

INTRUSIONE MARINA NEGLI ACQUIFERI CARBONATICI: IL CASO DEL FRONTE SORGIVO DI CASTELLAMMARE DI STABIA (NAPOLI)

SEAWATER INTRUSION IN CARBONATE AQUIFERS: THE CASE OF THE SPRING GROUP OF CASTELLAMMARE DI STABIA (NAPLES, SOUTHERN ITALY)

ANTONELLA BAIOCCHI^(*), ARIANNA DI PAOLA^(*), FRANCESCA LOTTI^(*), VINCENZO PISCOPO^(*) & FABIO SPAZIANI^(*)

^(*) Università della Tuscia - Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile
Largo Università - 01100 Viterbo, Italy - E-mail: pisco@unitus.it

RIASSUNTO

La comprensione dei fenomeni di intrusione marina negli acquiferi costieri è importante per un appropriato uso delle risorse idriche, soprattutto per gli acquiferi fratturati e carsici. Questo studio analizza l'intrusione di acqua salata nell'acquifero carbonatico di Monte Faito in prossimità dell'area delle sorgenti di Castellammare di Stabia. In quest'area, emergono acque sotterranee in prossimità della costa per una portata totale di circa 0.5 m³/s da più sorgenti che differiscono per portata e chimismo delle loro acque.

Sono stati considerati i risultati delle precedenti indagini, riesaminando in particolare i dati chimici disponibili dal 1979. Sono state condotte nuove indagini nell'area delle sorgenti, comprendenti analisi chimiche ed isotopiche delle sorgenti più significative e misure di portata. Inoltre è stata realizzata una perforazione sperimentale presso le sorgenti.

In accordo con i precedenti studi, le differenti sorgenti presenti lungo la linea di costa sono il risultato di differenti percentuali di mescolamento tra due termini estremi. Un primo termine rappresenta le acque sotterranee circolanti tipicamente nell'acquifero carbonatico ed affioranti dalle sorgenti meno mineralizzate. Un secondo termine è costituito dall'acqua di intrusione marina nell'acquifero carbonatico. Il cuneo di intrusione salina ed in particolare la zona di dispersione collegata all'interfaccia acqua dolce - acqua salata determinano differenti percentuali di mescolamento influenzando il chimismo delle sorgenti di acque salmastre e saline. Sulla base dei risultati della perforazione sperimentale, delle percentuali di mescolamento che spiegano i differenti gruppi di sorgenti e delle analisi isotopiche, è stato ricostruito un modello idrogeologico concettuale della singolare area sorgiva, dove il fenomeno dell'intrusione di acqua marina è complicato dalla presenza di un acquifero fratturato e talvolta carsificato, dall'upconing dell'interfaccia in corrispondenza delle sorgenti e dalla risalita localizzata di gas di provenienza profonda.

TERMINI CHIAVE: relazioni acqua dolce - acqua salata, acquiferi carbonatici, acquiferi costieri, sorgenti di acque salmastre e saline

INTRODUZIONE

L'intrusione di acqua marina negli acquiferi costieri è un problema generalmente legato ad un eccessivo pompaggio. E' noto che negli acquiferi fratturati e carsici, a causa della loro elevata eterogeneità, il

ABSTRACT

Understanding salt water intrusion in coastal aquifers is very important for appropriately managing water resources, especially in fractured and karst aquifers. This study analyses the salt water intrusion phenomenon in the carbonate aquifer of the Mount Faito near the spring area of Castellammare di Stabia. In this area, groundwater outflow near the coastline reaches a total of about 0.5 m³/s, from various springs that differ from one another in discharge rate and water chemistry.

Results of the previous work were considered, re-examining in particular the chemical data available since 1979. New investigations were carried out in the springs area, including chemical and isotopic analyses of the main representative springs and measurements of flow rate. Furthermore, an experimental borehole was drilled near the springs.

According to previous studies, the different springs located near the coastline are the results of different percentages of mixing between two end-members. A first end-member represents the groundwater circulation typically occurring in the carbonate aquifer and outflowing from the less mineralised springs. A second end-member is constituted by the salt water intrusion in the carbonate aquifer. The sea water wedge and particularly the zone of dispersion related to the interface between fresh water and salt water determine different percentages of mixing between two end-members that affect the water chemistry of the brackish and saline springs. Based on the results of the experimental borehole, on the percentage of mixing that explains the difference in hydrochemical facies of the different spring groups and on the isotopic analyses, it was reconstructed a conceptual hydrogeological model of the peculiar spring area, where the phenomenon of the saltwater intrusion is complicated by the presence of fractured and sometimes karstified aquifer, of the interface upconing near the springs and of the localised rise of deep gases.

KEY WORDS: salt water - fresh water relations, carbonate aquifers, coastal aquifers, brackish and saline springs

INTRODUCTION

Salt water intrusion in coastal aquifers is a problem generally related to over-exploitation. It is understood that in fractured and karst aquifers salt water intrusion can also be related to the hetero-

fenomeno di intrusione marina dipende anche dalla distribuzione della permeabilità nell'area costiera, dalla variabilità del carico idraulico dell'acqua di falda rispetto a quello dell'acqua salata e dalla variazione della localizzazione dei punti di recapito delle acque sotterranee avvenute durante il Quaternario (CUSTODIO, 2010). La comprensione del meccanismo di salinizzazione, soprattutto negli acquiferi fratturati e carsici, è di grande importanza per la gestione più appropriata delle risorse idriche sotterranee, essendo questi acquiferi caratterizzati da un notevole rendimento (per esempio, SPRINGFIELD & LEGRAND, 1969; BONACCI & BONACCI, 1997; COST ACTION 621, 2005; FLEURY *et alii*, 2007; SANDFORD *et alii*, 2007; POLEMIO *et alii*, 2009). Inoltre lo studio degli acquiferi costieri assume particolare importanza attualmente, in quanto i flussi idrici che si perdono verso mare non sono ben conosciuti e la loro gestione è ancora basata su metodi empirici. Proprio una migliore gestione degli acquiferi che presentano flussi verso mare potrebbe risolvere alcuni problemi legati al crescente fabbisogno idrico, in considerazione delle variazioni climatiche in corso (DRAGONI & SUKHJA, 2008).

Nell'area del Mediterraneo sono documentati diversi casi di salinizzazione di acquiferi carbonatici per cause naturali, riconducibili principalmente alla presenza di condotti carsici che permettono l'interazione tra acque dolci e acque salate ed alla stratificazione della densità del flusso (SANZ *et alii*, 2002; MARAMATHAS, 2006; FLEURY *et alii*, 2007; ARFIB *et alii*, 2007; CUSTODIO, 2010). In Italia un caso singolare di intrusione di acqua salina riconducibile a cause naturali è segnalato in corrispondenza del fronte sorgivo di Castellammare di Stabia, ubicato circa 30 km a sud di Napoli (CELICO *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000).

L'obiettivo di questo studio è di approfondire l'analisi del fenomeno di intrusione marina che interessa l'acquifero carbonatico dei Monti Lattari, in prossimità del fronte sorgivo di Castellammare di Stabia, dove emergono acque sotterranee per una portata complessiva di circa 0.5 m³/s da più sorgenti che differiscono per portata e chimismo.

AREA DI STUDIO E PRECEDENTI CONOSCENZE

Il gruppo sorgivo di Castellammare di Stabia, affiorante in corrispondenza della costa (Fig. 1), rappresenta il principale recapito del rilievo carbonatico di Monte Faito, una idrostruttura dei Monti Lattari avente un rendimento medio annuo unitario di acque sotterranee di circa 0.026 m³/s per km² (CELICO & CORNIELLO, 1979; PISCOPO *et alii*, 1994).

Il rilievo di Monte Faito è costituito da una potente successione carbonatica mesozoica di piattaforma (migliaia di metri), comprendente principalmente dolomie triassiche alla base ed un considerevole spessore di calcari dolomitici e calcari (Giurassico - Cretaceo Superiore) (BONARDI *et alii*, 1988). Sono stati riconosciuti differenti stili tettonici e andamenti delle faglie (MILIA & TORRENTE, 1997), tra queste ultime le faglie normali orientate verso NW e verso NE, che danno luogo a strutture a horst e graben, hanno una maggiore incidenza sulla circolazione idrica sotterranea. Nell'area in esame, cioè il versante settentrionale di Monte Faito, si distingue una struttura monoclinale di calcari cretacei immergenti verso NW e ribassati verso il Golfo di Napoli da faglie normali (Figg. 1 e 2). Tra questi ultimi motivi

geneous distribution of hydraulic conductivity in the coastal area, the variability of the hydraulic head of fresh water in comparison with that of salt water, and the location changes of discharge areas during the Quaternary (CUSTODIO, 2010). Understanding salinisation is very important for appropriately managing water resources, especially in fractured and karst aquifers, being these aquifers characterised by a high yield (e.g., SPRINGFIELD & LEGRAND, 1969; BONACCI & BONACCI, 1997; COST ACTION 621, 2005; FLEURY *et alii*, 2007; SANDFORD *et alii*, 2007; POLEMIO *et alii*, 2009). Nowadays the study of the coastal aquifers has great importance because the rate of groundwater flowing to the sea is not well known and the water resource management is still based on empirical methods. Only a better coastal aquifers management could partly solve the growing demand of water supply, especially considering the present climate change (DRAGONI & SUKHJA, 2008).

Several salinity problems in carbonate aquifer due to natural causes are well known in the Mediterranean areas. They are mainly the results of inflow of seawater through karst conduits and density stratification of the flow (SANZ *et alii*, 2002; MARAMATHAS, 2006; FLEURY *et alii*, 2007; ARFIB *et alii*, 2007; CUSTODIO, 2010). In Italy a singular case of salinisation of a carbonate aquifer due to natural causes is reported for the spring area of Castellammare di Stabia town, 30 km south of Naples (CELICO *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000).

The aim of this study is to examine the salt water intrusion phenomenon in the carbonate aquifer of the Lattari Mountains near the spring area of Castellammare di Stabia. In this area, groundwater outflow near the coastline reaches a total of about 0.5 m³/s, from various springs that differ from one another in discharge rate and water chemistry.

STUDY AREA AND PREVIOUS WORK

The Castellammare di Stabia springs, outcropping near the coastline (Fig. 1), are the main discharge area of the carbonate aquifer of the Mount Faito, a hydrostructure of the Lattari Mountains characterised by an average specific yield in groundwater of about 0.026 m³/s per km² (CELICO & CORNIELLO, 1979; PISCOPO *et alii*, 1994).

The Mount Faito relief is constituted by a thick succession of Mesozoic platform carbonates (thousands of metres), consisting mainly of Triassic dolostones at the base and a considerable thickness of dolomitic limestones and limestones (Upper Cretaceous - Jurassic) (BONARDI *et alii*, 1988). Different structural styles and fault trends have been recognised (MILIA & TORRENTE, 1997), with NW- and NE-trending normal faults forming horst and graben structures mainly affecting the groundwater circulation. In the study area, i.e., the northern slope of Mount Faito, the outcropping Cretaceous limestones are homoclinic, dipping to the NW and dropping down towards the Gulf of Naples through normal faults (Figg. 1 and 2). Among these, the border fault seems to have an important hydrogeological significance

Fig. 1 - **a** Inquadramento geologico dell'area sorgiva (da PISCOPO *et alii*, 2000, modificata): 1 Depositi alluvionali, costieri e piroclastici rimaneggiati (Quaternario), 2 Depositi detritico-piroclastici (Quaternario), 3 Rocce calcaree (Cretaceo Inferiore), 4 Giacitura degli strati, 5 Faglie (tratteggiate se presunte o sepolte), 6 Sorgenti o gruppi sorgivi e relativo numero di riferimento (Tab. 1), 7 Traccia di sezione (Fig. 2).
b Fronte sorgivo di Castellammare di Stabia: 1 Terreni di riporto, 2 Depositi costieri, detritici e piroclastici (a: livello sepolto di depositi piroclastici fini) (Quaternario), 3 Calcarei (Cretaceo Inferiore) e depositi di copertura, 4 Principali faglie (presunte se tratteggiate), 5 Probabile ubicazione della faglia marginale, 6 Sorgenti e numero di riferimento (Tab. 1), 7 Perforazione sperimentale

- **a** Geological location of the spring area (modified from PISCOPO *et alii*, 2000): 1 Alluvial, coastal and remoulded pyroclastic deposits (Quaternary), 2 Detritic and pyroclastic deposits (Quaternary), 3 Limestone (Lower Cretaceous), 4 Attitude of beds, 5 Faults (buried or supposed if sketched), 6 Springs or group of springs with reference number (Tab. 1), 7 Trace of sections (Fig. 2).
b Spring area of Castellammare di Stabia: 1 Layer of fill, 2 Coastal, detritic and pyroclastic deposits (a: buried layer of fine pyroclastic deposits) (Quaternary), 3 Limestone (Lower Cretaceous) and covering deposits, 4 Main faults (supposed if sketched), 5 Supposed location of border fault, 6 Springs with reference number (Tab. 1), 7 Experimental borehole

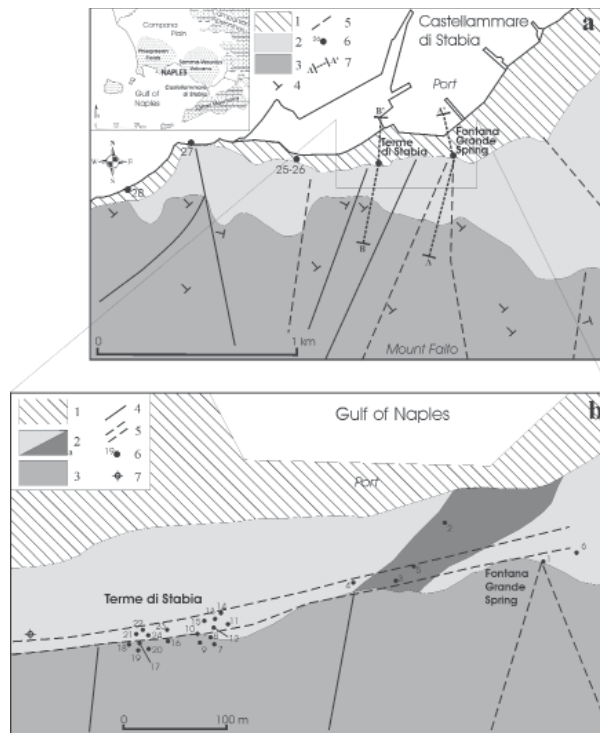
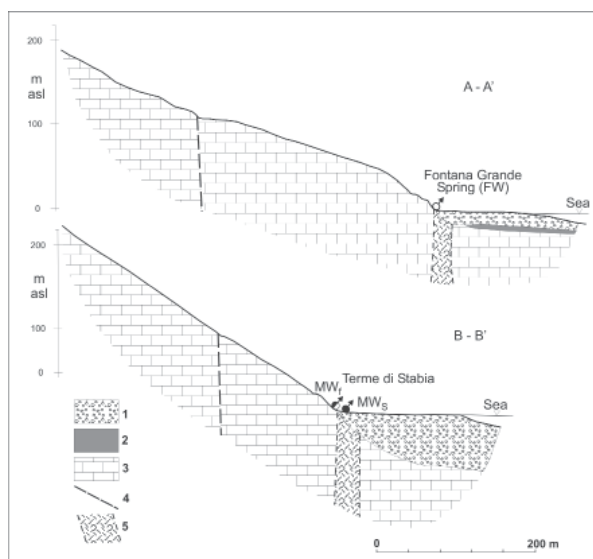


Fig. 2 - Sezioni geologiche schematiche (da PISCOPO *et alii*, 2000, modificata): 1 Depositi sabbioso-ghiaiosi, 2 Depositi limosi, 3 Calcarei e loro copertura, 4 Faglie presunte, 5 Zona fratturata della faglia marginale

- Schematic geological sections (modified from PISCOPO *et alii*, 2000): 1 Sand-gravelly deposits, 2 Silty deposits, 3 Limestone and covering deposits, 4 Supposed faults, 5 Fractured zone of the border fault

strutturali, la faglia marginale sembra avere un particolare significato idrogeologico (CELICO *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000). Le formazioni superficiali che ricoprono i carbonati (aventi uno spessore fino ad alcune decine di metri ai piedi del versante) comprendono depositi conglomeratici, detritici, alluvionali e piroclastici del Quaternario.

Le 28 sorgenti di Castellammare di Stabia sono ubicate lungo una fascia di circa un chilometro alla base del versante settentrionale di Monte Faito, o al passaggio tra l'acquifero carbonatico, fratturato ed a volte carsificato, ed i depositi di copertura, o all'interno della stessa coltre detritica

(CELICO *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000). Superficial formations (with thicknesses up to some tens of metres at the foot of the slope) cover the carbonate and are composed of Quaternary conglomerates and detritic, alluvial and pyroclastic deposits.

The 28 springs of Castellammare di Stabia town are located along a stretch of about one kilometre at the base of the northern slope of Mount Faito, or at the interface between the carbonate aquifer, which is fractured and sometimes karstified, and covering deposits, or inside the detritic and pyroclastic belt (Fig. 1

N.	Spring	Elevation (m a.s.l.)	Discharge (L/s)	Type	Temperature (°C)	Electrical conductivity (mS/cm)	
1	Fontana Grande	2.5	350	FW	13.0	1.18	
2	Acqua della Madonna	0.8	3	FW	13.3	1.67	
3	Acqua Acetosella	2.2	2.5	FW	12.5	1.74	
4	Acqua Rossa	2.2	1		13.0	4.14	
5	Acqua Acidula	2.2	2		13.3		
6	Acqua Ferrata del Mulino	2.5	1		13.9		
7	Magnesiaca Vanacore	2.4	32	MWf	14.3	9.13	
8	Acidula Vanacore	2.4		MWf	14.4	9.18	
9	S. Vincenzo Vanacore	2.4		MWf	14.4	9.23	
10	Media Vanacore	2.4		MWf	14.7	10.14	
11	Ferrata Vanacore	2.1		MWs	15.0	13.07	
12	Muraglione Vanacore	2.1		MWs	16.9	17.31	
13	Solfurea Vanacore	1.9		MWs	17.0	17.38	
14	Solfurea ferrata Vanacore	1.9		MWs	16.8	17.28	
15	Solfurea carbonica Vanacore	1.9		MWs	16.9	17.42	
16	Pozzillo Stabiana	1.8		55	MWf	14.7	9.8
17	Magnesiaca Stabiana	2.1			MWf	15.4	11.61
18	Media I Stabiana	1.9			MWf	14.6	7.97
19	Media II Stabiana	1.9	MWf		14.7	8.60	
20	S. Vincenzo Stabiana	2.4	MWf		14.5	9.02	
21	Ferrata Stabiana	1.9	MWs		15.8	16.50	
22	Solfurea Stabiana	1.8	MWs		16.8	17.60	
23	Solfurea ferrata Stabiana	1.8	MWs		16.6	16.40	
24	Stabia Stabiana	1.7	MWs	17.4	17.80		
25-26	Muraglione	1.7	5				
27	Pozzano	0	1				
28	Bagni Pozzano	0	23				
	Sea water			SW	17.0	56.00	

Tab. 1 - Principali caratteristiche delle sorgenti di Castellammare di Stabia (da PISCOPO *et alii*, 2000): FW acqua dolce, MWf acqua salmastra, MWs acqua salina, SW acqua di mare
- Main characteristics of the spring group of Castellammare di Stabia (after PISCOPO *et alii*, 2000): FW fresh water, MWf brackish water, MWs saline water, SW sea water

e piroclastica che cinge i carbonati (Fig. 1 e 2). Lungo il fronte sorgivo, da est verso ovest, la quota di affioramento delle sorgenti e la loro portata diminuiscono; nella stessa direzione la salinità delle acque sotterranee aumenta e cambia generalmente il profilo idrochimico (Tab. 1 e Fig. 1).

Gli studi precedenti spiegano la genesi delle differenze qualitative delle 28 sorgenti presenti come la conseguenza della circolazione sotterranea relativamente più superficiale e più attiva della falda basale dell'acquifero carbonatico, per quanto riguarda la principale sorgente di Fontana Grande (circa 0.3 m³/s), e di circuiti relativamente più profondi nella roccia fratturata ed a volte carsificata interagente in diverse proporzioni con il cuneo di intrusione marina, per le sorgenti più mineralizzate delle Terme di Stabia (circa 0.1 m³/s) (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986). Ulteriori studi condotti negli anni '90 (PISCOPO *et alii*, 2000) considerano la eterogeneità geochimica delle acque delle sorgenti quale conseguenza della variazione dei rapporti acqua dolce - acqua salata lungo il fronte sorgivo, a causa della eterogeneità idraulica dell'acquifero carbonatico, della locale idrostratigrafia, della variazione della portata degli efflussi sorgivi lungo il fronte e degli effetti della faglia marginale del rilievo di Monte Faito. Il modello idrogeologico concettuale ipotizzato prevede una locale risalita dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata a causa della locale depressione piezometrica della falda di base dei carbonati che si crea nell'intorno delle sorgenti. Tale risalita sembra essere più contenuta presso il principale recapito dell'acquifero carbonatico, la sorgente Fontana Grande, caratterizzata da acque tipicamente bicarbonato-calciche a bassa temperatura e relativamente poco mineralizzate. L'interfaccia sembra essere a profondità ridotta presso le sorgenti delle Terme di Stabia, dove emergono acque clorurato-sodiche molto mineralizzate, a bassa temperatura e con significativi contenuti gassosi (CO₂ e H₂S). In particolare il contenuto dei

and 2). Moving from east to west, the height above sea level and discharge rate of the springs decrease; in the same direction, the water salinity increases and the hydrochemical facies generally changes (Tab. 1 and Fig. 1).

Previous studies have explained the origin of the differences in water chemistry of the 28 springs as a result of the shallow and more yielding groundwater circulation in the basal carbonate aquifer, especially as regards the main spring of Fontana Grande (about 0.3 m³/s), and the relatively deep circulation in the fractured and karst aquifer interacting in different proportions with the wedge of salt water intrusion, as regards the more mineralized springs of the Terme di Stabia (about 0.1 m³/s) (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986). Further studies carried out in the nineties (PISCOPO *et alii*, 2000) considered the geochemical heterogeneity of spring waters as a result of the variation of the salt-fresh water shape along the coastline, owing to the hydraulic heterogeneity of the carbonate aquifer, the change in local hydrostratigraphy, the variability of the flow rates of different springs and the effects of the border fault of Mount Faito. The conceptual hydrogeological model supposes a local upconing of the interface of salt water - fresh water owing to the local drawdown of the piezometric level of the basal carbonate aquifer that is produced around the springs. This upconing seems to be lower near the main spring of the carbonate aquifer, Fontana Grande Spring, characterised by waters that are typically calcium-bicarbonate with low temperature and salinity. The interface seems to be shallow near the springs of the Terme di Stabia, where sodium-chloride waters outflow with high salinity, low temperature and significant gas contents (CO₂ and H₂S). These have been explained as the upflow of deep fluids through the important faults which drop down the carbonate rocks

gas nelle acque sotterranee è stato spiegato con la risalita di fluidi profondi attraverso le importanti faglie che ribassano i carbonati nel graben della Piana Campana (Figg. 1 e 2) (CELICO *et alii*, 1998; PISCOPO *et alii*, 2000).

DATI E METODI

Per approfondire le conoscenze sulla genesi della varietà idrochimica lungo il fronte sorgivo e, quindi, per esaminare le relazioni tra la falda di base dei carbonati ed il cuneo di intrusione marina, sono stati considerati i risultati delle precedenti indagini, riesaminando nello specifico i dati delle analisi chimiche effettuate a partire dal 1979. Sono state poi effettuate nuove indagini presso il fronte sorgivo comprendenti analisi chimiche ed isotopiche delle acque delle scaturigini più significative e misure della loro portata. E' stata inoltre realizzata una perforazione sperimentale presso le sorgenti delle Terme di Stabia che ha permesso, tra l'altro, campionamenti delle acque a diversa profondità.

I dati chimici disponibili in letteratura riguardano: gli anioni (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) ed i cationi maggiori (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) di 24 sorgenti (2-4, 6, 7-26 in Tab. 1 e Fig. 1), riportati in NOTA D'ELOGIO (1979); gli anioni ed i cationi maggiori, la temperatura, il pH, la conducibilità elettrica ed il contenuto di gas (H_2S) delle 18 sorgenti delle Terme di Stabia (7-24 in Tab. 1 e Fig. 1) e della sorgente Fontana Grande (1 in Tab.1 e Fig. 1), riportati in CELICO *et alii* (1986); gli anioni e cationi maggiori, temperatura, pH, conducibilità elettrica, alcuni costituenti minori ed in traccia (Sr, Li, SiO_2) e il contenuto di gas (H_2S e CO_2) delle 18 sorgenti delle Terme di Stabia (7-24 in Tab. 1 e Fig. 1), delle sorgenti Fontana Grande, Acqua della Madonna e Acqua Rossa (1-4 in Tab. 1 e Fig. 1) e dell'acqua di mare, riportati in PISCOPO *et alii* (2000); gli anioni e cationi maggiori, temperatura, pH, conducibilità elettrica, alcuni costituenti minori ed in traccia (Li, NO_3^- , Fe, Mn, Al, F, I, SiO_2) e il contenuto di gas (H_2S) delle 18 sorgenti delle Terme di Stabia (7-24 in Tab.1 e Fig. 1) e della sorgente Acqua della Madonna (2 in Tab. 1 e Fig. 1), relativi ad analisi condotte nel 2000, 2001 e 2003 dalle TERME DI STABIA (2003).

Le nuove analisi chimiche sono state condotte nel 2006 su otto sorgenti delle Terme di Stabia (7, 8, 15, 18, 21, 22, 24, 25 in Tab. 1 e Fig. 1), sulla sorgente Acqua della Madonna (2 in Tab. 1 e Fig. 1) e su sei campioni di acque prelevate a diversa profondità nella perforazione (P1-P6 in Fig. 3). Temperatura, pH e conducibilità elettrica a 25°C (CE) sono state misurate in sito.

towards the graben of Campana Plain (Figg. 1 and 2) (CELICO *et alii*, 1998; PISCOPO *et alii*, 2000).

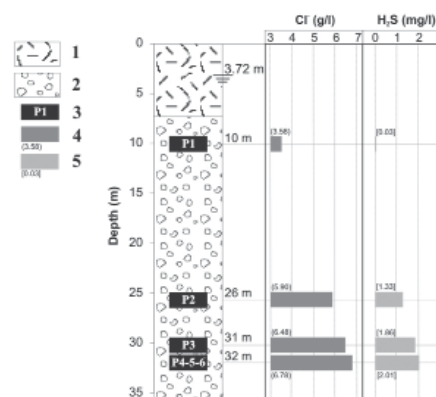
DATA AND METHODS

In order to closely examine the origin of the hydrochemical variety in the springs of Castellammare di Stabia and therefore to analyse the relations between the basal circulation of the carbonate aquifer and the wedge of salt water intrusion, we considered the results of the previous work, re-examining in particular the chemical data available since 1979. New investigations were carried out in the springs area, including chemical and isotopic analyses of the main representative springs and measurements of flow rate. Furthermore, an experimental borehole was drilled near the springs of the Terme di Stabia that enabled, among other things, sampling at different depths.

The chemical data available in the literature concern: the major anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) and cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) of 24 springs (2-4, 6, 7-26 in Tab. 1 and Fig. 1), reported in NOTA D'ELOGIO (1979); the major anions and cations, temperature, pH, electrical conductivity and gas content (H_2S) of the 18 springs of the Terme di Stabia (7-24 in Tab. 1 and Fig.1) and Fontana Grande Spring (1 in Tab.1 and Fig. 1), reported in CELICO *et alii* (1986); the major anions and cations, temperature, pH, electrical conductivity, some minor and trace constituents (Sr, Li, SiO_2) and gas content (H_2S and CO_2) of the 18 springs of the Terme di Stabia (7-24 in Tab. 1 and Fig. 1), Fontana Grande, Acqua della Madonna and Acqua Rossa springs (1-4 in Tab. 1 and Fig. 1) and sea water, reported in PISCOPO *et alii* (2000); the major anions and cations, temperature, pH, electrical conductivity, some minor and trace constituents (Li, NO_3^- , Fe, Mn, Al, F, I, SiO_2) and gas content (H_2S) of the 18 springs of the Terme di Stabia (7-24 in Tab.1 and Fig. 1) and Acqua della Madonna Spring (2 in Tab. 1 and Fig. 1) conducted in 2000, 2001 and 2003, provided by the TERME DI STABIA (2003).

New chemical analyses were conducted in 2006 on eight springs selected among those of the Terme di Stabia (7, 8, 15, 18, 21, 22, 24, 25 in Tab. 1 and Fig. 1), Acqua della Madonna Spring (2 in Tab. 1 and Fig. 1) and six waters of the borehole sampled at different depths (P1-P6 in Fig. 3). The temperature, pH and electrical conductivity at

Fig. 3 - Stratigrafia della perforazione sperimentale e contenuto di Cl^- e H_2S nelle acque: 1 Depositi piroclastici, 2 Depositi detritici carbonatici, 3 Campionamento e numero di riferimento, 4 Concentrazione di Cl^- in g/L, 5 Concentrazione di H_2S in mg/L
- Stratigraphy of the experimental borehole, and Cl^- and H_2S contents of waters: 1 Pyroclastic deposits, 2 Carbonate detritus, 3 Water sampling with reference number, 4 Cl^- concentration in g/L, 5 H_2S concentration in mg/L



Gli anioni maggiori (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), i nitrati (NO_3^-), i fluoruri (F^-) ed i bromuri (Br^-) sono stati determinati in laboratorio entro 24 ore dal campionamento. L' HCO_3^- è stato determinato mediante titolazione, usando HCl 0.01N come titolante e metil-arancio come indicatore di pH. I F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- e SO_4^{2-} sono stati determinati mediante cromatografia ionica. I cationi maggiori (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ed il Fe sono stati determinati con un ICP-OES. Per la determinazione della SiO_2 , 10 ml di campione sono stati diluiti in situ con 50 ml di acqua distillata doppia, e in laboratorio analizzati mediante un fotocolorimetro. L' H_2S è stato stabilizzato con acetato di zinco e poi determinato in laboratorio con titolazione diretta di ione solfuro con ioduri e retrotitolazione dell'eccesso di ioduri mediante tiosolfati. La CO_2 è stata determinata in situ mediante titolazione con sodio idrato.

I dati chimici sono stati elaborati utilizzando il software AQUACHEM 5.1. La correlazione dei diversi parametri chimici è stata effettuata mediante la matrice di correlazione di Pearson. Lo studio statistico multivariato, ovvero l'analisi delle componenti principali (PCA), è stata condotta utilizzando il software STATISTICA per meglio comprendere le interrelazioni tra i diversi parametri chimici. Questa elaborazione permette di ridurre la dimensionalità dei dati mediante la trasformazione di un gruppo correlato di variabili in un più piccolo numero di variabili non correlate dette componenti principali (MEGLIN, 1991). La PCA è stata preceduta da una normalizzazione dei dati, al fine di assicurare un uguale peso delle variabili (FITZPATRICK *et alii*, 2007), ed adottando successivamente una rotazione Varimax per massimizzare la variazione espressa attraverso le componenti (REYMENT & JORESKOG, 1996). Le componenti principali sono state quindi estratte dal set di dati normalizzati, sulla base degli autovalori della matrice di correlazione.

Dieci dei precedenti punti d'acqua (sette sorgenti delle Terme di Stabia: 7, 8, 15, 18, 21, 22, 24 in Tab. 1; la sorgente Acqua della Madonna: 2 in Tab. 1; due campioni della perforazione: P2 e P6 in Fig. 3) sono stati analizzati nel 2006 per determinare alcuni isotopi ambientali. Sono stati determinati gli isotopi stabili dell'acqua, ^2H e ^{18}O , e ^{34}S dei solfati mediante spettrometria di massa. I risultati sono espressi in $\delta\text{‰}$ V-SMOW per $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ed in $\delta\text{‰}$ V-CDT per $\delta^{34}\text{S}$. La concentrazione di trizio è stata determinata mediante scintillazione liquida dopo arricchimento elettrolitico; i risultati sono riportati in unità UT.

La portata delle sorgenti delle Terme di Stabia è stata misurata nel 2006 mediante un mulinello idrometrico nella stessa sezione utilizzata nelle precedenti indagini (PISCOPO *et alii*, 2000). La perforazione ubicata nei pressi delle sorgenti più mineralizzate a 6 m s.l.m. (Fig. 1) è stata realizzata fino ad una profondità di 36 m con un diametro di 130 mm (Fig. 3). Il perforo è stato completato con un filtro di 33 m di lunghezza ed aperture di 2 mm, al fine di esplorare completamente la profondità investigata. Nel corso ed alla fine della perforazione, sono stati rilevati diversi profili di temperatura e conducibilità elettrica attraverso una sonda multiparametrica. Inoltre sono state eseguite prove di pompaggio misurando la portata emunta dalla perforazione, mediante metodo volumetrico, e controllando la portata delle sorgenti ed il livello piezometrico nel perforo.

Sono stati anche considerati i rilievi piezometrici condotti in passato (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000) su pozzi dell'area sorgiva che hanno interessato i carbonati.

25°C (EC) were measured in the field.

Major anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), fluoride (F^-), and bromide (Br^-) were measured in the laboratory within 24 hours of sample collection. HCO_3^- was determined by means of titration, using HCl 0.01N as a titrant and methyl-orange as a pH indicator. F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- and SO_4^{2-} were determined by ion chromatography. Major cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) and Fe were determined with an ICP-OES. For SiO_2 determination, 10 ml of sample were diluted in the field with 50 ml of doubly distilled water, and laboratory analyses were then carried out with a photocolorimeter. H_2S was stabilised with zinc acetate and then determined in the laboratory by direct titration of the sulphur ion with iodine and retitration of the excess iodine with tiosulphate. The CO_2 was determined in the field by titration with sodium hydrate.

Chemical data were processed using AQUACHEM 5.1 software. The Pearson correlation matrix was used to analyse the correlation among the chemical parameters. A multivariate statistical study, Principal Component Analysis (PCA), was performed using STATISTICA software in order to better understand the intercorrelations of the chemical parameters. This computation reduces the dimensionality of the data by transforming a group of correlated variables into a smaller number of uncorrelated variables called principal components (MEGLIN, 1991). The PCA was performed as an eigenanalysis of the correlation matrix; the data were first standardised, in order to assure equal weights of the variables (FITZPATRICK *et alii*, 2007), and the Varimax rotation was adopted to maximise the variation explained by the components (REYMENT & JORESKOG, 1996).

Ten of the previous water points (seven springs of the Terme di Stabia: 7, 8, 15, 18, 21, 22, 24 in Tab. 1; Acqua della Madonna Spring: 2 in Tab. 1; two borehole samples: P2 and P6 in Fig. 3) were analysed in 2006 to detect certain environmental isotopes. Stable isotopes of water, ^2H and ^{18}O , and ^{34}S of dissolved sulphate were determined through mass spectrometry. Results are expressed in $\delta\text{‰}$ V-SMOW for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ and in $\delta\text{‰}$ V-CDT for $\delta^{34}\text{S}$. The tritium concentration was also determined by a scintillation counter following electrolytic enrichment; the results were reported in standard TU.

The flow rates of the Terme di Stabia springs were measured in 2006 by a flow-meter in the same section used in previous investigations (PISCOPO *et alii*, 2000). The borehole located near the more mineralised springs at 6 m a.s.l. (Fig. 1) was drilled to a depth of 36 m with a 130 mm diameter (Fig. 3). The borehole was completed with a 33 m long, 2 mm aperture screen in order to fully explore the investigated depth. During and at the end of the excavation, more temperature and electrical conductivity logs were determined by a multiparameter probe. Pumping tests were also conducted to determine the discharge from the borehole by the volumetric method, and controlling the spring flow rate and water level in the borehole.

Water level measurements reported in literature (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), conducted on wells penetrating the carbonate rocks, were considered as well.

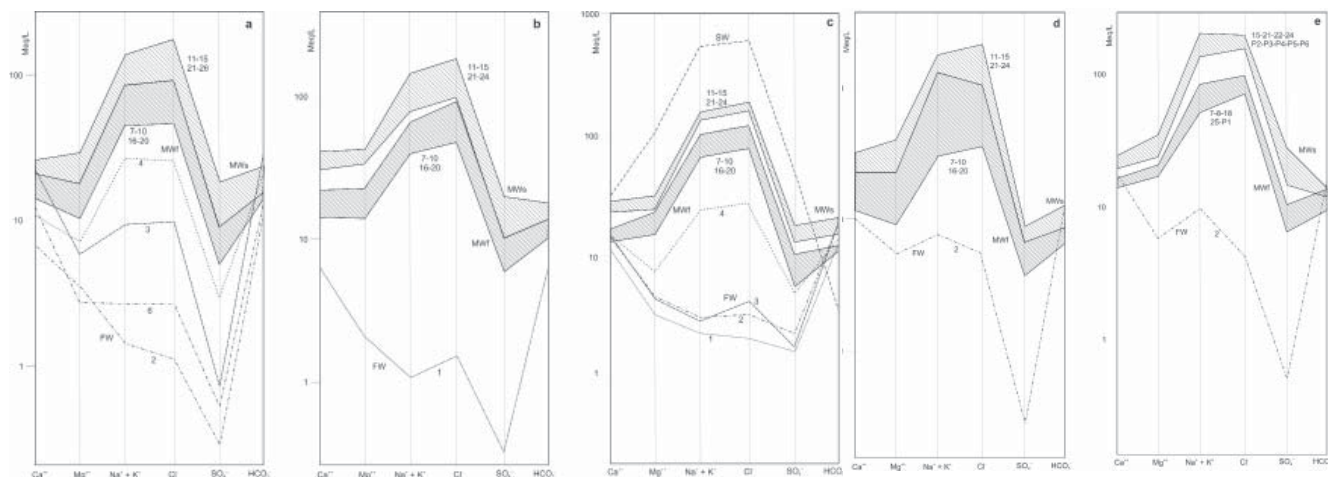


Fig. 4 - Diagrammi di Schoeller delle acque delle sorgenti relativi agli anni 1979 (a), 1986 (b), 2000 (c), 2003 (d) e 2006 (e) (FW: acqua dolce; MWf: acqua salmastra; MWs: acqua salina; SW: acqua di mare)

- Schoeller diagrams of the spring waters for the years 1979 (a), 1986 (b), 2000 (c), 2003 (d) and 2006 (e) (FW: fresh water; MWf: brackish water; MWs: saline water; SW: sea water)

RISULTATI

A conferma di quanto già riportato in bibliografia (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), le sorgenti possono essere distinte sulla base degli ioni maggiori, temperatura e salinità in due gruppi principali: un gruppo di acque dolci (FW in Tab. 1 e Fig. 4), caratterizzate da acque bicarbonato-calciche con bassa temperatura (12-14°C) e mineralizzazione ($CE < 2$ mS/cm), ed un gruppo di acque molto mineralizzate (MW in Tab. 1 e Fig. 4), caratterizzate da acque clorurato-alcaline con più alta temperatura (14-17°C), paragonabile con quella dell'acqua di mare (SW in Tab. 1 e Fig. 4), e alta salinità (CE tra 8 e 18 mS/cm).

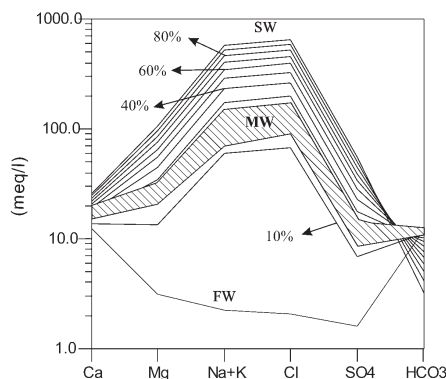
Il gruppo FW rappresenta la circolazione idrica sotterranea della falda di base dell'acquifero carbonatico, affiorante tipicamente alla sorgente Fontana Grande ad una quota di 2.5 m s.l.m., dove nella copertura detritico-piroclastica dei carbonati a valle della sorgente è presente un sottile strato di piroclastiti a bassa permeabilità (Fig. 2). Il gruppo MW, che include principalmente le sorgenti ricadenti nello stabilimento delle Terme di Stabia affioranti a quote relativamente più basse, rappresenta termini di mescolamento della falda di base con il cuneo di intrusione marino. Il gruppo MW può essere ulteriormente suddiviso in due sottogruppi: un primo caratterizzato da acque saline con profilo chimico più influenzato dalle acque di intrusione marina (MWs) ed un secondo caratterizzato da acque salmastre con profilo chimico che risente meno del mescolamento con le acque salate (MWf) (Fig. 4). Le acque appartenenti al sottogruppo MWs affiorano dalla cintura detritica e piroclastica poco a valle del versante carbonatico, mentre le acque appartenenti al gruppo MWf scaturiscono direttamente dal versante carbonatico al contatto con i depositi di copertura della fascia costiera (Fig. 2). Le differenze idrochimiche tra le diverse sorgenti risultano anche dal contenuto di gas disciolti. Il contenuto di H_2S marca bene i tre profili idrochimici, risultando assente nella sorgente Fontana Grande,

RESULTS

According to previous work (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), the springs of the Castellammare di Stabia can be subdivided into two main groups, based on the relative amounts of major ions, the temperature and the salinity: a fresh-water (FW in Tab. 1 and Fig. 4) group, characterised by calcium-bicarbonate waters at low temperature (12-14°C) and mineralisation ($EC < 2$ mS/cm), and a highly mineralised water (MW in Tab. 1 and Fig. 4) group, characterised by alkaline-chloride waters with higher temperatures (14-17°C), comparable with that of sea water (SW in Tab. 1 and Fig. 4), and high salinity (EC between 8 and 18 mS/cm).

The FW group represents groundwater circulation in the basal carbonate aquifer, outflowing typically in the Fontana Grande Spring at the elevation of 2.5 m a.s.l., where the carbonate aquifer is locally covered by low permeability pyroclastic deposits (Fig. 2). The MW group, including mainly the springs of the Terme di Stabia and outflowing at a lower elevation, represents mixing between groundwater of the basal carbonate aquifer and the wedge of salt water intrusion. The MW group can be further subdivided into two sub-groups: a first sub-group characterised by saline waters with hydrochemical facies more influenced by salt water (MWs) and a second one characterised by brackish waters with hydrochemical facies less influenced by salt water (MWf) (Fig. 4). The waters belonging to the MWs subgroup outflow from the detritic and pyroclastic belt more closed to the sea, whereas the waters belonging to the MWf group outflow from the carbonate slope at the interface with the detritic and pyroclastic belt (Fig. 2). In addition, the gas contents of the waters highlight the hydrochemical differences of the springs. The H_2S content marks the three main hydrochemical facies, being absent in the water of Fontana Grande Spring, with values less than 0.2 mg/L in the waters of

Fig. 5 - Diagramma di Schoeller relativo al mescolamento tra acqua di mare (SW) ed acqua dolce (FW) con indicazione del campo che include le sorgenti delle Terme di Stabia (MW)
 - Schoeller diagram of the mixing between sea water (SW) and fresh water (FW) showing the range including the springs of the Terme di Stabia (MW)



con valori inferiori a 0.2 mg/L nelle acque del gruppo MWf e con valori fino a circa 1 mg/L nelle acque del gruppo MWs.

L'analisi dei dati chimici storici e di quelli recenti basata sempre sugli ioni maggiori non evidenzia rilevanti cambiamenti del profilo geo-chimico negli ultimi trenta anni (ad eccezione della sorgente Acqua della Madonna, 2 in Fig. 4) come si può vedere dai grafici di Figura 4, dove si nota anche il graduale mescolamento tra il termine rappresentativo dell'acqua dolce dei carbonati e l'acqua di mare. Proprio utilizzando il chimismo di questi due termini estremi sono stati simulati con AQUACHEM diversi gradi di mescolamento per valutare la percentuale di acqua salata presente nelle acque delle sorgenti molto mineralizzate. Come si può vedere dalla Figura 5, risulta per le sorgenti dello stabilimento delle Terme di Stabia una percentuale di mescolamento tra il termine FW e l'acqua di mare dal 10 al 30%, i valori più bassi corrispondono alle sorgenti del gruppo MWf ubicate al piede del versante carbonatico e le percentuali più alte corrispondono alle sorgenti del gruppo MWs più prossime alla costa affioranti dalla coltre detritica e piroclastica (Fig. 2).

La perforazione realizzata in corrispondenza delle sorgenti delle Terme di Stabia (Fig. 3) ha permesso di verificare la presenza di detriti calcarei fino ad una profondità circa 30 m al di sotto del livello del mare. Dalle analisi delle acque campionate nel corso della perforazione e dopo il completamento del perforo, è risultato che i campioni prelevati a profondità comprese tra 26 e 32 m hanno un profilo chimico molto simile a quelli delle sorgenti mineralizzate più influenzate dal mescolamento con l'acqua di mare (P2-P6 in Fig. 4e). Cloruri e H_2S incrementano con la profondità come si può vedere in Figura 3. Alcuni profili di temperatura e conducibilità elettrica relativa determinati in foro dopo il condizionamento sono riportati in Figura 6; per la conducibilità elettrica relativa (ECr) è stata utilizzata la seguente relazione:

$$ECr = \frac{(EC - EC_{FW})}{(EC_{SW} - EC_{FW})}$$

dove

EC è la conducibilità elettrica a 25°C rilevata alle diverse profondità nel perforo;

EC_{FW} e EC_{SW} sono rispettivamente la conducibilità elettrica della sorgente Fontana Grande, 1.2 mS/cm, e dell'acqua di mare, 56 mS/cm (PISCOPO *et alii*, 2000).

the MWf group and up to 1 mg/L in the waters of the MWs group.

Comparison of the historical chemical data with those of recent acquisition, again based on the major ions, does not highlight significant changes in the hydrochemical facies in the last thirty years (with the exception of the Acqua della Madonna Spring, 2 in Fig. 4), as the graphs of Figure 4 show. From these graphs, it is also clear that the geochemical profiles of the waters correspond to different ratios of mixing between the carbonate fresh water and salt water. Precisely these two end-members were used to simulate using AQUACHEM software different degrees of mixing to evaluate the percentage of salt water that affects the highly mineralised springs. As shown in Figure 5, this results in a percentage of mixing between the FW member and the salt water ranging from 10 to 30% for the springs of Terme di Stabia, the lowest values corresponding to the springs of MWf group outflowing directly from the carbonate slope and the highest values corresponding to the springs of MWs group outflowing from the detritic and pyroclastic belt that is more closed to the sea (Fig. 2).

The borehole drilled near the springs of Terme di Stabia enables us to identify the presence of carbonate detritus up to 30 m below sea level (Fig. 3). From the water sampling during the drilling progress and after the borehole completion, it results that the chemical profile of waters sampled at depth between 26 and 32 m are very like those of highly mineralised springs more affected by salt water mixing (P2-P6 in Fig. 4e). Chloride and H_2S contents increase with depth as reported in Figure 3. In Figure 6, some of the logs of temperature and relative electrical conductivity measured after the borehole completion are reported; the relative electrical conductivity (ECr) is defined as follows:

where

EC is the electrical conductivity at 25 °C measured at different depth in the borehole;

EC_{FW} and EC_{SW} are the electrical conductivity of Fontana Grande Spring, 1.2 mS/cm, and salt water, 56 mS/cm (PISCOPO *et alii*, 2000).

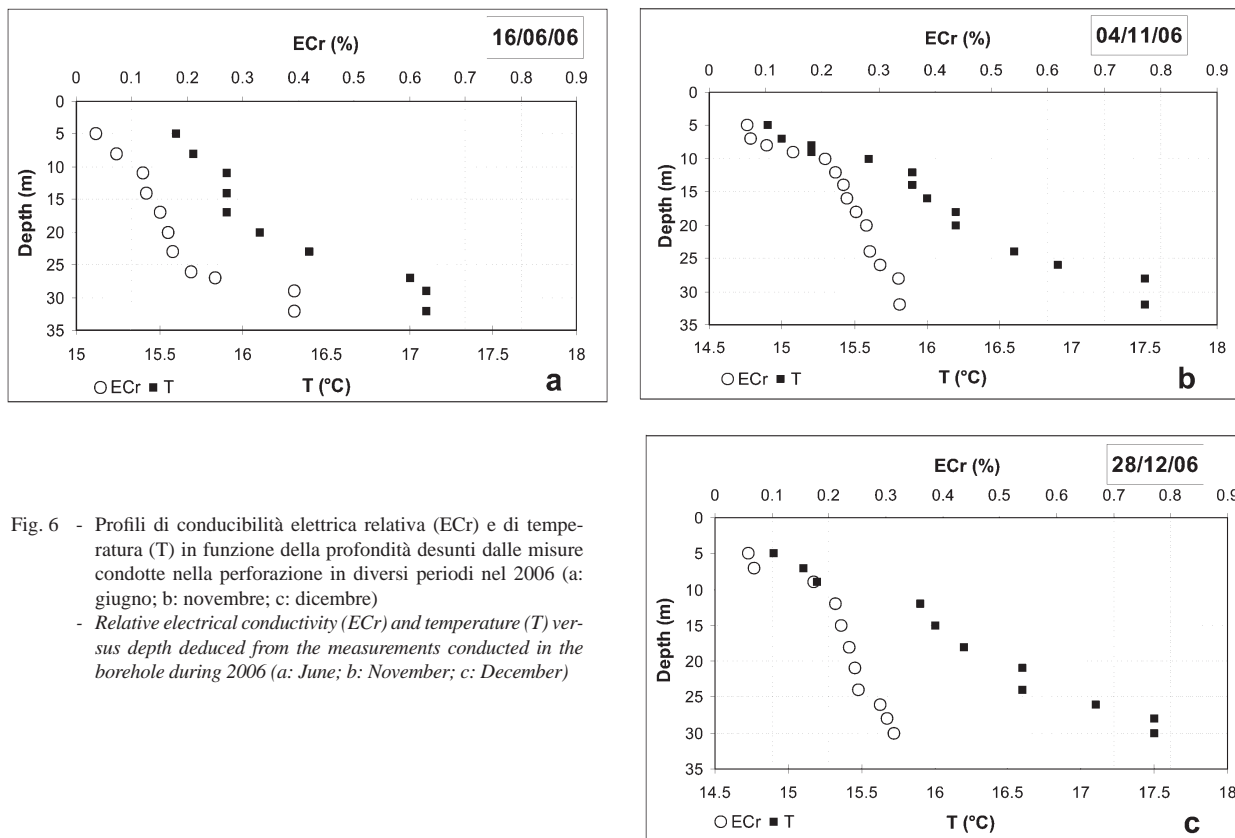


Fig. 6 - Profili di conducibilità elettrica relativa (ECr) e di temperatura (T) in funzione della profondità desunti dalle misure condotte nella perforazione in diversi periodi nel 2006 (a: giugno; b: novembre; c: dicembre)
 - Relative electrical conductivity (ECr) and temperature (T) versus depth deduced from the measurements conducted in the borehole during 2006 (a: June; b: November; c: December)

Le prove di pompaggio su pozzo singolo eseguite con una durata massima di 22 ore hanno evidenziato un rapido raggiungimento della stabilizzazione dell'abbassamento piezometrico per valori della portata da 60 a 120 L/min e nessuna interferenza con la portata delle sorgenti. I valori di portata specifica calcolati dalle prove sono compresi tra 0.035 e 0.18 m²/s.

La portata delle sorgenti delle Terme di Stabia è stata misurata a marzo, giugno e dicembre 2006. Complessivamente per il gruppo di sorgenti la portata misurata è compresa tra 0.24 and 0.04 m³/s con un indice di variabilità (calcolato quale rapporto tra la differenza della portata massima e la portata minima sulla portata media) uguale a 160%. I valori misurati di portata e l'indice di variabilità risultante sono in accordo con quelli riportati in bibliografia (PISCOPO *et alii*, 2000). Come risulta dai lavori precedenti, è da sottolineare che la variabilità della portata delle sorgenti più mineralizzate è più alta di quella della sorgente Fontana Grande (indice di variabilità uguale a 50%; PISCOPO *et alii*, 2000).

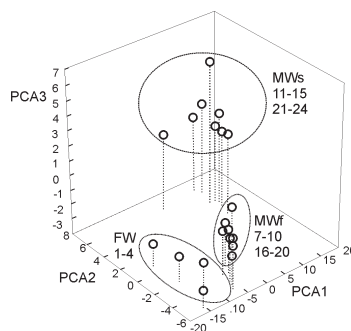
Analisi statistiche sono state condotte utilizzando i dati chimici disponibili. Utilizzando la matrice di correlazione di Pearson applicata ai dati chimici disponibili per i diversi anni, è risultata una forte correlazione tra temperatura, conducibilità elettrica, cloruri, solfati e sodio ($R > 0.8$). L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è stata

The single-well pumping tests carried out for a maximum period of 22 hours highlight a fast reaching of the drawdown equilibrium for discharge values ranging from 60 to 120 L/min and no interference with flow rate of the springs. The specific capacity determined on the basis of these tests is between 0.035 and 0.18 m²/s.

The discharge of the springs of the Terme di Stabia was measured in March, June and December 2006. The total rate of the spring group ranged between 0.24 and 0.04 m³/s with an index of discharge variability (computed as the ratio between the difference of maximum and minimum discharge, and average discharge) equal to 160%. The measured values of flow rate and index of discharge variability agree with those quoted in the literature (PISCOPO *et alii*, 2000). As reported in the previous work, it is pointed out that the discharge variability of the highly mineralised springs is higher than the Fontana Grande Spring (index of discharge variability of 50%; PISCOPO *et alii*, 2000).

Statistical analyses of the available chemical data were conducted. The Pearson correlation matrix calculated on chemical data for the different years considered shows a strongly correlation among temperature, electrical conductivity, chloride, sulphate and sodium ($R > 0.8$). The Principal Component Analysis (PCA) was performed using the chemical data of 2000 and 2003. The computation results

Fig. 7 - Diagramma dei valori della PCA (PCA1, PCA2 e PCA3) per le analisi chimiche del 2000 (FW: acqua dolce; MWf: acqua salmastra; MWs: acqua salina)
 - Scatterplot of PCA scores (PCA1, PCA2 and PCA3) of the chemical analyses of 2000 (FW: fresh water; MWf: brackish water; MWs: saline water)



applicata ai dati chimici del 2000 e del 2003. I risultati dell'elaborazione della serie più completa di dati, quella del 2000, sono mostrati nel grafico 3D di Figura 7 con assi corrispondenti alle prime tre componenti principali relative ai primi tre fattori (circa il 92% della varianza). Dal grafico è ancora evidente la differenza tra i tre gruppi di sorgenti precedentemente individuati FW, MWf e MWs (Fig. 7).

I risultati delle analisi relative agli isotopi stabili dell'acqua ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) condotte nel 2006 di alcune sorgenti significative e campioni del pozzo sono riportati in Figura 8, insieme alla retta indicativa della tendenza globale delle acque meteoriche (CRAIG, 1961) ed a quella significativa per l'Italia meridionale (LONGINELLI & SELMO, 2003). Sullo stesso grafico è indicato anche il campo della composizione isotopica delle acque del Mediterraneo, riportato in bibliografia per determinazioni effettuate su campioni provenienti dall'Adriatico e dallo Ionio (GONFIANTINI & ARAGUAS-ARAGUAS, 1988).

Tutte le acque campionate cadono in prossimità delle rette delle acque meteoriche. In particolare dal grafico si distinguono diversi gruppi di acque: il campione relativo alla sorgente meno mineralizzata (sorgente Acqua della Madonna, appartenente al gruppo FW, 2 in Fig. 8) è quello più impoverito di isotopi; meno impoverite rispetto al precedente sono le acque appartenenti al gruppo MWf (7, 8, 18 in Fig. 8); sono ancora meno impoveriti i campioni relativi alle acque appartenenti al gruppo MWs ed ai campioni della perforazione (15, 21, 22, 24, P2, P6 in Fig. 8). Con riferimento a quanto riportato in LONGINELLI & SELMO (2003), in merito alla relazione tra composizione isotopica delle acque di precipitazione e quota, si calcolano quote di ricarica comprese tra 330 e 1200 m s.l.m., per le acque delle sorgenti meno mineralizzate (sorgenti appartenenti ai gruppi FW e MWf). Queste quote corrispondono con quelle di principale ricarica della falda di base del rilievo carbonatico di Monte Faito.

In Figura 9, è riportato il contenuto isotopico $\delta^{34}\text{S}$ dei solfati disciolti in funzione del contenuto dei solfati. Tutte le acque esaminate hanno un contenuto isotopico compreso tra 20 e 21‰ ed un elevato contenuto in SO_4^{2-} , ad eccezione del campione della sorgente Acqua della Madonna (2 in Fig. 9). Resta confermato da queste analisi che la sorgente principale dei solfati nelle acque più mineralizzate è legata all'ingressione di acque marine nell'acquifero carbonatico, in accordo con i valori isotopici tipici dell'acqua di mare (CLARK & FRITZ, 1997).

Il contenuto di trizio delle acque campionate varia tra 5 e 9 UT, pertanto è possibile attribuire alle acque in esame tempi di permanenza presumibilmente inferiori ai 30 anni (CLARK & FRITZ, 1997).

with reference to the more complete dataset of 2000 are plotted on the 3D diagram (Fig. 7) with axes corresponding to the principal component scores related to the first three factors (about 92% of the variance). Three clusters were distinguished, generally corresponding to previous FW, MWf and MWs groups (Fig. 7).

The analysis results of stable isotopes of water ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) conducted in 2006 of selected springs and borehole samples are shown in Figure 8, together with the global meteoric water line (CRAIG, 1961) and the Southern Italy meteoric water line (LONGINELLI & SELMO, 2003). The same diagram also reports the range of isotopic compositions of the Mediterranean Sea, as quoted in the literature for water samples of the Adriatic and Ionian seas (GONFIANTINI & ARAGUAS-ARAGUAS, 1988).

All of the sampled waters fall near the meteoric water lines. In particular, different types of waters can be distinguished on the diagram: the sample collected at a lower mineralised spring (Acqua della Madonna Spring belonging to the FW group, 2 in Fig. 8) is least enriched in $\delta^{18}\text{O}$; the waters sampled from the springs of the MWf (7, 8, 18 in Fig. 8) are relatively enriched in $\delta^{18}\text{O}$; and the waters sampled from the springs of the MWs group and from the borehole (15, 21, 22, 24, P2, P6 in Fig. 8) are somewhat more enriched. If the available vertical isotope gradients of the western side of the Apennine Chain (LONGINELLI & SELMO, 2003) are considered, then the elevation of the recharge area of less mineralised waters (springs belonging to FW and MWf groups) ranges from 330 to 1200 m a.s.l. These values agree with those of the recharge area of the basal carbonate aquifer of Mount Faito.

The $\delta^{34}\text{S}$ values for dissolved SO_4^{2-} versus the water content of SO_4^{2-} are provided in Figure 9. All of the sampled waters have an isotopic ratio ranging from 20 and 21‰ and significant contents of SO_4^{2-} , with the exception of the water of the Acqua della Madonna Spring (2 in Fig. 9). These analyses confirm that the main source of SO_4^{2-} of the higher mineralised springs is related to the salt water intrusion, according to the typical isotopic values of the sea water (CLARK & FRITZ, 1997).

The tritium content of the sampled waters ranges from 5 and 9 TU, so an apparent age of less than 30 years is possible for the sampled waters (CLARK & FRITZ, 1997).

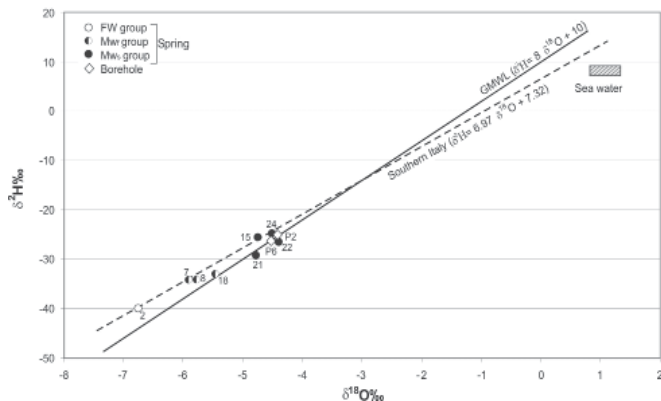


Fig. 8 - Diagramma $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ delle acque di alcune sorgenti e della perforazione campionate nel 2006 con la rette meteoriche globale e dell'Italia meridionale e la composizione isotopica delle acque del Mediterraneo
 - $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ plot of the waters of selected springs and borehole sampled in 2006 together with the global meteoric water line and the Southern Italy meteoric water line, and the isotopic composition of the Mediterranean Sea

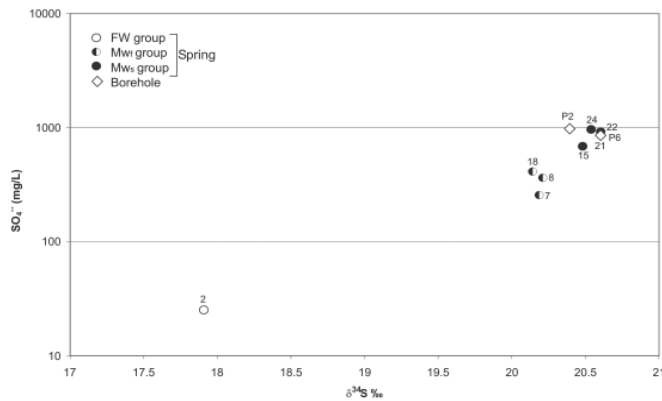


Fig. 9 - Diagramma $\delta^{34}\text{S}$ dei solfati disciolti in funzione del contenuto dei solfati delle acque di alcune sorgenti e della perforazione campionate nel 2006
 - Plot of $\delta^{34}\text{S}$ for dissolved SO_4^{2-} versus the water content of SO_4^{2-} of selected springs and borehole waters sampled in 2006

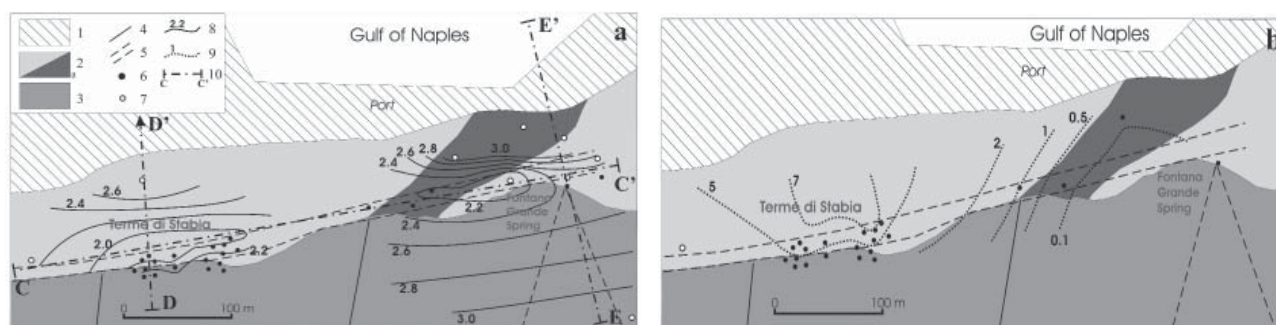


Fig. 10 - Andamento della piezometria (a) e della concentrazione dei cloruri (b) in corrispondenza del fronte sorgivo: 1 Terreni di riporto, 2 Depositi costieri, detritici e piroclastici (a: livello sepolto di depositi piroclastici fini) (Quaternario), 3 Calcarei (Cretaceo Inferiore) e depositi di copertura, 4 Principali faglie (presunte se tratteggiate), 5 Probabile ubicazione della faglia marginale, 6 Sorgenti considerate per la ricostruzione piezometrica ed il contenuto di cloruri, 7 Perforazioni e pozzi considerati per la ricostruzione piezometrica ed il contenuto di cloruri, 8 Curve piezometriche e quote in m s.l.m., 9 Curve di uguale concentrazione dei cloruri in g/L, 10 Tracce delle sezioni di Figura 11
 - Potentiometric surface (a) and chloride concentration (b) in the spring area: 1 Layer of fill, 2 Coastal, detritic and pyroclastic deposits (a: buried layer of fine pyroclastic deposits) (Quaternary), 3 Limestone (Lower Cretaceous) and covering deposits, 4 Main faults (supposed if sketched), 5 Supposed location of border fault, 6 Springs considered for the potentiometric surface reconstruction and chloride concentration, 7 Boreholes and wells considered for the potentiometric surface reconstruction and chloride concentration, 8 Water-level contour in m a.s.l., 9 Isolines of chloride in g/L, 10 Traces of sections of Figure 11

Utilizzando i rilievi piezometrici condotti in perforazioni che hanno interessato i carbonati (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), le misure effettuate nella nuova perforazione e considerando la quota di emergenza delle sorgenti, è stato ricostruito in prima approssimazione l'andamento della piezometria. La ricostruzione piezometrica è riportata in Figura 10, insieme all'andamento della distribuzione dei cloruri derivante dalle analisi chimiche condotte sulle sorgenti e sulla perforazione sperimentale (campione P1 in Fig. 3).

A rough potentiometric surface of the spring area of Castellammare di Stabia was reconstructed interpolating the elevation of the springs with the groundwater levels of the wells penetrating the carbonate rocks (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii* 1986; PISCOPO *et alii*, 2000) and of the new borehole. This potentiometric surface is shown in Figure 10 together with the distribution of the chloride concentration resulting from the chemical analyses of waters of the springs and experimental borehole (sample P1 in Fig. 3).

DISCUSSIONE

Le indagini idrogeologiche condotte a Castellammare di Stabia hanno permesso di esaminare i meccanismi genetici delle diverse scaturigini presenti lungo il fronte sorgivo ed indagare sul correlato fenomeno di intrusione marina nell'acquifero carbonatico.

Le diverse sorgenti presenti, in accordo con quanto già noto in bibliografia (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), sono conseguenza di un diverso grado di mescolamento tra due termini principali. Un primo termine è legato a circuiti idrici sotterranei che avvengono tipicamente nell'acquifero carbonatico, dotato di elevata permeabilità e con area di ricarica corrispondente con il rilievo di Monte Faito. Una espressione di questo tipo di circuiti è la sorgente Fontana Grande ed in parte la sorgente Acqua della Madonna (gruppo FW), entrambe emergenti dove l'acquifero carbonatico è localmente ricoperto da depositi quaternari a bassa permeabilità (Fig. 1 e 2). Un secondo termine estremo è costituito dall'acqua di mare che ingredisce nell'acquifero carbonatico. Il cuneo di intrusione marina ed in particolare la zona di dispersione connessa con l'interfaccia acqua dolce - acqua salata determinano diversi gradi di mescolamento tra i due termini influenzando il chimismo delle acque delle sorgenti più mineralizzate (Fig. 4 e 5). In particolare le sorgenti ubicate al piede del versante carbonatico (MWf in Fig. 2) risentono meno della zona di dispersione, invece le sorgenti che scaturiscono dai depositi detritici e piroclastici di copertura del substrato (MWs in Fig. 2), più prossime alla linea di costa ed alla faglia marginale del rilievo carbonatico, risentono in modo più evidente dell'intrusione dell'acqua di mare. La faglia marginale, che ribassa i carbonati verso il graben della Piana Campana, sembra essere responsabile della risalita di gas profondi che caratterizzano queste ultime sorgenti.

I dati chimici ed isotopici confermano questo modello idrogeologico concettuale. I risultati della perforazione sperimentale rafforzano lo stesso schema. I campionamenti effettuati nel corso ed alla fine della perforazione hanno permesso di determinare la presenza di una zona di dispersione a ridotta profondità nella copertura detritica molto permeabile dell'acquifero carbonatico.

Il campionamento condotto a circa 10 m di profondità nella perforazione è relativo ad acque molto simili chimicamente a quelle delle sorgenti del gruppo MWf (P1 in Fig. 4e), cioè le sorgenti caratterizzate da acque salmastre direttamente affioranti dal versante carbonatico. Invece i campionamenti effettuati a fondo foro (circa 30 m al di sotto il livello del mare) sono chimicamente ed isotopicamente simili alle acque delle sorgenti caratterizzate da acque saline appartenenti al gruppo MWs (Fig. 4e, 8 e 9), cioè quelle più mineralizzate affioranti dalla cintura detritica e piroclastica. Le acque campionate a fondo foro differiscono dalle acque del gruppo MWs solo per il contenuto in H₂S superiore di almeno il 30% nelle acque del perforo; l'incremento dell'H₂S con la profondità conferma la risalita dal basso del gas (Fig. 3).

L'andamento dei cloruri con la profondità (Fig. 3) ed i profili di temperatura e conducibilità elettrica relativa rilevati nella perforazione (Fig. 6) confermano la presenza della zona di dispersione all'interno dei depositi detritici presenti a copertura dei carbonati, a valle delle sorgenti delle

DISCUSSION

The hydrogeological investigations conducted at Castellammare di Stabia allow us to examine the origin of groundwater flowing out from the different springs and to evaluate the correlated effect of salt water intrusion in the carbonate aquifer.

According to previous studies (CELICO *et alii*, 1986; PAOLETTI *et alii*, 1986; PISCOPO *et alii*, 2000), the different springs located near the coastline are the results of different percentages of mixing between two end-members. A first end-member represents the groundwater circulation typically occurring in the carbonate aquifer, which is characterised by high permeability and whose recharge area corresponds to Mount Faito. Examples of this kind of circulation include the Fontana Grande Spring and, partly, the Acqua della Madonna Spring (FW group), both emerging where the carbonate aquifer is locally covered by low permeability Quaternary deposits (Fig. 1 and 2). A second end-member is constituted by the salt water intrusion in the carbonate aquifer. The sea water wedge and particularly the zone of dispersion related to the interface between fresh water and salt water determine different percentages of mixing between two end-members that affect the water chemistry of the more mineralised springs (Fig. 4 and 5). In particular, the springs outflowing from the carbonate slope, at the interface with the detritic and pyroclastic belt (MWf in Fig. 2), do not feel much of the influence of the zone of dispersion, whereas the springs outflowing from the detritic and pyroclastic belt (MWs in Fig. 2), which are more closed to the coastline and border fault of the carbonate relief, are more affected by the salt water intrusion. The border fault, which drops down the carbonate rocks towards the graben of the Campana Plain, seems to be responsible for the rise of deep gases that characterise these last springs.

The chemical and isotopic data for the springs confirm this conceptual hydrogeological model. The results of the experimental borehole strengthen the same conceptual model. Through sampling and measurements conducted during and at the end of the drilling, we determined the presence of a dispersion zone at low depth in the highly permeable detritic cover of the carbonate aquifer. The water sampled at 10 m depth shows a hydrochemical profile like the waters in the MWf group (P1 in Fig. 4e), namely the springs characterised by brackish waters directly outflowing from the carbonate slope. On the other hand, the water sampled at the bottom of the borehole (about 30 m below sea level) are chemically and isotopically like the waters included in the MWs group (Fig. 4e, 8 and 9), namely those that are most mineralised outflowing from the detritic and pyroclastic belt. The water sampled at the bottom of the borehole differs from the waters of the MWs group only for the H₂S content, which is higher by about 30% in the borehole water. Furthermore, the H₂S content of the borehole waters increases with depth, confirming the upward rise of the gas (Fig. 3).

The vertical distribution of the chloride (Fig. 3) and the logs of temperature and relative electrical conductivity measured in the borehole (Fig. 6) confirm the presence of a dispersion zone in the detritic

Terme di Stabia. I depositi di copertura dei carbonati in questa zona sono caratterizzati da una elevata trasmissività se si tiene conto dei risultati delle prove di pompaggio condotte sulla perforazione sperimentale.

Il confronto tra la seppur schematica ricostruzione piezometrica dell'area sorgiva e la distribuzione dei cloruri di Figura 10 evidenzia in prossimità delle Terme di Stabia la corrispondenza tra il cono di depressione e la locale alta concentrazione dei cloruri. In questa zona l'ingressione di acqua di mare può essere favorita dall'elevata permeabilità dei depositi detritici che ricoprono le rocce carbonatiche. Invece in corrispondenza della sorgente Fontana Grande l'ingressione di acqua di mare è più contenuta, se si considera la più bassa concentrazione di cloruri e il più elevato gradiente idraulico che si crea in corrispondenza del cono di depressione. Ciò è conseguenza anche della presenza, in questa zona, di piroclastiti a bassa permeabilità a copertura delle rocce carbonatiche (Fig. 2).

Sulla variabilità del fenomeno di ingressione salina lungo il fronte sorgivo bisogna considerare anche che in prossimità della sorgente Fontana Grande la portata dell'acquifero è più elevata rispetto a quella dell'acquifero presso le sorgenti delle Terme di Stabia, avendo queste ultime una portata più bassa (Tab. 1) ed in parte dovuta ad acqua di ingressione marina (per il 10-30 %). Infatti la sorgente Fontana Grande rappresenta il principale recapito dell'acquifero carbonatico ed è caratterizzata da un basso indice di variabilità della portata, nonostante sia ubicata a quota relativamente più alta delle sorgenti di acque salmastre e saline delle Terme di Stabia.

La più alta quota di emergenza della sorgente Fontana Grande, essendo il primo punto di intersezione della falda dei carbonati con la topografia nell'ambito della zona di emergenza, la più alta portata locale dell'acquifero carbonatico, la presenza a copertura delle rocce carbonatiche di piroclastiti a bassa permeabilità sono tutti elementi che contrastano l'ingressione marina presso il settore orientale del fronte sorgivo. Invece la più bassa quota di emergenza delle sorgenti delle Terme di Stabia, il considerevole spessore di detriti ad alta permeabilità a valle delle sorgenti e la più bassa portata dell'acquifero carbonatico sembrano essere responsabili della più facile ingressione marina nel settore occidentale del fronte sorgivo. Questo settore rappresenta comunque un recapito secondario dell'acquifero carbonatico e ciò può spiegare anche il più alto indice di variabilità della portata riscontrato per le sorgenti delle Terme di Stabia, in accordo con quanto già noto in bibliografia (PISCOPO *et alii*, 2000).

L'esame delle serie storiche di dati chimici non permettono di individuare chiare tendenze evolutive della qualità delle acque sotterranee nel corso dell'ultimo trentennio (Fig. 4), anche a causa della carenza di sufficienti dati sulla portata delle sorgenti che non permettono correlazioni tra composizione chimica delle acque ed entità del flusso.

Una rappresentazione interpretativa e schematica della forma dell'interfaccia lungo il fronte sorgivo è riportata in Figura 11, mettendo a confronto il modello approssimato di Ghyben-Herzberg, che considera condizioni idrostatiche, con i risultati delle analisi chimiche ed isotopiche delle acque delle sorgenti e della perforazione.

Assumendo per il rapporto $\rho_f/(\rho_s - \rho_f)$, dove ρ_f è la densità dell'acqua dolce e ρ_s è la densità dell'acqua di mare, un valore pari

cover of the carbonate aquifer, down to the springs of the Terme di Stabia. In this zone the deposits covering the carbonate aquifer are characterised by high transmissivity, as results from the pumping tests carried out through the experimental borehole.

The comparison of the potentiometric surface, even though approximate, with the chloride concentration reported in Figure 10, highlights the correspondence of the cone of depression with the local high content of chloride near the Terme di Stabia. In this zone the salt water intrusion can be favoured by the high permeability of the detritic deposits that cover the carbonate rocks. On the contrary the influence of the salt water intrusion is less evident by the Fontana Grande Spring, if one considers the lower content of chloride and the high hydraulic gradient of the depression cone. This is also due to the presence of low permeability pyroclastic deposits that cover the carbonate aquifer in this zone (Fig. 2).

Understanding the salt water intrusion influence in the spring area is necessary to consider that the discharge of the aquifer is higher near Fontana Grande Spring than near the Terme di Stabia springs; these last springs are characterised by a lower flow rate (Tab. 1) also due to sea water (for 10-30 % of total rate). Indeed the Fontana Grande Spring represents the main outflowing point of the carbonate aquifer and is characterised by a low index of discharge variability, although its elevation is higher than those of the brackish and saline springs of the Terme di Stabia.

The higher outflowing height of the Fontana Grande Spring, being the first point of intersection of the carbonate water table with the topography, the local higher outflow of the carbonate aquifer, the presence of low permeability deposits covering the carbonate rocks are all factors in contrast with the salt water intrusion in the eastern side of the spring area. On the other hand, the lower height of the emerging area of the Terme di Stabia springs, the significant thickness of high permeability deposits covering the carbonate rocks and the local lower outflow of the carbonate aquifer seem to be all circumstances favourable to salt water intrusion in the western side of the spring area. The Terme di Stabia springs represents a secondary emerging area of the carbonate aquifer and that can also explain the high index of discharge variability of these springs, according to the previous work (PISCOPO *et alii*, 2000).

The analysis of the historical series of chemical data does not highlight a clear change in the water quality during the last thirty years (Fig. 4), in part because a lack of data concerning the flow rate of springs does not allow the analysis of the correlation between the chemical composition and amount of discharge.

An interpretative and schematic representation of the shape of the interface between fresh water and salt water in the spring area is shown in Figure 11. It comes from the comparison of the approximate model of Ghyben-Herzberg, which considers hydrostatic conditions, with the chemical and isotopic composition of the waters of the springs and borehole.

Based on the groundwater levels of the new borehole and of the wells drilled in the past, and on the emerging height of the springs,

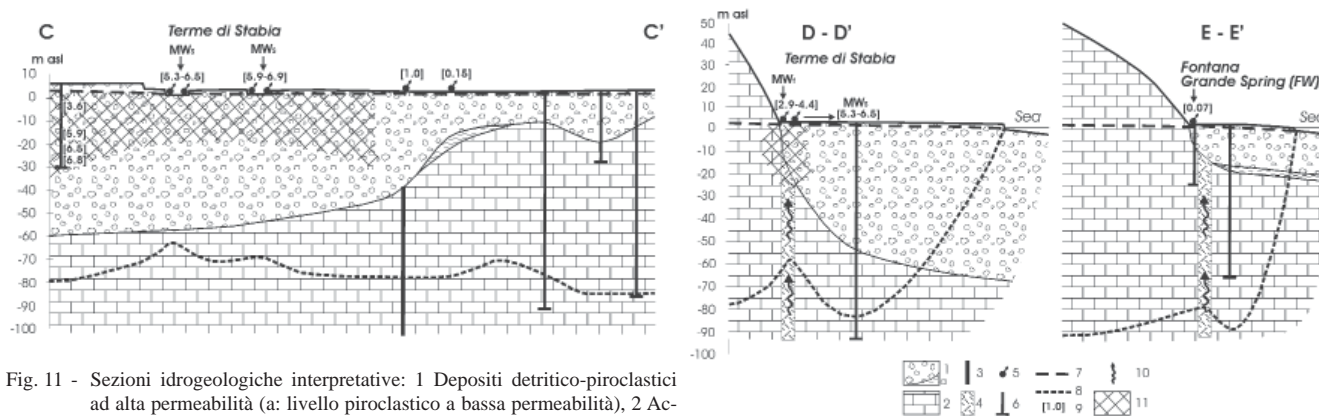


Fig. 11 - Sezioni idrogeologiche interpretative: 1 Depositi detritico-piroclastici ad alta permeabilità (a: livello piroclastico a bassa permeabilità), 2 Acquifero carbonatico, 3 Faglia, 4 Zona fratturata della faglia marginale, 5 Sorgente, 6 Perforazioni e pozzi, 7 Livello piezometrico, 8 Interfaccia secondo Ghyben-Herzberg, 9 Concentrazione dei cloruri in g/L, 10 Risalita di gas, 11 Zona di dispersione
 - Interpretative hydrogeological sections: 1 Highly permeable pyroclastic-detritic deposits (a: low permeability pyroclastic layer), 2 Carbonate aquifer, 3 Fault, 4 Fractured zone of the border fault, 5 Spring, 6 Boreholes and wells, 7 Groundwater level, 8 Ghyben-Herzberg interface, 9 Chloride content in g/L, 10 Rise of gas, 11 Zone of dispersion

a circa 35 (PISCOPO *et alii*, 2000) e considerando i livelli piezometrici rilevati nella nuova perforazione e nei pozzi realizzati in passato nell'area e la quota di emergenza delle sorgenti, è stato possibile ricostruire la forma dell'interfaccia di Ghyben-Herzberg lungo il fronte sorgivo. Come si può vedere in Figura 11 la forma dell'interfaccia evidenzia gli effetti indotti dal fenomeno di upconing in risposta al locale abbassamento del carico idraulico in prossimità della zona di emergenza delle sorgenti. In altre parole le sorgenti si comportano come un pozzo in pompaggio presso la costa (DAGAN & BEAR, 1968), abbassando localmente il livello piezometrico nell'intorno della zona di emergenza.

Se si considerano i gradi di mescolamento acqua dolce - acqua salata determinati per le sorgenti delle Terme, i profili di conducibilità elettrica e le analisi chimiche delle acque della perforazione, le analisi isotopiche e il contenuto di cloruri di tutte le sorgenti, è evidente che la fascia di transizione che separa le acque dolci e l'acqua salata è presente a ridotta profondità nella parte occidentale del fronte sorgivo. Ciò si può vedere in Figura 11 almeno in parte, confrontando il contenuto di cloruri rilevati nella perforazione con quello rilevato alle sorgenti delle Terme di Stabia.

Anche se si nota una generale coerenza tra la risalita dell'interfaccia in corrispondenza delle sorgenti ed il contenuto di cloruri, è evidente che il modello di Ghyben-Herzberg rappresenta solo una prima approssimazione per definire la forma dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata. Le acque salmastre e saline che emergono dalle sorgenti delle Terme di Stabia sono quindi da ricondurre anche alle altre cause citate in precedenza, cioè la distribuzione della portata dell'acquifero carbonatico lungo il fronte sorgivo e lo spessore e la permeabilità dei depositi di copertura delle rocce carbonatiche a valle delle sorgenti, oltre che alla anisotropia ed eterogeneità dell'acquifero ed alla possibilità di canalizzazioni carsiche.

the shape of Ghyben-Herzberg interface was reconstructed in the spring area. A value of about 35 (PISCOPO *et alii*, 2000) for the ratio $\rho_f/(\rho_s - \rho_f)$, where ρ_f and ρ_s are the densities of fresh and salt water respectively, was considered. As it reported in Figure 11 the shape of the interface highlights the effects of upconing in response to the local lowering of the hydraulic head near the emerging zone of the spring groups. In other words, the springs behave as a pumping well near the coastline (DAGAN & BEAR, 1968), locally lowering the piezometric level around the emerging zone.

Considering the percentage of mixing between fresh water and sea water determined for the Terme di Stabia springs, the logs of electrical conductivity and chemical characteristics of the borehole waters, the isotopic analyses and chloride contents of all springs, it results that the transition zone separating fresh water from salt water is shallow in the western side of the spring area. That can be partly seen in Figure 11, comparing the chloride contents of the borehole waters with those of the Terme di Stabia springs.

Though there is a general correspondence between the rise of the interface and chloride content near the springs, it is clear that the Ghyben-Herzberg model roughly represents the shape of the interface. Therefore the brackish and saline waters emerging from the Terme di Stabia springs are also due to the other previously cited causes, namely the variation of flow of carbonate aquifer along the stretch where springs emerge and the thickness and permeability of the covering deposits of the carbonate rocks down to the spring area, in addition to the anisotropy and heterogeneity of the aquifer and the possible presence of karst conduits.

CONCLUSIONI

La coesistenza di sorgenti di acqua dolce, salmastra e salina all'interno della piccola fascia costiera dell'acquifero carbonatico di Monte Faito è funzione della variazione della natura dei depositi di copertura dell'acquifero carbonatico, della quota di emergenza delle differenti sorgenti e della variazione della portata dell'acquifero carbonatico lungo il fronte sorgivo. Le sorgenti di acqua dolce drenano principalmente il flusso orizzontale della falda basale dei carbonati. Le sorgenti di acqua salmastra e salina possono essere spiegate con un differente grado di mescolamento tra acqua dolce ed acqua marina; la locale presenza di detriti molto permeabili a copertura dei carbonati facilita localmente l'ingressione di acqua marina nell'acquifero. Per queste ultime sorgenti, la componente verticale del flusso incrementa spostandosi verso costa, contestualmente aumentano la salinità, il contenuto di cloruri e gas. In particolare, l' H_2S caratterizza le sorgenti ubicate vicino la faglia marginale che ribassa la successione carbonatica verso mare.

La forma dell'interfaccia acqua dolce - acqua salata nell'intorno delle sorgenti è stata ricostruita in prima approssimazione mediante un approccio integrato comprendente le caratteristiche chimiche ed isotopiche delle differenti sorgenti e le informazioni ricavate dalla perforazione sperimentale. L'origine delle sorgenti di acqua salmastra e salina di Castellammare di Stabia sembra essere collegata ad una locale risalita dell'interfaccia dovuta all'abbassamento piezometrico nell'intorno della zona di emergenza, alle condizioni idrostratigrafiche locali ed alla più bassa portata dell'acquifero carbonatico rispetto a quella che affiora presso la principale sorgente di acqua dolce.

Il modello idrogeologico concettuale delineato non è risolutivo in quanto richiede ulteriori verifiche e miglioramenti anche mediante simulazioni numeriche. Tuttavia esso sembra essere allo stato attuale delle conoscenze appropriato per spiegare una realtà idrogeologica complicata dalla presenza di un acquifero fratturato e talvolta carsificato, dalla intrusione di acqua marina e dalla risalita localizzata di gas di provenienza profonda.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato condotto con il contributo del PRIN 2008 - prot. 2008YYZKEE_002.

Gli autori desiderano ringraziare le Terme di Stabia, nelle persone dell'ing. Salvatore Ioviene, dott. Mario Marasca, geom. Alfonso Somma e geom. Vincenzo Visconti, per la disponibilità ed il supporto alle attività di campo. Gli autori ringraziano anche i revisori per gli utili e costruttivi commenti.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ARFIB B., DE MARSILY G. & GANOULIS J. (2007) - *Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using spring flow*. Ground Water, **45** (1): 28-35.
- BONACCI O. & BONACCI T.R. (1997) - *Seawater intrusion in coastal karst springs: example of Blaz Spring (Croatia)*. Hydrol. Sc. J., **42**: 89-100.
- BONARDI G., D'ARGENIO B. & PERRONE V. (1988) - *Carta geologica dell'Appennino meridionale (1: 250000)*. Atti del 74° Congr. Soc. Geol. d'It., 13-17 Settembre 1988, Sorrento (Napoli).
- CELICO P., ALIBERTI F., BISCARDI D., DE FUSCO R., MAZZACCA F.R. & PAOLETTI A. (1986) - *Relazioni tra idrodinamica sotterranea e caratteristiche fisico-chimiche delle acque minerali di Castellammare di Stabia*. Atti Cong. Int. Igiene e Medicina Termale e Ambientale, 24-26 ottobre, Castellammare di Stabia, Napoli, 127-144.

CONCLUSIONS

The co-existence of fresh, brackish and saline water springs within a small coastal stretch of the carbonate aquifer of Mount Faito is related to the variation in composition of the deposits that cover the carbonate aquifer, the height of emergence of the different springs and the variation of the flow of the carbonate aquifer in the spring area. Fresh water springs drain mainly the horizontal flow of the basal carbonate aquifer. Brackish and saline springs can be explained as different ratios of mixing between fresh water and seawater; the local presence of a highly permeable detritic coverage of the carbonate rocks facilitates the salt water intrusion in the aquifer. For these last springs, the vertical component of flow increases towards the coastline, while simultaneously the salinity and chloride contents of the water springs and the dissolved gases increase. In particular, the H_2S characterises the springs located near the border fault that lowers the carbonate succession towards the sea.

The shape of the fresh water - salt water interface in the spring area was reconstructed using an integrated approach involving the use of hydrochemical and isotopic characteristics of the different spring groups and the information derived from an experimental borehole. A local rise of the interface due to lowering of the hydraulic head around the emerging zone, the local hydrostratigraphy and the lower discharge of the carbonate aquifer in the western side of the spring area seem to be the main causes of the brackish and saline springs of Castellammare di Stabia.

The conceptual hydrogeological model outlined is not final since it needs further controls and improvements also through numerical simulations. Nevertheless, at the present state of knowledge, it seems to be appropriate to explain a complex hydrogeological environment owing to the presence of fractured and sometimes karstified aquifer, saltwater intrusion and localised rise of deep gases.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out with a contribution under PRIN 2008 - prot. 2008YYZKEE_002.

The authors would like to thank the Terme di Stabia, in the persons of Eng Salvatore Ioviene, Dr Mario Marasca, surveyors Alfonso Somma and Vincenzo Visconti, for allowing and supporting field operations. The authors are grateful to the reviewers for their helpful and constructive comments.

INTRUSIONE MARINA NEGLI ACQUIFERI CARBONATICI: IL CASO DEL FRONTE SORGIVO DI CASTELLAMMARE DI STABIA (NAPOLI)

- CELICO P. & CORNIELLO A. (1979) - *Idrodinamica, potenzialità e possibilità di sfruttamento delle risorse idriche sotterranee dei Monti Lattari (Campania)*. Mem. e Note dell'Ist. Geologia Applicata di Napoli, **15**: 1-28.
- CELICO P., PISCOPO V. & STANZIONE D. (1998) - *Sulla genesi di alcune acque minerali effervescenti della Campania (Italia meridionale)*. Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol., **73**: 167-180.
- CLARK I. D. & FRITZ P. (1997) - *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, New York.
- COST ACTION 621 (2005) - *Ground Water Management of Coastal Karstic Aquifers*. L. TULIPANO Ed., Luxembourg, 363 pp.
- CRAIG H. (1961) - *Isotopic variations in meteoric waters*. Science, **133**: 1702-1703.
- CUSTODIO E. (2010) - *Coastal aquifers of Europe: an overview*. Hydrogeol. J., **18**: 269-280.
- DAGAN G. & BEAR J. (1968) - *Solving the problem of local interface upconing in a coastal aquifer by the method of small perturbations*. J. Hydrol. Res., **6**: 15-44.
- DRAGONI W. & SUKHIA B.S. (2008) - *Climate change and groundwater: a short review*. In: *Climatic Change and Groundwater*, W. DRAGONI & SUKHIA B.S. Ed., Geological Society of London, London, 1-12.
- FITZPATRICK M.L., LONG D.T. & PIJANOWSKI B.C. (2007) - *Exploring the effects of urban and agricultural land use on surface water chemistry, across a regional watershed, using multivariate statistics*. Appl. Geochem., **22**: 1825-1840.
- FLEURY P., BAKALOWICZ M. & DE MARSILY G. (2007) - *Submarine springs and coastal karst aquifers: a review*. J. Hydrology, **339**: 79-92.
- GONFIANTINI R. & ARAGUAS-ARAGUAS L. (1988) - *Los isotopos ambientales en el estudio de la intrusion marina. Tecnologia de la intrusion en acuíferos costeros*. Inst. Geol. y Minero de Espana, Madrid, **1**: 135-190.
- LONGINELLI A. & SELMO E. (2003) - *Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map*. J. Hydrology, **270**: 75-88.
- MARAMATHAS A. (2006) - *A new approach for the development and management of brackish karst springs*. Hydrogeol. J., **14**: 1360-1366.
- MEGLIN R.R. (1991) - *Examining large databases: a chemometric approach using principal component analysis*. J. Chemometrics, **5**: 163-179.
- MILIA A. & TORRENTE M. (1997) - *Evoluzione tettonica della penisola sorrentina (margini peritirrenico campano)*. Boll. Soc. Geol. It., **116**: 487-502.
- NOTA D'ELOGIO E. (1979) - *Le acque minerali e termali della Provincia di Napoli*. Mem. e Note dell'Ist. Geologia Applicata di Napoli, **15**: 4-108.
- PAOLETTI A., ALIBERTI F., BISCARDI D., CELICO P., DE FUSCO R., GARGIULO E., MAZZACCA F.R., MELLUSO G., PARELLA A., LIONETTI E., NEBULOSI R. & ROMANO L. (1986) - *Il fronte sorgentizio di Castellammare di Stabia*. Atti Cong. Int. Igiene e Medicina Termale e Ambientale, 24-26 Ottobre, Castellammare di Stabia, Napoli.
- PISCOPO V., ALLOCCA V., BRUSA G., CESARIO M., MONETTI V. & PIANESE L. (2000) - *Il fronte sorgivo di Castellammare di Stabia (Napoli): variazione del grado di mineralizzazione delle acque sotterranee per l'eterogeneità dell'acquifero carbonatico costiero*. Boll. Soc. Geol. It., **119**: 567-580.
- PISCOPO V., FUSCO C. & LAMBERTI A. (1994) - *Idrogeologia dei Monti Lattari (Campania)*. Quad. Geologia Appl., **2 (95)**: 359-366.
- POLEMIO M., DRAGONE V. & LIMONI P.P. (2009) - *Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy)*. Environ. Geol., **58**: 299-312.
- REYMENT R.A. & JORESKOG K.G. (1996) - *Applied Factor Analysis in the Natural Sciences*. Cambridge University Press, 383 pp.
- SANDFORD W., LANGEVIN C., POLEMIO M. & POVINEC P. (2007) - *A new focus on groundwater-seawater interactions*. IAHS Publications, **312**, IAHS, 344 pp.
- SANZ E., CUSTODIO E., CARRERA J., AYORA C., BARÓN A. & GONZÁLES C. (2002) - *Modelling coastal salty springs: first approach in carbonate media (S'Almadrava, Mallorca, Spain)*. Proc. 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, May 2002, 195-203.
- SPRINGFIELD V.T. & LeGRAND H.E. (1969) - *Relation of sea water to fresh water in carbonate rocks in coastal area, with special reference to Florida, USA, and Cephalonia (Kephallinia), Greece*. J. Hydrology, **9**: 387-404.
- TERME DI STABIA (2003) - *Rapporto sulle analisi chimiche delle sorgenti delle Terme di Stabia*. Castellammare di Stabia, Napoli.

Received June 2009 - Accepted May 2010