

STUDIO GEOCHIMICO DELLE ACQUE SORGIVE DEI BACINI DEL TORRENTE VACCUTA E DEL FIUME ABATEMARCO (CALABRIA NORD-OCCIDENTALE, ITALIA)

GEOCHEMICAL STUDIES OF SPRING WATER IN THE VACCUTA AND ABATEMARCO RIVER BASINS (NORTH-WESTERN CALABRIA, ITALY)

CARMINE APOLLARO(*), CARLO ARTUSA(**), CARLO FRANCO(**), ROSANNA DE ROSA(*),
MAURIZIO POLEMIO(***) & RAFFAELLA VIRGA(*)

(*) Università della Calabria - Dipartimento di Scienze della Terra – via P. Bucci, cubo 15B - 87036 Arcavacata di Rende (CS), Italy

(**) Collaboratore esterno

(***) C.N.R. - I.R.P.I. - via Amendola 122/1 - 70126 Bari, Italy

RIASSUNTO

Vengono riportati i risultati di un'indagine geochimica condotta su 54 sorgenti ricadenti nei bacini imbriferi del fiume Abatemarco e del torrente Vaccuta (Calabria settentrionale, Italia). Considerazioni sulla composizione chimica delle acque, associate ad informazioni di carattere idrogeologico, e la stesura di sei carte tematiche, consentono di individuare tre acquiferi principali: un acquifero profondo in equilibrio con rocce carbonatiche, un acquifero metamorfico superficiale ed un acquifero di valle impostato su conglomerati e sabbie. La presenza di acque solfatiche non correlate alla geologia di superficie ed il loro allineamento lungo direttrici preferenziali suggerisce la risalita di fluidi profondi probabilmente provenienti dalla dissoluzione di livelli evaporitici non affioranti nell'area investigata.

PAROLE CHIAVE: *idrogeologia, geochimica, interazione acqua-roccia, sorgenti*

INTRODUZIONE

Le acque sotterranee rappresentano un patrimonio naturale di notevole rilevanza socio-economica per l'intero territorio dell'Italia meridionale, le cui popolazioni le utilizzano in modo prevalente per gli usi potabili. In Calabria settentrionale, la copiosa disponibilità di acque sotterranee sorgive ha da sempre garantito perenni risorse idriche, anche durante le più gravi siccità note storicamente.

Le maggiori e più regolari portate sono garantite da vasti acquiferi carbonatici, riconoscibili nel massiccio del Monte Pollino (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1979; ALVINO *et alii*, 1994), in grado di garantire portate sorgive in alcuni casi pari ad alcune centinaia di litri al secondo.

La crescente domanda idrica, le sempre più frequenti siccità, il degrado qualitativo subito da alcune tra le tradizionali risorse utilizzate, spinge ad estendere le conoscenze ad aree finora non compiutamente caratterizzate o utilizzate, per l'intrinseca complessità delle condizioni geologico-strutturali determinanti per la circolazione idrica sotterranea e/o per la minore entità delle portate sorgive attese. In questo contesto si inserisce la nota, che condensa gli studi svolti al fine di validare con approccio prevalentemente geochimico il modello idrogeologico concettuale di una vasta area montuosa posta sul versante tirreni-

ABSTRACT

The results of the geochemical investigation of 54 springs flowing into the drainage basins of the river Abatemarco and of the stream Vaccuta (northern Calabria) are reported in this paper. Considerations on the chemical composition of the waters, hydrogeological information and six thematic maps were made allowing to identify three main aquifers: a deep aquifer in equilibrium with carbonate rocks, a superficial metamorphic aquifer and a valley aquifer constituted by conglomerates and sands. The presence of sulphate waters, not related to the surface geological setting and their alignment along preferential lines, indicates the ascent of deep fluids derived by the dissolution of evaporite layers.

KEY WORDS: *hydrogeology, geochemical, water-rock interaction, springs*

INTRODUCTION

Groundwater represents a natural patrimony of notable socio-economic importance for the whole territory of southern Italy, whose population use them prevailing as drinking waters. Even during dry periods in northern Calabria the plentiful availability of spring waters has been guaranteed by the occurrence of wide carbonate aquifers in the Pollino massif (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1979; ALVINO *et alii*, 1994). However in the last years the increasing demand of water allowed to extend the investigation to find new resources also in some basins draining towards the Tyrrhenian sea. In these areas the intense tectonics creates discontinuous aquifers and develops preferential paths of outflow of waters along faults.

The aim of this work is to validate the hydrogeological model of a wide area in the province of Cosenza, including the municipalities of Verbicaro, Grisolia, Maierà, Santa Maria del Cedro, Cirella and Diamante using new geochemical data on spring waters. In the studied area the Mesozoic-Cenozoic units of the calcareous-dolomite complex of Southern Apennines are in tectonic contact with the units of the Calabro-Peloritano Arc (OGNIBEN, 1969; TORTORICI, 1982). The carbonate rocks are intensely tectonised; the runoff is strongly influenced by the structural setting. No water wells exist in this area,

co della provincia di Cosenza, che interessa i comuni di Verbicaro, Grisolia, Maierà, Santa Maria del Cedro, Cirella e Diamante.

Nell'area si osserva il contatto tettonico di unità appartenenti al complesso calcareo-dolomitico dell'Appennino meridionale (OGNIBEN, 1969) di età meso-cenozoica, con le unità dell'Arco Calabro Peloritano (TORTORICI, 1982). Le rocce carbonatiche si presentano intensamente tettonizzate e l'idrografia di superficie è fortemente influenzata dall'assetto geologico-strutturale. In questo complesso contesto geologico, in cui praticamente assenti sono le captazioni mediante pozzi per la notevole soggiacenza imposta dall'accidentata orografia, la caratterizzazione geochimica delle acque sorgive si mostra essere di valido aiuto per la definizione e la verifica delle ipotesi inerenti la schematizzazione idrogeologica e il riconoscimento dei lineamenti principali della circolazione idrica sotterranea.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Lo studio interessa un'area di circa 110 km² situata lungo la costa tirrenica della Calabria settentrionale. Quest'area include le più alte cime della catena appenninica meridionale (Cozzo del Pellegrino 1987 m s.l.m., Monte la Mula 1935 m, Cozzo di Valle Scura 1824 m e monte Montalto 1750 m).

L'idrografia superficiale è caratterizzata da due principali corsi d'acqua, il fiume Abatemarco e il torrente Vaccuta che si estendono su una fascia E-W di circa 18 km.

In questa area si osserva il contatto tettonico di unità appartenenti al complesso calcareo-dolomitico dell'Appennino meridionale (OGNIBEN, 1969) di età meso-cenozoica, con le unità dell'Arco Calabro Peloritano (TORTORICI, 1982).

L'intera area è caratterizzata da tre eventi deformativi principali (COTECCHIA *et alii*, 1983); il primo, di tipo duttile, è caratterizzato da strutture a pieghe a scala regionale, evidenziato dalla piega anticlinale affiorante a Monte la Mula al Cozzo di Valle Scura e sino alla Cresta, in direzione NNE-SSO che ripiega verso Est nella catena del Pollino nella parte Settentrionale.

Il secondo evento è dato da sovrascorrimenti a scala regionale, diffusi in tutta la catena Appenninica, in generale, e nel confine calabro-lucano, in particolare.

Il terzo evento deformativo è di tipo fragile, caratterizzato da due sistemi principali di fagliamento, ai quali se ne accompagnano altri secondari. L'insieme di queste fasi tettoniche ha sicuramente ripreso le strutture originarie, interrompendone la continuità, modificandone i rapporti stratigrafici delle unità affioranti, tale da conferire alla zona il suo assetto attuale.

Nell'area di studio si distinguono l'Unità metamorfica di San Donato, l'Unità di Verbicaro e le Unità interne.

In particolare, nel settore nord-est dell'area affiora l'Unità Metamorfica di San Donato (AMODIO MORELLI *et alii*, 1976) che costituisce la base geometrica, sia per la catena appenninica che per l'Arco Calabro.

then the geochemical characterization of the spring waters may highlight the hydrogeological scheme and the reconstruction of the groundwater flow.

HYDROGEOLOGICAL AND GEOLOGICAL FRAMEWORK

The studied area is located along the Tyrrhenian coast of northern Calabria. It covers a surface of about 110 km² and includes the highest relieves of the southern Apennine chain (Cozzo del Pellegrino, 1987 m s.l.m.; Monte la Mula, 1935 m; Cozzo di Valle Scura, 1824 m and mountain Montalto, 1750 m). The surface hydrography is characterized by two main rivers, the river Abatemarco and the stream Vaccuta whose basins extend 18 km in a EW direction.

A tectonic contact between the Meso-Cenozoic units belonging to the calcareous-dolomitic complex of the Southern Apennines and the Calabro-Peloritano units can be observed in this area (OGNIBEN, 1969; TORTORICI, 1982).

In particular, the whole area is characterized by three main deformative events (COTECCHIA *et alii*, 1983). The first, of ductile type, is characterized by regional fold structures well represented by the NNE-SSW anticline outcropping at Monte la Mula, Cozzo di Valle Scura until Cresta. Northward of the Pollino chain this anticline refolds toward East.

The second event is represented by large thrusts widespread in the whole Apennine Chain, and in particular along the Calabro-Lucano border.

The third deformative event is of fragile type and is characterized by two main fault systems. These tectonic phases intensely modified the original structures and their continuity giving rise to the present setting.

In the studied area the metamorphic unit of San Donato, the Verbicaro unit and the Internal Units outcrop. In particular, in the northeast sector of the area the metamorphic Unit of San Donato (AMODIO MORELLI *et alii*, 1976) outcrops. This unit, ranging in age from Upper Trias (carbonate neritic facies) to Lower Trias (siliciclastic facies), includes also rocks of older age (basal phillites). It represents the geometric basis both for the Apennine chain and the Calabrian Arc.

Questa unità, si estende stratigraficamente dal Trias superiore (facies carbonatiche neritiche) al Trias basale (facies silicoclastiche) o età più antiche (filladi basali). E' caratterizzata alla base da una successione silico-clastica (filladi) con intervalli risedimentati; verso l'alto si intercalano con maggiore frequenza ed entità i corpi carbonatici. Nella parte sommitale si ha il passaggio stratigrafico ad una successione per lo più dolomitica o calcareo-dolomitica di colore grigio, sono presenti anche intervalli di breccie dolomitiche. All'interno di questa unità, ma non in affioramento, sono presenti anche rocce di tipo evaporitico come gesso ed anidriti. Tali evaporiti sarebbero cioè elementi relitti dispersi lungo la superficie di accavallamento tettonico che coinvolgerebbe la totalità dei corpi meso-cenozoici di Catena al di sotto delle Unità Alpine (COTECCHIA *et alii*, 1988).

Nella parte centrale affiora l'Unità di Verbicaro che si estende dal Triassico superiore al Miocene inferiore (AMODIO MORELLI *et alii*, 1976), dove si riscontrano oltre alle dolomie e alle breccie calcaree, anche calcari marnosi a luoghi selciferi, conglomerati intraformazionali, breccie calcaree con frammenti di selce e calcareniti con intercalazioni di letti argillosi.

A sud di Verbicaro affiorano le formazioni appartenenti alle Unità Interne (IETTO *et alii*, 1992) costituite da una successione di metamorfiti contenenti blocchi di dimensioni variabili di rocce ofiolitiche e di rocce di crosta continentale.

Nell'area di Santa Maria del Cedro e nel tratto costiero si alternano le successioni sedimentarie mioceniche-pleioceniche e pleistoceniche, costituite da conglomerati, arenarie e calcari arenacei poco cementati, marne calcaree siltose, argille marnose e sabbie.

In figura 1 è riportata la carta geologica dell'area in esame con l'ubicazione dei punti di campionamento.

Dal punto di vista idrogeologico, si possono distinguere tre principali complessi idrogeologici (Fig. 2).

Il complesso idrogeologico calcareo, costituito principalmente da calcari grigio scuri, breccie calcaree e calcari dolomitici, presenta buone caratteristiche idrogeologiche, in virtù della permeabilità, principalmente secondaria, per fessurazione, massima nell'area, e la notevole potenza degli acquiferi che costituisce. Il grado di permeabilità è stimabile medio-alto. Si riconosce nella porzione montana dei bacini.

Il complesso calcareo alimenta alcune importanti sorgenti presenti nell'area (Fig. 2, Tab. 1). Complessivamente sono state censite 22 sorgenti in tale complesso, per una portata complessiva stimabile in 59 l/s. La portata sorgiva massima censita è 17 l/s.

Su numerose sorgenti appare evidente il ruolo della tettonica nel determinare le condizioni di efflusso delle acque sotterranee di tale complesso. L'indisponibilità di dati di dettaglio che permettano l'approfondimento degli aspetti idrogeologici che condizionano la circolazione idrica sotterranea fino a determinarne la venuta a giorno non permette che si approfondisca ulteriormente questo aspetto.

Il complesso sedimentario è costituito da conglomerati e da depositi alluvionali. Il grado di permeabilità è in questo caso variabile da medio ad alto, con maggiore frequenza del primo attributo, in rela-

In the basal siliciclastic sequence (phyllites) carbonate bodies are intercalated that become thicker and more frequent upward. At the top of the sequence there is a stratigraphic transition to a dolomitic or calcareous-dolomitic sequence of grey colour with interbedded layers of dolomitic breccias. Evaporitic rocks, chalk-anhydrites, are also interbedded within this unit but they do not outcrop at the surface. It is suggested that should be relict rocks scattered along the tectonic thrust involving all the Meso-Cenozoic bodies of the Chain below the Alpine Units. (COTECCHIA *et alii*, 1988).

In the central part the Verbicaro Unit outcrops, ranging in age from Upper Triassic to Lower Miocene (AMODIO MORELLI *et alii*, 1976). Dolomites and calcareous breccias, marl and flinty limestones, calcareous breccias with fragments of flint and interlayered clayey beds are present within this unit.

Southward of the Verbicaro unit the Internal Units (IETTO *et alii*, 1992) outcrop including a metamorphic sequence containing ophiolitic blocks and crustal rocks of variable size.

At Santa Maria del Cedro and along the coastal sector, sedimentary successions of Miocene to Pleistocene age outcrop. They consist of conglomerates, sandstones and calcareous sands, marly limestones, marl clays and sands.

Figure 1 shows a schematic geologic map of the investigated area with the location of the sampling points.

Three main hydrogeological complexes can be distinguished (Fig. 2). The calcareous hydrogeological complex, mainly constituted by grey dark limestones, dolomitic limestones and breccias, presents good hydrogeological characteristics due to the middle high degree of permeability, mainly due to fracturing phenomena, and the high thickness. This complex feeds some important springs in the area (fig. 2, Tab.1). Twenty two springs have been documented for a whole flow rate of 59 l/s. The maximum estimated flow rate of a spring is equal to 17 l/s.

There are evidence that the tectonic regime strongly influences the outflow conditions of groundwater. However the lack of detailed data sets does not permit a deeper knowledge of the hydrogeological system.

The sedimentary complex consists of conglomerates and alluvial deposits. The degree of permeability varies from medium to high in relation to the abundance of the pelitic fraction. Only six springs belong to this complex; however two of them are characterized by the highest flow rates measured in the investigated area, respectively of 79 and 69 l/s. Taking into account the limited extent of the complex and the climatic context (with rainfall higher than evapotranspiration), it is suggested that these springs are fed by fluxes coming from the near calcareous complex or subordinately by water loss from the hydrographic network, rather than by the normal reload of the sedimentary complex.

Phyllites and phyllitic schists showing a general low permeability form the metamorphic-crystalline complex. On these rocks,



Fig. 1 - Carta geologica. LEGENDA: 1-depositi alluvionali (Olocene); 2-depositi della piana alluvionale costiera (Olocene); 3-sabbie e conglomerati (Pleistocene); 4-breccie calcaree (Eocene); 5-calcarei grigio scuri (Mesozoico); 6-dolomie e calcari dolomitici (Mesozoico); 7-sciisti e filladi (Mesozoico); 8-faglie; 9-sorgenti; 10-acque piovane; 11-sezione A-B
- Geological map. LEGEND: 1-Alluvial deposits (Holocene), 2-Alluvial coastal plane deposits (Holocene), 3 - sands and conglomerates (Pleistocene), 4 - Calcareous breccias (Eocene), 5- Dark-grey limestones (Mesozoic), 6- Dolomites and dolomitic-limestones (Mesozoic), 7- Schists and Phyllites; 8 - faults, 9- springs, 10- Rain waters, 11- A-B section

zione alla variabile presenza della frazione pelitica.

In questo complesso le sorgenti sono poche, 6 in tutto, ma due di queste hanno elevata nonché massima portata, pari a 77 e 69 l/s.

Vista la modesta estensione del complesso e il contesto climatico in cui si colloca, caratterizzato dalle peggiori condizioni nell'area di studio per la piovosità efficace (minima piovosità e massima temperatura media annua), è realistica l'ipotesi che tali sorgenti non siano alimentate tanto dalla ricarica zenitale che perviene al complesso idrogeologico quanto da efflussi provenienti dal contiguo complesso calcareo o, secondariamente da perdite provenienti dal reticolo idrografico, come si cercherà di caratterizzare con l'analisi geochemica.

Il complesso cristallino-metamorfico è costituito da filladi e sciisti filladici, la cui permeabilità in genere è molto bassa. A luoghi, in particolare nelle porzioni più superficiali degli affioramenti di tali rocce, l'effetto sovrapposto di un complesso di processi della dina-

the action of surface processes favours the generation of a ground-water circulation that gives rise to numerous spring waters of limited extent and very low flow rates. 25 springs have been included in this complex, with an estimated whole flow rate of 3.1 l/s.

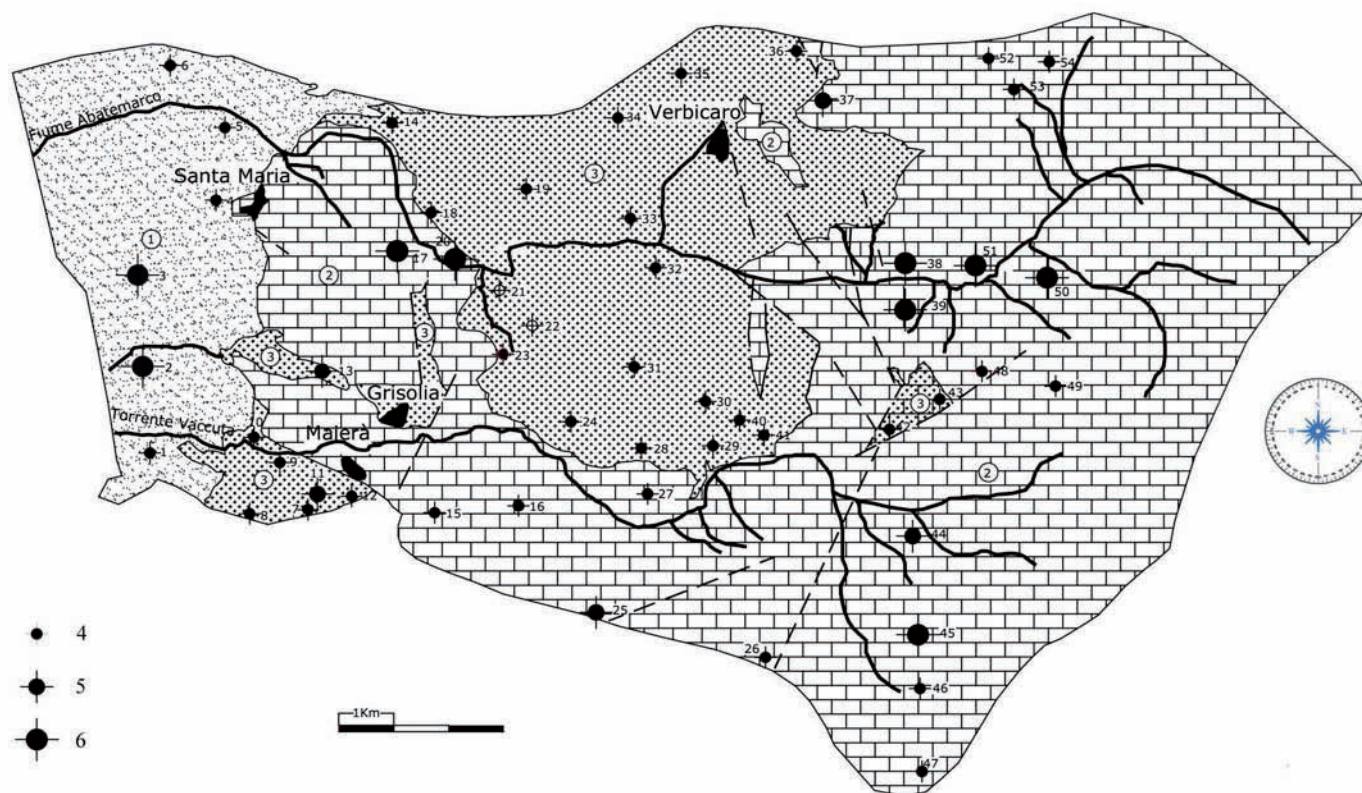


Fig. 2 - Carta idrogeologica schematica. LEGENDA: 1-complesso sedimentario; 2-complesso calcareo; 3-complesso cristallino metamorfo; 4-sorgenti con portate inferiori a 0.5 l/s; 5-sorgenti con portate comprese tra 0.5 l/s e 2 l/s; 6-sorgenti con portate maggiori di 2 l/s
 - Schematic hydrogeological map. LEGEND: 1- Sedimentary complex; 2- Calcareous complex; 3- Metamorphic-crystalline complex; 4- Springs with flow rates lower than 0.5 l/s; 5- Springs with flow rates between 0.5 and 2 l/s, 6 - Springs with flow rates higher than 2 l/s

mica esogena determina condizioni più favorevoli alla circolazione idrica sotterranea, dando vita a numerosissime sorgenti, 25 sono le sorgenti censite in tale complesso, per una portata complessiva stimabile al più in 3,1 l/s. Trattasi quindi di sorgenti dall'entità del tutto trascurabile, dovute agli efflussi da acquiferi modestissimi, di limitata estensione e potenza.

METODI DI CAMPIONAMENTO E DI ANALISI

Il campionamento delle acque di sorgente è stato condotto nel mese di aprile 2002. Nello stesso periodo, sono stati campionati due singoli eventi piovosi, uno a quota 200 m s.l.m. e l'altro a quota 300 m s.l.m. In situ sono state effettuate le misure dei parametri chimico-fisici, temperatura, pH, Eh e conducibilità elettrica specifica, compensata a 20°C, mediante strumenti portatili ad elettrodo. Al fine di evitare fenomeni di precipitazione, sono state condotte in campo anche la determinazione del ferro totale presente nelle acque, tramite fotometro monofrequenza portatile, e dei tenori in ione bicarbonato, mediante titolazione acido-base con titolante HCl 0.1N.

Per ciascun campione sono state prelevate, e conservate in contenitori in PET a doppio tappo, due aliquote: una filtrata con filtro da 0.45 µm, destinata all'analisi degli anioni ed un'altra filtrata ed acidificata con HNO₃ ultrapuro, per la determinazione delle specie cationiche.

SAMPLING AND ANALYTICAL METHODS

The sampling of the spring ywaters has been conducted in the month of April 2002. In the same period two rainy events have been sampled, respectively at 200 and 300 m a.s.l. In situ determinations of the chemical-physical parameters, temperature, pH, Eh and specific electrical conductivity (compensated at 20°C), have been performed using electrode portable tools. With the purpose to avoid precipitation phenomenon, both the total iron and the bicarbonate content in the waters have been determined in the field respectively by a portable mono frequency photometer and an acid-base trimetry with 0.1N HCl solution.

For every sample two shares have been sampled and preserved in PET containers with double cork: the former was filtered with a filter of 0.45 µm, for anions analysis; the latter was filtered and acidified with super-pure HNO₃, for cations determination.

La determinazione delle concentrazioni degli ioni principali presenti in fase acquosa è stata effettuata mediante HPLC (High Performance Liquid Chromatography) utilizzando un cromatografo Dionex DX-120.

L'analisi chimica e la restituzione fotografica dei depositi prelevati presso la sorgente 50 sono state effettuate al microscopio elettronico a scansione mediante microanalisi chimica elementare (SEM-EDS).

ESPOSIZIONE DEI DATI

I risultati analitici relativi alle 54 sorgenti campionate e a 2 campioni di pioggia sono riportate in tabella 1.

Le acque considerate presentano temperature comprese tra 10°C e 20°C con valori di pH compresi tra 5.2 e 8.1.

In generale le sorgenti alimentate da acquiferi metamorfici hanno

The main ionic concentrations in water phase has been performed by HPLC (High Performance Liquid Chromatography) using a chromatograph Dionex DX-120.

The chemical analysis and the photographic restitution of the sampling deposits near the spring 50, have been effected using a scanning electron microscope coupled with elementary chemical micro-analysis (SEM-EDX).

RESULTS

The analytical results related to the 54 sampled springs and to 2 rain samples are shown in table 1.

The investigated waters have temperatures between 10°C and 20°C, and pH values ranging from 5.2 to 8.1. In general the springs fed by metamorphic aquifers show the lowest pH values, salinity

CAMP	ID	LITOLOGIA	QUOTA m s.l.m.	TEMP C°	pH	Eh mV	COND. 20°C uS/cm	Fe mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	HCO3 mg/l	NO3 mg/l	Q l/s
Cirella/D	1	Sabbie/congl.	10	11.4	7.1	170	850	0.00	83.7	22.0	8.8	0.8	24.2	46.4	300	9.6	pozzo
Palazzo	2	Sabbie/congl.	18	14.2	7.3	106	710	0.01	75.1	28.6	5.0	0.5	13.1	105.2	259	2.8	77
Fiumicell	3	Sabbie/congl.	30	14.5	7.4	99	990	0.00	109.7	35.7	6.3	0.8	16.8	203.7	285	4.8	69
S.Maria	4	Sabbie/congl.	144	14.5	7.3	93	740	0.02	78.2	22.7	7.6	0.5	20.2	88.2	257	3.6	<0,01
S.Andrea	5	Sabbie/congl.	64	14.6	7.4	124	655	0.00	81.2	14.0	16.6	2.4	51.1	28.2	250	37.9	<0,00
Tre Fonta	6	Sabbie/congl.	27	14.2	7.1	137	775	0.02	86.2	30.4	9.4	1.1	23.4	65.1	300	24.5	<0,01
Fontana	7	Congl./Metamorf.	250	12.0	7.8	124	610	0.00	94.0	20.2	18.7	0.9	37.1	79.0	270	0.0	0.02
Ariestu	8	Metamorf.	150	14.3	7.5	79	1130	0.03	139.7	39.1	59.6	0.2	86.5	132.5	422	2.1	0.23
Ariestu1	9	Metamorf.	165	13.6	7.0	102	1230	0.02	172.5	34.6	32.2	0.2	63.4	121.2	477	0.0	0.01
Vaccuta	10	Metamorf.	90	18.0	6.9	154	1013	0.04	78.6	37.6	79.5	0.0	75.4	138.8	357	2.5	< 0,01
Carmine	11	Metamorf.	300	14.9	7.1	99	605	0.00	87.2	23.8	11.3	5.2	20.4	37.3	300	18.2	1.5
Maulicino	12	Metamorf.	350	11.9	7.1	68	225	0.00	32.5	11.1	12.0	0.7	22.7	25.0	135	0.0	pozzo
Magarosa	13	Metamorf.	212	14.7	7.5	187	343	0.02	69.0	14.5	9.5	0.6	20.7	32.2	258	3.6	0.5
Destra	14	Metamorf.	150	14.5	7.2	81	605	0.03	101.2	20.1	36.8	1.7	17.6	40.2	390	32.5	0.036
Ponticell	15	calcari/dolomie	400	14.0	6.9	82	510	0.00	97.0	26.6	14.6	1.3	20.6	48.3	322	38.1	<0,01
Lo Scavo	16	calcari/dolomie	509	14.7	7.4	98	585	0.00	101.2	34.6	10.4	0.3	21.1	45.1	376	20.3	0.06
Acqua da	17	calcari/dolomie	85	12.7	7.4	76	680	0.00	119.2	42.6	5.9	0.9	7.7	271.6	216	1.6	15
Presa	18	calcari/dolomie	82	13.0	8.1	80	305	0.00	74.8	22.6	7.5	1.2	10.8	78.8	235	2.9	<0,01
Destra 1	19	Metamorf.	366	16.9	7.1	44	695	0.00	99.4	15.7	50.6	0.3	27.8	56.8	360	23.6	0.025
Acqua da	20	calcari/dolomie	95	13.0	7.3	75	490	0.00	134.8	36.5	5.0	0.8	8.0	283.0	260	1.4	0.17
Loc.Panta	21	Metam./calcari	360	18.5	7.0	80	276	0.05	43.1	25.5	10.5	1.8	18.8	35.9	235	3.7	<0,01
Pastena	22	Metamorf.	461	17.6	6.5	175	136	0.03	14.4	3.5	7.1	0.8	11.0	10.2	56	8.6	0.025
S.Ianni	23	Metamorf.	470	15.5	6.2	191	144	0.00	17.0	4.4	9.5	1.0	15.5	15.1	63	4.4	0.016
Battista	24	Metamorf.	720	14.9	6.3	161	179	0.01	37.0	3.0	6.1	0.2	13.6	11.0	108	0.2	<0,01
Pizzerra	25	calcari/dolomie	706	14.5	7.1	140	774	0.05	84.8	27.3	11.1	1.0	16.2	11.6	355	2.2	1
Mulini	26	calcari/dolomie	702	15.0	7.3	147	273	0.00	105.4	12.0	8.5	0.5	14.5	10.7	333	0.8	0.06
Triatti	27	calcari/dolomie	550	10.1	7.7	118	400	0.04	49.5	21.0	5.3	0.4	13.6	11.0	217	0.2	0.2
Monticell	28	Metamorf.	664	13.9	5.2	31	41	0.01	3.2	1.9	6.0	0.6	7.8	3.1	19	3.0	0.02
Cannovo	29	Metamorf.	615	12.8	7.6	177	343	0.00	39.1	16.1	3.5	0.0	8.3	35.1	162	2.2	0.04
Campagna	30	Metamorf.	604	13.6	6.2	47	56	0.01	5.8	2.1	6.1	0.2	11.1	4.1	24	0.9	<0,01
Pastena 1	31	Metamorf.	480	17.1	6.5	178	129	0.00	13.3	4.9	8.0	0.5	18.6	13.8	45	12.2	0.0156
Bozzino	32	Metamorf.	425	16.3	7.7	140	294	0.06	29.9	6.7	8.7	0.3	7.8	25.9	115	0.6	0.0119
S.Frances	33	Metamorf.	300	15.7	7.6	25	620	0.07	77.8	14.8	38.9	0.4	33.2	55.0	295	0.0	<0,01
F.te S.Le	34	Metamorf.	485	16.0	6.9	28	275	0.01	67.9	13.7	10.4	0.3	17.9	78.3	185	2.8	0.15
Le monach	35	Metamorf.	500	15.2	6.8	40	450	0.02	70.1	18.8	12.9	0.0	17.3	126.8	140	0.4	0.25
F.te dei	36	Metamorf.	670	13.3	7.2	100	610	0.00	116.2	24.9	8.7	1.1	11.9	121.4	295	0.6	0.15
Fontanell	37	calcari/metam.	428	15.5	7.6	50	310	0.00	55.3	13.1	6.6	1.3	11.2	38.6	170	8.2	0.5
Centrale	38	calcari/dolomie	210	15.5	7.3	65	405	0.00	90.8	15.3	15.8	0.5	15.8	17.8	312	2.7	4
Centrale1	39	calcari/dolomie	240	14.1	7.5	20	390	0.02	61.5	12.6	12.7	0.4	11.8	14.7	226	3.7	5.5
Fonte Sci	40	Metamorf.	690	13.3	6.5	108	116	0.03	16.6	4.0	9.4	0.6	17.2	7.3	66	0.0	<0,01
SIJa	41	Metamorf.	755	16.8	6.0	93	186	0.08	33.8	5.1	5.2	0.7	11.7	22.5	102	3.6	<0,01
Terralong	42	Metamorf.	740	19.8	6.7	44	51	0.00	6.4	1.1	3.8	0.1	7.9	2.5	21	4.0	<0,01
Scuola	43	calcari/dolomie	630	12.0	7.8	125	415	0.02	57.1	21.1	6.2	0.4	7.7	33.1	232	2.8	0.15
Serravecc	44	calcari/dolomie	646	12.2	7.8	180	176	0.00	38.6	9.7	3.1	0.1	7.4	8.9	165	1.3	1.5
Pantanell	45	calcari/dolomie	655	16.0	7.5	181	305	0.05	36.5	15.2	3.9	0.1	8.2	37.5	153	2.5	10.5
Le Rape	46	calcari/dolomie	804	18.7	7.9	176	582	0.02	59.1	35.2	5.6	0.8	18.0	37.2	329	3.2	< 0,01
V.ne d. S	47	calcari/dolomie	900	18.9	8.1	182	433	0.07	49.8	23.1	4.8	0.2	12.2	9.5	261	1.3	0.03
Pericelle	48	calcari/dolomie	1000	11.8	6.9	88	263	0.00	71.6	3.5	4.8	0.1	11.7	4.4	204	22.1	0.15
Mastro Ma	49	calcari/dolomie	980	11.0	7.2	54	157	0.02	60.7	11.4	4.9	0.1	12.3	3.8	198	22.9	0.13
Solforosa	50	calcari/dolomie	410	12.9	7.1	-113	495	0.04	120.7	47.5	13.5	0.4	9.2	245.9	300	0.8	2.5
Cosciuni	51	calcari/dolomie	270	13.0	7.6	9	345	0.09	54.9	21.0	13.4	0.4	9.7	25.3	239	2.6	17
Cannavata	52	Metam./calcari	709	11.0	6.7	19	90	0.00	14.2	3.3	8.9	0.2	16.1	6.3	56	4.4	0.125
Coture	53	calcari/dolomie	750	13.1	7.5	56	320	0.02	61.9	6.6	6.3	0.1	8.7	7.8	195	2.5	0.25
Trentacar	54	calcari/dolomie	875	13.2	7.4	85	415	0.00	66.3	10.2	7.5	2.8	9.3	14.2	224	4.5	0.25
Pioggie 200m	P200	Pioggia	200	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.1	0.9	11.9	0.7	16.6	2.7	12	1.4	
Pioggie 300m	P300	Pioggia	300	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.5	0.7	11.8	0.4	16.2	2.9	16	1.6	

Tab. 1 - Composizione chimica delle acque analizzate; n.d.: non determinato
- Chemical composition of analyzed waters; n.d.: not determined

i valori più bassi del pH della salinità e portate effimere (Fig. 2) per le quali la componente meteorica esercita ancora una influenza non trascurabile sul chimismo (BERNER & BERNER, 1996). I valori più elevati di pH si riscontrano in acque maturatesi in acquiferi carbonatici in cui il processo di idrolisi, favorito anche da elevati tempi di contatto acqua-roccia, ha decisamente reso più alcalina la soluzione acquosa rispetto al pH delle precipitazioni (APPELO & POSTMA, 1999).

I valori di Eh misurati sono positivi e compresi tra 190 e 9 mV, ad eccezione della sorgente 50, per la quale viene misurato un Eh di -113 mV molto probabilmente dovuto alle condizioni riducenti presenti in profondità nell'acquifero, dove la coppia redox dominante potrebbe essere $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$.

I valori di conducibilità elettrica specifica, compensati a 20°C, sono compresi tra 40 e 1230 $\mu\text{S}/\text{cm}$. I termini meno conduttivi hanno anche basso pH, per cui è ragionevole pensare ad acque chimicamente poco mature, in quanto l'interazione acqua-roccia può essere considerata come una titolazione acido-base continua che cambia progressivamente il pH del fluido da un valore iniziale acido o debolmente acido, che dipende solo dalla $f\text{CO}_2$, ad un valore finale basico o debolmente basico governato dalla $f\text{CO}_2$ e dalla saturazione rispetto ad una o più fasi minerali (MARINI *et alii*, 2001).

I dati desunti dalle analisi chimiche sono stati plottati sugli usuali diagrammi classificativi, (Fig.3) assegnando simboli diversi in base ai complessi idrogeologici dai quali le acque vengono a giorno. Nei diagrammi vengono riportati anche i punti rappresentativi dei due campioni di pioggia raccolti nel bacino imbrifero del Fiume Abatemarco, a quote rispettivamente di 200 m s.l.m. (campione P200) e 300 m s.l.m. (campione P300). Entrambi i campioni presentano quasi gli stessi tenori in cloruri (16.6 mg/l e 16.2 mg/l) e sodio (11.9 mg/l e 11.8 mg/l), valori che, vista l'ubicazione geografica dell'area, suggeriscono contaminazione da aerosol marino. Nel campione raccolto a quota più elevata si riscontra un aumento nella concentrazione di Ca^{++} e HCO_3^- , probabilmente dovuto alla maggiore influenza di polveri aerodisperse (MARINI & OTTONELLO, 1997) prodotte da azione meccanica sugli affioramenti carbonatici (Fig. 3).

I diagrammi ternari discriminanti rispettivamente per gli anioni e per i cationi mettono in evidenza che la maggior parte delle acque analizzate sono a bicarbonato ed a calcio prevalente. Si individuano nettamente tre trend per ciascuno dei complessi idrogeologici principali considerati. Un primo trend, ad andamento subparallelo all'asse $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ ed all'asse Mg - Ca, suggerisce un equilibrio con rocce carbonatiche con un progressivo arricchimento in solfati ed un lieve decremento percentuale in cloruri ed alcali. Un secondo trend, che delinea una nuvola di dispersione allungata subparallelamente all'asse Cl-HCO_3 e Na+K-Ca , caratterizza i campioni riferibili ad acquiferi metamorfici e mostra un progressivo aumento del grado di maturazione delle acque da un chimismo notevolmente influenzato dalle precipitazioni (sorgenti di piccola portata) ad una condizione di equilibrio con l'acquifero metamorfico ospitante. Un terzo trend, meno evidente, ad andamento circa subparallelo agli assi $\text{SO}_4\text{-Cl}$ e Mg-Na+K , nel quale

and outflow yields (FIG.2); for them the meteoric component plays yet a major role on chemistry (BERNER & BERNER, 1996). The highest pH values characterized the waters of carbonate aquifer, in which the process of hydrolysis favoured by the long-time water-rock interaction processes make them more alkaline in comparison to the composition of meteoric waters (APPELO & POSTMA, 1999).

The Eh values are positive and range between 190 and 9 mV. Only the spring 50 shows an Eh value of -113 mV probably due to the occurrence with depth of redox conditions dominated by the couple $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$. The specific electrical conductivity values, compensated at 20°C, are between 40 and 1230 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The less conductive groundwater also has low pH suggesting a compositional immaturity of these waters. These characteristics can be explained by water-rock interaction processes acting as a continuous acid-basic titration progressively changing the pH of fluid from an initial acid or weakly acid condition, as a function only of $f\text{CO}_2$, to final basic or weakly basic conditions controlled by the $f\text{CO}_2$ and the saturation in respect to one or more mineral phases (MARINI *et alii*, 2001).

The chemical data have been plotted in the usual classification diagrams, assigning different symbols on the basis of the identified hydrogeological complexes (Fig. 3). In the diagrams the composition of two rain samples collected in the basin of the River Abatemarco, at respectively 200 m a.s.l. (sample P200) and 300 m a.s.l. (sample P300) are also plotted. Both samples have the same quantities in chlorides (16.6 mg/l and 16.2 mg/l) and sodium (11.9 mg/l and 11.8 mg/l). These values, according to the geographical location of the area, suggest sea aerosol contamination. In the sample collected at higher elevations there is an increase in the concentration of Ca and HCO_3^- , probably due to a greater influence of atmospheric dusts, produced by mechanical action on outcropping rock surface, on rain composition (MARINI & OTTONELLO, 1997) (Fig. 3).

The ternary diagrams underline that most of the analyzed waters are bicarbonate and calcium waters. There are three trends: a first trend is sub-parallel to the $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ and the Mg-Ca axes and suggests an equilibrium with carbonate rocks, a progressive increase of sulphates and a light decrease of chlorides and alkali. A second trend shows a dispersion subparallel to the Cl-HCO_3 and Na+K - Ca axes; it includes waters characterised by a progressive increase of the compositional maturity from those strongly influenced by precipitations (springs with low flow-rate) to those in equilibrium with the rocks of metamorphic aquifer. A third trend is less clear: it is almost sub-parallel to the $\text{SO}_4\text{-Cl}$ and Mg-Na+K axes, including all the waters rising from valley sands and conglomerates.

It is interesting to note that in the ternary diagram of the anions and in the Langelier-Ludwig diagram (LANGELIER & LUDWIG, 1942) five water samples (3, 17, 20, 35 and 50), belonging to different hydrogeological complexes, show anomalous high quantities of sul-

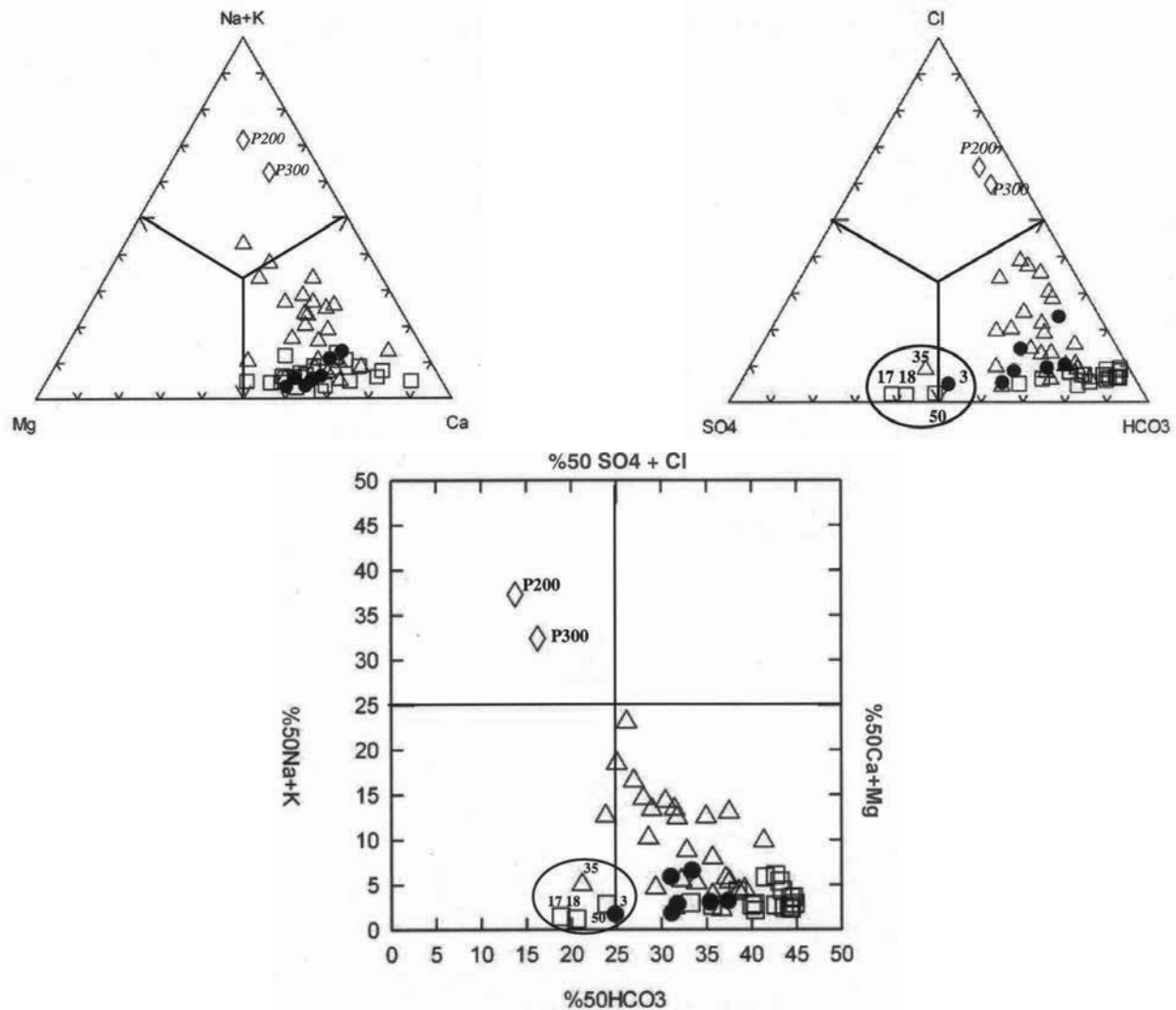


Fig. 3 - Digrammi classificativi. LEGENDA: rombi = acque di pioggia; quadrati = sorgenti in carbonati; triangoli = sorgenti in metamorfiti; punti = sorgenti in sabbie e conglomerati
- Classification Diagrams. LEGEND: diamond = rain water; square = water in limestones; triangle = water in metamorphic rocks; dot = water in sand and conglomerate

ricadono le acque defluenti dai conglomerati e sabbie di valle.

Nel diagramma ternario degli anioni e nel diagramma Langelier-Ludwig (LANGELIER & LUDWIG, 1942), si nota chiaramente la presenza di cinque campioni (3, 17, 20, 35 e 50), riferibili a complessi idrogeologici differenti, che presentano alti tenori relativi in solfati.

Al fine di valutare il contributo di ciascuna specie ionica al grado di maturazione chimica delle acque, le concentrazioni, espresse in meq/l, sono state poste in relazione alla conducibilità elettrica specifica (a 20°C) misurata ai punti di prelievo (Fig. 4).

Le concentrazioni di Ca, Mg ed HCO₃ risultano ben correlate alla conducibilità elettrica, mentre lo scenario cambia notevolmente se si considerano le relazioni esistenti tra la conducibilità elettrica specifica e, rispettivamente, i metalli alcalini, i cloruri ed i solfati. In questo

phates.

In order to evaluate the contribution of each ionic type on the degree of water maturity, the concentrations, expressed in meq/l, are considered in relation to the electrical conductivity measured at the sampling points. (Fig. 4).

Inspection of the diagrams shows that the concentrations of Ca, Mg and HCO₃ increase with conductivity. On the contrary the electrical conductivity seems not positively related with alkalis, chlorides and sulphates. However it is still possible to identify some characteristic groups in each single diagram. Some of these groups seem particularly meaningful: samples 8, 9 and 10, which are located SW of Grisolia village and fed by the metamorphic aquifer, show high conductivity in respect to waters samples belonging to this hydrogeolog-

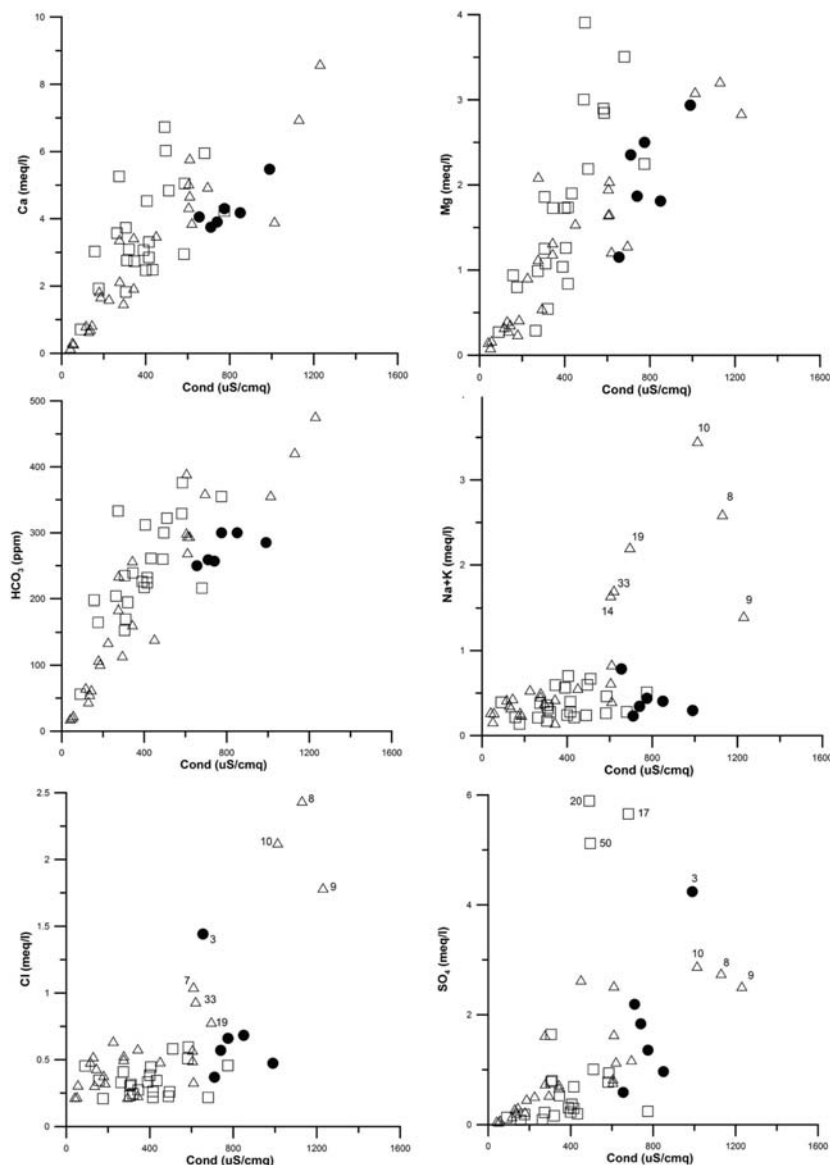


Fig. 4 - Diagrammi concentrazione-conduttività elettrica. Per i simboli, si fa riferimento alla fig.3
 - Diagrams of concentration vs conductivity. Symbols as in fig.3

caso la conducibilità non appare correlabile alle concentrazioni ioniche, ma è comunque possibile individuare dei raggruppamenti caratteristici che si delineano, più o meno marcatamente, nei singoli diagrammi. Alcuni di questi raggruppamenti sembrano particolarmente significativi: i campioni 8, 9 e 10, molto prossimi tra loro e localizzati a SW di Grisolia, alimentati dal complesso metamorfico, sono caratterizzati da elevata conducibilità elettrica e si distaccano chiaramente dall'andamento generale in tutte le relazioni considerate, mostrando tenori di cloro e sodio particolarmente elevati.

Nel diagramma di relazione con i metalli alcalini si isolano nettamente anche i campioni 14, 19 e 33, relativi a sorgenti del complesso metamorfico che si allineano secondo una direttrice con orien-

tical complex. In particular they show high quantities of chlorine and sodium.

In the diagram of the alkaline metals, samples 14, 19 and 33, related to springs of the metamorphic complex plot in a distinct field and are aligned along a NW direction (Fig.1). The same distribution is observed for chlorides.

In the diagram of sulphates, values greater than 4 meq/l characterize the samples 3, 17, 20 and 50 which form an isolated group. Such springs gush out at elevations from 30 to 400 m a.s.l. and are located along an E-W alignment marked by the straight tracing of the Abatemarco river. (Fig.1)

tazione NW-SE (Fig. 1). Stesso andamento si individua, ma meno nettamente, in relazione ai cloruri.

Nel diagramma di correlazione con i solfati, valori maggiori di 4 meq/l caratterizzano i campione 3, 17, 20 e 50, alimentate dal complesso calcareo che, come già visto nei diagrammi classificativi, formano un raggruppamento isolato. Tali sorgenti sgorgano a quote comprese tra 30 e 400 m s.l.m. e si allineano secondo una direttrice E-W in parte marcata nell'area di monte dal tratto rettilineo del fiume Abatemarco (Fig.1).

DISCUSSIONE DEI DATI

La maturità composizionale delle acque analizzate è legata a fenomeni di idrolisi di rocce carbonatiche e di metamorfite ricche in calcio e magnesio. I tenori, generalmente bassi, in metalli alcalini ed in cloruri sembrano poco influenzati dalla interazione con le rocce, per cui è ragionevole pensare che le acque mantengano memoria della composizione dell'acqua meteorica che alimenta le falde acquifere. In questo quadro, la presenza in alcune aree vallive di una anomalia positiva di Cl ed Na è da imputare probabilmente a fenomeni locali di contaminazione (inquinamento antropico).

Alcuni diagrammi di correlazione binaria (Fig. 5) consentono di chiarire i rapporti tra la composizione chimica delle acque e le fasi solide.

Nei diagrammi che coinvolgono i metalli alcalini ed i cloruri e nel diagramma bicarbonato cloruri, alcuni campioni (8, 9 e 10) si discostano dall'andamento generale, come già visto in relazione alla conducibilità elettrica nel diagramma di fig. 4. Lo stesso dicasi per i campioni 3, 17, 20 e 50 quando si considerino le relazioni con il solfato. In particolare nel diagramma solfato-calcio questi ultimi quattro campioni si dispongono in prossimità della retta con coefficiente angolare unitario suggerendo una interazione di acque bicarbonato alcalino terrose con litotipi evaporitici.

L'interazione delle acque con acquiferi carbonatici ed evaporitici viene avvalorata dall'allineamento dei punti rappresentativi delle acque analizzate lungo la retta indicante rapporti molari unitari tra i metalli alcalino-terrosi e bicarbonati e solfati.

Tra le acque ricche in ione solfato, la sorgente denominata Solforosa (50) ha delle caratteristiche peculiari. Essa presenta Eh negativo (-113 mV) e manifesta al punto di emergenza, oltre l'odore caratteristico delle esalazioni solfuree, la presenza di depositi di precipitazione.

L'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) di tali depositi ha messo in evidenza la presenza di cristalli neogenici di zolfo e tracce di ferro, alluminio, cloro e silice (Fig. 6). La precipitazione di zolfo è probabilmente da ricondurre all'ossidazione di solfuri al punto di emergenza.

L'origine di composti dello zolfo in soluzione potrebbe essere legata alla presenza dei livelli gessosi presenti nell'unità del Trias Basale il cui tetto, al di sotto di Cozzo di Valle Scura (in sinistra del fiume Abatemarco), è stato rinvenuto a quote inferiori ai 700 m

DISCUSSION

The composition maturity of the analyzed waters is related to hydrolysis phenomena of carbonate and metamorphic rocks with high calcium and magnesium content. The quantities, generally low, in alkaline metals and chlorides seem a little influenced by water-rock interaction processes. For this reason it is suggested the spring waters maintain memory of the composition of the meteoric water that feeds the aquifer strata. Therefore, the presence of a positive anomaly of Cl and Na for some springs of valley areas is probably related to local phenomena of contamination (anthropic pollution).

The diagrams of binary correlation (Fig. 5) allow to clarify the relationships between the chemical composition of the waters and the solid phases.

In the diagrams alkaline metals vs. chlorides, and carbonate vs. chlorides some samples (8, 9 and 10) plot in a different field (as already seen in respect to the electrical conductivity of Fig. 4). The same occurs for the samples 3, 17, 20 and 50 in respect to sulphate. Particularly in the sulphate vs. calcium diagram, these four samples plot close to the line with unitary angular coefficient suggesting an interaction of alkaline bicarbonate earthy waters with evaporite layers.

The water interaction with carbonate and evaporite aquifers is confirmed by the alignment of points representative of the analyzed waters along the line that indicates the unitary relationships between the alkaline-earth metals and bicarbonates and sulphates.

Among the spring waters with valuable sulphate concentration, the spring named "Solforosa" (50) has some peculiar characteristics. It has negative Eh (-113 mV) and, where it comes out, it shows the presence of precipitation deposits in addition to the characteristic smell of the sulphurous exhalations. The SEM analysis of these deposits has underlined the presence of neogenic crystals of sulphur and iron, aluminum, chlorine and silica (Fig. 6). The precipitation of sulphur is probably due to the sulphur oxidation of sulphides when they come in contact with the atmosphere.

Sulphur may derive from evaporitic layers interbedded within the low-grade metamorphic rocks belonging to the Basal Trias Unit whose top has been found below Cozzo di Valle Scura (to the left side of the Abatemarco river) at 700m a.s.l. (COTECCHIA *et alii*, 1983). During the perforation of the Abatemarco-Mezzafiumina tunnel a sensitive turbidity of water of the spring Capomazza (425m a.s.l.) was recorded with a strong increase of sulfates (from

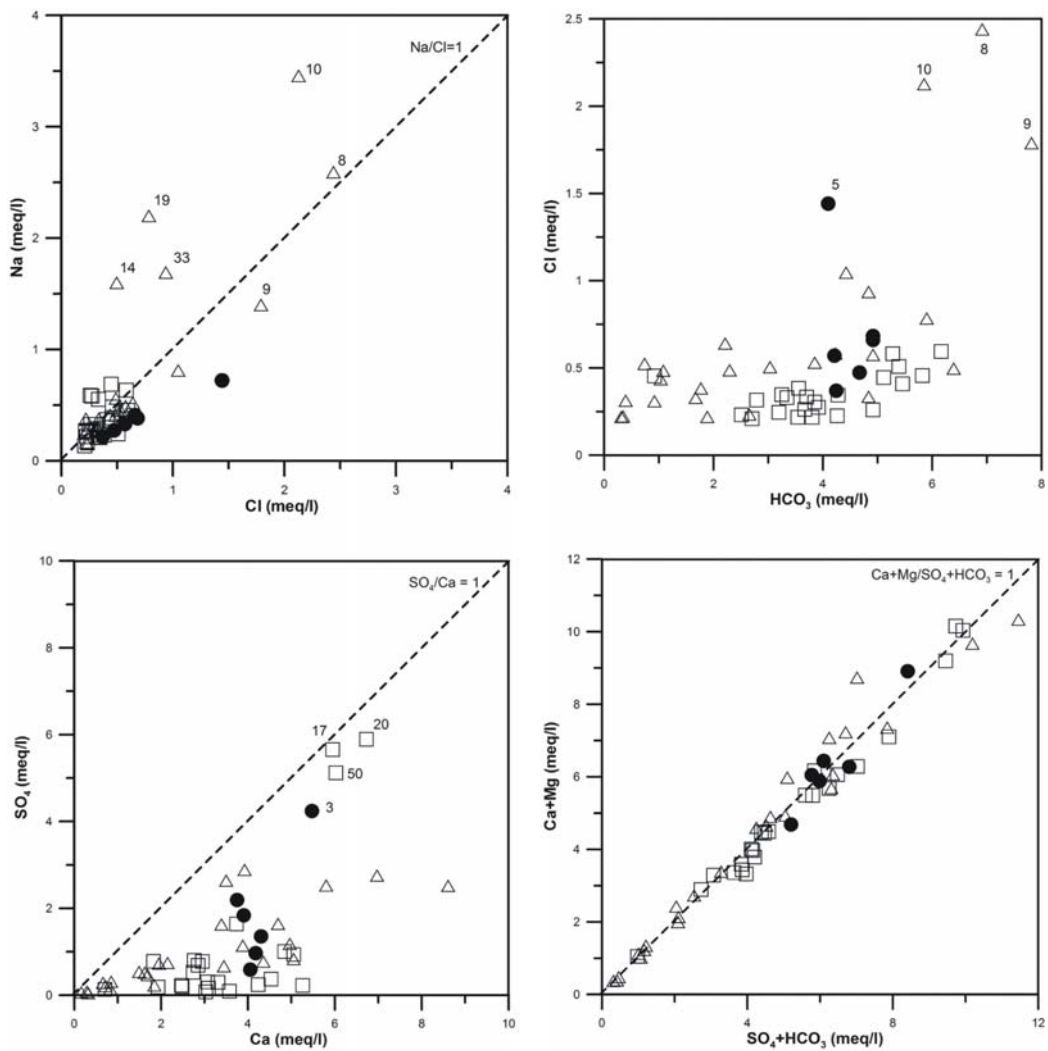


Fig. 5 - Diagrammi di correlazione binaria. Per i simboli, si fa riferimento alla fig. 3
 - Diagrams of binary correlation. Symbols as in fig. 3

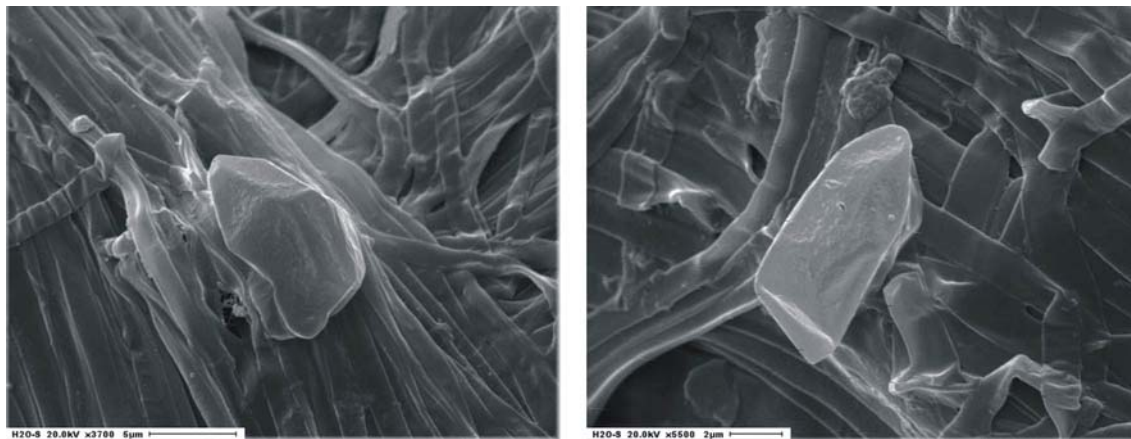


Fig. 6 - Immagine al SEM dei campioni di deposito prelevati presso la sorgente n° 50
 - SEM images of deposits sampled near spring no. 40

s.l.m., durante la perforazione per la costruzione della galleria drenante dell'Abatemarco-Mezzafiumina (COTECCHIA *et alii*, 1983).

Durante lo scavo di tale galleria, venne segnalato un sensibile intorbidimento delle acque della sorgente Capomazza, ubicata a quota 425 m, ed un forte aumento del tenore in solfati (da 35 a 157 mg/l), a sette mesi dallo scavo, nelle venute d'acqua in corrispondenza della progressiva 2000 (Fig. 7) (COTECCHIA *et alii*, 1983).

Gli AA. imputarono tali variazioni ad interazione con i fanghi di perforazione, ma non è da escludere la possibilità che lo scavo abbia agevolato la risalita di fluidi provenienti dal Trias Basale attraverso discontinuità tettoniche riscontrate in corrispondenza della progressiva 2000 (Fig. 7). Analogamente, l'ubicazione, la quota (410 m s.l.m.), il basso potenziale di ossido-riduzione ed il contesto tettonico in cui si colloca la sorgente 50, posta sul versante a NW di Cozzo di Valle Scura, suggeriscono che l'origine delle specie anioniche dello zolfo in soluzione possa essere legata alla contaminazione della falda carbonatica da parte dei fluidi di provenienza profonda.

MAPPE DI DISTRIBUZIONE TERRITORIALE

Per ottenere una immediata valutazione visiva di alcune caratteristiche geochimiche degli acquiferi, sono state realizzate sei carte tematiche (Fig. 8 e Fig. 9). Queste carte mostrano la distribuzione areale di alcuni parametri chimici, rendendo facile l'individuazione di massimi e minimi.

Per ogni variabile considerata (conducibilità, pH, calcio, nitrato,

35 to 157 mg/l) seven months after the perforation. The authors suggested that these variations were caused by the perforation muds but it is not excluded the possibility that the boring has facilitated the ascent of fluids coming from the evaporitic layers through tectonic discontinuity close to the progressive 2000 (Fig.7). The geological context, the location of the spring (along the NW slope of Cozzo di Valle Scura), the elevation (410 m a.s.l.) and the low Eh value suggest that the origin of sulphur should be related to contamination of the carbonate aquifer by deep fluid.

MAPS OF SPATIAL DISTRIBUTION

In order to obtain a sudden evaluation of the main geochemical characteristics of the aquifers, six thematic maps have been produced (Fig. 8 and Fig. 9). These maps show the aerial distribution of some chemical parameters, making easy the identification of maximum and minimum.

The maps have been obtained using the technique of the "Inverse

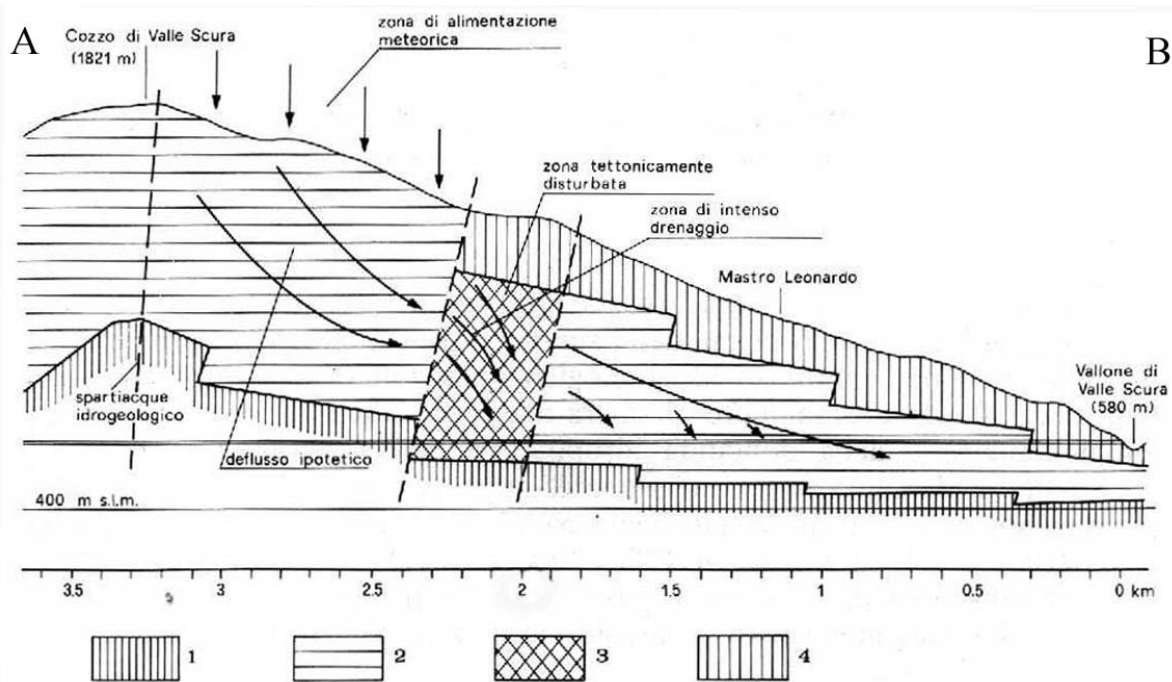


Fig. 7 - Sezione idrogeologica schematica interpretativa (A-B in fig.1). LEGENDA: 1-impermeabile di base; 2-Unità dei calcari metamorfosati (acquifero p.d.); 3) Unità dei calcari metamorfosati fortemente cataclastica; 4-Unità delle filladi superiori (tampono idrogeologico). (COTECCHIA *et alii*, 1983).
- Schematic hydrogeological section: 1) Low permeability bedrock; 2) Metamorphosed limestones unit (aquifer p.d.); 3) Metamorphic and cataclastic limestone unit; 4) Upper phyllitic unit (hydrogeological buffer). (COTECCHIA *et alii*, 1983)

cloruro e solfato) è stata realizzata una mappa di distribuzione, usando la tecnica dell' inverso della distanza al quadrato (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

I valori analitici della sorgente 50 sono stati esclusi in tutte le procedure di interpolazione grafica (tranne che nella carta di distribuzione del solfato) perché le acque di questa sorgente hanno caratteristiche chimiche peculiari, che si differenziano nettamente da quelle di tutte le altre sorgenti del complesso di afferenza, quello dei calcari.

L'analisi spaziale ha accomunato i valori relativi a sorgenti afferenti ai diversi complessi idrogeologici, senza soluzione di continuità ai limiti di quest'ultimi, in quanto la principale finalità di queste elaborazioni è una valutazione qualitativa complessiva delle acque sotterranee dell'area.

Le scale cromatiche sono state in genere impostate in modo da distinguere 10 livelli differenti associati a 10 percentili.

Mappa di distribuzione della conducibilità elettrica specifica

In questa carta (Fig. 8) è riportato il valore della conducibilità ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C) misurata sul terreno.

Nonostante essa possa essere influenzata da incertezze analitiche dovute ad esempio ad effetti di temperatura o alla presenza di solidi sospesi, questo dato permette di avere una immediata visione del contenuto salino delle acque.

All'interno dell'area di studio la conducibilità elettrica media risulta di $447\ (\mu\text{S}/\text{cm})$ con un minimo di $41\ (\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20^\circ\text{C})$, un massimo di $1230\ (\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20^\circ\text{C})$ e una deviazione standard di $283\ (\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20^\circ\text{C})$. Dalla carta si può osservare come i valori più bassi di conducibilità si trovano nelle sorgenti che emergono dal complesso cristallino-metamorfico mentre i valori più alti sono situati a valle, nei depositi sabbiosi e conglomeratici. La sorgente 50 presenta un valore di $495\ (\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20^\circ\text{C})$.

Mappa di distribuzione del pH

L'analisi dei valori del pH permette di valutare l'apporto di sostanze acide presenti nella soluzione acquosa. In generale, l'acidità della soluzione acquosa dipende dalla quantità di CO_2 disciolta, CO_2 che viene acquisita dall'acqua già in atmosfera per poi aumentare una volta a contatto con il suolo per azione prevalentemente biologica. Dopo che gli acidi si sono formati, vengono progressivamente neutralizzati, principalmente per interazione delle acque con le rocce. Di conseguenza il pH permette di valutare il grado di avanzamento della reazione di interazione della acqua con le rocce con cui viene a contatto. Così, valori bassi di pH ci indicano una scarsa interazione con i litotipi presenti.

Nell'area in studio, il valore medio del pH è di 7.16 con un minimo di 5.2, un massimo di 8.1 e una deviazione standard di 0.55. I valori minimi sono ubicati in corrispondenza del complesso cristallino-metamorfico (fig. 8) e probabilmente sono dovuti al breve percorso che le acque fanno negli acquiferi cristallini. La scarsa interazione in questa parte dell'area ci viene anche testimoniata dai valori

Distance to a Power" (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

The analytical values of the spring 50 have been excluded in all the procedures of graphic interpolation (except in the sulphate map) because of its peculiar chemical characteristics in comparison to the others springs of the carbonate complex.

Since the aim of these maps is the general evaluation of the groundwater of the studied area, the spatial distribution has been made combining the analytical values of the springs independently from the hydrogeological complexes.

The chromatic scales have been selected in order to distinguish ten different levels associated with ten percentiles.

Map of conductivity distribution

This map (Fig. 8) shows the conductivity distribution ($\mu\text{S}/\text{cm}$ at 20°C). The plotted values refer to "in situ" determinations. Despite this parameter can be influenced by analytical uncertainties, it can be considered as a measure of water salinity.

In the studied basins, the average electrical conductivity is $447\ \mu\text{S}/\text{cm}$, with minimum, maximum and standard deviation respectively equal to 41, 1230 and $283\ \mu\text{S}/\text{cm}$.

The lowest conductivity values are found in the sources emerging in the low grade metamorphic rocks, while the highest values are located in the middle portion of drainage basins, in the sandy and conglomerate deposits. The spring 50 value is equal to $495\ \mu\text{S}/\text{cm}$ at 20°C .

Map of pH distribution

The analysis of the pH values allows to evaluate the contribution of the acid substances in the water solution. In general, the acidity of the water solution depends on the quantity of dissolved CO_2 that is already acquired by water in the atmosphere, and then increases in contact with the ground, for biological action. After the acids are formed, they are progressively neutralized, mainly through the water-rock interaction. The pH value depends on the degree of advancement of the reaction of water interaction with the rocks. Low values of pH indicate a scarce water-rock interaction. In the investigated area, the average value of the pH is 7.16 with a minimum of 5.2, and a maximum of 8.1 and a standard deviation of 0.55. The minimum values occur in the low grade metamorphic rocks (fig. 8) and probably they are due to the short path of groundwater in the crystalline aquifers. The low degree of interaction in this area is also suggested by the low values of conductivity. In contrast, the maximum values are primarily located on the sources that

minimi di conducibilità elettrica. I valori massimi invece, sono localizzati prevalentemente sulle sorgenti che emergono dai calcari e dai depositi post-orogeni. La sorgente 50 presenta un valore di pH di 7.1

Mappa di distribuzione del calcio

La carta di distribuzione del calcio, come quella della conducibilità elettrica, mostra che i valori massimi di questo elemento si trovano in corrispondenza dei depositi sabbiosi-conglomeratici di valle, mentre i valori minimi, anche in questo caso, si trovano nelle sorgenti ubicate al centro dei bacini impostate su metamorfiti di basso grado (fig.8).

Il valore medio del calcio è di 66.5 mg/l, con un minimo di 3.2 mg/l, un massimo di 172.5 mg/l e una deviazione standard di 39.9 mg/l. La sorgente 50 presenta un valore di calcio di 148.3 mg/l.

Mappa di distribuzione del nitrato

I nitrati rappresentano l'ultimo stadio ossidativo dell'azoto e possono avere un'origine atmosferica, antropica o derivare da naturali processi di nitrificazione. Il contenuto di NO₃ nelle acque campionate ha una media di 6.9 mg/l e varia da un minimo di 0 a un massimo di 38.1 mg/l con una deviazione standard di 9.8 mg/l.

Nessuna sorgente supera il limite di 50 mg/l attualmente vigente in Italia per le acque potabili (G.U.R.I., 2001).

Come si può osservare dalla carta del nitrato (fig. 9) i valori massimi si riscontrano a nord di S. Maria e a Sud di Maierà e sono probabilmente dovuti ad inquinamento antropico di origine agricola.

La sorgente 50 presenta un contenuto di NO₃ pari a 0.77 mg/l.

Mappa di distribuzione del cloruri

Il cloruro presente in soluzione è uno degli elementi meno reattivi e i processi di interazione acqua roccia possono influenzare sensibilmente la sua concentrazione solo in presenza di rocce evaporitiche contenenti halite. Ne consegue che il cloruro rilevato nelle acque di falda deriva essenzialmente dall'apporto meteorico. Una volta che le acque di falda si infiltrano nel sistema idrico sotterraneo, la concentrazione di cloro non dovrebbe andare incontro a sensibili variazioni; concentrazioni anomale potranno essere considerate quindi un affidabile segnale di contaminazioni antropiche e/o di infiltrazione di acqua marina.

Le concentrazioni rilevate nell'area hanno una media di 19.3 mg/l con un minimo di 7.4 mg/l, un massimo di 86,5 mg/l e una deviazione standard di 16.1 mg/l.

Dalla carta di distribuzione del cloro (fig.9) si può osservare come le concentrazioni minime si trovino a monte del bacino mentre le massime si trovino a valle lungo la pianura costiera. In particolare il massimo assoluto si trova a ovest di Maierà lungo l'asta fluviale del torrente Vaccuta e nella bassa valle del Fiume Abatemarco. Gli alti tenori di cloro potrebbero essere legati sia ad intrusione marina lungo le aste fluviali che ad inquinamento antropico come percolazione in falda di acque di scarico ricche in cloruri.

emerge in the limestones and in the post-orogenic deposits. The source 50 has a pH value of 7.1.

Map of calcium distribution

The map of calcium distribution, as that of the conductivity, shows the maximum values in the conglomerate-sands deposits of valley, while the low values are found in the centre of the basins where low grade metamorphic rocks outcrop (fig.8).

The mean value of calcium is 66.5 mg/l, with a minimum of 3.2 mg/l, a maximum of 172.5 mg/l and a standard deviation of 39.9 mg/l. The spring 50 has a value of calcium of 148.3 mg/l.

Map of nitrate distribution

The nitrates represent the last oxidation stadium of the nitrogen. They can have an atmospheric origin or derive from natural processes of nitrification. The content of NO₃ in the sampled waters has an average of 6.9 mg/l and varies from a minimum of 0 to a maximum of 38.1 mg/l with a standard deviation of 9.8 mg/l. None of the springs pass the limit of 50 mg/l required in Italy for drinkable water (G.U.R.I., 2001).

As it can be observed in the map (fig.9) the maximum values are found north of S. Maria and south of Maierà and they are probably due to pollution of agricultural origin.

The source 50 has a content of NO₃ equal to 0.77 mg/l.

Map of chloride distribution

The chloride in solution is one of the least reactive elements and the water-rock interaction processes can influence its concentration only when evaporitic deposits containing halite minerals are present. Therefore, the chloride found in the studied waters essentially derives from meteoric contribution. Once the meteoric waters infiltrate in the underground water system, the concentration of chlorine should not have significant variations. Therefore anomalous concentrations in chlorides can be considered a signal of contaminations and/or infiltration of sea water.

The concentrations found in the studied area have an average of 19.3 mg/l with a minimum of 7.4 mg/l, a maximum of 86,5 mg/l and a standard deviation of 16.1 mg/l.

In the map (fig.9) it can be observed that the lower concentrations are found at the top of the studied basin while the maximum values are found downward along the coastal lowland. Particularly the maximum values occur west of Maierà village along the stream Vaccuta and in the low valley of the river Abatemarco. The higher amount of chlorine could be due both to sea intrusion or pollution, as discharging of water with chloride in the aquifer

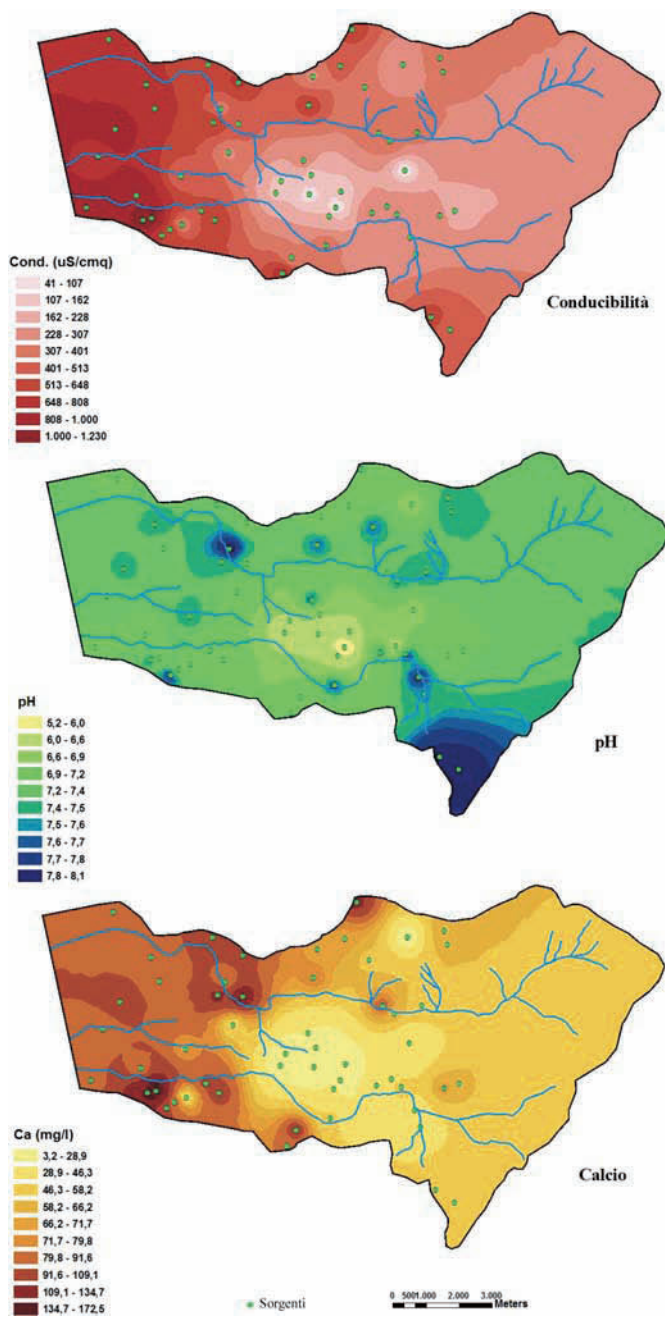


Fig. 8 - Mappe di distribuzione della conducibilità, pH e calcio
- Distribution maps of conductivity, pH and calcium

Mappa di distribuzione del solfato

L'andamento della distribuzione del solfato mostra che i valori minimi si trovano a monte dell'area in studio e i massimi invece sono localizzati nei depositi di valle (fig.9). Le concentrazioni più elevate in questo tratto del bacino potrebbero essere dovute ad interazione delle acque con i depositi metamorfici di basso grado come gli scisti

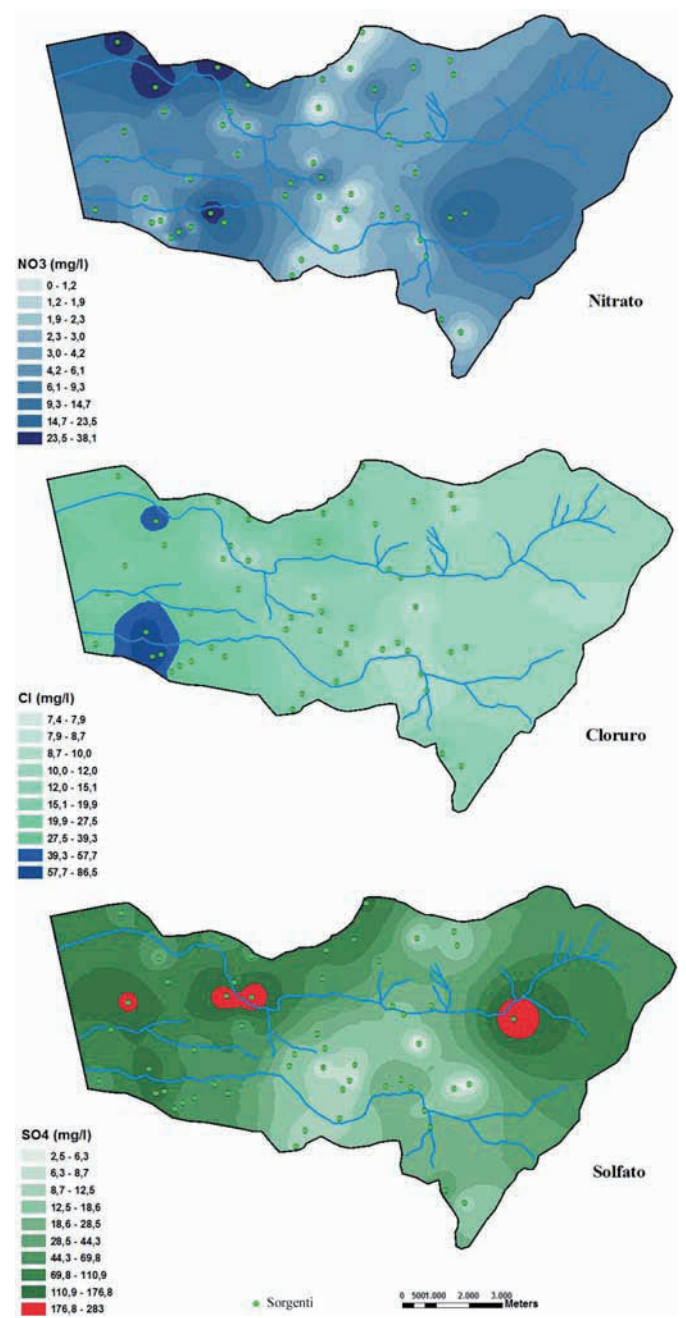


Fig. 9 - Mappe di distribuzione del nitrato, cloruro e solfato
- Distribution maps of nitrate, chloride and sulphate

Map of sulphate distribution

The map of the sulphate distribution shows that the lower values occur at the top of the investigated area whereas the maximum ones are located in the valley deposits (fig.9).

The higher concentrations could be due to water interaction with low grade metamorphic deposits as the schists and the phillites out-

e le filladi o a depositi evaporitici che non affiorano in superficie. La seconda ipotesi comunque sembra essere la più plausibile in quanto le sorgenti con i valori più alti di solfato presentano anche alti valori di calcio.

La concentrazione media del SO_4 è di 52.6 mg/l, con un minimo di 2.5 mg/l, un massimo di 282.9 mg/l e una deviazione standard di 62.5 mg/l.

In particolare, le aree di massima anomalia si allineano in direzione E-W a monte ed a valle del tratto rettilineo del F. Abatemarco. Tale distribuzione suggerisce un legame genetico tra queste aree; esse potrebbero rappresentare zone di risalita di fluidi profondi arricchiti in zolfo per interazione con livelli evaporitici messiniani e/o triassici non affioranti nell'area investigata.

CONCLUSIONI

Le acque sorgive dell'area investigata sono per la quasi totalità acque a bicarbonato e calcio prevalente. Le relazioni tra concentrazioni e conducibilità elettrica specifica ed i rapporti tra concentrazioni individuano caratteri chimico-fisici delle acque che ben si correlano con le caratteristiche dei principali acquiferi costituiti dai complessi idrogeologici individuati. Le tipologie sono da porre in relazione ad una circolazione idrica sotterranea che avviene in tre tipi di acquifero: acquifero carbonatico di notevole potenza, acquifero cristallino-metamorfico superficiale, poco esteso e poco potente, nonché in un acquifero costiero impostato su conglomerati e sabbie. L'acquifero carbonatico genera acque carbonato-calciche, con le maggiori concentrazioni di Ca, Mg e HCO_3 e con i rapporti tra metalli alcalini e cloruri che rispecchiano quelli delle precipitazioni. Una minore maturità composizionale distingue le acque interagenti con l'acquifero cristallino-metamorfico, mentre le acque sorgive maturatesi in conglomerati e sabbie presentano composizioni più omogenee ed elevati valori di conducibilità elettrica che testimoniano come tali sorgenti non possano essere alimentate soltanto dalla ricarica zenitale (considerando anche le massime portate misurate di 69 e 77 l/s) che perviene al complesso idrogeologico ma anche da efflussi provenienti dal contiguo complesso calcareo e/o da perdite secondariamente provenienti dal reticolo idrografico.

L'analisi geochimica è coerente e, quindi, conferma le ipotesi formulate in merito al modello concettuale idrogeologico.

La relazione tra natura litologica del mezzo acquifero e composizione chimica delle acque sorgive indica che la variabilità composizionale è essenzialmente il risultato di processi di idrolisi che, a partire dalle acque meteoriche, si differenziano in funzione della specifica litologia.

L'unica eccezione è data dalla presenza di acque solfatiche che sgorgano da sorgenti poste lungo un allineamento E-W, dovuto probabilmente ad una circolazione idrica più profonda, soggetta agli effetti della dissoluzione di livelli evaporitici non affioranti nell'area investigata.

Alcune sorgenti ubicate in prossimità del torrente Vaccuta, affio-

cropping in this part of the basin or with evaporitic deposits that don't appear at the surface. However, the second hypothesis seems to be the most reasonable, because the sources with the highest values of sulphate have also high values of calcium.

The mean concentration of SO_4 is of 52.6 mg/l, with a minimum of 2.5 mg/l, a maximum of 282.9 mg/l and a standard deviation of 62.5 mg/l.

Particularly, the areas of maximum anomaly occur along an E-W direction, both at the top and at the bottom of the rectilinear valley of the Abatemarco river. Such a distribution suggests a genetic bond among these areas; they could represent zones of flowing of deep fluids with sulphur due to interaction with evaporitic layers of Messinian and/or Triassic age not outcropping in the investigated area.

CONCLUSIONS

The spring waters of the investigated area are almost bicarbonate and calcium waters. The relations between concentrations and conductivity and concentrations and chemical parameters point out a good correlation between the water composition and the main characteristics of the aquifers belonging to the hydrogeological complexes occurring in the studied area. The observed water characteristics relate to a groundwater circulation in three main types of aquifers: a carbonatic aquifer of high flow rates, a surface metamorphic-crystalline aquifer, with low extent and low flow rates, and a coastal aquifer on conglomerates and sands. The carbonatic aquifer generates carbonate-calcium waters with the higher concentrations of Ca, Mg and HCO_3 and the relations between alkaline metals and chlorides reflect those of precipitations. A low compositional maturity characterizes the waters interacting with the metamorphic-crystalline aquifer while waters in conglomerates and sands show a more homogeneous composition, the higher values of electric conductivity and the highest flow rates (69 e 77 l/s). This suggests that these springs are fed by fluxes coming from the near calcareous complex or subordinately by water loss from the hydrographic network rather than by the normal reload of the sedimentary complex.

The geochemistry of waters affirms this hydrological model. The relationship between the lithological nature of the aquifer and the chemical composition of waters indicates that their compositional variability is the result of hydrolysis processes of meteoric waters with rocks of different mineralogical and chemical composition.

The only exception is the occurrence of sulphate waters from springs aligned along an E-W tectonic line. These waters may be probably related to deep water circulation undergoing dissolution effects on evaporitic layers not outcropping in the investigated area.

Some springs located near the Vaccuta river on metamorphic rocks show high content of chlorine and sodium suggesting the occurrence of contamination processes probably of anthropic origin.

The results underline the availability, in the investigated area, of potable waters (none of the studied spring waters pass the limits required by law enacted on February 2, 2001 n°31) whose exploita-

ranti da metamorfiti, mostrano alti tenori di cloro e sodio. Per esse si ipotizzano processi di contaminazione antropica.

Gli studi chimici condotti evidenziano la disponibilità nell'area investigata di acque sorgive idonee all'uso idropotabile (in nessuna sorgente studiata vengono superati i limiti di legge imposti dal Decreto Legislativo del 2 febbraio 2001 n°31) il cui sfruttamento, considerando l'uniformità del regime idrologico, potrebbe rappresentare una risorsa integrativa importante per il fabbisogno idrico dell'area.

tion, taking into account the constant hydrological regime, would represent an important integrative resource for the water requirement of the entire territory.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ALVINO R., CASALE M. & HABETS WALLNER F. (1994) – *Idrodinamica sotterranea e valutazione delle risorse idriche dell'area del Pollino (confine Calabro-Lucano)*. IV Convegno dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, pp. 304-311.
- APPELO C.A.J. & POSTMA D. (1996) - *Geochemistry, groundwaters and pollution*. A.A. Balkema 536 pp., Rotterdam.
- AMODIO-MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICARRETTA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN-LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976) - *L'Arco Calabro-Peloritano nell'orogene Appenninico-Maghrebide*. Boll. Soc. Geol. It., **17**: 1-60.
- BERNER E.K. & BERNER R.A. (1996) - *Global environment: water, air, and geochemical cycles*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- CASSA PER IL MEZZOGIORNO (1979) - *Progetto speciale 26. Studio idrologico della Calabria settentrionale*.
- COTECCHIA V., NUZZO G., SALVEMINI A. & VENTRELLA N.A. (1983) - *Studi di geologia applicata ed idrogeologia finalizzati alla realizzazione della galleria di valico del Monte la Mula per l'Acquedotto dell'Abatemarco-Mezzafiumina*. Geol. Appl. e Idrogeol., **18 (1)**: 451-489.
- COTECCHIA V., SALVEMINI A. & VENTRELLA N.A. (1988) - *Le metamorfiti Triassiche basali dell'Unità di S. Donato Auct.: Proposta di revisione della posizione stratigrafica in base ai dati scaturiti dalla esecuzione della galleria idraulica del monte la Mula (Calabria Settentrionale)*. Mem. Soc. Geol. It., **41**: 557-565.
- GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA (2001) - *Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31*. In: Supplemento n. 52, 3 marzo 2001. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, Italy.
- IETTO A., BARILARO A.M., CALLIGARO G. & MANCUSO C. (1992) – *Elementi per una revisione dei rapporti Appennino-Arco Calabro*. Boll. Soc. Geol. It., **111**: 193-215.
- ISAAK E.H. & SRIVASTAVA R. M. (1989) - *An introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- LANGELIER W.F. & LUDWIG H.F. (1942) – *Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters*. JAWWA, **34**, 335.
- MARINI L. & OTTONELLO G. (1997, Eds.) – *Atlante degli acquiferi del comune di Genova. Volume 1: Alta Val Bisogno ed Alta Val Polcevera*. Pacini Editore 42 pp. (52 tav.), Pisa.
- MARINI L., CANEPA M., CIPOLLI F., OTTONELLO G. & VETUSCHI ZUCCOLINI M. (2001) - *Use of stream sediment chemistry to predict trace element chemistry of groundwater. A case study from the Bisagno valley (Genoa, Italy)*. J. Hydrol., **241**: 194-220.
- OGNIBEN L. (1969) – *Schema introduttivo sulla geologia del confine Calabro-Lucano*. Mem. Soc. Geol. It, **8(4)**: 453-763.
- TORTORICI L. (1982) – *Lineamenti geologico-strutturali dell'Arco Calabro Peloritano*. Rendiconti della Società Italiana di mineralogia e petrografia, v.38, 927-940

Received January 2005 - Accepted June 2006

