

GIOVANNANGELA BERTORINO*, RAFAELE CABOI*, ANNÀ MARIA CAREDDA*,
ROSA CIDU*, LUCA FANFANI*, PAOLA ZUDDAS*

CARATTERI IDROGEOCHIMICI DELLE ACQUE NATURALI DELLA SARDEGNA MERIDIONALE

3. LE ACQUE DELLA MARMILLA E DEL SARCIDANO

RIASSUNTO. — In base allo studio idrochimico di 53 campioni (42 sorgenti, 4 pozzi e 7 acque superficiali) sono riconoscibili nell'area in studio tre zone con caratteristiche idrologiche diverse.

Le acque della parte sud-orientale costituita dai rilievi del complesso paleozoico hanno circolazione limitata e superficiale. La salinità è scarsa e modesta l'evoluzione verso i bicarbonati alcalino-terrosi.

Nella parte settentrionale comprendente la formazione carbonatica giurese l'infiltrazione è alta e la circolazione estesa. Tutti i campioni di acque sorgive sono saturi in calcite e dolomite.

Nella zona collinare costituita da sedimenti terziari e subordinatamente quaternari le falde sono alimentate dalle acque delle precedenti formazioni e la maturazione fino a valori di salinità di alcuni grammi/litro si evolve in genere verso i cloruri-solfati bilanciati.

ABSTRACT. — Three areas with different hydrologic characters are recognized in the region investigated on the basis of the chemical analysis of 53 samples (42 springs, 4 wells and 7 superficial waters). In the South-Eastern part, set up by reliefs of the Paleozoic complex, waters exhibit restricted and superficial circulation. Salinity is scarce and development is towards the earth-alkaline hydrocarbonates. In the Northern part including the Jurassic carbonatic formation, infiltration is high with wide circulation. All samples of spring-waters are saturated in calcite and dolomite.

In the hilly zone, where Tertiary and subordinately Quaternary deposits are located, aquifers are supplied with waters of the previously described formations and metamorphism reaches values of salinity in the range of few grams/liter and generally evolves towards balanced chlorides-sulphates.

Premessa

In precedenti studi idrogeochimici condotti presso l'Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università di Cagliari, erano state individuate le caratteristiche chimiche principali delle acque naturali circolanti nelle più importanti formazioni geologiche della Sardegna sud-orientale (BERTORINO et al., 1979; BERTORINO et al., 1981).

La zona investigata nel presente lavoro comprende parte della Marmilla, il Sarcidano ed il margine settentrionale della Trexenta, con un'estensione di circa

* Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università, via Trentino 51, 09100 Cagliari.

600 Km². L'area è limitata ad occidente dal Flumini Mannu e dal Rio Sarcidano che ne costituisce il corso superiore, ad est dal Flumendosa, a nord dalla linea congiungente il Rio del Sarcidano con il Flumendosa attraverso la P.ta S'Ardia de Continui (833 m), a sud dallo spartiacque che da ovest verso est tocca i rilievi di P.ta Sebera (360 m), Piano Lasina (321 m), San Mauro (501 m), P.ta Corongedda (496 m) e Cuccuru Turri (675 m).

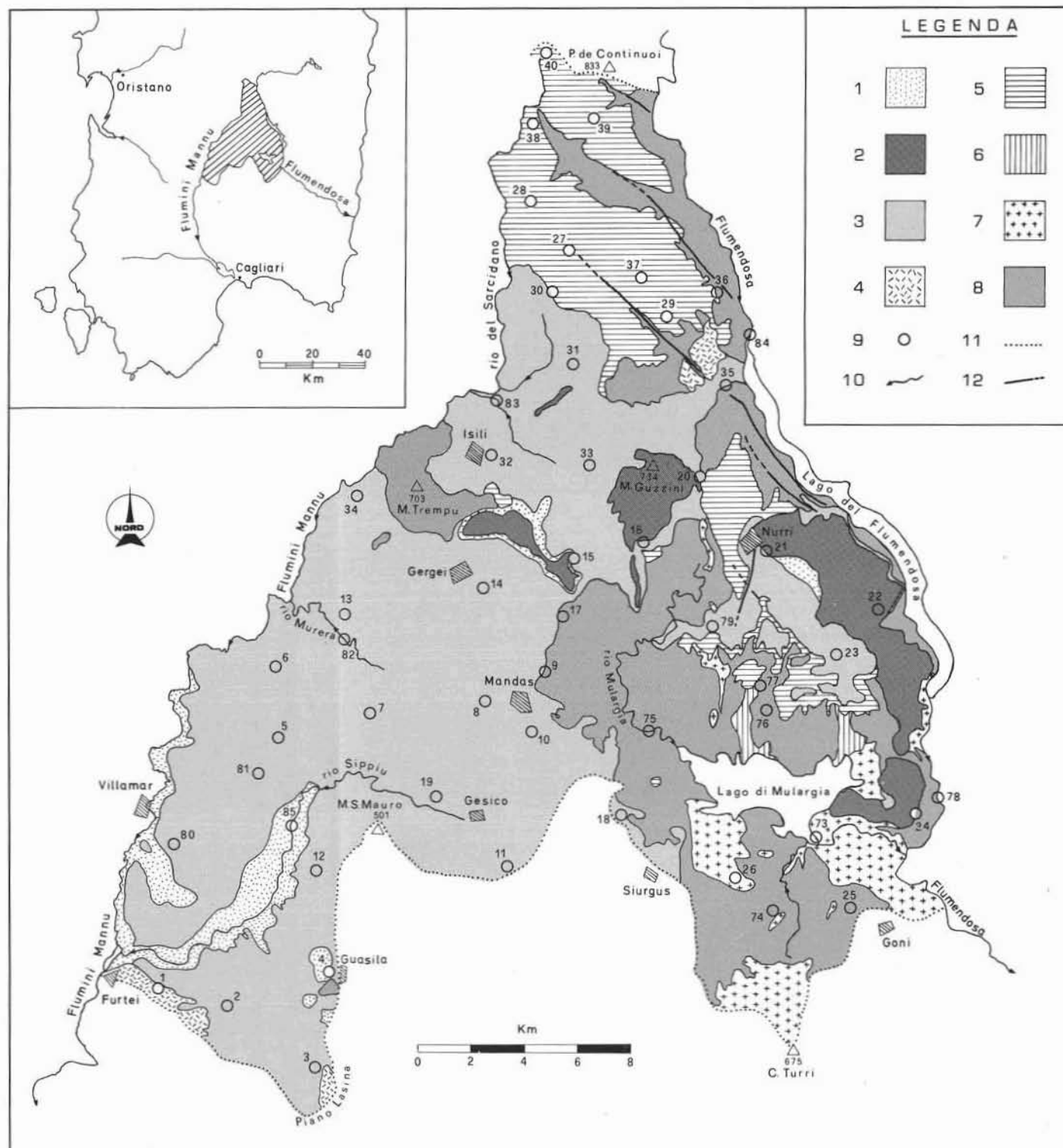
L'obiettivo di questa campagna idrogeochimica, realizzata nell'estate del 1979, è duplice: 1° completare lo studio, iniziato nelle precedenti campagne, del bacino di sinistra del Flumini Mannu sino alle sue sorgenti e di alcuni sottobacini di destra del medio-Flumendosa sino al confine del Sarcidano con la Barbagia; 2° studiare il chimismo di base delle acque circolanti nelle formazioni carbonatiche mesozoiche presenti nell'area, nonché le loro relazioni con le acque delle altre formazioni.

Caratteri morfologici e geologici

L'area in esame presenta una morfologia varia essendovi rappresentati diversi tipi litologici che vanno dal Paleozoico al Quaternario. I terreni paleozoici danno luogo ad una zona montagnosa caratterizzata da rilievi scistosi modellati dall'erosione, con altitudini che non superano 850 m. La formazione carbonatica giurese, ad essi sovrastante, con giacitura tabulare, è stata sbloccata dalla tettonica alpina che ha originato altopiani isolati, detti «tacchi», a bordi ripidi e scoscesi con altezze sui 700-800 m. I terreni sedimentari terziari hanno una morfologia collinare con quote medie di 300 m. I basalti pliocenici formano generalmente piccoli pianori, denominati «giare», con scarpate ai bordi caratterizzate spesso da una fessurazione colonnare da raffreddamento; questi espandimenti lavici, originariamente occupanti i fondi vallivi, si trovano attualmente elevati per erosione differenziale che ha provocato l'inversione del rilievo (M.te Planumuru, 764 m; M.te Guzzini, 734 m; Giara di Serri, 630 m).

I terreni più antichi, ascrivibili al paleozoico, hanno subito ripetute fasi erosive e tettoniche che complicano le datazioni e l'individuazione dei rapporti stratigrafici fra le varie formazioni. La serie paleozoica inizia con la «Formazione di Laconi» costituita da argilloscisti generalmente associati a lenti calcaree ed, alla base, da

Fig. 1. — Carta geolitologica schematica della Marmilla e del Sarcidano. — *Legenda:* 1 = Alluvioni grossolane, detriti di falda e depositi di travertino (Quaternario - Attuale). 2 = Basalti (Pliocene). 3 = Conglomerati, arenarie, argille e calcari (Eocene); conglomerati, arenarie, marne arenacee ed argillose e calcari (Miocene). 4 = Andesiti e loro tufi (Segariu e Piano Lasina), tufi più o meno bentonitici (Villanovatulo) (Oligo-Miocene). 5 = Conglomerati, argille nere e grige, calcari dolomitici in grosse bancate (Giurese). 6 = Conglomerati rossastri, tufi piroclastici, marne e calcari (Permiano e Trias). 7 = Porfiroidi e porfidi in ammassi e filoni e subordinati graniti. 8 = Calcari metamorfici, argilloscisti con lenti calcaree (Ordoviciano inf.); siltiti, arenarie ed argilloscisti (Ordoviciano sup.); scisti neri a Graptoliti e calcari ad *Orthoceras* (Siluriano e Devonico). 9 = Punti di campionamento. 10 = Corsi d'acqua. 11 = Limiti della zona. 12 = Faglie.



corpi carbonatici metamorfici; la sua età dovrebbe risalire all'Ordoviciano inferiore (MINZONI, 1975). Seguono piccoli affioramenti di argilloscisti neri a Graptoliti e calcari ad *Orthoceras* o *Tentaculitidi* attribuiti al Siluriano-Devonico; porfiroidi e porfidi in filoni ed ammassi (M.te Nuxi presso Siurgus); intrusioni granitiche del ciclo ercinico (M.te Treppe). Il complesso paleozoico è stato interessato dall'orogenesi ercinica ed in minor misura da quella alpina; l'elemento strutturale fondamentale è un'ampia anticlinale con asse passante per Laconi con direzione NO-SE, interessata da varie complicazioni (MINZONI, 1975). Faglie dirette NE-SO hanno provocato talora dislocazioni notevoli nella serie paleozoica.

Vengono datati al Permo-Trias i sedimenti affioranti presso il lago del Mulargia e nel territorio di Orroli; si tratta di conglomerati rossastri con elementi paleozoici, tufi piroclastici, marne e calcari (CAVINATO, ANEDDA, 1954).

In discordanza sul Paleozoico si trova la serie giurese composta dal basso verso l'alto da conglomerati a ciottoli di quarzo, argille nere e grigie del Bajociano e calcari dolomitici stratificati in grosse bancate (DEL RIO, 1976). La piattaforma giurese è stata sottoposta alla tettonica alpina, con faglie dirette NO-SE, fra cui quella di Funtanamela che viene a determinare uno spartiacque netto fra il bacino del Flumini Mannu e quello del Flumendosa (PALA et al., 1979).

La serie terziaria ha inizio con piccoli affioramenti di sedimenti eocenici, discordanti sul Giurese e sul Paleozoico; si ritrovano presso Orroli e Piano Lasina (PECORINI, 1966) e comprendono conglomerati, arenarie, argille e calcari fossiliferi, talora in alternanza. L'Oligocene è rappresentato da vulcaniti di tipo andesitico a Segariu e Piano Lasina, e da tufi più o meno bentonitici a Villanovatulo; ancora a Villanovatulo, Siurgus ed Isili da conglomerati, marne e argille continentali.

Il Miocene occupa molta parte dell'area in esame ed è trasgressivo a seconda delle zone sui terreni precedenti, dal Paleozoico all'Oligocene. Dal basso verso l'alto comprende conglomerati, arenarie, marne arenacee ed argillose talora disseminate di solfuri ferrosi, calcari di scogliera con Coralli, Ostree e *Lithotamni* (POMESANO CHERCHI, 1968). I sedimenti miocenici sono stati interessati dall'orogenesi alpina che ha provocato un'inclinazione della serie ed un suo abbassamento per faglie subparallele, dirette NO-SE, legate allo sprofondamento della fossa campidanesa.

Direttamente sulle marne mioceniche poggiano gli espandimenti basaltici appartenenti al ciclo effusivo pliocenico collegato con una tettonica disgiuntiva recente. Il Quaternario è rappresentato da alluvioni grossolane del Flumendosa, Flumini Mannu e Rio Lanessi; da detriti di falda lungo le pendici dei «tacchi» e delle «giare»; da depositi di travertino lungo le maggiori sorgenti circolanti in rocce carbonatiche.

In figura 1 sono rappresentati i caratteri geolitologici dell'area studiata secondo una schematizzazione efficace ai fini dello studio idrogeochimico.

Cenni climatici ed idrogeologici

Nella zona in studio alle varietà morfologiche corrispondono differenziazioni climatiche: alla zona collinare competono precipitazioni modeste, comprese tra 500 e 600 mm annui, concentrate in brevi periodi dell'anno; non di rado la stagione secca si prolunga da maggio ad ottobre; la temperatura media annua è sui 18° C, con massimi a luglio e agosto (32° C) e minimi a dicembre e gennaio (12° C). L'area degli altopiani presenta caratteristiche intermedie fra le zone montagnose della Sardegna e quelle collinari con precipitazioni medie di 600-700 mm annui e temperatura media di 15° C. L'evaporazione è ovunque notevole a causa dei venti con direzione prevalente da ovest e nord-ovest, dell'insolazione elevata e dell'andamento irregolare delle precipitazioni.

I corsi d'acqua principali sono il Flumini Mannu ed il Flumendosa, mentre la maggior parte dei loro affluenti ha carattere torrentizio e stagionale. Un serbatoio idrico importante è costituito dal complesso carbonatico giurese, le uniche rocce veramente permeabili della zona, che danno origine a numerose sorgenti con portate elevate (30-60 l/s). I terreni paleozoici ed i basalti pliocenici sono sede di una modesta circolazione idrica per fratturazione con sorgenti per lo più stagionali e di portata modesta (0,1-1 l/s). Nei sedimenti terziari, a permeabilità variabile, si hanno falde sotterranee a diverse profondità, soprattutto in corrispondenza dei conglomerati di base e delle arenarie grossolane che permettono un'infiltrazione dagli appoggi laterali paleozoici e limitatamente dalla piattaforma giurese. Più consistenti ma di modesta estensione sono le falde superficiali legate alle alluvioni quaternarie, alimentate dalle precipitazioni e dai corsi d'acqua attraverso i sub-alvei. Nell'area studiata esistono due laghi artificiali: uno sul Flumendosa ed uno sul torrente Mulargia; il secondo è parzialmente alimentato dalle acque del primo per mezzo di una galleria di collegamento.

Campionamento, analisi ed elaborazione dati

La campagna di campionamento è stata condotta nei mesi di giugno e luglio, stagione già prescelta negli anni passati per le più favorevoli condizioni climatiche ed idrologiche (buone portate e minima influenza delle precipitazioni) e per rendere le condizioni il più possibile omogenee con quelle delle precedenti campagne.

L'area campionata è ricca di sorgenti per cui è stato possibile ottenere una maglia abbastanza omogenea; in alcune zone dei terreni miocenici l'area è stata coperta da pozzi alimentati dalla falda superficiale. In totale sono stati analizzati 53 campioni di cui 42 sorgenti, 4 pozzi e 7 acque superficiali. I punti d'acqua campionati sono indicati in fig. 1.

In campagna sono state effettuate le misure di portata, temperatura, conducibilità e pH ed inoltre HCO_3 , Ca e Ca + Mg; in laboratorio SO_4 , Cl, Na e K oltre i controlli su HCO_3 , Ca e Mg; le metodologie analitiche sono state le

TABELLA 1
Dati fisici e chimici dei campioni d'acqua studiati

Camp.	tipo	classe	temp.	cond.		Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	sal.tot.				
n°	acqua	port.	°C	mf/cm	pH	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	Si _c	Si _d	Si _g	lgHCO ₂
73	sup.	-	25	0.26	8.8	1.2	0.9	0.9	0.04	1.7	0.6	0.8	216	0.70	1.34	-2.33	-3.84
75	sup.	6	26	0.75	8.1	2.9	2.5	2.7	0.10	4.1	1.2	2.9	566	0.70	1.40	-1.83	-2.75
78	sup.	3	24	0.16	7.9	1.3	0.9	0.6	0.03	1.5	0.5	0.6	188	-0.17	-0.44	-2.36	-2.96
82	sup.	5	21	1.10	8.3	4.2	2.6	4.9	0.24	5.6	2.9	3.2	832	1.06	1.95	-1.39	-2.85
83	sup.	4	18	0.70	7.6	5.3	1.8	2.0	0.06	5.9	1.2	3.7	725	0.51	0.54	-1.61	-2.13
84	sup.	3	25	0.38	8.3	1.7	1.7	0.9	0.03	2.9	0.8	0.8	317	0.58	1.23	-2.14	-3.09
85	sup.	4	21	1.80	8.0	8.1	4.8	10.8	0.30	7.8	7.8	7.2	1591	1.05	1.92	-0.90	-2.43
9	sorg.	7	17	0.20	6.6	1.1	0.7	1.9	0.03	1.3	0.8	1.4	241	-1.71	-3.63	-2.24	-1.76
17	sorg.	6	15	0.25	6.5	2.1	1.0	1.2	0.01	2.5	0.8	1.3	319	-1.30	-2.96	-2.00	-1.40
24	sorg.	6	17	0.80	7.1	3.2	2.8	3.1	0.07	5.4	1.2	2.6	652	-0.25	-0.56	-1.80	-1.67
25	sorg.	7	16	0.60	7.4	5.2	0.9	1.7	0.04	4.7	1.5	1.4	565	0.20	-0.37	-1.47	-2.03
26	sorg.	7	14	0.26	6.9	2.0	0.6	0.9	0.02	1.8	1.0	1.0	265	-1.06	-2.68	-1.90	-1.94
74	sorg.	6	16	0.30	6.6	1.6	0.5	1.4	0.02	1.7	0.6	1.2	246	-1.44	-3.39	-2.19	-1.65
76	sorg.	7	17	1.20	6.9	4.8	4.6	3.9	0.05	7.5	1.4	5.0	945	-0.19	-0.41	-1.67	-1.34
77	sorg.	7	17	0.27	6.2	2.7	1.5	1.8	0.05	3.2	0.5	1.7	395	0.03	0.03	-2.15	-0.98
27	sorg.	5	14	0.61	7.1	4.4	4.7	0.9	0.04	8.7	1.1	0.9	783	0.03	0.03	-1.76	-1.49
28	sorg.	4	14	0.53	7.1	3.5	3.5	0.6	0.02	6.8	0.7	0.7	602	-0.13	-0.32	-1.95	-1.59
29	sorg.	4	16	0.65	7.6	4.2	3.8	1.0	0.04	7.9	1.0	0.9	717	0.51	0.94	-1.79	-2.02
30	sorg.	4	15	0.46	7.1	3.7	4.6	1.1	0.03	7.9	0.6	1.1	705	-0.05	-0.06	-2.09	-1.52
36	sorg.	5	14	0.90	7.1	4.2	4.5	0.9	0.04	8.1	1.0	1.0	738	-0.01	-0.05	-1.80	-1.52
37	sorg.	4	13	0.80	6.9	4.8	5.2	0.9	0.05	9.4	1.0	1.0	837	-0.12	-0.28	-1.79	-1.27
38	sorg.	5	14	0.57	7.1	3.4	3.3	0.6	0.02	6.3	1.1	0.7	587	-0.18	-0.42	-1.79	-1.62
39	sorg.	5	13	0.66	7.1	3.9	3.9	0.6	0.02	7.6	0.2	0.7	639	-0.05	-0.19	-2.41	-1.55
40	sorg.	4	15	0.53	7.1	3.2	3.2	0.6	0.02	6.1	1.0	0.6	558	-0.20	-0.44	-1.85	-1.63
79	pozzo	-	21	0.70	7.3	3.5	3.5	1.5	0.14	7.3	0.9	1.4	692	0.17	0.37	-1.90	-1.71
1	sorg.	5	17	1.30	6.9	4.5	4.6	9.2	0.05	9.7	1.7	6.7	1271	-0.15	-0.30	-1.67	-1.24
2	sorg.	6	16	1.20	7.4	6.1	4.5	6.8	0.13	6.9	5.1	3.4	1125	0.30	0.45	-1.08	-1.89
3	pozzo	-	16	0.80	7.2	4.1	1.6	4.5	0.45	5.3	1.5	2.7	714	-0.07	-0.57	-1.61	-1.78
4	pozzo	-	16	1.30	7.4	4.8	2.2	10.7	0.05	6.4	4.9	3.4	1124	0.18	-0.01	-1.17	-1.92
5	sorg.	5	16	1.50	7.2	6.1	4.3	7.8	0.03	6.1	8.1	4.2	1268	0.00	-0.18	-0.92	-1.76
6	sorg.	5	16	1.00	7.1	4.5	2.5	5.7	0.22	7.1	2.7	3.1	933	-0.05	-0.38	-1.39	-1.57
7	sorg.	6	16	1.20	7.4	6.2	2.9	5.5	0.16	6.9	4.0	3.7	1037	0.34	0.32	-1.14	-1.89
8	sorg.	6	15	0.90	7.2	6.4	2.5	3.3	0.06	6.0	2.5	2.8	872	0.12	-0.20	-1.27	-1.75
10	sorg.	7	15	1.40	7.3	5.0	2.0	2.4	0.02	5.7	1.6	1.8	670	0.13	0.01	-1.50	-1.80
11	pozzo	-	16	1.20	7.3	5.3	2.6	5.8	1.00	7.2	3.0	4.7	1061	0.20	0.07	-1.31	-1.77
12	sorg.	7	16	1.00	7.8	22.2	13.5	22.0	0.37	8.1	40.2	7.0	3783	0.94	1.65	-0.20	-2.30
13	sorg.	5	18	1.20	7.8	4.1	3.4	7.5	0.07	6.8	3.8	4.0	1038	0.58	1.07	-1.33	-2.28
14	sorg.	7	17	1.20	7.1	5.4	3.1	6.1	0.10	6.4	3.7	4.6	1022	-0.04	-0.32	-1.22	-1.61
15	sorg.	6	15	0.90	6.9	4.7	3.2	3.4	0.56	6.6	1.4	3.2	816	-0.25	-0.71	-1.63	-1.40
18	sorg.	7	16	0.70	6.9	6.4	1.5	1.9	0.01	6.5	1.7	1.7	730	-0.10	-0.85	-1.39	-1.40
19	sorg.	6	17	0.80	7.2	5.6	2.6	4.1	0.04	6.6	2.4	2.1	833	0.13	-0.08	-1.34	-1.69
23	sorg.	7	16	0.69	7.3	4.8	1.3	2.2	0.04	5.2	1.2	1.8	603	0.11	-0.37	-1.61	-1.89
31	sorg.	7	18	0.36	7.5	2.4	2.3	2.0	0.03	3.9	1.0	1.7	470	0.06	0.20	-1.95	-2.14
32	sorg.	7	17	0.50	6.9	6.2	1.0	1.1	0.06	6.0	1.9	1.0	658	-0.12	-1.05	-1.33	-1.42
53	sorg.	6	15	0.85	6.9	6.1	1.7	2.8	0.02	6.7	1.7	1.7	760	-0.12	-0.84	-1.42	-1.39
34	sorg.	7	20	0.56	7.4	3.5	2.1	1.3	0.04	4.5	1.1	1.3	500	0.08	-0.03	-1.76	-2.02
35	sorg.	5	20	0.70	7.1	3.2	5.7	2.0	0.06	8.5	0.9	1.4	795	-0.04	0.18	-1.98	-1.46
80	sorg.	6	18	1.50	7.2	5.6	4.5	11.4	0.21	6.8	8.1	6.1	1449	0.03	-0.03	-0.99	-1.69
81	sorg.	6	18	2.20	7.0	7.6	5.4	15.0	0.06	9.3	7.3	9.6	1824	0.06	-0.02	-0.98	-1.37
16	sorg.	6	16	0.16	6.7	0.6	0.7	1.4	0.03	1.0	0.6	1.1	182	-1.97	-3.90	-2.58	-1.98
20	sorg.	7	14	0.43	7.7	1.7	1.1	1.8	0.03	2.5	0.9	1.3	332	-0.21	-0.66	-2.04	-2.61
21	sorg.	6	14	0.75	7.9	2.9	2.4	2.8	0.08	4.1	1.0	2.6	545	0.37	0.60	-1.89	-2.61
22	sorg.	7	15	0.80	7.3	2.0	3.2	3.7	0.07	3.5	1.0	4.9	602	-0.45	-0.74	-2.06	-2.07

medesime utilizzate nelle precedenti campagne ed indicate nelle relative note.

I risultati analitici e le misure di campagna sono riportati nella tabella 1 suddivisi a seconda del tipo d'acqua e delle formazioni geologiche in cui sono localizzati i pozzi o l'emergenza delle sorgenti; tale suddivisione individua famiglie d'acqua abbastanza omogenee o per composizione o per evidenti «trend» evolutivi. In tabella le portate sono espresse per classi secondo IPPOLITO et al. (1975); inoltre sono riportati i valori della P_{CO_2} e degli indici di saturazione per la calcite, la dolomite ed il gesso, rispettivamente $SI_c = \log [(a_{Ca^{2+}} \cdot a_{CO_3^{2-}})/K_c]$, $SI_d = \log [(a_{Ca^{2+}} \cdot a_{Mg^{2+}} \cdot a_{CO_3^{2-}}^2)/K_d]$ e $SI_g = \log [(a_{Ca^{2+}} \cdot a_{SO_4^{2-}})/K_g]$. Le attività, le pressioni parziali della CO_2 e gli equilibri con le specie mineralogiche considerate sono stati calcolati utilizzando il programma WATEQ (TRUESDELL, JONES, 1974) e le relative costanti termodinamiche.

I valori di reazione di ogni campione sono riportati nei diagrammi di Piper dai terreni paleozoici attraverso i torrenti lungo le sponde orientale e meridionale e soprattutto attraverso la galleria di collegamento col lago del Flumendosa, con acque assai meno saline di quelle del rio Mulargia che raccoglie le acque dei terreni sedimentari terziari.

Acque superficiali

I 7 campioni analizzati riguardano 2 punti sul Flumendosa, 4 su torrenti minori e l'acqua del lago artificiale del Mulargia. La salinità ed il chimismo di tali campioni sono estremamente variabili in relazione alle formazioni geologiche su cui scorrono; quelli che ricevono gli apporti esclusivamente dai terreni paleozoici presentano il minimo contenuto salino (tra 188 e 317 mg/l), mentre l'attraversamento dei sedimenti mesozoici e ancor più dei terziari porta ad un incremento sensibile della salinità fino a un valore assai elevato (1591 mg/l) riscontrato per acque provenienti in massima parte dalle formazioni mioceniche.

I campioni 73 e 78 si riferiscono rispettivamente al lago del Mulargia e al Flumendosa a valle dello sbarramento artificiale. Ambedue queste acque sono risultate meno saline dei rispettivi immissari (campioni 75 e 84). La diluizione avvenuta nei laghi è imputabile alla permanenza in essi delle acque invernali meno saline per le più abbondanti precipitazioni e per la maggior componente di ruscellamento superficiale; il lago del Mulargia è inoltre interessato da apporti dai terreni paleozoici attraverso i torrenti lungo le sponde orientale e meridionale e soprattutto attraverso la galleria di collegamento con il lago del Flumendosa, con acque assai meno saline di quelle del rio Mulargia che raccoglie le acque dei terreni sedimentari terziari.

L'influenza dei differenti apporti sul chimismo di base si evidenzia nel diagramma di Piper (fig. 2); le acque interessate dai terreni paleozoici e mesozoici cadono nel campo dei bicarbonati alcalino-terrosi, mentre nel sedimentario terziario al notevole incremento della salinità (campioni 82 e 85) corrisponde un arricchimento

mento in cloruri ed in solfati alcalini. L'anomalo contenuto salino del campione 85 è da attribuire al drenaggio dalla locale falda freatica ricca in solfati (vedi campione 12).

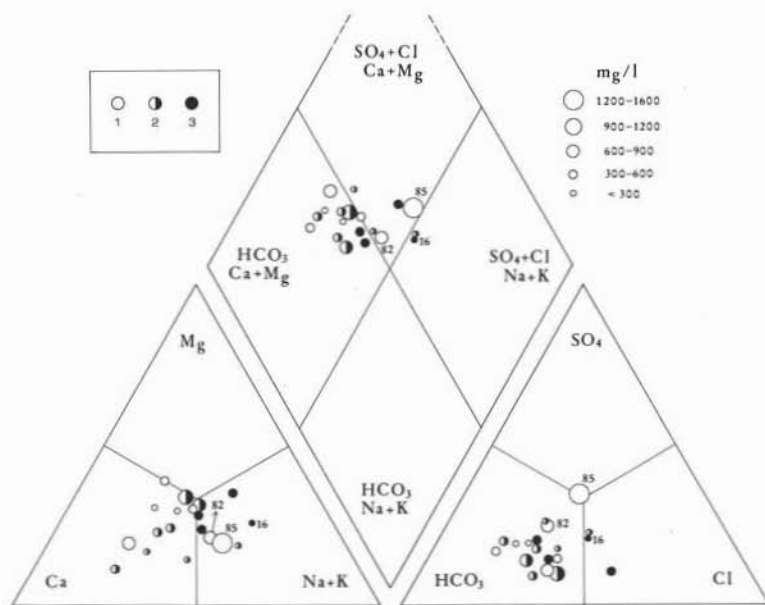


Fig. 2. — Diagramma di Piper delle acque superficiali (1), del complesso paleozoico (2) e dei basalti (3).

Acque delle formazioni paleozoiche

Per la modesta estensione in questo settore gli affioramenti paleozoici sono stati coperti solo da 8 punti d'acqua. Le indicazioni ottenute dai valori di salinità e dalla composizione (fig. 2) sono in buon accordo con i risultati ottenuti nella campagna del contiguo Gerrei, i cui caratteri litologici sono simili all'area in studio (BERTORINO et al., 1979). Le acque presentano scarsa salinità ed una modesta evoluzione verso i bicarbonati di Ca ed Mg.

Acque dei calcari mesozoici

Questo settore è caratterizzato da numerose sorgenti con portate dell'ordine di decine di l/s, assai superiori a quelle delle sorgenti delle altre formazioni. Sono state campionate 9 sorgenti e un pozzo alimentati da calcari dolomitici giuresi. Le loro acque si distinguono per una sensibile omogeneità di tutti i parametri misurati che si evidenzia particolarmente nel «Piper» (fig. 3) ove i punti rappresentativi si raggruppano in un'area molto ristretta e prossima al polo dei bicarbonati di Ca e Mg; se ne discosta leggermente il campione di un

pozzo alimentato dalla falda freatica (79) che rivela un maggior contributo in NaCl, sicuramente dovuto ad apporti dalle formazioni sedimentarie terziarie.

Il rapporto Ca/Mg è assai prossimo all'unità, rispecchiando il rapporto in cui si trovano nella roccia dolomitica con la quale le acque interagiscono. I caratteri descritti fanno ritenere che le acque di questa formazione, per l'elevata permeabilità

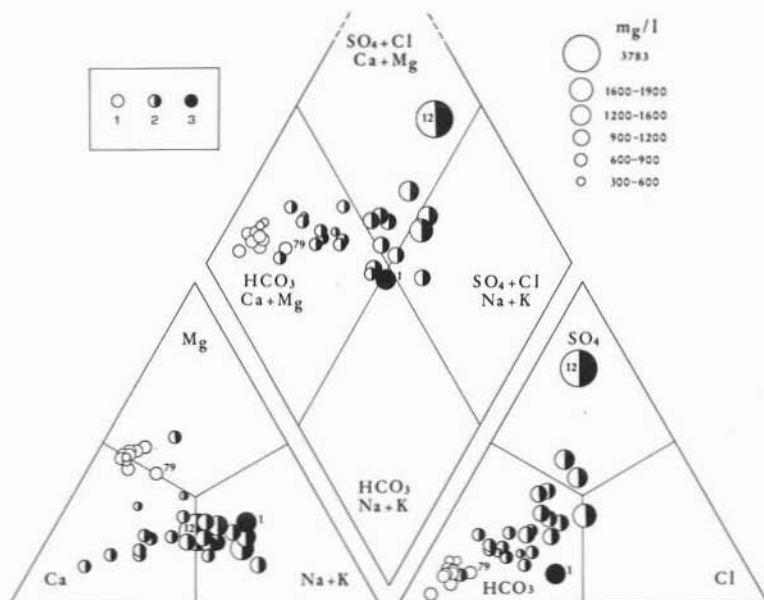


Fig. 3. — Diagramma di Piper delle acque dei calcari dolomitici giuresi (1), delle formazioni sedimentarie terziarie (2) e delle vulcaniti oligo-mioceniche (3).

TABELLA 2

Composizione media delle acque dei calcari dolomitici mesozoici

	pH	Ca meq/l	Mg meq/l	Na meq/l	K meq/l	HCO ₃ meq/l	SO ₄ meq/l	Cl meq/l	Salin. mg/l
$\bar{x}$	7.1	3.9	4.1	0.8	0.03	7.6	0.9	0.8	685
σ'	0.2	0.5	0.7	0.2	0.02	1.1	0.3	0.2	95
$\sigma/\bar{x}$	0.03	0.13	0.17	0.25	0.67	0.14	0.33	0.25	0.14

Ca e Mg. In tab. 2 sono riportati i valori medi e le relative dispersioni dei parametri misurati (escluso il campione 79).

cui fa riscontro un'intensa circolazione ed interazione con la roccia, arrivano velocemente alla maturità raggiungendo l'equilibrio con i minerali carbonatici: ciò è confermato anche dai più bassi coefficienti di variazione ($\sigma/\bar{x}$ in tab. 2) relativi ai valori coinvolti negli equilibri dei carbonati di

Acque delle formazioni terziarie

Con 24 punti d'acqua rappresenta il gruppo di campioni più numeroso in relazione alla maggior estensione degli affioramenti terziari nel settore in studio. Nel diagramma di Piper (fig. 3) si evidenzia il «trend» caratteristico delle acque «mioceniche»: acque a bicarbonato di calcio con salinità intorno a 600-700 mg/l si evolvono verso termini a cloruri e solfati alcalini, con un rapporto medio SO_4/Cl intorno ad 1, sino ad una salinità di 1200-1500 mg/l. Si distingue il campione 12 con salinità di 3783 mg/l, un tenore elevato in solfato ed un rapporto medio SO_4/Cl quasi 6; questo campione è stato prelevato in una zona contigua a quella della Trexenta che nel precedente studio aveva presentato caratteristiche idrogeochimiche analoghe, ricollegabili ad un'interazione dell'acqua con i prodotti di ossidazione di solfuri ferrosi disseminati nelle marne e nelle arenarie in quel settore miocenico. Per i campioni non inseriti nel «trend» miocenico un'interpretazione sicura non è possibile. Si può comunque osservare che essi sono tutti localizzati ai margini delle formazioni terziarie.

Un solo campione è stato prelevato nelle vulcaniti oligo-mioceniche affioranti ai bordi meridionali dell'area (camp. 1); il suo inserimento nella linea evolutiva delle acque delle formazioni terziarie è ricollegabile a sicuri apporti dai sedimenti miocenici sovrastanti.

Acque dei basalti

I punti d'acqua campionati alla base delle colate basaltiche plioceniche, modeste in quest'area per estensione e potenza, sono solamente 4. La variabilità nella salinità ed in alcuni componenti quali Na, Cl e HCO_3 , è indizio di miscelamenti più o meno importanti con acque delle formazioni mioceniche sulle quali poggiano i basalti. Il campione che, per la situazione geologica, è da riferire ad acque circolanti sicuramente nei basalti è il 16; presenta salinità bassissima e composizione bilanciata tra alcalini ed alcalino-terrosi, con un lieve eccesso di cloruri e solfati sul bicarbonato. Nell'insieme i caratteri di queste acque indicano un andamento simile a quello delle acque paleozoiche, insieme con le quali sono rappresentate nel grafico di fig. 2.

Evoluzione complessiva delle caratteristiche idrogeochimiche Equilibri con calcite, dolomite e gesso

Il modello idrogeologico illustrato in studi precedenti (BERTORINO et al., 1979; PALA et al., 1979) prospetta per le acque della Sardegna meridionale una relazione tra gli acquiferi del complesso paleozoico, quello carbonatico mesozoico e le falde della serie sedimentaria terziaria che sono in parte alimentate dai primi attraverso le facies conglomeratiche basali del Miocene.

In fig. 4 si evidenzia la linea evolutiva complessiva del chimismo di tutte

le famiglie di acque considerate. Il triangolo del grafico ha per base la migliore retta interpolante il «trend» delle acque su un diagramma di Piper quadrato, retta sulla quale sono proiettati ortogonalmente i punti rappresentanti i vari campioni; sull'altezza del triangolo sono espresse le salinità in mg/l e ciascun campione è riportato alla rispettiva salinità sulla congiungente il punto proiettato sulla retta e il vertice a salinità zero. Alle salinità più basse si trovano i campioni di «acque paleozoiche», sia sorgive che superficiali, ed alcuni dei basalti; con l'aumento della salinità fino a valori di circa 600-800 mg/l la linea evolutiva è

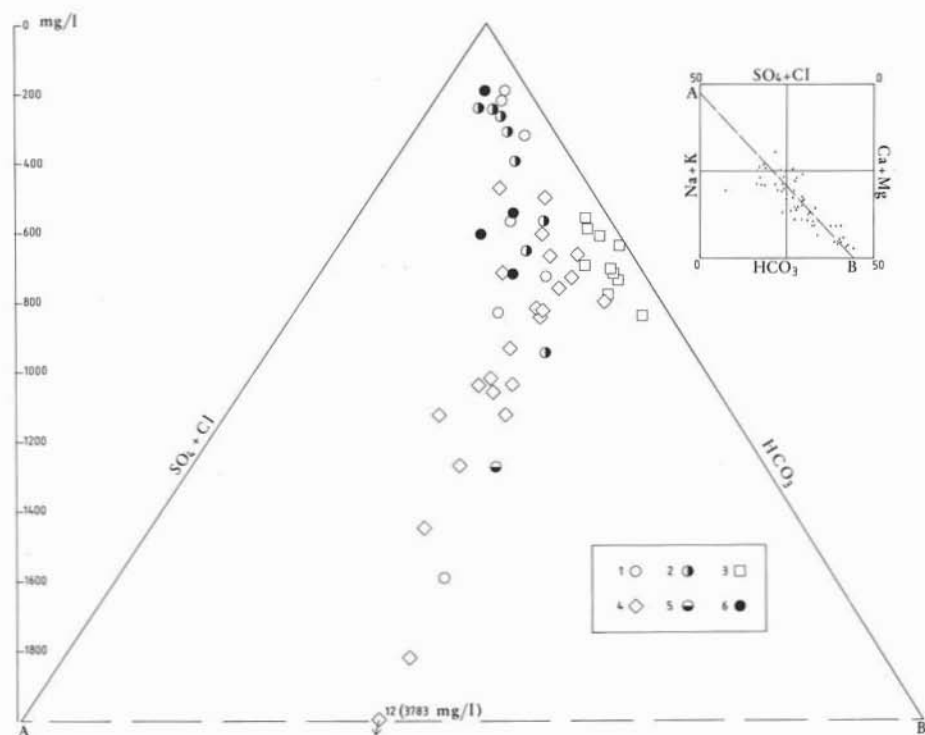


Fig. 4. — Evoluzione chimica complessiva delle acque nella zona studiata: superficiali (1), del complesso paleozoico (2), della formazione giurese (3), del sedimentario terziario (4), delle vulcaniti oligo-mioceniche (5) e dei basalti (6).

indirizzata verso il campo dei bicarbonati alcalino-terrosi; a tali valori di salinità ma spostate verso destra si trovano raggruppate le acque dei «tacchi» giuresi che mostrano più accentuato il carattere bicarbonato alcalino-terroso. Da queste due popolazioni si diparte un unico «trend» che coinvolge tutte le «acque mioceniche», sia freatiche che superficiali, verso il campo a cloruri e solfati alcalini prevalenti.

Sulla base dei litotipi con cui le acque interagiscono e dell'andamento mostrato dalla linea evolutiva generale, considerando la maggiore solubilità dei cloruri e solfati alcalini rispetto a quella dei carbonati alcalino-terrosi, i minerali che

verosimilmente regolano l'evoluzione del chimismo di base di queste acque sono la calcite, la dolomite e il gesso.

Dall'esame dei valori, riportati in tabella 1, degli indici di saturazione per la calcite e la dolomite, risultano decisamente insature solo le meno saline fra le acque delle formazioni paleozoiche e dei basalti; tutte le altre risultano sature o prossime alla saturazione sia in calcite che in dolomite ed alcune, le superficiali in particolare, sovrasature.

Sulla base della dispersione dei valori di SI_c e SI_d intorno alle rette di equilibrio teoriche (fig. 5) appare corretto considerare un intervallo di $\pm 0,25$ per la

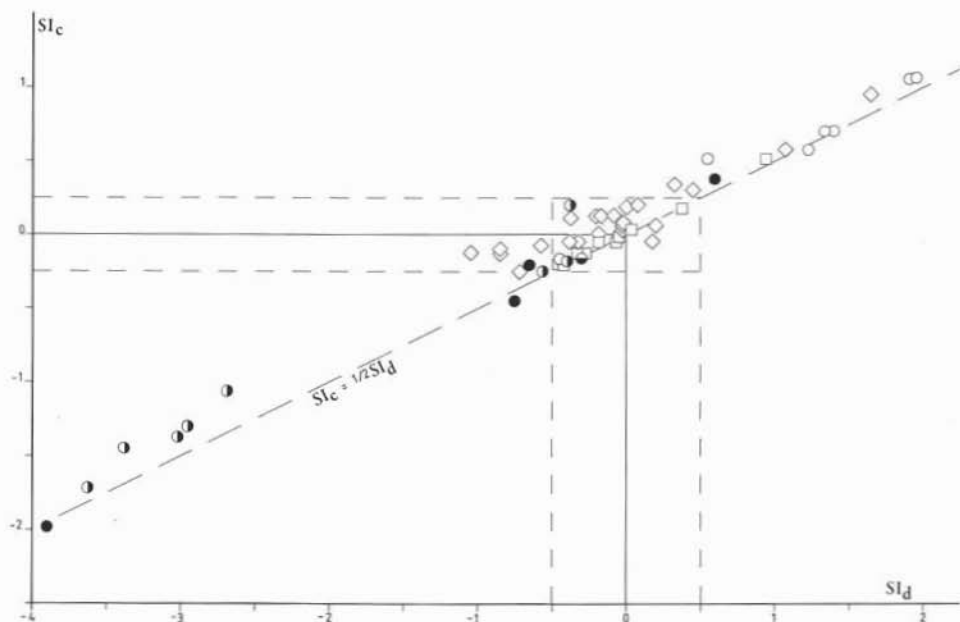


Fig. 5. — Indici di saturazione in calcite e dolomite per i campioni analizzati (per la simbologia vedi fig. 4).

saturazione in calcite e $\pm 0,50$ per quella in dolomite; dal momento che una valutazione delle condizioni rispetto all'equilibrio di un campione relativamente a più minerali può essere espressa non tanto da un confronto degli SI_i quanto da un confronto di espressioni del tipo $SI_i / -\log K_i$ è da aspettarsi che campioni con eguale distanza dalla saturazione in calcite e dolomite siano allineati su una retta $SI_c = 1/2 SI_d$. Questo è vero solo in prima approssimazione perchè quasi tutti i campioni sono leggermente spostati alla sinistra di tale retta dimostrando in definitiva che la saturazione in carbonato di calcio sembra raggiunta più facilmente di quella del carbonato doppio.

In figura 6 si evidenzia ancora il carattere particolare delle acque superficiali che appaiono sovrasature, sia quelle che scorrono in terreni paleozoici che quelle delle formazioni terziarie; tale comportamento potrebbe porsi in relazione

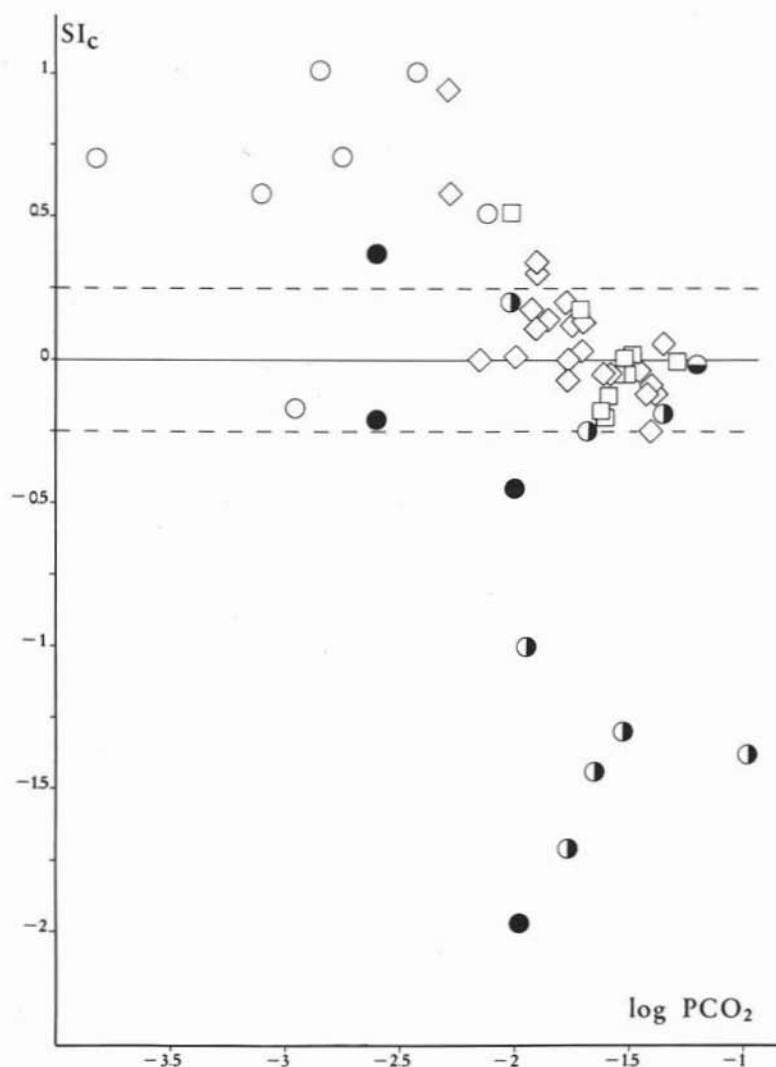


Fig. 6. — Indici di saturazione in calcite in funzione della pressione parziale di CO_2 .

con l'incremento dell'attività ionica dello ione carbonato connesso con l'aumento del pH, a sua volta dipendente dal degasamento della CO_2 che tende ad equilibrarsi con la P_{CO_2} atmosferica. La sovrasaturazione si spiega con il fatto che l'equilibrio con la calcite non viene raggiunto istantaneamente, soprattutto nei piccoli torrenti alimentati da vicine sorgenti; i valori dei $\log P_{\text{CO}_2}$ riportati in tabella 1 sono per le acque superficiali i più bassi e tendono a raggiungere il valore atmosferico di $-3,5$.

I valori della P_{CO_2} compresi tra $10^{-1,2}$ e 10^{-2} atm per la maggioranza delle acque sotterranee, sia sature che sottosature, possono indicare con la loro varia-

bilità diversi livelli di approfondimento della circolazione e/o i differenti tipi di suoli con cui le acque hanno interagito durante l'infiltrazione; comunque se si cerca per le acque sottosature di mettere in relazione P_{CO_2} e maturazione si può osservare che questa avviene in un sistema aperto al rifornimento di CO_2 da parte dell'acqua di infiltrazione attraverso i suoli.

Onde verificare ancora una volta se la dissoluzione della calcite e/o quella

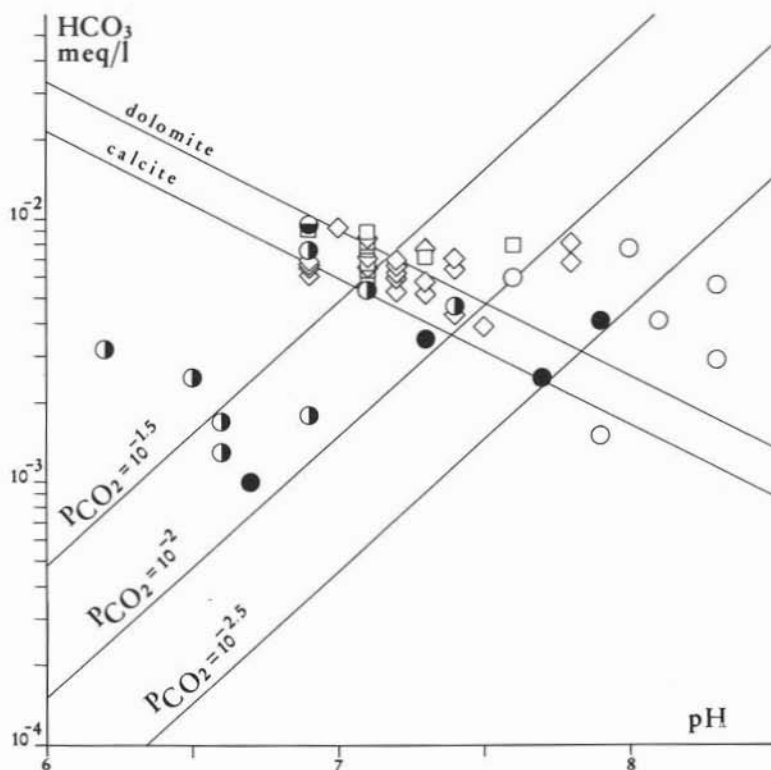


Fig. 7. — Grafico $m(HCO_3)/pH$ con rette di equilibrio per calcite e dolomite e valori della P_{CO_2} .

della dolomite controlla l'evoluzione del chimismo delle acque nell'area in studio è stato costruito il grafico di figura 7 dove sono riportati i punti rappresentativi di ogni campione in funzione del pH misurato e della concentrazione in HCO_3 e le rette di saturazione alla temperatura di $15^\circ C$, supponendo che le sole reazioni implicate siano in un caso: $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ [dissoluzione della calcite $m_{Ca} = 1/2 (m_{HCO_3})$] e nell'altro caso $CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$ [dissoluzione della dolomite $m_{Ca} = m_{Mg} = 1/4 (m_{HCO_3})$] ed assumendo la forza ionica uguale ad $1,5 m_{HCO_3}$. Le due rette sono esprimibili mediante le due equazioni (LANGMUIR, 1971).

$$1^{\circ}) -\log (m_{\text{HCO}_3}) = 1/2 [pH - \log (2K_e/K_2) + \log (\gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{HCO}_3})];$$

$$2^{\circ}) -\log (m_{\text{HCO}_3}) = 1/2 [pH - \log (4K_d^{1/2}/K_2) + 1/2 \log (\gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{Mg}} \gamma_{\text{HCO}_3}^2)].$$

Il caso della contemporanea saturazione in calcite e dolomite è rappresentato con una retta sostanzialmente coincidente con quella della dolomite. Dal grafico si osserva che la maggior parte dei campioni delle acque delle formazioni mesozoiche e terziarie sono compresi fra le due rette della calcite e della dolomite quasi a significare che le acque si trovano all'equilibrio con ambedue i minerali; solo pochi campioni appaiono sovrasaturi rispetto ad essi.

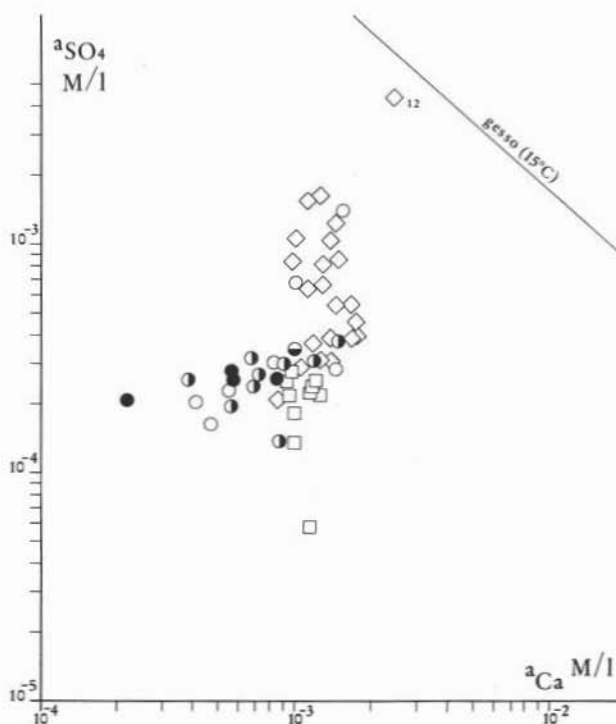


Fig. 8. — Diagramma di equilibrio del gesso.

Per quanto riguarda lo studio degli equilibri con il solfato di calcio risulta che la maggior parte delle acque delle formazioni paleozoiche, mesozoiche e dei basalti sono notevolmente sottosature rispetto al gesso ($SI_g < -1,75$); la circolazione nei terreni terziari conduce ad un aumento degli indici di saturazione con l'aumento della salinità e del contributo in solfato, sino ad arrivare alla saturazione solo nel campione 12 ($SI_g = -0,2$); in tale evoluzione l'attività dello ione calcio, ormai regolata dagli equilibri dei carbonati si mantiene pressoché costante tra 1 e 2 mM/l (fig. 8).

Conclusioni

Nell'area in studio sono distinguibili tre zone con caratteristiche idrologiche diverse:

- a) parte sud-orientale includente i rilievi del complesso paleozoico; l'idrologia è analoga a quella descritta per il Gerrei;
- b) parte settentrionale comprendente la formazione carbonatica giurese; questa formazione altamente permeabile è sede di intensa circolazione. La limitata estensione dei « tacchi » in superficie e spessore origina, al contatto con le formazioni sottostanti, una corona di sorgenti con discreta portata. La composizione dei sali disciolti si mantiene costante ed a bicarbonato calcico-magnesiaco come prevedibile data la natura dolomitica del serbatoio;
- c) zona collinare caratterizzata da sedimenti terziari e subordinatamente quaternari: le falde sono alimentate in parte dalle formazioni paleozoiche e mesozoiche ed all'iniziale maturazione a bicarbonati segue generalmente una a cloruri-solfati bilanciati; lo scambio falda freatica-corsi d'acqua è in alcuni casi documentato.

Nel settore centro-orientale la complicata situazione geologica non permette la definizione di caratteri idrologici generali. Ogni punto d'acqua risente della situazione locale e talora, anche su questa base, il chimismo non risulta univocamente interpretabile.

Ringraziamenti. — Gli autori intendono ringraziare S. GIAQUINTO, G. PECORINI ed A. R. ZANZARI per gli utili suggerimenti forniti e le proficue discussioni, A. R. ZANZARI anche per l'elaborazione dei dati svolta presso il Centro di Calcolo Elettronico dell'Università di Perugia.

BIBLIOGRAFIA

- BERTORINO G., CABOI R., CAREDDA A. M., CONTI-VECCHI G., FANFANI L., MASSOLI-NOVELLI R., ZUDDAS P. (1979) - *Caratteri idrogeochimici delle acque naturali della Sardegna meridionale. 1. Le acque del Gerrei e della Trexenta*. Rend. Soc. It. Min. Petr., 35, II, 677-691.
- BERTORINO G., CABOI R., CAREDDA A. M., CONTI-VECCHI G., FANFANI L., PALA A., ZUDDAS P. (1981) - *Caratteri idrogeochimici delle acque naturali della Sardegna meridionale. 2. Le acque del Sarrabus e del Campidano meridionale*. Rend. Soc. It. Min. Petr. (in stampa).
- CAVINATO A., ANEDDA V. (1954) - *Il Permiano in territorio di Orroli*. Res. Ass. Min. Sarda, 58, VII, 3-15.
- DEL RIO M. (1976) - *Analisi palinologica del Giurese della Sardegna centrale*. Boll. Soc. Geol., 95, III-IV, 619-631.
- DEPLANO L. (1979) - *Tesi di laurea inedita*. Università di Cagliari, Anno Acc. 1979-80.
- IPPOLITO F., NICOTERA P., LUCINI P., CIVITA M., DE RISO R. (1975) - *Geologia tecnica*. ISEDI, Milano.
- LANGMUIR D. (1971) - *The geochemistry of some carbonate ground waters in Central Pennsylvania*. Geoch. Cosm. Acta, 35, 1023-1045.

- MINZONI N. (1975) - *La serie delle formazioni paleozoiche a sud del Gennargentu*. Boll. Soc. Geol., 94, III, 347-365.
- PALA A., PORCU A., TODDE S. (1979) - *Idrogeologia dell'alta valle del Flumini Mannu di Isili (Sardegna centrale)*. Rend. Sem. Fac. Sc. Univ. Cagliari, 64, I-II, 277-303.
- PECORINI G. (1966) - *Sull'età «oligocenica» del vulcanismo al bordo orientale della fossa tettonica del Campidano (Sardegna)*. Acc. Naz. Lincei Cl. Fis. Mat. Nat., Roma, 50, VI, 1058-1065.
- POMESANO CHERCHI A. (1968) - *Studio bio-stratigrafico della Sardegna centro-meridionale*. Giorn. Geol., 35, III, 255-276.
- TRUESDELL A.H., JONES B.F. (1974) - *WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters*. Journ. Res. U.S. Geol. Surv., 2, II, 233-248.