

V. DUCHI (\*), A. MINISSALE (\*\*), L. ROMANI

STUDIO GEOCHIMICO SU ACQUE E GAS  
DELL'AREA GEOTERMICA  
LAGO DI VICO-M. CIMINI (VITERBO) (\*\*\*)

**Riassunto** — In questa indagine sono state studiate da un punto di vista geochimico 20 acque superficiali, 26 acque profonde e 17 emanazioni gassose associate, appartenenti all'area dei M. Cimini-Vico. Il chimismo dei campioni ha messo in evidenza due acquiferi principali: uno superficiale a composizione bicarbonato alcalino-terrosa (vulcaniti) ed uno profondo a chimismo prevalente solfato calcico, non comunicanti fra loro in quanto separati da terreni impermeabili (sedimenti marini del ciclo neoautoctono). Il chimismo solfato calcico, l'associazione di fasi gassose a prevalente CO<sub>2</sub>, l'alta termalità di queste acque e informazioni dirette ottenute da perforazioni profonde, indicano in modo inequivocabile una circolazione idrica nelle rocce anidritico-carbonatiche mesozoiche.

In base alla composizione delle acque e dei gas associati e alle diversità fra loro esistenti è stato possibile costruire modelli di circolazione; trattasi di cicli aperti di circolazione convettiva che si originano prevalentemente da nuclei mesozoici affioranti e dai numerosi camini vulcanici esistenti nella zona, per svilupparsi poi in profondità e quindi risalire per gradiente idrodinamico lungo fratture.

Gli indicatori geotermici litio e boro, assieme alla correlazione chimica delle fasi gassose, giustificano, in questa zona, la presenza di un'anomalia geotermica, che è responsabile della termalità delle sorgenti calde dell'area in esame.

**Abstract** — *Water and gas geochemistry in the lago di Vico-M. Cimini geothermal area (Viterbo).* 20 surface springs, 26 deep springs and 17 gas vents from the M. Cimini-Vico area have been studied from a geochemical point of view.

The chemistry of the springs points out the presence of two non-communicating aquifers. The uppermost has an alkaline earth bicarbonate composition, whereas a calcium sulphate chemistry characterizes the deeper one.

The chemical composition and the high thermality of the springs, the gas composition (mostly CO<sub>2</sub>) and bore-hole information, indicate the presence of a deep aquifer in the calcareous anhydritic rocks.

---

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra di Firenze.

(\*\*) Centro di Studio per la Mineralogia e la Geochimica dei Sedimenti, C.N.R. - Firenze.

(\*\*\*) Lavoro eseguito con il contributo M.P.I. 60%.

The circulation models generally result open convective circuits. They originate in the Mesozoic limestones and/or in the volcanic necks outcropping in the area. They are developed in depth, owing to the high permeability of the horst rocks. The upwelling is mainly due to hydrodynamic gradients along the main fractures.

The high content of the markers of thermal anomaly (Li,  $H_3BO_3$ ), the correlation between temperature and sulphate content in thermal springs, as well as the gas composition, indicate the presence of a deep regional thermal anomaly.

**Key words** — Geochemistry of waters and gases - circulation models - thermality - Latium (Italy).

## INTRODUZIONE

Questo studio geochimico su acque e gas dell'area Lago di Vicom. Cimini si inquadra in un programma di ricerca che da alcuni anni, nell'ambito del Dipartimento di Scienze della Terra di Firenze, viene condotto sulle fasi fluide delle aree ad anomalia geotermica dell'Appennino centro-settentrionale.

Sono state prelevate diverse acque di origine superficiale, un certo numero di acque profonde, alcune delle quali mai analizzate in precedenti lavori svolti nella zona (DALL'AGLIO e TEDESCO, 1968; BALDI *et al.*, 1973; ARNONE, 1979) e le fasi gassose ad esse associate dove erano campionabili.

Lo studio della composizione chimica delle manifestazioni naturali prelevate, integrato con dati geologici e geofisici ripresi dalla letteratura, si propone di ottenere informazioni circa la genesi, la circolazione, l'evoluzione e il comportamento delle fasi mobili nella parte più superficiale della crosta terrestre, oggetto di maggiore interesse anche ai fini di uno sfruttamento energetico.

Ulteriore scopo di questa ricerca è anche quello di evidenziare, attraverso i costituenti in tracce quali  $SiO_2$ ,  $NH_4^+$ ,  $Li^+$  e  $H_3BO_3$  (buoni indicatori chimici di anomalie geotermiche profonde) e attraverso la composizione delle fasi gassose, le aree a gradiente anomalo.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

L'area che comprende il Lazio settentrionale e la Toscana meridionale, tra la costa tirrenica e la catena appenninica, costituisce un settore di una provincia tettonica ben definita. La sua caratteristica principale è data dalla presenza di bacini di sedimentazione

alto mio-pleistocenici che si allungano tra dorsali costituite da rocce sedimentarie e metamorfiche corrugate preneogeniche. Le strutture principali, una serie di horst e graben con prevalente direzione di allungamento NNW-SSE, sono conseguenti alla tettonica distensiva che segue l'orogenesi appenninica dal Pliocene inferiore al Pleistocene. Le unità strutturali preneogeniche sono costituite, nell'area considerata, dalla successione filladica-quarzitica del Verrucano (Carb.-Trias), dalle successioni pelagiche-marnose-silicee e turbiditiche della Serie Umbra (Trias sup.-Miocene) al margine NE dell'area e della Serie Toscana (Trias sup.-Oligocene) nella parte più occidentale ed infine da unità alloctone in facies di flysch prevalente (Giura-Eocene) (v. fig. 1). I rapporti tra queste formazioni sono tettonici, conseguenti alla fase compressiva del Tortonian (orogenesi appenninica) con prevalente movimento verso est. Sulle unità sopra citate poggiano, in discordanza, le formazioni sedimentarie del ciclo marino neoautoctono sia in facies trasgressiva che regressiva (Miocene-Pleistocene) e successivamente depositi continentali lacustri e fluvio-lacustri Plio-Quaternari. I bacini sedimentari si approfondiscono anche oltre 2000 metri e sono limitati da faglie subverticali con direzione NNW-SSE per le principali e trasversale alla precedente per le secondarie. Affiorano inoltre plutoniti e vulcaniti intermedio acide (M. Cimino) e appartenenti alla Provincia Petrografica Toscana e vulcaniti alcalinopotassiche (Vico) appartenenti alla Provincia Petrografica Romana (Pleistocene). Alcune fasi della tettonica distensiva Plio-Quaternaria sono accompagnate da diffuse manifestazioni idrotermali che hanno portato alla formazione di estesi depositi di travertino, che in alcune località è tuttora in atto (Viterbo, Orte).

I principali lineamenti tettonici delle aree del Cimino e di Vico includono l'alto di M. Razzano, i sedimenti del Pliocene sollevati con vulcanismo cimino, il graben del Tevere e l'alto strutturale di Orte. Il duomo del M. Cimino, che giace lungo l'asse del graben, è controllato da un sistema di faglie di cui la principale ha direzione NE-SW. La distribuzione dei duomi attorno al M. Cimino definisce un sistema di fratture circolari, un'altra serie di duomi ha invece disposizione allungata NW-SE per circa 16 Km ed è connessa con un altro sistema di faglie. Un altro elemento tettonico che interessa l'area è il sistema di faglie Vico-Orte alla cui attività è presumibilmente connesso il vulcanismo di Vico. Il sistema di faglie, con probabile componente trascorrente sinistra, interrompe l'alto strutturale di Orte e si estende da questa fino al Lago<sup>4</sup> di Vico.

Dai terreni presenti nella zona i complessi alloctoni in facies ligure, le formazioni calcareo-marnose-arenacee della Serie Toscana ed Umbra e i terreni sedimentari del ciclo marino neoautoctono, si possono considerare prevalentemente impermeabili. Questi costituiscono la base idrogeologica delle sovrastanti vulcaniti, che hanno una permeabilità primaria elevata, e la coltre di copertura del sottostante acquifero costituito dalle formazioni carbonatiche mesozoiche permeabili per fratturazione. Quindi normalmente non c'è interscambio tra i due acquiferi ad eccezione dei camini vulcanici e dei piani di faglia dove si ha comunicazione idraulica.

Per ulteriori dettagli di natura geologica ed idrogeologica consultare i lavori specifici sulla zona (BRANDI *et al.*, 1970; MATTIAS e VENTRIGLIA, 1970; PUXEDDU, 1971; BALDI *et al.*, 1974; CALAMAI *et al.*, 1976; SOLLEVANTI, 1983).

#### UBICAZIONE DEI CAMPIONI

Nell'area interessata da questo studio sono state campionate, in due fasi successive, 46 acque e 17 emanazioni gassose; la loro ubicazione è riportata in figura 1. Per avere un quadro della circolazione idrogeologica generale abbiamo prelevato sia acque superficiali che profonde; cioè tutte quelle manifestazioni che presentavano una certa termalità o erano associate a fasi gassose, più un certo numero di acque vadose e freatiche come corsi d'acqua, pozzi e sorgenti. Per quanto riguarda la numerazione dei campioni questa segue l'ordine di campionamento ed è mostrata in figura 1.

#### RISULTATI ANALITICI E LORO DISCUSSIONE

Nelle acque oltre l'analisi fondamentale sono stati determinati alcuni costituenti minori quali  $\text{Li}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{F}^-$ , utilizzando i metodi analitici consueti per i quali si rimanda a BENCINI *et al.* (1977). Sono stati determinati per via spettrofotometrica anche lo ione ammonio utilizzando il reattivo di Nessler e il boro impiegando Azometina H (BENCINI, 1985). La determinazione dell'ammonio è stata effettuata in campagna per mezzo di spettrofotometro portatile. Nei gas sono stati dosati, per via gascromatografica, i componenti:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{S}$ .

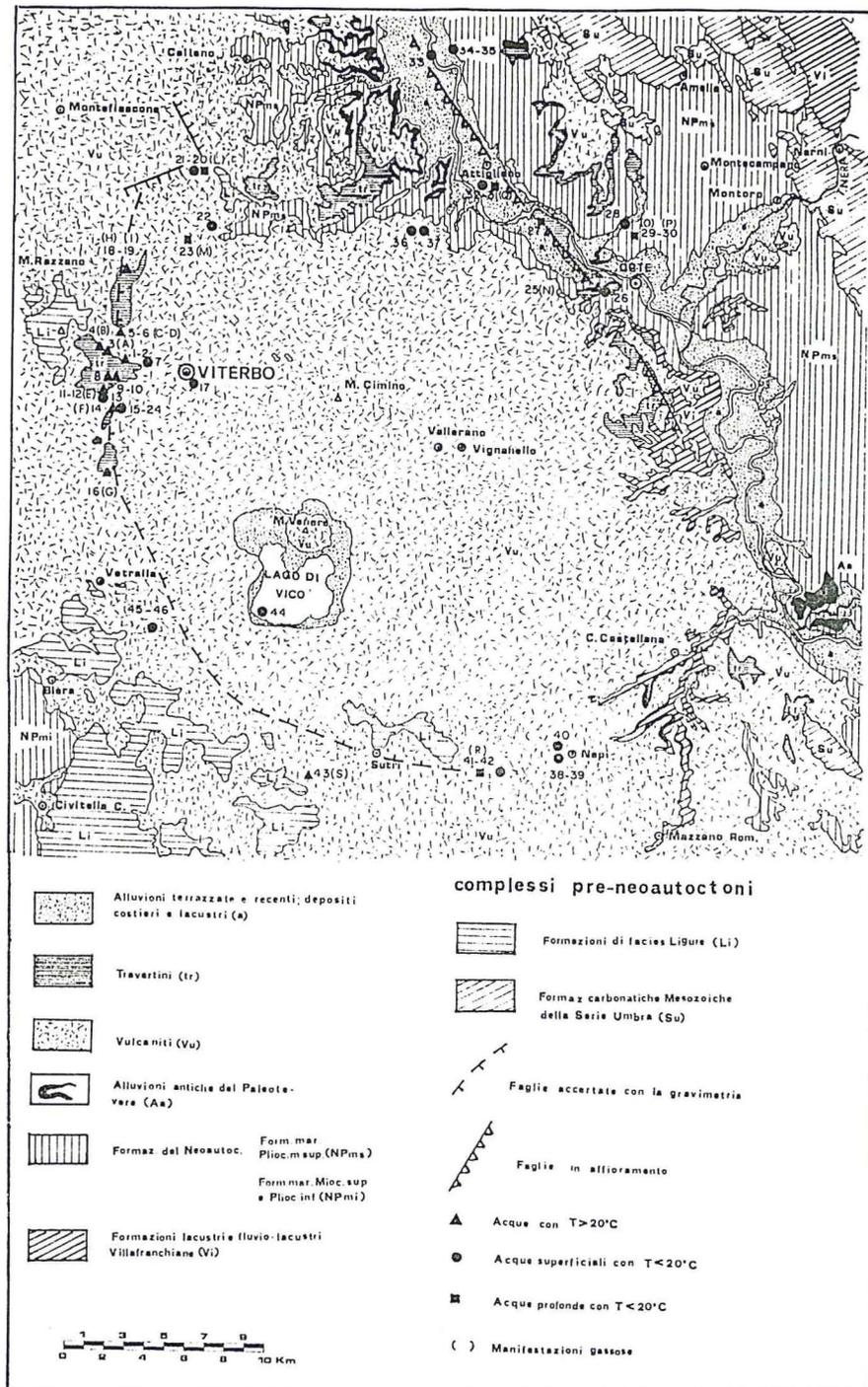


Fig. 1 - Carta geologica ripresa da Baldi et al. (1974) e modificata. Nella carta è riportata anche l'ubicazione dei campioni di acque e di gas prelevati.

TABELLA I - Acque profonde.

| n° | nome                  | T°C | pH   | cond | TDS  | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | SiO <sub>2</sub> | F <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | Li <sup>+</sup> |
|----|-----------------------|-----|------|------|------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1  | Bullicame 1           | 56  | 6.67 | 4.10 | 2781 | 26.4             | 10.4             | 1.50            | 0.88           | 16.0                          | 0.44            | 22.2                          | 970              | 180            | 280                          | 96                             | 20.2            |
| 2  | Bullicame 2           | 39  | 7.29 | 3.60 | 2281 | 21.2             | 10.0             | 1.54            | 0.88           | 9.6                           | 0.45            | 22.2                          | 980              | 110            | 336                          | 100                            | 22.2            |
| 3  | Bullicame 3           | 57  | 6.63 | 4.20 | 2778 | 26.4             | 9.2              | 1.52            | 0.88           | 15.6                          | 0.40            | 23.0                          | 930              | 190            | 860                          | 99                             | 21.3            |
| 4  | Le Zitelle            | 62  | 6.59 | 4.40 | 3500 | 29.6             | 12.0             | 1.53            | 0.90           | 16.4                          | 0.45            | 24.6                          | 900              | 190            | 27                           | 100                            | 20.7            |
| 5  | C.ma CALÈ 1           | 46  | 6.48 | 3.90 | 2766 | 26.8             | 10.6             | 1.50            | 0.89           | 16.4                          | 0.45            | 21.2                          | 1000             | 210            | 36                           | 98                             | 20.2            |
| 6  | C.ma CALÈ 2           | 50  | 6.64 | 4.00 | 2848 | 27.4             | 11.4             | 1.51            | 0.86           | 16.6                          | 0.45            | 22.2                          | 950              | 190            | 13                           | 94                             | 21.3            |
| 8  | Terme com.            | 57  | 6.62 | 4.20 | 2989 | 29.8             | 11.6             | 1.50            | 0.88           | 17.2                          | 0.38            | 23.4                          | 970              | 66             | 3.6                          | 97                             | 20.2            |
| 9  | Stab. INPS 1          | 53  | 6.46 | 4.00 | 2898 | 28.2             | 11.0             | 1.52            | 0.85           | 16.6                          | 0.49            | 23.0                          | 950              | 180            | 28                           | 92                             | 18.4            |
| 10 | Stab. INPS 2          | 55  | 6.40 | 4.50 | 2886 | 28.4             | 10.4             | 1.50            | 0.85           | 16.8                          | 0.48            | 22.6                          | 940              | 190            | 0.8                          | 93                             | 19.0            |
| 11 | P. Diavolo 1          | 33  | 6.27 | 3.10 | 2277 | 23.4             | 8.0              | 1.37            | 0.71           | 13.9                          | 0.50            | 18.2                          | 1050             | 120            | 5                            | 70                             | 11.5            |
| 12 | P. Diavolo 2          | 30  | 7.41 | 3.00 | 2188 | 21.0             | 8.2              | 1.38            | 0.74           | 12.7                          | 0.51            | 17.0                          | 1040             | 110            | 33                           | 69                             | 11.5            |
| 14 | Asinello 1            | 53  | 6.43 | 5.00 | 3604 | 38.0             | 11.8             | 1.50            | 0.83           | 17.5                          | 0.38            | 32.4                          | 950              | 160            | 11                           | 100                            | 22.2            |
| 16 | Il Masso              | 59  | 6.49 | 4.90 | 3549 | 36.4             | 13.6             | 1.50            | 0.82           | 17.8                          | 0.50            | 31.0                          | 800              | 160            | 7.1                          | 98                             | 19.0            |
| 18 | Bagnaccio 1           | 65  | 6.40 | 4.30 | 3115 | 30.4             | 11.8             | 1.54            | 0.85           | 16.9                          | 0.50            | 26.0                          | 800              | 190            | 7.8                          | 100                            | 19.0            |
| 19 | Bagnaccio 2           | 43  | 6.82 | 4.20 | 2986 | 27.8             | 12.4             | 1.60            | 0.85           | 14.7                          | 0.50            | 27.0                          | 830              | 140            | 7.8                          | 101                            | 19.0            |
| 20 | Solfatara             | 19  | 3.31 | 1.80 | 715  | 5.0              | 3.3              | 1.03            | 0.32           | ass.                          | 0.36            | 9.8                           | 920              | n.d            | 340                          | 24                             | 4.6             |
| 23 | Stab. CO <sub>2</sub> | 19  | 5.83 | 1.30 | 945  | 6.5              | 1.7              | 1.96            | 2.00           | 10.5                          | 0.46            | 1.8                           | 1790             | 110            | 5                            | 26                             | 8.6             |
| 25 | Bagno Orfe 1          | 23  | 6.72 | 2.90 | 2116 | 20.0             | 7.6              | 2.00            | 0.27           | 16.0                          | 1.55            | 11.2                          | 270              | 71             | 7.1                          | 71                             | 6.4             |
| 27 | Il Laghetto           | 16  | 6.67 | 2.20 | 1791 | 17.4             | 4.8              | 1.50            | 0.20           | 15.0                          | 1.26            | 8.0                           | 480              | 47             | 7.1                          | 17                             | 2.8             |
| 29 | Muralto 1             | 14  | 5.77 | 1.60 | 1122 | 12.6             | 1.4              | 0.92            | 0.03           | 8.2                           | 0.40            | 6.6                           | 220              | 17             | 7.1                          | 8                              | 1.4             |
| 30 | Muralto 2             | 11  | 5.88 | 2.30 | 1759 | 21.0             | 2.0              | 0.49            | 0.04           | 14.0                          | 0.20            | 9.2                           | 420              | 8.4            | 28                           | 8                              | 2.1             |
| 31 | Acqua Puzza1          | 16  | 6.30 | 4.50 | 3410 | 20.0             | 11.0             | 15.0            | 0.58           | 31.2                          | 6.60            | 7.8                           | 370              | 130            | 101                          | 99                             | 41.0            |
| 34 | Acqua Santa           | 16  | 6.55 | 15.4 | 9443 | 14.5             | 23.1             | 103             | 1.90           | 53.2                          | 89              | 0.80                          | 420              | 62             | 1050                         | 286                            | 84              |
| 38 | Sorg. Nepi            | 20  | 5.83 | 0.89 | 823  | 4.50             | 2.50             | 1.80            | 1.50           | 8.50                          | 0.40            | 1.50                          | 2100             | 120            | 17.0                         | 26                             | 8.60            |
| 41 | Solf. Nepi 1          | 10  | 3.63 | 0.88 | 349  | 1.7              | 1.3              | 1.20            | 0.45           | ass.                          | 0.40            | 5.0                           | 830              | n.d            | 22                           | 10                             | 1.4             |
| 43 | Mola Bassano          | 23  | 5.59 | 0.76 | 553  | 3.1              | 1.3              | 1.60            | 1.10           | 5.2                           | 0.20            | 1.5                           | 2060             | 77             | 5.7                          | 29                             | 7.8             |

TABELLA II - Acque superficiali.

| n° | nome          | T°C | pH   | cond | TDS | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | SiO <sub>2</sub> | F <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | Li <sup>+</sup> |
|----|---------------|-----|------|------|-----|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 7  | F.te Boia     | 17  | 6.93 | 0.49 | 344 | 2.36             | 0.92             | 1.14            | 0.54           | 2.70                          | 0.80            | 0.92                          | 1200             | 66             | 3                            | 12                             | 0.14            |
| 13 | P. Diavolo 3  | 18  | 6.88 | 0.31 | 225 | 1.18             | 0.58             | 0.84            | 0.53           | 2.00                          | 0.38            | 0.35                          | 1040             | 63             | 3.6                          | 14                             | 2.88            |
| 15 | Asinello 2    | 17  | 7.03 | 0.27 | 189 | 0.84             | 0.56             | 0.71            | 0.56           | 1.50                          | 0.52            | 0.37                          | 970              | 45             | 0.8                          | 16                             | 1.15            |
| 17 | Sorg. Viterbo | 14  | 7.02 | 0.23 | 170 | 0.86             | 0.46             | 0.68            | 0.42           | 1.49                          | 0.44            | 0.18                          | 930              | 29             | 28                           | 10                             | 0.14            |
| 21 | Edifizio      | 20  | 7.61 | 0.48 | 383 | 2.80             | 0.86             | 0.99            | 0.36           | 3.80                          | 0.42            | 0.14                          | 890              | 97             | 0.8                          | 4                              | 1.73            |
| 22 | Acqua Rossa   | 19  | 5.76 | 1.05 | 721 | 3.96             | 2.40             | 1.61            | 2.20           | 8.40                          | 0.45            | 0.80                          | 1830             | 94             | 7.8                          | 21                             | 5.76            |
| 24 | T. Freddano   | 13  | 7.09 | 0.75 | 587 | 4.40             | 1.30             | 1.70            | 0.58           | 4.00                          | 0.95            | 3.00                          | 930              | 36             | 7.8                          | 26                             | 2.10            |
| 26 | Bagno Orte 2  | 13  | 7.73 | 0.81 | 699 | 7.10             | 1.50             | 0.71            | 0.08           | 6.30                          | 0.44            | 2.50                          | 330              | 16             | 4.3                          | 9                              | 1.40            |
| 28 | Rio Grande    | 10  | 7.49 | 0.62 | 525 | 5.60             | 0.60             | 0.57            | 0.09           | 5.40                          | 0.36            | 1.00                          | 180              | 16             | 8.6                          | 8                              | 0.71            |
| 32 | Acqua Puzza2  | 11  | 7.67 | 0.88 | 764 | 6.90             | 1.60             | 1.40            | 0.12           | 7.40                          | 1.05            | 1.70                          | 640              | 24             | 5.7                          | 13                             | 1.40            |
| 33 | Tevere        | 14  | 7.74 | 0.67 | 558 | 4.80             | 1.50             | 0.96            | 0.12           | 5.50                          | 0.43            | 1.40                          | 180              | 12             | 7.1                          | 12                             | 1.40            |
| 35 | S. Eugenia,   | 16  | 7.07 | 0.86 | 733 | 7.20             | 1.50             | 0.92            | 0.06           | 7.90                          | 0.80            | 0.78                          | 430              | 2.3            | 2.1                          | 10                             | 1.40            |
| 36 | F.te Casoli   | 13  | 7.37 | 0.60 | 479 | 2.60             | 0.70             | 2.00            | 0.65           | 5.40                          | 0.48            | 0.02                          | 980              | 79             | 8.6                          | 9                              | 2.10            |
| 37 | F.so Casoli   | 12  | 8.02 | 0.79 | 540 | 3.80             | 1.40             | 1.20            | 0.63           | 4.80                          | 0.40            | 1.84                          | 920              | 48             | 4.3                          | 22                             | 3.60            |
| 39 | Stab. Nepi    | 17  | 5.77 | 0.82 | 691 | 3.90             | 2.20             | 1.50            | 1.30           | 7.30                          | 0.58            | 0.76                          | 1700             | 100            | 19.0                         | 19                             | 7.10            |
| 40 | T.Tre Archi   | 11  | 7.00 | 0.37 | 267 | 1.90             | 0.70             | 0.87            | 0.30           | 2.60                          | 0.40            | 0.36                          | 730              | 23             | 5.7                          | 9                              | 0.71            |
| 42 | T. Nepi       | 12  | 7.18 | 0.40 | 304 | 1.60             | 0.80             | 1.30            | 0.39           | 3.00                          | 0.42            | 0.40                          | 720              | 35             | 17                           | 26                             | 0.71            |
| 44 | Lago di Vico  | 14  | 8.44 | 0.38 | 292 | 1.20             | 0.90             | 1.10            | 0.63           | 2.60                          | 0.36            | 0.76                          | ass.             | 59             | 2.1                          | 98                             | 3.60            |
| 45 | Pozzo Noce 1  | 14  | 6.92 | 0.65 | 486 | 3.20             | 1.00             | 1.20            | 0.89           | 3.20                          | 1.20            | 0.48                          | 1400             | 20             | 7.1                          | 15                             | 1.40            |
| 46 | Pozzo Noce 2  | 14  | 6.08 | 0.41 | 311 | 1.40             | 0.80             | 0.99            | 0.78           | 3.10                          | 0.56            | 0.24                          | 1410             | 39             | 8.6                          | 29                             | 3.60            |

Cond. = mΩ<sup>-1</sup> x cm<sup>-1</sup>; TDS = ppm; SiO<sub>2</sub> - H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> = μmoli/litro;

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - F<sup>-</sup> - Li<sup>+</sup> = μeq./litro; altri ioni = meq./litro

In tabella 1 sono riportati i risultati analitici delle acque profonde, in tabella 2 quelli delle acque superficiali e in tabella 3 la composizione delle fasi gassose.

TABELLA III - Gas espressi in percento in volume.

| nome                    | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| A Bullicame 3           | n.r.           | 0.134          | 5.29           | 0.106           | 94.47           | n.r.             | 39.00                          |
| B Le Zitelle            | n.r.           | 2.470          | 18.13          | 0.124           | 79.24           | 0.036            | 7.34                           |
| C Caserma CALE 1        | n.r.           | 0.220          | 6.02           | 0.074           | 93.58           | 0.117            | 27.00                          |
| D Caserma CALE 2        | n.r.           | 0.390          | 2.78           | 0.013           | 96.75           | 0.072            | 7.13                           |
| E P.te Diavolo 1        | n.r.           | 0.690          | 42.96          | n.r.            | 56.62           | n.r.             | 62.00                          |
| F Asinello 1            | n.r.           | 0.083          | 3.52           | 0.016           | 96.31           | 0.068            | 42.00                          |
| G Il Nasso              | n.r.           | 0.170          | 8.85           | 0.190           | 90.70           | 0.090            | 55.00                          |
| H Bagnaccio 1           | n.r.           | 0.080          | 2.59           | 0.160           | 97.00           | 0.180            | 32.00                          |
| I Bagnaccio 2           | n.r.           | 0.105          | 4.69           | 0.277           | 94.75           | 0.180            | 45.00                          |
| L Solfatara             | n.r.           | 0.007          | 5.18           | 2.570           | 92.25           | n.r.             | 740.00                         |
| M Stab. CO <sub>2</sub> | n.r.           | 0.500          | 6.41           | 5.540           | 93.08           | n.r.             | 13.00                          |
| N Bagno Orté 1          | n.r.           | 1.740          | 54.65          | 0.053           | 43.56           | n.r.             | 31.40                          |
| O Muralto 1             | n.r.           | 0.002          | 1.17           | 0.178           | 98.55           | 0.096            | 585.00                         |
| P Muralto 2             | n.r.           | 0.002          | 3.29           | 0.410           | 96.02           | 0.100            | 1645.00                        |
| Q Acqua Puzza 1         | n.r.           | 0.290          | 29.60          | 0.160           | 69.88           | 0.073            | 102.00                         |
| R Solf. Nepi 1          | n.r.           | 0.014          | 2.94           | 0.013           | 96.90           | 0.135            | 210.00                         |
| S Mola Bassano          | n.r.           | 0.250          | 12.99          | 0.030           | 86.73           | n.r.             | 52.00                          |

### *Acque superficiali e profonde*

Dai valori di reazione, inseriti nei diagrammi quadrati di Langelier-Ludwig, si è potuto caratterizzare il chimismo delle acque superficiali (Fig. 2) e di quelle profonde (Fig. 3). Le acque superficiali freatiche e vadose hanno composizione prevalente bicarbonato alcalino terrosa come in genere si riscontra in questo tipo di acque. Dei campioni considerati di origine profonda (quelli che presentano all'emergenza una  $T > 20^{\circ} \text{C}$  e/o sono associati a fasi gassose e/o hanno una salinità  $> 1000$  ppm) 17 hanno composizione solfato alcalino terrosa, 8 bicarbonato alcalino terrosa ed 1 ha chimismo clorurato alcalino.

### *Acque superficiali*

Nonostante il chimismo di questi campioni sia prevalentemente bicarbonato alcalino terroso, si notano alcune diversificazioni in base al contenuto degli elementi fondamentali Na e K. Il relativo diagramma di correlazione (Fig. 4) mostra due gruppi di acque: uno arricchito in Na e l'altro in K rispetto all'acqua di mare. Tale distribuzione si ritrova anche nel diagramma Na/K-T (Fig. 5). Il diverso comportamento molto probabilmente è da mettere in relazione al

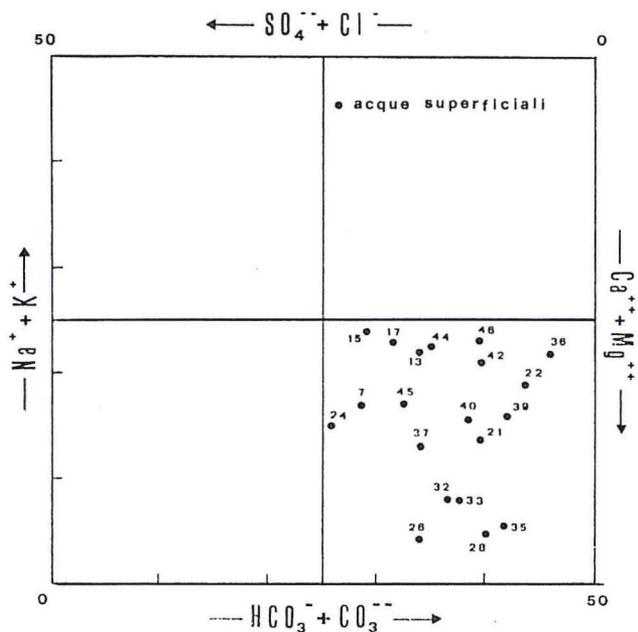


Fig. 2 - Diagramma quadrato secondo Langelier-Ludwig per le acque superficiali.

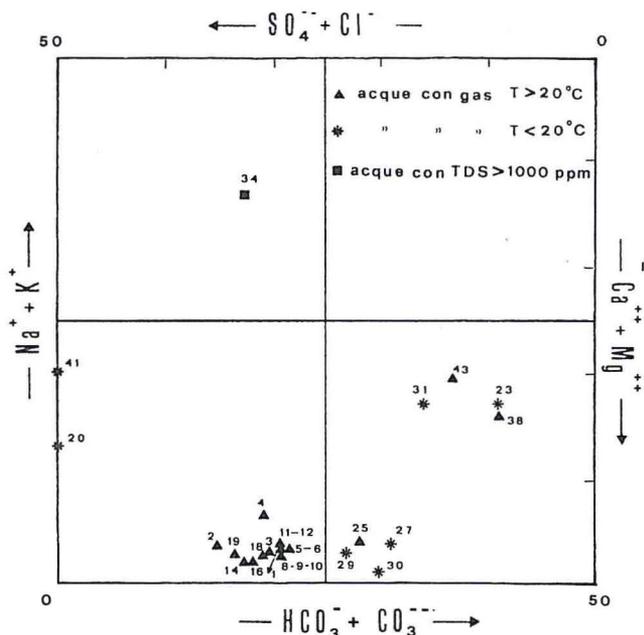


Fig. 3 - Diagramma quadrato secondo Langelier-Ludwig per le acque di origine profonda.

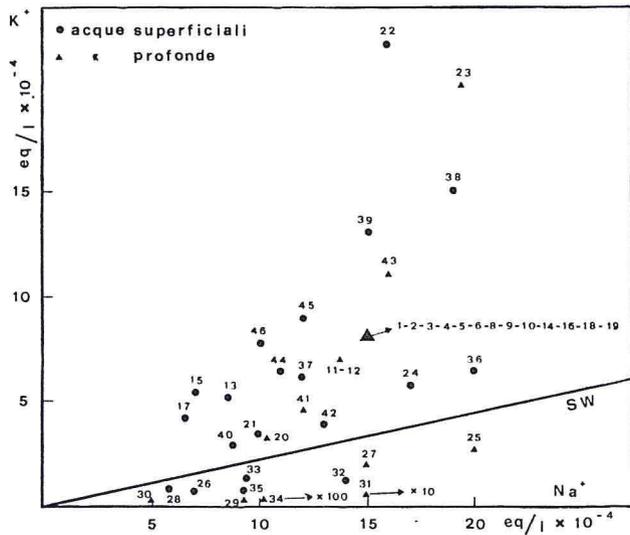


Fig. 4 - Diagramma di correlazione tra Na e K per i campioni di acque sia superficiali che profonde.

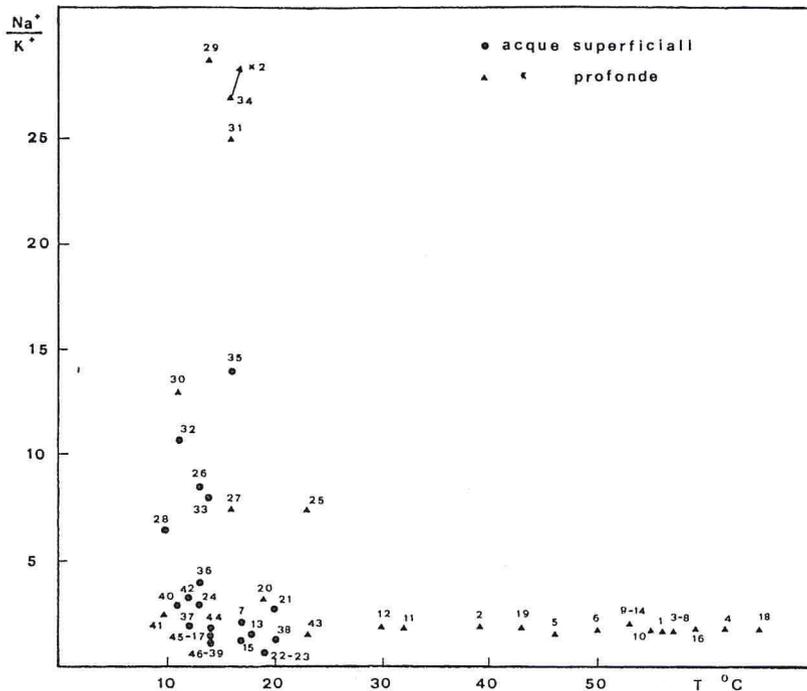


Fig. 5 - Diagramma Na/K-temperatura per i campioni di acque superficiali e profonde.

tipo di rocce liscivate: o vulcaniti (arricchimento in K rispetto all'acqua di mare e  $Na/K < 5$ ) o sedimenti marini del Pliocene e alluvioni recenti (arricchimento in Na e  $Na/K > 5$ ). Gli elementi minori per le acque superficiali non danno indicazioni di rilievo.

### Acque di origine profonda

Delle acque solfato calciche la maggior parte costituisce una famiglia piuttosto omogenea sia da un punto di vista chimico che termale, a questo gruppo appartengono i campioni prelevati nei dintorni di Viterbo (n. 1-2-3-4-5-6-8-9-10-11-12-14-16-18-19; vedi fig. 1). Queste acque presentano un'elevata salinità costituita in prevalenza da ioni calcio e solfato tra loro in concentrazione praticamente stechiometrica (v. tab. 1 e fig. 6) e subordinatamente da ioni bicarbonato, presentano inoltre fasi gassose libere a  $CO_2$  prevalente (v. tab. 3), una sovrasaturazione in carbonato di calcio (v. fig. 7) e un'alta temperatura correlata positivamente con la concentrazione di ioni solfato (Fig. 8). Queste caratteristiche, unite ad informazioni ottenute da perforazioni profonde che evidenziano in profondità sequenze evaporitico-carbonatiche mesozoiche, suggeriscono in modo inequivocabile una circolazione idrica in tali formazioni.

Le acque n. 20 e 41 del gruppo solfato calcico hanno una genesi

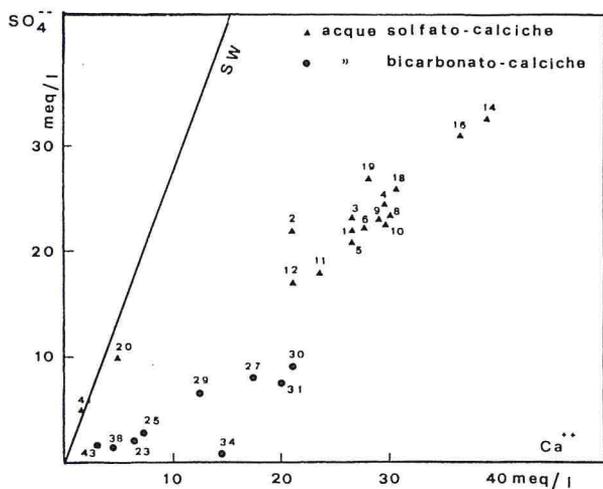


Fig. 6 - Diagramma di correlazione ioni  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  relativi ai campioni di origine profonda.

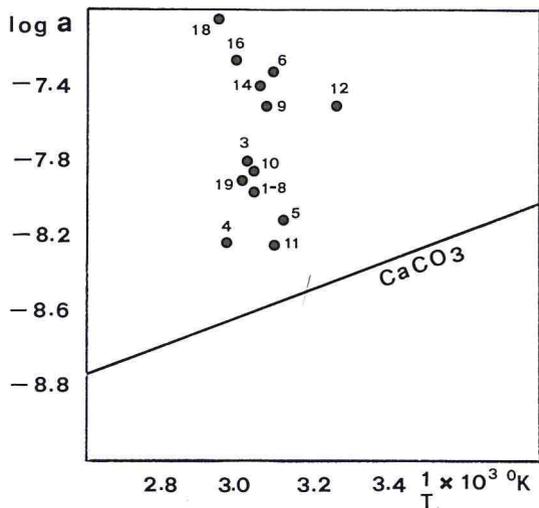


Fig. 7 - Costante di equilibrio della calcite in funzione della temperatura. Sono riportati i campioni delle acque termali dell'area di Viterbo che risultano essere tutte sovrasature.

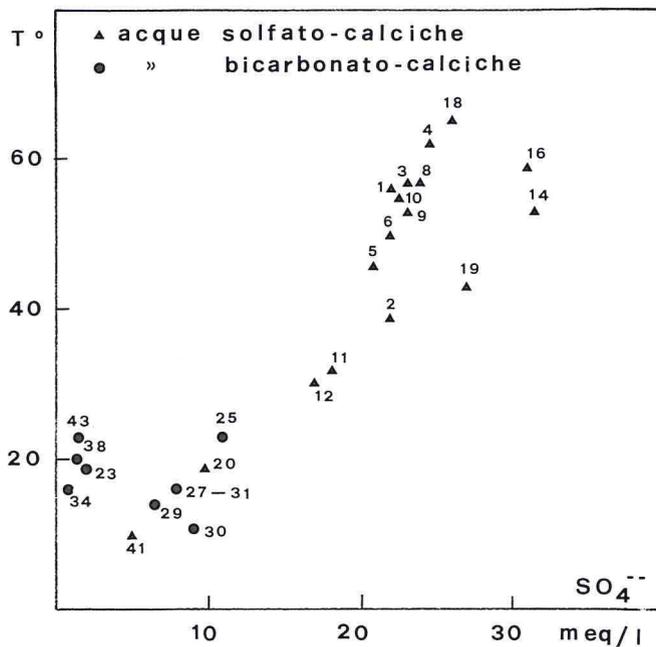


Fig. 8 - Diagramma temperatura-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> relativo alle acque di origine profonda.

completamente diversa in quanto si distinguono dalle altre sia per alcune caratteristiche chimico-fisiche ( $\text{pH} \sim 4$ , basse  $T$  e salinità come si vede in tab. 1) che per il tipo di manifestazione naturale, si tratta infatti di campioni prelevati da putizze o solfatare (pozze di acqua in cui gorgogliano emanazioni gassose). La fase gassosa risulta responsabile del chimismo di queste acque, in particolare l' $\text{H}_2\text{S}$  che, ossidandosi in ambiente superficiale probabilmente per intervento di solfobatteri, passa ad  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (v. figg. 3 e 6). Anche i diagrammi di correlazione  $\text{Li-T}$  e  $\text{H}_3\text{BO}_3\text{-T}$  (Figg. 9 e 10) evidenziano un comportamento di queste acque del tutto diverso da quello dei campioni ad elevata termalità circolanti nelle rocce evaporitico-carbonatiche.

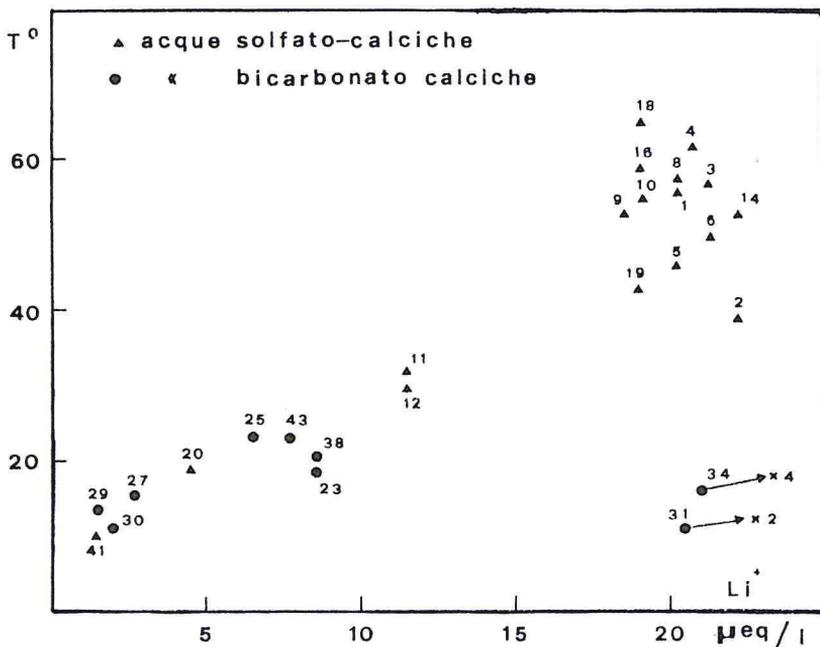


Fig. 9 - Diagramma temperatura-Li relativo alle acque di origine profonda.

Delle acque a composizione bicarbonato alcalino terrosa i campioni n. 23-29-30 sembrano dovere il loro chimismo all'azione dei gas associati, in particolare alla  $\text{CO}_2$  che disciogliendosi in acqua dà ioni bicarbonato che vengono parzialmente neutralizzati (v.  $\text{pH}$

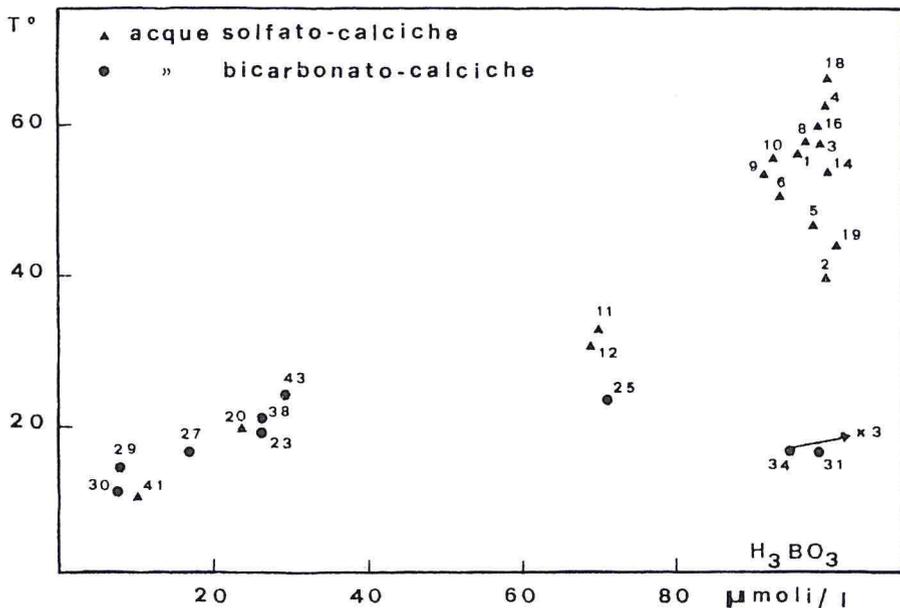


Fig. 10 - Diagramma temperatura- $H_3BO_3$  relativo alle acque di origine profonda.

fra 5 e 6) da ioni calcio e magnesio provenienti dall'alterazione delle rocce. La maggiore salinità di queste acque rispetto a quelle superficiali della zona avvalorata questa ipotesi genetica.

Il chimismo dei campioni 25-27-31 non può essere spiegato mediante l'arricchimento dovuto alla fase gassosa, sia perché le manifestazioni naturali per il n. 25 e 27 sono scarse ed intermittenti, sia perché ci sono indizi di apporti profondi (vedi salinità e T). La maggior salinità e la più alta concentrazione in elementi quali  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $Li^+$ ,  $F^-$  per il campione n. 31 (v. tab. 2 e figg. 4, 5, 9, 10) sono spiegati facilmente dal fatto che questa acqua dilava sedimenti marini pliocenici durante la risalita. Pertanto sembrerebbe che i campioni 25-27-31 circolino nei livelli più superficiali delle sequenze evaporitico-carbonatiche mesozoiche che affiorano nella parte NE dell'area (v. fig. 1). La bassa salinità e la caratterizzazione chimica delle acque n. 38-43 è tipica di acque superficiali che circolano, in questa zona, nelle vulcaniti. È soltanto per la loro termalità che sono state considerate di origine profonda.

Il campione 34 con chimismo clorurato alcalino è stato classificato come profondo per la sua elevata salinità (9443 ppm). I suoi alti contenuti in Na, Cl,  $NH_4$ , B e Li (v. tab. 1) riscontrati, tipici

di acque che circolano in depositi marini (estesamente rappresentati nella zona di fuoriuscita), unitamente al suo comportamento del tutto diverso da quello degli altri campioni di origine profonda (v. diagrammi di figg. 3, 4, 5, 8, 9, 10) e alla sua modesta temperatura di emergenza (16° C) lo fanno ritenere di origine superficiale.

### *Circolazione*

Lo studio geochimico condotto sulle acque superficiali e profonde dei M. Cimino ha messo in evidenza, attraverso la composizione chimica delle medesime, l'esistenza di due acquiferi principali: uno superficiale costituito da acque bicarbonato alcalino terrose drenanti vulcaniti ed uno profondo a prevalente composizione solfato calcica circolante in rocce anidritico-carbonatiche mesozoiche. La chimica delle acque mostra che i due acquiferi non sono comunicanti fra loro, confermato questo anche dalla presenza di terreni impermeabili (depositi pliocenici e complesso alloctono) che li separano. Pertanto l'acquifero profondo, che costituisce il potenziale geotermico della zona, risulta essere confinato tra la copertura impermeabile e il basamento scistoso-filladico, come suggerito da BALDI *et al.* (1973) e CALAMAI *et al.* (1976). L'alimentazione dell'acquifero profondo è da ricollegare all'infiltrazione di acqua meteorica come confermano studi condotti sugli isotopi dell'ossigeno in depositi di travertino (MANFRA *et al.*, 1976). Le principali aree di assorbimento di acqua meteorica che possono alimentare la circolazione profonda sono da individuare negli apparati vulcanici principali ed accessori, molto numerosi nella zona del M. Cimino e negli affioramenti carbonatici mesozoici presenti nella parte NE dell'area (Fig. 1). Infatti da calcoli, anche se approssimativi, sull'infiltrazione dai camini vulcanici e dai duomi (permeabilità stimata attorno al 10% e superficie di circa 5-6 Km<sup>2</sup> dedotta dalla carta morfologica di BALDI *et al.*, 1974), conoscendo la piovosità media della zona e le portate delle sorgenti (ARNONE, 1979) si dimostra l'insufficienza della ricarica dei reservoir dai soli apparati vulcanici.

Le acque meteoriche s'infiltrano dai nuclei assorbenti fino all'acquifero confinato, da qui scorrono orizzontalmente aumentando la loro temperatura e riemergono secondo un sistema termoartesiano lungo fratture profonde che delimitano in parte il graben del Tevere, come si vede dall'allineamento delle sorgenti (Fig. 1). Dal lato est del graben fuoriescono i campioni a composizione bicarbo-

nato alcalino terrosa a più bassa termalità che giustificano una circolazione nei livelli più superficiali dei nuclei mesozoici rispetto a quelli emergenti dal lato occidentale a più elevata termalità e a composizione solfato calcica.

### *Termalismo*

In base ai dati ottenuti in accordo con CALAMAI *et al.* (1976) e DUCHI e PRATI (1985) si pensa che il termalismo delle sorgenti alimentate dall'acquifero confinato (rocce mesozoiche evaporitico-carbonatiche) più che derivare da un processo di trasformazione isotermica anidrite-gesso invocato da TREVISAN (1951) è qui piuttosto da ricercare nella circolazione profonda associata alla presenza in questa area di un flusso di calore anomalo. Infatti la temperatura all'emergenza ( $\sim 60^\circ\text{C}$ ), le temperature stimate mediante l'applicazione del geotermometro della silice ( $\sim 110^\circ\text{C}$ ) e le temperature ( $\sim 100^\circ\text{C}$ ) dell'acquifero confinato (ARNONE, 1979) ottenute mediante misure dirette effettuate con pozzi profondi sono molto maggiori di quelli di equilibrio anidrite-gesso ( $\sim 40^\circ\text{C}$ ). Inoltre le acque solfato calciche di origine profonda che presentano alti contenuti in boro e litio e una correlazione positiva di questi elementi con la temperatura (v. figg. 9 e 10) fanno supporre una mobilizzazione di questi elementi dovuta ad un'anomalia geotermica profonda.

I contenuti notevolmente anomali in litio e boro riscontrati nei campioni 31 e 34, non essendo correlati con la temperatura ed essendo accompagnati da alti tenori in Na e Cl, più che dovuti ad una mobilizzazione conseguente ad un gradiente geotermicamente anomalo, sembrano derivare da lisciviazione di sedimenti marini del Pliocene (anche l'alto rapporto Na/Li avvalorata tale ipotesi). Le manifestazioni naturali (putizze) e le fasi gassose associate alle acque termali, ambedue a  $\text{CO}_2$ , prevalente, suggeriscono un processo metamorfico profondo su livelli carbonatici attivato dalla  $\text{SiO}_2$  e da relativamente alte temperature (TONANI, 1977; FYFE *et al.*, 1978; D'AMORE e PANICHI, 1980). L'esistenza di un'anomalia geotermica è messa in evidenza anche dalle acque che fuoriescono nella zona a sud di Vico (campioni 38 e 43). La chimica di queste acque le caratterizza come drenanti esclusivamente vulcaniti che nella zona non superano i 100-200 metri di spessore (come si può dedurre dai dati delle perforazioni profonde ripresi da ARNONE, 1979). La termalità quindi di queste acque non può essere che dovuta ad un gradiente geotermico

anomalo, facilmente stimabile almeno tre volte quello normale, dato confermato anche da indagini geofisiche (CALAMAI *et al.*, 1976).

### Gas

L'analisi effettuata sui campioni di gas prelevati nell'area in esame mostra come il costituente principale, esclusi i gas E, N, Q e più abbondante sia la CO<sub>2</sub> (v. tab. 3) che varia fra il 79,24% e il 98,55%. La presenza predominante del gas carbonico in questo tipo di emanazioni è un fatto frequente ed accertato imputabile, come riferito in precedenza, a processi metamorfici profondi. La percentuale rimanente è costituita quasi esclusivamente da azoto, anche se sono presenti piccole quantità di O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e talvolta H<sub>2</sub>S (v. tab. 3). L'idrogeno non è mai stato rilevato nei nostri gas.

Il contenuto di azoto presente nei nostri campioni è, contrariamente a quanto osservato in gas del sottosuolo di aree vulcaniche attive e di aree geotermiche (circa 1-2%), tendenzialmente più elevato. Tale caratteristica è da imputare probabilmente ai meccanismi di circolazione che, essendo aperti, favoriscono un'infiltrazione di aria. I rapporti N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> più elevati di quelli dell'aria (circa 3,5) si possono attribuire a processi di ossidazione di composti minerali e/o di sostanze organiche in cui viene consumato l'ossigeno. I campioni E, N, Q, S con alto contenuto in azoto (v. tab. 3) si diversificano dagli altri per avere una pressione poco superiore a quella idrostatica, per cui si presentano come manifestazioni blande ed intermittenti. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che tali gas non arrivano direttamente in superficie, ma si disperdono nei sedimenti e nella falda acquifera. In questo modo la CO<sub>2</sub>, che è il più solubile dei gas analizzati, passa in soluzione mentre l'azoto si arricchisce nella fase libera.

Tali manifestazioni si localizzano prevalentemente nell'area di Orte dove le strutture profonde devono arrestarsi alla coltre dei depositi neogenici e quindi le fasi gassose provenienti dal profondo si decomprimono prima dell'emergenza.

### CONCLUSIONI

Lo studio geochimico condotto nell'area Lago Vico-M. Cimini sulle acque sia superficiali che profonde e sulle fasi gassose ad esse associate ha fornito, oltre una serie di dati inediti, specialmente per

quanto riguarda i gas, anche indicazioni di un certo interesse relativamente alla genesi e all'evoluzione delle manifestazioni naturali analizzate, che possiamo così sintetizzare.

Nell'area esaminata esistono due acquiferi principali, uno superficiale costituito dalle vulcaniti dei M. Cimini e del Lago di Vico ed uno profondo costituito dalle rocce mesozoiche evaporitico-carbonatiche. Le acque costituenti l'acquifero superficiale o che comunque drenano le vulcaniti mostrano un arricchimento in potassio rispetto al sodio qualunque sia la loro natura (acque vadose, freatiche o di origine profonda). Generalmente non si ha mescolamento tra le acque dell'acquifero profondo e quello dell'acquifero superficiale per l'esistenza di livelli impermeabili che le separano. Le acque provenienti dall'acquifero confinato, alimentate essenzialmente da acque di origine meteorica, risalgono attraverso fratture profonde conseguenti alla tettonica distensiva plio-quadernaria, che delimitano in parte il graben del Tevere. Quelle a chimismo solfato calcico e a più elevata termalità, fuoriescono dal lato occidentale del graben (area di Viterbo), mentre i campioni a composizione bicarbonato calcico e a più bassa temperatura emergono lungo il margine est (area di Orte). Tale fatto è giustificato da una circolazione rispettivamente nei livelli più profondi delle sequenze evaporitico-carbonatiche mesozoiche e nella parte più superficiale delle medesime formazioni.

Il termalismo è da mettere in relazione con l'esistenza di un gradiente geotermico anomalo, messo in evidenza sia con il chimismo delle acque e con il contenuto di alcuni elementi in tracce quali litio e boro, che con informazioni dirette ottenute mediante perforazioni profonde e indagini geofisiche. Questi dati evidenziano l'esistenza di un'anomalia geotermica in tutta l'area e prevalentemente nella zona di Viterbo e lago di Vico.

L'area di ricarica dei reservoir, che costituiscono il potenziale geotermico della zona, si può individuare nei nuclei carbonatici mesozoici affioranti nell'area a NE del Tevere e nei numerosi camini vulcanici presenti nella zona in esame, ambedue permeabili per fratturazione.

I gas, confermando un meccanismo di risalita legato a fratture profonde e avendo una composizione a CO<sub>2</sub> prevalente da imputarsi ad un metamorfismo su sedimenti contenenti calcare dovuto all'alta temperatura e l'alta attività della silice, a loro volta testimoniano l'esistenza di un'anomalia geotermica profonda.

## BIBLIOGRAFIA

- ARNONE G. (1979) - Studio delle sorgenti termali del Lazio settentrionale. *Rend. Soc. It. Min. Petr.*, **35**, 647-666.
- BALDI P., FERRARA G., MASSELLI L., PIERETTI C. (1973) - Hydrochemistry of the region between Monte Amiata and Rome. *Geothermics*, **2**, 124-141.
- BALDI P., DECANDIA F., LAZZAROTTO A., CALAMAI A. (1974) - Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **13**, 575-606.
- BENCINI A., DUCHI V., MARTINI M. (1977) - Geochemistry of thermal springs of Tuscany. *Chem. Geol.*, **19**, 229-252.
- BENCINI A. (1985) - Applicabilità del metodo dell'Azometina H alla determinazione del boro nelle acque naturali. *Rend. Soc. It. Min. Petr.* (in stampa).
- BRANDI G.P., CERRINA FERRONI A., DECANDIA F., GAINNELLI L., MONTEFORTI B., SALVATORINI G. (1970) - Il pliocene del bacino del Tevere fra Celleno (Terni) e Civitella Castellana (Viterbo). Stratigrafia ed evoluzione tettonica. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem.*, serie A, **77**, 308-326.
- CALAMAI A., CATALDI R., LOCARDI E., PRATURLO A. (1976) - Distribuzione delle anomalie geotermiche nella fascia preappenninica Tosco-Laziale. Estr. «*Simposio internacional sobre energia geotermica en America Latina*», 189-229.
- DALL'AGLIO M., TEDESCO R. (1968) - Rilievo idrogeochimico dell'area dei Monti Cimini. *CNEN, RT/GEO (68)*, **9**, 3-25.
- D'AMORE F., PANICHI C. (1980) - Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geoch. Cosmochim. Acta*, **44**, 549-556.
- DUCHI V., PRATI F. (1985) - Indagine geochimica su acque e gas dei sistemi termali a bassa temperatura dell'area amiatina. *Boll. Soc. Geol. Ital.* (in stampa).
- FYFE W.S., PRINCES N.J., THOMPSON A.B. (1978) - Fluids in the earth's crust. Elsevier Sc. Publ. Co., Amsterdam-Oxford-New York.
- MANFRA L., MASI V., TURI B. (1976) - Composizione isotopica dei travertini del Lazio. *Geologica Romana*, **16**, 127-174.
- MATTIAS P.P., VENTRIGLIA V. (1970) - La regione vulcanica dei Monti Sabatini e Cimini. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **9**, 331-384.
- PUXEDDU M. (1971) - Studio chimico petrografico delle vulcaniti del Monte Cimino (Viterbo). *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem.*, serie A, **78**, 329-394.
- SOLLEVANTI F. (1983) - Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy. *Jour. Volc. and Geoth. Res.*, **17**, 203-217.
- TONANI F. (1977) - Geotermia. In: «Enciclopedia della chimica, VI», USES, Firenze.
- TREVISAN L. (1951) - Una nuova ipotesi sull'origine della termalità di alcune sorgenti della Toscana. *Ind. Min.*, **2**, 41-42.

(ms. pres. il 30 ottobre 1985; ult. bozze il 15 gennaio 1986)