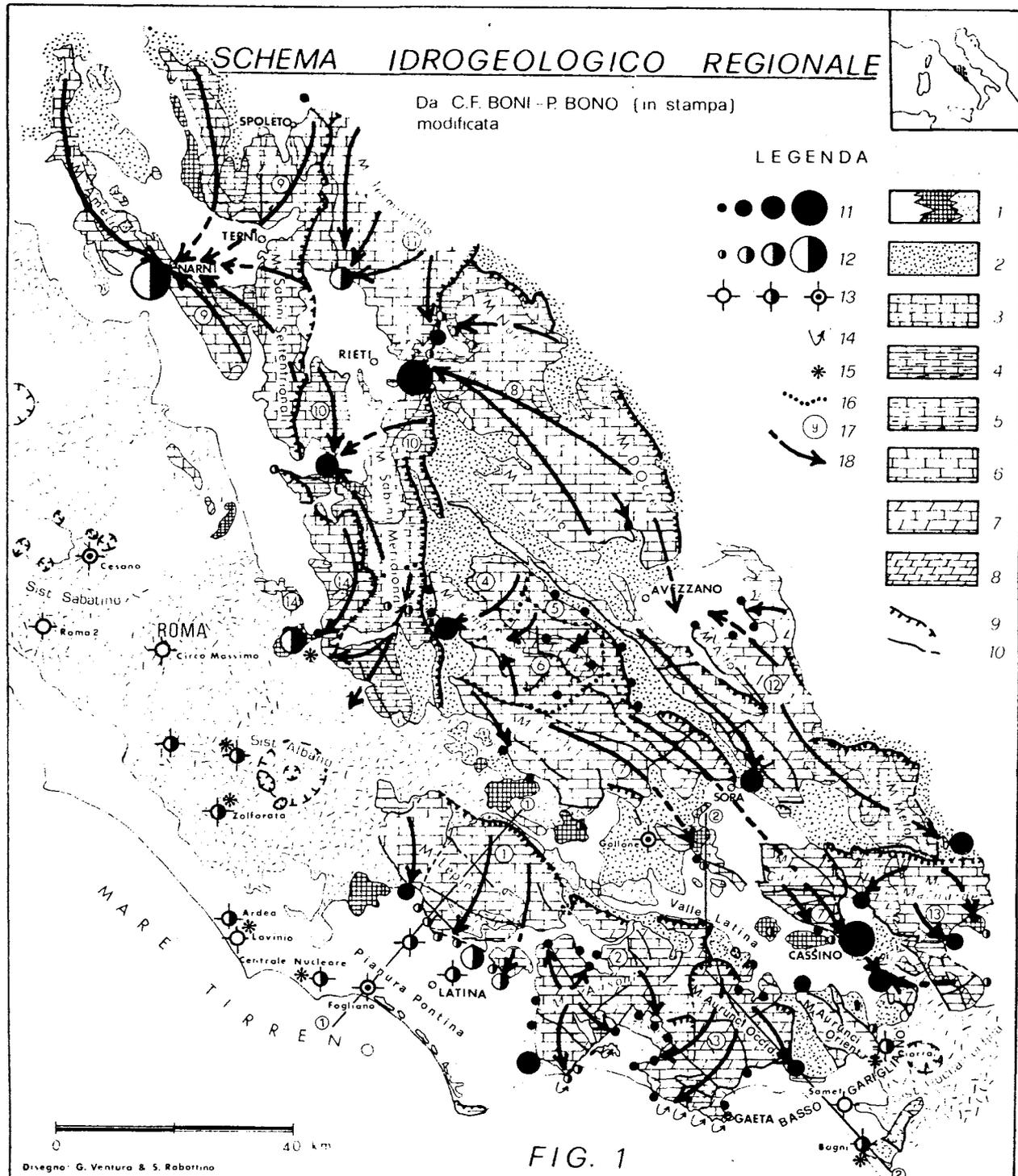


INDAGINE IDROGEOLOGICA E GEOCHIMICA NELL'APPENNINO CARBONATICO LAZIALE-ABRUZZESE. PRIMI RISULTATI DELLA CAMPAGNA 1976-1978.

C. F. Boni, P. Bono, G. Capelli, S. Lombardi, M. Parotto, G. Ventura.

Lavoro eseguito nell'ambito del Progetto Finalizzato "Energistica", Sottoprogetto "Energia Geotermica", dall'Unità Operativa dell'Istituto di Geologia e Paleontologia dell'Università di Roma.

1. Oggetto e obiettivi della ricerca. - La ricerca interessa una vasta area dell'Appennino centrale che comprende gran parte del Lazio e dell'Abruzzo e alcuni settori dell'Umbria e delle Marche (Fig. 1).
Come è noto, in questa area dominano in affioramento serie carbonatiche mesozoiche interessate da un imponente ciclo carsico che caratterizza l'idrogeologia regionale. In questo tipico ambiente geologico ed idrogeologico sono state da tempo individuate numerose sorgenti ed alcuni pozzi che, nel contesto idrogeologico regionale, possono essere considerate anomali, perché erogano acque molto mineralizzate, con elevati tenori in cloruri ed in solfati e apprezzabili anomalie termiche positive.
Nella prima fase della ricerca è stato eseguito il censimento delle manifestazioni di presumibile interesse geotermico; è stato eseguito lo studio dei loro caratteri chimico-fisici fondamentali; si è chiarito il contesto idrogeologico e geochimico che le origina. Successivamente si è tentato di verificare se tali anomalie possono essere considerate come indizi della presenza di aree di interesse geotermico. In questa ottica, correlando i differenti elementi raccolti in superficie sono state selezionate tre zone risultate più promettenti, dove si è tentato di elaborare un modello schematico della circolazione sotterranea. Nell'ambito di questi modelli si sono cercate le condizioni che fossero più prossime allo schema ideale di una struttura geotermica:
- esistenza di un "serbatoio" di dimensioni convenienti, provvisto di sufficiente copertura e posto a profondità accessibile;



- 1. Terreni di copertura recenti (argille, sabbie, limi; travertini; prodotti vulcanici); Flio-Quaternario. - 2. "Flysch" argilloso arenaceo; Miocene Sup..
- "FACIES SABINA": 4. Marne e calcari detritici; Eocene-Miocene Inf., 5. Calcari e calcari marnosi; Cretacico Sup. - "FACIES LAZIALE-ABRUZZESE": 3. Breccie calcaree di falesia; Miocene Medio, 6. Calcari; Mesozoico, 7. Calcari e dolomie; Mesozoico 8. Dolomie; Mesozoico. - 9.; 10. Linee tettoniche di interesse idrogeologico: sovrascorrimenti e faglie distensive. - 11. Gruppo di sorgenti con acque bicarbonato calciche (portata in m³/sec.): ● 2; ● 2-4; ● 4-8; ● 8-15). - 12. Gruppo di sorgenti con acque miste (portata c.s.). - 13. Perforazione di interesse stratigrafico ⊕, geotermico ⊕ e stratigrafico-geotermico ⊕. - 14. Perdite sottomarine e sublacustri. - 15. Manifestazioni prevalentemente gassose. - 16. Limite del bacino idrogeologico. - 17. Numero del bacino idrogeologico. - 18. Direzione di scorrimento delle acque sotterranee.

- condizioni idrogeologiche favorevoli alla ricarica del serbatoio;
- situazione geotermica tale da mantenere la temperatura del serbatoio a livelli sufficientemente elevati.

Scopo ultimo della ricerca è pertanto l'elaborazione di modelli che siano il più possibile rappresentativi delle condizioni idrogeologiche e geotermiche, nelle zone risultate più favorevoli nell'ambito dell'area di indagine.

2. Breve sintesi delle condizioni geologiche del territorio - Viene qui di

seguito molto brevemente schematizzata la situazione geologica regionale, rimandando alla letteratura per un'analisi più approfondita.

Nel settore laziale-abruzzese affiora una potente successione di rocce carbonatiche, in facies di piattaforma neritica, di età prevalentemente mesozoica, circondata da depositi di soglia che, attraverso una tipica serie di transizione passano verso l'esterno ad una successione schiettamente pelagica, ben nota nella regione umbro-marchigiana. Depositi di transizione, che fanno passaggio ad una serie pelagica affine a quella toscana, circondano la piattaforma carbonatica lungo il suo margine occidentale, come risulta da rari affioramenti e da diversi metodi di prospezione del sottosuolo. Situazione analoga si ritrova al margine orientale dove la piattaforma fa passaggio alla serie molisano-sannitica.

La piattaforma carbonatica, potente mediamente oltre 3000 m, agli inizi del Mesozoico, e successivamente, verso la fine dello stesso periodo, ha subito locali smembramenti in settori, dove si instaurano diversi ambienti di sedimentazione.

Alcune delle profonde lacerazioni apertesi, all'interno ed ai margini dello Shelf, si sono successivamente comportate come linee di debolezza, che si riattivarono in occasione delle successive fasi orogeniche.

La crisi orogenica che, a partire dal Miocene medio, produce una generale traslazione verso Nord-Est a partire dalle unità litostratigrafiche tirreniche, trova la piattaforma già differenziata in settori di alto e di basso strutturale. In questa fase, la sedimentazione dei differenti Flysch argilloso-arenacei e la messa in posto delle coltre alloctone produsse il colmamento delle depressioni esistenti. Le strutture carbonatiche oggi affioranti, corrispondenti alle zone positive, risultano in tal modo separate da potenti accumuli di Flysch. Un'ulteriore fase traslativa esaspera e cristallizza tale

situazione, portando le grandi strutture carbonatiche a ridosso delle aree di Flysch. Alle fasi traslative che danno origine al rilievo appenninico fa seguito una fase tettonica distensiva (riferibile anche al più generale processo di apertura del Tirreno) che disarticola e bascula le strutture carbonatiche in una successione di Horst e Graben, a partire dalle aree occidentali. In questa fase di espansione vengono riattivate molte delle vecchie linee tettoniche mesozoiche e si produce una intensa attività vulcanica che, nel Lazio centro-occidentale, interessa soprattutto l'ampia fascia tirrenica e le dorsali carbonatiche pre-appenniniche (Area Albana, Pianura Pontina, basso Garigliano, Valle Latina).

Le fondamentali ricerche geologiche che hanno interessato le zone di transizione e i bacini pelagici, che circondano la piattaforma, sono analoghe a quelle sopra descritte: disarticolazione del sub-strato carbonatico nel Lias inferiore-medio; differenziazione dei bacini, seguita dalla depressione dei terreni mesozoici, sovente lacunosi, sugli alti strutturali; a partire dal Miocene, deposizioni dei Flysch e crisi orogenica con generale fenomeno di traslazione, variamente orientata nei diversi settori periferici dello Shelf, con formazione di strutture plicative di raccorciamento; nuova recente fase tettonica di espansione, con caratteri distensivi, che ha dato origine a strutture a Horst e Graben.

Le strutture di "facies Sabina" e quelle di "facies Laziale-Abruzzese" sono separate, nel settore considerato, dalla nota linea tettonica Antrodocolivano che va considerata un elemento tettonico di notevole importanza nel contesto geologico regionale.

3. Censimento delle manifestazioni.

3.1. Caratteristiche e distribuzione delle manifestazioni - Nella Fig. 2 sono riportate, schematicamente, le principali caratteristiche chimiche e le temperature delle acque erogate da alcune delle manifestazioni in studio, ritenute più significative per la comprensione della circolazione delle acque nell'area in esame, la cui ubicazione è rappresentata in figura. Esse sono state riunite, per semplicità di trattazione, in tre gruppi: gruppo della Pianura Pontina, della Valle Latina e del Basso Garigliano. A questi fanno parte acque debolmente mineralizzate a bicarbonati alcalino-

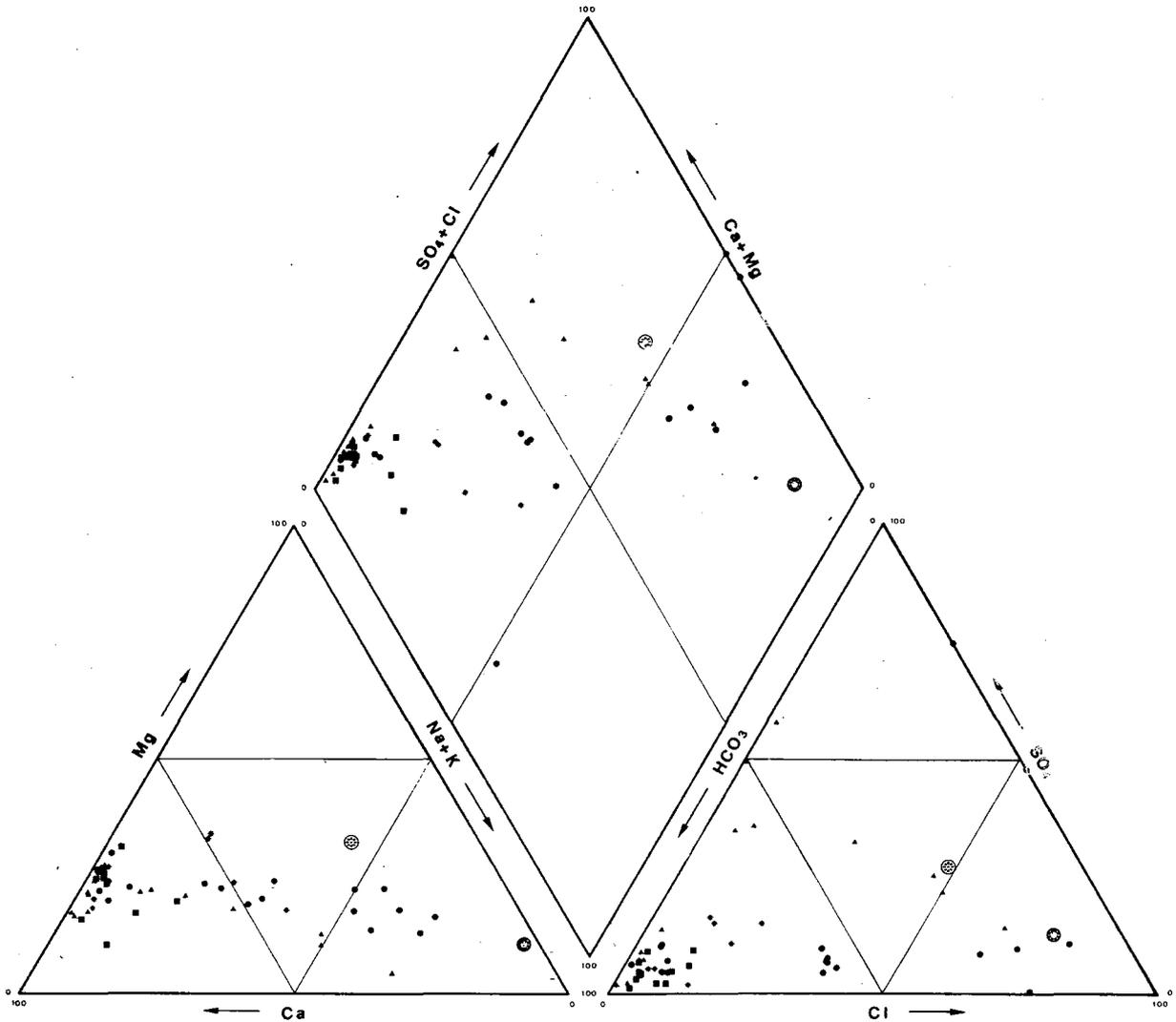
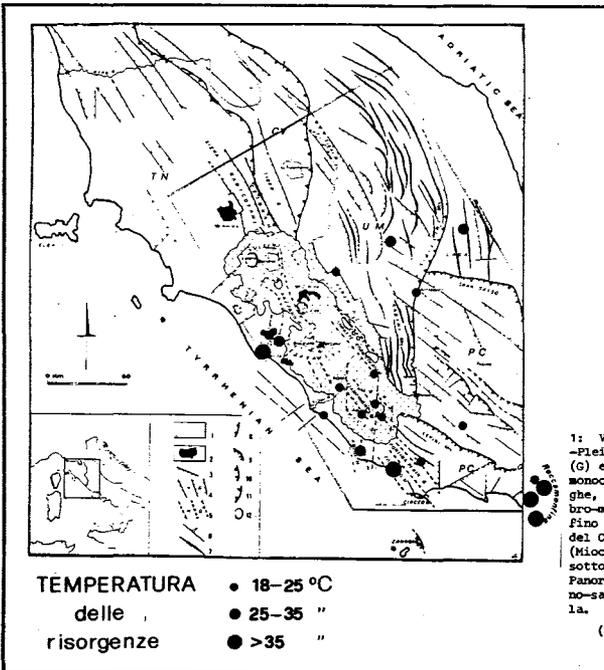


fig.2 - Diagramma di PIPER

- Sorgenti della Pianura Pontina
- " " Valle Latina
- " " del Basso Garigliano
- " " Lazio centro-sett.
- ⊙ Mar Mediterraneo (FORNASERI M., 1973)
- ⊗ Acqua piovana, Lazio centrale (LOMBARDI, 1975)



1: Vulcaniti laziali alcalino-potassiche (Pleistocene). 2: Vulcaniti acide (Pliocene sup.-Pleistocene). 3: Faglie distensive (i trattini indicano il lato ribassato). 4: Graben (G) e Horst (H) (Plio-Pleistocene). 5: idem, sotto la copertura vulcanica. 6: Strutture monoclinali del Complesso Panormide, con immersione generale verso NE. 7: Assi di pieghe, generalmente rovesciate verso E o NE. 8: Fronte di accavallamento del Complesso umbro-marchigiano-sabino; probabilmente esso prosegue verso sud sotto le vulcaniti, almeno fino a Capo Circeo (Miocene sup.-Pliocene inf.). 9: Fronti di accavallamenti all'interno del Complesso Panormide (Miocene sup.). 10: Fronte del Complesso M. Modino-M. Cervarola (Miocene medio). 11: Fronte della Falda Toscana; probabilmente esso continua verso sud, sotto le vulcaniti (Miocene medio). 12: Margini di caldere o di crateri. PC = Complesso Panormide (facies di piattaforma carbonatica). UM = Complesso di bacino umbro-marchigiano-sabino (facies pelagica). TN = Falda Toscana. CV = Complesso di M. Modino-M. Cervarola.

(da LOCARDI et alii, GEOLOGICA ROMANA, 1976).
modificata

terrosi, appartenenti al ciclo carsico, e acque fortemente mineralizzate, legate a circuiti più profondi e complessi. Quest'ultime sono erogate da sorgenti e perforazioni ubicate generalmente nelle aree vulcaniche e nelle aree maggiormente fratturate ai margini dei rilievi carbonatici e/o nelle valli ad essi contigue.

Riassumendo in breve i dati ottenuti per le acque di probabile interesse geotermico e che verranno, almeno in parte, riprese in seguito, si può dire che :

- Le manifestazioni della Valle Pontina sono caratterizzate da acque a cloruri alcalini, fortemente mineralizzate (salinità maggiore di 3 g/l) e ricche in gas. Le temperature riscontrate nelle acque sorgive al margine sudoccidentale dei M. ti Lepini, non superano i 20°C (Laghi del Vescovo, Acquapuzza ecc.), nel Pozzo Fogliano, invece, sono state misurate temperature maggiori di 50°C.

- Nella Valle Latina le mineralizzazioni osservate sono prevalentemente legate ad una forte presenza di solfati alcalino-terrosi. I valori delle temperature non superano, in genere, i 20°C (Terme Pompeo).

- Il gruppo delle acque erogate principalmente dalle perforazioni nel basso Garigliano, infine, cadono nel campo delle acque a bicarbonati e solfati alcalino-terrosi; sono ricche in gas e presentano valori di temperatura variabili tra 30 e 50°C circa (Terme di Suio, Mondragone).

3.2. Considerazioni sulla distribuzione delle manifestazioni - Il confronto tra la distribuzione delle manifestazioni e i caratteri geologici della regione, suggerisce alcune considerazioni di carattere generale circa il legame esistente fra particolari situazioni geo-strutturali e la presenza di indizi geotermici superficiali. Si può notare una differenza, nella distribuzione delle manifestazioni, tra la zona sabina e quella laziale-abruzzese. Nel settore occidentale le manifestazioni sono concentrate nel settore più interno dell'arco sabino, dove la recente fase tettonica di collasso ha interessato il settore tirrenico delle strutture. Risulta inoltre che le manifestazioni più evidenti sono ubicate quasi sempre in zone assai prossime agli affioramenti triassici (Monte Morra, Tivoli, Monti Martani, Monti di Amelia, Montagne dei fiori). Lungo il margine esterno dell'arco, dove prevalgono le strutture di raccorciamento, in superficie mancano indizi.

Nel settore laziale-abruzzese, le manifestazioni più vistose sono prevalentemente distribuite ai margini della piattaforma (area di Antrodoco, Marano Equo, Pianura Pontina, Basso Garigliano, Valle del Volturno) lungo la fascia di instabilità tettonica e di compensazione del diverso grado di subsidenza, che per tutto il Mesozoico ha separato la piattaforma dal bacino pelagico. Queste linee di instabilità sono state riattivate anche in occasione della più recente fase tettonica distensiva.

Nel settore interno della piattaforma, le manifestazioni attive (e quelle non più evidenti ma che hanno lasciato depositi di travertino a testimonianza di una passata attività) sono assai limitate nella distribuzione e nell'entità.

Indizi di attività idrotermale sono comunque localmente presenti ai margini delle grandi depressioni interne o nel settore caudale delle strutture, sempre in corrispondenza di linee distensive, riattivate dalle più recenti fasi della tettonica. Il caso più vistoso si trova lungo la Valle Latina tra Colleferro e Cassino. Mancano invece indizi superficiali ai margini nord-orientali dei rilievi dove si sono sviluppate strutture di raccorciamento e sovrascorrimento.

4. Indagine geologica ed idrogeologica.

4.1. Metodi ed obiettivi dell'indagine geologica regionale - Nell'impossibilità di descrivere le condizioni geologiche riscontrate a monte delle numerosissime manifestazioni esaminate ci si limita ad esporre, in termini generali, le metodologie adottate e gli obiettivi perseguiti. Verranno in seguito desunti i risultati conseguiti in tre zone dove la ricerca geologica è stata più approfondita.

L'indagine geologica è stata indirizzata a chiarire le condizioni stratigrafiche e strutturali soprattutto nelle aree marginali della piattaforma, dove più evidenti sono le manifestazioni.

Nel campo della ricerca litostratigrafica di particolare interesse è stata l'analisi dei caratteri sedimentologici dei carbonati, dei flysch e dei depositi plio-pleistocenici di copertura.

Lo studio sedimentologico dei carbonati, in armonia con i risultati ottenuti da altri metodi, ha consentito di ipotizzare quale sia stato il più probabile processo di migrazione dei margini della piattaforma carbonatica, durante il Mesozoico e di conseguenza quale sia la più probabile posizione dei

migliori "serbatoi" distribuiti ai margini della stessa.

Lo studio sedimentologico della coltre terrigena è servito a valutare indicativamente le permeabilità delle coperture, che in vario modo ricoprono le rocce serbatoio. L'analisi strutturale è stata eseguita con appositi rilevamenti di terreno, associati allo studio dei dati geofisici, gravimetrici ed elettrici (dove disponibili) e dei dati di perforazione. Lo studio ha portato alla individuazione delle grandi dislocazioni che interessano i margini della piattaforma; è risultato che molte di queste, per le loro caratteristiche, la loro storia geologica e l'importanza che rivestono nell'ambito regionale, sono presumibilmente lacerazioni tali da facilitare il flusso di fluidi geotermici verso la superficie e capaci quindi di dare emergenze a zone con gradiente geotermico anomalo.

Lo studio strutturale è servito inoltre a preparare i modelli di circolazione profonda che vengono proposti.

4. 2. Risultati dell'indagine idrogeologica regionale - L'analisi idrogeologica, che si è avvalsa in larga misura dei risultati che uno studio di carattere regionale intrapreso dagli Autori, già da molti anni e recentemente concluso, ha ottenuto i seguenti risultati.

- Definizione dettagliata dell'area di sviluppo del ciclo carsico superficiale in tutta la regione. Questo elemento può permettere una migliore impostazione di una eventuale campagna di misura del flusso termico, perché consente di evitare le aree non idonee per la presenza di una imponente falda superficiale e di concentrare la ricerca nelle zone più favorevoli.
- Definizione delle caratteristiche generali ed idrodinamiche del ciclo carsico in tutta la regione (limiti degli acquiferi, ubicazione e caratteristiche delle sorgenti, direzione di flusso, gradienti idraulici, bilancio quantitativo con determinazione dell'infiltrazione efficace e delle portate di ciascuna falda). Questi elementi sono risultati di naturale interesse nella valutazione delle possibilità di ricarica dei "serbatoi".
- Lo studio idrogeologico diretto delle manifestazioni, ha portato alle seguenti conclusioni:
 - a) tutte le acque erogate da sorgenti e pozzi considerati interessanti ai fini di questa ricerca, sono in netta prevalenza di origine carsica. Ciò risulta sia dall'analisi delle condizioni idrogeologiche, di alimentazione del

le sorgenti, sia dei dati della prospezione geochimica;

b) nelle acque di tutte le principali manifestazioni considerate è presente, in percentuale generalmente molto modesta, una componente che, per i suoi caratteri chimico-fisici non può aver origine nell'ambito del ciclo carsico superficiale, ma deve necessariamente provenire da un diverso ciclo che si sviluppa lateralmente o al di sotto dell'area di dominio del ciclo carsico;

c) in corrispondenza di tutte le manifestazioni, esistono le condizioni strutturali (grandi faglie distensive recentemente riattivate) che paiono idonee a favorire la risalita in superficie di fluidi profondi;

d) tutte le manifestazioni sono state di conseguenza interpretate come prodotto di miscelazione delle acque carsiche con apporti idrotermali, che si manifestano in superficie solo in corrispondenza di situazioni strutturali favorevoli.

5. Ricerca delle strutture geotermiche - Nello studio delle strutture geotermiche sono stati impiegati due diversi metodi di indagine complementari. I metodi propri della ricerca geologica ed idrogeologica, sono stati impiegati soprattutto per la individuazione delle rocce serbatoio, per la verifica dell'esistenza di una copertura, per la valutazione dell'entità del serbatoio e per la stima delle condizioni di ricarica. I metodi geochimici sono stati impiegati per lo studio indiretto delle condizioni fisiche del serbatoio, attraverso l'analisi delle manifestazioni. Ovviamente i diversi metodi non hanno limiti così definiti, come potrebbe apparire dalla schematizzazione, ma si integrano vicendevolmente.

Nell'area considerata, la Pianura Pontina, la bassa Valle del Garigliano, il settore centro-meridionale della Valle Latina, la zona delle Acque Albule presso Tivoli, la media Valle del Velino presso Antrodoco, il settore caudale della struttura martana ed altri ancora, sono zone dove alla presenza di manifestazioni liquide e gassose si associano condizioni strutturali particolarmente favorevoli alla risalita di fluidi profondi e condizioni idrogeologiche tali da lasciare prevedere un'agevole ricarica degli eventuali serbatoi carbonatici. Tutte le zone sono state, allo stato attuale, più o meno profondamente analizzate, ma gli studi sono stati soprattutto approfondi

ti nella Pianura Pontina, che è l'area maggiormente studiata, nel basso Garigliano e nella Valle Latina.

Dati sulla geologia del sottosuolo sono stati ricavati in vario modo.

a) Stratigrafia dei numerosi pozzi, la maggior parte dei quali, purtroppo, poco profondi.

b) Carte gravimetriche disponibili

c) Prospezione geoelettrica.

d) Analisi del contesto geologico regionale e sedimentologico delle formazioni affioranti.

e) Analisi delle manifestazioni idrotermali.

5.1. Pianura Pontina - Mentre è ben nota la successione stratigrafica della serie carbonatica lepino-ausona e la condizione strutturale del rilievo lepino, non altrettanto conosciuto è il sottosuolo della Pianura Pontina, dove i terreni meso-cenozoici sono sepolti sotto una potente coltre di sedimenti terrigeni plio-quadernari.

Una sintesi schematica della probabile situazione strutturale ed idrogeologica è data nella fig. 3 dove un profilo geologico è associato ad uno schema idrogeologico e al profilo gravimetrico.

A NE è rappresentata la struttura lepina affiorante, formata da sedimenti di piattaforma. Il rilievo è bordato da una fascia di fratture a grande rigetto lungo le quali si allineano le manifestazioni idrotermali e le grandi sorgenti carsiche. Segue verso SW, un settore della piattaforma, ribassato e coperto da una coltre di depositi plio-quadernari, relativamente sottile. Il margine della piattaforma culmina, presumibilmente con i resti di una soglia, che in base ai dati sedimentologici, dovrebbe trovarsi nella porzione interessata. Segue il Graben pontino, presumibilmente delimitato ai margini da grandi faglie che ribassano i depositi carbonatici di scogliera e periscogliera, bioclastici, molto porosi e fessurati. Nel settore sud-occidentale si trova la struttura sepolta, attraversata dalle perforazioni Fogliano 1 e 2 fino ad una profondità massima di 1034 metri. Si tratta di una struttura, formata da terreni della serie di transizione piattaforma-bacino, analoga a quella del promontorio Circeo.

Dallo schema idrogeologico risulta che la circolazione carsica dominante nel settore nord-orientale si estende anche nel settore ribassato dalla piat-

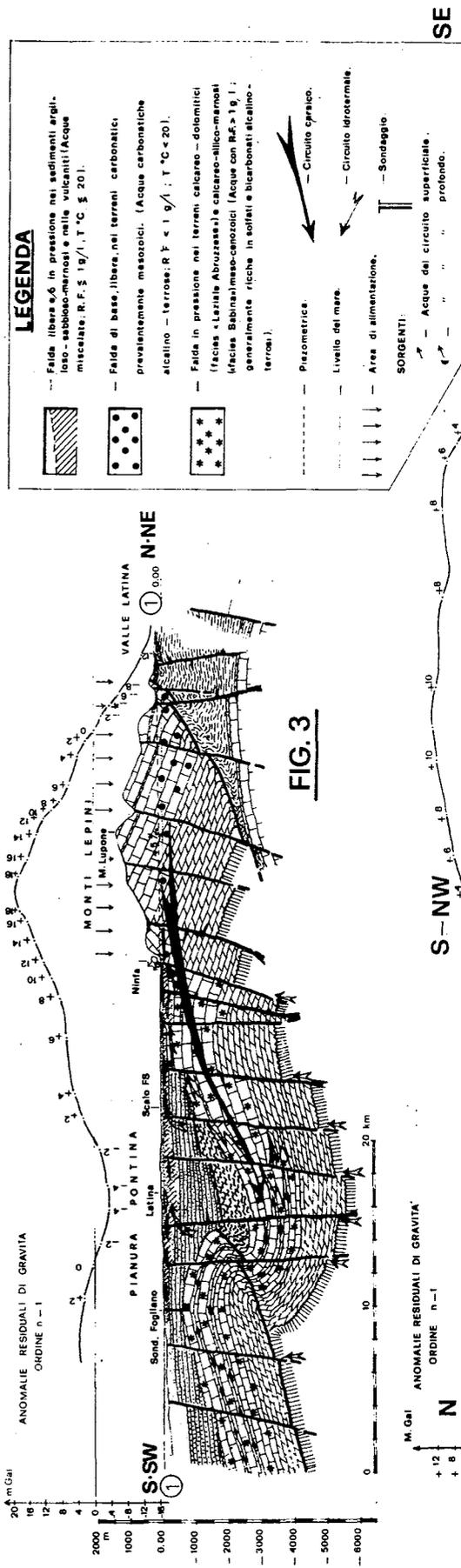


FIG. 3

LEGENDA

- Falde libere ± 6 in pressione nei sedimenti argilloso-sabbioso-marnosi e nelle vulcaniti (Acque miscelate: R.F. § 19/7, T °C ≤ 20).
- Falde di base, libere, nei terreni carbonatici prevalentemente mesozoici. (Acque carbonatiche alcalino-terrose: R.F. ≤ 1 g/l; T °C ≤ 20).
- Falde in pressione nei terreni calcareo-dolomitici (facies «Laziale-Abruzzese») e calcareo-siliceo-marnosi (facies «Bibina») meso-cenozoici (Acque con R.F. > 1 g/l; generalmente ricche in solfati e bicarbonati alcalino-terrosi).
- Piezometrica.
- Livello del mare.
- Area di alimentazione.
- Acque del circuito superficiale.
- Acque del circuito profondo.
- SONDAGGIO.
- Circuito idrotermale.
- Circuito Cetraro.

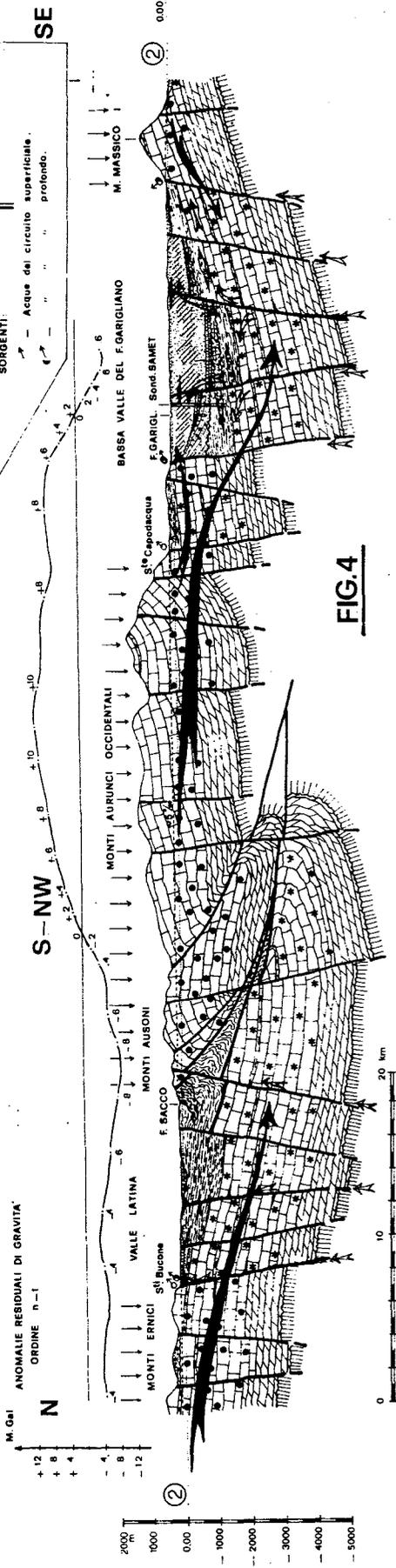


FIG. 4

- «ACQUICLUDE»
- Vulcaniti, sedimenti argilloso-sabbioso-marnosi post-orogениci, Complesso delle Argille Caotiche e "Flysch" arenaceo-argilloso sin-orogениci.
- «SERBATOIO CARBONATICO»
- Serie carbonatica in facies «Sabina» e in facies «Laziale-Abruzzese» meso-cenozoica.
- Substrato triassico.
- Basamento metamorfico.
- Faglia

SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE SOTTERRANEA

taforma ai margini del rilievo lepino (dati desunti da perforazioni) dove tuttavia risulta parzialmente miscelata con acque mineralizzate. Si presume che la circolazione idrotermale domini il settore centrale del Graben e la struttura di Fogliano, dove si hanno dati diretti di perforazione. In corrispondenza delle grandi fratture si è ipotizzata la presenza di apporti idrotermali profondi.

La migliore roccia serbatoio dovrebbe essere rappresentata dai depositi bioclastici di scogliera e periscogliera di età giurassico-cretacea, presumibilmente ubicati in corrispondenza del Graben, dove risulterebbero interessati da un sistema di fratture distensive sub-verticali. L'estensione reale della roccia serbatoio è valutabile diverse decine di km² e lo spessore, molto variabile, di alcune centinaia di metri. La copertura del serbatoio è garantita da un potente accumulo di depositi terrigeni prevalentemente argillosi. Le condizioni di chiusura non sono state per il momento accertate. E' tuttavia probabile che esistano locali condizioni favorevoli, come risulterebbe dall'andamento molto articolato del sub-strato (dati gravimetrici).

Le condizioni di ricarica del serbatoio sono assicurate dalla falda carsica che si trova in sicura connessione idraulica con il serbatoio. La falda dei Lepini ha un bilancio accuratamente valutato superiore a 400 milioni di m³/anno (pari a circa 14 m³/sec).

Le condizioni fisiche del serbatoio sono desumibili solo da dati indiretti.

I più interessanti sono quelli del pozzo Fogliano. Il pozzo è in grado di erogare spontaneamente acqua molto mineralizzata a cloruri alcalini (R.F. circa uguale a 10 g/l) con forte contenuto gassoso ed una temperatura che raggiunge, all'emergenza, in regime di erogazione costante, 55° C. La pressione a testa pozzo è variabile tra 10 e 15 atmosfere. La perforazione di Fogliano non ha raggiunto il serbatoio, ma si è fermata nei terreni di copertura calcareo-marnosi, dove mancano le condizioni per una buona rialimentazione.

Estrapolando i dati disponibili al settore centrale del Graben, dove più elevato dovrebbe essere il flusso termico, ad una profondità indicativa di 2500-3000m, non sembra inverosimile ipotizzare una temperatura di 150°C.

5.2. Pianura del basso Garigliano - Compresa tra la costa tirrenica e le

propaggini sud-orientali della dorsale dei Volsci, la Pianura del basso Garigliano è delimitata, a nord, dai M. ti Aurunci orientali, a nord-est dal sistema vulcanico di Roccamonfina, a sud-est, dal rilievo di M. te Massico. Come è noto, la successione stratigrafica dei rilievi carbonatici che delimitano l'area in esame, è riferibile alla serie Laziale-Abruzzese. Dopo la crisi orogenica alto-miocenica, caratterizzata da una fase tettonica prevalentemente traslativa, i cui effetti sono molto evidenti lungo il fronte nord-orientale della struttura dei Volsci, nel Plio-Pleistocene l'intera regione risente di un generale fenomeno di collasso con formazione di strutture a Horst e Graben. In concomitanza di questi eventi, nella regione si è sviluppata un'intensa attività vulcanica, che ha vistosamente interessato anche l'area in esame (Vulcano di Roccamonfina), oltre che la Valle Latina. Il Rifting neogenico, di cui le monoclinali di M. te Maio e di M. te Massico rappresentano le culminazioni positive, sembra avere interessato la regione secondo due allineamenti tettonici principali, con direzione appenninica e antiappenninica, che si intersecano nell'area di Roccamonfina. Sono presenti, tuttavia, anche faglie distensive con direzione circa meridiana e parallela, il cui significato nell'evoluzione tettonica recente dell'area assume particolare interesse ai fini geotermici. Il Graben del basso Garigliano, con direzione antiappenninica, risulta delimitato verso nord-ovest dall'alto strutturale di M. te Maio e verso sud-est da quello di M. te Massico. La depressione tettonica si continua, verso nord-est, delimitata lungo il margine nord-occidentale dall'alto di M. te Camino, fino a raggiungere le propaggini meridionali dei M. ti delle Mainarde. Il Graben prosegue verso sud-ovest, a mare, colmato da depositi marnoso-arenacei flyschiodi, da sequenze caotiche riferibili al complesso Sicilide e da terreni prevalentemente argilloso-sabbiosi del ciclo neogenico superiore (sondaggio SAMET). L'area di ricarica degli acquiferi risulta sostanzialmente limitata agli affioramenti della serie calcareo-dolomitica giurese-cretacico-miocenica. Il complesso terrigeno flyschioide e la successione sabbioso-argillosa plio-quaternaria, poco permeabile in massa, circondano con continuità i rilievi carbonatici di M. te Maio, M. te Camino e M. te Massico, molto permeabili per fessurazione e carsismo e sede di una attiva circolazione sot-

terranea.

Le acque di falda che alimentano le numerose manifestazioni sorgentizie ubicate alla periferia dell'unità di M. te Maio, presentano caratteristiche fisiche e geochimiche fra loro molto differenti, riconducibili a due diversi tipi di circolazione, una superficiale, prevalentemente carsica, e l'altra profonda, di tipo idrotermale, che interferiscono tra loro.

L'analisi delle manifestazioni idrotermali presenti nell'area in esame, ben note ed utilizzate per scopi terapeutici fin dai tempi storici, ha consentito di individuare due settori di particolare interesse ai fini geotermici. Il primo settore è ubicato nell'area di Suio, lungo il limite orientale dell'unità di M. te Maio, dove sono stati perforati numerosi pozzi per la ricerca di acque calde. Uno dei più significativi è il pozzo "Terme Vescine", profondo 137 metri, che eroga spontaneamente in superficie acque fortemente gassate alla temperatura di circa 60°C. Come era lecito attendersi, tali acque presentano marcate affinità chimico-fisiche con quelle delle manifestazioni sorgentizie, poco distanti, allineate lungo il margine nord-occidentale del Graben; hanno un residuo fisso di circa 3 g/l ed un valore di pH debolmente acido.

Il secondo settore si trova nell'area di Mondragone, al limite sud-occidentale del rilievo di M. te Massico, dove è ubicato il pozzo "Bagni Solfurei". Profondo solamente alcune decine di metri, eroga acque in pressione, ricche in gas, alla temperatura di circa 45° C, con residuo fisso maggiore di 5 g/l e pH acido.

Le acque mostrano marcate affinità geochimiche e fisiche con quelle captate dal pozzo "Terme Vescine"; distante circa 20 km. Sulla base dei dati geologici, idrogeologici ed idrogeochimici finora acquisiti, viene proposto un modello schematico (Fig. 4) rappresentativo della circolazione sotterranea che interesserebbe l'area in esame, secondo la traccia di un profilo che passa a sud del rilievo di M. te Maio, per gli alti strutturali di M. te Massico, a sud-est, e degli Aurunci occidentali, a nord-ovest, attraverso il Graben del basso Garigliano. Sebbene largamente incompleti, i dati acquisiti lasciano presumere nel Graben del basso Garigliano, al di sotto della copertura terrigena alto miocenica e plio-quadernaria, a bassa permeabilità l'esistenza di un vistoso serbatoio carbonatico mesocenoico,

in facies Laziale-Abruzzese, dello spessore di circa 2000 metri (Lias medio-Miocene medio).

Le migliori rocce serbatoio dovrebbero però essere rappresentate dalle sequenze dei calcari del Lias medio-superiore (serbatoio "inferiore"), dello spessore di circa 300 m, e, del Cretacico superiore-Miocene medio (serbatoio "superiore"), potenti almeno 500 metri.

Le condizioni di ricarica sono assicurate dalla falda carsica che satura la base dei rilievi di M. te Maio, M. te Camino, degli Aurunci occidentali e di M. te Massico, in sicura connessione idraulica con il serbatoio sepolto. La falda dell'unità di M. te Maio ha un bilancio accuratamente valutato superiore a 90 milioni di m^3 /anno, pari a circa $3 m^3/s$, mentre quello di M. te Camino risulta di circa 170 milioni di m^3 /anno, pari a $5,5 m^3/s$. Il contributo potenziale del rilievo di M. te Massico alla rialimentazione del serbatoio meso-cenozoico sepolto è molto modesto, in relazione alla limitata estensione dell'area di ricarica. Di notevole interesse alla ricarica del serbatoio sepolto risulta invece la sottounità degli Aurunci occidentali, che costituisce un bacino idrogeologico di vaste proporzioni. Le perforazioni esistenti nell'area, se si esclude il pozzo SAMET profondo 1500 metri e di cui non si dispone di alcuna informazione di interesse geotermico, sono superficiali, al più di poco superiori a 200 metri. Le condizioni fisiche del serbatoio sono desumibili solamente da dati indiretti; i più interessanti sono quelli rilevabili dal pozzo "Terme Vescine", presso Suio Terme, e "Bagni Solfurei", presso Mondragone. Il pozzo "Terme Vescine" non ha raggiunto la migliore roccia serbatoio, riferibile alla sequenza "inferiore" del substrato carbonatico, ma si è fermato nelle assise prevalentemente dolomitiche del Lias superiore-Dogger, dove le condizioni di rialimentazione sono ridotte. D'altra parte il pozzo "Bagni Solfurei", non ha raggiunto il serbatoio carbonatico "superiore", arrestandosi alla profondità di circa 40 metri nei depositi alluvionali che circondano il settore sud-occidentale del rilievo di M. te Massico. Sulla base delle caratteristiche stratigrafiche, dell'assetto strutturale della regione e dei dati geochimici disponibili (geotermometro della silice) si può ritenere che nel serbatoio "inferiore" dell'area di Suio, tra -500 e -1000 metri di quota, le acque possono raggiungere valori di temperatura compresi tra 100 e $150^\circ C$, mentre in quello "superiore" del-

l'area di Mondragone, tali valori non supererebbero, alla quota indicativa di - 1000 metri, il valore di 100° C. Il tetto ed il letto del serbatoio meso-cenozoico, nel settore più profondo del Graben del basso Garigliano, dovrebbero trovarsi, indicativamente, a 2000 e 4000 metri di profondità. Estrapolando i dati fisici disponibili al settore centrale del Graben, dove più elevato dovrebbe essere il flusso termico, si può ipotizzare, indicativamente, un gradiente geotermico di almeno 60° C/km.

6. Valle Latina - Compresa tra le dorsali carbonatiche dei Volsci a sud-ovest, e dei M. ti Simbruini-Ernici a nord-est, la Valle Latina risulta delimitata a nord-ovest dalle propaggini meridionali dei M. ti Prenestini e del Vulcano Albano e a sud-est dai rilievi di M. te Maio, M. te Camino e del vulcano di Roccamonfina. Orientata con direzione appenninica, la Valle Latina ha una superficie di circa 800 km^2 .

Come noto, la successione dei terreni mesozoici e cenozoici p. p. che costituiscono le dorsali dei Volsci, dei Simbruini-Ernici, di M. te Maio e di M. te Camino, è schiettamente calcareo-dolomitica; potente oltre 2500 m, risulta riferibile alla serie Laziale-Abruzzese.

I M. ti Prenestini sono invece rappresentati da una successione meso-cenozoica, carbonatico-silico-marnosa dello spessore di circa mille metri, con marcate caratteristiche di transizione della serie Umbro-Marchigiana (facies "Sabina").

Per quanto concerne la successione stratigrafica dei terreni meso-cenozoici sepolti nella Valle Latina, sulla base dei dati disponibili, si può ritenere che essa presenti facies analoghe a quelle rilevabili nella dorsale simbruino-ernica, di cui costituisce la naturale prosecuzione verso sud-ovest. La parte nord-occidentale del substrato meso-cenozoico della valle, mostra, tuttavia, marcate affinità stratigrafiche con la serie dei M. ti Prenestini, costituendone la naturale prosecuzione, verso sud, al di sotto della copertura vulcanica del sistema albano. Nella Valle Latina il substrato mesozoico risulta sepolto da una potente sequenza flyschioide arenaceo-marnosa del Miocene medio-superiore, che presenta verso l'alto frequenti intercalazioni argilloso-calcarenitiche, molto caotizzate riferibili al Complesso Sicilide. La serie termina con depositi prevalentemen

te argilloso-sabbioso-conglomeratici del plio-quadernario, coperti da una coltre vulcanica discontinua e generalmente di modesto spessore. Sono presenti, inoltre, vistosi affioramenti di travertino che occupano ampie aree della valle, lungo il suo asse maggiore, la cui formazione è riconducibile ad una intensa e diffusa attività vulcanica che ha interessato la regione nel Quaternario.

Il Graben della Valle Latina risulta delimitato dagli alti strutturali e morfologici della dorsale dei Volsci, a sud-ovest e dei M. ti Simbruini-Ernici a nord-est, ribassato da una successione di faglie distensive, appenniniche. Nel settore nord-occidentale della valle, tale struttura sembra proseguire verso settentrione, nel Graben di Riano, delimitato dagli alti strutturali, rispettivamente, di Cesano-Circo Massimo-Ciampino, a sud-ovest, e di M. te Soratte-M. ti Cornicolani, a nord-est. La fossa tettonica in esame risulta, tuttavia, complicata dalla presenza di alti e bassi strutturali minori, delimitati da faglie con direzioni trasversali a quella appenninica, formatesi in tempi diversi, a seguito dei movimenti differenziali di sprofondamento subiti dal substrato nel corso del Plio-Quaternario.

Le dorsali carbonatiche dei Volsci e dei M. ti Simbruini-Ernici, costituiscono per le loro caratteristiche litologiche, strutturali e morfologiche, due unità idrogeologiche di vistose proporzioni, ben definite, separate dal Graben della Valle Latina, che risulta colmato da depositi sin-orogenici e post-orogenici di notevole spessore, prevalentemente terrigeni, a bassa permeabilità.

L'Unità idrogeologica dei Volsci, circondata da una cintura di sedimenti poco permeabili, è saturata alla base da una falda che mostra, in generale, linee di drenaggio regionali verso sud-ovest, dove alimenta una numerosa serie di manifestazioni sorgentizie, allineate prevalentemente lungo il margine tirrenico della struttura. Il deflusso istantaneo potenziale medio risulta di circa $34 \text{ m}^3/\text{s}$, pari a circa 1100 milioni di m^3/anno .

L'Unità idrogeologica dei Simbruini-Ernici è saturata alla base da due falde principali, separate all'altezza dei Simbruini meridionali, dove l'alto strutturale di Trevi solleva il basamento dolomitico infraliassico. La falda settentrionale più ridotta, alimenta il gruppo di sorgenti di Agosta, a nord-ovest, le sorgenti dell'alto Aniene, e le sorgenti dell'alta Valle Ro-

veto, a nord-est. La falda meridionale, estesa con continuità dai Simbruini a M. te Camino, alimenta principalmente le sorgenti del F. Gari e del F. Peccia. In particolare, l'Unità Simbruino-Ernica, ribassata a gradinata verso la Valle Latina da una successione di faglie distensive, con direzione appenninica, risulta tamponata dai depositi terrigeni sin-orogenici e post-orogenici, a bassa permeabilità, che colmano la depressione. In questa situazione strutturale, lungo il versante sinistro della valle, il substrato carbonatico può essere ben alimentato lateralmente dalla falda di base che satura il vicino rilievo ed è presumibile l'esistenza di considerevoli falde imprigionate.

Le sorgenti basali della sottounità idrogeologica dei Simbruini meridionali-M. ti Ernici-M. te Cairo sono ubicate a quote decrescenti verso sud-est, lungo il limite di permeabilità tra le rocce carbonatiche della struttura mesozoica e i depositi terrigeni mio-plio-quadernari della Valle Latina e presentano globalmente un deflusso istantaneo medio di circa $25 \text{ m}^3/\text{s}$, pari a circa 773 milioni di m^3/anno .

Le acque della falda basale che satura la sottounità sono bicarbonatiche-alcalino-terrose. Presentano pH debolmente basico, un residuo fisso inferiore generalmente a $0,7 \text{ g/l}$, e valori di temperatura che si aggirano tra 12 e 15° C . Le sorgenti solfuree della Valle Latina sono ubicate all'interno o alla periferia di vistosi affioramenti di travertino, che occupano generalmente il settore centrale della valle, oppure lungo il margine nord-orientale della depressione, al contatto con la struttura carbonatica simbruino-ernica. Tali manifestazioni presentano sempre un deflusso istantaneo al più di qualche l/s , con acque spesso accompagnate da forti emanazioni gassose. Classificabili, generalmente, come acque a solfati e bicarbonati alcalino-terrosi hanno pH debolmente acido, residuo fisso compreso fra $0,7$ e $1,8 \text{ g/l}$ e valori di temperatura leggermente più alti e costanti nel tempo, variabili tra 16 e 20° C circa.

Sulla base dei dati geologici, idrogeologici ed idrogeochimici acquisiti, viene proposto un modello schematico (Fig. 4) rappresentativo della circolazione sotterranea che interesserebbe l'area in esame, secondo la traccia di un profilo che, attraverso il Graben della Valle Latina, collega gli alti strutturali e morfologici delle Unità idrogeologiche dei Volsci, a sud-ovest,

e dei Simbruini-Ernici, a nord-est. Sebbene largamente incompleti, i dati acquisiti lasciano prevedere, al di sotto della copertura terrigena mio-plio-
-quaternaria, a bassa permeabilità, la presenza di un serbatoio carbonati-
co meso-cenozoico, in facies Laziale-Abruzzese, in sicura connessione
idraulica con l'Unità simbruino-ernica, sede di una attiva circolazione
carsica ipogea. La presenza di deboli anomalie termiche e di più marcate
anomalie geochimiche, consentono di ipotizzare la risalita attraverso il
substrato carbonatico sepolto, lungo vie di discontinuità tettonica, di flui-
di liquidi e/o gassosi, termicamente anomali e molto mineralizzati. Tali
fluidi nella loro risalita si miscelerebbero con le acque di falda, imprigio-
nate, che saturano il serbatoio carbonatico, condannando localmente an-
che le falde epidermiche presenti nei terreni della copertura plio-quater-
naria, più permeabili.

Le migliori rocce serbatoio dovrebbero essere rappresentate dalle sequen-
ze dei calcari del Lias medio-superiore, dello spessore di circa 300 m
(serbatoio "inferiore") e dei calcari organogeni del Cretacico superiore-
-Miocene inferiore, potente circa 600-700 m (serbatoio "superiore").

Allo stato attuale della ricerca non si dispone di dati fisici, "diretti" o "in-
diretti", attendibili, sulle probabili condizioni termiche del serbatoio meso-
-cenozoico sepolto; tuttavia la situazione geologica, strutturale e l'evolu-
zione tettonica recente dell'area consentono di ipotizzare un valore di gra-
diente indicativamente di 50° C/km nella fascia centrale e sud-occidenta-
le del Graben, dove più interessanti appaiono le condizioni termiche del
serbatoio.

Conclusioni, limiti e prospettive della ricerca.

E' stato eseguito il censimento delle manifestazioni idrotermali e delle ano-
malie geochimiche presenti nel settore dell'Appennino carbonatico conside-
rato.

E' risultato chiaramente che tutte le manifestazioni vengono prevalentemen-
te alimentate dalle acque del ciclo carsico, in varia misura miscelate con
acque di un ciclo idrotermale.

Dal confronto fra la distribuzione delle anomalie e le caratteristiche geo-
logiche del territorio risulta che le manifestazioni più interessanti cadono
in corrispondenza delle particolari situazioni geo-strutturali descritte nel

paragrafo 3. 2.

La selezione delle aree più favorevoli all'esistenza di strutture geotermiche ha portato per il momento all'approfondimento degli studi in tre zone, per ciascuna delle quali si propone un modello schematico di circolazione sotterranea.

E' ovvio che nei limiti dei metodi di ricerca utilizzati non si può andare oltre la proposta di modelli teorici, più o meno affidabili, che risultano dalla estrapolazione di pochi elementi raccolti in superficie. E' questa comunque una fase che, con tutti i suoi limiti, riteniamo utile per fare il punto delle conoscenze acquisite e indispensabili per il proseguimento degli studi. La futura ricerca può svilupparsi in due direzioni:

- preparazione di nuovi modelli in tutte le aree dove gli elementi raccolti in superficie risultano interessanti;
- tentativo di migliorare l'affidabilità del modello e soprattutto meglio definire le caratteristiche fisiche e geometriche del serbatoio.

In generale si può affermare che nelle aree considerate, le potenziali rocce serbatoio carbonatiche meso-cenozoiche, sepolte da una efficace copertura terrigena mio-plio-quadernaria, sono ubicate ai margini di imponenti bacini idrogeologici, di natura carsica, che ne assicurano la ricarica.

I dati fisici "diretti" (ove disponibili) ed "indiretti" (ove attendibili) sulle caratteristiche termiche dei serbatoi sepolti, consentono di prevedere l'esistenza di fluidi, in pressione e a bassa entalpia, con gradiente indicativamente superiore a 50° C/km.

BIBLIOGRAFIA SOMMARIA

- /1/ B. Accordi (1966) - La componente traslativa nella tettonica dell'Appennino laziale-abruzzese. *Geologica Romana*, 5, 355-400, 33 Figg., 1 carta tett., Roma.
- /2/ C. F. Boni (1973) - Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese (primi risultati della campagna 1970-1972). *Atti 2 Congr. Int. Acque Sotterranee*, 11 pp., 1 Fig., Palermo.
- /3/ M. Parotto e A. Praturlon (1975) - Geological Summary of Central Apennines. In: "Structural Model of Italy. Maps and explanatory Notes". *Quat. Ric. Sc.*, 90, 257-311, 20 Figg., Roma.