge appena quote intorno ai 15 metri, con debole pendenza (0,05%) che provoca vasti ristagni d'acqua e la tendenza alla formazione di nuove aree paludose, nonostante le opere di canalizzazione e di bonifica effettuate nel corso dei secoli. Tali fenomeni di difficoltoso drenaggio sono accentuati, nella fascia costiera (zone della Costanza e di Castagnolo-Coltano), dallo sbarramento costituito dal sistema di lidi e dune litoranei, sopraelevati di pochi metri (le quote non superano in genere i 3 m) rispetto alla piana alluvionale ed alle interposte depressioni («lame»); a questo proposito è da mettere in rilievo che la notevole subsidenza (fino a 10-20 mm/a; Tongiorgi, 1978), legata soprattutto agli intensi emungimenti, tende a provocare depressioni topografiche chiuse e quindi ristagni d'acqua.

I cordoni sabbiosi coprono una fascia costiera larga 5-6 Km cui seguono, verso l'interno e prevalentemente a sud dell'Arno, più pronunciati rilievi, con quote massime intorno ai 15-18 metri, di più antica origine eolica (Palazzetto, Castagnolo e Isola di Coltano); nella pianura alluvionale retrodunare, i depositi limo-sabbiosi di esondazione «formano aree leggermente rilevate nei confronti di quelle che furono occupate dai paduli e dai sedimenti alluvionali più fini» (Della Rocca et al., 1987).

Sul lato settentrionale, in destra idrografica del F. Serchio, la pianura si prolunga nella bassa Versilia, restringendosi in corrispondenza del Lago di Massaciuccoli (di origine retrodunare) e del suo emissario Fosso della Bufalina. Verso nord-est, essa è chiusa dalla pronunciata dorsale dei Monti Pisani, che culmina alla quota 917 del M. Serra, e dei Monti d'Oltre Serchio, con quote massime intorno ai 200 metri; questi due rilievi, che presentano caratteri di sovralluvionamento, sono separati dalla Valle di

Ripafratta, solcata dal Fiume Serchio, quest'ultimo proveniente dalla Pianura di Lucca.

L'ampia Valle di Bientina, un tempo percorsa dal Paleoserchio, separa a sua volta i Monti Pisani dalle Colline delle Cerbaie; attualmente essa è drenata dal Canale Emissario di Bientina, collegato all'Arnaccio attraverso la «Botte» di S. Giovanni alla Vena (vedi anche Tav. f.t.).

Verso sud, il limite fisiografico della pianura è rappresentato dalla scarpata (detta Gronda dei Lupi) di un terrazzo di abrasione marina (Terrazzo di Livorno) e dalle Colline livornesi-pisane; il raccordo è segnato da blande ondulazioni (quote massime intorno ai 20-30 metri, con dislivelli rispetto all'adiacente pianura alluvionale di 10-15 metri), costituite da depositi eolici e fluvio-palustri del Pleistocene superiore.

I tratti terminali dell'Arno e del Serchio, ad andamento spiccatamente meandriforme, sono stati in gran parte rettificati con interventi compiuti tra il 1300 e il 1700; numerosi sono anche i meandri abbandonati, per effetto della naturale evoluzione di questo tipo di alveo fluviale.

I corsi d'acqua originati dai Monti Pisani e dalle Colline meridionali sono stati quasi interamente canalizzati nei loro tratti di pianura e convogliati nella fitta rete di fossi e canali artificiali che anticamente erano utilizzati, oltre che per l'irrigazione, come idrovie e come forza motrice; solo di recente (1972) sono state completate le opere di allacciamento dello Scolmatore dell'Arno, poste immediatamente a valle dell'abitato di Pontedera.

3. STRUTTURA DELL'ACQUIFERO

Per un inquadramento geo-idrologico del 1° Acquifero artesiano in Ghiaie si rimanda al sopracitato lavoro di Baldacci et al. (1994); ci limitiamo qui a ricordare che esso costituisce il termine inferiore dei due principali orizzonti dell'Acquifero multistrato confinato (Amc) della Pianura pisana come è rappresentato, oltreché nella sezione litostratigrafica della Fig. 2, in quelle del suddetto lavoro (Fig. 10) e nella tavola f.t. qui allegata.

Mentre il soprastante 1° Acquifero artesiano in Sabbie è appunto costituito essenzialmente da depositi sabbiosi,

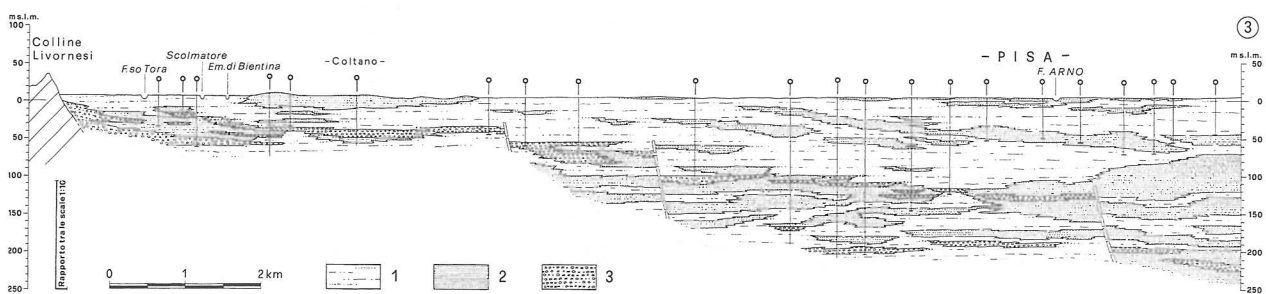


Fig. 2 - Sezione litostratigrafica interpretativa attraverso la Pianura pisana.

Legenda: 1. *Argille e limi*: argille limose, talvolta torbose, e limi argillosi, passanti a limi sabbiosi con lenti e straterelli sabbiosi; 2. *Sabbie*: sabbie prevalentemente medio fini, talvolta limose, con intercalazioni sia limose che sabbiose grossolane, fino a ghiaiose-ciottolose; 3. *Ghiaie*: ciottoli e ghiaie, talvolta con matrice sabbiosa in varie proporzioni, con intercalazioni di livelli francamente sabbiosi.

Per le caratteristiche di permeabilità delle Unità idrogeologiche si veda la Tabella 5 in Baldacci et al., 1994; la traccia della sezione è nella Fig. 3.

che passano a sabbiosi-fini e a limo-sabbiosi, di facies fluvio-lacustre, marina-transizionale ed eolica, l'ambiente di quelli che costituiscono l'acquifero di cui si tratta è più francamente fluviale («Paleoserchio da Bientina»; vedi Trevisan e Tongiorgi, 1953), e più precisamente è riferibile ad alvei tipo fiumara, con depositi prevalentemente ghiaiosi-sabbiosi.

Il corso del Paleoserchio si è verosimilmente spostato, durante le fasi di progradazione e di aggradazione della Pianura pisana, dalla fascia pedemontana settentrionale a quella pedecollinare meridionale, a partire dalla sua antica confluenza nell'Arno, situata presso lo sbocco della Valle di Bientina.

Questa migrazione plano-altimetrica dell'alveo, durante il colmamento alluvionale dell'originario bacino della Pianura pisana, può essere attribuita sia ad un basculamento tettonico del suo substrato (Della Rocca et al., 1987), sia ad una maggiore «spinta sedimentaria» da parte degli affluenti di destra rispetto a quella degli affluenti di sinistra, originati rispettivamente dai Monti Pisani e dalle Colline livornesi-pisane, non potendosi escludere la combinazione di entrambi questi fattori. Un tale meccanismo sedimentario è rispecchiato dall'andamento generale del tetto del 1° Acquifero artesiano in *Ghiaie*, illustrato nella carta della Fig. 3 per mezzo di isolinee di eguale profondità.

La ricostruzione della carta strutturale della Fig. 3 è lar-

gamente schematica ed interpretativa, in quanto è solo in parte basata su dati geognostici, che sono peraltro scarsi e disomogeneamente distribuiti nell'area della pianura; in particolare la presenza del 1° Acquifero artesiano in *Ghiaie* è ben documentata in tutta la parte centro-meridionale della pianura stessa, mentre esso non è mai stato raggiunto da pozzi trivellati nel suo settore nord-occidentale, adiacente ai Monti Pisani. Tale ricostruzione si avvale pertanto, oltreché delle indicazioni fornite dalla evoluzione paleo-idrografica sopra prospettata, di un inquadramento del Bacino versiliese-pisano nell'evoluzione tettonica distensiva a scala regionale.

È opportuno inoltre precisare che il tetto delle *Ghiaie* non rappresenta in qualche caso la superficie fisica di un unico acquifero continuo, ma l'involuppo di più corpi alluvionali di minori dimensioni, con geometria stratiforme o lenticolare, sfalsati e in parte sovrapposti.

In questo contesto i «gradini» segnati nella superficie strutturale, orientati secondo direttrici tettoniche appenniniche, sono stati ipotizzati come l'effetto di una riattivazione post-wurmiana (D'Amato Avanzi e Nardi, 1993) dei sistemi di faglie che delimitano verso SW l'alto morfotettonico dei Monti Pisani.

La «depressione neotettonica» adiacente ai Monti Pisani, situata sul prolungamento sud-orientale del semigraben della bassa Val di Magra, è stata ipoteticamente ricostruita anche in base alla reinterpretazione (studi in corso di F.



Fig. 3 - Carta interpretativa del tetto del 1° Acquifero artesiano in *Ghiaie*.

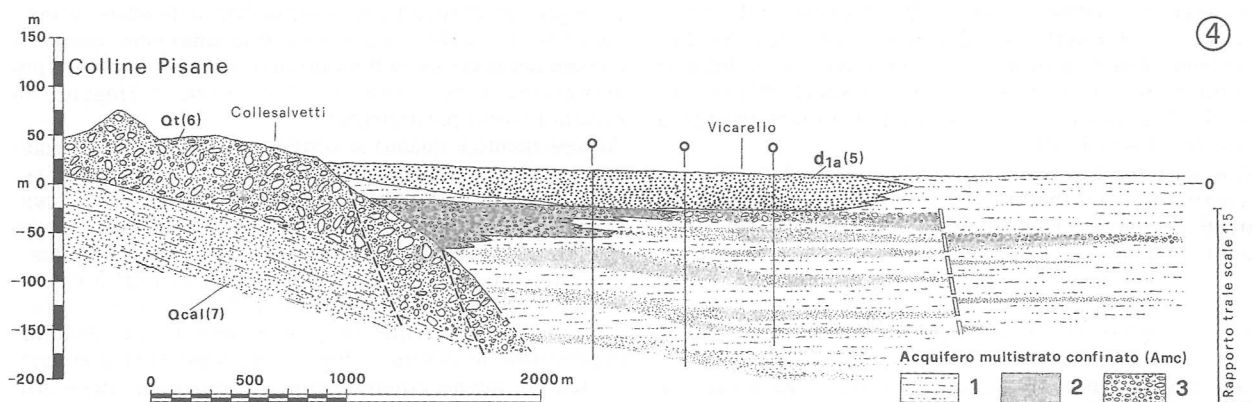


Fig. 4 - Sezione litostratigrafica interpretativa che mostra i rapporti tra il 1° Acquifero artesiano in Ghiaie, le Sabbie e limi di Vicarello, e la struttura idrogeologica «incassante» delle Colline pisane.

Per la legenda delle Unità idrogeologiche relative alla Pianura pisana e per le didascalie delle formazioni geologiche sulle colline adiacenti, si veda rispettivamente la precedente Fig. 2 e la Tavola f.t.; la traccia della sezione è segnata nella Fig. 3.

Baldacci, P. Cantini e F. Carosi) di prospezioni gravimetriche (Grassi e Gianelli, 1994) e geoelettriche (Cantini et al., submitted); i coni alluvionali sepolti, presenti al margine nord-orientale della depressione stessa, sono stati inoltre considerati solo parzialmente interessati dalla riattivazione post-wurmiana delle faglie, in quanto la loro deposizione si è protratta oltre a quella del Paleoserchio.

Anche nella fascia meridionale della pianura, dove i depositi ghiaiosi del Paleoserchio si trovano alle minime profondità, si individuano alcuni settori a geometria conica (corrispondenti verosimilmente a ventagli alluvionali completamente sepolti), formati dall'antico sistema dei suoi tributari di sinistra, che hanno origine dalle Colline livornesipisane; attraverso questi si stabilisce un collegamento idraulico tra il 1° Acquifero artesiano in Ghiaie e gli acquiferi di subalveo dei suddetti affluenti del Paleoserchio.

La sezione 4 mostra che sulla trasversale Collesalveti - Vicarello, nella fascia pedecollinare, la struttura idrogeologica si differenzia dalla più tipica successione dell'Amc, comprendente due principali livelli acquiferi; su questa trasversale l'acquifero in Ghiaie viene infatti direttamente sormontato dai terreni semipermeabili appartenenti all'Unità idrogeologica 5 (Sabbie e Limi di Vicarello); in questo caso non è quindi presente il livello superiore dell'Amc in Sabbie e gli affioramenti dell'Unità 5 funzionano da aree di ricarica dell'Acquifero in Ghiaie, che localmente diviene semiconfinato, attraverso processi di drenanza.

Nella zona tra S. Prospero e Pontedera (vedi sezione in calce alla Tavola f.t.), la distinzione tra i due principali livelli acquiferi non è netta, in quanto tra essi sono presenti strati ghiaiosi che passano lateralmente e verso il basso a strati sabbiosi, questi ultimi a loro volta collegati al 1° Acquifero artesiano in Ghiaie; analogamente nelle zone delle dune costiere di S. Piero a Grado, discontinui livelli ghiaiosi sono interposti tra l'acquifero principale in Sabbie, alimentato anche attraverso le dune stesse, e quello sottostante in Ghiaie. Sono quindi possibili collegamenti idraulici, più o meno diretti, tra i due acquiferi principali, anche per fenomeni di drenanza attraverso gli strati semipermeabili e di limitato spessore, che li separano.

4. CONDIZIONI PIEZOMETRICHE

La ricostruzione delle condizioni piezometriche del 1° Acquifero artesiano in Ghiaie è basata sui dati acquisiti nell'ambito dello studio per la Tesi di Laurea di Vieri (1996), nel corso del quale sono stati eseguiti due rilevamenti del livello della falda in pressione, il primo nel mese di Maggio 1994 e il secondo nell'Agosto dello stesso anno; erano stati inventariati complessivamente 93 pozzi, 79 dei quali utilizzabili per le misure piezometriche. I risultati delle due campagne di misura, riportati nella tabella 1 della pagina seguente, sono stati confrontati ed integrati con quelli dell'indagine eseguita da Geomath s.r.l. e Geoser s.c.r.l. (1994) per conto del Virgo Project. I due periodi di misura sono stati scelti come rappresentativi delle condizioni piezometriche rispettivamente delle fasi dei massimi (Maggio) e dei minimi (Agosto) livelli di falda. Il regime pluviometrico che mediamente caratterizza le aree di ricarica dell'Amc (vedi Baldacci et al., 1994) è infatti di tipo bimodale, con due massimi e due minimi, i primi corrispondenti rispettivamente alle stagioni primaverile ed autunnale, i secondi a quelle invernale ed estiva. Questa distribuzione stagionale delle piogge non è correlabile alla ricarica, ma si traduce nel suddetto andamento piezometrico unimodale; ciò è dovuto alla combinazione autunnale-invernale di due fattori, cioè piogge elevate associate a bassa evapotraspirazione reale, favorevoli all'alimentazione degli acquiferi, nonché allo sfasamento della ricarica rispetto alle piogge efficaci, che producono il massimo primaverile; al contrario, verso la fine della stagione estiva si sommano gli effetti negativi delle scarse piogge e dell'alta evapotraspirazione.

Sulle variazioni piezometriche stagionali influisce, oltre al rapporto ricarica/discarica in condizioni naturali, la discarica artificiale dovuta agli emungimenti dai pozzi, particolarmente intensi nei mesi estivi, sia per gli usi agricoli che civili, questi ultimi legati anche alle attività turistiche soprattutto della fascia costiera.

La configurazione piezometrica del mese di Agosto, pur nel suo generale abbassamento, non si discosta in modo significativo da quella di Maggio; abbiamo pertanto rite-

nuto superfluo riportarle entrambe in questa nota, limitandoci a quella della fase di minima (fine Agosto), per l'evidente maggiore interesse pratico che hanno tutte le informazioni sulla disponibilità di risorse idriche nel periodo di minimi livelli piezometrici, in concomitanza della maggiore richiesta.

Abbiamo peraltro ritenuto opportuno di evidenziare con un altro specifico elaborato le variazioni piezometriche spaziali tra maggio e agosto, oltre a quelle puntuali riportate in tabella.

4.1. Piezometria del mese di agosto 1994

Come già accennato, la Carta piezometrica della Fig. 5 è rappresentativa di una situazione di magra della falda, che

si raggiunge abitualmente verso la fine della stagione estiva, prima che abbia inizio la ricarica autunnale; questa si protrae nel successivo periodo invernale-primaverile fino al raggiungimento, in genere verso la fine di Maggio, dei massimi livelli piezometrici.

Analogamente a quanto si verifica in ogni struttura acquifera confinata, situata in una pianura costiera, anche nel caso in esame la discarica naturale dovrebbe essere controllata da un generale lieve gradiente piezometrico, con un conseguente flusso sotterraneo, dall'entroterra verso il mare. L'andamento piezometrico illustrato nella Fig. 5 mostra invece, nella fascia costiera, un gradiente inverso e, nell'entroterra, un complesso insieme di estese e profonde depressioni ad isolinee chiuse, che sono evidentemente l'effetto di intensi emungimenti, verso le quali viene artificialmente richiamato il drenaggio sotterraneo.

Tabella 1 - Livelli piezometrici dei pozzi, nei mesi di Maggio e Agosto 1994.

N.	Livello piezometrico		Δ	Note	N.	Livello piezometrico		Δ	Note
	Maggio	94 Agosto				Maggio	94 Agosto		
1	20,46	18,58	1,88		42*	—	-11,30		c
2	9,65	7,92	1,73		43	-6,06	-8,85	2,79	
5	12,25	9,38	2,87		44	0,00	-2,40	2,40	
6	10,90	9,00	1,90		45	0,69	-6,79	7,48	a
7	13,54	10,70	2,84		46*	-9,70	-10,85	1,15	b
8	11,44	5,70	5,74		47	-1,79	-3,30	1,51	
9	5,02	3,90	1,12		48	-0,68	-2,82	2,14	
10	3,45	-----		b	49	-0,20	-2,70	2,50	
11	2,80	-0,20	3,00		50*	—	-12,70		c
12*	-----	-0,10			51*	—	-11,00		c
13	2,50	-0,05	2,55		52	-0,40	—		
14	2,44	-0,20	2,64		53	-1,20	-2,67	1,47	
15	2,68	0,17	2,51		54	-2,10	-3,22	1,12	
16	21,50	18,86	2,64		55*	—	-13,80		c
17	9,19	7,93	1,26		56	-1,80	-4,40	2,60	
18	12,59	10,98	1,61	a	57	-2,95	-5,60	2,65	c
19	1,30	-1,63	2,93		59	-3,20	-3,90	0,70	
20	2,50	0,35	2,15		60	-2,10	-4,45	2,35	
21	2,25	0,60	1,65		61	-1,20	-2,80	1,60	
22	2,40	-0,34	2,74		62	-0,90	<-4		a/c
23	0,84	-1,25	2,09		66	-4,68	-5,25	0,57	
24	1,04	-0,90	1,94		67	-0,89	-2,47	1,58	
25	0,20	-1,77	1,97		68	-0,95	-1,60	0,65	
26	1,23	-0,64	1,87		69	-0,71	-2,58	1,87	b
27	10,12	9,20	0,92		70	-1,22	-3,60	2,38	
28	2,70	1,03	1,67		71	0,13	-0,95	1,08	d
29	2,42	0,56	1,86		77	-1,80	-2,94	1,14	
30	1,07	-0,93	2,00		78*	-0,90	-1,50	0,60	e
31	1,05	-1,20	2,25		79	-2,25	-2,45	0,20	
32	0,81	-0,95	1,76		84	-0,94	-2,07	1,13	
33	3,30	1,71	1,59		85	-3,55	-3,75	0,20	
34	9,60	7,20	2,40		86	-3,73	-4,20	0,47	
35	-0,40	-2,50	2,10		87	0,55	-0,60	1,15	
36	10,52	5,70	4,82		88	-0,50	-1,6	1,10	
37*	-1,86	-2,08	0,22	b	89	-0,22	0,75	0,53	
38	0,63	-2,30	2,93		90	-0,09	-0,68	0,59	
39	0,43	-1,85	2,28		91	-0,50	-0,96	0,46	
40	—	—			92	0,57	0,06	0,51	
41	-0,50	-2,10	1,60		93	—	0,30		

* Pozzi Acquedotti

a - Valori piezometrici non attendibili per probabile intasamento del pozzo e/o dei filtri;

b - Livelli dinamici;

c - Livelli influenzati da emungimenti in pozzi vicini;

d - Pozzo che attinge anche al I° Acquifero artesiano in sabbie;

e - Pozzo che attinge anche nelle sabbie sottostanti il I° acquifero artesiano in ghiaie.

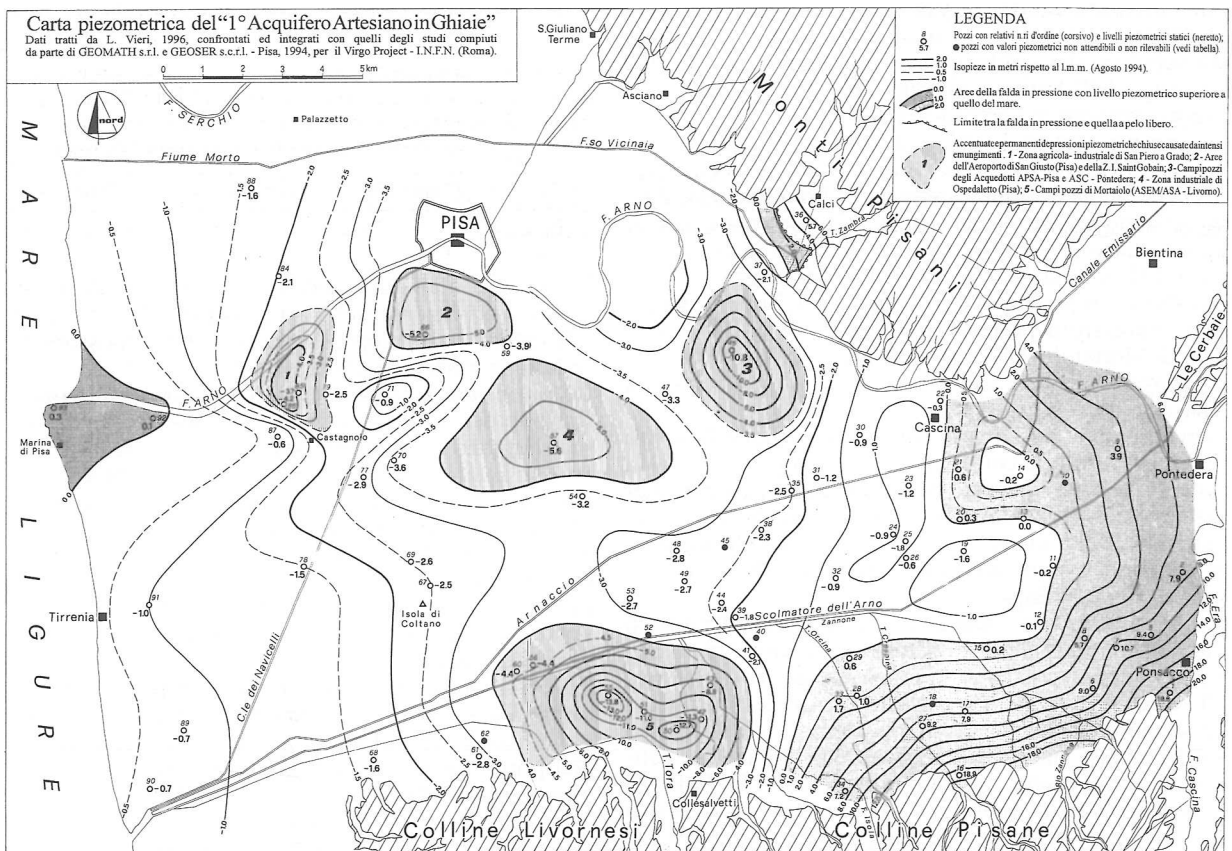


Fig. 5 - Carta piezometrica del mese di Agosto 1994. Le quote piezometriche sono state approssimate al 1° decimale per motivi grafici; da ciò derivano alcune apparenti incongruenze nella posizione delle isolinee. Per i valori corretti si veda la Tabella A nel testo.

A questo proposito è da mettere in rilievo un ampio comprensorio depressionario, che occupa tutta la parte centrale della pianura (a sud di Pisa) ed è articolato in tre minimi, fino a valori di oltre 5 metri sotto il livello del mare; questi corrispondono agli intensi prelievi per l'area agricola-industriale di San Piero a Grado (Zona 1), per l'area dell'Aeroporto di Pisa-San Giusto e delle industrie vetrarie del Gruppo Saint Gobain (Zona 2) e per la Zona industriale di Ospedaletto (Zona 4). Le due più accentuate depressioni piezometriche sono però centrate sui Campi pozzi della APSA-Pisa e della ASC-Pontedera in località Navacchio (Zona 3, con oltre 10 metri sotto il l.m.m.) e dell'ASEM (ex ASA) -Livorno in località Mortaiolo (Zona 5); quest'ultima è composta da due minimi, che raggiungono rispettivamente oltre 12 e 13 metri sotto il livello del mare.

Depressioni piezometriche meno profonde (inferiori a 2 metri sotto il l.m.m.), originate probabilmente da meno intensi emungimenti ad uso privato, si individuano inoltre nell'area prospiciente lo sbocco delle valli di Bientina e dell'Arno nella Pianura di Pisa.

Nella fascia costiera a nord dell'Arno, corrispondente al Parco di Massaciuccoli - Migliarino - San Rossore, ed in

quella a sud dell'Arno stesso, occupata in gran parte dal Campo militare Darby, è documentata una lieve, graduale tendenza all'innalzamento della superficie piezometrica verso la linea di riva². Il livello del mare viene raggiunto solo in prossimità della costa, con valori positivi in un'area ristretta che si protende verso l'interno in corrispondenza del tratto terminale dell'Arno, esprimendo quindi un'alimentazione anche della falda artesia che ha sede nelle *Ghiaie* da parte del fiume stesso; ciò è in accordo con i possibili collegamenti idraulici più o meno diretti, attraverso gli apparati dunari affioranti e sepolti, tra i due acquiferi artesiani principali, come prospettato nel precedente paragrafo (vedi anche sezione della Tav. f.t.).

Altre e più estese aree con quote piezometriche al disopra del l.m.m. e con gradienti più o meno accentuati, che presentano configurazioni coniche divergenti, si individuano (o possono essere ipoteticamente delineate per scarsità di dati a disposizione), allo sbocco nella Pianura pisana delle Valli di Bientina, dell'Arno, dell'Era-Cascina e dei corsi d'acqua minori che provengono dalle colline livornesipisane (R. Zannone, T. Crespina e T. Orcina); esse sono l'espressione di aree di ricarica, confermando così le rico-

² Si deve però notare che la scarsità di dati in quasi tutta la fascia costiera, ed in particolare nella Tenuta di S. Rossore, ne rende la ricostruzione piezometrica del tutto indicativa.

struzioni idrostrutturali del già citato lavoro di Baldacci et al. (1994), che hanno individuato negli acquiferi confinati di subalveo dei suddetti corsi d'acqua le principali vie di ricarica dell'**Amc**, unitamente agli altri paleoalvei del sistema idrografico Serchio-Arno.

Il «cono piezometrico» più marcato si configura però in corrispondenza di quello che doveva essere il vecchio percorso del Fiume Cascina, diretto verso l'omonima località; non si hanno invece dati sufficienti a documentare un presumibile analogo settore conico divergente in corrispondenza dello sbocco dell'Era nella Pianura pisana.

Allo sbocco in pianura del F. Isola e del T. Tora, le accentuate depressioni piezometriche provocate dal Campo pozzi di Mortaiolo cancellano invece gli effetti della ricarica proveniente dall'acquifero confinato di subalveo di questi due corsi d'acqua.

Notevole importanza riveste anche, per i suoi effetti sulla ricarica, il settore conico divergente, in parte con falda freatica (anch'esso peraltro ricostruito in base a pochi dati piezometrici), situato allo sbocco in pianura del T. Zambra (Valle di Calci); ciò in virtù di condizioni idrologiche-idrogeologiche particolarmente favorevoli (ibidem) all'alimentazione del **Sap**.

È importante infine rimarcare, a conferma del ruolo di ricarica svolto dai suddetti settori conici divergenti, che soltanto in corrispondenza di essi (oltre al caso della foce dell'Arno) si raggiungono estesamente quote piezometriche superiori al livello del mare. Lo zero piezometrico risulta pertanto situato ben all'interno della pianura, delimitando una fascia arcuata prospiciente le Valli di Bientina, dell'Arno, dell'Era-Cascina e dei corsi d'acqua minori originati dalle Colline pisane, mentre corrisponde proprio allo sbocco della valle nel caso del T. Zambra; ciò è da mettere in relazione alla maggiore alimentazione proveniente dalle prime, rispetto al più limitato apporto del bacino dello Zambra, nonché all'azione drenante svolta dalla profonda ed estesa depressione piezometrica (Zona 3) adiacente all'area di ricarica.

4.2. Variazioni piezometriche tra i mesi di Maggio e di Agosto 1994

Dal confronto tra i livelli piezometrici del mese di Maggio (Vieri, 1996), che rappresentano i massimi annuali, e le successive condizioni di magra della falda in Agosto (queste ultime illustrate nel paragrafo precedente) emerge che non ci sono significativi cambiamenti nella configurazione generale della superficie piezometrica (e quindi negli andamenti delle linee di flusso), ma soltanto un suo generale, seppur più o meno accentuato, abbassamento, come risulta dai valori delle differenze (D) riportati nella precedente tabella, che sono tutti positivi.

Le principali variazioni tra le condizioni di massima (Maggio) e quelle di minima (Agosto) dei livelli di falda possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

– Dal mese di Maggio a quello di Agosto si è verificato uno spostamento delle due isolinee zero, la prima verso il margine costiero e la seconda verso quello interno della pianura, con conseguente ampliamento del-

l'area dove la superficie piezometrica si trova al di sotto del l.m.m. ed una corrispondente riduzione dell'area dove invece essa si trova al di sopra.

– Anche in corrispondenza del «cono piezometrico» del T. Zambra si registra un analogo accentuato spostamento dell'isolinea zero verso monte, pur mantenendosi una conforme superficie piezometrica.

– Le depressioni piezometriche a isolinee chiuse rimangono centrate all'incirca nelle rispettive posizioni, ma con notevoli approfondimenti ed ampliamenti; in particolare, in corrispondenza del Campo pozzi di Mortaiolo, i valori minimi sono variati da 5 m a oltre 13 m sotto il livello del mare.

Per quanto riguarda invece la distribuzione areale delle variazioni piezometriche tra Maggio e Agosto, in base alla relativa carta rappresentata nella Fig. 6 possono essere fatte le osservazioni che seguono.

Le più estese e le più accentuate (valori massimi dell'ordine dei 3 m) variazioni di livello piezometrico³ si raggiungono ovviamente sia in aree di ricarica, sia in aree di intenso emungimento; queste ultime esprimono uno squilibrio nel rapporto ricarica/discarica ovvero, in altri termini, un sovrasfruttamento rispetto alle potenzialità della falda. Una correzione di questo squilibrio potrebbe essere ottenuta da una parte attraverso metodologie di ricarica artificiale, dall'altra con l'ottimizzazione dei prelievi, ma questa problematica esula dagli scopi del presente lavoro.

Le variazioni minime (inferiori al metro) si registrano nella fascia costiera e in una parte centro-settentrionale della pianura prevalentemente in sinistra dell'Arno.

Nel primo caso ciò è verosimilmente da mettere in relazione con un effetto di ricarica esercitato, anche rispetto al 1° *Acquifero artesiano in Ghiaie* (oltreché al 1° *Acquifero artesiano in Sabbie*), attraverso il sistema dunare (vedi sezione della Tavola f.t.), il che non è peraltro ben documentabile a causa della scarsità di dati piezometrici disponibili per quest'area.

Più problematica è l'interpretazione del secondo caso, nel quale si può comunque prospettare il concorso di due fattori: da una parte i minori prelievi, dall'altra una apprezzabile ricarica proveniente dalle strutture idrogeologiche, superficiali e profonde, sul bordo dei Monti Pisani; ciò sembra confermato dai valori negativi (innalzamento piezometrico tra Maggio e Agosto) misurati nei pozzi n. 64 e n. 65 (vedi Vieri, 1996), anche se questi sfruttano soltanto il 1° *Acquifero artesiano in Sabbie*.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le depressioni piezometriche, registrate soprattutto nel settore centro-meridionale della pianura, sono l'espressione del pronunciato sovrasfruttamento delle falde artesiane o, in altri termini, del forte squilibrio che in esse si è venuto a creare nel rapporto fra ricarica e scarica.

Non essendo attualmente praticabile, al fine di un apprezzabile recupero dei livelli piezometrici, una riduzione dei prelievi, né d'altra parte del tutto risolutiva una loro ottimizzazione (AA.VV., 1994), le più efficaci soluzioni del problema devono essere ricercate in quelle opere idrauliche

³ Le massime escursioni piezometriche puntuali (metri 5,74 e 7,48, registrate rispettivamente nei pozzi 8 e 45) non sono state ritenute significative (e pertanto sono state escluse dalla ricostruzione delle linee di isovarianza), probabilmente per intasamento del pozzo e/o dei filtri.

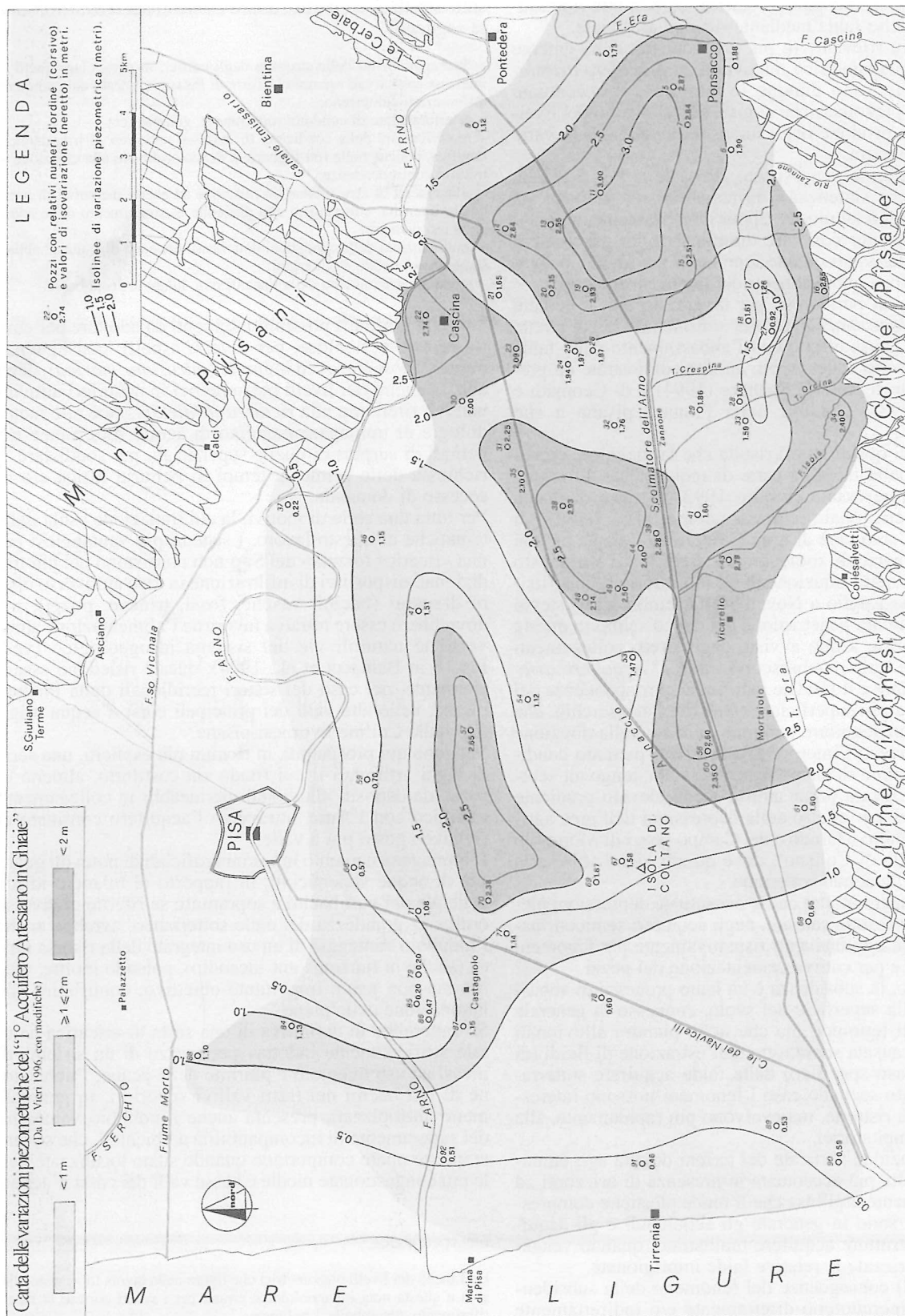


Fig. 6 - Carta delle variazioni piezometriche tra i mesi di maggio e agosto 1994.

che atte ad incrementare la ricarica, cioè in una ripressurizzazione delle falde mediante ricarica artificiale.

L'aspetto più rilevante (e più preoccupante) che emerge dal quadro piezometrico relativo al 1° *Acquifero artesiano in Ghiaie* sono dunque le numerose e accentuate depressioni piezometriche chiuse, ben al disotto del livello del mare, prodotte dagli intensi emungimenti in varie aree della pianura.

La Carta piezometrica (Agosto 1994) della Fig. 5 e della tavola f.t., che sintetizza il principale risultato di questa nota, fornisce in tal modo, seppur indirettamente, una rappresentazione per così dire drammatica dei gravi rischi ambientali derivanti da due fenomeni, già in atto, provocati da tali forti abbassamenti dei livelli piezometrici.

Ci riferiamo ai pericolosi, per diversi aspetti, fenomeni della *intrusione marina* e della *subsidenza*, le cui strette relazioni di causa-effetto con l'abbassamento delle falde sotterranee sono state rispettivamente dimostrate da precedenti studi di Rossi e Spandre (1994) e di Geomath e Geoser (1994), condotti nella Pianura pisana a sud dell'Arno.

Dal primo di questi lavori risulta che la maggiore contaminazione della falda da parte di acque salate di origine marina ha interessato (Luglio 1992) il tratto di fascia costiera meridionale corrispondente alla Tenuta di Coltano, un'area cioè di grande richiesta d'acqua per usi soprattutto agricoli-zootecnici; è significativa a questo proposito la netta riduzione degli indicatori chimico-fisici da Giugno-Luglio a Novembre-Dicembre dello stesso anno. La marcata penetrazione del cuneo salino in questa zona è favorita, a mio avviso, dagli stretti collegamenti idraulici che qui si stabiliscono tra il 1° *Acquifero artesiano in Ghiaie* e il fondale marino, in corrispondenza del più recente e più superficiale alveo del Paleoserchio, che costituisce un acquifero continuo, almeno nella direzione dalla costa verso l'interno. Si realizzano pertanto condizioni di massimo richiamo di acqua salata, lungo un «corridoio» ad elevata permeabilità e con elevato gradiente piezometrico, per effetto delle depressioni dell'area agricola di San Piero a Grado e del Campo pozzi di Mortaiolo (oltre a quella di Coltano), dove quindi viene attivata la dinamica delle acque sotterranee.

È da sottolineare inoltre che le accentuate depressioni piezometriche possono causare, negli acquiferi semiconfinati e confinati, inquinamenti rispettivamente per fenomeni di drenanza e per cattiva cementazione dei pozzi.

Come è noto, la subsidenza è un lento processo di abbassamento della superficie del suolo, connesso in generale a movimenti tettonici, ma che nelle pianure alluvionali può essere causata soprattutto dall'estrazione di fluidi (di acqua nel caso specifico) dalle falde acquifere sotterranee; in questo secondo caso i fenomeni possono interessare aree più ristrette, ma evolvono più rapidamente, alla scala dei tempi storici.

La compattazione verticale dei terreni dovuta agli emungimenti risulta più accentuata in presenza di orizzonti ad alta componente argillosa che li rende plastici e compressibili, come sono in generale gli acquicludi e gli acquitardi delle strutture acquifere multistrato, quando vengono depressurizzate le relative falde imprigionate.

Le principali conseguenze del fenomeno della subsidenza, che si ripercuotono direttamente e/o indirettamente

sulle strutture ed infrastrutture esistenti sul territorio, sono le seguenti:

- danneggiamento delle strutture degli edifici, in particolare quelli di interesse storico (ad esempio la Torre di Pisa), provocato dai cedimenti differenziali del terreno;
- deterioramento di condotte sotterranee, gallerie ecc;
- modificazioni delle condizioni di deflusso nelle reti di irrigazione e bonifica, nonché nelle reti fognarie e di scolo, dovute alla creazione di tratti in contropendenza;
- allagamenti di aree urbane, in relazione ad eventi meteorici di particolare intensità, conseguenti alla difficoltà di smaltimento delle acque nelle reti drenanti;
- modificazioni delle condizioni di deflusso nei corsi d'acqua ed abbassamento del livello degli argini;
- sensibile arretramento della linea di riva, lungo le coste basse.

Un cenno infine a possibili interventi da adottare per contrastare le pericolose, per diversi aspetti, conseguenze dirette (*subsidenza*) ed indirette (*intrusione marina*), degli abbassamenti dei livelli piezometrici in acquiferi alluvionali. Ci riferiamo alla *ricarica artificiale*, cioè alle metodologie di immagazzinamento di acque sotterranee nei periodi di surplus di quelle superficiali, per soddisfare la richiesta delle prime in tempi di penuria idrica e/o di eccesso di domanda.

Per tutta una serie di motivi, la cui trattazione esula dalle tematiche di questo lavoro, i sistemi più vantaggiosi per una «ricarica forzata» del Sap non consistono nei più tradizionali dispositivi di infiltrazione in loco attraverso opere drenanti (bacini, vasche, fossi, trincee, pozzi), ma dovrebbero essere mirati a favorirne l'alimentazione attraverso le naturali vie del sistema idrogeologico (vedi Fig.18 in Baldacci et al., 1994); queste risiedono essenzialmente, nel caso dei settori meridionali della Pianura pisana, nelle alte valli dei principali corsi d'acqua originati dalle Colline livornesi-pisane.

Vengono qui prospettati, in termini più espliciti, una serie di laghi artificiali il cui fondo sia costituito, almeno in parte, da depositi alluvionali permeabili in collegamento idraulico con l'Amc, attraverso l'acquifero confinato di subalveo posto più a valle.

L'immagazzinamento in bacini artificiali di notevoli quantità di acque superficiali, in rapporto al bilancio idrico generale dei vari bacini e soprattutto se riferite al diverso ordine di grandezza del ciclo sotterraneo, avrebbe anche l'indubbio vantaggio di un uso integrato della risorsa idrica (anche in funzione ant'incendio), potendo inoltre, ultimo ma non meno importante obiettivo, contribuire alla laminazione delle piene.

Si tratterebbe in definitiva di una sorta di «ricarica naturale artificialmente indotta» per mezzo di un sistema di invasi ad uso integrato e plurimo delle acque; l'ubicazione di tali bacini nei tratti vallivi superiori, in generale meno antropizzati, presenta anche l'indubbio vantaggio del superamento di incompatibilità ambientali, che sovente queste opere comportano quando siano localizzate nelle più congestionate medie e basse valli dei corsi d'acqua.

ERRATA CORRIGE

La Tabella dei livelli piezometrici che figura nella tavola fuori testo allegata a questa nota è parzialmente errata; per i valori corretti si faccia riferimento alla Tabella 1 nel testo.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 1994. Convegno: Il Serchio: una possibile soluzione dei problemi idrici di Pisa e Livorno. Pisa, 19.02.1994: 159 pp., Litografia Felici, Pisa.
- Cantini, P., Testa, G., Zanchetta, G., Cavallini, R. The Plio-Pleistocene evolution of extensional tectonics in Northern Tuscany, as constrained by new gravimetric data from the Montecarlo Basin (Lower Arno Valley, Italy). Submitted to Tectonophysics.
- Baldacci, F., Bellini, L., Raggi, G., 1994. Le risorse idriche sotterranee della Pianura Pisana. Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Ser. A, 101: 241-322.
- D'Amato Avanzi, G., Nardi, I., 1993. Indizi di neotettonica nei Monti d'Oltre Serchio: faglie distensive recenti al bordo della Pianura pisana e depositi ciottolosi a quota 170 metri. Boll. Soc. geol. ital., 112: 601-614.
- Della Rocca, R., Mazzanti, R., Pranzini, E., 1987. Studio geomorfologico della Pianura di Pisa (Toscana). Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10: 56-84.
- Dini, I., 1976. La prima falda artesianiana della zona di Pisa. Provincia - Comune di Pisa: 1-59.
- Federici, P.R., Mazzanti, R., 1988. L'evoluzione della paleogeografia e della rete idrografica del Valdarno inferiore. Boll. Soc. Geogr. It. Roma, Ser. XI, Vol. V: 573-615.
- Geomath s.r.l. (G. Pizzi, U. Pizzi e A. Paolinelli) - Geoser s.c.r.l. (F. Alvarez, S. Rossi), 1994. Virgo Project - Interferometric gravitational wave detector. Study of the land subsidence of Pisa plain, south of the Arno river - Phase one.
- Grassi, S., Gianelli, G., 1994. Studies of Low-Temperature Hydrothermal Systems: San Giuliano Prospect (Pisa, Italy). Energy Sources, 16: 401-423.
- Rossi, S., Spandre, R., 1994. L'intrusione marina nella falda artesianiana in ghiaia nel litorale pisano. Acque Sotterranee, 43: 51-58.
- Segre, A., 1955. Nota sulla Idrografia continentale e marina. In: Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000, foglio 111 Livorno. Serv. geol. ital., Roma.
- Tongiorgi, M., 1978. La subsidenza nelle basse pianure dell'Arno e del Serchio. In: Atti Conv. «I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo», Pisa, 1978, Vol. 2, Pacini, Pisa: 7-14.
- Trevisan, L., Tongiorgi, E., 1953. Le acque del sottosuolo della Regione Pisana. La Provincia Pisana 9-10, Pisa.
- Vieri, L., 1996. Studio idrogeologico della Pianura di Pisa. Tesi di Laurea inedita - Università degli Studi di Firenze. Relatore F. Baldacci.

(ms. pres. il 5 settembre 2000; ult. bozze il 19 dicembre 2000)

