

C. BONI (*) - P. BONO (*) - G. CALDERONI (**)
S. LOMBARDI (*) - B. TURI (**)

INDAGINE IDROGEOLOGICA E GEOCHIMICA
SUI RAPPORTI TRA CICLO CARSIKO E CIRCUITO
IDROTERMALE NELLA PIANURA PONTINA
(LAZIO MERIDIONALE) (***)

RIASSUNTO

Sono state esaminate le relazioni tra le condizioni geologiche, idrogeologiche e geochimiche nella Pianura Pontina (Lazio Meridionale). Sulla base dei dati geologici e geofisici disponibili e di appositi rilevamenti di terreno è stata schematizzata la più probabile situazione strutturale nell'area considerata. Il motivo strutturale di maggiore interesse si trova in corrispondenza del graben pontino dove una discontinuità tettonica attiva dal Mesozoico fino al Quaternario recente, separa il margine occidentale della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese dai depositi di transizione di facies Sabina, sepolti sotto la copertura plio-quadernaria in corrispondenza della fascia costiera.

In corrispondenza delle strutture carbonatiche lepino-ausone si trova un imponente acquifero carsico che alimenta, con una portata media annua di oltre 17 m³/s, le sorgenti pedemontane allineate ai margini nord-orientali della pianura. Nel reticolo di fratture del graben e nelle strutture sepolte di facies Sabina è stato invece individuato un circuito idrotermale di acque con forte carica gassosa, elevati tenori di cloruri alcalini, di stronzio, di fluoro; un'abbondante presenza di solfati colloca le acque molto in prossimità della saturazione rispetto al gesso ed all'anidride. Le acque dei due cicli emergono in superficie dopo essersi in varia misura miscelate.

È stato accertato attraverso l'analisi isotopica che le acque del ciclo idrotermale sono di origine meteorica e che hanno tempi di residenza che possono superare almeno alcune decine di anni. Sull'origine e sulle modalità del ciclo idrotermale sono state esaminate differenti ipotesi. In conclusione si propone uno schema che prevede in corrispondenza del graben pontino l'esistenza di un attivo processo metamorfico, probabilmente accompagnato

(*) Istituto di Geologia e Paleontologia dell'Università degli Studi di Roma.

(**) Istituto di Geochimica dell'Università degli Studi di Roma.

(***) Lavoro eseguito con il contributo dell'Università degli Studi di Roma (Progetto «Geolazio») e del Progetto Finalizzato «Energetica», sottoprogetto «Energia Geotermica», contratto CNR no. 78.01728.92.

da apporti acidi, capace di produrre da un lato anomalie termiche positive e dall'altro lo sviluppo dei gas (CO₂, H₂S, HF), presenti nelle manifestazioni superficiali e negli acquiferi profondi. La temperatura delle acque del ciclo idrotermale profondo, valutata con il sistema dei termometri geochimici, risulterebbe variabile tra 180° e 200°C, nettamente superiore quindi a quella delle manifestazioni superficiali.

SUMMARY

The structural features of the Pontina Plain (southern Latium, Central Italy) are outlined on the basis of geological and geophysical data and field evidences. In correspondence with this large Graben, a tectonic discontinuity separates the western margin of the Latium-Abruzzi carbonate shelf from the sediments of the Pliocene-Quaternary cover along the Tyrrhenian coast.

The Pontina plain is delimited, to the east, by the Lepini and Ausoni Mountains. In these thick Meso-Cenozoic carbonate series, an important karstic aquifer occurs, with a mean annual discharge as high as 17 m³/sec. This aquifer feeds the numerous springs aligned along the north-eastern margin of the Graben. The waters of this shallow circuit are believed to undergo mixing processes with thermal waters circulating through the network of fractures existing at depth in the Graben and in the sedimentary units of the «Sabine facies». These latter waters are rich in alkali chlorides, strontium, fluoride and appear to be nearly saturated with respect to calcium sulfate. ¹⁸O/¹⁶O and D/H analyses clearly indicate that the waters of this circuit are of meteoric origin; their residence times, on the basis of the tritium contents, are higher than about 30 years. Geothermometric investigations indicate, at depth, temperatures ranging from 180° to 200°C, distinctly higher than those observed when the waters of the hydrothermal circuit reaches the surface.

1. PREMESSA

In molte zone dell'Italia Centrale e Meridionale è nota l'esistenza di sorgenti che, pur essendo certamente alimentate da bacini idrogeologici estesi in aree carsiche, erogano acque con caratteri chimico-fisici che, in ambiente carsico, sono inconsueti: elevata salinità con forti tenori di solfati e cloruri, abbondanza di gas disciolti, anomalie termiche positive, pH debolmente acido, etc. Manifestazioni di questo tipo, pur diffuse in molte zone dell'Appennino carbonatico, sono particolarmente frequenti lungo il versante tirrenico dalla Toscana alla Calabria.

In molti casi non è stata ancora definita nè la natura geochimica delle acque nè il processo che dà origine alle anomalie e al termalismo, così come manca una visione chiara del rapporto tra la distribuzione delle sorgenti termali, le caratteristiche delle acque, la situazione idrogeologica e le linee strutturali della regione.

Questo studio, di carattere preliminare, è stato eseguito nella Pianura Pontina dove numerose sono le manifestazioni idrotermali. La ricerca si inquadra in un più vasto programma di studio geologico sulla regione Lazio ed affronta alcuni problemi della situazione idrogeologica e geochimica qui sotto sintetizzati:

- Definizione dei principali caratteri geochimici e isotopici delle acque sotterranee e sorgive.

- Analisi delle relazioni tra le condizioni geologiche (stratigrafico-sedimentologiche e strutturali) e idrogeologiche regionali e le caratteristiche chimico-fisiche delle acque.

- Individuazione dei principali acquiferi esistenti nella regione e tentativo di determinazione delle loro caratteristiche (estensione, portata, caratteri geochimici etc.).

- Analisi delle cause che possono dare origine al circuito idrotermale, responsabile delle anomalie geochimiche e termiche riscontrate nelle manifestazioni superficiali.

I dati ottenuti sono stati utilizzati per proporre uno schema interpretativo della situazione geologica, idrogeologica, geochimica e geotermica caratteristica della Pianura Pontina, ma che, nelle sue linee generali, può forse essere esteso ad altre zone dell'Appennino, dove si riconoscono manifestazioni idrotermali simili che cadono in settori caratterizzati da analoghe situazioni strutturali.

Al di là dell'interesse strettamente scientifico, si vuole qui appena accennare anche agli aspetti pratici perseguiti da questo lavoro, che sono sostanzialmente due:

- la delimitazione delle zone nelle quali le acque sotterranee del circuito carsico superficiale non risultano miscelate con quelle dei circuiti idrotermali profondi e dove conseguentemente le acque di falda, per la loro bassa mineralizzazione, sono direttamente utilizzabili per usi municipali, industriali ed agricoli. Si è inteso in tale modo contribuire alla realizzazione di un piano organico di sfruttamento delle acque pontine, che è stato oggetto di numerose ricerche e convegni;

- la raccolta e l'elaborazione degli elementi necessari per una prima valutazione delle condizioni geotermiche del sottosuolo pontino, tenendo soprattutto conto del contesto idrogeologico regionale, dove un'imponente falda carsica, fredda e a bassa mineralizzazione, diluisce e maschera le acque del ciclo idrotermale tanto da rendere le sue manifestazioni superficiali apparentemente poco significative. L'interpretazione dei dati geochimici e geotermici rilevabili in superficie, non può infatti essere corretta se non si tiene nel dovuto conto l'esistenza e l'influenza del ciclo epidermico.

Si vuole infine sottolineare l'opportunità che gli schemi idrogeologici comunemente proposti per spiegare la genesi del termalismo e della mineraliz-

zazione, soprattutto quelli che prevedono lunghi percorsi nel sottosuolo, vengano esaminati anche nel loro aspetto idrodinamico, per verificare, almeno grossolanamente se i carichi idraulici disponibili paiano sufficienti ad azionare il ciclo previsto.

2. CARATTERI GENERALI DELLA REGIONE PONTINA

La Pianura Pontina (figg. 1, 2 e 3) si estende, per circa 50 km di lunghezza e 20 di larghezza, lungo la fascia costiera compresa tra le pendici sud occidentali dei monti Lepini e Ausoni a NE, il mare Tirreno a SO, le pendici meridionali dell'apparato vulcanico albano a NO e il capo Circeo a S.

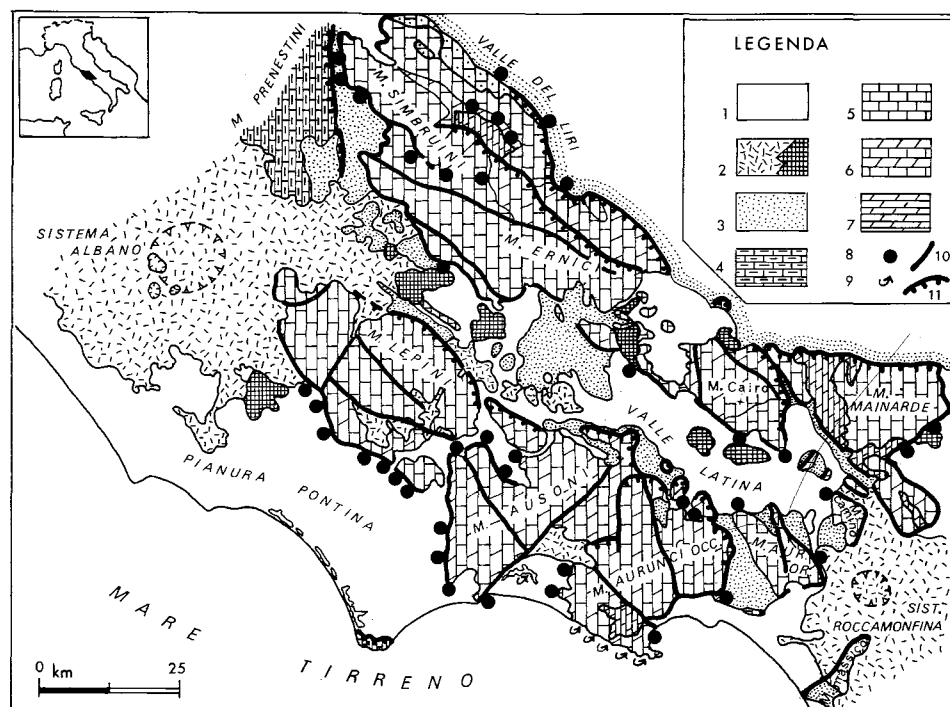


Fig. 1 - Schema idrogeologico della regione. 1. Depositi plio-quadernari antichi e recenti di ambiente marino, salmastro e fluvio-lacustre. 2. Prodotti vulcanici quadernari e travertino (reticolo). 3. Depositi neogenici argilloso-marnoso-arenacei (Miocene superiore). 4. Serie prevalentemente carbonatica mesozoica di facies Sabina. 5-6. Serie carbonatica mesozoica di piattaforma. 7. Affioramenti dolomitici infraliasici. 8. Sorgenti principali. 9. Sorgenti sottomarine e sub lacuali. 10. Faglie normali. 11. Faglie inverse e sovrascorrimenti.

Hydrogeological sketch of the region. 1. Plio-quadernary old and recent deposits: marine, brakish and continental facies. 2. Quaternary volcanic products and travertines (crossed lines). 3. Upper Myocene marly-arenaceous deposits. 4. Mainly mesozoic limestones sequence of «Sabina» facies. 5-6. Carbonate mesozoic sequence of Lazio-Abruzzo platform facies. 7. Infraliasic dolomitic outcrops. 8. Springs. 10. Normal fault. 11. Inverse fault and overlapping.

Il rilievo carbonatico lepino-ausono si eleva dal livello del mare fino ai 1500 m del monte Semprevisa; riceve una precipitazione media annua di circa 1200 mm che, assorbita in gran parte, riemerge lungo il margine sud-occidentale attraverso una quarantina di sorgenti, distribuite su un fronte di 50 km, a quota variabile tra 30 m ed il livello del mare; sorgenti minori si trovano anche nella depressione dell'Amaseno, all'interno del rilievo. La portata media annua complessiva delle sorgenti pontine che fanno capo ai rilievi Lepini e degli Ausoni è risultata di oltre 17 m³/sec, con massimi mensili di 24 m³/sec e minimi di 12 m³/sec.

La salinità delle acque sorgive varia da un minimo di 250 mg/l ad oltre 3.000 mg/l, la temperatura, sensibilmente proporzionale alla salinità, varia tra 12° e 24°C. Le acque meno salate e più fredde hanno la tipica mineralizzazione bicarbonato calcica delle acque carsiche, mentre quelle più calde e mineralizzate si distinguono per l'elevato contenuto gassoso, i notevoli tenori di solfati e cloruri e il pH debolmente acido. Nelle depressioni interne della struttura carbonatica e nel settore della pianura costiera più prossima al rilievo sono stati perforati numerosi pozzi a varie profondità che attingono nel substrato carbonatico ed erogano acque con salinità molto variabile. Due perforazioni eseguite presso il lago di Fogliano, ad una profondità di poco superiore ai 1000 m, erogano acqua calda, gassata e molto mineralizzata (12 g/l).

Le abbondanti acque sorgive che in passato davano origine, ai margini del rilievo lepino, ad estese aree paludose, defluiscono oggi a mare attraverso il sistema di opere idrauliche della nota bonifica pontina.

3. GEOLOGIA

Per studiare le relazioni esistenti tra la particolare natura delle acque pontine e le condizioni geologiche della regione, sono stati esaminati i dati geologici disponibili. Sulle strutture carbonatiche affioranti, con specifiche campagne di rilevamento, si sono raccolti elementi soprattutto stratigrafico-sedimentologici e strutturali; per le strutture sepolte sotto la pianura sono stati esaminati sia dati di perforazione reperibili in letteratura che inediti (serie di pozzi Mazzocchio eseguiti per conto del Consorzio Industriale Roma-Latina) e si sono considerati gli studi geofisici disponibili, gravimetrici ed elettrici.

Pur nella generale scarsità di dati, gli elementi raccolti sono parsi sufficienti per tracciare e proporre un quadro strutturale della regione che pare idoneo a spiegare la natura dei fenomeni idrogeologici osservabili in superficie.

3. 1. Isola di Zannone

Nell'isola di Zannone, situata 30 km a S di Capo Circeo, affiora un lembo del substrato regionale, direttamente esaminato da uno degli autori e recentemente descritto da PAROTTO & PRATURLON [32] e da FUNICIELLO & PAROTTO [21].

L'affioramento è costituito in parte da una sequenza di filliti quarzoso-sericitiche, alternate ad arenarie quarzose molto tenaci riferibili al basamento regionale; le metamorfite sono in contatto tettonico con una serie calcareo-dolomitica norico-retica, potente 600-700 m, formata da intercalazioni di dolomie stromatolitiche, biomicriti con alghe dasicladacee e megalodonti con sporadiche intercalazioni di calcari di tipo «Portoro». L'ambiente sedimentario è di tipo neritico e più particolarmente lagunare, caratterizzato da facies intertidali e supratidali. In netta discordanza sui terreni triassici poggia una serie alto cretacea, con giacitura sub orizzontale formata da un moderato spessore di «scaglia rossa» che passa ad un flysch paleogenico costituito da alternanze di calcari marnosi, marne policrome ed arenarie con intercalazioni di «alberese». Secondo PAROTTO & PRATURLON [32] la serie di Zannone ha marcate affinità con la serie toscana.

Il sedimentario dell'isola di Zannone presenta due principali motivi di interesse:

- indica che, in posizione più interna, rispetto a quella di Capo Circeo e di Fogliano, si trova una serie affine a quella toscana;
- contiene un affioramento triassico molto prossimo all'area di indagine.

La natura del substrato triassico può giocare un ruolo determinante nel processo di mineralizzazione delle acque riferibili al ciclo idrotermale, che si manifesta nella Pianura Pontina, perchè è noto che i depositi triassici dell'Italia centrale contengono frequentemente orizzonti evaporitici.

Purtroppo l'affioramento triassico di Zannone risulta incompleto; i caratteri sedimentologici della parte affiorante sono tuttavia confrontabili con quelli dei coevi affioramenti osservati nei M. Aurunci e a M. Morra, presso Tivoli, dove ai calcari si intercalano episodi argilloso-marnosi con gessi.

I pozzi Trevi 1 e Androco 1, a livello del Trias, sotto una potente serie calcareo-dolomitica, hanno attraversato una spessa sequenza di intercalazioni evaporitiche che ha indotto PAROTTO & PRATURLON [32] ad ipotizzarne la presenza alla base della serie tipo della piattaforma laziale-abruzzese. In Toscana ed in Umbria il Trias evaporitico passa alle marne a *Retavicula*, mentre nella serie martana le marne a *Retavicula* e bacrilli del Norico-Retico, giacciono su una sequenza dolomitica a *Megalodon*.

I dati sulla distribuzione delle facies triassiche nell'Appennino centrale sono ancora troppo sporadici ed insufficienti per suggerire quale possa essere la più probabile situazione in corrispondenza della Pianura Pontina; tutti gli affioramenti più prossimi sono tuttavia riferibili ad un ambiente di sedimentazione intertidale e supratidale, tale cioè da non escludere la presenza di facies evaporitiche isopiche o di età più antica, come i ritrovamenti dei pozzi Trevi e Androco lascerebbero supporre.

3. 2. Promontorio del Circeo

La struttura mesozoica del Capo Circeo emerge dai depositi plio-quadernari che colmano la depressione pontina; è formata da tre scaglie carbonatiche, fra loro parzialmente accavallate e sovrapposte a depositi flyschoidi

oligo-miocenici [1, 7]. La serie è formata alla base da dolomie e calcari massivi, del Lias inferiore, confrontabili con la formazione del «calcare massiccio»; fanno seguito pochi metri di marne e argille con rare ammoniti, passanti a calcari marnosi con selce, ben stratificati, potenti un centinaio di metri, riferibili al Lias medio-Dogger inferiore.

L'intera serie mesozoica ha chiara affinità con quella Sabina [32] mentre il flysch oligo-miocenico (formato da calcareniti prevalenti, intercalate a marne argillose) è confrontabile con il flysch descritto da NOVARESE [31] alla base del sondaggio La Guardia e con la serie cenozoica di Pozzo Fogliano. Gli elementi «sicilidi» segnalati nel flysch del Circeo [1] sono riferibili alle sequenze caotiche di Carpineto Romano e a quelle dei pozzi (Agip) Latina 1 e Latina 2.

L'assetto strutturale del promontorio è stato acquisito in una fase tettonica precoce rispetto a quella che ha costruito il rilievo lepino-ausono.

Risulta quindi che il Capo Circeo è formato da una serie di transizione mesozoica, molto affine a quella Sabina, interessata da una tettonica traslativa molto marcata, con vergenza a NNE. Il flysch del Circeo è precoce rispetto a quello della Valle Latina col quale non presenta alcuna affinità nè litologica nè cronologica.

Nella fascia costiera tra Tor Caldara ed il Circeo si notano tre anomalie gravimetriche positive: Tor Caldara, Fogliano e lo stesso Circeo (fig. 2). I massimi valori di anomalia cadono in prossimità del promontorio dove, sotto la struttura affiorante e verosimilmente radicata, dovrebbe esistere una situazione di alto strutturale, in continuità con le culminazioni poste più a NO.

3. 3. Monti Lepini e Ausoni

Studi recenti considerano il rilievo carbonatico lepino-ausono come probabile prosecuzione della piattaforma interna campana [17, 32].

La parte basale della serie lepina è ben esposta lungo il versante sud occidentale del M. Semprevisa. Il termine più antico, riferibile al giurassico superiore (Dogger-Malm), affiora a reggipoggio lungo la dorsale di M. Lupone, M. Perentile, M. Semprevisa, M. della Difesa, per una potenza di 1000 m circa. Un altro modesto lembo riferibile alla stessa età si trova a N di Patrica.

Il Dogger inferiore è costituito da una successione potente qualche decina di metri di calcari detritici ed oosparitici, ben classati, con *Protopeneroptis striata* (Weyn.). A questi si intercalano orizzonti di intramicriti nocciola con rare *Trocolina* sp. e *Pfenderina salernitana* (SART. & CRESC.). Verso l'alto segue una monotona ripetizione di dolomie e calcari marnosi micritici nocciola a *Cladocoropsis mirabilis* (FAURE), che passa ad orizzonti più marnosi con oogoni di *Charophita*, depositi in un ambiente lagunare molto tranquillo, con marcata influenza continentale; episodi di emersione sono testimoniati da dolomie bituminose, sottilmente stratificate e ricche di resti di flora continentale a *Brachiphyllum* e *Plagiophyllum* e rari pesci. Questo affioramento, già segnalato da COCOZZA e PRATURLON [14] prosegue lungo il versante orientale di M. Furchiavecchia in località Crocefisso. Risulta in sintesi che la successione giurassica, nell'ambito della piattaforma, presenta frequenti eteropie e denota, nel tempo, l'interazione di due ambienti sedimentari con marcate differenze di energia deposizionale: nel Dogger facies di barra formate da sabbie oolitiche

ben classate e nel Malm prevalenti facies fangose di laguna interna, prossime ad aree emerse. Al passaggio giurassico-cretacico, visibile sulla dorsale prima considerata fino a M. S. Martino e anche presso Civita (Norma) e M. Acquapuzza (Sermoneta), non si notano sensibili differenze nell'ambiente di sedimentazione. Il Cretacico inferiore è rappresentato da una sequenza di circa 500 m, molto dolomitica, con frequenti intercalazioni di stromatoliti, micriti, intramicriti con alghe *Caieuxia*, cuneoline primitive, oogoni e rare *Requienia*. La sedimentazione schiettamente carbonatica viene interrotta dalla deposizione del noto livello prevalentemente marnoso con *Orbitolina sp.* ed oogoni di *Charophyta* che si presenta discontinuo e con spessore variabile fino ad un massimo di 20 m. Queste marne di età aptiana, ben esposte lungo la strada dell'Amministrazione Forestale che sale le pendici del M. Semprevisa, si sono probabilmente deposte in ambiente lagunare, in condizioni prossime alla continentalità.

Nella parte sommitale del Cretacico inferiore (Albiano-Cenomaniano inf.) la sedimentazione torna ad essere prevalentemente carbonatica: calcari dolomitici, stromatolitici, con partizioni argillose e frequenti intercalazioni di loferiti e livelli di breccie a clasti scuri [6] riferibili ad un ambiente scarsamente energetico, di facies intracotidale e supracotidale.

Si può riassumere la situazione dicendo che i caratteri sedimentologici del Cretacico inf. (Neocomiano-Cenomaniano inf.) sono assai simili a quelli rilevati nella successione giurassica: sedimentazione carbonatica in ambienti prossimi all'emersione con saltuari episodi di continentalità.

Il Cretacico superiore (Cenomaniano superiore-Paleocene) occupa in affioramento la maggiore estensione del rilievo lepino. La sedimentazione carbonatica nel settore occidentale (a SO della linea Segni-Montelanico-Carpineto-Maenza) sembra esaurirsi nel Cenomaniano-Turoniano, mentre nel settore orientale la sedimentazione continua almeno fino al Campaniano-Coniaciano.

Nel settore occidentale il Cenomaniano-Turoniano si presenta a N (M. Arrestino) con caratteri sedimentologici tipici di un ambiente di scogliera e periscogliera (tanatocenosi di caprinidi, resti di coralli, echinidi ed idrozoi) chiuso al tetto da facies lagunari regressive, ricche di ostracodi. Più a S ed all'interno del rilievo sono invece frequenti facies dolomitiche e biomicritiche schiettamente lagunari a *Cisalveolina fallax* (REICHEL).

Il Campaniano - Coniaciano, poco diffuso nei Lepini occidentali, è invece ben rappresentato nel settore orientale, ai margini del rilievo. Procedendo da ovest verso est, decrescono gradualmente gli spessori e variano i caratteri sedimentologici. Da depositi riferibili ad un ambiente di scogliera (orizzonti organogeni a rudiste di grossa taglia, integre od in frammenti, con scarsa matrice, intercalati a micriti o dolomie cristalline) diffusi a M. Pilocco e Costa Pecci, si passa a sequenze carbonatiche di piattaforma interna, con facies lagunari salmastre ed episodi di emersione (tracce di probabile paleocarsismo rilevate a M. Faro, M. Fantozzo, Pozzo delle Fontanelle) già segnalati da CARBONE & CATENACCI [13].

Il Maestrichtiano-Campaniano p. p. è scarsamente rappresentato. Nei Lepini occidentali è noto in due soli affioramenti: all'estremo settentrionale del rilievo, presso Segni, in località Cave di Calcare e in prossimità di Colle Cantocchio. I due affioramenti sono in facies detritico-organogena (calcare sacca-roidale degli Autori) ricca di Orbitoidi, frammenti di rudiste ed echinodermi.

Tali sequenze si sono deposte verosimilmente in un ambiente di periscogliera esterna, che risentiva l'influenza di un bacino pelagico, come lascia presumere il ritrovamento di globotruncane.

Nei Lepini orientali il Maestrichtiano-Campaniano affiora al margine nord orientale indicativamente tra Morolo e Cima Retagna e sul rilievo di Macchia di Anagni; è costituito da una successione prevalentemente dolomitica, con episodi di emersione, che passa ad alternanze di calcareniti ad orbitoidi, frammenti di echinidi e rudiste, che si chiude con una sequenza di orizzonti micritici che preludono all'emersione.

Il Paleogene non è segnalato nei M. Lepini; come è noto manca, tranne varie eccezioni, in tutta la piattaforma laziale-abruzzese, mentre si trova a Zannone, al Circeo e nel Pozzo Fogliano.

Il Miocene, sempre trasgressivo sui terreni del Cretacico superiore è poco rappresentato nella dorsale, dove si trova solo in lembi di spessore modesto (da qualche metro a qualche decina di metri). A sud di Colleferro NEGRETTI [30] segnalava un affioramento di sedimenti basso miocenici (Aquitaniense) formato da brecce sinsedimentarie e calcareniti con miogipsine e macroforaminiferi pelagici rimaneggiati.

A Colle Cantocchio, presso Bassiano, affiorano pochi metri di Miocene che si trovano in contatto tettonico con il Cretacico superiore. Si tratta di una sequenza calcarenitico-marnosa i cui orizzonti basali contengono miogipsine, anfistegine, eterostegine, briozoi, anellidi etc. e sono riferibili al Langhiano-Serravalliano, mentre la parte sommitale, prevalentemente marnosa, contiene orbuline, globorotalie, Globigerinoides, globoquadrine e foraminiferi bentonici nel complesso riferibili al Serravalliano-Tortoniano [14].

Anche a Carpineto Romano la base del Miocene trasgressivo è rappresentata da una serie calcarenitico-marnosa riferibile al Langhiano-Serravalliano, molto affine alla sequenza di Colle Cantocchio. Recentemente in un sondaggio realizzato dalla MISTRAL S.p.A., presso Latina Scalo, al di sotto di una coltre di terreni quaternari, in facies prevalentemente salmastra e continentale (potenti circa 240 metri), è stato raggiunto il substrato carbonatico, intensamente carsificato, costituito da calcareniti organogene oligo-mioceniche, di facies sabina.

Nei Lepini orientali la trasgressione miocenica ha inizio nel Langhiano superiore [2] con la deposizione di calcareniti a Pecten e briozoi che perdura fino al Serravalliano inferiore; seguono i calcari marnosi a *Cilindrites* del Serravalliano superiore che segnano la fine della sedimentazione carbonatica e l'inizio dei massicci apporti terrigeni altomiocenici.

La formazione delle marne ad *Orbulina* del Tortoniano inferiore affiora con spessori di circa 20 metri lungo la Valle Fornaca e a Macchia di Anagni. A sud di Carpineto Romano la formazione delle marne ad *Orbulina* è databile al Serravalliano superiore e poggia sulle calcareniti a *Miogipsina* riferibili al Langhiano.

Il Tortoniano-Messiniano è rappresentato dal flysch argilloso-arenaceo che colma la valle del Fiume Sacco, con una potenza imprecisata, ma probabilmente superiore a 500 metri. Questi depositi torbiditici sono stati riferiti [28, 29] ad un ambiente di conoide sottomarina, presumibilmente alimentata da NO.

Alla sedimentazione torbiditica si intercalano periodici apporti di tipo 'sicilide' che si ritrovano anche in sporadici affioramenti lungo la dorsale lepi-

na e soprattutto ammassati lungo il margine nord-orientale dove assumono un aspetto caotico e risultano implicati nel movimento traslativo che ha interessato l'intera dorsale.

A Carpineto Romano, in località Occhio di Bue, le «sicilidi» affiorano in sequenze marnoso-argilloso-arenacee apparentemente poco disturbate, che poggiano sulle marne ad *Orbulina* del Serravalliano superiore. Il complesso mostra notevoli affinità litologiche con l'analoga serie tolfetana [5].

A SE di Montelanico e di Segni si trovano ammassi caotici di «sicilidi» di modesta estensione, depositi direttamente sul Cretacico superiore; altri affioramenti, in posizione analoga, sono implicati nella struttura di M. Caccume.

Gli affioramenti di Gavigniano [2] sono stati riferiti ad un ambiente deposizionale di conoide, caratterizzato da incisioni torrentizie, trasporto canalizzato e movimenti di massa. L'età della messa in posto delle «sicilidi» nei Lepini non è sempre ben definibile e sembra prendere un arco di tempo piuttosto lungo. A Carpineto l'arrivo delle «sicilidi» sembra più precoce e può riferirsi al Miocene medio-inferiore. A Gavignano la messa in posto sembra perdurare fino al Pliocene [2]. Tra Patrica e Prossedi affiorano potenti ammassi di «sicilidi» molto caoticizzate, intercalate nella parte sommitale della serie flyschioide alto-miocenica. Nella Valle dell'Amaseno la datazione è incerta perchè si ha l'appoggio diretto sul Cretacico superiore.

Nei Monti Ausoni, se si esclude il modesto affioramento di M. Alto non sono noti affioramenti «sicilidi».

Lungo la Valle dell'Amaseno e nelle depressioni interne del rilievo a questa connesse, i dati di perforazione disponibili indicano la presenza di sequenze carbonatiche del Cretacico superiore direttamente coperte da depositi fluvio-lacustri e vulcanici quaternari. Nonostante questa situazione sembri escludere la presenza di «sicilidi» in questa area, riteniamo probabile, secondo una ipotetica ricostruzione della situazione paleogeografica, che, in corrispondenza della attuale depressione che separa i Lepini dagli Ausoni, a partire dal Miocene inferiore si trovasse un solco che metteva in comunicazione il bacino oligo-miocenico pontino, in emersione (o già emerso?) con il bacino latino fortemente subsidente ed in fase di rapida sedimentazione. Se questa interpretazione è corretta l'ipotetico solco dovrebbe essere almeno parzialmente colmato da depositi «sicilidi» che, nella Valle Latina, si ammassano caoticamente e con grande abbondanza proprio in corrispondenza dell'incontro fra il rilievo dei M. Lepini e dei M. Ausoni.

Il riavvicinamento delle strutture lepina ed ausona, ed il conseguente raccorciamento del solco che le separava, potrebbe aver determinato la sovrapposizione della successione carbonatica ausona sui sedimenti caotici intrappolati nel paleosolco, tanto da mascherarne la presenza nella fascia più superficiale.

Correlando gli elementi esposti si può tracciare un quadro riassuntivo della situazione stratigrafica lepina.

Una sedimentazione caratteristica di piattaforma subsidente copre l'arco di tempo compreso tra il Dogger ed il Cenomaniano. Si succedono diverse facies di tipo lagunare con frequenti episodi di emersione. Nel Cretacico superiore ha inizio un profondo processo di differenziazione: nel settore nord-occidentale si instaura un ambiente di margine ad elevata energia con deposizione di sedimenti tipici di scogliera e periscogliera che localmente risentono l'influenza di un bacino pelagico; nel settore orientale perdura la sedimenta-

zione di piattaforma, seguita dalla deposizione di orizzonti calcarenitici, con fasi lagunari regressive alla chiusura del ciclo.

Nel settore occidentale la sedimentazione cessa al Cenomaniano-Turoniano, mentre più ad est il ciclo si chiude al Campaniano-Coniaciano. Segue la lunga fase di emersione paleogenica. Nel Miocene inferiore-medio, con l'inizio di una intensa attività tettonica, riprende la sedimentazione marina nel settore orientale del rilievo lepino. La trasgressione langhiano-serravalliana deposita calcareniti detritico-organogene seguite ben presto da sedimenti prevalentemente marnosi. Segue la deposizione terrigena del Miocene medio-superiore e la messa in posto delle coltri alloctone, in un quadro strutturale in piena evoluzione.

Prima del Miocene medio, una fase tettonica precoce determina il corrugamento ed il sollevamento dei depositi paleogenico-miocenici e delle coltri alloctone di provenienza tirrenica, depostesi nel solco pontino. Contemporaneamente nella struttura lepina ed ai suoi margini si aprono tre solchi principali: la depressione latina, il solco lungo l'allineamento Segni-Carpineto e quello lungo l'attuale Valle dell'Amaseno. Lungo quest'ultimo solco, le coltri alloctone di provenienza tirrenica, presumibilmente in fasi successive si muovono verso NE, fino a raggiungere la Valle Latina.

Al movimento delle coltri alloctone si accompagna e segue il corrugamento dell'intera dorsale lepino-ausona, con il raccorciamento dei citati solchi. Nel Miocene medio-superiore la struttura traslata a NE sovrascorre sul flysch della Valle Latina, determinando il generale processo di raccorciamento del rilievo e di compressione dei solchi, mediante faglie inverse e sovrascorimenti.

Nel Plio-Pleistocene il rilievo lepino viene ancora interessato da una fase tettonica distensiva, della quale si dirà nei paragrafi successivi.

3. 4. Pianura Pontina

Nella Pianura Pontina affiorano depositi quaternari che, dalle falde sud-occidentali del rilievo lepino-ausono, si estendono fino all'attuale linea di costa. Si tratta prevalentemente di sedimenti continentali fluvio-lacustri, eolici e piroclastici.

La natura del sottosuolo può essere ricostruita, indirettamente, utilizzando i dati geofisici (gravimetrici ed elettrici) ed i risultati di numerose perforazioni.

I dati gravimetrici [3] delineano un solco, a contorni sufficientemente ben definiti, che corre lungo l'allineamento Cisterna-S. Donato, interrotto da una culminazione relativa posta poco a sud di Latina. Questa depressione separa il rilievo lepino-ausono da una marcata anomalia gravimetrica positiva estesa nel Tirreno, che ha il suo margine nord orientale lungo l'allineamento Tor Caldara-Torre Astura-Fogliano e Circeo. Lungo il margine nord orientale della pianura si individua chiaramente un settore della struttura carbonatica lepino-ausona, debolmente ribassato e coperto da depositi quaternari recenti. Quest'area marginale della Pianura Pontina è stata oggetto di un accurato stu-

dio geoelettrico (CMP, rapporto inedito) controllato da una campagna di perforazioni (CMP, rapporto inedito, [11]) che fornisce un'eccellente ricostruzione di dettaglio dell'andamento del tetto dei calcari (fig. 3).

L'articolato alto gravimetrico che corre lungo la costa corrisponde presumibilmente ad un complesso di strutture sepolte, culminanti, come già si è accennato precedentemente, in prossimità di Tor Caldara, Fogliano e Circeo.

Numerosi dati di perforazione profonda (fig. 2) contribuiscono a chiarire la situazione stratigrafica e strutturale (Pozzi Agip Latina 1 e Latina 2, Pozzo Fogliano, La Guardia, etc.). Questi dati sono stati recentemente analizzati da PAROTTO & PRATURLON [32]; vengono pertanto riconsiderati i risultati di questi studi, integrati da elementi di maggiore dettaglio desunti da perforazioni meno profonde, della serie Mazzocchio, riportate in fig. 3, delle quali è stata studiata la stratigrafia.

I pozzi Latina 1 e Latina 2 perforati dall'Agip (ENI 1972) forniscono dati incerti sulla natura dei sedimenti posti sotto la copertura plio-pleistocenica, indicati genericamente come «alloctono indifferenziato». Non è escluso che sia stata interessata anche parte di una serie cenozoica di facies umbro-sabina. I due pozzi di Fogliano, perforati ad una profondità di poco superiore a 1000 metri, hanno attraversato, sotto il Pliocene argilloso, una tipica serie cenozoica di transizione piattaforma-bacino, di tipo sabino, sulla quale trasgrediscono calcareniti del Miocene inferiore. L'esistenza di intercalazioni di tipo «sicilide» nella stratigrafia di pozzo Fogliano 1, già ipotizzata in passato, può essere esclusa, a seguito dell'accurato studio stratigrafico del pozzo Fogliano 2 [32].

Il sondaggio La Guardia, sotto una serie prevalentemente sabbioso-siltosa plio-pleistocenica, attraversa una ventina di metri di arenarie quarzose che già NOVARESE [31] riferiva al flysch del Circeo.

Anche nel sondaggio Sabaudia, sotto una copertura quaternaria, sono segnalati sedimenti riferibili dubitativamente al flysch oligo-miocenico. Di là del solco pontino il sondaggio Pontinia, perforato a ridosso del rilievo lepino, attraversa una formazione detritica organogena del Pliocene medio-superiore (il «macco» degli Autori) direttamente trasgressiva sui carbonati del Cretacico superiore.

Depositi di facies salmastra e lagunare, difficilmente databili, ma presumibilmente quaternari, ricoprono direttamente il Cretacico superiore in corrispondenza del blocco lepino ribassato, lungo il settore nord orientale della pianura, a NO dell'allineamento Cisterna-Terracina, come risulta dalla stratigrafia dei pozzi Mazzocchio, direttamente esaminata da uno degli Autori.

Dagli elementi raccolti risulta, in sintesi, che lungo la Pianura Pontina si individua un solco profondo apertosi tra il margine della piattaforma lepina e le strutture sepolte più occidentali, formate da una serie di transizione di tipo sabino. Pur mancando prove sicure, si può pensare che il solco sia stato parzialmente colmato da un flysch oligo-miocenico e da depositi caotici di tipo «sicilide», depositi precocemente rispetto al complesso argilloso-arenaceo di età tortoniano-messiniana, molto diffuso nei settori più orientali e sconosciuto nell'area pontina. Una fase tettonica penecontemporanea alla deposizione del flysch, costruisce le strutture oggi sepolte lungo la costa e che sembrano estendersi nel Tirreno.

Sia le strutture tirreniche sepolte (in base ai dati di pozzo Fogliano) sia il rilievo lepino hanno avuto lunghi periodi di emersione, almeno parziale, durante la deposizione del flysch di tipo sabino, nel solco pontino.

Da questo quadro strutturale risulta che la Pianura Pontina cade in corrispondenza dell'ampia fascia di transizione e di marcata instabilità tettonica che per tutto il Mesozoico ed il Cenozoico ha diviso la piattaforma lepina dal bacino pelagico tirrenico. Questa condizione di instabilità è perdurata nella regione anche in epoche successive, come risulta dalla notevole variabilità degli ambienti sedimentari plio-pleistocenici e dalle attuali condizioni strutturali della regione.

A partire dal Pliocene inferiore una fase tettonica distensiva, (che si sviluppa in un vasto settore dell'Italia centrale), conferisce alla regione un assetto ad Horst e Graben. Con il riattivarsi delle antiche linee tettoniche, si riapre gradualmente il solco pontino con un processo discontinuo, probabilmente non ancora del tutto esaurito. Alla attività tettonica segue la ripresa della sedimentazione marina e l'inizio dell'intensa attività vulcanica, ben nota in aree molto prossime alla zona direttamente esaminata.

Nel Pliocene inferiore il mare ingredisce su gran parte della regione, dove deposita un potente pacco di argille marnose di schietto ambiente pelagico (affioramenti di Tor Caldara e sondaggio di Foce Verde) che d'altra parte non sono state raggiunte dalle perforazioni eseguite nel settore centrale della depressione pontina.

Il Pliocene medio-superiore è bene rappresentato nei sondaggi Foce Verde, Fogliano, La Guardia e Pontinia; in quest'ultimo, più prossimo al rilievo lepino, si ritrova in facies detritico-organogena, litorale (nota a Tor Caldara come «macco») direttamente trasgressiva sul Mesozoico. Ad occidente (pozzo Fogliano), le argille sabbiose del Pliocene medio-superiore trasgrediscono sul Miocene inferiore, mentre più a sud ricoprono direttamente il flysch oligo-miocenico.

Il Calabriano argilloso-sabbioso si estende con continuità lungo il settore costiero della pianura: pare invece dubitativa la sua segnalazione a ridosso della struttura lepina [15].

Dagli stessi Autori sono stati riferiti al Siciliano i depositi sabbioso-argillosi di facies costiera e lagunare estesi nel settore nord orientale della pianura; tuttavia anche questa datazione pare dubitativa.

Come già si è accennato, molto incerta è anche la datazione dei depositi di facies prevalentemente lagunare e fluvio-lacustre, attraversati dai pozzi Mazzocchio, in prossimità del rilievo e nella Valle dell'Amaseno; sembra tuttavia probabile riferire al post-siciliano la formazione di tali terreni.

Considerazione particolare merita l'attività vulcanica che ha interessato la regione soprattutto nella fase più recente della sua evoluzione. Numerosi affioramenti di piroclastiti, disseminati al margine del rilievo lepino e nelle depressioni interne, sono riferibili all'intensa attività vulcanica manifestatasi nell'area albana ed in minor misura nella media Valle Latina. Fanno tuttavia eccezione alcuni affioramenti che, per le loro caratteristiche, non possono essere genericamente riferiti alla coltre piroclastica regionale. Si tratta di affioramenti che contengono abbondanti inclusi di rocce sedimentarie (abbazia di Valvisciolo, Fosso di M. Acuto, Supino) o che si presentano come ammassi di piroclastiti generalmente rossastre o grigiastre, costituite da pomici, scorie nere e lapilli cristallini, più o meno cementate (Bassiano, Maenza, Roccagorga, Piana della Faggeta etc.). Intercalati alle piroclastiti si osservano localmente ammassi lavici in giacitura di colata (Maenza) o frammentati in grandi blocchi (Roccagorga).

I prodotti di questo vulcanismo periferico, sebbene siano ancora poco conosciuti, per i caratteri sedimentologici sembrano riferibili ad una attività prevalentemente esplosiva, dovuta a centri di emissione assai prossimi alle aree di affioramento. Nell'affioramento dell'abbazia di Valvisciolo il diametro degli inclusi sedimentari raggiunge 20-30 cm; in quello più modesto della cava sita in località Acquapuzza, gli stessi inclusi hanno diametro di qualche centimetro e sono frammisti a frequenti clasti di leucitite anche se sempre di piccole dimensioni.

Anche la natura delle vulcaniti pontine non è stata ancora rigorosamente definita; tuttavia le caratteristiche delle manifestazioni esaminate sul terreno e le analogie con i prodotti degli apparati più noti, fanno pensare ad un vulcanismo alcalino potassico di tipo prevalentemente esplosivo. L'età, sebbene ancora indeterminata, si può considerare genericamente posteriore al Pliocene medio-superiore.

Oltre a queste considerazioni di dettaglio, che meritano un'analisi più approfondita, considerazioni di carattere più generale, come l'assetto strutturale della Pianura Pontina, la presenza di prodotti riferibili ad attività vulcanica periferica affioranti ed incontrati in numerose perforazioni (travertini di Cisterna e numerosi altri orizzonti di travertino sepolti sotto depositi più recenti) e soprattutto la vicinanza degli apparati vulcanici di interesse regionale e più sopra citati, inducono ad ipotizzare nella regione l'esistenza di un vulcanismo più o meno sviluppato che può influenzare notevolmente i caratteri geochimici delle acque pontine.

3. 5. Sintesi delle condizioni geologiche regionali

A partire dal Giurassico il bacino di sedimentazione si differenzia in due diversi settori: ad est si imposta un altotondo dove la rapida subsidenza viene compensata dall'attiva sedimentazione della serie lepino-ausona, per uno spessore di circa 3.000 metri; ad ovest si instaura un bacino pelagico tirrenico, presumibilmente separato dalla piattaforma da un'ampia fascia di transizione, dove si sedimenta una serie di tipo sabino.

Nel settore occidentale i terreni giurassici e del Cretacico inferiore hanno origine in un caratteristico ambiente di piattaforma carbonatica, mentre i sedimenti del Cretacico medio-superiore lungo i limiti settentrionali, e presumibilmente anche occidentali si depongono in un ambiente di margine. Nel Cretacico superiore la sedimentazione marina sembra cessare definitivamente; fanno eccezione alcuni settori periferici ed interni, dove, sui carbonati mesozoici, trasgrediscono sedimenti marini più recenti. Un vasto settore della catena lepino-ausona è quindi emerso definitivamente alla fine del Mesozoico.

Non è nota in affioramento la posizione della soglia giurassica e del Cretacico inferiore che si troverebbe sepolta sotto la Pianura Pontina, mentre è nota la soglia cenomaniana nei pressi di Cori, che pare correlabile con quella di Rocca di Cave [12, 21].

Ad occidente del margine mesozoico, che ha probabilmente migrato nel tempo, si estende un ambiente di transizione, molto affine a quello sabino, dove la sedimentazione si sviluppa con qualche lacuna a partire dal Cretacico superiore, fino alla deposizione dei termini oligomiocenici.

Alla fine del Mesozoico ha inizio la crisi orogenica che assume caratteristiche differenti e si sviluppa in tempi diversi nei due domini sedimentari.

Ai margini settentrionali ed occidentali della piattaforma si sviluppa un corrugamento della serie di transizione che da origine a strutture di accavallamento (ben note nella Sabina e nei Prenestini) e molto probabilmente estese anche al settore occidentale (Fogliano, Circeo ed altre strutture positive sepolte al margine tirrenico). Emerge la struttura di Fogliano quando è già almeno in parte emersa la struttura lepina. In corrispondenza della Pianura Pontina si delinea una depressione dove si accumulano, presumibilmente, depositi oligo-miocenici e coltri alloctone analoghe a quelle che si ritrovano localmente all'interno della catena lepina, al Capo Circeo e che sono segnalate come «alloctone indifferenziato» nei pozzi profondi [21]; segue una fase di generale emersione del settore occidentale.

Mentre nell'area di transizione si sviluppa una tettonica plicativa precoce, accompagnata dalla deposizione di sedimenti sinorogenici, la piattaforma carbonatica subisce un graduale processo di smembramento in settori tra loro separati da profondi solchi, aperti lungo direttrici appenniniche (i principali) ed antiappenniniche (i secondari). Hanno in tal modo origine l'embrione del solco latino e della dorsale dei Volsci, rotta dalle depressioni trasversali, già delineate, dell'Ausente e dell'Amaseno. Solo a partire dal Tortoniano nella Valle Latina avrà inizio la massiccia deposizione di torbiditi argilloso-arenacee e successivamente di sedimenti caotici di colata. Nel tardo Miocene la catena dei Volsci subisce una vistosa traslazione verso NE [1] che determina un generale processo di raccorciamento e di accavallamento delle masse carbonatiche sui depositi che colmano i solchi. Durante la sedimentazione del flysch tortoniano e lo sviluppo della fase orogenica traslativa che interessa la catena carbonatica, nel settore occidentale perdura la fase di emersione.

Nel plio-pleistocene una nuova fase distensiva conferisce alla regione l'attuale assetto strutturale. La Valle Latina assume la configurazione di un Graben fra la dorsale simbruina e quella dei Volsci. Come conseguenza si sviluppa il vulcanismo fissurale noto come vulcanismo ernico [4]. Si apre ancor prima il Graben pontino che, con fasi alterne, si svilupperà progressivamente in armonia con il generale fenomeno di collasso che investe il settore tirrenico [24] e che tanta importanza assume nella genesi del vulcanismo.

Sufficientemente chiara appare, nel suo insieme la situazione strutturale della regione, mentre assai pochi sono gli elementi che permettono di conoscere l'assetto strutturale in corrispondenza della Pianura Pontina, cioè della fascia di transizione che collega la dorsale lepina con le strutture sepolte lungo la costa tirrenica. In quest'area, qualunque schema si voglia oggi proporre, per la scarsità degli elementi disponibili, non può essere altro che un'ipotesi di lavoro da verificare con studi più approfonditi e nuovi mezzi di indagine.

IPPOLITO & SGROSSO [23] propongono uno schema che ipotizza la sovrapposizione della piattaforma interna di affinità campana (settore sud-occidentale della struttura dei Volsci) su una piattaforma più esterna (laziale-abruzzese).

MANFREDINI [26] ipotizza, in corrispondenza della Pianura Pontina, l'esistenza di un altotondo stabile che durante il Mesozoico divideva il bacino pelagico tirrenico dalla piattaforma subsidente. Sarebbe seguita una fase tettonica distensiva che avrebbe dato origine alla fossa pontina.

FUNICIELLO & PAROTTO [21] danno una interpretazione strutturale molto simile a quella che viene qui proposta ed illustrata nel profilo di fig. 4, dove si

— PROFILO GEOLOGICO SCHEMATICO —

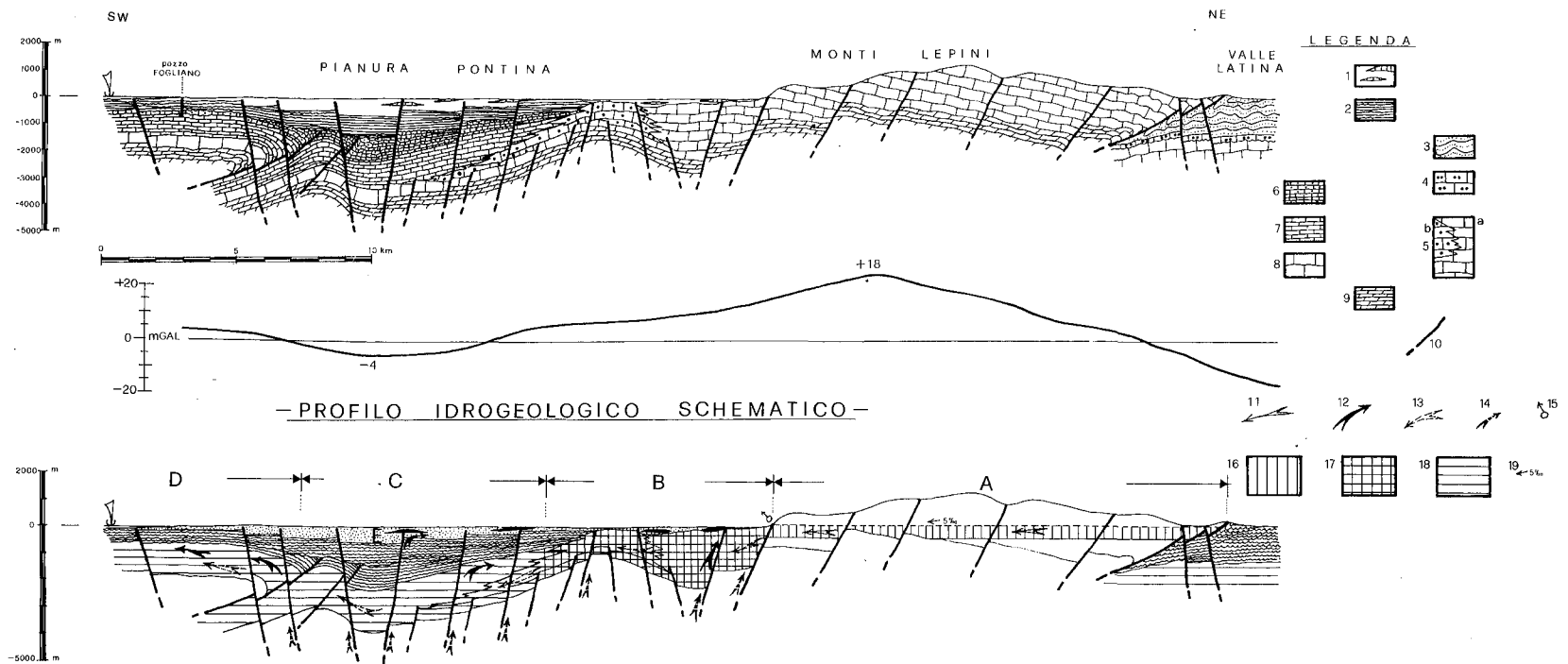


Fig. 4 – Profili geologici ed idrogeologici. 1. Depositi quaternari e travertini. 2. Depositi argillosi plio-pleistocenici. 3. Flysch del Miocene sup. (Valle Latina). 4. Calcarenitì langhiane della Valle Latina. 5 A. Serie carbonatica mesozoica della piattaforma lepina. 5 B. Ipotetica serie mesozoica del margine occidentale della piattaforma lepina. 6. Marne siliciche e detritiche, prevalentemente paleogeniche. 7. Serie liassico-cretacica di facies «Sabina». 8. Calcari detritico organogeni del Lias inf.-medio di facies «Sabina». 9. Dolomie infraliassiche. 10. Faglie distensive e sovrascorimenti. 11. Prevalente direzione di scorrimento delle acque carsiche. 12. Prevalente direzione di flusso del circuito idrotermale. 13. Direzione di lento movimento delle acque carsiche nel Graben pontino prodotto da gradienti di pressione dei gas. 14. Venute gassose calde ed acide di diversa origine. 15. Sorgenti. 16. Dominio del circuito carsico lepino. 17. Acque miscelate. 18. Dominio del circuito idrotermale. 19. Gradiente idraulico medio.

Schematic geological and hydrogeological sections. 1. Quaternary deposits and travertines. 2. Plio-pleistocenic argillous deposits. 3. Upper Miocene «Flysch» (Latina Valley). 4. Lower Miocene detrital limestones (Latina Valley). 5 A. Mesozoic carbonatic platform of Mts Lepini. 5 B. Hypothetic mesozoic carbonate sequence of the W edge of Mts Lepini platform. 6. Siliceous and detrital marls mainly palaeogenic. 7. Liassic and cretaceous sequence of «Sabina» facies. 8. Lower and middle Lias detrital and organogenic limestones of «Sabina» facies. 9. Infraliassic dolomitic rocks. 10. Faults and overlappings. 11. Underground flow direction of karstic waters. 12. Water flow direction of hydrothermal circuit. 13. Flow direction of karstic waters through the «Pontina» Graben favoured by the gas pressure. 14. Hot and acid fluids of different origin. 15. Springs. 16. Karstic circuit extension of Mts Lepini. 17. Mixed waters. 18. Hydrothermal circuit extension. 19. Average hydraulic charge.

vogliono mettere in evidenza alcuni aspetti delle condizioni stratigrafiche e strutturali, in parte già chiaramente definiti ed in parte solo ipotizzabili.

Si è cercato innanzitutto di mettere in evidenza i possibili rapporti tra i vari tipi di sedimenti depositi nei diversi ambienti di sedimentazione che si sono succeduti nel tempo nell'ampia fascia che separa la piattaforma carbonatica lepina dalla serie di transizione tirrenica. Nel tentativo di ricostruzione sono stati considerati gli effetti prodotti dalle diverse fasi tettoniche che, con modalità assai varie, hanno interessato la regione.

1. È stata ipotizzata una fase tettonica liassica di apertura del substrato che ha originato la differenziazione degli ambienti sedimentari. Questa fase tettonica, non direttamente riconoscibile nell'area esaminata, ma ben nota nell'Appennino centrale, è stata qui evidenziata perché può assumere particolare significato in questo tipo di ricerca. La differenziazione di ambienti sedimentari a diverso grado di subsidenza comporta infatti, lungo le fasce di separazione, l'apertura di linee di debolezza del substrato che restano variamente attive durante l'intero ciclo sedimentario e che possono venire particolarmente riattivate durante le successive fasi tettoniche distensive (genesì del Graben pontino).

Nella regione pontina, come in molte altre località appenniniche, ubicate soprattutto ai margini della piattaforma carbonatica, le manifestazioni idrotermali e le anomalie geochemiche sembrano particolarmente concentrate dove antiche linee tettoniche liassiche sono state riprese da una tettonica distensiva recente.

2. Viene evidenziato l'accavallamento della piattaforma lepina sui depositi terrigeni che colmano il solco della Valle Latina, motivo di interesse sia strutturale che idrogeologico.

3. Viene indicata una soglia mesozoica (la cui esistenza è desumibile dall'analisi sedimentologica e strutturale) di posizione ancora incerta e presumibilmente variabile nel tempo, ma probabilmente posta al margine occidentale della piattaforma. Si tratta di una serie ridotta giurassico-cretacica, bordata a SO da depositi detritico-organogeni, che si raccordano con la serie di transizione più occidentale.

4. Viene indicato, in modo evidentemente esemplificativo l'accavallamento della struttura di Fogliano sui depositi della scarpata lepina, in analogia con simili situazioni strutturali, note nei vicini monti Sabini, Tiburtini e Prenestini.

5. Viene evidenziato il Graben pontino, formato da una fitta rete di faglie normali; la sua esistenza è sottolineata dall'andamento delle anomalie gravimetriche e dagli effetti della tettonica recente, probabilmente impostata sulle antiche linee di debolezza liassiche.

6. In accordo con i dati geofisici, il Graben pontino figura colmato da depositi terrigeni, in gran parte di natura ancora indefinita ma comunque di bassa densità ed elevata conducibilità elettrica.

Si riconoscono alcune strutture idrogeologiche, certamente sede di attiva circolazione, che vengono qui sotto elencate:

1) La parte emersa della struttura lepina, traslata sul Miocene terrigeno della Valle Latina: è interessata da un vistoso processo carsico ed ospita una falda imponente.

2) La parte della struttura lepina ribassata sotto la Pianura Pontina e coperta da modesti spessori di sedimenti impermeabili quaternari: contiene una ricca falda imprigionata, alimentata lateralmente dall'acquifero della dorsale emersa.

3) Il reticolo di faglie normali che ha dato origine al Graben, visibile direttamente solo al margine nord orientale, ma molto probabilmente ramificato in profondità nei depositi carbonatici sepolti sotto la pianura: questo reticolo è sede preferenziale di circolazione di acque calde, mineralizzate e molto gassate.

4) Le strutture tirreniche sepolte, che sono presumibilmente delle anticlinali variamente deformate, a nucleo carbonatico mesozoico ricoperto da un potente pacco di depositi terrigeni: con tali caratteri le dorsali sepolte sembrano assumere la configurazione di «trappole» e sono certamente sede di circolazione idrotermale.

Si distinguono quindi a grandi linee due situazioni idrogeologiche molto differenti:

a) un acquifero carsico esteso sia nella parte emersa che nella parte ribassata della struttura lepina;

b) un circuito idrotermale che si sviluppa e si manifesta di preferenza attraverso il reticolo di faglie normali e che certamente si estende nel settore centrale del Graben e nelle strutture sepolte tirreniche.

Nei paragrafi seguenti verranno descritti i caratteri fondamentali della falda carsica e del circuito idrotermale e verranno discusse le possibili modalità di interferenza.

4. 1. L'acquifero carsico della struttura lepina

La dorsale lepina è quel settore della struttura dei Volsci esteso a NO del Torrente Amaseno; come si è visto, è formata da carbonati mesozoici di piattaforma: dolomie, calcari dolomitici e calcari prevalentemente micritici, che passano localmente a termini bioclastici, soprattutto ai margini settentrionali della dorsale.

4. 1. 1. Permeabilità

I depositi carbonatici sono stati interessati da tre fasi tettoniche principali che hanno in vario modo influito sulla permeabilità di insieme del rilievo. Nella prima fase di smembramento della piattaforma hanno agito fenomeni dominanti di tensione che hanno dato origine ad una tettonica distensiva; è seguita una fase traslativa caratterizzata da fenomeni di raccorciamento e compressione; l'ultima fase ha nuovamente prodotto nelle masse carsiche uno stato di tensione i cui effetti sono visibili su tutto il rilievo e particolarmente evidenti lungo i limiti sud occidentali. La maggior parte della dorsale, emersa definitivamente alla fine del Mesozoico, è stata interessata da un processo carsico molto intenso e prolungato che ha certamente avuto diverse fasi di sviluppo e una complessa storia evolutiva (ancora poco conosciuta) dovuta alle frequenti variazioni del livello di base.

La variabilità dei tipi litologici, dello stato di fratturazione e di carsificazione, dei processi alterni di dissoluzione e di colmamento dei vuoti, riconoscibili nelle carote di perforazione, sono tutti fattori che certamente hanno determinato nelle masse carsiche lepine una disomogenea distribuzione della permeabilità; questa disomogeneità è desumibile anche dalla variabilità dei valori di trasmissività che sono stati direttamente determinati con prove di emungimento nel settore ribassato della struttura. Misure eseguite su 8 pozzi [27] hanno fornito valori di trasmissività variabili tra 1×10^{-1} e 9×10^{-5} m²/sec; i coefficienti di immagazzinamento valutati su quattro pozzi hanno valori variabili tra $3,6 \times 10^{-4}$ e $8,1 \times 10^{-4}$, caratteristici di una falda imprigionata.

L'irregolare distribuzione della permeabilità influenza certamente le modalità di percolazione in zona satura, mentre non sembra influire sensibilmente sul processo di infiltrazione. Mancano infatti, nella serie carbonatica affiorante, orizzonti a bassa permeabilità tanto estesi e tanto potenti da dare origine a significative falde sospese (l'orizzonte marnoso ad Orbitolina gioca un ruolo del tutto secondario). Il processo di infiltrazione si sviluppa, di conseguenza, in modo prevalentemente verticale, tanto da assicurare una ricarica sufficientemente omogenea e l'accumulo di tutte le acque infiltrate in una falda carsica che satura la base del rilievo.

4. 1. 2. Limiti

L'ipotesi che la dorsale lepino-ausona costituisca un'unità idrogeologica isolata dalle strutture carbonatiche più orientali [8] appare tuttora valida. I dati di bilancio recentemente acquisiti [10] sembrano escludere che il ciclo carsico lepino riceva apporti, attraverso la Valle Latina, dai rilievi carsici simbruino-ernici.

La superficie di sovrascorrimento, che pone a contatto i carbonati lepini con i potenti depositi terrigeni della Valle Latina, chiude ad est la falda carsica ad una quota sempre superiore a 150 m, più elevata rispetto alla quota di saturazione dei carbonati. Lungo le pendici sud occidentali del rilievo, ai margini della Pianura Pontina, i carbonati sono coperti da depositi fluvio-palustri quaternari a quote nettamente inferiori, dove sono distribuite numerosissime sorgenti che erogano complessivamente una portata media annua non inferio-

re a $15 \text{ m}^3/\text{sec}$, se si considera anche la stima delle portate che, per varie cause, sono difficilmente misurabili. Il gradiente idraulico medio dell'acquifero carsico lepino, diretto a SO, è approssimativamente di $5-6 \text{ m}/\text{km}$ [27] e tale quindi che in nessun punto del rilievo la piezometrica possa superare $100-125 \text{ m}$ di quota. Si spiega in tal modo sia l'assenza di sorgenti carsiche lungo la Valle Latina, che l'origine delle sorgenti poste nella valle dell'Amase-no, dove la superficie topografica depressa interseca quella piezometrica. La struttura lepina si può considerare quindi un'unità idrogeologica con limiti sufficientemente ben definiti; qualche incertezza permane ai margini sud-orientali, dove i limiti con la contigua struttura degli Ausoni non sono netti.

4. 1. 3. Bilancio.

Si riportano in sintesi i dati del bilancio idrogeologico dell'acquifero carsico lepino [10].

Superficie del bacino idrogeologico: km^2 508 (calcarei dolomitici 104, calcari 404); precipitazione media annua: $609 \times 10^6 \text{ m}^3$ pari a 838 mm di infiltrazione efficace minima accertata. La somma del ruscellamento e dell'evapotraspirazione risulterebbe di $361 \text{ mm}/\text{a}$. Portata complessiva media annua dell'acquifero, valutata considerando, oltre alle portate misurate alle sorgenti, anche le «perdite», vale a dire la stima approssimativa delle portate che non è stato possibile misurare: $476 \times 10^6 \text{ m}^3$ pari a 937 mm di infiltrazione efficace annua. La somma del ruscellamento e dell'evapotraspirazione ammonterebbe in tal caso a $262 \text{ mm}/\text{anno}$.

Il bilancio qui presentato è stato calcolato utilizzando i dati medi di afflusso meteorico del periodo 1921-50 editi dal Servizio Idrografico; considerando che le stazioni pluviometriche si trovano ad una quota media assai più bassa della quota media del rilievo, si possono ritenere i dati di afflusso utilizzati inferiori a quelli reali.

I dati di portata sono stati ricavati da MOUTON [27], in parte dagli archivi della Cassa per il Mezzogiorno che li ha gentilmente forniti e da numerose misure direttamente eseguite nel periodo 1973-78. Si tratta quindi di dati meno rappresentativi rispetto a quelli delle precipitazioni, ma certamente affidabili, considerato il grado di approssimazione ottenibile in questo tipo di calcolo e la regolarità del regime delle sorgenti maggiori.

D'altra parte una infiltrazione di circa 900 mm su un afflusso superiore ai 1200 mm , nell'ambiente carsico in esame, pare un dato decisamente accettabile, se confrontato con valutazioni analoghe fatte in condizioni idrogeologiche confrontabili.

Nota la portata media della falda carsica ($13-15 \text{ m}^3/\text{sec}$), il gradiente idraulico dell'acquifero ($5-6 \text{ m}/\text{km}$) e la lunghezza del fronte di drenaggio (circa 25 km), la trasmissività media dell'acquifero può essere valutata approssimativamente nell'ordine di $10^{-1} \text{ m}^2/\text{sec}$.

4. 1. 4. Regime

Circa il regime delle sorgenti, rifacendosi alle misure periodiche pubblicate da MOUTON [27] e relative a tutte le sorgenti della Pianura Pontina, che

sono in parte alimentate anche dal rilievo degli Ausoni, risulta che la portata media annua complessiva delle sorgenti varia da un massimo di 18,9 m³/sec nel 1970 ad un minimo di 15,2 m³/sec nel 1975, con una media di 17,15 m³/sec. La portata media mensile varia da un massimo di 22,15 m³/sec (5-1974), ad un minimo di 12,19 m³/sec (9-1971).

Un regime con caratteri di stabilità così marcati, in un ambiente carsico sufficientemente evoluto, induce a pensare che nell'acquifero esiste una particolare situazione capace di agire come elemento stabilizzatore delle portate. In base agli elementi raccolti si può pensare all'esistenza di uno o più reticoli paleocarsici, formati a vari livelli in passate epoche geologiche, che si trovino oggi al di sotto dell'attuale livello di base, mentre un nuovo reticolo si starebbe formando ad un livello superiore.

Diversi elementi sembrano confermare questa ipotesi:

- I sedimenti che costituiscono la soglia impermeabile, dalla quale oggi emergono le acque carsiche, sono quasi sempre riferibili al Quaternario recente; conseguentemente anche l'età delle emergenze deve essere assai recente, mentre è certa l'esistenza di un carsismo pre-quaternario.

- La morfologia della maggior parte delle sorgenti è priva di quei caratteri di senilità che sono tipici delle emergenze che fanno capo a reticoli carsici evoluti.

- Le sorgenti, numerosissime, sono distribuite su un fronte di 25 km; il reticolo carsico, almeno nella parte più prossima all'emergenza, deve essere ancora poco evoluto, tanto da non favorire la canalizzazione e la concentrazione del flusso.

- È stato segnalato [11] e direttamente riconosciuto nelle carote di perforazione dei pozzi Mazzocchio, un orizzonte paleocarsico, ad una quota variabile tra 150 e 250 m sotto il livello del mare, più profondo quindi di altri orizzonti paleocarsici, prodottisi per effetto delle variazioni eustatiche quaternarie, lungo le coste carbonatiche del Mediterraneo. Se il reticolo paleocarsico fosse riferibile al Wurmiano, per trovarsi oggi a 250 m di profondità, avrebbe dovuto subire un ulteriore ribassamento, presumibilmente per cause tettoniche, di un centinaio di metri, in epoca più recente della sua formazione. È significativo rilevare a questo proposito che nei settori ribassati della struttura, terreni quaternari di ambiente salmastro poggiano direttamente su calcari mesozoici, presumibilmente emersi fino ad epoca molto recente.

Non si può, d'altra parte, escludere che orizzonti paleocarsici possano essersi formati anche prima dell'ultima grande variazione eustatica würmiana. Infatti con l'emersione della struttura lepina, nel Cretacico superiore, ha avuto indubbiamente inizio lo sviluppo di un reticolo carsico che si estendeva anche nell'attuale settore ribassato e che presumibilmente aveva il suo livello di base spostato più a SO rispetto all'attuale. Il carsismo ha potuto svilupparsi in questo settore, almeno fino alla trasgressione del mare pliocenico sulla dorsale mesozoica (Pozzo Pontinia) o addirittura fino ad epoca più recente, come risulterebbe dalla stratigrafia dei pozzi Mazzocchio, dove il reticolo carsico aperto nel substrato carbonatico è parzialmente colmato da depositi prevalentemente di ambiente eolico e salmastro, certamente più recenti del Pliocene.

Lungo il margine lepino, particolarmente instabile, eustatismo e tettonica, processi erosivi e sedimentari hanno certamente causato, fino ad epoca recentissima, frequenti variazioni del livello di base, con conseguenze sullo sviluppo del reticolo carsico e delle condizioni di emergenza. Queste condizioni ed i pochi dati sinora disponibili, portano ad ipotizzare l'esistenza di un reticolo carsico molto evoluto ed articolato, esteso all'interno della struttura, a quota inferiore all'attuale livello di base che costituisce ancora il principale livello di drenaggio. Questo reticolo è stato presumibilmente troncato e ribassato dal sistema di faglie dirette che interessa il settore occidentale della struttura. Gli antichi sbocchi della falda carsica sarebbero stati successivamente colmati ed ostruiti dalla deposizione dei sedimenti quaternari, che avrebbero ulteriormente variato la posizione del livello di base. Fra gli antichi condotti e gli attuali punti di emergenza (così come in corrispondenza della attuale zona di fluttuazione della piezometrica), si sta presumibilmente sviluppando un nuovo reticolo, ancora poco evoluto, che ostacola la rapida scarica dell'acquifero carsico.

4. 1. 5. Il settore sepolto dell'acquifero carsico

La situazione idrogeologica del settore della struttura lepina ribassata sotto la pianura, sebbene mascherata da depositi quaternari di spessore variabile, si può ritenere ben conosciuta. Si dispone di una precisa cartografia del tetto del substrato carbonatico ed è nota anche la superficie piezometrica della falda, imprigionata sotto la copertura recente, che in molti settori risulta artesianiana. I risultati delle approfondite ricerche compiute (campagne geofisiche, misure periodiche di portata delle sorgenti e di una trentina di pozzi distribuiti in parte nelle depressioni interne e ai margini del rilievo ed in parte nella pianura) sono stati sintetizzati da MOUTON [27]. Oltre alla definizione delle caratteristiche dell'acquifero, risulta chiaramente dimostrata, dagli studi eseguiti, la continuità dell'acquifero carsico della struttura emersa con la falda artesianiana del settore ribassato.

4. 1. 6. Brevi considerazioni sui caratteri chimico-fisici delle acque carsiche in relazione alla situazione strutturale

Le acque erogate dalle sorgenti e dai pozzi che attingono nella falda carsica hanno caratteristiche chimico-fisiche molto variabili.

Basandosi sui dati della letteratura più volte citata e su numerose analisi appositamente eseguite si può tracciare un primo grossolano quadro, che verrà meglio definito nei paragrafi che descrivono la situazione geochimica.

Tutte le acque sono bicarbonato-calciche; quelle meno mineralizzate hanno salinità totale inferiore a 300 mg/l; circa la metà delle acque sorgive hanno salinità inferiore ad 1 g/l; le punte massime di mineralizzazione raggiungono 3-4 g/l. Tutte le acque più mineralizzate hanno un forte contenuto gassoso, elevati tenori di cloruri e solfati, temperature all'emergenza superiori

alla media locale e generalmente proporzionale alla mineralizzazione. Tutte le acque del gruppo con salinità inferiore a 300 mg/l provengono:

- 1) dalle sorgenti e dai pozzi anche relativamente profondi, ubicati all'interno della dorsale emersa.
- 2) dalla sorgente di Ninfa e dai pozzi a questa più prossimi (Mazzocchio, emergenze numero 3, 6, 10).

Queste emergenze sono alimentate da quel settore dell'acquifero posto a NE delle grandi linee distensive che costituiscono il margine nord-orientale del Graben pontino e corrono lungo i limiti della struttura affiorante.

Tutte le acque più mineralizzate emergono o in corrispondenza od a SO delle principali linee di dislocazione. Si tratta evidentemente di acque provenienti dal ciclo carsico che, prima di emergere attraverso pozzi e sorgenti, si miscelano con acque più calde o mineralizzate che certamente circolano, di preferenza nel reticolo di grandi faglie normali del Graben pontino.

Il fenomeno di miscelazione assume proporzioni imponenti se si considera che la maggioranza delle acque sorgive, in prossimità dell'emergenza, muta sensibilmente la sua composizione, anche se il cambiamento non è tale da modificare completamente i caratteri originari, sempre riconoscibili. Le modalità della miscelazione dipendono ovviamente dalle condizioni idrodinamiche locali e dai rapporti fra le portate dei due cicli.

Essendo il flusso della falda carsica diretto a SO, risulteranno miscelate anche le acque carsiche contenute nel settore posto a SO delle grandi dislocazioni, e quindi nel blocco ribassato sotto la pianura. Queste considerazioni ci sembrano assumere particolare interesse per chi ha il compito di preparare piani di utilizzazione razionale delle acque carsiche ed intenda captarle, con evidente vantaggio, nelle zone dove la mineralizzazione risulta più limitata.

4. 2. Le falde nei terreni quaternari della Pianura Pontina

Nel settore centrale della Pianura Pontina i terreni quaternari più epidermici sono stati attraversati da numerosi pozzi. Si tratta di depositi eterogenici: tufi vulcanici, soprattutto nel settore nord occidentale, sabbie dunari, sabbie ed argille marine, depositi lagunari e lacustri, sedimenti alluvionali e detritici. Le falde idriche contenute in questi terreni hanno, conseguentemente, caratteristiche molto variabili che rispecchiano l'eterogeneità dei tipi litologici: negli orizzonti più permeabili si trovano acquiferi, anche considerevoli, direttamente alimentati per infiltrazione verticale dalle aree di affioramento, che tuttavia possono ricevere apporti provenienti dalla falda delle vulcaniti albane e dalla falda dei carbonati.

Pur trascurando l'analisi dei caratteri delle diverse falde contenute nei sedimenti quaternari è tuttavia necessario sottolineare che questi acquiferi, soprattutto nelle aree più prossime al margine del rilievo lepino hanno ricevuto in passato e ricevono ancora apporti di acque calde mineralizzate risalenti lungo le fratture del basamento. A giudicare dall'estensione dei travertini

affioranti e dalla frequenza degli orizzonti travertinosi, intercalati a varie profondità nei depositi quaternari, si può ritenere che l'apporto di acque calde e sovrassature di provenienza profonda, sia stato in passato e resti ancora un fenomeno molto diffuso in un vasto settore della pianura.

4. 3. Le acque di superficie della Pianura Pontina

Il fitto reticolo di canali che si estende nella Pianura Pontina, per la maggior parte dell'anno è sostanzialmente alimentato dalle acque sorgive. La qualità delle acque superficiali corrisponde quindi a quella delle acque erogate dalle sorgenti. È interessante citare i risultati di uno studio dei caratteri chimico-fisici delle acque dei canali [19, 33] dal quale risulta che le acque marine risalgono lungo i canali di bonifica e si stratificano sotto le acque continentali. Il fenomeno assume dimensioni diverse nelle varie stagioni in relazione al regime delle portate, ma non si spinge all'interno mai più di 7-8 km dalla foce di Porto Badino e di 3-4 km dalla foce del Fiume Sisto. Ad esclusione della fascia costiera, l'ingressione marina è strettamente circoscritta alle immediate vicinanze dei canali di bonifica.

Dallo stesso studio risulta anche una marcata anomalia di salinità, nelle acque di superficie, in una zona che si estende per alcuni km nell'area circostante dei Laghi del Vescovo, e un'anomalia meno marcata in prossimità della sorgente Acqua Puzza. Queste anomalie non hanno alcun rapporto con l'ingressione marina lungo i canali, ma sono evidentemente da attribuirsi alla salinità delle acque sorgive.

4. 4. Il circuito idrotermale

Dallo studio idrogeologico regionale è risultato che le acque della falda lepina, in corrispondenza del settore emerso del rilievo, hanno la mineralizzazione bicarbonato-calcica tipica delle acque carsiche; la loro salinità, il loro contenuto gassoso e la temperatura, crescono nettamente dove il circuito carsico penetra le grandi fratture che danno origine al Graben pontino.

Per giustificare questa ben localizzata variazione di caratteri chimico-fisici, viene qui ammessa l'esistenza di un «circuito idrotermale» che si manifesta prevalentemente lungo le fratture del Graben e che, mescolandosi con le acque carsiche, produce le vistose anomalie riscontrate. Il circuito idrotermale si estende anche alla struttura sepolta di Fogliano.

4. 4. 1. Caratteristiche

Allo stato attuale delle ricerche, è possibile conoscere la natura del ciclo idrotermale solo attraverso le sue manifestazioni superficiali, che sono il prodotto di miscelazione di un fluido, di natura non ancora ben definita, con le acque carsiche.

Il fenomeno assume dimensioni notevoli: se si fa eccezione per le sorgenti di Ninfa, appositamente scelta come tipica sorgente carsica, tutte le altre sorgenti hanno sofferto un processo di miscelazione più o meno spinto, tanto che nelle sole sorgenti alimentate dalla struttura lepina, almeno 10-12 m³/sec di acque sorgive risultano miscelate; se si considerano tutte le sorgenti della Pianura Pontina la portata delle acque miscelate supera 15 m³/sec.

Si può ritenere che la miscelazione avvenga di preferenza all'incrocio fra le grandi linee di dislocazione ed il reticolo paleocarsico, che si estende ad una profondità crescente da 150-200 m, nel settore più prossimo alla dorsale, fino a valori assai elevati spostandosi verso il centro del Graben.

Gli elementi finora raccolti non sembrano sufficienti per definire con sicurezza le caratteristiche chimico-fisiche dei fluidi termali; si può tuttavia ritenere che, almeno all'origine, la componente gassosa ne costituisca la parte fondamentale, non solo per la natura delle manifestazioni, ma soprattutto per motivi idrodinamici che verranno esaminati in seguito.

4. 4. 2. Estensione

È evidente la stretta relazione tra la distribuzione delle manifestazioni e l'andamento delle linee strutturali che danno origine al Graben pontino. Considerazioni analoghe si possono fare in molti altri settori dell'Appennino dove, come avviene nella Pianura Pontina, manifestazioni idrotermali ed emanazioni gassose si trovano allineate lungo le faglie distensive di età recente, impostate in corrispondenza di antiche e profonde lacerazioni crostali.

La sede preferenziale della circolazione idrotermale è certamente il reticolo di grandi faglie normali che dà origine al Graben e che si estende sotto l'intera pianura, fino ad interessare le strutture tirreniche sepolte.

A partire da questo reticolo principale, il circuito termale si ramifica certamente anche all'interno di quelle rocce che siano interessate da fratture e che posseggano caratteri di permeabilità e di porosità tali da consentire la mobilità e l'immagazzinamento delle acque e dei gas. È qui evidente il riferimento ai depositi di margine e di scarpata che sono stati ipotizzati ai limiti della piattaforma carbonatica ed alle formazioni più schiettamente carbonatiche della serie di transizione.

Pare quindi lecito ipotizzare che il circuito idrotermale interessi l'intero Graben pontino e si estenda nelle strutture tirreniche di facies sabina, come peraltro viene dimostrato dai dati desunti dall'analisi del Pozzo Fogliano.

4. 4. 3. La circolazione idrotermale nella struttura di Fogliano

Delle strutture sepolte al margine tirrenico si conosce ben poco. In base ai dati geologici elaborati è stato presentato un modello esemplificativo della struttura di Fogliano (fig. 4) dal quale risulta che la struttura, formata da sedimenti di facies sabina, può contenere buoni orizzonti permeabili in corrispondenza del Cretacico inferiore e soprattutto del Lias medio, dove notoriamente dominano le facies più schiettamente calcaree.

Nel modello ipotizzato appare garantita la continuità idraulica con la dorsale lepina che assumerebbe quindi il ruolo di una potenziale area di

ricarica degli acquiferi della dorsale sepolta. Ovviamente, allo stato attuale delle ricerche nulla è possibile dire sull'entità della ricarica che sarebbe assicurata nel caso di uno sfruttamento massiccio, perché troppo incerte restano le condizioni strutturali in corrispondenza del Graben pontino. Poiché è stato dimostrato, con criteri geochemici, che le acque contenute nella struttura sono di sicura origine continentale, lo schema proposto può assumere maggiore credibilità.

Sulla struttura di Fogliano dati diretti, di notevole interesse, ci vengono dai due pozzi perforati alla profondità di 1000 m circa, a distanza di poche decine di metri tra di loro. I due pozzi, alla base, hanno penetrato l'acquifero della «scaglia» detritica, di età campaniano-maestrichtiana, dopo avere attraversato una serie lacunosa prevalentemente argilloso-marnosa: 450 m di argille siciliane, calabriane e plioceniche, poche decine di metri di marne e calcareniti mioceniche, 250 m di marne selcifere e detritiche eoceniche e quindi calcari marnosi e detritici del Cretacico superiore [32].

Il pozzo n. 1, perforato nel luglio del 1973, da tempo non è più in produzione; erogava una portata costante di 52 l/sec di acqua a temperatura leggermente superiore a 50°C.

Il pozzo n. 2, figg. 5 e 6, che è stato chiuso nell'estate del 1977, aveva un regime intermittente caratteristico: ogni 6-7 ore erogava spontaneamente per 45-60 minuti acqua salata (11 g/l), figg. 7 e 8, molto gassata ed a temperatura variabile, che raggiungeva un massimo di 49°C⁽¹⁾.

Dopo un periodo di 6-7 ore di inattività dalla bocca del pozzo, lasciata sempre aperta, cominciava ad uscire gas a debole pressione. Successivamente aveva inizio un gocciolio di acqua, a temperatura di 18°-20°C, contenente evidenti tracce di idrocarburi. La portata aumentava molto lentamente, (fig. 5), ma costantemente fino a raggiungere, dopo 45 minuti circa, almeno una trentina di litri al secondo erogati con notevole violenza (fig. 6). Con la portata cresceva anche la temperatura (nella fase di massima erogazione toccava i 49°C) ed il contenuto dei gas nell'acqua. Dopo i 15 minuti circa il getto, sempre violento, diveniva intermittente con intervalli sempre più distanziati. Fra un getto ed il successivo continuava, irregolarmente, l'erogazione di gas.

⁽¹⁾ Tenendo conto degli elementi raccolti si è cercato di spiegare il meccanismo che provoca l'erogazione ad intermittenza. Il volume erogato in ciascun ciclo, stimato in modo molto approssimativo tra 30 e 40 m³, è confrontabile con il volume interno della colonna di rivestimento del pozzo. Ogni ciclo provoca quindi lo svuotamento pressoché totale dell'acqua contenuta nel tubo, mentre nell'intervallo tra una erogazione e l'altra il pozzo si riempie tanto lentamente da consentire il parziale raffreddamento di quella parte della colonna d'acqua che si trova più prossima alla superficie. La temperatura dell'acqua non supera all'uscita i 50°C, mentre da attendibili informazioni raccolte risulta che la temperatura misurata a fondo foro è di 65°C. In tali condizioni il violento processo di erogazione di acqua e gas non può essere riferito all'ebollizione dell'acqua, ma più verosimilmente risulta attivato dai gas che vengono erogati con l'acqua.

Nella fase terminale di ogni ciclo, a seguito dello svuotamento del pozzo, si determina a fondo foro una rapida e marcata decompressione di circa un centinaio di atmosfere che produce la degassazione delle acque di falda più prossime al pozzo. Cessata l'erogazione entra quindi nella colonna di rivestimento acqua degassata che riempie progressivamente il tubo. Il tempo di riempimento, data la portata relativamente scarsa, deve essere sufficientemente lungo, tanto da consentire all'acqua di equilibrare la sua temperatura con quella dell'ambiente circostante.

Quando il casing si sarà in buona parte riempito, nella parte superiore si troverà dell'acqua più fredda, degassata e pesante, mentre nella parte inferiore continuerà ad entrare acqua più calda, gassata e leggera. La forte pressione esercitata dalla colonna d'acqua deve limitare al fondo del pozzo la liberazione dei gas disciolti tanto che tra un ciclo ed il successivo dalla bocca del pozzo la fuoriuscita di gas non è percepibile.

L'acqua che si trova nella parte superiore, spinta dalla pressione sottostante, comincia ad uscire lentamente dal pozzo in modo che l'acqua fredda e pesante viene gradualmente sostituita da acqua più calda e leggera che entra alla base. La progressiva diminuzione del peso della colonna ed il graduale aumento della temperatura favoriscono l'instaurarsi di condizioni che consentono l'ebollizione dei gas disciolti.

Quando si innesca il processo, il gas liberatosi agisce da propellente e provoca la violenta erogazione, prima continua e poi intermittente, fino all'esaurimento per progressivo svuotamento del casing.

Cessata la fuoriuscita di acque continuava per un breve periodo l'erogazione di solo gas; esaurita l'emissione di gas, il pozzo restava inattivo fino all'inizio del ciclo successivo. Le modalità di erogazione osservate più volte durante il periodo della ricerca, restavano sostanzialmente identiche.

Prove eseguite, poco dopo la costruzione del pozzo n. 2, indicano che la pressione alla testata, chiusa, raggiunge le 15 atm. e che una riduzione



Fig. 5 - Pozzo «Fogliano 2». Chiuso nell'estate del 1977 il pozzo aveva un regime di erogazione spontanea intermittente: ogni 6-7 ore erogava per circa 1 ora acqua salata (11 g/l); molto gassata, a temperatura variabile che raggiungeva un massimo di 49°C. In fotografia il pozzo poco dopo l'inizio della fase di erogazione: l'acqua è ancora fredda (18-20°C) con scarso contenuto di gas e portate nettamente inferiori alla massima che si raggiunge dopo circa 45 minuti (v. fig. 6).

Fogliano Well no. 2. The well, with a spontaneous and intermittent discharge was closed in the summer 1977. The discharge was about 1 hour after 6-7 hours of inactivity. The water supplied is characterized by high gas content and salinity (11 g/l) with a temperature of 49°. The picture shows the beginning of the eruption: the water is yet cold (18-20°C) with a low gas content and yields, decisely lower respect to the maximum values reached after about 45 min. the eruption started. (see fig. 6).

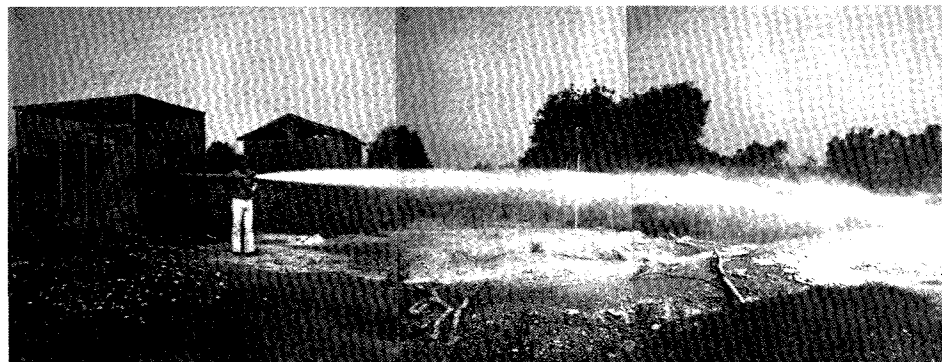


Fig. 6 - Pozzo «Fogliano 2» (v. fig. 5). In fotografia il momento di massima erogazione (circa 30 l/s).

Fogliano Well no. 2 (see also fig. 5). The picture shows the well during the time of its maximum yield (about 30 l/sec).

dell'apertura consente un'erogazione costante di 0,65 l/sec con una pressione a testa pozzo di 10 atm. ed una temperatura di 55°C.

Pare interessante sottolineare il ruolo fondamentale esercitato dalla pressione dei gas nel processo di erogazione; l'argomento verrà ripreso successivamente, trattando dell'origine del circuito idrotermale.

Circa la produttività dei Pozzi Fogliano, assai scarsa se si considera la situazione strutturale in cui cadono, si deve osservare che le perforazioni sono state arrestate negli orizzonti superiori della «scaglia» detritica, cioè in una formazione relativamente marnosa, la cui permeabilità è piuttosto scarsa. È molto probabile che negli orizzonti inferiori più schiettamente calcarei e presumibilmente fratturati (formazione della «maiolica», della «corniola» e del «massiccio») od in orizzonti ancora più bassi, esistano permeabilità nettamente superiori e temperature assai più elevate.

L'erogazione ritmica durata 5 anni si è ripetuta costantemente con analoghe modalità, né sono stati osservati elementi che indichino una tendenza del fenomeno ad esaurirsi. È pertanto accertato che l'acquifero, nei limiti della ridotta erogazione cui è stato sottoposto, risulta regolarmente rialimentato in acqua e gas, che conservano temperatura costante.

Sulle caratteristiche dell'acquifero non si hanno molti dati, oltre quelli desumibili dall'analisi strutturale, dalla stratigrafia e dell'attività del pozzo. L'anomalia gravimetrica positiva pontina, che a suo tempo ha suggerito la perforazione del pozzo, è piuttosto marcata e pare in continuità con gli alti gravimetrici di Tor Caldara e del Circeo: è significativo a questo proposito accennare alle manifestazioni presenti in corrispondenza di Tor Caldara [39, 9], che sembrerebbero confermare una continuità del ciclo idrotermale nell'intero arco delle strutture sepolte; il circuito idrotermale assumerebbe, in tale caso, dimensioni imponenti.

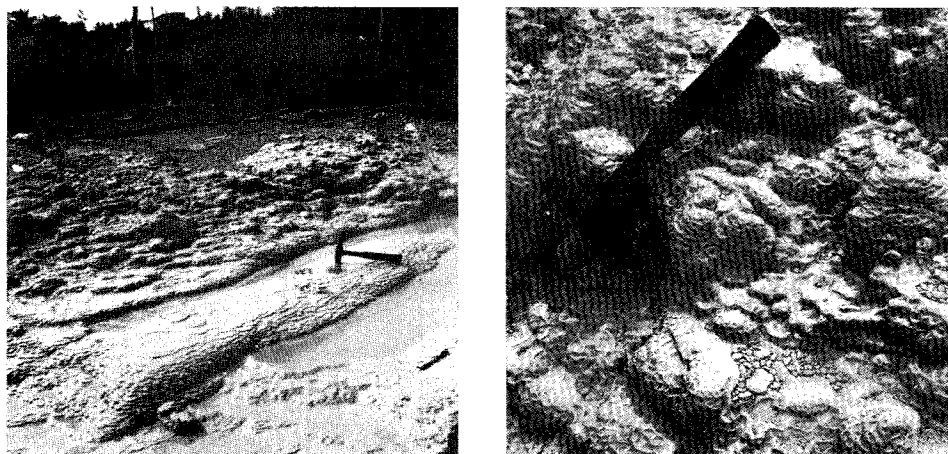


Fig. 7 e 8 - Pozzo «Fogliano 2». Concrezioni calcaree prodotte dalle acque salate (11 g/l) del pozzo: situazione nell'estate 1977.

Fogliano Well no. 2. Concretions produced by the precipitation of calcium carbonate from the saline waters (11 g/l) in the surrounding of the well. This situation is referred to the summer 1977.

5. PARTE SPERIMENTALE

Nel corso del presente lavoro sono state effettuate le analisi chimiche ed isotopiche delle acque erogate dalle seguenti sorgenti e pozzi le cui ubicazioni sono indicate nella fig. 3.

Gruppo	Sorgente o pozzo	N°
	Sorgente Ninfa	1
Laghi del Vescovo	Sorgente Fontana Muro	2
	Sorgente 1	3
	Sorgente 2	4
	Sorgente 3	5
Scafarapini	Sorgente Sardellane	6
Sermoneta	Sorgente Acqua Puzza	7
Acqua Puzza	Sorgente Catena	8
	Pozzo Artesiano (prossimo al gruppo Acqua Puzza)	9
	Pozzo Ferriere	10
	Pozzo Fogliano 2	11

Analisi chimiche

Per le analisi chimiche si sono adottate le procedure sperimentali standard [34]; in particolare gli elementi alcalini ed alcalino-terrosi sono stati determinati per spettrofotometria di assorbimento atomico. Il pH, la conducibilità e la temperatura sono stati misurati direttamente in campagna.

Analisi isotopiche

Le analisi isotopiche dell'ossigeno sono state eseguite secondo il metodo di EPSTEIN e MAYEDA [20], consistente nell'equilibrare l'acqua in esame con CO₂ commerciale e nel determinare quindi il rapporto ¹⁸O/¹⁶O di questo gas per spettrometria di massa.

La misura dei rapporti D/H è stata eseguita sull'idrogeno ottenuto dai campioni mediante riduzione con uranio metallico a circa 700-800°C [22].

I risultati analitici sono espressi, come di consueto, in termini della grandezza δ , che rappresenta la deviazione, in parti per mille, del rapporto isotopico considerato (¹⁸O/¹⁶O, D/H) del campione rispetto a quello di un opportuno standard di riferimento, costituito in entrambi i casi dallo «SMOW» (Standard Mean Ocean Water) [16].

5. 1. Presentazione e discussione dei risultati

I risultati delle determinazioni chimiche sono riportati in Tabella 1. Già da un semplice esame dei valori analitici tabulati si rilevano notevoli differenze di chimismo; queste differenze vengono maggiormente evidenziate dall'impiego del diagramma di tipo Piper riportato in fig. 9. In esso, come di consueto, i punti rappresentativi il chimismo dei campioni analizzati hanno dimensioni crescenti in funzione della salinità. Il cerchio pieno indicato con la lettera M rappresenta la composizione media dell'acqua oceanica. Nel grafico risultano chiaramente distinguibili tre famiglie di acque, una a cloruri alcalini (campioni 5, 6, 7, 11) indicata con la lettera A, un'altra, C, a bicarbonati alcalino terrosi (campioni 1, 3) ed infine un'ultima famiglia, B, costituita dalle altre sorgenti considerate (campioni 2, 4, 8, 9, 10) i cui punti rappresentativi cadono in una posizione intermedia rispetto ai due raggruppamenti precedenti. Le acque costituenti la famiglia A presentano valori della conducibilità compresa tra circa 3.000 e 15.000 $\mu\text{mho cm}^{-1}$, tenori elevati di Na^+ e Cl^- (da 490 a 2.854 mg/l e da 850 a 4.467 mg/l rispettivamente) ed infine contenuti nettamente più alti di Sr^{++} e di F^- . Nell'ambito di questa famiglia va rilevata la modesta termalità delle acque dei Laghi del Vescovo e la termalità più elevata dell'acqua di Pozzo Fogliano 2. La concentrazione degli ioni Ca^{++} ed SO_4^- delle acque di questo gruppo è tale che, come appare dal grafico di fig. 10, tre di esse (campioni 5, 6, 7) sono prossime alla saturazione rispetto al gesso ed all'anidrite, mentre l'acqua di Pozzo Fogliano 2 è decisamente satura rispetto ad entrambi. Tali acque sono inoltre sature rispetto alla calcite ($I_s > 0,1$).

Le acque della famiglia C presentano una conducibilità sempre inferiore a 750 $\mu\text{mho cm}^{-1}$, mentre la concentrazione degli ioni alcalini e dei cloruri risulta abbastanza contenuta da poter essere confrontata con quella delle acque meteoriche della zona [39]. L'aumento della salinità all'interno di questa

Fig. 9 - Con i cerchi pieni sono riportati sul diagramma di Piper i punti rappresentativi del chimismo delle acque studiate. Il diametro dei cerchi, come d'uso, è proporzionale alla salinità delle acque. Osservare la netta suddivisione delle acque in tre gruppi, contrassegnati dalle lettere A, B, C.

Piper diagram showing the main chemical features of the waters analyzed. The existence of three groups of waters is clearly noticeable.

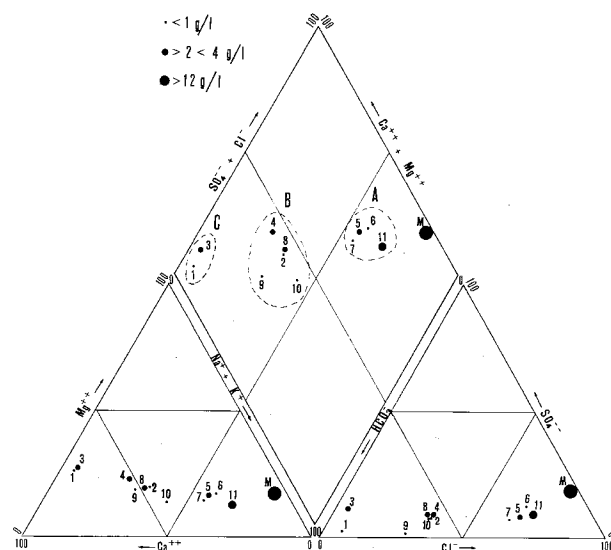


TABELLA 1 – Caratteri chimici e chimico-fisici delle acque studiate. I valori del pH, della temperatura e della conducibilità elettrica sono stati misurati direttamente in campagna.

Chemical analyses of the waters studied. Concentrations are given in mg/l and meq/l (in parentheses). Ph and C measured in the field.

Denominazione della sorgente o pozzo	T °C	pH	C µmho/cm	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	F ⁻	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Sr ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂
Ninfa	12,7	7,3	360	238,0(3,9)	< 5	12,4(0,35)	0,045(0,002)	13,0(1,07)	59,4(2,96)		4,4(0,19)	0,7(0,02)	5,0
Fontana Muro	15,0	7,4	840	375,3(5,85)	39,4(0,82)	129,1(3,64)		24,6(2,02)	99,6(4,97)		77,0(3,35)	6,3(0,16)	6,0
Laghi del Vescovo 1	23,0	6,3	5320	973,2(15,95)	247,9(5,16)	1438,9(40,58)		120,2(9,88)	353,2(17,62)	2,6(0,029)	770,0(33,48)	74,0(1,89)	42,3
Laghi del Vescovo 2	24,2	6,6	3270	497,3(8,15)	247,4(5,16)	852,5(24,04)		77,6(6,38)	181,8(9,07)	1,4(0,016)	493,0(21,44)	19,1(0,49)	
Laghi del Vescovo 3	19,2	6,5	3360	710,0(11,65)	170,5(3,55)	863,3(24,35)	0,42(0,022)	78,9(6,49)	237,5(11,85)	1,2(0,013)	497,0(21,61)	21,2(0,54)	
Sardellane	16,2	7,8	840	375,3(6,15)	38,9(0,81)	140,0(3,95)		29,4(2,42)	111,6(5,57)		59,8(2,60)	5,9(0,15)	
Acqua Puzza	14,5	6,7	670	451,0(7,40)	44,2(0,92)	12,4(0,35)		28,3(2,33)	118,0(5,98)		8,3(0,36)	3,4(0,09)	10,0
Sorgente Catena	15,6	6,7	1260	530,8(8,7)	66,3(1,38)	181,5(5,12)	0,23(0,012)	21,1(1,73)	167,0(8,34)		109,5(4,76)	10,0(0,26)	14,0
Pozzo Artesiano	16,0	7,3	995	441,8(6,75)	65,2(1,17)	145,4(4,1)		17,9(1,47)	102,6(5,12)		92,5(4,02)	48,9(1,25)	
Pozzo Ferriere	14,0	7,0	780	371,6(6,09)	11,0(0,23)	94,0(2,65)		19,7(1,62)	95,0(4,74)		56,8(2,47)	12,8(0,33)	
Pozzo Fogliano	48,0	6,1	14240	2249,7(36,87)	783,0(16,32)	4467,0(125,98)	0,9(0,047)	277,8(22,84)	733,7(36,61)	6,6(0,075)	2584,4(112,38)	253,9(6,49)	

famiglia è legato prevalentemente alla presenza dello ione bicarbonico e subordinatamente a quella dello ione solforico; queste acque risultano nettamente sottosature rispetto al gesso, mentre sono prossime alla saturazione nei confronti della calcite.

Nel diagramma $[Cl^-]/[SO_4^{2-}]$, fig. 11, si osserva una buona correlazione tra le acque delle famiglie A e B, mentre nulla può essere detto per le uniche due appartenenti alla famiglia C. Le acque della famiglia B, come già detto, presentano un chimismo intermedio rispetto a quello degli altri due gruppi (fig. 9); queste caratteristiche ibride risultano anche dal grafico di fig. 12, $[Cl^-]/Cond.$ e da quello di fig. 13, $[SO_4^{2-}]/Cond.$; si potrebbe pertanto formulare l'ipotesi che le acque comprese in questa famiglia derivino dalla miscelazione, in proporzioni diverse, di acque degli altri due tipi e più precisamente di un'acqua tipo «Ninfa» con una di tipo «Fogliano», rispettivamente a minore ed a maggiore contenuto salino. È evidente che i due termini estremi potrebbero anche essere rappresentati rispettivamente da un'acqua ancor meno mineralizzata (acqua meteorica) e da un'acqua ancor più mineralizzata, sulla natura della quale torneremo in seguito. Le implicazioni idrogeologiche di una simile ipotesi rivestono una grande importanza e sono state oggetto di un altro lavoro [18]: discuteremo più avanti con il supporto dei dati isotopici la sua attendibilità.

I valori di $\delta^{18}O$ e di δD ottenuti per le acque analizzate nel presente studio sono riportati in Tabella 2. La loro spiccata uniformità ed il loro campo di variabilità da $-6,1$ a $-7,6\%$ per il $\delta^{18}O$ e da $-34,9$ a $-44,2\%$ per il δD , suggeriscono per tutte le acque esaminate una origine in comune e legata alle precipitazioni meteoriche locali. Quest'ultima caratteristica risulta molto chiaramente dal grafico di fig. 14, nel quale è stata posta a confronto la composizione isotopica delle piogge della zona, rappresentata dall'equazione $\delta D = 8 \delta^{18}O + 14$ (TISSIER, 1976) [35], con quella dei campioni analizzati. Da un

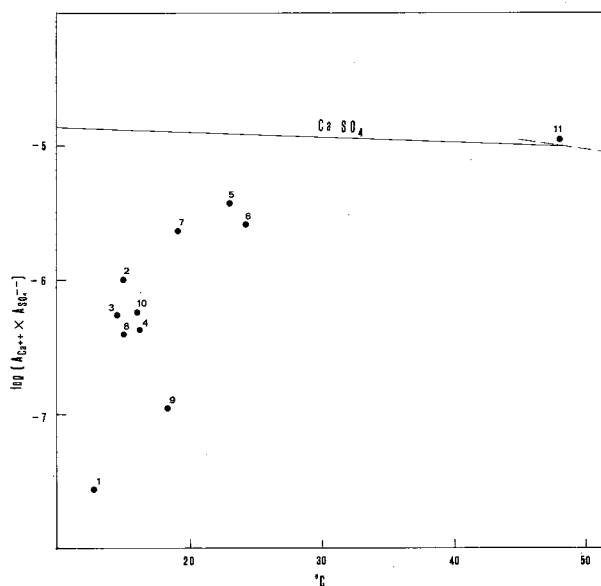


Fig. 10 - Proiezione dei punti rappresentativi delle acque studiate in un diagramma $\log(A_{Ca^{++}} \times A_{SO_4^{2-}})$ in funzione della temperatura. La retta divide le acque saturate rispetto al $CaSO_4$ da quelle sottosature.

Plot of $\log(A_{Ca^{++}} \times A_{SO_4^{2-}})$ as a function of the temperature, showing the degree of saturation of the various water samples with respect to $CaSO_4$. It is evident that sample 11 (Pozzo Fogliano 2) is oversaturated; all the others lie below the saturation line.

TABELLA 2 - Composizione isotopica dell'idrogeno e dell'ossigeno delle acque provenienti da Ninfa, Acqua Puzza, Sorgente Catena, Laghi del Vescovo 3, Pozzo Ferriere e Pozzo Fogliano 2.

Oxygen and hydrogen isotope analyses and dates of collection of waters from some sampling localities (Ninfa, Acqua Puzza, Sorgente Catena, Laghi del Vescovo 3, Pozzo Ferriere, Pozzo Fogliano 2).

Campione	Data di prelievo	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta\text{D}\text{‰}$
Ninfa	18 giugno 1976	-7,6	-44,2
	8 luglio 1976	-7,3	
	14 ottobre 1976		
Acqua Puzza	31 maggio 1976	-7,0	-41,7
	8 luglio 1976	-7,1	
	14 ottobre 1976	-6,9	
Sorgente Catena	31 maggio 1976	-6,9	-42,8
	8 luglio 1976	-6,9	
	14 ottobre 1976	-6,7	
Sorgente 3 - Laghi del Vescovo	18 giugno 1976	-6,6	-41,4
	8 luglio 1976	-6,7	
	14 ottobre 1976	-6,5	
Pozzo Ferriere	8 luglio 1976	-6,4	
	14 ottobre 1976	-6,3	
Pozzo Fogliano 2	31 maggio 1976	-6,1	-34,9
	8 luglio 1976	-6,1	
	14 ottobre 1976	-6,1	

semplice esame del diagramma di fig. 10 possiamo inoltre escludere che le acque analizzate siano andate soggette ad evaporazione e/o abbiano subito, nel corso della circolazione, apprezzabili interazioni con le rocce del basamento: infatti tali fenomeni avrebbero dovuto riflettersi sui valori del $\delta^{18}\text{O}$ e del δD in modo tale da far scartare i punti rappresentativi dalla retta delle acque meteoriche locali.

Le differenze riscontrate tra i rapporti $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H delle diverse acque esaminate possono essere imputate al fatto che i rispettivi acquiferi sono stati alimentati od in differenti periodi dell'anno, sì da risentire delle variazioni stagionali di composizione isotopica delle precipitazioni, o da acque infiltratesi in aree di ricarica situate a quote diverse, quindi influenzate dall'«effetto altitudine». Per esaminare la prima possibilità è stata determinata la composizione isotopica dell'ossigeno di alcune delle acque studiate per un

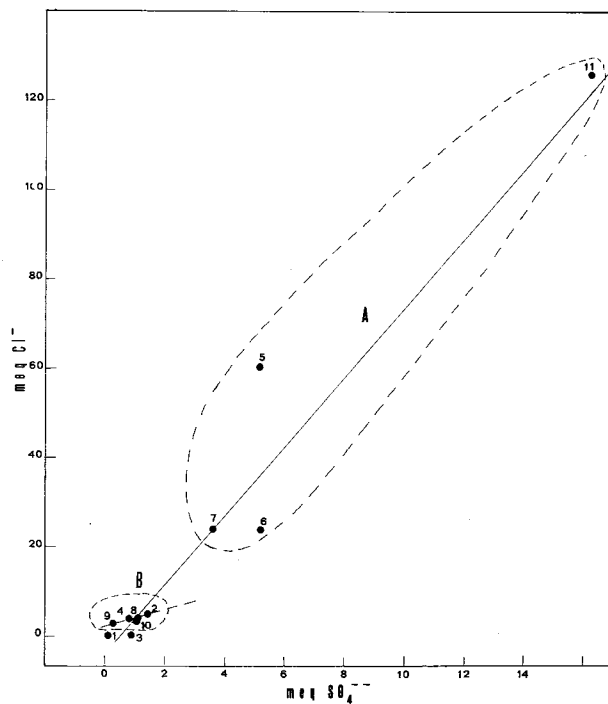


Fig. 11 - Diagramma $[SO_4^{2-}]/[Cl^-]$. Si può osservare una debole correlazione generale tra tutte le acque esaminate e l'esistenza di una correlazione tra le acque della famiglia B.

$[SO_4^{2-}]$ vs. $[Cl^-]$ plot. Note the weak correlation of these parameters for all the water samples as well as within the B group.

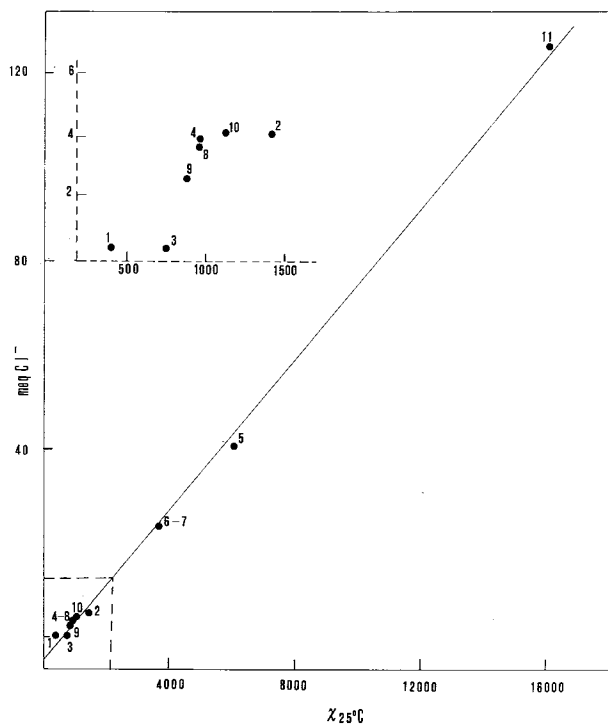


Fig. 12 - Relazione tra la concentrazione dello ione Cl^- ed il valore della conducibilità elettrica nei campioni di acqua esaminati. La correlazione risultante è buona: $r = 0,999$.

Diagram showing the linear relationship between $[Cl^-]$ and $Z_{25^{\circ}C}$ ($r = 0.999$).

arco di tempo di alcuni mesi. I risultati, graficizzati in fig. 15, mostrano una variabilità lieve, ma significativa, per la sola acqua di Ninfa; la variabilità è nulla per quella di Pozzo Fogliano 2 e del tutto trascurabile per le altre acque. Ciò dimostra che le variazioni del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ osservate nelle acque campionate (tranne che per la sorgente di Ninfa) non sono legate in maniera apprezzabile a variazioni stagionali di composizione isotopica delle precipitazioni locali; queste, infatti, risultano essere dell'ordine del 5‰ circa [39]. Queste conclusioni sono avvalorate anche dal contenuto in tritio misurato nell'acqua di Ninfa ($41 \pm 2,5$ U.T.) e del Pozzo Fogliano 2 ($0,0 \pm 0,7$ U.T.); questi risultati indicano per Ninfa una alimentazione legata a precipitazioni recenti, con tempi di residenza relativamente brevi, e per l'acqua erogata da Pozzo Fogliano 2 una provenienza da un reservoir ben mescolato, di grandi dimen-

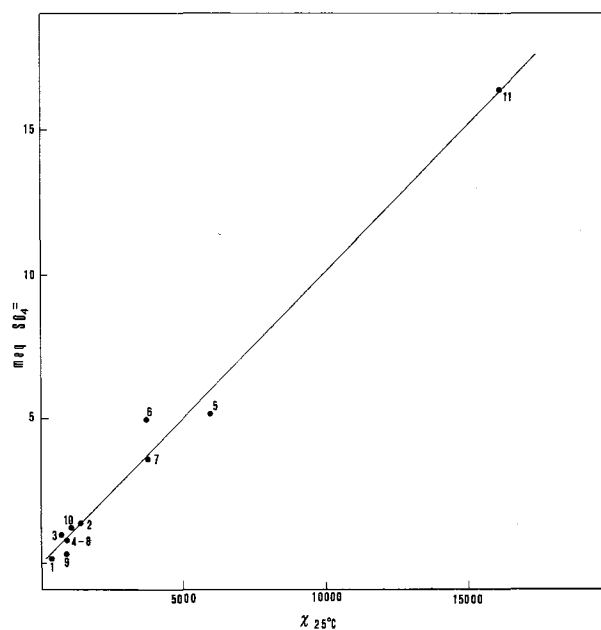


Fig. 13 - Relazione tra la concentrazione dello ione solforico ed il valore della conducibilità elettrica nei campioni di acqua esaminati.

Diagram showing the linear relationship between $[\text{SO}_4^{2-}]$ and $\chi_{25^\circ\text{C}}$ ($r = 0.99$).

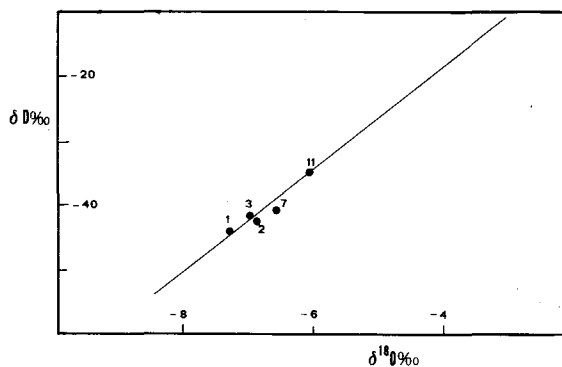


Fig. 14 - Relazione intercorrente tra il δD ed il $\delta^{18}\text{O}$ per le acque analizzate nel corso del presente lavoro. La linea retta rappresenta la composizione delle acque meteoriche locali (TISSIER, [35]).

Relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ for the water samples studied in this work. The solid line represents the isotopic composition of the local meteoric waters (TISSIER, [35]).

sioni e con tempi di residenza nel sottosuolo superiori almeno ad alcune decine di anni.

Consideriamo ora l'eventualità che le differenze di composizione isotopica delle varie acque siano in relazione alle diverse quote delle aree di ricarica. Per le precipitazioni interessanti il versante tirrenico del Lazio meridionale, ZUPPI et Alii [39] hanno ricavato la seguente relazione tra il $\delta^{18}\text{O}$ e l'altitudine, h , espressa in metri:

$$\delta^{18}\text{O} = -3,44 \cdot 10^{-5} h - 5,14$$

Secondo questa relazione, una variazione del $\delta^{18}\text{O}$ pari all'errore analitico ($\pm 0,1\%$) già comporta un'incertezza su h di ± 30 metri. Ne consegue che le differenze di quota calcolabili in base ai nostri dati per le sorgenti pedemontane non sono significative da un punto di vista idrogeologico. Potrebbe essere significativa la differenza tra l'altitudine stimata per l'area di ricarica delle sorgenti di Ninfa (circa 630 metri) e di Pozzo Fogliano 2 (circa 280 metri). Comunque dobbiamo escludere che la ricarica di Pozzo Fogliano 2 sia totalmente dovuta ad acque meteoriche infiltratesi a quota prossima a quella del mare; il $\delta^{18}\text{O}$ medio annuo delle piogge della Pianura Pontina, secondo ZUPPI et Alii [38] è infatti pari a $-5,2\%$.

Con il supporto dei dati isotopici vagliamo ora la possibilità, formulata all'inizio sulla scorta dei soli dati chimici, che le acque mediamente mineralizzate comprese nella famiglia B (fig. 5) potessero essere interpretate come

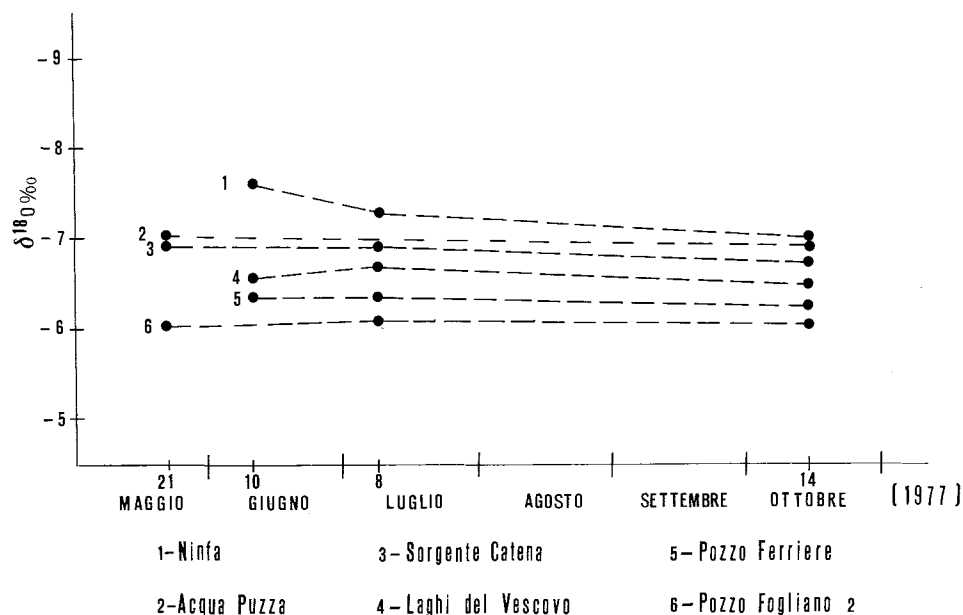


Fig. 15 - Nel diagramma sono riportate le variazioni stagionali del $\delta^{18}\text{O}$ per le acque di Ninfa, Pozzo Ferriere, Laghi del Vescovo 3, Acqua Puzza, Sorgente Catena e Pozzo Fogliano 2.

Seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$ for the water from Ninfa, Pozzo Ferriere, Laghi del Vescovo 3, Acqua Puzza, Sorgente Catena e Pozzo Fogliano 2.

prodotti di miscelazione dei due termini a salinità estrema, Ninfa e Fogliano. Le acque della famiglia B esaminate per la loro composizione isotopica mostrano effettivamente valori del δD e del $\delta^{18}O$ intermedi rispetto ai due termini estremi, che, ricordiamolo, potrebbero non essere necessariamente costituiti da Ninfa e da Fogliano. Ninfa è abbastanza accettabile, come termine estremo, stante la sua diretta derivazione meteorica, il breve tempo di residenza, la sua mineralizzazione; Fogliano potrebbe già non essere un termine puro. Purtuttavia, nonostante che i dati chimici ed isotopici determinati per le acque della famiglia B forniscano valori intermedi tra i due estremi, non sempre si trova una buona corrispondenza tra le percentuali, calcolate separatamente con i dati isotopici e chimici, delle acque di Ninfa e di Fogliano che si sarebbero miscelate. Ciò significa che il semplice modello di miscelazione proposto non è in grado di spiegare soddisfacentemente le differenze di composizione chimica ed isotopica della serie di acque studiate. Queste potrebbero essere interpretate ammettendo che le acque meteoriche che si infiltrano sui rilievi carbonatici e sulla pianura vengano in contatto, in diverse proporzioni, dopo aver differenzialmente circolato nel sottosuolo. Questa ipotesi però, è in aperta contraddizione con le caratteristiche idrogeologiche e strutturali della zona, nettamente contrarie alla possibilità di una infiltrazione nella Pianura Pontina di acque meteoriche in profondità, ed inoltre non giustifica sufficientemente le caratteristiche chimico-fisiche delle acque erogate dalle sorgenti pedemontane e dal Pozzo Fogliano 2, che sottintendono fenomenologie più complesse. A supporto di quest'ultima affermazione portiamo una serie di dati, relativi a Pozzo Fogliano 2, che concorrono ad indicare una circolazione di tipo profondo, con complicati e molteplici processi di mineralizzazione. Ricordiamo che l'acqua di Pozzo Fogliano 2 fuoriesce alla temperatura di 48°C, mentre in fondo al pozzo sono state misurate temperature di circa 65°C. Sempre in questo pozzo l'emissione dell'acqua avviene sotto elevata pressione ed è accompagnata da abbondanti manifestazioni gassose⁽²⁾. La particolare mineralizzazione dell'acqua può essere relazionata a lisciviazione di rocce evaporitiche ed eventualmente di rocce vulcaniche (apporti di F^- e di K^+), ambedue peraltro non incontrate nel corso del sondaggio, mentre non può essere escluso un apporto diretto di fluidi mineralizzanti profondi o di acque entrate in contatto con il basamento metamorfico. Anche i sedimenti argillosi, così abbondantemente rappresentati nella Pianura Pontina, possono aver contribuito al processo di mineralizzazione. Infatti l'impiego di un diagramma triangolare Na-K-Mg, fig. 16, mette in evidenza una netta differenza tra le acque legate al circuito carsico e quelle della pianura. Notiamo che tutte queste ultime si collocano nella zona del diagramma corrispondente alle acque che nel loro ciclo hanno subito processi di arricchimento di Na e di K: è questo un ulteriore elemento a conferma di due diversi schemi di circolazione, uno dei quali comprendente apporti di sali sodici e probabili interazioni con materiali argillosi.

⁽²⁾ I gas emessi sono costituiti da CO_2 (93,3%), H_2S (6,4%), CH_4+N_2 (0,3%) FANCELLI, 1978. (Comunicazione personale)

Data la non trascurabile termalità delle acque di Pozzo Fogliano 2 e di quelle della serie dei Laghi del Vescovo si è ritenuto utile eseguire dei tentativi di calcolo della temperatura di quello che potrebbe essere un serbatoio geotermico profondo. Sebbene siano note le limitazioni e le incertezze di tali approcci riteniamo utile riportare i risultati ottenuti applicando alcuni dei geotermometri di maggior impiego nella letteratura. Per Pozzo Fogliano 2 i geotermometri Na-K secondo WHITE [38] e secondo TRUESDELL [36] forniscono rispettivamente temperature di 185° e di 182°C, mentre la temperatura fornita dal geotermometro Na-K-Ca di TRUESDELL [37] è stata, per $\beta = 1/3$, di 196°C. Purtroppo non ci è stato possibile confrontare tali valori con quelli deducibili dal tenore in SiO_2 , in quanto quest'ultima non è stata determinata.

Tuttavia i precedenti valori concordano con la temperatura del geotermometro a gas, che ha fornito il valore di circa 180°C (D'AMORE, com. pers.). Un analogo tentativo è stato effettuato per una delle quattro acque del gruppo dei Laghi del Vescovo (sorgente 1) scelta perché maggiormente mineralizzata. Per tale acqua il geotermometro Na-K-Ca ha fornito una temperatura di 180°C ($\beta = 1/3$), quelli Na-K temperature di 180° e di 179°C rispettivamente, entrambe in buon accordo con le temperature precedentemente riportate per Pozzo Fogliano 2. Le temperature basate sull'impiego dei geotermometri a SiO_2 sono nettamente inferiori, risultando comprese tra 62° e 97°C. Queste discrepanze di temperatura calcolate per le acque della sorgente 1 possono essere imputate a consistenti processi di miscelazione degli apporti profondi con l'acqua del circuito superficiale: tale processo influenzerebbe anche l'attendibilità del geotermometro a gas, che comunque fornisce una temperatura di circa 120°C (D'AMORE, com. pers.).

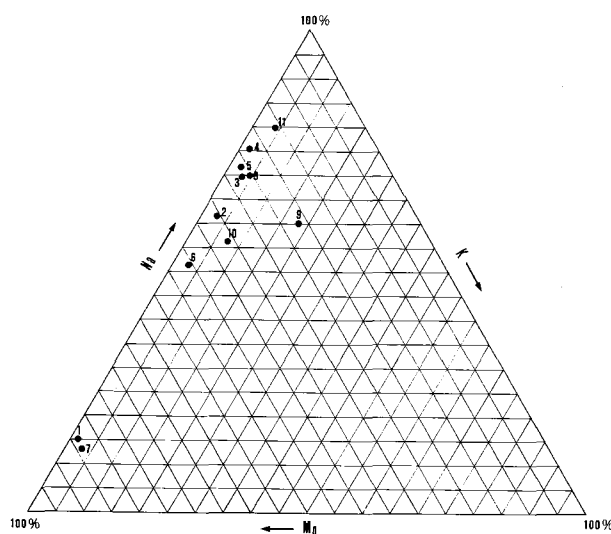


Fig. 16 - Rappresentazione in un diagramma triangolare (Na, K, Mg) delle acque studiate. Osservare come la maggioranza manifesta la tendenza a disporsi nel settore delle acque a carattere sodico.

Triangular diagram (Na, K, Mg), showing the sodic character of the majority of the waters studied.

6. CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI SULLA GENESI E SULL'IDRO-DINAMICA DEL CIRCUITO IDROTERMALE

L'idrogeologia della Pianura Pontina dipende strettamente dal quadro strutturale della regione, schematizzato in fig. 4.

A NE si trova la piattaforma carbonatica lepina, accavallata al flysch della Valle Latina ed interessata da un reticolo di faglie normali che ribassano il suo margine occidentale sotto la Pianura Pontina, dove, in base agli elementi raccolti, è stata ipotizzata una soglia che fa da passaggio alla serie di transizione. Nel settore centrale della pianura si trova il Graben pontino, apertosi nel Plio-pleistocene in corrispondenza di una antica linea di debolezza crostale che, durante il Mesozoico, ha separato la piattaforma dal bacino pelagico tirrenico, compensando il loro diverso grado di subsidenza e restando attiva, sia pure con fasi alterne, dall'inizio del Mesozoico fino al Quaternario recente; questo elemento strutturale, caratteristico della regione pontina, assume certamente il ruolo principale nella genesi del circuito idrotermale, che si manifesta in diversi punti della regione. A SO del Graben si trovano numerose strutture sepolte, formate da sedimenti con facies molto affini a quelle della serie di transizione sabina. In questa situazione strutturale sono stati individuati e distinti due principali circuiti idrogeologici nettamente differenziati.

Nella struttura carbonatica lepino-ausona ha sede una circolazione carsica molto attiva caratterizzata da brevi tempi di residenza; le acque sono bicarbonato-calciche, fredde, prossime alla saturazione nei confronti della calcite, ma nettamente sottosature rispetto al gesso ed all'anidrite.

Nel reticolo di faglie del Graben pontino e nelle strutture tirreniche sepolte si sviluppa, invece, una circolazione idrotermale; le acque calde, pur essendo certamente di origine meteorica, hanno tempi di residenza molto più lunghi rispetto a quelli del ciclo carsico, hanno una forte carica gassosa, elevati tenori di cloruri alcalini, di stronzio, di fluoro e sono sature o molto prossime alla saturazione rispetto a gesso ed anidrite.

Le acque dei due cicli emergono in superficie dopo essersi in varia misura tra loro mescolate.

L'origine e le modalità di circolazione del circuito idrotermale costituiscono, ovviamente, l'aspetto di maggior interesse di questa ricerca.

Le acque del circuito idrotermale sono note soprattutto attraverso il Pozzo Fogliano; sulla loro origine si è fatta una prima ipotesi di lavoro considerando che ad elevare la mineralizzazione contribuissero apporti di acqua marina. L'ipotesi è stata ben presto scartata perché la composizione isotopica dell'acqua è risultata sostanzialmente corrispondente a quella dell'acqua meteorica locale. Inoltre anche alcuni rapporti, tra i principali elementi della mineralizzazione, si discostano dagli stessi rapporti caratteristici delle acque di mare. Accertata quindi la sua origine continentale si è ovviamente esaminata la possibilità che la mineralizzazione derivi dalla lisciviazione di depositi evaporitici presumibilmente presenti nel substrato triassico e nel basamento regionale. Questa possibilità è stata esaminata sotto diversi aspetti e si è giunti alla conclusione che un semplice processo di lisciviazione (operato dalle acque carsiche, che dovrebbero infiltrarsi a grande profondità per poi riemergere mineralizzate ed arricchite in gas lungo le fratture del Graben) è insuffi-

ciente per giustificare un fenomeno così vasto e così complesso, come quello che interessa il Graben pontino e le strutture tirreniche sepolte.

Le insufficienze di questo schema interpretativo, comunemente adottato in situazioni analoghe, sono sostanzialmente due. Da una parte resterebbe oscura l'origine del gas, che è una componente caratteristica e non certo trascurabile delle manifestazioni. Dall'altra i gradienti della falda carsica lepina non paiono sufficienti per azionare un circuito idraulico tanto complesso, nemmeno invocando l'effetto di « termosifone » che potrebbe facilitare la percolazione delle acque a grande profondità.

I dati tratti dalle numerose perforazioni eseguite nella struttura lepina dicono che, già pochi metri sotto l'orizzonte paleocarsico interessato da attiva circolazione, la permeabilità dei carbonati scende bruscamente. In tali condizioni, una falda che possiede un carico idraulico medio equivalente a 5 atm di pressione non pare in grado di fornire l'energia necessaria per azionare un attivo processo di percolazione attraverso masse dolomitiche di permeabilità ridottissima (anche se localmente fratturate) lungo percorsi che variano da un minimo di 10 ad oltre 30 km. Come potrebbero, d'altra parte, le acque carsiche rialimentare la « trappola » di Pozzo Fogliano dove la pressione interna della parte più corticale del serbatoio supera le 15 atm? In tali condizioni il processo idrodinamico ci pare che possa svilupparsi solo se azionato da un meccanismo capace di produrre gradienti di pressione nettamente superiori a quelli che possono essere esercitati dal carico idraulico della falda carsica. Questa considerazione di carattere idrodinamico non esclude certo la possibilità che la mobilizzazione dei solfati e dei cloruri contenuti nelle masse carbonatiche profonde, possa giocare un ruolo determinante nella mineralizzazione delle acque; pone solo la condizione dell'esistenza di uno o più fattori capaci di fornire l'energia necessaria ad azionare il complesso meccanismo idrodinamico. D'altra parte, se si considera non solo la Pianura Pontina, ma più in generale l'intero Appennino carbonatico, si trova una stretta corrispondenza tra l'andamento delle linee tettoniche di importanza regionale (particolarmente quelle che corrono ai margini delle piattaforme carbonatiche e che sono state recentemente riattivate) e le manifestazioni idrotermali e gassose. Né si può pensare che l'effetto di queste grandi lacerazioni crostali sia solo quello di aprire, nelle masse carbonatiche più corticali, delle fasce di permeabilità preferenziale. Lungo le grandi fratture che certamente si spingono in profondità, fino ad interessare il substrato metamorfico, all'aumento della permeabilità si associa certamente un'accentuazione del flusso termico e la risalita da grande profondità quanto meno di fluidi acidi e caldi; fenomeni questi quasi sempre mascherati, lungo i margini delle piattaforme carbonatiche, dall'attiva circolazione carsica.

Nel contesto strutturale della Pianura Pontina, un sistema capace di produrre sia l'energia necessaria a muovere le acque carsiche, sia la carica gassosa presente nelle manifestazioni, potrebbe essere azionato dal concorso di due fattori principali:

- 1) un processo di metamorfismo termico, non si sa quanto spinto né dove localizzato, capace di liberare grandi quantità di anidride carbonica e di facilitare la mobilizzazione dei solfati e dei cloruri, a spese di masse carbonatiche contenenti evaporiti allo stato diffuso o in grandi ammassi.

2) la risalita, lungo le lacerazioni del substrato metamorfico, di fluidi acidi e caldi, analoghi a quelli legati a processi vulcanici, capaci di attaccare i depositi carbonatici ed evaporitici e di determinarne la parziale mobilizzazione allo stato gassoso, con risultati finali pressoché analoghi a quelli che produrrebbe il metamorfismo.

Pare molto probabile, in corrispondenza dell'apparato vulcanico albano [21], che il Trias evaporitico abbia effettivamente subito un intenso processo metamorfico tale da determinare la mobilizzazione di solfati e cloruri che, sotto varie forme, si ritrovano in concentrazioni anomale nei prodotti vulcanici.

Il Graben pontino, che si raccorda verosimilmente con l'apparato albano, potrebbe essere sede di condizioni analoghe, anche se presumibilmente meno spinte e più durature; infatti il sistema tettonico che ha prodotto il vulcanismo albano è lo stesso che ha dato origine al Graben, né si può dimenticare che ai margini della Pianura Pontina sono state trovate tracce, anche se ancora assai labili, di un'attività vulcanica marginale di tipo esplosivo. Nel contesto strutturale della regione, compresa tra l'apparato albano e quello di Roccamonfina, l'ipotesi che in corrispondenza del Graben pontino si sia verificata la parziale risalita di masse magmatiche capaci di esercitare una notevole azione termica e la cessione di fluidi acidi, anche se ben lontana dall'essere dimostrata, ci sembra possa essere assunta almeno come ipotesi di lavoro.

Fenomeni del tipo ipotizzato, o altri analoghi, comunque capaci di liberare notevoli quantità di gas, localizzati in corrispondenza del Graben od anche in aree assai prossime, potrebbero giustificare perfettamente la dinamica del ciclo idrotermale. La grande produzione di gas creerebbe infatti forti gradienti di pressione che sarebbero responsabili del movimento delle acque.

I gas seguirebbero presumibilmente due percorsi preferenziali: uno verso il margine NE della Pianura Pontina e l'altro verso il Tirreno, dove dovrebbero esistere emanazioni sottomarine. In questo processo dinamico le acque carsiche verrebbero passivamente trascinate e spostate dai gradienti di pressione dei gas senza svolgere un ruolo attivo, essendo sprovviste della necessaria energia.

In base ai dati geochimici disponibili si deve ammettere che alla struttura di Fogliano giungano acque di sicura origine continentale, anche se in quantità presumibilmente limitata e con un movimento lentissimo, come desumibile dall'assenza di tritio.

In quest'ottica le manifestazioni pontine sarebbero solo un aspetto parziale di un fenomeno di maggiori dimensioni che si estenderebbe anche nel mar Tirreno.

Si possono fare infine alcune considerazioni sulla potenzialità geotermica della regione.

La temperatura del circuito idrotermale profondo, stimata con il metodo dei geotermometri, è risultata di 180°-200°C per pozzo Fogliano e di 180°C per i Laghi del Vescovo. Sono noti i limiti e le riserve sulla validità di queste determinazioni.

Non è parso ragionevole tentare una valutazione quantitativa del potenziale geotermico della regione, anche se teoricamente possibile, perché le necessarie assunzioni arbitrarie di parametri non determinabili allo stato

attuale delle ricerche, renderebbe la stima eccessivamente imprecisa. Si può genericamente considerare che la situazione idrogeologica e geotermica riscontrata nella Pianura Pontina (grandi serbatoi profondi in strutture sepolte e con un reticolo di fratture, saturati da acque calde presumibilmente bene rialimentabili da una capace falda carsica) si estende, con analoghe caratteristiche tra Roccamonfina ed i Colli Albani, con una potenzialità termica, quindi, decisamente molto elevata.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. I. Friedman, Direttore del Branch of Isotopes Geology del USGS di Denver, ed i dottori P. Noto e S. Nuti, ricercatori dell'Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche del CNR di Pisa, rispettivamente per la disponibilità manifestata nel permettere le misure dei rapporti isotopici dell'idrogeno e per l'esecuzione delle misure di tritio.

I signori C. Trudu e E. Di Biasio, tecnici in servizio presso l'Istituto di Geochimica, hanno collaborato all'esecuzione delle misure.

LAVORI CITATI

- 1 - ACCORDI B.: *La componente traslativa nella tettonica dell'Appennino laziale-abruzzese*. Geologica Rom., 5: 355-406, Roma, 1966.
- 2 - ALBERTI A. U., BERGOMI C., CATENACCI V., CENTAMORE E., CESTARI G., CHIOCCHINI M., CHIOCCHINI U., MANGANELLI V., MOLINARI-PAGANELLI V., PANSERI-CRESCENZI C., SALVATI L. & TILIA-ZUCCARI A.: *Note illustrative del F. 389 Anagni*. Serv. Geol. d'Italia, Roma, 1975.
- 3 - AMALDI G., SEGRÉ A. G. & TRIBALTO G.: *Alcune considerazioni sulla gravimetria e sulla geologia del F. 158 Latina della Carta Geologica d'Italia*. Assoc. Geofisica Italiana, 1965.
- 4 - ANGELUCCI A.: *Rapporti tra tettonica pleistocenica e vulcanismo minore intrappenninico nel Lazio centro-meridionale*. Atti Accad. Gioenia Sci. Nat. Catania, s. 6, 18: 73-84, 1967.
- 5 - ASQUINI E., DEVOTO G. & TERSIGNI C.: *Nuovi dati sui «complessi sicilidi» affioranti presso Carpineto Romano e Roccasecca dei Volsci (Monti Lepini ed Ausoni, Lazio Meridionale)*. Geologica Rom., Roma (in corso di stampa).
- 6 - BERNARDINI F., FUNICIELLO R. & PAROTTO M.: *Considerazioni sedimentologiche su alcune intercalazioni brecciate nelle serie carbonatiche del Cretacico dei Monti Lepini (Lazio)*. Boll. Soc. Geol. it., 92 (Suppl. 1973): 127-155, Roma, 1973.
- 7 - BONI C. F.: *Prospezione geoelettrica sul Promontorio del Circeo (Lazio)*. Atti Accad. Naz. Lincei, 46: 588-596, Roma, 1969.
- 8 - BONI C. F.: *Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese (Primi risultati della campagna 1970-72)*. Atti 2^o Conv. Acque Sotterranee - Palermo, 1973.
- 9 - BONI C. F., BONO P., CAPELLI G., LOMBARDI S., PAROTTO M. & VENTURA G.: *Indagine idrogeologica e geochimica nell'Appennino laziale-abruzzese. Primi risultati della campagna 1976-78*. Atti 1^o Seminario Informativo CNR «Energia Geotermica». Roma, 1979.
- 10 - BONI C. F. & BONO P.: *Essai de bilan hydrogeologique dans une region karstique de l'Italie Centrale*. UNESCO (in corso di stampa).
- 11 - BOSSOLA A., COPPA C. & SCANDELLARI F.: *Approvvigionamento idrico industriale degli agglomerati meridionali dell'area di sviluppo industriale Roma - Latina*. Atti 2^o Conv. Int. Acque Sotter., Palermo, 1973.
- 12 - CARBONE F., PRATURLON A. & SIRNA G.: *The Cenomanian shelf-edge facies of Rocca di Cave (Prenezzini Mts., Latium)*. Geologica Rom., 10: 131-198. Roma, 1971.
- 13 - CARBONE F. & CATENACCI V.: *Facies analysis and relationships in Upper Cretaceous carbonate beach sequences (Lepini Mts., Latium)*. Geologica Rom. 17: 191-231. Roma, 1978.
- 14 - COCOZZA T. & PRATURLON A.: *Note Geologiche sul Colle Cantocchio (Lepini sud-occidentali, Lazio)*. Geologia Rom. 5: 323-334, Roma, 1966.
- 15 - CONFORTO B., DI RICCO G. & SAPPA M.: *Indagine sulle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino: parte seconda*. Rapp. Cassa Mezzogiorno. Roma, 1961.
- 16 - CRAIG H.: *Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters*. Science, 133. 1833-1834, 1961.
- 17 - D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P.: *Schema geologico dell'Appennino Meridionale (Campania e Lucania). Moderne vedute sulla Geologia dell'Appennino, Convegno Roma 1972*. Quad. Accad. Naz. Lincei, 183. 49-72. Roma, 1973.
- 18 - DEFFENU L., LOMBARDI S. & FEDERICI C.: *An introductory note on statistical analysis of physicochemical characteristics of natural waters. Application to some Central Apennines spring waters*. Rend. Sc. Fis. Mat. Lincei, LIX; 1-15. Roma, 1975.
- 19 - DRAGONE F., SALVATI L., SEGRÉ A. G. & SEMERARO C.: *Studio idrografico della Pianura Pontina: la salinità delle acque di superficie*. Ist. Geol. Paleont. e Geograf. Fis., Univ. Messina, s. 1, 1969.
- 20 - EPSTEIN S. & MAYEDA T.: *Variation of ¹⁸O content of waters from natural sources*. Geoch. et Cosmoch. Acta, 26, 1215-1245, 1953.
- 21 - FUNICIELLO R. & PAROTTO M.: *Il substrato sedimentario dell'area dei Colli Albani. Considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale*. Geologica Rom. 17, 233-287. Roma, 1978.
- 22 - GODFREY J. D.: *The deuterium content of hydrous minerals from the East Central Sierra Nevada and Yosemite National Park*. Geoch. et Cosmoch. Acta, 26, 1215-1245, 1962.
- 23 - IPPOLITO F. & SGROSSO I.: *Sulle ricerche di idrocarburi nell'area litorale del Lazio e sulla loro interpretazione*. Rivista Mineraria Siciliana, 133-135: 37-50, 1972.

- 24 - LOCARDI E., LOMBARDI G., FUNICIELLO R. & PAROTTO M.: *The main volcanic groups of Latium (Italy): relations between structural evolution and petrogenesis*. *Geologica Rom.*, 15, 279-300. Roma, 1977.
- 25 - LOMBARDI S.: *Il ruolo dell'idrologia nei confronti del vulcanismo freatico Albano. Appendice in «Caratteri deposizionali dei prodotti del vulcanismo freatico dei Colli Albani»*, *Geologica Rom.*, 14, 1-39. Roma, 1975.
- 26 - MANFREDINI M.: *Orientamenti per l'analisi idrogeologica dell'Agro Pontino. Atti «L'acqua per la Pianura Pontina: situazioni e Prospettive»*. Consorzio Bonif. Latina, 1977.
- 27 - MOUTON J.: *Contributo allo studio delle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino. Atti «L'acqua per la Pianura Pontina: situazione e prospettive»*. Consorzio Bonifica Latina, 1977.
- 28 - MUTTI E. & RICCI LUCCHI F.: *Le torbiditi dell'Appennino settentrionale: introduzione all'analisi di facies*. *Mem. Soc. Geol. Ital.* II, 161-199, 1972.
- 29 - MUTTI E. & WALKER R. G.: *Turbidite facies and facies association*. In *SEPM Pacific Sect., Short Course, «Turbidites and deep water sedimentation»*, 1973.
- 30 - NEGRETTI G. C.: *Appunti sulla geologia della regione di Cori-Artena-Colleferro (Lazio). La posizione stratigrafica del calcare «Nummulitico» dei dintorni di Colleferro*. *Suppl. Ric. Sci.*, 3, 47-60, 1954.
- 31 - NOVARESE V.: *Trivellazione profonda nell'Agro Pontino*. *Boll. Uff. Geol. d'Italia*, 55, (nota II), 1930.
- 32 - PAROTTO M. & PRATURLON A.: *Geological summary of the Central Appennines*. With appendix of BONI C. F.: *The relationship between the geology and the hydrogeology of the Latium-Abruzzi Appennines*. In «Structural Model of Italy Maps and Explanatory notes», *Quad. Ric. Sci.*, 90: 54 pp., 1975.
- 33 - SEGRÉ A. G., DRAGONE F., SALVATI L. & SEMERARO C.: *L'inquinamento salino nell'Agro Pontino in provincia di Latina*. *Atti Conv. Difesa d. Risorse Idriche contro l'inquinamento*. Pavia, 1968.
- 34 - *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Ass. Inc., New York, 1971.
- 35 - TISSIER B.: *Recoinnnaissance isotopique de l'ecoulement souterraine dans un massif carbonaté (Simbruini-Ernici, Italie Centrale)*. These de doctorat, Univ. P. M. Curie, Paris, 1976.
- 36 - TRUESDELL A. H. & FOURNIER R. O.: *Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, USA*. U. N. Symposium on the development and utilization of geothermal Resources, Pisa. *Proceedings (Geothermics Spec. Iss. 2)* 2, 529-535, Pisa, 1970.
- 37 - TRUESDELL A. H. & FOURNIER R. O.: *An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters*. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 37, 1255-1275, 1973.
- 38 - WHITE D. E., FOURNIER R. O. & TRUESDELL A. H.: *Geochemical indicators of subsurface temperature. Part I. Basic Assumptions* U. S. Geol. Survey Journ. Research, 3, no. 3, 259-262, 1974.
- 39 - ZUPPI M. G., FONTES J. CH. & LETOILLE R.: *Isotopes du milieu et circulation d'eaux sulfuré dans le Latium*. *Isotope techniques in ground water hydrology*. 1, 341-361, IAEA, Vienna, 1974.