

BILANCIO IDROGEOLOGICO DEL BACINO VULSINO **GROUND WATER BUDGET OF THE VULSINI BASIN**

(tratto da "Geologia Tecnica & Ambientale", n°3 – Luglio/Settembre 2000)

Giuseppe Pagano, Antonio Menghini & Stefano Floris
Studio di Tecnologie per la Geologia e l'Ambiente (S.Te.G.A.)
Via Monte Bianco, 5 – 01100 Viterbo
Tel/Fax 0761/228191
email: stega@stega.it

RIASSUNTO

E' stato approntato un bilancio idrogeologico del Bacino del Lago di Bolsena, considerando due periodi trentennali, che vanno dal 1931 al 1960 e dal 1961 al 1990. In tal modo è stato possibile verificare una sostanziale modificazione degli equilibri che intercorrono tra le singole componenti del bilancio, testimoniata dall'abbassamento della superficie piezometrica e del livello lacustre, nonché dalla diminuzione delle portate naturali del F. Marta. Si tratta di manifestazioni interconnesse, che riflettono uno stato di crisi del sistema idrogeologico, le cui cause vanno ricercate nella diminuzione della ricarica naturale dell'acquifero, nell'incremento dei prelievi dal bacino idrogeologico e negli interventi artificiali sul deflusso del F. Marta. Per il futuro si prevede un ulteriore aggravamento della situazione, determinato da una più cospicua riduzione della ricarica naturale dell'acquifero in conseguenza di variazioni climatiche negative.

ABSTRACT

A ground water budget of the Vulcini Basin was performed; two periods of thirty years were considered: from 1931 to 1960 and from 1961 to 1990. By this way it was possible to verify the actual stress induced by human activities, supposing a negligible effect during the first period. Besides, the comparison of the two ground water budgets allowed to appreciate the climatic changes which were occurred, because a thirty years' interval is usually assumed as the smallest reference period to make hydrogeological valuations

Into the Vulcini Basin the following hydrogeological units crop out: lacustrine and fluvial alluvial deposits, incoherent pyroclastics, lavas, lithoid ignimbrites and volcanic-sedimentary deposits. The main aquifer is formed by volcanics and rests on a clay substratum. By an accurate piezometric survey, which included 341 points (both wells and springs) the ground water basin was drawn; this basin represents the area which recharges the Bolsena lake, by underground water yields; it has an area of about 229 Km², while the drainage basin amounts to 157 Km². If we consider also the lake, which extends to 113 Km², the ground water basin has a total area of about 342 Km².

The water resources were considered equal to the effective infiltration into the ground water basin which recharges the lake; clearly they represent a volume of water which is available only in theory, because it does not consider the present withdrawals; the real available resource is a part of the total amount, so that the lake's recharge is guaranteed.

The entrance components of the ground water budget are: direct rainfall over the lake surface (P), runoff coming from the drainage basin (R), effective infiltration into the ground water basin (I), waste waters return to the lake (R_a), irrigation waters return to

the aquifer (R_i). The exit components are: direct evaporation from the lake surface (E), underground exits from the lake (U_s), outflow by Marta River (D), withdrawals into the ground water basin (U_p). Finally we consider hydrometric (ΔL) and phreatic (ΔF) fluctuations, since they can be represent large amounts, because of the wide extension both of the lake and the aquifer.

The ground water budget of the 1931-60 period shows a substantial balance of the hydrogeological system. The water resources can be estimated equivalent to 88 millions of cubic metres/year; this amount represents the recharge of the lake during this period, in absence of withdrawals by the main aquifer. On the contrary for the 1961-90 period we can verify the break of the hydrogeological balance; this fact is testified by the ground water lowering, the negative hydrometric trend of the lake and the reduction of Marta River outflow. The water resources of this second period are equivalent to 77 millions of cubic meters/year; this decrease is due to the reduction of rainfall and to the shifting of rainfall towards summer season. If we consider also the amount of withdrawals, the real recharge of the lake drops to 62,5 millions of cubic meters/year: it represents a reduction equivalent to 29 %.

To extrapolate these values to the present situation, we must consider the persistence of the pluviometric deficit and a very probable rate of abusivism regarding the extraction statements, so that the available water resources drop to 38 millions of cubic meters: it represents a very remarkable reduction, which is equivalent to 57 %. Considering the effects registered during the 1961-90 period, when the reduction was smaller, it is obvious that the lake is not able to tolerate this situation.

For the future the problems could worsen because of further aggravating circumstances: the increase of temperatures, the persistence of negative pluviometric trend, the intensification of extraordinary rainfalls and the possible growth of withdrawals.

1. PREMESSA

Il Lago di Bolsena, il più grande dei laghi vulcanici italiani, rappresenta una delle maggiori ricchezze ambientali del Lazio; numerosi centri abitati traggono da esso sostentamento economico, utilizzandolo sia come risorsa turistica, sia come fonte di approvvigionamento idropotabile ed irriguo. Il recente manifestarsi di alcuni preoccupanti comportamenti (repentine variazioni di livello, diminuzione di portata delle sorgenti presenti nel Bacino e dell'emissario) ha indotto l'Amministrazione Pubblica (Regione Lazio e Provincia di Viterbo) ad intraprendere una serie di studi mirati a definire nel dettaglio l'assetto idrogeologico ed a far luce sui meccanismi che regolano il delicato equilibrio del sistema. La presente nota costituisce un estratto condensato dello studio idrogeologico realizzato per l'Assessorato Ambiente (Settore Tutela Acque) della Provincia di Viterbo.

Allo scopo di comprendere i rapporti che intercorrono tra i vari fattori, naturali ed antropici, che intervengono nell'equilibrio idrogeologico dell'acquifero Vulsino, sono stati predisposti due differenti bilanci, riferiti ad altrettanti periodi trentennali, che vanno dal 1931 al 1960 e dal 1961 al 1990. Nel contempo è stato possibile stimare l'entità delle risorse idriche e quindi valutare, grazie al confronto con i prelievi in atto, l'entità della pressione antropica sul sistema.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il Bacino del lago di Bolsena (o Bacino Vulsino) si inserisce all'interno del Distretto vulcanico Vulsino, il più settentrionale della Provincia vulcanica laziale, la cui attività si è esplicata attraverso più fasi, ora esplosive ora effusive, da cinque principali centri di emissione: Paleobolsena, Bolsena, Montefiascone, Latera e Neobolsena.

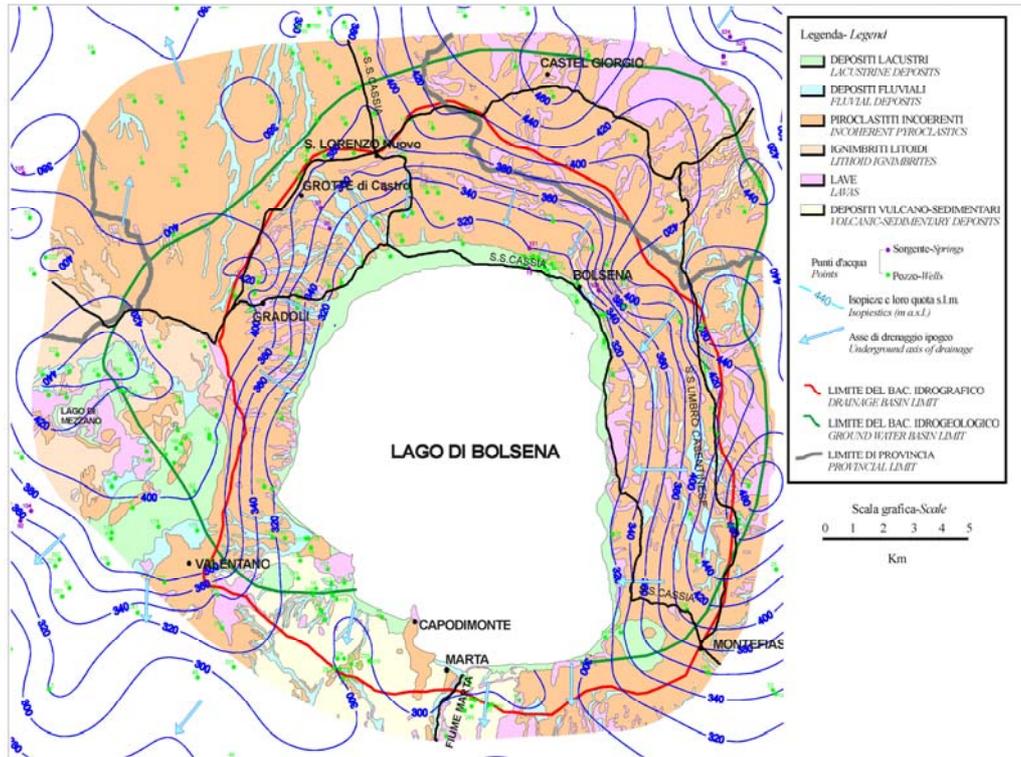
La complessa evoluzione del distretto vulcanico, ha fatto sì che in zona affiori una molteplicità di rocce, molto differenti sia dal punto di vista petrografico che granulometrico: si va dalle colate laviche agli espandimenti ignimbrici, dai coni di scorie e lapilli ai tufi argillificati. Considerate le finalità del presente studio, si è accentrata l'attenzione sulle caratteristiche idrogeologiche dei materiali, analizzando le formazioni, anche se appartenenti a centri di attività differenti, in relazione alla granulometria ed al grado di addensamento. In definitiva le numerose e differenti vulcaniti presenti nell'area, sono state accorpate in un gruppo limitato di complessi, che corrispondono ad altrettante unità idrogeologiche, caratterizzate ognuna da una permeabilità di tipo primario, per porosità, o secondario, per fessurazione, del tutto confrontabile. Lo stesso vale per le rocce di origine sedimentaria, rappresentate nella fattispecie dalle alluvioni fluviali e lacustri.

La distribuzione delle varie unità idrogeologiche è riportata nella Fig.1, costruita sulla base della Carta Geologica d'Italia, in scala 1:100.000, Fogli *Santa Fiora, Orvieto, Tuscania, Viterbo*. Nella carta è stato inserito anche il limite del bacino idrografico e di quello idrogeologico del Lago di Bolsena; sulle modalità di definizione del secondo, si rimanda al paragrafo successivo. E' pertanto possibile distinguere le seguenti unità idrogeologiche:

- Complesso delle alluvioni lacustri
- Complesso delle alluvioni fluviali
- Complesso delle piroclastiti incoerenti
- Complesso delle lave

- Complesso delle ignimbriti litoidi
- Complesso dei depositi vulcano-sedimentari

Fig.1



3. CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

Il complesso delle formazioni del Distretto Vulcanico Vulsino e delle loro facies presenta, in linea generale, una discreta permeabilità, legata tanto alla porosità delle piroclastiti incoerenti, quanto alla fessurazione degli espandimenti lavici ed ignimbritici, se pur caratterizzata da una distribuzione fortemente anisotropa. Ne deriva la presenza di un acquifero vulcanico composito, costituito da più orizzonti sovrapposti, sostenuti da variazioni di facies nell'ambito delle stesse vulcaniti, nel caso delle "falde sospese", e dal substrato sedimentario, di natura argillosa, o flyschioide, nel caso della "falda basale". Quest'ultima presenta una maggiore potenzialità, nonché una maggiore diffusione areale, e rappresenta il corpo idrico prevalentemente sfruttato dai pozzi pubblici e privati dell'intero Bacino, nonché quello che contribuisce direttamente all'alimentazione del Lago.

Le perforazioni esplorative condotte negli ultimi 30 anni da ENEL ed AGIP, finalizzate alla ricerca di forze endogene, hanno verificato la presenza di un acquifero geotermico confinato, costituito dalle formazioni carbonatiche mesozoiche soggiacenti ai complessi Liguridi, con caratteristiche marcate di termalismo e chimismo tipicamente solfato-

bicarbonato-alcalino. Le sorgenti termali come pure la presenza di depositi travertinosi sul fondo del lago, sono evidenti testimonianze di queste venute.

Lo studio idrogeologico ha interessato solamente l'acquifero vulcanico basale, essendo quello più direttamente connesso con il sistema lacustre; allo scopo di ricostruirne nel dettaglio la piezometria, sono stati censiti 341 punti d'acqua, tra pozzi e sorgenti. I livelli idrostatici si riferiscono alla Primavera-Estate 1997: si è proceduto alla loro interpolazione mediante il metodo "Minimum curvature" che si è rivelato il più idoneo, in quanto è riuscito a produrre curve isopiezometriche molto "lisciate", ma nello stesso tempo fedeli ai dati puntuali di campagna. In Fig.1 è stato riportato l'andamento delle curve isopiezometriche con equidistanza di 20 metri, insieme a tutti i punti d'acqua utilizzati.

Sulla base della geometria dell'acquifero è possibile tracciare i principali assi di drenaggio sotterraneo e gli spartiacque idrogeologici. Questi ultimi consentono di delimitare il "Bacino Idrogeologico Vulsino", ovvero l'area che alimenta, attraverso gli apporti idrici sotterranei, il lago di Bolsena. Procedendo in senso orario esso risulta chiuso in continuo fra l'estremità sud-occidentale (Capodimonte-Valentano) e l'estremità sud-orientale (Montefiascone) da una serie di spartiacque sotterranei, all'interno dei quali il flusso idrico ipogeo assume direzione centripeta. Va sottolineato che nel settore nord-occidentale dell'acquifero, l'esatta delimitazione del limite idrogeologico è resa quanto mai difficoltosa dal modestissimo gradiente idraulico della falda, per cui non è sempre agevole seguirne le "culminazioni piezometriche", nonché dalla presenza di falde sospese più superficiali talora difficilmente distinguibili dalla basale. In questo senso è necessario considerare un certo margine di approssimazione nella delimitazione del bacino, per cui è lecito attendersi discostamenti anche nell'ordine di 1 Km rispetto a quanto evidenziato. Va anche tenuto conto del fatto che, per via del modesto gradiente piezometrico, lo spartiacque idrogeologico è soggetto a migrazioni di carattere stagionale, o indotte da intense estrazioni attraverso pozzi, per cui la delimitazione del bacino così come rappresentata, deve essere intesa come condizione media.

Il limite meridionale del Bacino idrogeologico corre lungo la linea di costa, considerato che a valle di questa, la superficie piezometrica si attesta a quote inferiori ai 305 metri s.l.m. (la quota media del lago), per cui si verifica un travaso di acque sotterranee dal sistema lacustre verso il bacino del F. Marta, l'unico emissario del Lago. Le acque zenitali che s'infiltrano nei terreni posti subito a Sud di tale limite vanno ad alimentare il sistema idrogeologico del F. Marta, nonostante essi ricadano all'interno del bacino idrografico del Lago. Quest'area è stata pertanto considerata esterna al bacino idrogeologico Vulsino. Nei successivi bilanci risulterà evidente che questi terreni hanno modo di alimentare il Lago solamente attraverso il ruscellamento superficiale.

Sulla base delle suddette considerazioni la parte emersa del bacino idrogeologico presenta una superficie di circa 229 Km², mentre quella del bacino idrografico ammonta a circa 157 Km². Se consideriamo anche la superficie lacustre, pari a 113 Km², il bacino idrogeologico presenta un'area complessiva pari a circa 342 Km².

4. BILANCIO IDROGEOLOGICO

Come già anticipato, il bilancio idrogeologico è stato impostato per due periodi trentennali, che vanno dal 1931 al 1960 e dal 1961 al 1990. Non è stato possibile estendere lo studio meteorologico sino all'anno in corso, poiché a partire dal 1990, si è verificato un drammatico crollo delle rilevazioni meteorologiche ed idrografiche del territorio, soprattutto per quel che riguarda le misurazioni di portata del F. Marta. Si tratta di una situazione alla quale si dovrà porre rimedio al più presto, poiché i dati in questione sono di fondamentale importanza per una corretta ed accurata gestione e pianificazione delle risorse idriche del territorio.

Con il confronto dei due periodi suddetti, si ha la possibilità di verificare qual'è attualmente e quale è stato l'impatto delle attività antropiche sul sistema idrogeologico, partendo dal presupposto che, nel primo trentennio, la pressione antropica doveva essere irrilevante. Allo stesso tempo, il confronto dei due bilanci permette di apprezzare le eventuali modificazioni climatiche intervenute, visto che il trentennio viene normalmente assunto come il periodo minimo di riferimento per approntare valutazioni idrogeologiche a livello statistico.

Per quanto riguarda la determinazione delle risorse idriche, saranno assunte pari all'infiltrazione efficace sul bacino idrogeologico. All'equilibrio del sistema, tali quantitativi possono essere considerati equivalenti al travaso sotterraneo che va dalla falda al Lago: ipotizzando escursioni freatiche nulle, in assenza cioè di stoccaggio, l'acqua che s'infiltra in falda va, prima o poi, a raggiungere lo specchio lacustre. In tal senso è lecito associare tale grandezza alle "risorse idriche rinnovabili", le uniche che è possibile sfruttare senza il rischio di modificare i delicati equilibri idrogeologici del sistema.

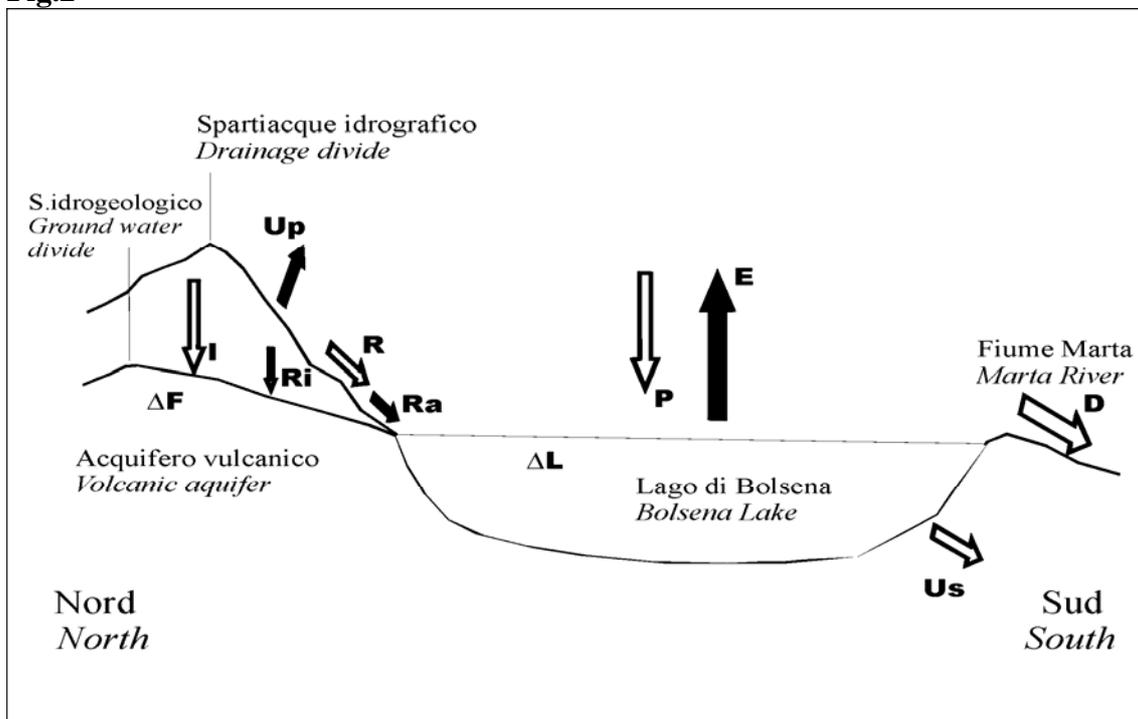
Chiaramente si tratta di un volume di acque disponibili solo in teoria, poiché esso non tiene conto delle estrazioni in atto e dell'influenza diretta che esse esercitano sulla vita del Lago, garantendone la sopravvivenza; tali quantitativi determinano infatti l'entità delle escursioni idrometriche, delle portate dell'emissario, etc. La risorsa effettivamente disponibile non potrà che essere una parte del totale, in modo da assicurare comunque l'alimentazione del Lago, ovvero un livello compatibile con scelte di tipo socio-economico. In questa sede ci si limiterà a valutare l'impatto della pressione antropica sul sistema, mettendo a confronto la risorsa idrica totale con i prelievi in atto.

In alternativa, uno degli approcci possibili di valutazione delle risorse idriche rinnovabili, potrebbe consistere nel misurare il flusso di base all'uscita del bacino idrogeologico e quindi, nello specifico, all'incile del Lago, sommandolo alle uscite sotterranee a valle dello stesso, ma tale ipotesi non è praticabile, visto che le portate del F. Marta sono collegate alla dinamica dello specchio lacustre, per cui non risentono, per lo meno direttamente, dell'apporto idrico sotterraneo, come invece avviene alla chiusura di un normale bacino imbrifero. La situazione si complica poi se si tiene conto della regolazione artificiale delle portate attraverso le paratoie, avvenuta per buona parte del trentennio 1961-90 da parte ENEL (l'Ente gestisce una piccola centrale idroelettrica derivando la portata del Fiume Marta, pochi chilometri a valle dell'incile).

Tornando all'impostazione del bilancio idrogeologico, questo è, come di norma, rappresentato da un'eguaglianza tra volumi di acque in entrata, che quindi alimentano più o meno direttamente il Lago, e volumi in uscita dallo stesso. Dato che nei due bilanci approntati sono stati considerati periodi trentennali, sembrerebbe logico trascurare l'immagazzinamento di acque in falda e nella stessa cuvette poiché, per un intervallo temporale così lungo, è lecito attendersi variazioni nulle, nel senso che le

oscillazioni positive dovrebbero essere azzerate da quelle di segno opposto. In realtà bisogna prendere atto del fatto che, viste le considerevoli dimensioni del bacino idrogeologico emerso e del Lago stesso, escursioni freatiche ed idrometriche anche di lieve entità, possono produrre ingenti volumi di immagazzinamento che possono far variare di molto l'entità delle entrate, o delle uscite, generando alternativamente condizioni di surplus, o di deficit di bilancio. A titolo di esempio si consideri che una variazione positiva del livello lacustre di appena 0,1 m si traduce in un immagazzinamento di ben 11 milioni di mc: la stessa entità si ricava, in prima approssimazione, con un'escursione unitaria della superficie piezometrica. Nel secondo caso, poiché non si dispone di alcuna serie storica di misure piezometriche, è stato impossibile valutare tale componente del bilancio, per cui si è preferito considerarla nulla.

Fig.2



Le componenti del bilancio che figurano tra le entrate sono costituite da:

- P - Piogge dirette sullo specchio lacustre
- R - Ruscellamento proveniente dal bacino imbrifero
- I - Infiltrazione efficace sul bacino idrogeologico
- R_a - Restituzione al lago di reflui
- R_i - Restituzione in falda delle acque irrigue

Le componenti in uscita sono rappresentate invece da:

- E - Evaporazione diretta dallo specchio lacustre
- U_s - Uscite in sotterraneo dal lago
- D - Uscite superficiali (deflussi) attraverso il F.Marta
- U_p - Prelievi dal bacino idrogeologico

I volumi derivanti infine dalle variazioni freatiche ed idrometriche, possono rappresentare tanto delle entrate, che delle uscite. I due valori sono rappresentati da:

- ΔL - Variazioni idrometriche
- ΔF - Variazioni freaticometriche

In definitiva l'equazione del bilancio può essere così espressa:

$$P + R + I + Ra + Ri \pm \Delta L \pm \Delta F = E + Us + D + Up$$

Lo schema della Fig.2 mostra visivamente le varie componenti del bilancio.

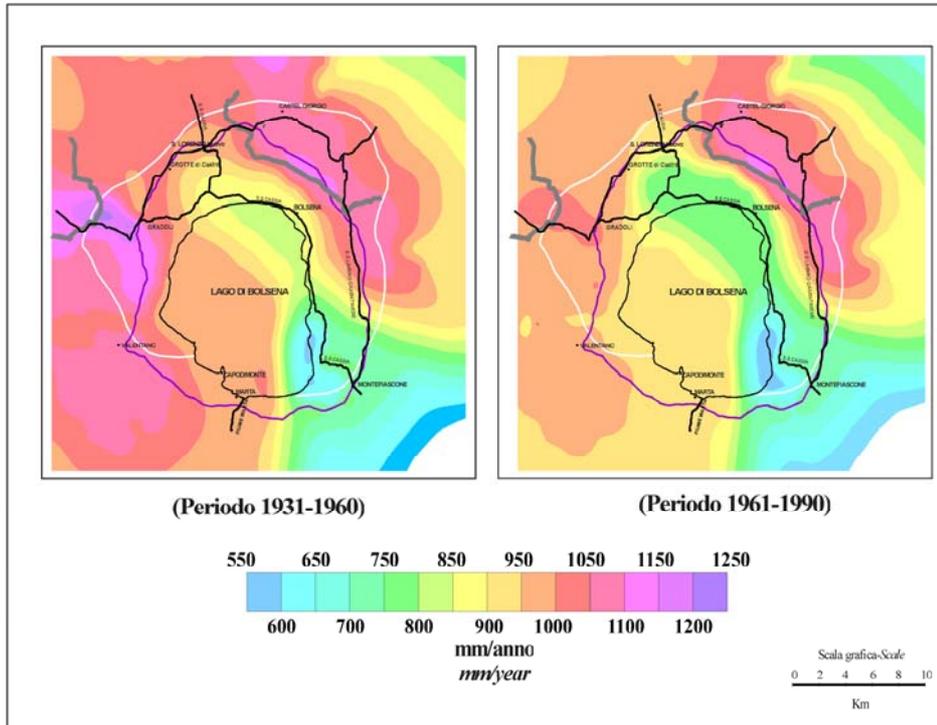
4.1. VALUTAZIONE DELLE PRECIPITAZIONI

Per ricostruire la distribuzione delle precipitazioni medie annue è stata utilizzata una tecnica, messa a punto dagli scriventi, che si basa sull'applicazione combinata del *metodo delle zone pluviometriche* e del *metodo dei pluviometri fittizi*. Il bacino del Lago di Bolsena è infatti caratterizzato da notevoli variazioni altimetriche, nonché da grandi differenze nell'esposizione dei versanti. E' opportuno quindi tener conto di entrambi i fattori nel determinare correttamente la distribuzione delle precipitazioni sul territorio. In un primo tempo quindi, sono state riconosciute le varie zone pluviometriche omogenee, caratterizzate da ben definite leggi di dipendenza tra piovosità ed altitudine. Per tale scopo sono state considerate 10 stazioni pluviometriche: Acquapendente, Bagnoregio, Bolsena, Isola Bisentina, Marta, Montefiascone, Orvieto, San Lorenzo Nuovo, Tuscania e Valentano, individuando così 3 differenti zone pluviometriche omogenee.

A questo punto, per costruire le carte delle isoiete dei due trentenni, si è fatto ricorso al metodo dei pluviometri fittizi, i quali sono stati posizionati lungo le isoipse principali, da 200 a 600 m s.l.m. Tenendo contemporaneamente conto del passaggio da una zona pluviometrica all'altra, è stato possibile ricostruire con buon dettaglio la più probabile distribuzione delle piogge nei due periodi considerati. Onde evitare un eccessivo parallelismo tra isoiete ed altimetria e variazioni troppo repentine al limite delle zone pluviometriche, è stato adottato un interpolatore che garantisse un deciso "lisciamento" delle curve (Minimum curvature), dato che le variazioni di piovosità su un vasto territorio hanno modo di esplicarsi in maniera molto graduale. In totale sono state inserite 248 stazioni fittizie, su ciascuna delle quali è stato introdotto il valore corrispondente di piovosità dedotto dalle rette rappresentative annuali. I valori mensili sono stati successivamente utilizzati per il calcolo dell'evapotraspirazione reale, di cui si riferirà nel seguito.

Il risultato delle elaborazioni è rappresentato dalle due Carte delle precipitazioni medie annue, riportate in Fig.3. Per quanto riguarda il 1931-60 è possibile riconoscere un'ampia fascia ad elevata piovosità (oltre 1000 mm/a) presente lungo tutto l'arco collinare che circonda ad Ovest, Nord ed Est il Lago di Bolsena e che può essere considerata come principale area di ricarica del Bacino. Su gran parte dello specchio lacustre si verifica una buona piovosità (tra 950 e 1000 mm/a), mentre verso la costa sud-orientale si registrano i minimi (sotto i 600 mm/a), determinati dalla presenza della 1a zona pluviometrica, più secca.

Fig.3



Se confrontiamo i dati del 1961-90 con i precedenti, si nota subito una diminuzione degli afflussi su tutto l'arco occidentale e nord-occidentale, dove si sono registrati valori di 950-1000 mm/a contro i 1000-1050 degli anni 1931-60; ciò ha chiaramente prodotto riflessi negativi sulla ricarica dell'acquifero. Anche sul Lago stesso i valori sono scesi decisamente, soprattutto lungo la costa orientale dove, a fronte degli 800-900 mm/a degli anni 1931-60, si sono registrati valori di 700-800 mm/a. L'area collinare posta a cavallo della S.S. Umbro-Casentinese presenta invece riduzioni molto più contenute. E' possibile verificare una riduzione media pari al 7 % (da 227 a 211 milioni di mc/a); va sottolineato che l'analisi dei trends pluviometrici, effettuata a partire mediamente dal 1921, mostra una diminuzione generale della piovosità annua sul Bacino Vulsino, ad un tasso variabile fra 0,4 e 3,1 mm/anno, con le riduzioni più cospicue a Bolsena (-2,4 mm/a), Orvieto (-3,1 mm/a) e Valentano (-2,0 mm/a). In concomitanza, si è osservato uno spostamento delle piogge verso i mesi estivi [PAGANO, MENGHINI & FLORIS, 1999]. Tale comportamento ha dei riflessi preoccupanti sulla ricarica delle falde, dato che in estate l'aliquota di acqua che evapotraspira è più rilevante.

4.2. VALUTAZIONE DELL'EVAPORAZIONE DAL LAGO

La valutazione dell'evaporazione diretta dallo specchio lacustre è stata effettuata tenendo conto della formula di Visentini (1938) nella sua forma annuale, l'unica in grado di produrre risultati vicini a quanto calcolato sperimentalmente attraverso evaporimetri [DRAGONI, 1992]; essa è così espressa:

$$E_a = 90 T_a$$

dove E_a = evaporazione media annua (mm/a)

e T_a = temperatura media annua (°C)

Dall'analisi meteorologica si evince che, alla quota del lago (305 m s.l.m.) la temperatura media annua è pari a circa 14°C; si deduce pertanto una evaporazione pari a 1260 mm/a, corrispondente a circa 143 milioni di mc/a. Poiché, come verrà puntualizzato nel paragrafo successivo, non vi sono state sensibili variazioni termometriche fra i due trentenni, tale valore può essere assunto tanto per il 1931-60 che per il 1961-90.

4.3. VALUTAZIONE DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE REALE

Il calcolo dell'evapotraspirazione reale presuppone la conoscenza delle temperature medie mensili. I dati del Servizio Idrografico non sono moltissimi, ma consentono comunque di ricavare una buona retta di correlazione temperatura-altitudine. Le 7 stazioni termometriche prese in esame sono: Acquapendente, Bolsena, Orvieto, Pitigliano, Santa Fiora, Tuscania e Viterbo; come si può notare, è stato necessario allargare notevolmente l'area d'indagine, in modo da coprire l'intero range altimetrico caratteristico del Bacino Vulsino (tra 300 e 600 m s.l.m.); la retta rappresentativa, relativa al periodo 1961-90, è espressa dall'equazione:

$$T = -0,0061 H + 15,874$$

Tale retta può senz'altro ritenersi valida anche per il periodo 1931-60, poiché le variazioni termometriche tra i due trentenni si sono mantenute molto basse, appena il -1 %; in effetti gli studi climatici globali mettono in luce, al più, un incremento di appena lo 0,5° C nell'arco dell'ultimo secolo.

Per calcolare le temperature medie mensili sono state ricostruite altrettante rette di correlazione, ognuna relativa a ciascun mese dell'anno. A questo punto è stato possibile applicare il metodo di Thornthwaite, che consente di calcolare accuratamente l'evapotraspirazione media mensile ed annua. A ciascuna delle stazioni fittizie già considerate per il calcolo delle piovosità, sono stati associati i valori corrispondenti di evapotraspirazione, per ciascuna fascia altimetrica e per ciascuna zona pluviometrica omogenea. Il contouring è stato realizzato sempre tramite il Minimum Curvature.

Poiché esiste un'unica retta di correlazione tra temperatura ed altitudine per tutto il territorio esaminato, risulta in genere una certa corrispondenza tra altimetria e curve di eguale evapotraspirazione, con i massimi valori di quest'ultima che si concentrano nelle aree più depresse, mentre i minimi cadono lungo i rilievi collinari.

I volumi medi evapotraspirati nei due trentenni presentano una sorprendente coincidenza (102 milioni di mc/a), a causa della compensazione tra l'aumento di evapotraspirazione nella fascia circumlacuale (determinato da uno spostamento delle piogge verso i mesi estivi) e la diminuzione nei settori nord-orientale ed orientale (provocato dalla minore piovosità). E' chiaro invece che, a livello locale, sono intervenute variazioni apprezzabili.

4.4. VALUTAZIONE DELL'INFILTRAZIONE EFFICACE

L'infiltrazione efficace è pari alla differenza tra la piovosità P e l'evapotraspirazione E (piovosità efficace), al netto del ruscellamento R

$$I = P - E - R$$

Purtroppo la valutazione diretta di quest'ultimo parametro è impossibile, poiché non sono mai state attive stazioni di misura di portata degli affluenti del Lago; fra l'altro, ciò avrebbe consentito la determinazione della ricarica solamente all'interno del bacino imbrifero, mentre sarebbe sfuggita la parte relativa alla porzione di bacino idrogeologico che si estende al di fuori del primo. Bisogna pertanto ricorrere all'uso dei coefficienti di infiltrazione potenziali (c.i.p.) che, in funzione delle sole caratteristiche geolitologiche dei terreni affioranti, determinano in maniera empirica il peso dell'infiltrazione efficace (I) nei confronti delle precipitazioni efficaci (P-E), attraverso la relazione

$$I = \text{c.i.p.} (P-E)$$

Tale determinazione non tiene conto di altri fattori, quali l'acclività, la presenza di coperture boschive, l'esposizione etc., che possono comunque influire sull'entità della ricarica; ciò lascia aperta la possibilità, oltretutto l'opportunità di un approfondimento delle tematiche coinvolte, nella prospettiva di migliorare le conoscenze idrogeologiche del Bacino con una stima più accurata dell'infiltrazione efficace.

Il valore del c.i.p. è compreso di norma tra 0,1 per terreni argillosi e 0,9 per terreni calcarei, o vulcanici fessurati: nella fattispecie si è tenuto conto delle caratteristiche di permeabilità dei complessi geolitologici precedentemente individuati, valutate attraverso l'esperienza maturata sul campo ed utilizzando dati di letteratura [CELICO, 1987]. E' stato pertanto assegnato un valore di 0,5 al Complesso delle alluvioni lacustri, delle ignimbriti litoidi e dei depositi vulcano-sedimentari; alle alluvioni fluviali ed alle piroclastiti incoerenti è stato assegnato un valore di 0,7, mentre per il Complesso delle lave si è tenuto conto di un c.i.p. pari a 0,9. Come si può notare, i valori sono comunque tipici di terreni discretamente permeabili, visto che all'interno del Bacino Vulcano non affiorano le argille Plioceniche, o i termini flyschoidi Liguridi. E' sottinteso che tali valori andrebbero verificati attraverso opportune sperimentazioni che tengano conto dell'effettiva situazione locale; ad ogni modo si ritiene che i rapporti relativi tra i vari complessi siano sufficientemente realistici.

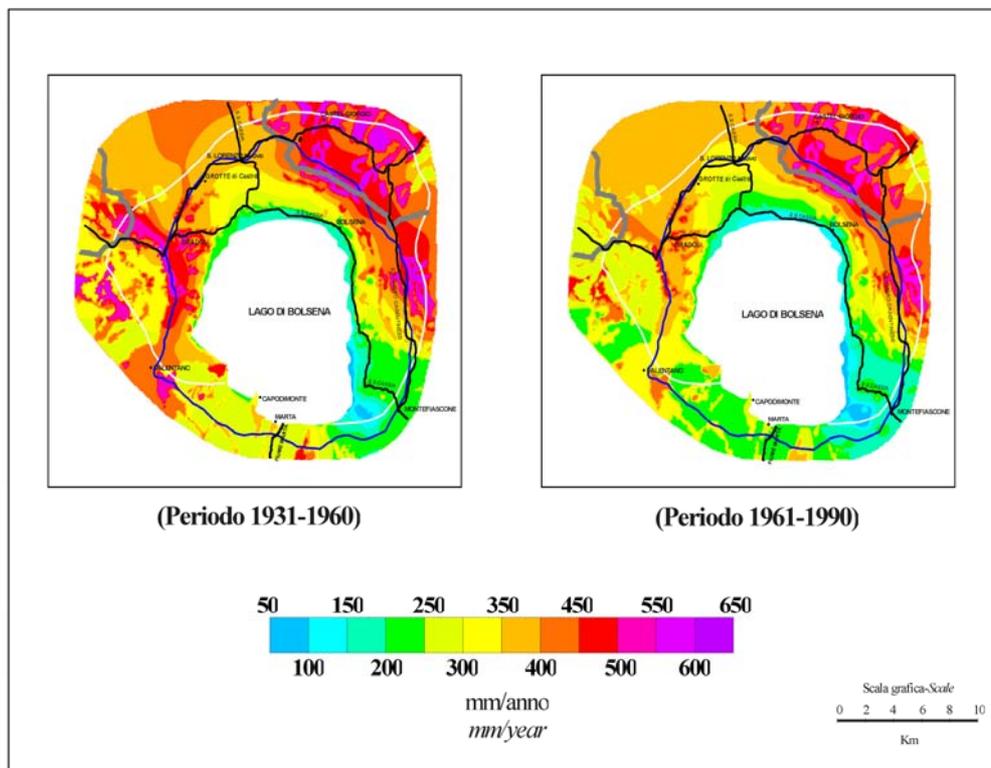
La relativa Carta di distribuzione dei coefficienti di infiltrazione potenziale è stata informatizzata, digitalizzando tutti i limiti dei complessi geologici precedentemente definiti, inserendo punti di controllo anche all'interno degli stessi affioramenti. I valori sono stati poi interpolati attraverso un gridding denominato "Triangulation w/Linear Interpolation", capace di mantenere inalterata l'effettiva distribuzione degli affioramenti; tale interpolatore, che viene di norma utilizzato nel caso si vogliano preservare linee nette di discontinuità, quali limiti geologici o faglie, fa uso dell'algoritmo di Delaunay che crea superfici triangolari congiungenti i dati di input, all'interno delle quali il valore della variabile è mantenuto costante.

I due tematismi (precipitazione efficace e c.i.p.) sono stati moltiplicati fra loro, secondo procedimenti di cartografia numerica; per ciascun nodo della maglia si ricava quindi il valore di $I = \text{c.i.p.} \times (P-E)$. Si ottiene così una distribuzione che si ritiene dettagliata e realistica dell'infiltrazione efficace, in cui vengono correlati dati meteorologici e geolitologici.

In Fig.4 sono riportate le due Carte dell'infiltrazione efficace; la scala colorimetrica permette di distinguere immediatamente le aree a maggiore infiltrazione, in pratica le principali aree di ricarica del sistema (rosso-magenta), rispetto a quelle a minore

infiltrazione (azzurro-blu). Le prime coincidono con gli affioramenti lavici presenti al margine nord-orientale della caldera di Latera e soprattutto con gli altopiani che si estendono tra Castel Giorgio e la S.S. Umbro Casentinese, dove si raggiungono picchi di 600-650 mm/a; è in questa fascia che è possibile riconoscere la principale area di ricarica del bacino Vulsino. La presenza di corpi lavici da' luogo ad un massimo di infiltrazione anche nell'area di Bisenzio e Valentano, con una ricarica media di oltre 500 mm/a. I valori minimi, al di sotto dei 300 mm/a, sono invece prevalenti su gran parte della caldera di Latera, lungo la maggior parte della fascia costiera ed al margine meridionale del bacino imbrifero; in tutti i casi si verifica la presenza di litologie poco permeabili (alluvioni lacustri e depositi vulcano-sedimentari). Si registra un minimo assoluto (<100 mm/a) all'interno della caldera di Montefiascone, per il coincidere di sfavorevoli condizioni pluviometriche e geolitologiche.

Fig.4



Per il periodo 1961-90 si registra un netto decremento dell'infiltrazione efficace nel settore occidentale e meridionale del Bacino, con abbattimenti medi di 50 mm/a. Nel settore orientale la diminuzione è invece meno evidente. Le variazioni percentuali raggiungono punte negative del 20-26 %, medie del 12,5-15 %, con le conseguenti ripercussioni sul sistema. Sull'intero bacino idrogeologico si è passati da 88 (1931-60) a 77 milioni di mc/a (1961-90).

4.5. VALUTAZIONE DEL RUSCELLAMENTO

Il ruscellamento sul bacino idrografico del Lago è stato calcolato a partire dalla differenza $R = P - E - I$. Si tratta del volume di acque superficiali che alimentano il Lago attraverso il reticolo dei suoi immissari. P, E ed I sono chiaramente i parametri riferiti al solo bacino imbrifero. Si ottengono così valori di $R = 22$ milioni di mc/a per il 1931-60, ed $R = 20$ milioni di mc/a per il 1961-90. La riduzione, pari al 9 %, è leggermente superiore a quella registrata per gli afflussi meteorici, testimoniando comunque di una evidente dipendenza tra le due quantità.

4.6. VALUTAZIONE DELLE USCITE SUPERFICIALI

Le uscite superficiali dal Lago sono rappresentate dai deflussi del suo unico emissario, il F. Marta. I dati di portata dei due trentenni esaminati, sono stati ricavati dalla stazione idrometrica di Ponte Cartiera, ubicata a breve distanza dall'incile, intorno a quota 299 m s.l.m. A partire dal 1986 è stato necessario far uso di dati non ufficiali, forniti dall'ENEL, in quanto il Servizio Idrografico non ne ha più raccolti.

Se prendiamo in considerazione solamente i dati pubblicati dal Servizio Idrografico, possiamo valutare una portata media di circa 2,49 mc/s ed un indice del flusso di base (rapporto tra la portata del mese di massima magra e la portata media) molto alto, pari a 0,76 [BONI ET ALII, 1993], che testimonia di un regime stagionale del corso d'acqua abbastanza uniforme. Ciò è determinato dall'inerzia della massa d'acqua del Lago e dall'esiguità della sezione di uscita, che attenuano le variazioni rapide dovute allo scolamento del bacino imbrifero ed agli effetti più lenti della ricarica sul bacino idrogeologico. Il tutto garantisce quindi un buon deflusso anche nei periodi secchi. Ne deriva un flusso di base apparente mediamente di 0,95 mc/s, chiaramente influenzato dagli effetti del bacino lacustre sopra evidenziati, per cui non può essere assunto pari al solo apporto delle acque sotterranee.

A partire poi dagli anni '60, bisogna tener conto della regimazione artificiale del deflusso, effettuata dall'ENEL per garantire il minimo di portata necessario al funzionamento della centrale idroelettrica di S. Savino, per cui i dati di portata non possono più essere assunti come naturali. Se infatti confrontiamo i deflussi medi annui dei due trentenni considerati, otteniamo una media di 65 milioni di mc/a per il 1931-60, contro un valore di 80 milioni di mc/a per il 1961-90: l'incremento registrato, pari al 23 %, non è determinato da fattori naturali, visto che la ricarica sul bacino idrogeologico è diminuita del 12,5 %. L'acqua in più è stata fornita dal Lago, tanto è vero che esso ha registrato una diminuzione sostanziale dei livelli, come verrà meglio specificato nel seguito.

Va sottolineato che dopo il 1995, a partire dal momento in cui non si è più regolato artificialmente il regime del F. Marta, si è assistito ad una rapida e progressiva diminuzione del deflusso sino a toccare minimi di 0,6 mc/s.

4.7. VALUTAZIONE DELLE USCITE SOTTERRANEE

Le uscite sotterranee dal Lago hanno modo di manifestarsi lungo la costa meridionale, come si può dedurre dalla Fig.1, in una fascia di circa 8 Km di larghezza, attraverso la quale le acque del Lago hanno modo di defluire verso il bacino del F. Marta. La determinazione delle quantità defluenti è molto complicata, poiché mancano dati di trasmissività dell'acquifero lungo il settore interessato. Si può far comunque ricorso ad una stima indiretta della stessa, adottando un valore medio di permeabilità $k = 1 \times 10^{-4}$ m/s, valido per buona parte dell'acquifero vulcanico, ed uno spessore dell'acquifero $h = 200$ m, valutabile sulla base di dati strutturali; si deduce pertanto un valore di trasmissività $T = k h$, pari a 2×10^{-2} m²/s. Introducendo a questo punto il valore del gradiente idraulico della falda ($i = 0,5 \%$) e la larghezza del settore ($L = 8$ Km) è possibile stimare un'uscita sotterranea pari a:

$$Q = T L i = 2 \times 10^{-2} \times 8000 \times 0,005 = 0,8 \text{ mc/s} = 25 \text{ milioni di mc/a}$$

Si tratta chiaramente di un valore molto approssimato, che necessita di verifiche dirette, particolarmente in ordine alla trasmissività, attraverso prove di portata da pozzo. Tale valore è stato considerato invariante per i due trentenni esaminati, poiché si dispone di dati poco dettagliati sulla piezometria del passato, limitati a pochi studi condotti, fra l'altro, a livello regionale. Si ha comunque motivo di ritenere che le variazioni siano state molto contenute, essendo tali anche le possibili modificazioni del gradiente idraulico.

4.8. VALUTAZIONE DEI PRELIEVI

La valutazione dei prelievi d'acqua dal Bacino idrogeologico nei due trentenni, componente essenziale del bilancio, ha rappresentato un momento particolarmente delicato dello studio, che nella maggioranza dei casi ha condotto a stime perfettibili, ma sufficientemente attendibili nell'ottica delle finalità perseguite. Per il 1931-60 si è supposto un prelievo di entità trascurabile; in effetti le estrazioni per uso potabile, irriguo, per non parlare poi del domestico, sono state sicuramente modeste, soprattutto nei confronti della falda di base che alimenta il Lago. L'utilizzo infatti di piccole sorgenti e di pozzi "alla romana", sempre di modesta profondità, andava ad intaccare, se mai, il sistema idrogeologico delle falde sospese. In termini comunque quantitativi, l'incidenza dei prelievi sul bilancio può quindi assumersi nulla.

Per il periodo 1961-90 è stato assunto un prelievo medio annuo pari alla metà dell'attuale, ipotizzando quindi un valore trascurabile all'inizio del trentennio ed una crescita costante ed uniforme lungo l'intervallo considerato.

Per stimare l'entità dei prelievi attuali, sia pubblici che privati, si è ricorsi, nel primo caso, alla raccolta diretta dei dati forniti dalle Amministrazioni pubbliche, mentre nel secondo si è proceduto ad un accurato lavoro di verifica delle denunce di prelievo presentate alla Banca dati dell'Amministrazione provinciale di Viterbo. Le tematiche oggetto di verifica sono costituite essenzialmente:

1. dalla selezione delle denunce riferite al territorio individuato come Bacino idrogeologico Vulsino,
2. dal numero effettivo dei prelievi in atto, deducibili dal complesso delle denunce, escludendo quelle reiterate e recuperando le omesse,
3. dalla corretta referenziazione topografica dei prelievi,
4. dalla valutazione, quanto più esatta possibile, degli effettivi volumi prelevati, a partire dai dati dichiarati.

Tutte le operazioni sono state effettuate al calcolatore, mediante programma Access, proponendo una serie successiva di “query” circostanziate. Il Bacino idrogeologico Vulsino comprende anche aree ricadenti nei Comuni di Orvieto (TR), Castel Giorgio (TR) e Sorano (GR); a causa della notevole profondità della falda, che condiziona fortemente i costi di escavazione, in queste aree extra-provinciali sono presenti pochissimi pozzi, per cui la densità di prelievo è molto modesta, e quindi facilmente ricostruibile.

Le captazioni pubbliche portano quasi sempre il valore del prelievo specifico oltre i 200.000 mc/a x Km². Si riconoscono così ampie zone di intenso sfruttamento lungo lo spartiacque sotterraneo settentrionale, tanto verso S. Lorenzo Nuovo che verso Castel Giorgio. Esse investono le aree di ricarica del bacino Vulsino e del bacino del F. Paglia. La situazione si fa più critica anche nella piana di Latera, lungo la S.S. Umbro-Casentinese e nei pressi di Bolsena, sempre per effetto di estrazioni pubbliche. In definitiva è possibile notare una maggiore pressione antropica nel settore occidentale e in quello settentrionale del bacino Vulsino.

Sulla base delle suddette valutazioni, è possibile stimare, relativamente all’anno 1997, un prelievo complessivo di circa 29 milioni di mc/a. La seguente tabella mostra nel dettaglio i volumi, espressi in milioni di mc, dedotti per tipologia di prelievo:

	PRELIEVI PUBBLICI	PRELIEVI PRIVATI	TOTALI
USO IDROPOTABILE	12,5		12,5
USO IRRIGUO	4,5	9,8	14,3
USO DOMESTICO		2,3	2,3
TOTALI	17	12,1	29,1

Nel bilancio del 1961-90 verrà tenuto conto di un prelievo medio annuo pari a 14,5 milioni di mc (50 % dell’attuale), ipotizzando pertanto una crescita lineare nel corso del periodo esaminato.

4.9. VALUTAZIONE DEL RITORNO AL LAGO DEI REFLUI

Tra le entrate del sistema idrogeologico, va considerata anche la restituzione dei prelievi pubblici sotto forma di reflui; essa è stata assunta pari al volume delle acque reflue scaricate nel Lago. Secondo i dati forniti dal CO.BA.L.B., il volume scaricato attualmente dai Comuni di Bolsena, Gradoli, Grotte di Castro, Montefiascone, San Lorenzo Nuovo e Valentano, è di circa 2 milioni di mc/a. Tenuto conto del fatto che mancano i Comuni di Marta e Capodimonte, ma che la produzione giornaliera di reflui negli anni ‘60-’70 doveva essere senz’altro minore, si è ritenuto opportuno considerare una riduzione del 50 % sugli attuali, così come è stato fatto per i prelievi.

Per il trentennio 1931-60 la restituzione dei reflui può invece ritenersi senz’altro trascurabile, a fronte di prelievi pubblici di modestissima entità.

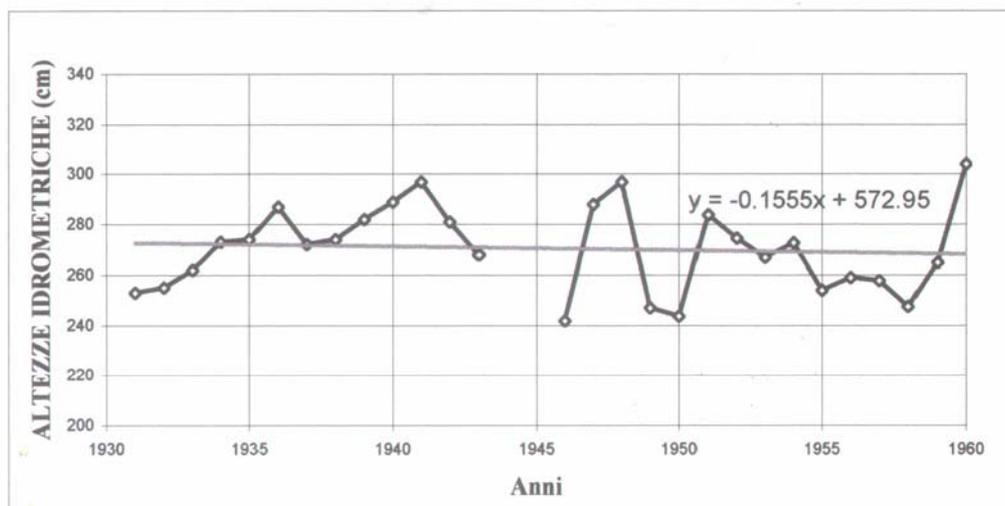
4.10. VALUTAZIONE DEL RITORNO DELLE ACQUE IRRIGUE

Per i prelievi irrigui è lecito attendersi un ritorno, se pure parziale, in falda; questo, se pure differito nel tempo e di lieve entità, può incidere in qualche misura sulla ricarica del sistema. La valutazione della percentuale di restituzione non è però affatto agevole, poiché esistono opinioni molto discordanti in merito: si passa da valori massimi del 60 % [BERETTA ET ALII, 1985], sino a minimi del 22-45 % [SOTTANI ET ALII, 1982]. Considerato che la maggior parte degli impianti utilizzati è del tipo a pioggia e che l'irrigazione è praticata nei mesi più caldi, quando l'evapotraspirazione è massima, si è preferito adottare i valori più bassi, considerando una restituzione media del 30 %. Tenuto conto di un prelievo irriguo medio annuo, per il 1961-90, di 7 milioni di mc/a, pari alla metà di quello attuale, si deduce una restituzione di circa 2 milioni di mc/a. Per il trentennio 1931-60, in mancanza di prelievi irrigui consistenti, si è considerata nulla la restituzione in falda.

4.11. VALUTAZIONE DELLE VARIAZIONI IDROMETRICHE

Le osservazioni idrometriche giornaliere raccolte sugli Annali del Servizio Idrografico, sia alla stazione di Bolsena (quota 301,533 m s.l.m.) che di Marta (301,683 m s.l.m.), hanno permesso di ricostruire le oscillazioni del livello lacustre in un ampio intervallo temporale che va dal 1930 al 1990; per il periodo 1991-1995 sono stati utilizzati dati ancora non pubblicati, gentilmente concessi dall'ENEL. Accentrando l'attenzione sulla stazione di Bolsena, che presenta il maggior numero di dati, si registra un'altezza media di 279 cm, mentre le oscillazioni massime si sono verificate, in senso negativo, nel 1946 (242 cm) e nel 1995 (243,5 cm); i valori massimi sono stati invece registrati nel 1963 (312 cm) e nel 1965 (311 cm). Le escursioni medie annue presentano pertanto variazioni di circa 60-70 cm.

Fig.5

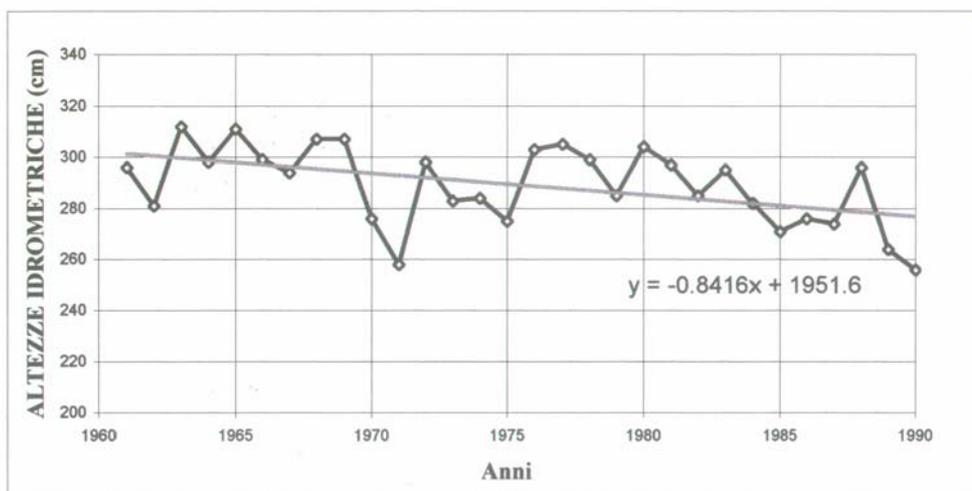


La Fig.5 riporta il dettaglio delle altezze idrometriche medie annue registrate alla stazione di Bolsena nell'intervallo 1931-60: la relativa retta di regressione mostra il mantenimento di una situazione di equilibrio, con una modestissima riduzione del livello, valutabile complessivamente in appena 4,7 cm, che corrisponde ad una variazione di circa 0,17 milioni di mc/a, senz'altro trascurabile nell'impostazione del bilancio. Il valore medio dell'altezza idrometrica si attesta intorno ai 270 cm.

Al contrario, per il trentennio 1961-90 (Fig.6) si registra un trend decisamente negativo, anche se i valori medi dell'altezza idrometrica sono più elevati (circa 289 cm); quest'ultimo fatto mostra un innalzamento assoluto del Lago, determinato dalle abbondanti precipitazioni del 1960. Al termine del trentennio si è comunque verificato un abbassamento totale di oltre 25 cm, che ha comportato il rilascio medio di circa 1 milione di mc/a.

Indubbiamente si assiste quindi ad una rottura dell'equilibrio idrogeologico del sistema, le cui cause verranno esaminate nel seguito.

Fig.6



4.12. BILANCIO PER IL PERIODO 1931-60

Come già accennato, il trentennio 1931-60 può essere assunto in prima approssimazione come l'intervallo temporale nel quale la pressione antropica è stata pressoché trascurabile. Il bilancio idrogeologico di questo periodo rappresenta quindi una preziosa opportunità per valutare i rapporti tra le varie componenti, in condizioni sostanzialmente "naturali".

Sostituendo nell'equazione di bilancio

$$P + R + I + Ra + Ri \pm \Delta L \pm \Delta F = E + Us + D + Up$$

i valori precedentemente calcolati, si ricava:

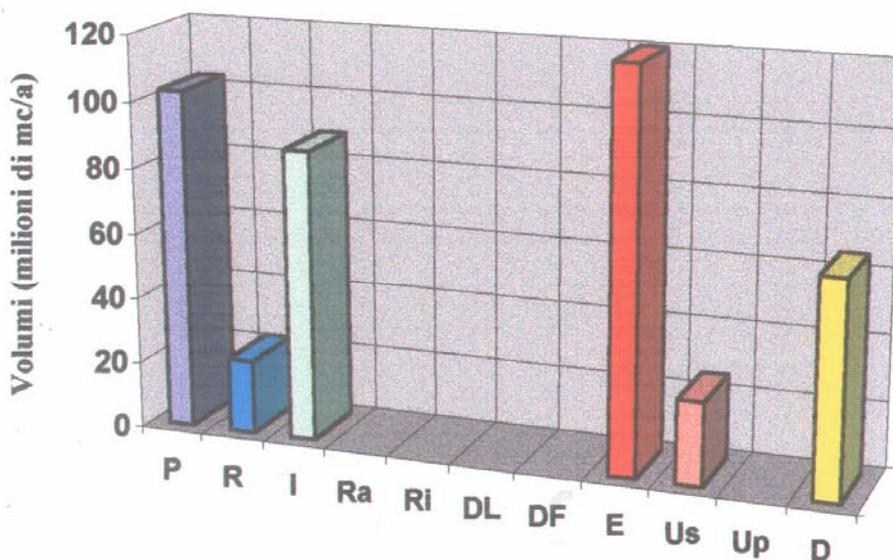
$$103 + 22 + 88 + 0 + 0 + 0 + 0 = 143 + 25 + 65 + 0$$

$$213 = 233$$

Ne consegue un deficit pari a 20 milioni di mc/a; si tratta di poco meno del 9% che si può far rientrare nei limiti di approssimazione del problema, al di sotto di quel 10 % di

norma ammesso nell'impostazione di un bilancio idrologico. Il blocco-diagramma della Fig.7 mostra quali sono i rapporti percentuali tra le varie componenti del bilancio: tra le entrate predomina nettamente la piovosità diretta sullo specchio lacustre (48 %), subito seguita dall'alimentazione da parte della falda (41 %). Il peso delle acque superficiali, provenienti dai piccoli immissari, è invece molto più modesto (11 %), evidenziando la buona capacità di infiltrazione attraverso i terreni affioranti all'interno del bacino idrografico. Le variazioni del livello lacustre hanno un'incidenza nulla, testimoniando una condizione pressoché di equilibrio del sistema; è lecito pertanto far coincidere le risorse idriche rinnovabili con l'infiltrazione efficace sul bacino idrogeologico.

Fig.7



Le singole componenti appaiono sostanzialmente ben calcolate, compatibili con l'equilibrio idrogeologico del sistema: è possibile quindi assumere $I = 88$ milioni di mc/a, pari a circa 2790 l/s, come entità delle risorse idriche. Questa è la quantità di acque sotterranee che è andata ad alimentare il Lago nel periodo 1931-60 in assenza, praticamente, di prelievi.

Passando invece ad esaminare le uscite, balza subito agli occhi il peso preponderante dell'evaporazione diretta dallo specchio lacustre (61 %). Si noti che il volume è di molto superiore a quello derivante dalle precipitazioni, per cui è evidente la stretta dipendenza del Lago dagli apporti sotterranei: in mancanza di questi il Lago sarebbe destinato rapidamente a scomparire. Il deflusso dall'emissario rappresenta un'altra importante aliquota delle uscite (28 %), mentre quelle sotterranee appaiono più modeste (11 %).

4.13. BILANCIO PER IL PERIODO 1961-90

Questo trentennio è caratterizzato dal marcato incremento demografico e produttivo della Provincia, per cui il bilancio deve necessariamente risentire degli effetti dei prelievi. Il progressivo sviluppo di tecniche di perforazione sempre più efficaci, ha consentito inoltre lo sfruttamento sostanziale della falda di base. L'equazione del bilancio può essere così espressa:

$$\begin{aligned} P + R + I + Ra + Ri \pm \Delta L \pm \Delta F &= E + Us + D + Up \\ 96 + 20 + 77 + 1 + 2 + 1 + 0 &= 143 + 25 + 80 + 14,5 \\ 197 &= 262,5 \end{aligned}$$

Il deficit che ne consegue è notevolissimo, pari a 65,5 milioni di mc/a, valore decisamente superiore all'errore accettabile. In definitiva è uscita dal sistema più acqua di quanta ne sia entrata. L'unica voce del bilancio imposta a priori per mancanza di dati sperimentali, è il quantitativo di acque legato alle escursioni freatiche ΔF ; d'altro canto l'acqua in difetto dovrebbe essere stata fornita proprio da un abbassamento piezometrico della falda visto che, sulla base del bilancio precedente, la modalità di valutazione delle altre componenti appare quantomeno affidabile. Le nuove voci che compaiono nel bilancio 1961-90 (restituzione delle acque reflue ed irrigue) non appaiono certamente in grado, per la loro esiguità, di pareggiarlo. Lo stesso vale per l'eventuale apporto della falda termale che alimenta le sorgenti sommerse.

Per rientrare quantomeno entro l'errore del 10 % sarebbe necessario ipotizzare $\Delta F = 40$ milioni di mc/a, corrispondente ad un abbassamento della superficie piezometrica di circa 3,6 metri, valore compatibile con le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, che presenta di norma escursioni stagionali nell'ordine del metro, o poco meno. L'abbassamento della superficie piezometrica potrebbe del resto spiegare la notevole diminuzione di portata verificatasi in alcune delle più importanti sorgenti dell'area Vulsina (Fontane, Le Vene, Schiavo e Barano).

Introducendo il suddetto valore di ΔF , il bilancio può essere così scritto:

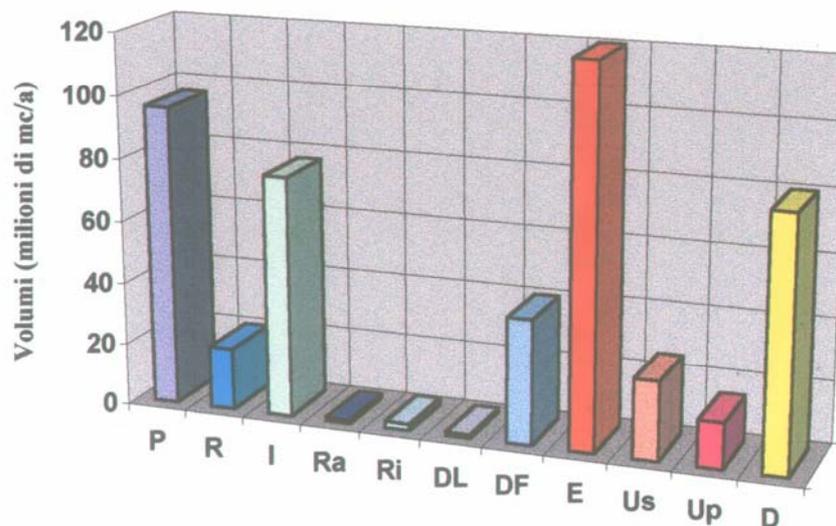
$$\begin{aligned} 96 + 20 + 77 + 1 + 2 + 1 + 40 &= 143 + 25 + 80 + 14,5 \\ 237 &= 262,5 \end{aligned}$$

Il deficit risulta così di 25,5 milioni di mc/a, chiaramente entro i limiti di approssimazione per i quali è stato imposto a priori.

Il blocco-diagramma di Fig.8 mette in luce i rapporti percentuali tra le varie componenti. Si ribadisce il peso preponderante, tra le entrate, delle piogge dirette sul Lago (41 %) e dell'infiltrazione efficace (33 %); subito dopo compare il ruolo determinante, per questo trentennio, delle variazioni freatiche (17 %), che si sono prodotte per mantenere in equilibrio il sistema. Tale quantitativo è stato inserito, per motivi di bilancio, tra le entrate, poiché si tratta di nuovi volumi generati dal sistema indipendentemente dalle vicissitudini meteorologiche e che comunque vanno ad alimentare il Lago; è opportuno però sottolineare che si tratta di acque sottratte all'acquifero e che quindi si configurano a tutti gli effetti come "perdite". Il peso del ruscellamento si mantiene su valori medio-bassi (8 %), mentre la restituzione di reflui verso lo specchio lacustre e delle acque di irrigazione verso la falda pesano pochissimo, incidendo complessivamente sulle entrate per poco più dell'1 %.

Se prendiamo in considerazione le uscite, si conferma il ruolo predominante dell'evaporazione (55 %), subito seguita dal cospicuo deflusso sul F. Marta (30 %). Rispetto al bilancio precedente compaiono in maniera incisiva i prelievi (5 %), comunque inferiori alle uscite sotterranee (10 %).

Fig.8



A differenza del bilancio del 1931-60, il sistema non appare in equilibrio, come testimoniato efficacemente dalla cospicua variazione freaticometrica e dal trend negativo del livello lacustre, per cui è errato ipotizzare il completo travaso delle acque di infiltrazione verso il Lago: la risorsa teoricamente disponibile è stata influenzata dai prelievi.

Ammissa comunque la corretta impostazione dei vari termini, l'entità della risorsa può assumersi nel valore di $I = 77$ milioni di mc/a (circa 2440 l/s); la marcata diminuzione rispetto al periodo 1931-60, pari al 12,5 %, è stata determinata dalla minore piovosità e da una maggiore evapotraspirazione, quest'ultima legata ad uno spostamento delle precipitazioni verso la stagione estiva.

A questo punto si può confrontare il valore sopra calcolato con il prelievo medio dal Bacino, pari a 14,5 milioni di mc/a, che rappresenta il 19 % delle risorse. Tale quantitativo, sottratto alla risorsa teoricamente disponibile, fornisce la reale alimentazione sotterranea del Lago: sono arrivati così 62,5 dei 77 milioni di mc/a forniti dalla ricarica naturale (si è tenuto conto del ritorno in falda delle acque irrigue). Rispetto al periodo 1931-60 il decremento reale delle risorse idriche, al netto quindi dei prelievi, è valutabile in un 29 %; è come dire che al Lago è mancato quasi un terzo della sua alimentazione sotterranea.

Ciò trova conferma diretta nella diminuzione del livello lacustre e dei deflussi "naturali" sul F. Marta (le portate misurate alla stazione di Ponte Cartiera sono artificialmente "gonfiate" dagli interventi sulle paratoie), avvalorando quanto già sopra ipotizzato in relazione agli abbassamenti del livello piezometrico. Il processo a catena così innescato, ha via via influito negativamente sull'equilibrio del sistema, nel quale la regimazione

forzata del F. Marta si può considerare un'aggravante. La causa principale va invece ricercata nei prelievi attuati sul bacino idrogeologico, il cui effetto si è sovrapposto pesantemente al deficit pluviometrico.

4.14. ESTRAPOLAZIONE ALLA SITUAZIONE ATTUALE E FUTURA

Per calare le valutazioni idrogeologiche sin qui effettuate sul periodo attuale, è opportuno tener conto di due fattori che non sono stati finora considerati e che tendono ad aggravare il quadro complessivo:

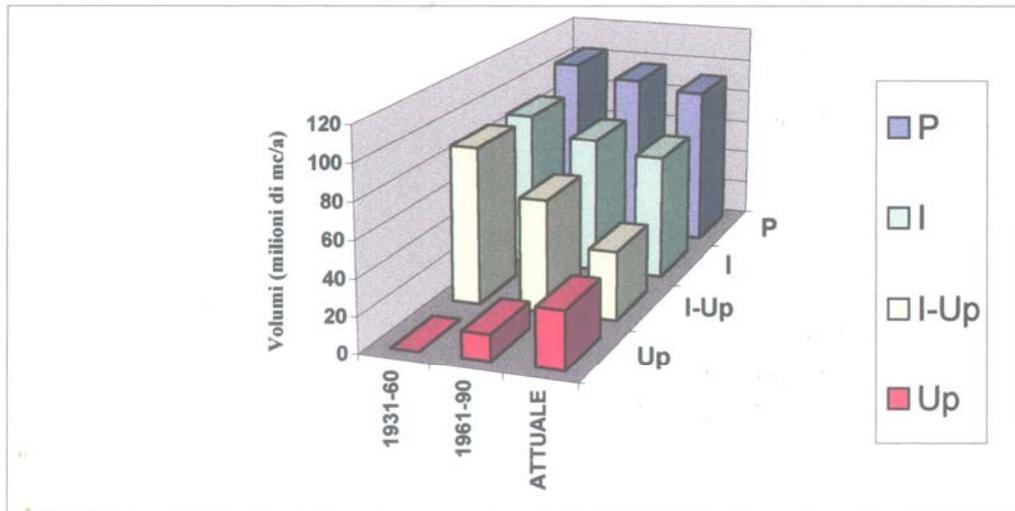
- il perdurare di condizioni meteorologiche sfavorevoli; esse hanno determinato un'ulteriore diminuzione delle piogge e quindi dell'infiltrazione efficace, tra il 1990 ed il 1998. Partendo da un decremento medio del 5 %, ed ipotizzando una corrispondente diminuzione dell'infiltrazione efficace del 9 % (si è mantenuto lo stesso rapporto che intercorre tra le diminuzioni percentuali della ricarica e delle piogge, così come deducibile dal confronto dei due trentenni), da 77 dovremmo scendere a 70 milioni di mc/a (2220 l/s).

- la sottostima dei prelievi, soprattutto di quelli privati; se si tiene conto di un probabile tasso di abusivismo nel prelievo privato pari al 25 % del totale (circa 3 milioni mc/a), valore forse sottostimato, ecco che il peso delle estrazioni totali dal Bacino (32 milioni di mc/a) sale al 46 % delle risorse. Pertanto, dei 70 milioni di mc/a disponibili, solo 38 milioni andranno effettivamente ad alimentare il Lago.

In altre parole l'attuale pressione antropica incide pesantemente sulle risorse del Bacino Vulsino sottraendo al Lago, in una prospettiva realistica, quasi la metà della sua alimentazione sotterranea, con ripercussioni sul sistema decisamente maggiori di quelle evidenziate per il periodo 1961-90, allorché in presenza di una diminuzione dell'alimentazione sotterranea del Lago più contenuta (29 %), già si verificava una sostanziale rottura dell'equilibrio idrogeologico. In effetti, nell'intervallo 1991-1998, si è registrato un ulteriore abbassamento del livello medio lacustre ed il conseguente decremento di portata del F. Marta.

Nella Fig.9 è riportato un blocco-diagramma che sintetizza i risultati ottenuti; in esso sono rappresentate le variazioni intervenute sulle piogge che cadono direttamente sul lago (P), sull'infiltrazione efficace all'interno del bacino idrogeologico (I), sui prelievi (Up) e sulle risorse idriche disponibili (I-Up). Queste ultime presentano così una diminuzione preoccupante, molto più accentuata di quella che si verifica per l'infiltrazione efficace: dal 1931-60 ad oggi si è passati da 88 a 38 milioni di mc/a, una riduzione del 57 %.

Fig.9



Passando ad ipotizzare scenari futuri, bisogna tener conto di ulteriori fattori penalizzanti: l'innalzamento delle temperature, a causa del ben noto "effetto serra", il perdurare del trend pluviometrico negativo e l'intensificarsi degli eventi piovosi eccezionali, con precipitazioni giornaliere che sempre più spesso raggiungono valori prossimi alla metà della piovosità media mensile; quest'ultima condizione provoca e provocherà un aumento del ruscellamento, a discapito dell'infiltrazione nel sottosuolo. Va infine sottolineato che sono stati volutamente ignorati ulteriori incrementi dei prelievi dal Bacino, che al tasso di crescita attuale risulterebbero, a parere degli scriventi, del tutto incompatibili con il sistema.

5. CONCLUSIONI

Sulla base del confronto tra i bilanci idrogeologici effettuati per i periodi 1931-60 e 1961-90, è possibile riconoscere una sostanziale modificazione degli equilibri che intercorrono tra le singole componenti del Bacino Idrogeologico Vulsino. Gli “effetti” di tale modificazione sono testimoniati da:

- 1) abbassamento della superficie piezometrica
- 2) abbassamento del livello lacustre
- 3) diminuzione delle portate “naturali” del F. Marta

Si tratta di manifestazioni interconnesse, che riflettono uno stato di crisi del sistema idrogeologico, le cui “cause” vanno ricercate:

- a) nella diminuzione della ricarica naturale dell’acquifero,
- b) nell’incremento dei prelievi dal bacino idrogeologico,
- c) negli interventi artificiali sul deflusso del F. Marta.

Per il futuro è prevedibile un ulteriore aggravamento della situazione, determinato da una più cospicua riduzione della ricarica naturale dell’acquifero, in conseguenza di variazioni climatiche sfavorevoli, attese sulla base dei trends in atto.

Le future politiche di gestione delle risorse idriche dovranno tener conto della stretta interdipendenza tra i fattori citati, per cui l’entità delle estrazioni dovrà comunque essere compatibile con un livello minimo del Lago, imposto da esigenze di ordine socio-economico ed ambientale, che non possono prescindere oltretutto dalla sopravvivenza del F. Marta attraverso la garanzia di un deflusso minimo vitale.

BIBLIOGRAFIA

- 1) BERETTA G.P., CAVALLIN A., FRANCANI V., MAZZARELLA S. & PAGOTTO A. (1985) - *Primo bilancio idrogeologico della Pianura Milanese. Acque Sotterranee*, **3**.
- 2) BONI C., PETITTA M., PREZIOSI E. & SERENI M. (1993) - *Genesi e regime di portata delle acque continentali del Lazio*. C.N.R. Uff. Pubblicazioni e Informazioni Scientifiche, Roma.
- 3) CELICO B. (1986) - *Prospezioni idrogeologiche. Vol. I*. Liguori Editore, Napoli.
- 4) CELICO B. (1987) - *Piano di Bacino del fiume Fiora. Studio idrogeologico preliminare*. VAMS Ingegneria s.r.l., Roma.
- 5) CELICO B. (1988) - *Prospezioni idrogeologiche. Vol. II*. Liguori Editore, Napoli.
- 6) DRAGONI W. & VALIGI D. (1992) - *Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia centrale*. Univ. degli studi di Perugia.
- 7) MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1900-1990) - *Annali idrologici (parte I e II)*. Pubbl. Serv. Idrografico, Sezione di Roma.
- 8) NAPPI G., RENZULLI A., SANTI P. & GILLOT P.Y. (1995) - *Geological evolution and geochronology of the Vulsini Volcanic District (central Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., **114**, Roma.
- 9) PAGANO G., TAMANTINI S., BRUTI G. (1982) - *Il complesso idrogeologico pulsino*. Rivista di Ingegneria Sanitaria nn°4-5-6.
- 10) PAGANO G. (1984) - *Osservazioni e considerazioni su un tentativo di bilancio integrale del Bacino idrogeologico vulsino*. C.A.A.V. Viterbo, rapporto interno.
- 11) PAGANO G. (1998) - *Problematiche relative al Lago di Bolsena ed al suo bacino idrogeologico*. Atti della Giornata di studio "Uso e tutela delle acque sotterranee", Viterbo 3 Aprile 1998. Union Printing, Viterbo.
- 12) PAGANO G., MENGHINI A. & FLORIS S. (1999) - *Problematiche relative al Lago di Bolsena ed al suo bacino idrogeologico*. Acque Sotterranee, **62**.
- 13) SOTTANI N., PRETTO L. & MARCOLONGO B. (1982) - *Gli acquiferi nella pianura a nord di Vicenza*. Az. Ind. Munic. Vicenza - C.N.R. Padova.