

L'ELIO DEI GAS DEL SUOLO NELLA PROSPEZIONE GEOTERMICA

RINO BERTRAMI

ENEL-UNG, Geominerario, 56044 Larderello, Pisa (Italia)

ARMANDO CECCARELLI

ENEL-UNG, Geominerario, 56100 Pisa (Italia)

SALVATORE LOMBARDI

Ist. di Geologia e Paleontologia dell'Univ., Città Universitaria, Piazza A. Moro, 00185 Roma (Italia)

RIASSUNTO. — Alcuni recenti lavori scientifici mostrano che in prossimità di sorgenti termali o all'interno di aree di interesse geotermico si registrano nei gas del suolo contenuti di elio superiori a quello dell'atmosfera. La nota presenza di quantità apprezzabili di elio nei gas del campo geotermico di Larderello suggerisce che vi possa essere un legame tra l'esistenza di serbatoi geotermici ed anomalie di superficie per questa specie particolarmente mobile.

Per verificare questa ipotesi sono stati condotti estesi rilievi nei campi geotermici italiani di Larderello-Travale, Piancastagnaio, Latera e Cesano, di cui si conoscono sufficientemente le caratteristiche geologiche, geochemiche e geofisiche.

Rilievi, in parte a livello di sperimentazione in parte a livello di prospezione, sono stati condotti anche nelle aree geotermiche dei Colli Albani e dell'Isola di Vulcano.

I risultati permettono di stabilire che le anomalie nel contenuto di elio corrispondono, all'interno di aree a gradiente geotermico anomalo, alle zone in cui le situazioni strutturali creano in profondità condizioni di intrappolamento per i fluidi. Il tipo di permeabilità dei terreni e l'esistenza di fratture o faglie giocano un ruolo importante nel determinare l'entità delle anomalie osservate. Il verificarsi di eventi sismici può localmente esaltare le anomalie o addirittura determinarle in alcuni casi.

Nel campo geotermico di Larderello non si osservano anomalie in corrispondenza delle aree in cui lo sfruttamento è di più vecchia data e nelle quali la perforazione è stata più intensa. I pozzi infatti dovrebbero rappresentare una via preferenziale di fuga per i gas presenti nella struttura serbatoio.

Sono anche stati osservati tenori in elio più bassi del valore di riferimento dell'atmosfera in corrispondenza di strutture ribassate ed in condizioni di scarsa permeabilità.

ABSTRACT. — Some recent papers show that, in proximity to hot springs or within areas of geothermal interest, helium contents in the ground gases are registered at levels greater than that in the atmosphere. The known presence of appreciable quantities of helium in the gases of the Larderello geothermal field suggests there may be a link between the existence of geothermal reservoirs and surface anomalies due to this particularly mobile species.

To verify this hypothesis, extensive surveys were conducted in the Italian geothermal fields of Larderello-Travale, Piancastagnaio, Latera and Cesano, whose geological, geochemical and geophysical characteristics are sufficiently documented.

Surveys partly on an experimental level and partly at the level of prospecting were carried out in the geothermal areas of the Colli Albani and Vulcano Island.

The results make it possible to establish that the anomalies in the helium content, within the areas of anomalous geothermal gradient, correspond to zones in which the structural situations create trapping conditions for underground fluids. The type of permeability of the terrains and the existence of fractures or faults play an important role in determining the scale of the observed anomalies. The occurrence of seismic events can intensify the anomalies locally or even create them in some cases.

In the Larderello geothermal field anomalies are not observed in correspondence with the early exploited areas where the most drilling has been performed. Indeed, the wells probably represent a preferential escape route for the gases present in the reservoir structure.

Helium contents lower than the reference value of the atmosphere were also observed in correspondence with lowered structures displaying poor permeability.

1. Introduzione

È stato osservato in numerosi casi che la presenza di un'anomalia geotermica nel sottosuolo può creare in superficie aloni di dispersione per varie specie chimiche (TONANI F., 1970; ELLIS A.J. et al., 1977).

L'elio può essere una di esse, poichè alcuni lavori scientifici recenti mostrano che in corrispondenza di sorgenti termali si ha

La velocità di sfuggita dell'elio dalla crosta è inferiore alla sua velocità di produzione, così che la crosta stessa costituisce una zona di accumulo per questo elemento (ANDREWS J.N. et al., 1979).

Le acque in movimento nel sottosuolo possono costituire un veicolo per l'accumulo locale di elio, dove esistano trappole adeguate (ANDREWS J.N. et al., 1979); ad esempio esso è presente nel fluido in pressione in

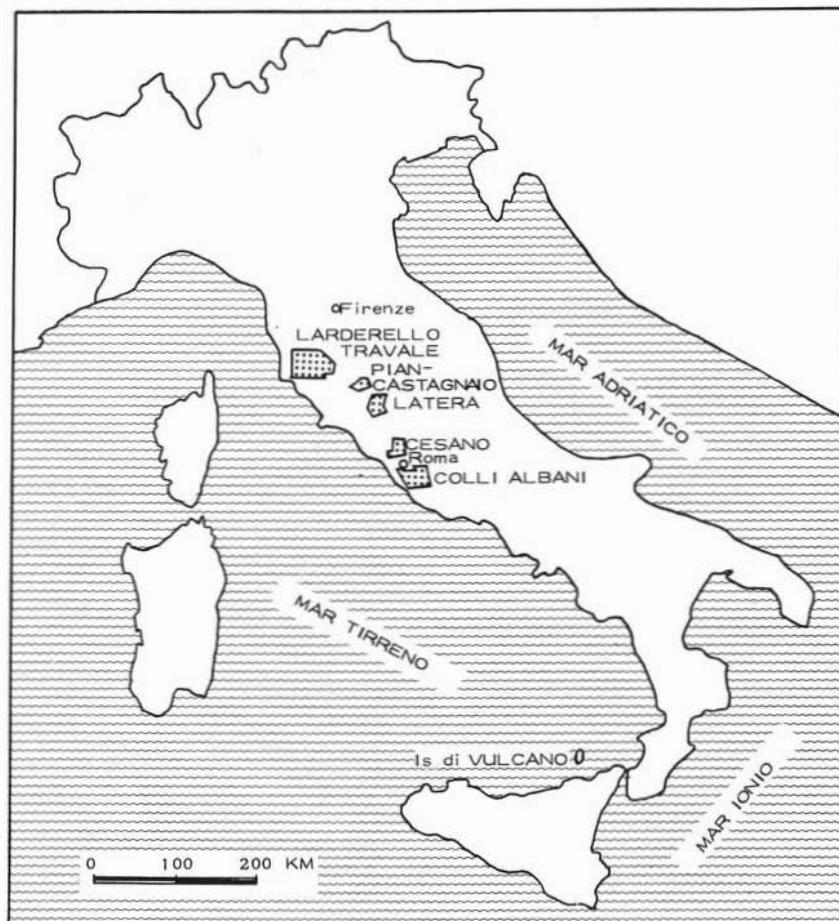


Fig. 1. — Localizzazione delle aree studiate.

un eccesso di elio nei gas del suolo rispetto all'atmosfera (ROBERTS A.A. et al., 1975; FRIEDMAN I. et al., 1976).

Questo elemento viene prodotto in seguito a decadimento radioattivo nella crosta e nel mantello; in quest'ultimo può essere presente anche elio primordiale (COOK G.A., 1961).

concentrazioni fino a qualche decina di ppm nei gas, del campo geotermico di Larderello-Travale (NASINI R., 1930; D'AMORE F. et al., 1977).

L'origine prevalentemente crustale di tale elio sembra provata dai rapporti $^3\text{He}/^4\text{He}$, compresi tra 0,20 e 2,8 volte il valore dell'atmosfera, ed He/Ne , oscillante tra 9 ed

oltre 400 (BERTRAMI R. et al., 1982; HOOKER P.J. et al., 1983; OXBURGH E.R. et al.).

Tenendo conto di questa fenomenologia e dell'osservazione sperimentale di cui sopra, sembra ragionevole pensare che l'esistenza nel sottosuolo di trappole per i fluidi ivi circolanti, in aree in cui sono possibili attività idrotermali di rilievo, possa dar origine in superficie ad aloni di anomalia anche per l'elio.

La prospezione dell'elio nei gas del suolo potrebbe in tal caso essere utilmente impiegata nell'esplorazione geotermica. In effetti recenti dati di letteratura indicano che in

nelle porzioni del suolo raggiungibili con il campionamento descritto in par. 4 possono essere classificati schematicamente come segue (fig. 2).

- *Gas atmosferici*, costituiti dall'aria stessa che può permeare il terreno o dai gas rilasciati nel sottosuolo dalle acque meteoriche.

- *Gas superficiali*, prodotti a profondità modeste in seguito ad alterazione di materiale organico per azione batterica o da attività biologiche in genere. Verosimilmente questi gas sono poveri di elio.

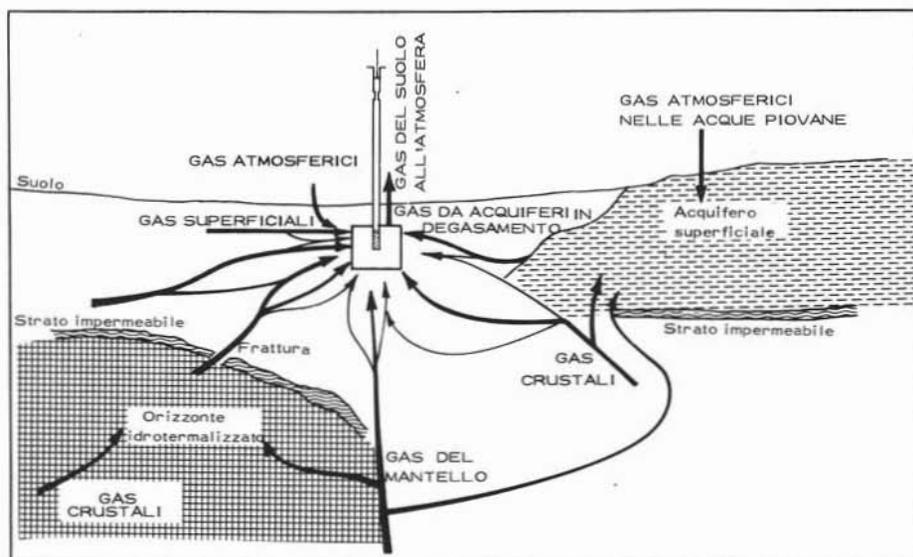


Fig. 2. — Le possibili origini dei gas presenti nel suolo.

aree di interesse geotermico si può avere un eccesso di He nei gas del suolo (BERTRAMI R. et al., 1980; HINKLE M.E. et al.; REIMER et al., 1977).

Un esteso rilievo condotto nei campi geotermici italiani di Larderello-Travale, Piancastagnaio, Latera e Cesano e nelle aree geotermiche dei Colli Albani e dell'Isola di Vulcano (fig. 1) conferma queste indicazioni (BALDI P. et al., 1984). I risultati salienti di questo studio sono esposti nel seguito.

2. Possibili sorgenti dei gas del suolo

A seconda delle loro origini, i gas presenti

- *Gas crustali*, prodotti sia da processi chimico-fisici di interazione delle acque con le rocce, sia da decadimento radioattivo.

Le acque circolanti nel sottosuolo possono costituire un veicolo preferenziale di trasporto per i gas così prodotti che, peraltro, possono spostarsi autonomamente per diffusione, convezione e gradiente di pressione.

La permeabilità dei terreni da un lato, la mobilità e la reattività di ciascun gas dall'altro, sono parametri importanti che determinano la velocità di migrazione ed il raggio di spostamento rispetto alla fonte di ciascuna specie.

- *Gas del mantello superiore*, sfuggenti

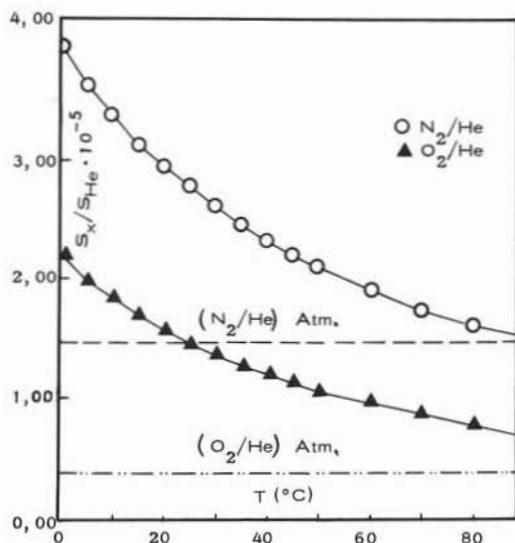


Fig. 3. — Andamento dei rapporti di solubilità azoto/elio ed ossigeno/elio in funzione della temperatura in acqua pura (S_x : solubilità di N_2 od O_2 ; S_{He} : solubilità dell'elio).

attraverso zone di frattura od in corrispondenza di regioni in cui la crosta ha spessore particolarmente ridotto.

Essi possono essere connessi sia a vulcanismo attivo, sia a fenomeni esalativi tardovulcanici.

Questi gas ed i loro possibili prodotti di mescolamento, convogliati in una determinata porzione di suolo per vie ed in quantità dipendenti dalle situazioni locali, tendono poi a sfuggire verso l'atmosfera in funzione delle caratteristiche fluido-dinamiche del sistema, della temperatura e dei gradienti di pressione e di potenziale chimico.

Nell'atmosfera l'elio è presente in quantità pressoché costante ed uniforme, con concentrazione pari a 5,24 ppm in volume per l'aria secca (GLUECKAUF E., 1946).

Poiché in acqua i rapporti N_2/He ed O_2/He sono, a temperature inferiori ai $90^\circ C$, maggiori che nell'aria (fig. 3), il degassamento di acque meteoriche in acquiferi superficiali e senza apporti profondi dovrebbe produrre un gas relativamente povero in elio rispetto all'atmosfera. Una compensazione di questo effetto può originarsi dal consumo di ossigeno in reazioni di ossidazione nel sottosuolo che aumenterebbero le quantità relative di He ed N_2 .

Nei confronti invece di un gas risalente dal basso, un acquifero freddo agisce in senso opposto, assorbendo i gas più solubili o reattivi e lasciando invece filtrare i più inerti e meno solubili.

3. Caratteri geologici delle zone studiate

Le zone studiate presentano situazioni strutturali e geotermiche diverse: alcune di queste hanno una storia di esplorazione e produzione pluridecennali, altre si trovano soltanto allo stadio iniziale di esplorazione profonda o a quello di prospezione preliminare.

Tra le prime rientrano i campi geotermici toscani di Larderello-Travale e Piancastagnaio.

Riassumendo sinteticamente la loro situazione geologica, si ricorda che il serbatoio è ospitato sia nelle sequenze metamorfiche basali (Paleozoico-Triassiche) sia nelle sovrastanti formazioni dolomitico-evaporitiche e calcaree mesozoiche, appartenenti alla ben nota « Serie Toscana ».

La copertura è rappresentata sia da formazioni alloctone in facies di flysch (Cretaceo-Eocene), sia da terreni prevalentemente argillosi depositi in bacini postorogenici (Miopliocene).

Tale assetto è la conseguenza di diverse fasi tettoniche compressive e distensive. In particolare durante la fase orogenica alpina si sono verificati la messa in posto delle coltri in facies flysch sopra la « Serie Toscana », che a sua volta ha subito riduzioni di serie, scollamenti e laminazioni; la successiva fase tettonica distensiva ha determinato l'instaurarsi di bacini tipo graben ed il loro colamento per ingressione marina. Il susseguente sollevamento, con il quale sono collegati importanti eventi magmatici di tipo anatectico, ha interessato buona parte della Toscana meridionale. Tali eventi sono consistiti in una serie di intrusioni solo sporadicamente affioranti ed in modeste attività effusive periferiche rispetto all'area di Larderello-Travale. Solo nel caso del M. Amiata si può parlare di un vero e proprio vulcano, di tipo prevalentemente riodacitico, situato sul bordo occidentale di un graben a direzione N-S.

A Sud del Monte Amiata sono localizzate le aree di Latera, Cesano e dei Colli Albani,

dove l'esplorazione geotermica è in atto solo da pochi anni. Tali aree sono caratterizzate dalla presenza di un vasto vulcanismo alcalino-potassico, prevalentemente quaternario, sviluppatosi in situazioni di graben post-orogonici.

Le rocce serbatoio triassico-mesozoiche, sono in questo caso di tipo più francamente carbonatico, con coperture in facies di flysch analoghe per età e litologia a quelle toscane.

L'ultima zona geotermica presa in considerazione, dove solo nel 1982 è stato perforato il primo pozzo esplorativo, è quella dell'Isola di Vulcano. Si tratta di un'isola interamente vulcanica con prodotti di tipo calc-alcalino (Pleistocene sup. - Attuale).

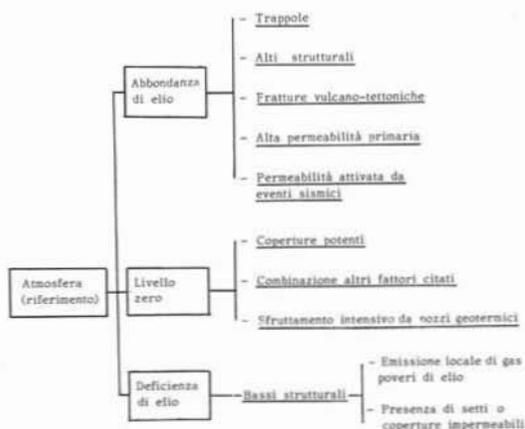


Fig. 4. — Principali fattori che regolano la distribuzione dell'elio nei gas del suolo.

4. Procedura sperimentale

I campioni di gas del suolo vengono raccolti mediante una sonda cava infissa nel terreno ad una profondità di circa 50 cm aspirando il gas tramite una siringa ipodermica (REIMER G.M. et al., 1979). Il campione può essere analizzato sul posto se si dispone di attrezzatura automontata o venir travasato in contenitori di vetro preventivamente evacuati (*Vacutainer*[®], *Venoject*[®]) e conservato per l'analisi in laboratorio.

Le misure vengono eseguite con uno spettrometro per massa 4 Du Pont 120 SSA modificato, munito di un sistema di introduzione del campione a pressione costante e collegato ad un registratore a carta (REIMER G.M. et al., 1979).

La sensibilità strumentale è di 20÷30 ppb per un f.s. dell'ordine delle 5240 ppb; essa si riduce progressivamente a concentrazioni superiori per i cambi di scala necessari.

La densità di campionamento adottata è in generale di un campione per km². Sono stati raccolti complessivamente circa 3500 campioni, ciascuno analizzato almeno in doppio.

5. Limiti di validità dei dati e loro campi di variazione

La scelta del punto di prelievo è stata sempre attentamente curata per evitare l'inquinamento del campione da aria, possibile quando il terreno è particolarmente incoerente.

L'umidità del suolo ed i fattori meteorologici hanno un effetto talvolta sensibile sui valori misurati (REIMER G.M. et al., 1977; REIMER G.M., 1979). Si è cercato di ovviare a questi inconvenienti concentrando le operazioni in periodi il più possibile omogenei dal punto di vista climatico e normalmente privi di precipitazioni. Tuttavia il gran numero di campioni raccolti non ha consentito di eseguire le operazioni in un unico breve periodo.

Fonti concentrate di radioattività naturale possono influenzare i risultati, ma solo raramente in misura notevole (REIMER G.M. et

TABELLA 1

Caratteri fondamentali delle distribuzioni di elio osservate nelle aree di studio

Zona	Classi estreme (ppb)*		"Fondo" (ppb) ^a	Superficie Infiagata (Km ²)
	Positivi	Negativi		
Larderello-Travale	1000 < He ≤ 23000	-600 He < -200	-200 He ≤ 200	1000
Piancastagnaio	400 < He ≤ 950	-800 He < -350	-150 He ≤ 200	250
Latera	180 < He ≤ 1900	-2100 He < -120	-120 He ≤ 60	330
Cesano	150 < He ≤ 400		-50 He ≤ 50	400
Colli Albani	1000 < He < 1800	-1250 He < 0	0 He ≤ 300	1100
Vulcano **	500 < He < 4700	-1000 He < -500	100 He ≤ 600 -100 He ≤ 0	22
***	200 < He < 8500		0 He ≤ 100	

^a) I dati sono forniti come differenza in ppb tra il contenuto di elio del campione e quello dell'aria, costante e pari a 5240 ppb (GLUECKAUF E., 1946).

^{oo}) Campagna 1982; riconoscimento generale.

^{ooo}) Campagna 1983; dettaglio su alcune aree.

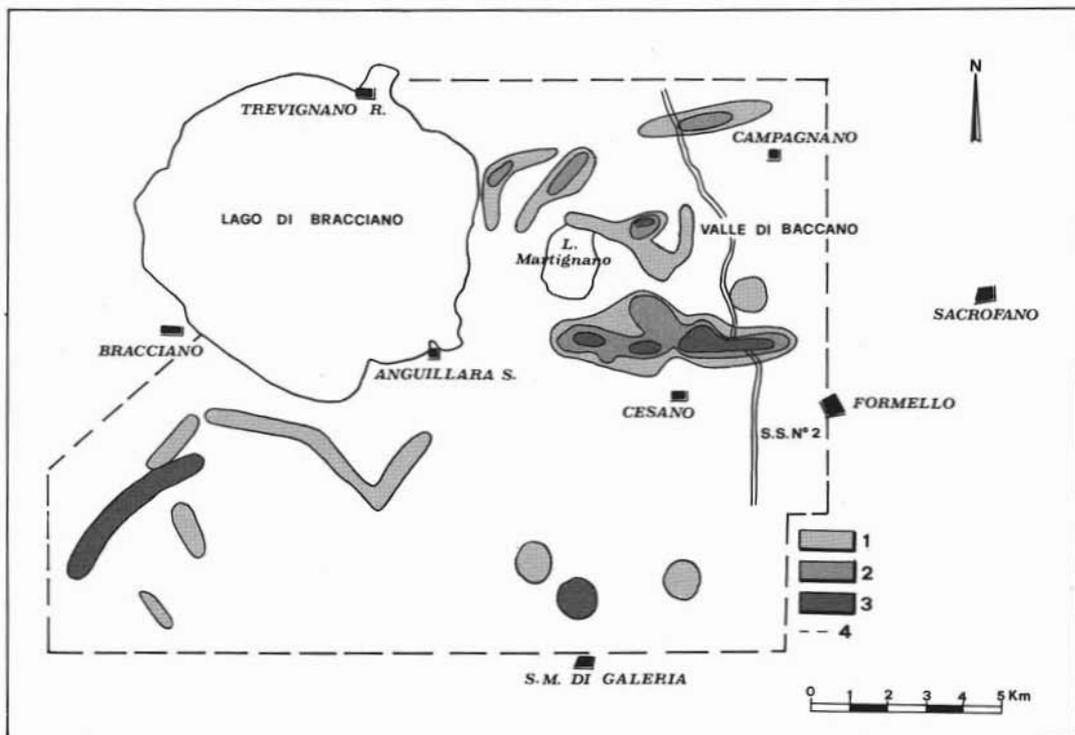


Fig. 5. — a) Distribuzione delle anomalie di elio nella zona di Cesano (BALDI P. et al., 1984). - 1: da -50 a $+100$ ppb; 2: da $+100$ a $+150$ ppb; 3: maggiori di 150 ppb; 4: limite dell'area studiata. I valori sono riferiti all'atmosfera come zero.

al., 1977; BRADY B.T. et al., 1977). L'eventuale presenza di minerali radioattivi nelle zone studiate (LOCARDI E., 1973) non dovrebbe produrre effetti apprezzabili, dando luogo solo ad un fondo « regionale » più elevato del normale a causa della loro probabile dispersione.

Anche il movimento delle acque di falda può avere effetto sui risultati finali (REIMER G.M. et al., 1977; BRADY B.T. et al., 1977) sia perchè l'acqua può costituire un veicolo di trasporto, sia perchè le variazioni dei carichi idrostatici possono modificare il percorso o l'entità del flusso dei gas.

Nell'Isola di Vulcano è stato osservato un gradiente negativo per la concentrazione dell'elio pari a 30 ppb ogni 100 m di aumento di quota (BERTRAMI R. et al.).

Nonostante queste limitazioni si sono ottenute, nelle zone studiate, distribuzioni di elio arealmente coerenti e quindi sufficientemente significative.

La tab. 1 riassume i caratteri fondamentali delle distribuzioni osservate. Dalla tabella emerge che il « fondo » delle zone di Larderello-Travale e di Piancastagnaio sono dello stesso ordine di grandezza, così come non molto diversi sono i valori estremi negativi. Invece gli estremi positivi sono molto più elevati nella prima che non nella seconda zona.

Il campo di variazione a Larderello-Travale è quindi molto più ampio che non a Piancastagnaio.

Nella zona di Latera il campo di variazione del fondo appare ridotto in ampiezza ed i valori estremi sono vicini allo zero. Tranne alcuni casi isolati, inoltre, anche il campo di variazione totale appare limitato.

La zona di Cesano è caratterizzata dai valori positivi più bassi in assoluto ed il fondo è compreso entro un campo confrontabile con la sensibilità strumentale.

Nei Colli Albani i valori estremi positivi sono paragonabili a quelli di Latera, con una

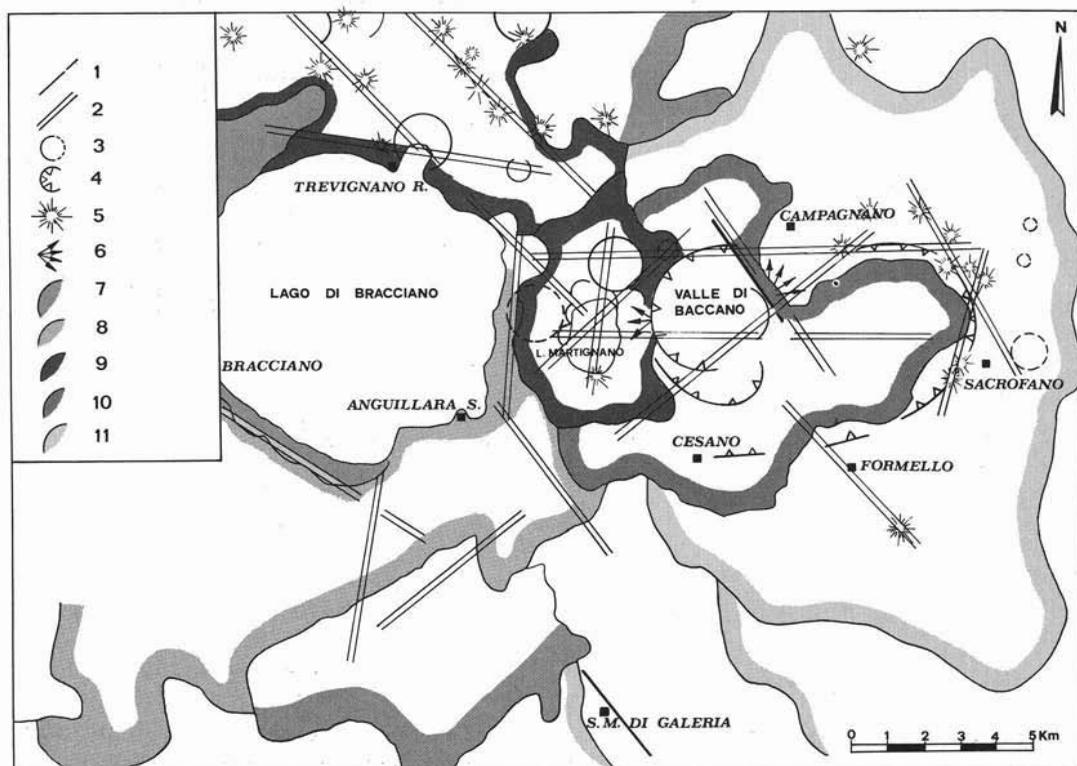


Fig. 5. — b) Mappa geologico-tettonica schematica della zona di Cesano (BALDI P. et al., 1982). - 1: faglie; 2: allineamenti di centri esplosivi od altri elementi vulcano-tettonici; 3: crateri di esplosione; 4: bordi di caldera; 5: coni di scorie; 6: coni di tufo; 7: colate leucitiche; 8: limite dell'Unità di Bracciano; 9: limite dell'attività di Martignano; 10: limite dell'attività di Baccano; 11: limite dell'attività di Sacrofano.

maggior abbondanza di quelli medio-alti ed un fondo decisamente più positivo.

Per Vulcano si dispone di dati relativi a due campionamenti svolti in epoche diverse (BERTRAMI R. et al.).

Si è proceduto dapprima ad un rilievo di riconoscimento generale, con densità di campionamento di 4 prelievi/km². Per questa serie di misure non sono stati osservati valori tra 0 e +100 ppb, per cui in tab. 1 sono stati individuati un « fondo » per i valori positivi ed uno per quelli negativi. Il primo è quello più rappresentativo per il numero di campioni che comprende ed è il più elevato rispetto a quelli delle altre zone esaminate. Nello studio di dettaglio, condotto con una densità di campionamento di 18 prelievi/km², il « fondo » è individuato da valori positivi che non superano i +100 ppb.

6. Significato della distribuzione dell'elio

L'esame comparato dei risultati della prospezione dell'elio in aree geotermiche mette in luce la costante presenza di addensamenti relativamente omogenei di valori positivi o negativi rappresentabili il più delle volte come superfici chiuse più o meno estese, altre volte come allineamenti.

Procedendo dall'interno verso l'esterno di queste superfici chiuse si ha in generale un graduale e regolare passaggio dai valori più positivi a quelli meno positivi e viceversa per quelli negativi.

Le aree in cui l'elio è presente al di sopra dello zero di riferimento costituito dall'atmosfera corrispondono a zone strutturalmente elevate o, come a Cesano e a Vulcano, ad aree di fratture vulcano-tettoniche. Viceversa i casi di valori negativi sono quasi sempre

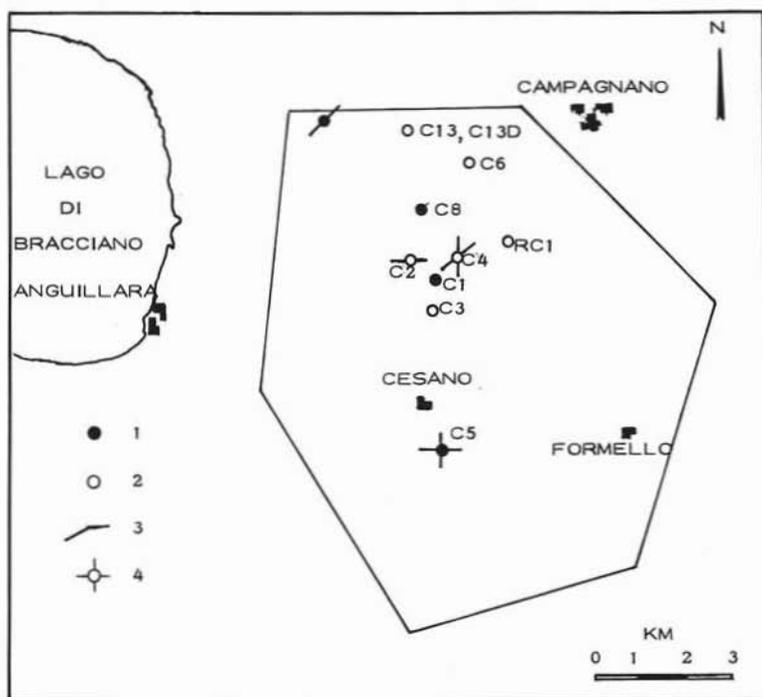


Fig. 6. — Localizzazione dei sondaggi profondi nel capo geotermico di Cesano. - 1: pozzi produttivi; 2: pozzi sterili; 3: limiti del permesso di ricerca; 4: tracce dei profili di campionamento dei gas del suolo di cui alla Fig. 7.

connessi con strutture ribassate, quali graben e bacini sedimentari (fig. 4).

Le aree a valori positivi sono normalmente caratterizzate da maggiore permeabilità rispetto a quelle a valori negativi. Le prime si riscontrano in corrispondenza di terreni fratturati o comunque di fratture note (Cesano, Vulcano) o attivate da eventi sismici (Colli Albani) ⁽¹⁾; le seconde corrispondono a terreni prevalentemente argillosi scarsamente permeabili e, in generale, di potenza elevata (gaben). Vulcano costituisce in questo senso un caso anomalo in quanto la coltre poco permeabile nota in superficie è di soli pochi metri; tuttavia non si conosce se vi possano essere fenomeni di autosigillamento o comunque permeabilità ridotte in profondità.

⁽¹⁾ Nei Colli Albani un rilievo condotto a breve distanza dagli eventi sismici del maggio 1981 ha fornito in alcune aree valori nettamente superiori a quelli misurati in una campagna svolta l'anno seguente.

A Larderello le piccole anomalie all'interno dell'area di coltivazione possono essere interpretate come « anomalie relitte » per scarso drenaggio dei fluidi da parte di pochi pozzi o di pozzi poco produttivi. I pozzi geotermici infatti, come dimostra l'alto contenuto di He nei gas dei fluidi da essi erogati (D'AMORE F. et al., 1977), costituiscono vie preferenziali di sfuggita dei gas endogeni.

Nel campo geotermico di Larderello-Travale non si notano sostanziali differenze nel tenore di elio tra gli affioramenti di terreni in facies di flysch e quelli di rocce carbonatiche e metamorfiche del serbatoio: in entrambi i casi infatti si hanno anomalie positive. Si può supporre che i terreni in facies di flysch siano in larga misura scarsamente permeabili all'acqua, ma possano invece esserlo ai gas più mobili ed inerti.

Nella casistica di tutte le zone esaminate si trovano poi alcune anomalie puntiformi, talora anche molto accentuate, che, se in alcuni casi possono essere correlate con la presenza di manifestazioni naturali, in altri sono di dubbia interpretazione.

Le fluttuazioni osservate nei tenori di elio rilevati in due distinti campionamenti a Vulcano mettono in luce possibili influenze legate a fattori locali (livello falde acquifere, attività microsismica, etc.) (BERTRAMI R. et al.).

Restano da chiarire ancora alcuni temi interpretativi e metodologici relativamente a questo tipo di prospezione, tuttavia i rilievi fin qui condotti sembrano indicare una

gita, i quali sono particolarmente accentuati in corrispondenza di altri strutturali e di vie preferenziali di sfuggita od in concomitanza di eventi sismici.

7. Un caso significativo: il campo geotermico di Cesano

La superficie indagata è di circa 400 km².

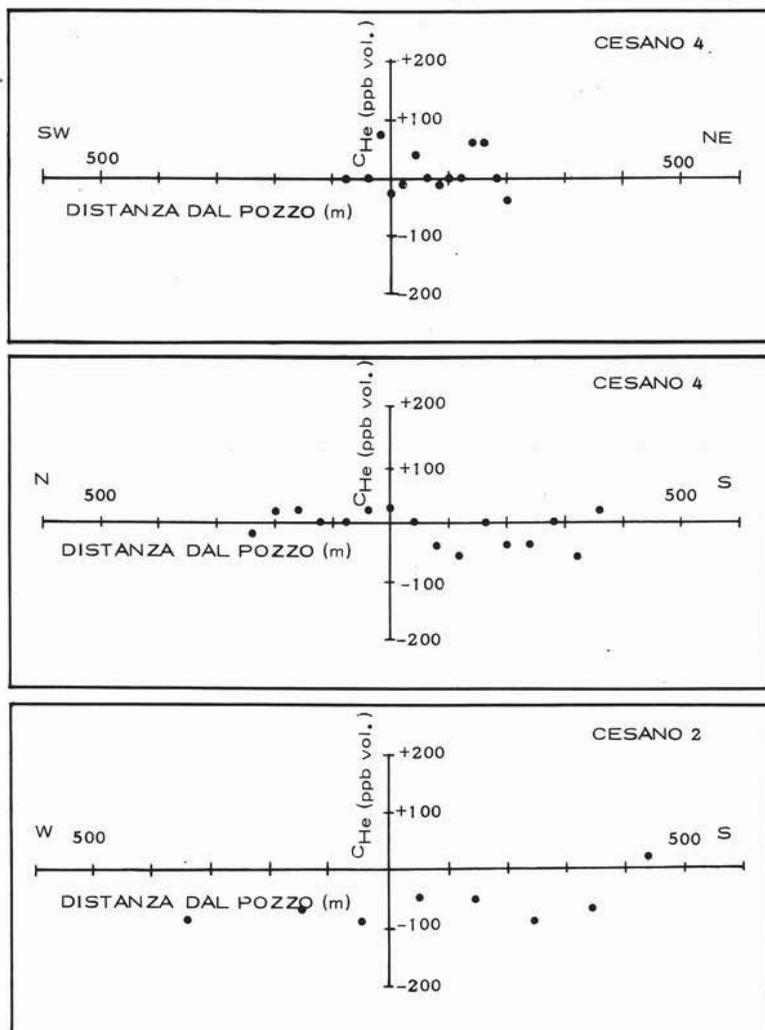


Fig. 7. — a) Distribuzione dell'elio nei gas del suolo in prossimità di sondaggi sterili del campo di Cesano.

stretta interdipendenza tra l'accumulo di elio in rocce serbatoio, la permeabilità di queste e gli aloni positivi prodotti dalla sua sfug-

Si osservano aree ad anomalia positiva di elio ubicate tra la sponda orientale del lago di Bracciano e la Caldera di Baccano (fig.

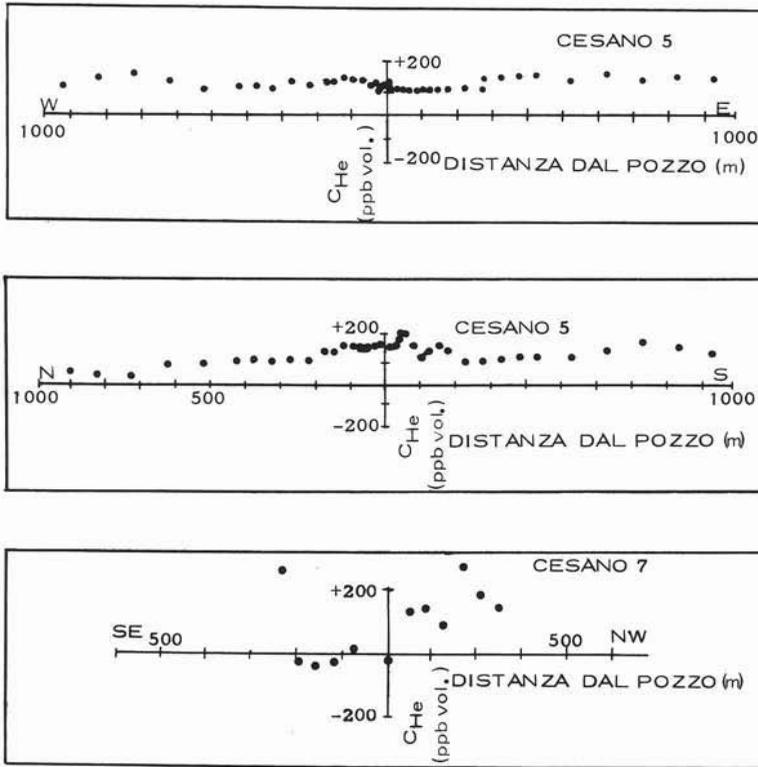


Fig. 7. — *b*) Distribuzione dell'elio nei gas del suolo in prossimità di sondaggi produttivi nel campo di Cesano.

5 *a*) in cui è nota una attività treatomagmatica recente, connessa con la tettonica distensiva (BALDI P. et al., 1982; FUNICIELLO R. et al., 1977).

La distribuzione dei valori di elio permette di riconoscere due allineamenti importanti con direzione circa E-W rispettivamente a Nord e a Sud della Caldera di Baccano, attribuibili probabilmente alla migrazione di tale gas lungo sistemi di fratture.

Gli allineamenti di anomalie risultano corrispondenti con l'andamento degli elementi vulcano-tettonici locali (fig. 5 *b*).

La scarsità di anomalie e i valori ridotti del fondo (tab. 1) sembrano correlabili sia con la ridotta permeabilità in orizzonti profondi, sia con la scarsità delle manifestazioni idrotermali di superficie.

La correlazione tra permeabilità profonda ed anomalie in elio sembra confermata da analisi effettuate in corrispondenza delle perforazioni esistenti (fig. 6).

Anche se la casistica non è sufficientemente elevata, è stato possibile osservare che le maggiori anomalie positive sono ubicate in prossimità delle perforazioni che hanno incontrato livelli produttivi o discretamente permeabili, mentre si hanno valori vicini a quelli atmosferici nel caso di perforazioni non produttive o caratterizzate da scarsa permeabilità degli orizzonti profondi.

Un confronto tra alcuni dei pozzi più rappresentativi in questo senso è riportato nelle figg. 7 *a* e 7 *b*.

L'argomento merita ulteriori indagini, ma è evidente l'interesse applicativo che esso potrebbe rivestire.

8. Conclusioni

Il contenuto di elio nei gas del suolo sembra essere un utile mezzo ausiliario nella prospezione geotermica, in quanto correlabile con particolari situazioni strutturali che

ne permettono l'accumulo, e termiche e di permeabilità che ne favoriscono la migrazione verso l'atmosfera.

Una più profonda comprensione della fenomenologia che determina la distribuzione

dell'elio nei gas del suolo è tuttavia legata ad ulteriori studi che richiedono il convogliamento di specifiche competenze nei settori fondamentali della geochimica e della geologia.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREWS J. N., LEE D. J. (1979) - *Inert gases in groundwater from the Bunter Sandstones of England as indicators of age and paleoclimatic trends*. Journal of Hydrology, vol. 41, p. 223.
- BALDI P., BERTRAMI R., CECCARELLI A., FRIEDMAN I., LOMBARDI S. (1984) - *Helium in soil gases in geothermal areas*. U.N. Seminar on Utilization of Geothermal Energy for Electric Power Production and Space Heating, Firenze, 14-17 maggio.
- BALDI P., BUONASORTE G., CAMELI G. M., CIGNI U., FUNICIELLO R., PAROTTO M., SCANDIFFIO G., TONEATTI R. (1982) - *Exploration methodology, deep drilling and geothermal model of the Cesano Field (Latium, Italy)*. Proc. of First Turkish-Italian Seminar on Geothermal Energy, Ankara-Kizildere, vol. II, p. 54.
- BERTRAMI R., ANTRODICCHIA E., LUZI C. - *Prospezione dei gas del suolo nell'Isola di Vulcano*. In questo volume.
- BERTRAMI R., CECCARELLI A., FRIEDMAN I., DOERING W., LOMBARDI S. (1980) - *Helium prospecting in geothermal areas. Preliminary results on Larderello-Travale and Cesano geothermal fields*. Proc. of Second DOE-ENEL Workshop for Cooperative Research in Geothermal Energy, Berkeley, p. 483.
- BERTRAMI R., LOMBARDI S., HOOKER P. J., MC RAE T.A., O'NIONS R.K., OXBURGH E.R. (1982) - *Helium isotopic variation in geothermal areas of central Italy*. Annual Meeting of American Geophysical Union, Washington.
- BRADY B. T., RICE R. S. (1977) - *Helium determinations as an explorations technique at the Ambrosia Lake uranium district, McKinley County, New Mexico*. U.S. Dept. of Interior, Geological Survey, Open File Report, 77-669.
- COOK G. A. (1961) - *Argon, helium and the rare gases. Occurrence and origin*. Ed. G.A. Cook, Interscience Publishers, vol. 1, p. 35.
- D'AMORE F., FERRARA G. C., NOTO P., NUTI S. (1977) - *Tenori di elio nei fluidi del campo geotermico di Larderello. Prime considerazioni sulle relazioni tra elio ed altri componenti del fluido*. ENEL-DSR Internal Report 511-Z-13/B.
- ELLIS A. J., MAHON W. A. (1977) - *The chemical nature of geothermal systems*. Chemistry and Geothermal Systems, Academic Press, p. 58.
- FRIEDMAN I., DENTON E. H., ROBERTS A. A., REIMER G.M. (1976) - *A mobile helium sniffer for petroleum, uranium, and geothermal prospecting*. Proc. 25th International Geological Congress, Sydney, vol. 2, p. 443.
- FUNICIELLO R., LOCARDI E., PAROTTO M. (1977) - *Lineamenti geologici dell'Area Sabatina Orientale*. Estratto da Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. XCV, p. 831.
- GLUECKAUF E. (1946) - *A microanalysis of helium and neon contents of air*. Proc. Royal Society, London, ser. A, vol. 185, p. 98.
- HINKLE M. E., DENTON E. H., BIGELOW R. C., TURNER R.L. - *Helium in soil gases of the Roosevelt Hot Springs KGRA, Beaver County, Utah*. Journal Research U.S.G.S., vol. 6, p. 563.
- HOOKER P.J., BERTRAMI R., LOMBARDI S., O'NIONS R.K., OXBURGH E.R. (1983) - *Helium isotope tracers in geothermal systems: a study of the Larderello area*. European geothermal update. Results of EC Research and Demonstration Projects in the field of geothermal energy, Munich, 29 novembre - 1° dicembre.
- LOCARDI E. (1973) - *Mineralizzazioni ad uranio in vulcaniti quaternarie del Lazio*, Bollettino della Società Geologica Italiana, vol. XCII, p. 541.
- NASINI R. (1930) - *I soffioni e i lagoni della Toscana e l'industria boracifera*. Tip. Ed. Italia, Roma.
- OXBURGH E. R. et al. - *Comunicazione personale su lavori in corso*.
- REIMER G. M. (1979) - *The use soil-gas helium concentrations for earthquake predictions: studies of factors causing diurnal variations*. U.S. Dept. of Interior, Geological Survey, Open File Report, 79-1623.
- REMEIR G. M., ADKISSON C. W. (1977) - *Reconnaissance survey of the helium content of soil gas in Black Hawk, Eldorado Springs, Evergreen, Golden Morrison, Ralston Buttes, and Squaw Pass quadrangles, Colorado*. U.S. Dept. of Interior, Geological Survey, Open File Report, 77-464.
- REIMER G. M., DENTON E. H., FRIEDMAN I., OTTON J.K. (1979) - *Recent development in uranium exploration using the U.S. Geological Survey's mobile helium detector*. Journal of Geochemical Exploration, vol. 11, p. 1.
- ROBERTS A. A., FRIEDMAN I., DONOVAN T. J., DENTON E.H. (1975) - *Helium survey, a possible technique for locating geothermal reservoirs*. Geophysical Research Letters, vol. 2, p. 209.
- TONANI F. (1970) - *Geochemical methods of exploration for geothermal energy*. Geothermics, Special Issue 2, vol. 2, part. 1, p. 492.