

LUCIANO BALLARIN<sup>1</sup>, LUCA D'AMELIO<sup>1</sup>, FULVIO FORTI<sup>1</sup>, VANNA GENTILLI<sup>1</sup>,  
STEFANO PISELLI<sup>1</sup>, ALESSANDRO RAPONI<sup>1</sup>, RINO SEMERARO<sup>1</sup> & ROBERTO VANON<sup>1</sup>

## THE KARSTIC AQUIFER IN THE REGION OF THE "CARSO": REVIEW OF HYDROGEOLOGY AND GEOCHEMISTRY\*

### Abstract

BALLARIN L., D'AMELIO L., FORTI FU., GENTILLI V., PISELLI S., RAPONI A., SEMERARO R. & VANON R. (2000) - *The Karstic Aquifer in the Region of the "Carso": Review of Hydrogeology and Geochemistry. L'aquifero carsico nella regione del Carso: sintesi idrogeologica e geochimica* - *Ipogea*, 3: 13-32.

The present note is a synthesis of the present knowledge on the karstic hydrology of the Trieste Karst. The geological and morphological aspects of the area, the hydrology, chemistry and isotope geochemistry of the underground waters are considered. In particular the coastal zone is taken into account. Moreover, some fundamentally important hydrogeological problems that have not yet been solved are pointed out. © 2000 GSSG/IPOGEEA. All rights reserved.

**Key Words:** Regional Geology, Karst Hydrogeology, Chemistry and Isotope Geochemistry of underground waters, The Trieste Karst, northeast-Italy-Slovenia.

**Parole chiave:** Geologia regionale, Idrogeologia carsica, chimica e geochimica isotopica delle acque sotterranee, Carso Triestino, Italia NE-Slovenia.

<sup>1</sup> *Geokarst Engineering S.r.l., Centre for Isotope Geochemistry - AREA Science Park, Padriciano 99, 34012 Trieste, Italy, E-mail: geokarst@com.area.trieste.it*

(\* Extended text from the Lectures presented by L. Ballarin in COST Action 621 "Groundwater management of coastal karstic aquifers", 6<sup>th</sup> Management Committee Meeting, National Technical University of Athens, Athens 29-31 October 1999, and 7<sup>th</sup> Management Committee Meeting, Karst Research Institute of Scientific Research Centre of Slovene Academy of Sciences and Arts, Postojna 23-25 March 2000.

### Index

INTRODUCTION	pag.	13
1. GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL FRAMEWORK	»	14
2. HYDROGEOLOGY OF THE TRIESTE KARST SYSTEM	»	16
3. HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF THE AQUIFER	»	19
4. HYDROGEOLOGY OF THE COASTAL AREA	»	20
5. HYDROGEOLOGY OF THE CONTACT DEEP ALLUVIAL AREA	»	21
CONSIDERATIONS	»	21
Summary	»	22
Riassunto	»	22
REFERENCES	»	27

### INTRODUCTION

The present note synthetically illustrates the fundamental hydrogeologic aspects of the Trieste Karst

(or simply the Karst). It is a territory, as it is well known, characterized by a mixed (autogenig-allogenic karst system), low-average height and coastal karst with a very big network of cavities. The coastal area of karstic

aquifer, where the springs of the system are localized with the Resurgences of the Timavo, is particularly illustrated. This note considers the present data on its hydrogeology, particularly on its geochemical aspects, with a list of the fundamental references. All this in the perspective of vast, finalized researches of isotope geochemistry and geophysics that are being carried out on the basins of the rivers Isonzo and Timavo by *Geokarst Engineering - AREA Science Park* with its *Centre for Isotope Geochemistry* together with *O.G.S. (Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale)*. These researches (*"MICA Project"*, *Legge N. 26/1986*) aim at obtaining the technological and scientific know how for the study and evaluation of karst and porous reservoirs. Moreover, we carry out parallel researches within the *COST Action 621 "Groundwater Management of Coastal Karstic Aquifers" European Commission, Directorate General XII: Science, Research and Development*.

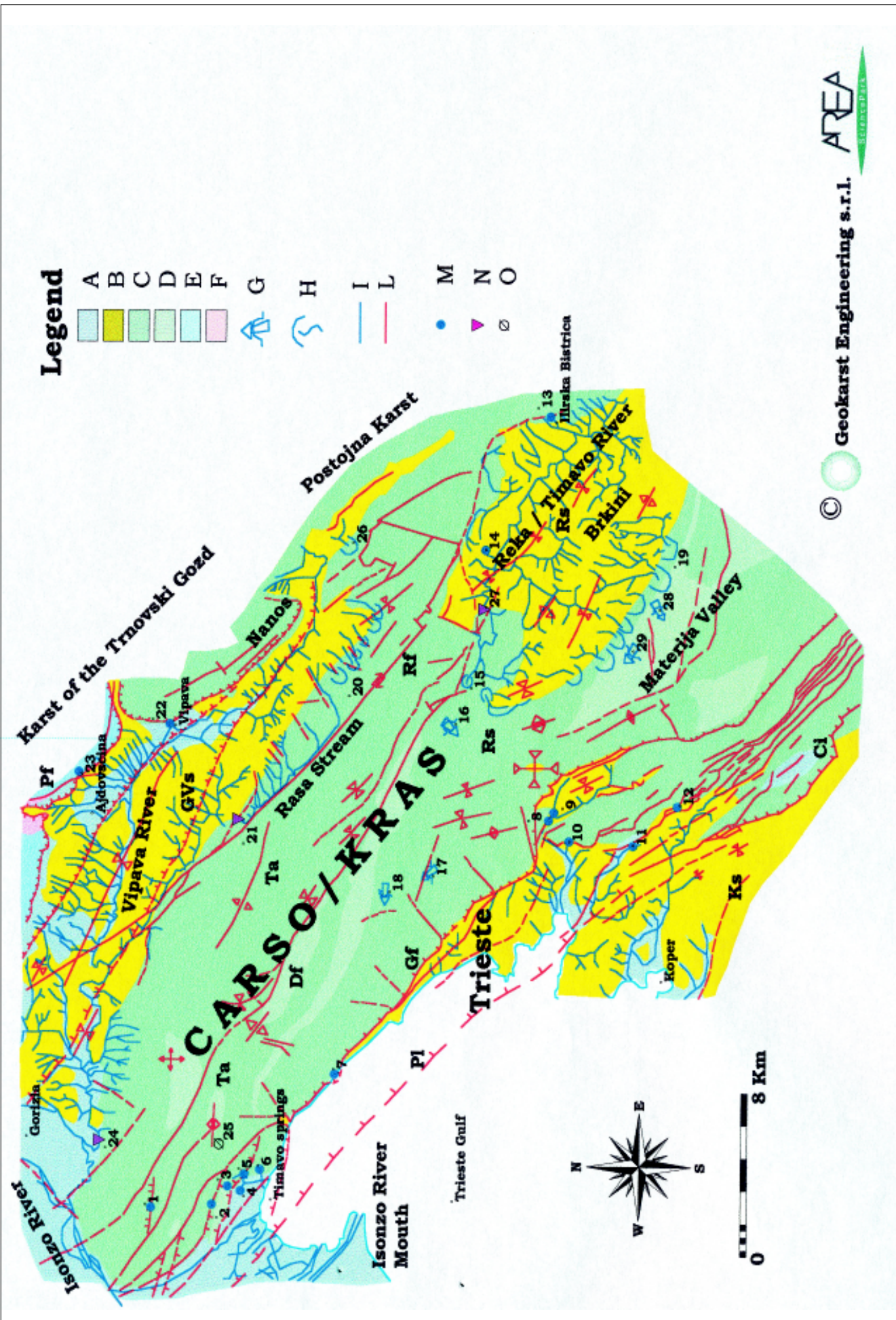
## 1. GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL FRAMEWORK

The Karst (Fig. 1), widely illustrated by the existing literature, is, structurally and summarily, a southeast-northwest faulted anticline that encompasses the Cretaceous-Paleocene, or more precisely from the Aptian to lower Eocene outcropping terrains. The area is the region called the "Carso" (Italian), "Kras" (Slovenian) or "Karst" (German) and corresponds to the "Triestiner Karst" of the first studies by G. Stache, A. Grund, and others, who defined its geological and hydrological

hydrological homogeneity at the beginning of '800 and end of '900. Important southeast-northwest faults having a regional character are: the "Rasa fault", which crosses the northern edge of the Karst; the "Divacia fault" (south-eastern prosecution of the thrust-fault of Udine), which passes in the central area of the Karst and locally causes the overlying of the Paleocene on the Cretaceous. Finally, on the southern edge the faults auxiliary the "Palmanova line" that determine the overthrusting of the Karst on the Eocene Flysch, among them the major observed is the "S. Giovanni fault". For this reason, the south-western edge of the Trieste Karst is like a big structural slope. From the geodynamic point of view the Karst has a very weak seismic activity. On the anticline (also called by the Slovenian authors the "Trieste-Komen anticline") local anticlines especially characterize the north-western area (Brestovica, Brje, Vojsicka); local synclines, instead, characterize the area to the north of the "Divacia fault" (Komen, Koprova), while small anticlines-synclines are localized in the south-eastern area (between Gaberk and Basovizza). To the north the Trieste Karst closes in correspondence with the "Gorizia-Vipacco syncline", to the south in correspondence with the "Trieste-Capodistria/Koper syncline", both in the Eocene Flysch. To the east it (weakly) borders on the Eocene Flysch of the "Senozee syncline" and of the area of Brkini, while to the south of the "upper Timavo syncline" in Flysch (north-western ending of the "Rijeka Synclinorium") it borders on the "Cicarije anticline". To the west the Karst borders on the floods of the Isonzo River, under whose plain it immerses.

Fig. 1 - Hydrogeological map of the Carso/Kras. Legend: A) Quaternary: deposits: intergranular porosity; B) Eocene: marly-arenaceous Flysch: impermeable rocks; C) Cretaceous-Paleocene-Eocene: calcareous rocks; highly permeable rocks; D) Cretaceous: dolomitic rocks: moderately permeable rocks; E) Jurassic: calcareous rocks: highly permeable rocks; F) Triassic: dolomitic rocks: moderately permeable rocks; G) underground river/stream; H) sink hole; I) hydrography; L) tectonic; M) spring; N) loss; O) well; 1 = Springs of Doberdò Lake; 2 = Springs of Sablici; 3 = Springs of Moschenizze; 4 = Springs of Lisert; 5 = Spring of Sardos; 6 = Resurgences of the Timavo; 7 = Springs of Aurisina; 8 = Spring of Clinciza; 9 = Springs near southwest Botazzo; 10 = Springs of Bagnoli; 11 = Spring and Ospò/Osp Cave; 12 = Spring of the Risano/Rizana; 13 = Springs of Ilirska Bistrica; 14 Spring of Podstenjek; 15 = S. Canziano Caves/Skocjanske Jame; 16 = "Abisso dei Serpenti" / "Kacna Jama" (abyss) (subterranean Timavo); 17 = "Abisso di Trebiciano" (abyss) (subterranean Timavo); 18 = "Grotta Lazzaro Jerko" (cave) (subterranean Timavo); 19 = sink holes of Materija Valley streams; 20 = sink holes of Dolenja Vas streams; 21 = loss of the Rasa Stream; 22 = Springs of Vipacco/Vipava; 23 = Spring of Hubelj; 24 = loss of the Vipacco/Vipava River (S of Vertoce/Vrtojiba); 25 = well and pump station of Klarici; 26 = sink hole of the Sajevski potok (stream); 27 = temporary sink hole of the Reka/Timavo River near Vreme; 28 = "Grotta del Fumo"/"Jama Dimnice" (cave); 29 = underground stream of north-western sink holes in Materija Valley; Pf = Predijama fault; GVs = Gorizia/Vipacco synclinorium; Rf = Rasa fault; Df = Divacia fault; Ta = Trieste-Komen antyclinorium (or "Trieste-Komen plateau"); Gf = San Giovanni fault (or "Trieste fault"); Pl = Palmanova line; Rs = Rijeka synclinorium (or "Paleogene basin of Rijeka"); Ci = Cicarije imbricate structure (or "Thrust structure of Cicarije"); Ks = Trieste-Koper synclinorium (or "Paleogene basin of Trieste").

Fig. 1 - Carta idrogeologica del Carso/Kras. Legenda: A) Quaternario: depositi: porosità intergranulare; B) Eocene: Flysch marnoso-arenaceo: rocce impermeabili; C) Cretacico-Paleocene-Eocene: rocce calcaree: rocce altamente permeabili; D) Cretacico: rocce dolomitiche: rocce moderatamente permeabili; E) Giurassico: rocce calcaree: rocce altamente permeabili; F) Triassico: rocce dolomitiche: rocce moderatamente permeabili; G) fiume/torrente sotterraneo; H) inghiottitoio; I) idrografia; L) tettonica; M) sorgente; N) perdita; O) pozzo; 1 = Sorgenti del Lago di Doberdò; 2 = Sorgenti di Sablici; 3 = Sorgenti di Moschenizze; 4 = Sorgenti del Lisert; 5 = Sorgente Sardos; 6 = Risorgive del Timavo; 7 = Sorgenti di Aurisina; 8 = Sorgente Clinciza; 9 = Sorgenti a SE di Botazzo; 10 = Sorgenti di Bagnoli; 11 = Sorgente e Grotta dell'Ospò/Osp; 12 = Sorgente del Risano/Rizana; 13 = Sorgente di Ilirska Bistrica; 14 = Sorgente Podstenjek; 15 = Grotte di S. Canziano/Skocjanske Jame; 16 = Abisso dei Serpenti/Kacna Jama (Timavo ipogeo); 17 = Abisso di Trebiciano (Timavo ipogeo); 18 = Grotta Lazzaro Jerko (Timavo ipogeo); 19 = inghiottitoio dei torrenti del vallone di Materija ("Valsecca di Castelnuovo"); 20 = inghiottitoio dei torrenti di Dolenja Vas; 21 = perdite del T. Rasa; 22 = Sorgenti del Vipacco/Vipava; 23 = Sorgente di Hubelj; 24 = perdite del F. Vipacco/Vipava (a S di Vertoce/Vrtojiba); 25 = pozzi e stazione di pompaggio di Klarici; 26 = inghiottitoio del Sajevski potok; 27 = inghiottitoio temporaneo del Reka/Timavo a Vreme; 28 = torrente della Grotta del Fumo/Jama Dimnice; 29) torrente sotterraneo degli inghiottitoio nord-occidentali del vallone di Materija; Pf = faglia di Predijama; GVs = sinclinorio Gorizia-Vipacco; Rf = faglia del Rasa; Df = faglia di Divacia; Ta = anticlinorio di Trieste-Komen (o plateau "Trieste-Komen"); Gf = faglia di San Giovanni (o "faglia di Trieste"); Pl = linea di Palmanova; Rs = sinclinorio di Rijeka (o "bacino paleogenico di Rijeka"); Ci = struttura embriata della Cicarije (o "struttura a Thrusts della Cicarije"); Ks = sinclinorio Trieste-Koper (o "bacino paleogenico di Trieste").



The plateau develops from average heights of 600 m in the south-western area (border on the area of Postojna and on the valley of Materija), reaching heights of a few dozens of metres in the area of the Springs of the Timavo, with a central ridge Mt. Lanaro-Mt. Castellaro. In general, the geomorphologic aspect is that of a medium-low height plateau with a temperate climate (locally sub-alpine), relatively hilly, with wide plains, characterized by dolines and by residual hills, with more or less highly karstified layers according to the outcropping lithologies. The Stream Rasa, the upper Timavo River/Reka and the Rosandra Stream are representative of the only hydrography in direct contact with the Trieste Karst.

As for the geologic framework see BALLARIN & SEMERARO (1997), BUSER (1973/a, 1973/b), CAROBENE & CARULLI (1981), CARULLI *et al.* (1980), CARULLI & CUCCHI (1991), CUCCHI *et al.* (1987), D'AMBROSI (1953, 1955/a, 1961/a), DEL Ben *et al.* (1991); JURKOVSEC *et al.*, (1996/a, 1996/b), MARTINIS (1951), PLENICAR *et al.* (1973/a, 1973/b), STACHE (1920/a, 1920/b), TENTOR *et al.* (1994).

## 2. HYDROGEOLOGY OF THE TRIESTE KARST SYSTEM

Essentially, as a result of a century of hydrogeologic researches on this area, famous for its karst phenomena, the aquifer of the Trieste Karst is substantially fed by: the precipitations on the area, the upper Timavo River (Reka), which is swallowed in the Caves of S. Canziano/Skocjanske Jame (Slovenia), and the contributions from the phreatic aquifer on the left of the Isonzo River (plain of Gorizia). The average height of the plateau is between 200-500 m above the sea level. The rainfalls on the basin are between 1,350-1,650 mm/average/annual, recorded on the medium-long term in the stations of "Borgo Grotta Gigante" (275 m), Godnje (295 m), Komen (289 m), Matavun (426 m) (COLUCCI, 1999; PETRIC & KOGOVSEK, 2000). The infiltration, according to CIVITA *et al.* (1995), would be over  $6 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/year (20 m<sup>3</sup>/sec). The total losses of the Timavo/Reka River (8.9 m<sup>3</sup>/sec), the partial/total ones of the north-eastern basins (the Rasa Stream, etc.), and those of the Vipacco River, for an estimated total of  $\sim 3 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/year, must be added to this infiltration. The losses of the Isonzo River estimated in some m<sup>3</sup>/sec and those only supposed of the area that borders on the Materja valley must be added to the above-described quantity. The karstic area, according to many authors, would vary from  $\sim 700$  to over 1,000 km<sup>2</sup>, with an evapotranspiration between 0.6 and 0.35, with uncertain data, rather relevant, of the inputs of the above-mentioned allogenic contributions. Our opinion is that a hydrological balance of the basin, with a better approximation to reality than the past one (BIDOVEC, 1965; BOEGAN, 1938; D'AMBROSI, 1955/b, 1961/c; 1961/d; CIVITA *et al.*, 1995; MOSETTI, 1965, 1966/a;

etc.) is still to be carried out.

The penetration of the Timavo in the subterranean aquifer occurs in function of its highly stream-like regime (flow of the Reka:  $Q_{\min}$  0.16 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{\text{ave}}$  8.95 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{\max}$  387 m<sup>3</sup>/sec) underlined by the ratio between minimum and maximum flows 1:2,400. The natural minimum flow of the Reka is 0.16 m<sup>3</sup>/sec, however after the construction of two basins in the area of "Villa del Nevoso" ("Ilirska Bistrica") the minimum flow is regularised so as it does not drop below 1 m<sup>3</sup>/sec. During catastrophic floods (memorable events) the Caves of San Canziano are not able to drain waters and then they are partially submerged; sometimes inside them a dynamic level is reached at a height of over 300 m above the sea level. Normally, in the tract preceding the swallowing in the Caves of San Canziano, the upper Timavo loses most of its flow because of karst phenomena, while during low water periods losses are total.

The contribution of the waters of the aquifer of the Isonzo River especially regards the western springs (Doberdò, Moschenizze, Sablici, Lisert). It has been supposed (however, not proven by tracing tests yet) by the trend of isophreatics in the alluvial area of Gorizia between the Isonzo and Vipacco Rivers, which show a depression (discharge) that enters the Karst, by hydrochemical data of the western springs themselves and by isotope data. The western springs have substantial similarities with the waters of the Isonzo, among which the outstanding ones are a minor total hardness and a significant ratio Ca/Mg lower than that of the Timavo. Also the isotope geochemistry shows a remarkable provenience from the Isonzo:  $\delta^{18}\text{O}$  (H<sub>2</sub>O) of these springs indicates characteristic negative values in the order of  $-8.5$ - $9\%$  in respect with the waters of the Timavo system. They correspond to the waters of the mountain basin of the Isonzo, their  $\delta^{18}\text{O}$  (H<sub>2</sub>O) reaches values of the order of  $-9.5\%$  especially during thaws. As for the isotope composition of the oxygen the available data first underline the feeding uniformity of the three main Springs of the Timavo. Secondly, they remind a similar feeding between these springs and those of South Moschenizze and Sardos. Also the more western springs like Doberdò, Pietrarossa, Lisert and North Moschenizze are quite similar among them. Since they have an annual average isotope value more negative than that of the former ones, they are more influenced by the water reservoirs fed at higher altitudes than the average ones of the Trieste Karst and therefore they might be referred to the Isonzo basin. In particular, the Spring Sardos, placed between the above-mentioned western springs and the Timavo, has intermediate characteristics among these families of waters. Tracing tests (TIMEUS, 1928) have proven a contribution to the western springs from the Vipacco, which is divided by the basin of the Timavo in the whole mountain area (POLAJNAR *et al.*,

1997; TRISIC, 1997) but which would lose a part of its waters when it enters the limestones near the plain of Gorizia. However, from geochemical data, it would be a rather limited contribution.

The Springs of the Timavo, ( $Q_{ave}$  30 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{max}$  158 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{min}$  7.4 m<sup>3</sup>/sec) with three big submerged mouths connected by a network of passages that reach a depth of about 80 metres, as subaqueous explorations and geophysics indicate (GUGLIA, 1994; MORELLI, 1954; MOSETTI, 1954/a), are characterized by “karst waters” (contributions of precipitations on the Karst). These waters have a ratio Ca/Mg higher than that of the western springs, while in autumn floods the values of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub> sensibly grow as well as those of turbidity due to the “natural tracing” caused by the upper Timavo whose basin is placed in Flysch. During spring floods, instead, waters have lower Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>, perhaps due to a “signal” of the Isonzo. On the contrary, during summer floods the “signal” of the Isonzo is outstanding, with low values of Ca<sup>2+</sup>, from which we would deduce a major contribution of the waters coming from the Isonzo, which would partly compensate the minor dynamic karst-reservoirs rich in carbonates. The flows of the northern springs (Sardos, Lisert, Sablici, Moschenizze) would amount to a  $Q_{ave}$  of ~5 m<sup>3</sup>/sec. Therefore, total flows, inclusive of those of Aurisina, would amount to a  $Q_{ave}$  of ~35 m<sup>3</sup>/sec.

On the bottom of Trebiciano Abyss (BOEGAN, 1909/10, 1921, 1938), placed between the Caves of San Canziano and the Springs of the Timavo, a subterranean river flows at an average height of 19.6 m above the sea level (low water 11.5 m). It is called the “subterranean Timavo” with estimated  $Q_{ave}$  of 3.4-4.6 m<sup>3</sup>/sec, and it flows in a network of mostly submerged passages, in the “Dolomite Complex” (Cenomanian), coming from south-south-east (FORTI *et al.*, 1978; GUGLIA, 1994; MAUCCI, 1953/b). During floods the water level in this cave rises up to 115 m. The river has resulted to be in connection with the Timavo in San Canziano (TIMEUS, 1928; etc.), even though a big share of the flowing water is supposed to come from the karst basin (MOSETTI, 1965, 1989). The official opinion is that the subterranean Timavo flows, then, from Trebiciano to the resurgences in one or more conduits alternated between tracts in phreatic conduits (“syphons”) and tracts in vadose conduits (GEMITI, 1966, 1984/a, 1998), draining the whole water of the upper Timavo.

Uphill of Trebiciano Abyss the subterranean Timavo flows, at ~10 km towards east-north-east, on the bottom of “dei Serpenti” Abyss/Kacna Jama (MIHEVIC, 1984; SEMERARO, 1982) within a vast network of passages (many kilometres), where it mostly flows in vadose conduits. Farther the uphill siphon subaqueous explorations have enabled to arrive, by now, at less than 1 km from S.Canziano Caves. In “dei Serpenti” Abyss the underground Timavo flows at heights of

~182-156 m above the sea level. Here during floods the water level rises even for ~90 m. However, it is not clear yet whether the Timavo in S.Canziano Caves and in “dei Serpenti” Abyss represents a piezometric level or is simply a “hanging” watercourse. This is an interpretation suggested by SEMERARO (1982) some time ago and it is still discussed. The fact that the underground Timavo appears flowing (from the present data) from the north to the south (besides to the west like a hydraulic vector), from S.Canziano Caves to “dei Serpenti” Abyss as far as Trebiciano Abyss, may be put in relation with the position of the “Dolomitic Complex”. This “Dolomitic Complex”, from the beginning of the development of its galleries, would influence a course (BALLARIN & SEMERARO, 1997) firstly in the Cretaceous highly karstifiable calcareous rocks to the south of the dolomitic lithozone cropping out to the north of the swallowing area. Then, because of stadial deepening, it would influence a course also in the dolomitic rocks. Recently, at ~ 3.5 km north-west from Trebiciano Abyss, on the floor of “Lazzaro Jerko” Cave a tract of an underground river has been discovered; it flows from east to west, at an approximate height of 6 m above the sea level. In this case the waters are almost surely those of the upper Timavo/Reka (information by F. Gemiti from unpublished data). Some deep caves intercept the aquifer in the central-southern area of the Karst. Apart from the caves near the Resurgences of the Timavo, those in the internal area of the plateau that have water basins are: “Claudio Skilan” Cave (-378 m) at a height of ~ 3 m above the sea level and “Massimo” Abyss (-227 m) at a height of ~0-3 m above the sea level. “Dei Cristalli” Abyss (-205 m) and “Lindner” Cave (-177.5 m), instead, are periodically flooded by waters flowing up from an aquifer that is supposed to be placed at a presumed level between 2-5 m. Since topographical data of caves (apart from Trebiciano Abyss) are uncertain, these heights must be thought of – we repeat it – as approximate. Sporadic observations in “Massimo” Abyss have shown raisings of the piezometric level of over 30 m (ANSELMINI & SEMERARO, 1984), whereas in continuum recordings in “Lindner” Cave have shown raisings up to 20 m (GEMITI & MILANI, 1977).

Data or interpretations of the illustrated circuit are taken from BALLARIN & SEMERARO (1979), BORDON *et al.* (1998), CANCIAN (1997, 1998), FLORA *et al.* (1990), GABUCCI *et al.* (1973), GEMITI (1994, 1966), GEMITI & LICCIARDELLO (1977), MOSETTI (1966, 1989), MOSETTI & POMODORO (1967). As for the temperature of the waters of the resurgences see also FLORA *et al.* (1990), FORTI & TOMMASINI (1965), TOMMASINI (1968, 1969). The data of the tests relative to the artificial tracings, by means of which the links among the upper Timavo / subterranean Timavo in Trebiciano Abyss / Springs of Aurisina / Springs of the Timavo / western springs have

been identified, are referred to the studies by ERIKSSON *et al.* (1963), GEMITI (1984/a, 1988), HABIC (1989), MOSETTI (1965), MOSETTI *et al.* (1963), TIMEUS (1928). For the story of the researches of the underground Timavo see GALLI (1999).

Substantially, one of the fundamental questions regarding the feeding of karst springs is represented by the share of the phreatic waters of the Isonzo, which would penetrate the north-western final part of the Karst. The contribution of the Isonzo was firstly supposed on geologic and hydrologic bases by BIDOVEC (1957, 1960), D'AMBROSI & MOSETTI (1965, 1972), MORGANTE *et al.* (1966), then identified on hydrochemical basis especially by CANCIAN (1987), GEMITI & LICCIARDELLO (1977), and MOSETTI & POMODORO (1967). Subsequently, from the geochemical-isotope data by FLORA *et al.* (1990) and LONGINELLI (1988), it has been identified again on the basis of the reinterpretation firstly proposed by GEMITI (1994) BALLARIN & SEMERARO (1977) and then by DOCTOR *et al.* (2000). This contribution is one of the "key points" of the karst hydrology of the area. Correlations between the flood curves of the Isonzo River in Gorizia and those of the Doberdò Lake show a delay from 3 to 5 days in Doberdò. On the contrary, near cavities, which reach the aquifer but are not directly linked to the canalizations of the presumed system Isonzo/Doberdò/ western springs, are affected only by the local meteoric contribution (NICOLETTIS, 1983). In this framework BARBIERI *et al.* (1998, 1999) and REISENHOFER *et al.* (1996, 1998) remarkably deepened the studies, by discriminating, using statistic methods, the physical-chemical parameters of the springs, confirming the data obtained by other authors in the past. Firstly (REISENHOFER *et al.*, 1996) it was possible to frame and to distinguish the three main springs of the Timavo one from the other (in particular the 3° spring was distinguished from the others). Although they are very near and apparently chemically very similar it was possible to do so by evaluating the content of some metals present in traces (Pb, Cu, Zn, Cd) using the DPASV technique. Subsequently, (REISENHOFER *et al.*, 1998) 11 sites were considered in the same area, where six physical-chemical parameters were determined (temperature, pH, conductivity, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Then by using the uni and multivariate statistic analysis, once again it was possible to distinguish a "typically karstic" group of waters from a second group. This second group is placed more to the north and is influenced by the waters of the Isonzo River (sulphates and pH were the most significant parameters for this distinction). The results obtained were later reconfirmed using statistic methods (three-way methods) that allowed the two factors, spatial and seasonal (BARBIERI *et al.*, 1999), which affect the quality of the waters, to be identified. Doc-

TOR *et al.* (2000) took a further step in distinguishing these waters by measuring high quantities of mercury diluted in Doberdò, Salici, Moschenizze North and in the pit B-4 in Klarici, or better a typical parameter in the Isonzo River (mines in Idria).

On the south-eastern edge of the Karst, in the area of the Rosandra Valley, many karst springs having weak flows flow out and they are influenced by the presence of aquicludes. These are represented by wedges of marls and of marly-arenaceous Flysch localized within the reverse faults, which characterized the landscape towards south-east of the anticline of the Karst of Trieste with the "Cicarije imbricate structure" (Mountainous Istria). Hydrogeologic and isotope geochemistry data of the springs and of the underground water courses (BALLARIN *et al.*, 1994; D'AMELIO *et al.*, 1997) confirm this influence.

The influence of the marly-arenaceous Flysch, which is the bed of the southeast-northwest, northeast dipping, reverse faults auxiliary the "Palmanova line" is very important for hydrology. On these faults rigid, carbonate rocks of the Karst characterizing the southern closure of the anticline (AMATO *et al.*, 1976; PLACER, 1981) have overthrust. The impermeable Flysch is a dam, which causes springs, where the topographic conditions and the lowering, like the tectonic contact ("S. Giovanni fault"), under the sea level allow for the outflow of waters (BALLARIN & SEMERARO, 1997; CIVITA *et al.*, 1995). It is the case of the Springs of Aurisina (BOEGAN, 1905/6) with average flow of 20,000 m<sup>3</sup>/die. They precede the group of the resurgences of the Timavo and prevailingly drain waters chemically definable as "karstic", even though the contribution of the Timavo is present especially during floods (GEMITI & LICCIARDELLO, 1977). In this sense, on the basis of the structural interpretation of the Karst, deep hydrogeology is to be reconsidered, since just the impermeable basement made up of the underthrusting Flysch would determine the "base level of the Karst".

Fundamentally, the uncertain border areas of the aquifer Trieste Karst are two: the north-eastern area that borders on the Karst of Postojna (or of the Carniola) and the south-eastern area that borders on the valley of Materija (Mountainous Istria). In the first area the underground watershed is rather well delineated (even though fluctuating) and it is not very different from the superficial one (HABIC, 1989) quite influenced by the contact limestones/Flysch; in the second, instead, the underground watershed is very uncertain. Tracing tests in the north-western swallow holes of the big valley of Materija/Matarsko podolje (also Podgrajsko podolje) (in Italian: "Valsecca di Castelnuovo") (KRIVIC *et al.*, 1989; TIMEUS, 1928) have, so far, always found communications with springs, which do not belong to the system of the Karst of Trieste, but which belong to the Istria mountainous

Karst (Springs of the Rizana/Risano, etc.). However, during these tests the check of underground waters of the Karst, such as for example those of Trebiciano Abyss, has never been taken into account. The hypothesis of flowing of underground waters from the big valley of Materija (with a subterranean hydrography at high altitudes) towards the Karst of Trieste should not be discarded, since there is contiguity between the two basins and there are not geologic dams. D'AMBROSI (1961/b) and MOSETTI (1966) already suggested this hypothesis, which was supposed right from the beginning of the '900 (GALLI, 1999). However, it is difficult to understand the problem, also from a theoretical point of view. Indeed, in the area the main springs of the Risano at a height of 70 m and of Ospio, (respectively traced in primary and secondary ways from the most western swallow-hole of Brezovica) are representative of the local base level. On the contrary, at ~10 km northwest the normal piezometric level in Skilan Cave is at a height of ~3 m above the sea level (a few metres more in Trebiciano Abyss); from this a hydraulic gradient of 7-9‰, which is completely normal, would be deduced. Going back to the northeastern edge of the area, links among the small streams that flow from the Flysch and that sink between Sajevece and Dolenia Vas and the Resurgences of the Timavo have been proven by tracers (HABIC, 1989). Also for the losses (sometimes total) of the Rasa Stream, whose bed is in limestones for the whole of its upper course, the communication with the Resurgences of the Timavo has been proven.

### 3. HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF THE AQUIFER

The hydrogeological and hydraulic studies carried out in the valley of Brestovica (western area of the Karst, in Slovenia), together with surveys and water wells (DROGUE *et al.*, 1984; KRIVIC, 1981, 1982/a, 1982/b, 1983, KRIVIC & DROBNE, 1980) have showed that the hydrodynamic pattern of the Trieste Karst is similar to that of a semi-confined aquifer. Its border characterizes the conduits in saturated area. They developed under the present sea level (typical situation of the peri-Mediterranean Karsts) during the regressions of the Tertiary and Quaternary. However, these conduits are not totally confined, since big fractures and karst pits put them in contact with the surface.

In one pit of the valley of Brestovica (called B4) (area of pits and surveys with variations of the differentiated piezometric level between ~3-12 m above the sea level) pumping tests have recorded a transmissibility (T) of 360 m<sup>2</sup>/h (free aquifer with a storing coefficient  $S \approx 10^{-2}$ , diffusivity T/S 3.6x10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/h). On the contrary, under conditions similar to the confined ones this value ranges from T/S 3.6x10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/h to T/S 3.6x10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/h. However, since the aquifer of the Trieste Karst is complex, these

conditions surely characterize the whole middle-western area. The eastern area, instead, might be characterized by an aquifer with highly freer conditions. In correspondence of these pits there is the pumping station of Klarici (annual pumping ~1.7x10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>). On the basis of the pumping and of the chemical and isotope data (URBANC & KRISTAN, 1998) during dry periods (tests August 1999) the contribution of the waters flowing from the Isonzo is around 60%.

The piezometric level (in a broad sense) of the karst aquifer seems to increase rapidly towards the northern permeable border of the basin in Flysch of the Vipacco River (area to the north of Komen: 154 m above the sea level) and that of Postojna (292 m above the sea level). This increase seems to have a very wide range. In the whole south-eastern area the piezometric level is influenced by the tides of the upper Adriatic (Brestovizza, Doberdò, etc) (KRIVIC, 1982/b, NICOLETTIS, 1983). The increase in the level of underground waters during floods, especially influenced by the contribution from the Timavo, reduces from the mount to the valley. Periodic, annual floods cause rises of 50-90 m in "dei Serpenti" Abyss. Normal floods reach 60 m in Trebiciano Abyss. Rises are of 20-30 m ("Massimo" Abyss, "Lindner" Cave) in the middle-southern area of the Karst. On the contrary, in "Pozzo dei Colombi" near the Resurgences of the Timavo, during floods the level rises even for 4 m (ANSELMINI & SEMERARO, 1984; BOEGAN, 1938; CUCCHI *et al.*, 1997; GEMITI & MILANI, 1997; KNEZ *et al.*, 1997). CUCCHI *et al.* (1997, 2000) have observed important correlations among the hydrometric levels in S.Canziano, Trebiciano Abyss and "Pozzo dei Colombi" by showing the direct influence of the Timavo on this tract.

BOEGAN (1938) generically supposed an underground Timavo uphill Trebiciano Abyss, predominantly in "vadose and semi-saturated areas", whereas downhill, by now in "saturated area", in conduits also under the sea level. In fact, the hypothesis is founded, if we base ourselves upon the hydraulic conditions of the Timavo found in "dei Serpenti" Abyss, in Trebiciano Abyss and in "Lazzaro Jerko" Cave. These conditions (a Timavo more and more mixed by autogenic contributions as it enters the Karst), are found up to the submerged Complex of the Resurgences of the Timavo (GUGLIA, 1994), where big galleries placed at 80 m under the sea level have been explored. This situation, more than be attributed to lithological influence, (function of the "Dolomitic Complex") (FORTI, 1978) would be simply ascribable to the effects of marine ingress on pre-existing karst phenomena and to the westward pivoting of the Karst, caused by the charge of the Plio-quaternary sediments. These sediments had formed the Veneto-Friuli plain (MOSETTI & MOSETTI, 1986). Where and how the springs of the "Timavo sys-

tem” worked in the past (Messinian, Quaternary) should be still understood. This is to be understood also in relation to the permeability threshold of the Flysch that cropped out (today it is placed offshore and it is buried by recent marine sediments) along the faults auxiliary the “Palmanova line”.

The hypothesis of a mostly confined aquifer, which would reach the mentioned “karst base level”, probably over 1,000 m of depth, with a “quick” circuit (even though the main flows take place in the upper area) is well founded. The confined aquifer would reach the Jurassic and lower Cretaceous facies, which do not crop out. These facies crop out, instead, to the north on the “high Karst” in the alloctonous of the thrust sheet of Hrusica and Trnovo (PLACER, 1981) and they may be correlated to the “Calcare del Vajont”, the “Calcare di Soccher”, etc. (BUSER, 1973/a, 1973/b, 1986/a, 1986/b; D’AMBROSI 1961/a; PLENICAR, 1970; TUNIS & VENTURINI, 1977).

#### 4. HYDROGEOLOGY OF THE COASTAL AREA

The outflows of the karst aquifer exactly start where the dam of Flysch, which borders on the coast, ends. The first way-outs are the Springs of Aurisina: nine springs placed at the sea level (linked by an artificial basin) on a front of 350 m, with a  $Q_{ave}$  0.3 m<sup>3</sup>/sec (BOEGAN, 1905-6).

Westwards a series of marine springs follows; they flow out from the coast to the calcareous bottom of the sea before and they are identified by means of in continuum conductometry and their flows are not certain (ACCERBONI & MOSETTI, 1967). However, the flows are evaluated to be not important. Along the coast, on the east side of San Giovanni of Duino, a series of small springs, with a minimum flow, flows out (CUCCHI & FORTI, 1983). They are submerged by the tide and present salinity. To the west the wayouts of the Timavo follow. The three mouths of the Timavo discharge the water in artificial basins provided with overfall orifices and/or mobile sluice gates communicating downhill with the short tract of the river to the sea. The level of the water in the basins is kept for most of the year by acting on the sluice gates between 140-190 cm with respect to the height 0 referred to the topography of the local “Piano Müller”. The so-called, above-mentioned farther western springs are located further inside at slightly lower heights, in correspondence of the bed formed by the courses of Moschenizze, Sardos, and Lisert.

The substratum of the alluvial area, which goes from the spring front towards Monfalcone, is calcareous. The isobaths of these limestones have been obtained by geophysical surveys (D’AMBROSI & MOSETTI, 1965), discovering a paleobed with east-west trend, placed at 40 m under the sea level. Under the same conditions another paleobed at 60 m under the sea level

has been instead found under the alluvial bed of the lower Timavo.

Along all the calcareous edge of the Karst, near the contact with the above-mentioned alluvial plain, in the area of Monfalcone, there are some caves that reach the karst aquifer. In one of these (“Cave to the east of the railway station of Monfalcone”) a monitoring test (CANCIAN, 1987) has shown that the waters have Cl<sup>-</sup> values up to 30 mg/l. These concentrations are not determining for insalination hypothesis yet, although the sea is so near; all this even though the whole karst aquifer is substantially “under pressure”. In all the above-mentioned springs, but also in other local karst underground springs, chlorides are always low. However, normal values of Cl<sup>-</sup> also of 9-13 mg/l may be observed (Lisert, Moschenizze, Doberdò), but values up to about 10 mg/l may simply derive from local rainfalls enriched on the sea placed before. Therefore, they are not significant data to speak about ingressive marine phenomena having a practical importance. On the contrary, more significant insalinations have been found in two small cavities that reach the karst aquifer to the south of the Resurgences of the Timavo: the Cave near the “Peschiera” of the Timavo and the new Cave of “Villaggio del Pescatore”. Both are placed very near the sea; they have, in this case, very high concentrations of chlorides (Cl<sup>-</sup> 37-103 mg/l) and, in general, the ions characteristic of marine water (S<sup>2-</sup> 21-77 mg/l, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 17-35 mg/l, Mg<sup>2+</sup> 9.3-16 mg/l) (GEMITI, 1994).

The effect of the tides of the Adriatic Sea on the karst aquifer is important even though little known. They remarkably affect the Doberdò Lake placed 3 km farther (NICOLETTIS, 1983), as well as the already mentioned karst aquifer of the valley of Brestovica. However, a wider area of influence is supposed.

In the alluvial area of Monfalcone, where the above-mentioned paleobed develops, some calcareous spurs come out (Mt. S. Antonio). They are interested by karst cavities from which thermal sulphuric-salt-sulphate waters, with temperatures of about 39-40°C, flow out and they are (generically) supposed to flow up from 1,500-3,000 m with higher temperatures at the origin (D’AMBROSI & MOSETTI, 1965). These waters are tied to deep fractures developed along the “Palmanova line”. They are waters with high contents of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> (300-400 mg/l), due to the presence of remarkable quantities (one third) of sea water evidently collected in their way up. However, the chemical characteristics of these waters are different from the thermal ones of the area of Grado, where the deep substratum corresponds to the eastern side of the carbonate horst of Cesarolo (CALORE *et al.*, 1995; DELLA VEDOVA, 1999; MARZONA, 1991).

The alluvial area between the course of Lisert-Locavaz Canal and Monfalcone corresponds to an



aquifer whose feeding is little known up to now, even though numerous geognostic and geophysical surveys have enabled to obtain the stratigraphy of the substratum and the morphology of the bedrock. The important phreatic aquifer, which characterized this territory, is supposed to be fed by karst waters. However, this area, which is strategic as far as the water supply of Monfalcone is concerned, is lacking of data relative to possible marine ingressive phenomena as well as of specific surveys for the use of this water resource.

## 5. HYDROGEOLOGY OF THE CONTACT DEEP ALLUVIAL AREA

The relations that have been supposed for a long time (D'AMBROSI & MOSETTI, 1972) between the Karst aquifer and the deep alluvial area on the left of the Isonzo River are important. This alluvial body, to the north of the "resurgence line" (to the south of Pieris-Staranzano), is marked by predominant fine, silty and clayey sediments, which provoke the outflowing of aquifer waters. It is characterized in depth by gravel beds (aquifers), often inter-fingered, separated by silty and sandy beds (aquicludes) (D'AMBROSI, 1955/c; D'AMBROSI & MOSETTI, 1962; ONOFRI & SEVERI, 1963; MORGANTE & ONOFRI, 1963, STEFANINI & CUCCHI, 1976, 1977). The basement is calcareous to the north of the "Palmanova line" (southeast-northwest) (AMATO *et al.*, 1976) found in the area to the left of the Isonzo River, in depth, by geophysical surveys (BERLASSO & CUCCHI, 1991), whereas to the south the Flysch stretches for tectonic contact.

Major data have been obtained by the study of the aquifers surveyed during the excavation of deep water wells realised by AGE GAT (1976) and AGE GA (1985, 1994), to the south of Fogliano-Redipuglia and S. Pier d'Isonzo ("North line" and "South line" of wells). In correspondence to the "North line" (Cassegliano-S.Zanut area) up to ~140 m the aquifers are predominantly fed by the leaks of the Isonzo River (apparent, average speed of the aquifer ~4 m/h). At major depths, where the calcareous bed-rock (~170-200 m under the sea level), which has been found by means of drillings near Cassegliano, is in contact with some saturated karst cavities (MOSETTI, 1980; MOSETTI & MOSETTI, 1977), highly mineralised waters flow. In particular, their content of Cl<sup>-</sup> is up to 100-110 mg/l. The waters of deeper aquifers, deeper than 150 m, have been called "Natisone-like", since they are more mineralised (TH 22-26 °F, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 8-14 mg/l) (AGE GA, 1994) than the "Isonzo-like" and they are chemically similar to those of the Natisone River. Then, the deepest aquifers are "contaminated" by salt waters flowing from the calcareous basement. Moreover, at major depths also "alpine-like" waters flow, with more negative isotope values δ<sup>18</sup>O (H<sub>2</sub>O), and they are characterised, on the

basis of tritium activity (TU), by theoretical longer periods of residence estimated in 30-40 years (ACEGA, 1985; DELLA VEDOVA *et al.*, 1987).

As for the karst area to the south of Sagrado, from the hydrologic and geochemical studies of "Pozzo di Polazzo" (CANCIAN *et al.*, 1996; COMAR & PELLIS, 1999; D'AMBROSI, 1962/a) carried out in limestones, it would result that in this area (though limited) Karst waters feed the floods of the Isonzo River. On the contrary, the flow is inverted during the floods of the Isonzo. This shows, once more, the complexity of the water-course of the Trieste Karst in this area of contact between the karst aquifer and the porous one of the Isonzo.

## CONSIDERATIONS

The region of the Karst is a substantially "open" aquifer system. It cannot be defined as a typology of drains, even though probably mixed, because of its complexity and because of our little knowledge about the aquifer network, although today the tendency is that of simplifying using "classifications" at all costs. The position, at about sea level, of the major springs, all concentrated in a small area, is a drainage for the porous aquifers, or directly for the losses of the rivers, which border on its north-western area. This fact is very evident in the geochemical differentiation of the waters of the various springs. The real times of residence of the karstic waters in the deep circuit, which might reach the "karst base level" made up of the same impermeable rocks (Flysch) that surround the Karst, are not known yet. Therefore the role of the static, or static-dynamic reservoirs, must be still defined. These reservoirs, at least in the southern zone of the Karst, are also influenced by the channelled flow, at the beginning vadose-epiphreatic and the vadose, of the allogenic contribution of the River Reka/Timavo. Therefore, among the other questions, also the real extension and depth of the big network of passages in saturated zone is still unanswered, considering that part of them have developed also in unsaturated conditions, and thus that the two evolutionary dynamics might have been independent. Generally, the existence or not of real interconnected subsystems, moved by the geological setting, is still to be understood. Furthermore, among the many interrogatives, it must be understood whether there are other, real, subterranean water courses beside that of the Timavo; then what is the real hydrogeological role of the karstified carbonate basement that is buried by the Isonzo floods and made up a single body with the aquifer of the Karst.

## Summary

The Karst is a south-east/north-west faulted anticline that encompasses the Cretaceous-Paleogene rocks with a probably not-outcropping Jurassic core. They are predominantly calcareous and secondarily dolomitic rocks with different karst degree. At the top the carbonate sequence grades into the Eocene marly-arenaceous Flysch. The Flysch is an impermeable belt, both along the north-east edge (basin of the River Vipacco) and along the south-west one (gulf of Trieste), delineating most of the limits of the carbonate reservoir. The inflows are given by rainfalls, by the allogenic contributions made up of the partial losses of the Rivers Isonzo and Vipacco to the north-west and by the total losses of the River Timavo/Reka. The contribution of the waters of the aquifer of the Isonzo to the system of the Karst characterises the “northern springs” (Doberdò, Moschenizze, Salici, Lisert), while the Reka and rainfalls characterise the big mouths of the Timavo and the minor springs of Aurisina. The total exits are estimated around 35 m<sup>3</sup>/sec on the average, of which 5 m<sup>3</sup> from the “northern springs”. The exits of the Timavo ( $Q_{ave}$  30 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{max}$  158 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{min}$  7.4 m<sup>3</sup>/sec) lead to a network of passages that reach a depth of about 80 metres, as the subaqueous explorations and geophysics indicate. “Karstic waters”, or better waters with a ratio Ca/Mg clearly higher than that of the western springs characterise them. On the contrary, during autumn floods the values of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> besides those of turbidity, due to the “natural tracing” due to the upper Timavo whose basin is in Flysch, sensibly increase. Spring floods, instead, have waters with less Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, perhaps because of a “signal” of the Isonzo. During summer low waters the “signal” of the Isonzo is, instead, remarkable, with low Ca<sup>2+</sup> values, from which a major drainage of the waters flowing from the Isonzo would be inferred. These waters would partly compensate the minor dynamic reservoirs of the Karst, which are richer in carbonates.

The contribution of the aquifer waters of the Isonzo has been proven also by the data of isotope geochemistry.  $\delta^{18}O$  (H<sub>2</sub>O) of the mentioned springs has characteristic negative values, with respect to the waters of the system of the Timavo, which can be connected with the waters of the mountain basin of the Isonzo, especially during thaws. As for the isotope composition of the oxygen, the available data firstly underline the homogeneity of feeding of the three main mouths of the Timavo, secondarily they recall a certain likeness of feeding between these springs and those of South Moschenizze and Sardos. Also the most western springs are quite similar. They are Doberdò, Pietrarossa, Lisert and North Moschenizze that, having an annual average isotope value more negative than the former ones, are more influenced by water reservoirs fed at higher altitudes than the average ones of the Trieste Karst and that therefore might refer to the basin of the Isonzo. In particular, the spring Sardos, placed between the above-mentioned western springs and the Timavo, has intermediate characteristics among these families of waters. Artificial tracing has proven the losses of the Vipacco, however from the geochemical data it would be a rather limited contribution.

In the alluvial area of Monfalcone some calcareous spurs crop out (S. Antonio Mt.). They are interested by karst cavities from which thermal waters flow out at temperatures of about 39-40°. These sulphuric-saline sulphate thermal waters are supposed (generically) to flow up from about 1,500-3,000 m, with even higher temperatures at the origin. These waters are linked to deep fractures developed along the “Palmanova line”. They are waters with a high content of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> (300-400 mg/l), due to the presence of large quantities of sea waters evidently collected during their flowing up.

The relationships between the aquifer of the Karst and the deep alluvial area to the left of the River Isonzo are important. This alluvial body, to the north of the “line of the resurgences”, is characterised by the predominance of the fine sediments that provoke the flowing up of the aquifer waters. It is also characterised in depth by gravel beds (aquifers), often interfingered, divided by beds made up of silts and clays (aquicludes). The basement is calcareous to the north of the “Palmanova line” in depth, whereas to the south the Flysch stretches for tectonic contact. The major information has been obtained from the study of the aquifers surveyed during the drilling of deep water-wells to the south of Fogliano-Redipuglia and S. Pier d'Isonzo (“North line” and “South line” of the wells). In correspondence of the “North line” (Cassegliano-S. Zanuta area) up to ~140 m the aquifers are predominantly fed by the losses of the River Isonzo. At major depths, at the contact with the calcareous bed-rock (~170-200 m under the sea level) that has been found drilling near Cassegliano with saturated karstic cavities, waters having higher mineralization flow, in particular with Cl<sup>-</sup> up to 100-110 mg/l. The waters of the deepest aquifers, under 150 m, have been called “Natisone type”, since they are more mineralised (TH 22-26°F, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 8-14 mg/l) than the “Isonzo type” and chemically similar to those of the River Natisone. Moreover, the deepest aquifers are “contaminated” by saline waters flowing from the calcareous basement. Finally, at major depths also “alpine type” waters appear, having isotope values  $\delta^{18}O$ (H<sub>2</sub>O) more negative and they are characterised, on the basis of the tritium activity (TU), by longer theoretical residence times that are estimated to be of 30-40 years.

## Riassunto

### INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

*Il Carso, ampiamente illustrato dalla letteratura esistente, è, strutturalmente, a grandi linee, un'anticlinorio fagliato SE-NW che comprende, in affioramento, terreni cretacico-paleogenici, o più precisamente dall'Aptiano all'Eocene inf. L'area è la regione denominata Carso (italiano), Kras (sloveno) o Karst (tedesco) e corrisponde al “Triestiner Karst” dei primi studi di G. Stache, A. Grund, ed altri, che nel periodo fine '800 inizio '900 hanno definito la sua unitarietà geologica e idrologica. Faglie importanti SE-NW, a carattere regionale, sono: la “faglia del Rasa” che interseca il bordo settentrionale del Carso, la “faglia di Divacia” (proseguimento SE del thrust-fault di Udine) che passa nella zona centrale del Carso e provoca localmente la*

sovrapposizione del Paleocene sul Cretacico, infine, al bordo meridionale, le faglie vicarianti la "linea di Palmanova", tra cui la maggiore in affioramento è la "faglia di S. Giovanni" (chiamata dagli Autori sloveni "faglia di Trieste"), che determinano il sovrascorrimento del Carso sul Flysch eocenico. Per questa ragione il bordo sud-occidentale del Carso Triestino si presenta come una grande scarpata strutturale. Dal punto di vista geodinamico il Carso presenta un'attività sismica molto debole. Sull'anticlinorio (chiamato anche, dagli Autori sloveni, "anticlinorio Trieste-Komen") anticlinali locali caratterizzano soprattutto la zona NW (Brestovica, Brje, Vojscika), sinclinali locali caratterizzano invece la zona a settentrione della "faglia di Divacia" (Komen, Koprova), mentre brevi pieghe anticlinali-sinclinali sono nella zona sud-orientale (tra Gaberk e Basovizza). A settentrione il Carso Triestino si chiude in corrispondenza del "sinclinorio Gorizia-Vipacco", a meridione in corrispondenza della "sinclinale Trieste-Capodistria", entrambi in Flysch eocenico. Ad oriente, confina (in modo labile) con il Flysch eocenico della "sinclinale di Senozece" e dell'area di Brkini, mentre a S della "sinclinale dell'alto Timavo" in Flysch (terminazione NW del vasto "sinclinorio di Rijeka") confina con la "anticlinale della Cicarije". Ad occidente il Carso confina con le alluvioni del F. Isonzo, sotto la cui pianura si immerge. L'altopiano, parte da quote medie di 600 m nella zona sud-orientale (confine con la zona di Postojna e con il vallone di Materija) giungendo a quote di poche decine di metri nella zona delle Risorgive del Timavo, con una dorsale centrale M. Lanaro-M. Castellaro. L'aspetto geomorfologico, in generale, è di un altopiano di bassa-media quota a clima temperato (localmente sub-alpino), relativamente ondulato, con ampi pianori, caratterizzato da doline e da colline residuali, con fasce ad incarsimento più o meno intenso a seconda delle litologie affioranti. L'unica idrografia in diretto contatto con il Carso Triestino è rappresentata dal T. Rasa, dal F. Timavo sup./Reka e T. Rosandra.

Per l'inquadramento geologico si rimanda a BALLARIN & SEMERARO (1997), BUSER (1973/a, 1973/b), CAROBENE & CARULLI (1981), CARULLI et al. (1980), CARULLI & CUCCHI (1991), CUCCHI et al. (1987), D'AMBROSI (1953, 1955/a, 1961/a), DEL BEN et al. (1991), JURKOVSEC et al. (1996/a, 1996/b), MARTINIS (1951), PLENICAR et al. (1973/a, 1973/b), STACHE (1920/a, 1920/b), TENTOR et al. (1994).

## IDROGEOLOGIA DEL SISTEMA DEL CARSO TRIESTINO

Sostanzialmente, come risultato di un secolo di ricerche idrogeologiche su quest'area classica per il carsismo, l'acquifero del Carso Triestino risulta essere alimentato soprattutto, a grandi linee: dalle precipitazioni insistenti sull'area, dal F. Timavo sup. (Reka) che è inghiottito nelle Grotte di San Canziano/Skočjanske Jame (Slovenia), da apporti della falda freatica in sinistra del F. Isonzo (piana di Gorizia). L'altitudine media del plateau è tra 200-500 m s.l.m. Le precipitazioni sul bacino sono tra 1350-1650 mm/medi/annui, registrati sul medio-lungo periodo nelle stazioni di Borgo Grotta Gigante (275 m), Godnje (295 m), Komen (289), Matavun (426) (COLUCCI, 1999; PETRIC & KOGOVSSEK, 2000). L'infiltrazione, secondo CIVITA et al. (1995), ammonterebbe ad oltre  $6 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/anno (20 m<sup>3</sup>/sec), cui bisogna aggiungere le perdite totali del F. Timavo/Reka (8,9 m<sup>3</sup>/sec), quelle parziali/totali dei bacini nord-orientali (T. Rasa, etc.), quelle del F. Vipacco, per un totale stimato di  $\sim 3 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/anno. A questa quantità vanno aggiunte le perdite del F. Isonzo stimabili in alcuni m<sup>3</sup>/sec e quelle solo supposte dell'area confinante con il vallone di Materja. L'area carsica, a seconda dei vari AA., varierebbe dai  $\sim 700$  ad oltre 1.000 km<sup>2</sup>, con una evapotranspirazione tra 0,6 e 0,35, con incertezze, pure rilevanti, degli input degli apporti allogeni citati. Il nostro parere è che un bilancio idrologico del bacino, con una migliore approssimazione alla realtà di quanto tentato in passato (BIDOVEC, 1965; BOEGAN, 1938; D'AMBROSI, 1955/b, 1961/c, 1961/d; CIVITA et al., 1995; MOSETTI, 1965, 1966/a; etc.) sia ancora da fare.

La penetrazione del Timavo nella falda sotterranea avviene in funzione del suo regime spiccatamente torrentizio (portate della Reka:  $Q_{\min}$  0,16 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{\text{med}}$  8,95 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{\max}$  387 m<sup>3</sup>/sec) evidenziato dal rapporto tra portate minime e massime 1:2.400. La portata minima naturale della Reka è di 0,16 m<sup>3</sup>/sec, ma con la costruzione di due bacini di accumulo nella zona di Villa del Nevoso (Ilirska Bistrica) la portata minima viene regolarizzata in modo che non scenda sotto 1 m<sup>3</sup>/sec. Durante le piene catastrofiche (eventi storici) le Grotte di S. Canziano non riescono a smaltire le acque e vengono parzialmente sommerse; talvolta al loro interno si raggiunge un livello dinamico ad oltre 300 m di quota s.m. Normalmente, nel tratto precedente l'inghiottimento nelle Grotte di San Canziano, il Timavo sup. perde per carsismo gran parte della sua portata, mentre in magra le perdite sono totali.

Il contributo delle acque di falda del F. Isonzo, che riguarda soprattutto le sorgenti occidentali (Doberdò, Moschenizze, Sablici, Lisert) è stato ipotizzato (ma non ancora provato con traccianti) sia dall'andamento delle isofreatiche nell'area alluvionale di Gorizia tra i fiumi Isonzo e Vipacco che mostrano una depressione (deflusso) che si incunea nel Carso, sia dai dati idrochimici delle sorgenti occidentali stesse che hanno una sostanziale similitudine con le acque isontine, tra cui una minore durezza totale e un significativo più basso rapporto Ca/Mg rispetto al Timavo, sia dai dati isotopici. MOSETTI & D'AMBROSI (1963) e MORGANTE et al. (1966) hanno stimato perdite del F. Isonzo tra Gorizia e Sagrado per  $\approx 6$  m<sup>3</sup>/sec in magra e  $\approx 12$  m<sup>3</sup>/sec in piena, di cui un'aliquota di  $\approx 50\%$  dispersi nel Carso. Pure la geochimica isotopica indica una notevole provenienza isontina:  $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$  di queste sorgenti presenta caratteristici valori negativi, dell'ordine del  $-8,5-9\%$ , rispetto alle acque del sistema del Timavo, correlabili con le acque del bacino montano dell'Isonzo, soprattutto in occasione dei disgeli che raggiunge valori dell'ordine del  $-9,5\%$ . Per quanto riguarda la composizione isotopica dell'ossigeno, i dati a disposizione mettono in evidenza, in primo luogo, l'uniformità di alimentazione delle tre principali Bocche del Timavo, secondariamente, richiamano una certa somiglianza d'alimentazione fra queste sorgenti e quelle di Moschenizze Sud e Sardos. Affinità, fra loro, presentano pure le sorgenti più occidentali quali Doberdò, Pietrarossa, Lisert e Moschenizze Nord che, avendo un valore isotopico medio annuo più negativo delle prime, sono maggiormente influenzate da riserve idriche alimentate a quote più elevate di quelle medie del Carso Triestino e che quindi si potrebbero riferire al bacino dell'Isonzo. In particolare, la sorgente Sardos, posta tra le sorgenti occidentali citate ed il Timavo, presenta caratteristiche intermedie, tra queste famiglie di acque. Un contributo del Vipacco, ben diviso dal bacino del Timavo in tutta la parte montana (POLAJNAR et al., 1997; TRISIC, 1997), alle sorgenti occidentali, ma che

perderebbe parte delle sue acque al suo ingresso nei calcari presso la piana di Gorizia, è stato appurato mediante tracciamento artificiale (TIMEUS, 1928); tuttavia, dai dati geochimici, si tratterebbe di un contributo piuttosto limitato.

Le uscite del Timavo ( $Q_{med}$  30 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{max}$  158 m<sup>3</sup>/sec,  $Q_{min}$  7,4 m<sup>3</sup>/sec), attraverso tre grandi bocche sommerse che fanno capo ad un reticolo di gallerie che raggiungono una profondità di circa 80 metri, come appare dalle esplorazioni subacquee e dalla geofisica (GUGLIA, 1994; MORELLI, 1954; MOSETTI, 1954/a), risultano caratterizzate da "acque carsiche" (apporti delle precipitazioni sul Carso), ovvero acque con un rapporto Ca/Mg nettamente più alto rispetto alle sorgenti occidentali, mentre nelle piene autunnali aumentano sensibilmente i valori di Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> oltre che della torbidità dovuti al "tracciamento naturale" dovuto al Timavo sup. il cui bacino è in Flysch. Le piene primaverili, invece, presentano acque con Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> inferiori, forse dovuto ad un "segnale" dell'Isonzo. Nelle magre estive il "segnale" dell'Isonzo è invece spiccato, con valori di Ca<sup>2+</sup> bassi, da cui si dedurrebbe un maggior richiamo delle acque di provenienza isontina, le quali compenserebbero, in parte, le minori riserve dinamiche del Carso più ricche in carbonati. Le uscite delle sorgenti più settentrionali (Sardos, Lisert, Sablici, Moschenizze) ammonterebbe ad una  $Q_{med}$  ~5 m<sup>3</sup>/sec. Le uscite totali, comprese quelle di Aurisina, ammonterebbero quindi ad una  $Q_{med}$  ~35 m<sup>3</sup>/sec.

Sul fondo dell'Abisso di Trebiciano (BOEGAN, 1909/10, 1921, 1938), situato tra le Grotte di San Canziano e le Risorgive del Timavo, scorre un fiume sotterraneo ad una quota media di 19,6 m s.l.m. (in magra 11,5 m) (denominato "Timavo sotterraneo") con  $Q_{med}$  3,4-4,6 m<sup>3</sup>/sec (stimate), in un sistema di gallerie per lo più sommerse, nel "Complesso dolomitico" (Cenomaniano), provenienti da SSE (FORTI et al., 1978; GUGLIA, 1994; MAUCCI, 1953/b). Durante le piene il livello dell'acqua in questa grotta s'innalza fino a 115 m. Il fiume è risultato in collegamento con il Timavo a S. Canziano (TIMEUS, 1928; etc.) anche se una grossa aliquota dell'acqua che transita proverrebbe dal bacino carsico (MOSETTI, 1965, 1989). È opinione accreditata che il Timavo sotterraneo scorra poi, da Trebiciano alle risorgenti, in uno o più condotti, convoglianti tutta l'acqua del Timavo sup., alternati fra tratti a pieno carico ("sifoni") e tratti a pelo libero (GEMITI, 1966, 1984/a, 1998).

A monte dell'Abisso di Trebiciano il Timavo ipogeo si trova, ~10 km a ENE, sul fondo dell'Abisso dei Serpenti/Kacna Jama (MIHEVC, 1984; SEMERARO, 1982), nell'ambito di un vasto reticolo di gallerie (parecchi chilometri), dove scorre per la maggior parte "a pelo libero". Esplorazioni subacquee oltre il sifone a monte hanno consentito di giungere, ormai, a meno di 1 km dalle Grotte di S. Canziano. Nell'Abisso dei Serpenti il Timavo ipogeo scorre a quote di ~182-156 m s.l.m., dove durante le piene il livello dell'acqua s'innalza anche di ~90 m. Tuttavia non è ancora chiaro se il Timavo nelle Grotte di San Canziano e nell'Abisso dei Serpenti rappresenti un livello piezometrico o sia semplicemente un corso d'acqua sotterraneo "sospeso": interpretazione a suo tempo prospettata da SEMERARO (1982) ed ancora dibattuta. Il fatto che il Timavo sotterraneo appaia diretto (dai dati attuali) da N verso S (oltre che verso W come vettore idraulico), dalle Grotte di San Canziano all'Abisso dei Serpenti fino all'Abisso di Trebiciano, probabilmente può esser messo in relazione alla giacitura del "Complesso dolomitico" che avrebbe, fin dall'inizio dell'evoluzione delle sue gallerie, condizionato un percorso (BALLARIN & SEMERARO, 1997) dapprima nelle rocce calcaree cretatiche molto carsificabili (poi per approfondimento studiale pure in quelle dolomitiche) a S della litozona dolomitica affiorante a N dell'area d'inghiottimento. Recentemente, a ~3,5 km NW dall'Abisso di Trebiciano, sul fondo della Grotta Lazzaro Jerko è stato scoperto un tratto di un fiume sotterraneo, scorrente da E ad W, ad una quota approssimativa di 6 m s.l.m.; in questo caso si tratta quasi sicuramente di acque del Timavo sup./Reka (inf. F. Gemiti da dati inediti). Sempre nella zona centro-meridionale del Carso, alcune grotte profonde intercettano la falda idrica. Tralasciando le grotte vicine alle Risorgive del Timavo, quelle nella zona interna dell'altopiano che presentano bacini d'acqua sono: la Grotta Claudio Skilan (-378 m) a quota ~3 m s.l.m. e l'Abisso Massimo (-227 m) a quota ~0-3 s.l.m., mentre l'Abisso dei Cristalli (-205 m) e la Grotta Lindner (-177,5 m) risultano periodicamente invasi da acque risalenti da una falda che si stima potrebbe situarsi ad un livello presunto tra 2-5 m. Data l'incertezza dei dati topografici delle grotte (escluso l'Abisso di Trebiciano) queste quote si debbono ritenere - lo ripetiamo - approssimative. Osservazioni sporadiche nell'Abisso Massimo hanno mostrato innalzamenti del livello piezometrico di oltre 30 m (ANSELMINI & SEMERARO, 1984), mentre registrazioni in continuo alla Grotta Lindner hanno mostrato innalzamenti fino a 20 m (GEMITI & MILANI, 1977).

Dati o interpretazioni del circuito illustrato sono tratti da BALLARIN & SEMERARO (1997), BORDON et al. (1998), CANCIAN (1987, 1988), FLORA et al. (1990), GABUCCI et al. (1973), GEMITI (1994, 1966), GEMITI & LICCIARDELLO (1977), KNEZ et al. (1997), MOSETTI (1966, 1989), MOSETTI & POMODORO (1967). Per le temperatura delle acque sorgive si rimanda pure a FLORA et al. (1990), FORTI & TOMMASINI (1965), TOMMASINI (1968, 1969). I dati dei test relativi ai tracciamenti artificiali effettuati, attraverso i quali sono stati appurati i collegamenti Timavo sup. / Timavo ipogeo nell'Abisso di Trebiciano / Sorgenti di Aurisina / Risorgive del Timavo / sorgenti occidentali, sono riferiti agli studi di ERIKSSON et al. (1963), GEMITI (1984/a, 1988), HABIC (1989), MOSETTI (1965), MOSETTI et al. (1963), TIMEUS (1928). Per la storia delle ricerche sul Timavo ipogeo si rimanda a GALLI (1999).

In sostanza, uno dei quesiti fondamentali in merito all'alimentazione delle sorgenti carsiche è rappresentato dall'aliquota delle acque subalvee isontine che penetrerebbero nella terminazione nord-occidentale del Carso. Il contributo dell'Isonzo è stato dapprima ipotizzato su base geologica e idrologica da BIDOVEC (1957, 1960), D'AMBROSI & MOSETTI (1965, 1972), MORGANTE et al. (1966); poi individuato su base idrochimica soprattutto da CANCIAN (1987), GEMITI & LICCIARDELLO (1977), MOSETTI & POMODORO (1967). Successivamente, dai dati geochimico-isotopici di FLORA et al. (1990) e LONGINELLI (1988) esso è stato nuovamente individuato sulla base della reinterpretazione proposta dapprima da GEMITI (1994) e BALLARIN & SEMERARO (1997) e poi da DOCTOR et al. (2000). Questo contributo è uno dei "punti chiave" dell'idrologia carsica della zona. Correlazioni tra le curve di piena del F. Isonzo, a Gorizia, e quelle del Lago di Doberdò mostrano un ritardo, a Doberdò, dai 3 ai 5 giorni, mentre invece cavità vicine, che raggiungono la falda idrica, ma che non sono direttamente collegate con le canalizzazioni del presunto sistema Isonzo / Doberdò / sorgenti occidentali, risentono del solo apporto meteorico locale (NICOLETTIS, 1983). Sempre in quest'ambito, un approfondimento è stato fatto da BARBIERI et al. (1998, 1999) e REISENHOFER et al. (1996, 1998) discriminando

con metodi statistici i parametri fisico-chimici delle acque sorgive, e confermando quanto rilevato in passato da altri autori. Dapprima (REISENHOFER et al., 1996) si è riuscito a caratterizzare ed a distinguere tra loro le tre principali bocche del Timavo (in particolare la 3<sup>a</sup> bocca dalle altre), che pur sono molto vicine ed apparentemente, chimicamente, molto simili, valutando il contenuto di alcuni metalli presenti in tracce (Pb, Cu, Zn, Cd) determinato con la tecnica DPASV. Successivamente (REISENHOFER et al., 1998) sono stati presi in considerazione 11 siti nella medesima area, dove sono stati determinati sei parametri fisico-chimici (temperatura, pH, conducibilità, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>); con l'impiego, poi, dell'analisi statistica uni e multivariata si è potuto nuovamente confermare la distinzione tra un gruppo di acque "tipicamente carsiche" ed un secondo gruppo localizzato più a N ed influenzato dalle acque del F. Isonzo (i solfati ed il pH sono stati i parametri più significativi per tale distinzione). I risultati ottenuti sono stati più tardi riconfermati impiegando metodi statistici (three-way methods) che hanno permesso di individuare due fattori che condizionano la qualità delle acque vale a dire uno spaziale e l'altro stagionale (BARBIERI et al., 1999). Un ulteriore passo in avanti nella discriminazione di queste acque è stato ottenuto da DOCTOR et al. (2000) misurando alti livelli di mercurio disciolto a Doberdò, Salici, Moschenizze N e nel pozzo B-4 di Klarici, ovvero un parametro tipico del F. Isonzo (miniere di Idria).

Sul bordo sud-orientale del Carso, nell'area della Val Rosandra, scaturiscono diverse sorgenti carsiche di non forte portata, condizionate dalla presenza di acquicludi. Questi sono rappresentati da scaglie di marne e di Flysch marnoso-arenaceo localizzate nell'ambito delle faglie inverse che caratterizzano il passaggio, verso SE, dell'anticlinorio del Carso Triestino con la "struttura embriciata delle Ciceria" (Istria Montana). I dati idrogeologici e geochimico-isotopici delle sorgenti e dei corsi d'acqua sotterranei (BALLARIN et al., 1994; D'AMELIO et al., 1997) confermano questo condizionamento.

Il condizionamento del Flysch marnoso-arenaceo, che costituisce il letto delle faglie inverse SE-NW e SW vergenti, vicarianti la "linea di Palmanova", sul quale sono sovrascorsi i terreni, rigidi, carbonatici del Carso caratterizzanti la chiusura meridionale dell'anticlinorio (AMATO et al., 1976; PLACER, 1981), è molto importante nei confronti dell'idrogeologia. Il Flysch, impermeabile, costituisce una tamponatura che dà luogo a sorgenti per soglia di permeabilità sottoposta, laddove le quote topografiche ed il suo abbassamento, come il contatto tettonico ("faglia di S. Giovanni"), sotto il livello marino permettono la fuoriuscita delle acque (BALLARIN & SEMERARO, 1997; CIVITA et al., 1995). È il caso delle Sorgenti di Aurisina (BOEGAN, 1905/6), che precedono il gruppo delle Risorgive del Timavo, e che drenano prevalentemente acque chimicamente definibili "carsiche", anche se l'apporto del Timavo è presente soprattutto durante le piene (GEMITI & LICCIARDELLO, 1977). In questo senso, in base all'interpretazione strutturale del Carso, l'idrogeologia profonda va riconsiderata, dato che il "livello di base del carsismo" sarebbe determinato proprio dal basamento impermeabile costituito dal Flysch sottoscorso.

Due sono, fondamentalmente, le zone di confine labile dell'acquifero Carso Triestino: l'area nord-orientale che confina il Carso di Postumia (o della Carniola) e l'area sud-orientale che confina con il vallone di Materija. Nella prima area lo spartiacque sotterraneo è abbastanza ben delineato (anche se fluttuante) e non si discosta molto da quello superficiale (HABIC, 1989) abbastanza condizionato dal contatto calcari/Flysch, nella seconda invece lo spartiacque sotterraneo è molto incerto. Test con traccianti effettuati negli inghiottitoi nord-occidentali del vallone di Materija/Matarsko podolje (anche Podgrajsko podolje) (nella letteratura italiana: "Valsecca di Castelnuovo") (KRIVIC et al., 1989; TIMEUS, 1928) hanno, finora, sempre trovato comunicazioni con sorgenti non appartenenti al sistema del Carso Triestino bensì a quello istriano interno (Sorgenti del Rizana/Risano, etc). Tuttavia, durante questi test non è mai stato preso in considerazione il controllo di acque interne del Carso, come per esempio quelle dell'Abisso di Trebiciano. L'ipotesi di deflussi di acque del vallone di Materija (con un'idrografia ipogea a quote elevate) verso il Carso Triestino, già suggerita da D'AMBROSI (1961/b) e MOSETTI (1966) ma prospettata fin dall'inizio del '900 (GALLI, 1999), non andrebbe scartata a priori data la contiguità tra i due bacini e l'insussistenza di barriere geologiche. Il problema, comunque, rimane di difficile comprensione, anche dal punto di vista teorico. Tuttavia, nell'area, le sorgenti principali del Risano (a quota 70) e quelle di Ospò (~90 m la quota di trabocco), rispettivamente tracciate in modo primario e secondario dall'inghiottitoio più occidentale di Brezovica, rappresentano il livello di base locale delle acque sotterranee del vallone di Materija, mentre ~10 km NW, in pieno Carso Triestino, il livello piezometrico normale alla Grotta Skilan (Basovizza) è a quota ~3 m s.l.m. (pochi metri più alto lo è nell'Abisso di Trebiciano), da cui si dedurrebbe, in questo caso, un gradiente idraulico del 7-9‰ ovvero del tutto normale. Ritornando all'estremità nord-orientale dell'area, collegamenti tra i piccoli torrenti provenienti dal Flysch che si inabissano tra Sajevece e Dolenia Vas e le Risorgive del Timavo sono stati accertati con traccianti (HABIC, 1989); pure per le perdite del T. Rasa (a volte totali) che ha il letto nei calcari per tutto il suo tratto superiore, è stata accertata la comunicazione con le risorgenze del Timavo.

## CONDIZIONI IDRODINAMICHE DELL'ACQUIFERO

Studi idrogeologici e idraulici eseguiti nella valle di Brestovica (zona occidentale del Carso, in Slovenia), in corrispondenza di sondaggi e pozzi per acqua (DROGUE et al., 1984; KRIVIC, 1981, 1982/a, 1982/b, 1983; KRIVIC & DROBNE, 1980), hanno indicato che il modello idrodinamico del Carso Triestino si avvicina a quello di un acquifero semi-confinato. Il confinamento caratterizza le condotte in zona satura formatesi al di sotto dell'attuale livello del mare (situazione tipica dei carsi peri-Mediterranei) durante le regressioni del Terziario e del Quaternario. Però, tali condotte non risultano totalmente confinate, dato che grandi fratture e pozzi carsici le mettono in contatto la superficie.

In un pozzo della valle di Brestovica (denominato B4) (zona di pozzi e sondaggi con variazioni del livello piezometrico, differenziato, tra ~3-12 m s.l.m.) prove di pompaggio hanno registrato una trasmissività (T) di 360 m<sup>2</sup>/h (falda libera con coefficiente di immagazzinamento S ≈ 10<sup>-2</sup>, diffusività T/S 3,6x10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/h), mentre in condizioni vicine a quelle confinate da T/S 3,6x10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/h a T/S 3,6x10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/h. Tuttavia, data la complessità dell'acquifero del Carso Triestino, tali condizioni sicuramente

caratterizzano l'intera zona centro occidentale, mentre la zona orientale potrebbe essere caratterizzata da un acquifero in condizioni maggiormente libere. In corrispondenza di questi pozzi funziona la stazione di pompaggio di Klarici (prelievo annuo  $\sim 1,7 \times 10^5 \text{ m}^3$ ); sulla base dei pompaggi e dei dati chimici ed isotopici (URBANC & KRISTAN, 1998) durante i periodi secchi (prove agosto 1995) il contributo di acque provenienti dall'Isonzo è attorno il 60%.

Il livello piezometrico (s.l.) della falda carsica sembra elevarsi rapidamente verso il confine impermeabile settentrionale del bacino in Flysch del F. Vipacco (zona a N di Komen: 154 m s.l.m.) e quello di Postojna (292 m s.l.m.), sembra con ampie escursioni. In tutta la zona sud-orientale il livello piezometrico risulta influenzato dalle maree dell'altro Adriatico (Brestovizza, Doberdò, etc.) (KRIVIC, 1982/b, NICOLETTIS, 1983). L'incremento del livello delle acque sotterranee durante le piene, soprattutto condizionato dall'afflusso del Timavo, mostra uno smorzamento procedendo da monte a valle. Nell'Abisso dei Serpenti piene periodiche, annuali, provocano innalzamenti di 50-90 m, all'Abisso di Trebiciano piene normali raggiungono i 60 m, nella zona centro-meridionale del Carso gli innalzamenti sono di 20-30 m (Abisso Massimo, Grotta Lindner), mentre nel Pozzo dei Colombi presso le risorgive del Timavo il livello, in piena, s'innalza anche di 4 m (ANSELMINI & SEMERARO, 1984; BOEGAN, 1938; CUCCHI et al., 1997; GEMITI & MILANI, 1997; KNEZ et al., 1997). Buone correlazioni tra i livelli idrometrici di S. Canziano, dell'Abisso di Trebiciano, del Pozzo dei Colombi e delle Risorgive del Timavo sono stata registrate da CUCCHI et al. (1997, 2000) dimostrando l'influenza diretta del Timavo lungo questo percorso.

Già il BOEGAN (1938) ipotizzava un Timavo ipogeo, del tutto genericamente, a monte dell'Abisso di Trebiciano prevalentemente nella "zona vadosa e semi-satura", mentre a valle ormai nella "zona satura" in condotte anche al di sotto del livello del mare. In effetti l'ipotesi è fondata, se ci basiamo sulle condizioni idrauliche del Timavo riscontrate all'Abisso dei Serpenti, all'Abisso di Trebiciano ed alla Grotta Lazzaro Jerko (un Timavo sempre più miscelato da apporti autogeni via via che esso si addentra nel Carso), fino al Complesso sommerso delle risorgive del Timavo (GUGLIA, 1994) dove sono state esplorate grandi gallerie poste 80 m sotto il livello del mare. Tale situazione, più che esser dovuta a condizionamenti litologici (funzione del "Complesso dolomitico") (FORTI, 1978) sarebbe semplicemente attribuibile agli effetti delle ingressioni marine sui carsismi pre-esistenti ed al basculamento verso W del Carso provocato dal carico dei sedimenti plio-quadernari che hanno formato la pianura veneto-friulana (MOSETTI & MOSETTI, 1986). Resterebbe da comprendere dove, eventualmente, ed in che modo, in passato (Messiniano, Quaternario) funzionavano le bocche del "sistema Timavo", anche in relazione alla soglia di permeabilità del Flysch che affiorava (oggi essa è al largo della costa sepolta da sedimenti marini recenti) lungo le faglie vicarianti la "linea di Palmanova".

L'ipotesi di un acquifero in gran parte confinato, che raggiungerebbe il citato "livello di base carsico", probabilmente oltre i 1.000 m di profondità, con un circuito "veloce" (anche se le maggiori circolazioni avvengono nella zona superiore), è fondata. L'acquifero confinato raggiungerebbe facies giurassiche e cretache inf., non affioranti nel "basso Carso". Facies che affiorano invece a N sull'"alto Carso", correlabili al "Calcarea del Vajont", al "Calcarea di Soccher", etc. (BUSER, 1973/a, 1973/b, 1986/a, 1986/b; D'AMBROSI 1961/a; PLENICAR, 1970; TUNIS & VENTURINI, 1997), nell'alloctono dei ricoprimenti di Hrusica e Trnovo (PLACER, 1981).

## IDROGEOLOGIA DELLA ZONA COSTIERA

Le uscite dell'acquifero carsico iniziano esattamente dove termina la barriera del Flysch che borda la costa. Le prime uscite sono le Sorgenti di Aurisina: nove sorgenti poste al livello del mare (allacciate con un bacino artificiale) su un fronte di 350 m, con una  $Q_{med}$  di  $0,3 \text{ m}^3/\text{sec}$  (BOEGAN, 1905-6). Seguono, procedendo verso occidente, una serie di polle marine, scaturenti dalla costa ai fondali calcarei antistanti, individuate mediante conduttometria in continuo, a mare, la cui portata non è accertabile (ACCEBONI & MOSETTI, 1967). Si valuta però portate non rilevanti. Sul lato E di San Giovanni di Duino, in costa, scaturiscono poi una serie di piccole sorgenti, di minima portata, che vengono sommerse dalla marea e che presentano insalinamento (CUCCHI & FORTI, 1983). Seguono, ad occidente, le uscite del Timavo. Le tre bocche del Timavo scaricano l'acqua in bacini artificiali provvisti di stramazzi e/o paratoie mobili comunicanti a valle con il breve corso del fiume fino al mare. Il livello dell'acqua nei bacini viene mantenuto per la maggior parte dell'anno, agendo sulle paratoie, tra 140-190 cm rispetto alla quota 0 riferito alla topografia del locale "Piano Müller. Le cosiddette sorgenti più occidentali, citate, sono poste maggiormente all'interno a quote leggermente inferiori, in corrispondenza dell'alveo formato dai bracci Moschenizze, Sardos, Lisert.

Il substrato della zona alluvionale che va dal fronte sorgivo verso Monfalcone è calcarea. Le isobate dei calcari sono state ricostruite mediante prospezioni geofisiche (D'AMBROSI & MOSETTI, 1965), scoprendo un paleoalveo con andamento E-W, situato a 40 m sotto il livello del mare. Nelle medesime condizioni, un altro paleoalveo a 60 m sotto il livello del mare è stato invece trovato all'incirca sottostante l'alveo alluvionale del Timavo inf.

Lungo tutto il bordo calcarea del Carso, nei pressi del contatto con la piana alluvionale citata, nella zona di Monfalcone, si trovano delle grotte che raggiungono la falda idrica carsica. In una di queste (Grotta ed Est della Stazione ferroviaria di Monfalcone) un monitoraggio (CANCIAN, 1987) ha mostrato che le acque presentano Cl con valori fino a 30 mg/l: concentrazioni sempre basse ma comunque più elevate rispetto al naturale background delle altre acque carsiche; ci sarebbe quindi da considerare la vicinanza del mare, anche se tutto l'acquifero carsico è, sostanzialmente, "in pressione". In tutte le sorgenti citate, ma anche nelle altre acque sotterranee carsiche locali, i cloruri sono sempre bassi; si notano valori, normali, di Cl anche di 9-13 mg/l (Lisert, Moschenizze, Doberdò), ma si deve considerare che valori fino a circa 10 mg/l possono semplicemente derivare dalle precipitazioni locali arricchitesi sul mare antistante. Non sono quindi dati ancora significativi per invocare fenomeni ingressivi marini d'importanza pratica. Insalinamenti più significativi, invece, sono stati trovati in due piccole cavità che raggiungono la falda carsica a S delle Risorgive del Timavo: la Grotta presso la Peschiera del Timavo e la Grotta nuova del Villaggio del Pescatore, ambedue situate molto vicine al mare, con, in questo caso, cloruri in concentrazioni elevate (Cl 37-103 mg/l) e in genere gli ioni caratteristici dell'acqua marina ( $S^{2-}$  21-77 mg/l,  $SO_4^{2-}$  17-35 mg/l,  $Mg^{2+}$  9,3-16 mg/l) (GEMITI, 1994).

Importante, anche se poco noto, è l'effetto delle maree del Mare Adriatico sulla falda carsica. Esse, a poco più di 3 km all'interno, nel Lago di Doberdò, fanno sentire nettamente la loro influenza (NICOLETTIS, 1983), come pure nella già citata falda carsica della valle di Brestovica. S'ipotizza però un'area di più vasta influenza.

Nell'area alluvionale di Monfalcone, dove si sviluppa il paleoalveo citato precedentemente, emergono alcuni speroni calcarei (M. S. Antonio). Questi affioramenti sono interessati da cavità carsiche dalle quali scaturiscono acque termali con temperature di circa 39-40°, sulfuree-salzo-solfatiche, che s'ipotizzano (genericamente) risalenti da circa 1.500-3.000 m, con temperature all'origine più alte (D'AMBROSI & MOSETTI, 1965). Queste acque sono legate a fratture profonde sviluppate lungo la "linea di Palmanova". Sono acque ad elevato contenuto di  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (300-400 mg/l), dovuto alla presenza di grosse quantità (un terzo) d'acqua di mare evidentemente raccolta durante la loro risalita. Le caratteristiche chimiche di queste acque sono tuttavia differenti da quelle, termali, della zona di Grado, dove il substrato profondo corrisponde al fianco orientale dell'alto strutturale carbonatico di Cesarolo (CALORE et al., 1995; DELLA VEDOVA, 1999; MARZONA, 1991).

Il corpo alluvionale situato tra il corso del Lisert-Canale Locavaz e Monfalcone corrisponde ad un importante acquifero la cui alimentazione è tuttora poco nota, anche se numerose indagini geognostiche e geofisiche hanno consentito di ricostruire la stratigrafia del substrato e l'andamento del bedrock. Si suppone che la falda freatica che caratterizza questo territorio sia alimentata da acque di provenienza carsica. Tuttavia quest'area, strategica per quanto riguarda l'approvvigionamento idrico della zona industriale di Monfalcone, è carente di dati relativi ai possibili fenomeni d'ingressione marina, nonché di indagini specifiche per l'utilizzo di questa risorsa idrica.

## IDROGEOLOGIA DELLA ZONA ALLUVIONALE PROFONDA DI CONTATTO

Importanti sono i rapporti tra l'acquifero del Carso e la zona alluvionale profonda in sinistra del F. Isonzo, da tempo ipotizzati (D'AMBROSI & MOSETTI, 1972). Il corpo alluvionale in questione, a N della "linea delle risorgive" (a S di Pieris-Staranzano), contraddistinto dal prevalere dei sedimenti fini, limosi e argillosi, che provocano il riaffiorare delle acque di falda, risulta caratterizzato in profondità da orizzonti ghiaiosi (acquiferi), spesso interdigitati, separati da orizzonti di limi e argille (acquicludi) (D'AMBROSI, 1955/c; D'AMBROSI & MOSETTI, 1962; ONOFRI & SEVERI, 1963; MORGANTE & ONOFRI, 1963; STEFANINI & CUCCHI, 1976, 1977). Il basamento è calcareo a N della "linea di Palmanova" (SE-NW) (AMATO et al., 1976), rintracciata nell'area in sinistra del F. Isonzo, in profondità, mediante prospezioni geofisiche (BERLASSO & CUCCHI, 1991), mentre a S si estende, per contatto tettonico, il Flysch.

Le maggiori informazioni si sono ottenute dallo studio degli acquiferi investigati durante l'esecuzione dei pozzi d'acqua profondi realizzati dall'ACEGAT (1976) e AGEGA (1985, 1994), a S di Fogliano-Redipuglia e S. Pier d'Isonzo ("linea N" e "linea S" di pozzi). In corrispondenza della "linea N" (zona Cassegliano-S. Zanut) fino a ~140 le falde vengono alimentate prevalentemente dalle perdite del F. Isonzo (velocità apparente, media, della falda freatica ~4 m/h). A profondità maggiori, al contatto con il bed-rock calcareo (~170-200 m sotto il l.m.) che è stato rintracciato mediante perforazione nei pressi di Cassegliano, con delle cavità carsiche sature (MOSETTI, 1980; MOSETTI & MOSETTI, 1977), scorrono acque con maggiori mineralizzazione, in particolare con Cl fino a 100-110 mg/l. Le acque delle falde più profonde, sotto i 150 m, sono state chiamate "tipo Natisone", poiché più mineralizzate (TH 22-26 °F,  $NO_3^-$  8-14 mg/l) (ACEGA, 1994) rispetto a quelle "tipo Isonzo" e chimicamente simili a quelle del F. Natisone; gli acquiferi più profondi, poi, risultano "contaminati" da acque salmastre provenienti dal basamento calcareo. Inoltre, alle maggiori profondità compaiono pure acque di "tipo alpino", con valori isotopici  $\delta^{18}O(H_2O)$  più negativi e caratterizzate, in base all'attività tritio (TU), da tempi di residenza teorici più elevati stimati in 30-40 anni (ACEGA, 1985; DELLA VEDOVA et al., 1987).

Per quanto riguarda la zona carsica a S di Sagrado, dallo studio idrologico e geochimico soprattutto del Pozzo di Polazzo (CANCIAN et al., 1996; COMAR & PELLIS, 1999; D'AMBROSI, 1962/a), nei calcari, risulterebbe che in questo settore (peraltro limitato) siano le acque del Carso ad alimentare le alluvioni del F. Isonzo, eccetto durante le piene dell'Isonzo in corrispondenza delle quali s'invertirebbe il flusso. Ciò dimostra, ancora una volta, la complessità del circuito idrico del Carso Triestino in questa zona di contatto tra l'acquifero carsico e quello poroso dell'Isonzo.

## REFERENCES

- ACCERBONI E. & MOSETTI F. (1967) - Localizzazione dei deflussi d'acqua dolce in mare mediante un conduttometro elettrico superficiale a registrazione continua - Boll. Geof. Teor. Appl., IX (36): 225-268.
- A.C.E.G.A.T. (1976) - (a cura di F. GEMITI), *Acquedotto dell'Isonzo. Relazione sulle caratteristiche chimico-fisiche delle acque dei pozzi in sinistra Isonzo* - Rapporto interno: 18 pp., 10 all.
- A.C.E.G.A. (1985) - (a cura di F. GEMITI), *Esecuzione di uno studio idrologico di dettaglio sulla potenzialità, alimentazione e possibilità di sfruttamento delle acque sotterranee della bassa pianura in sinistra del fiume Isonzo. Studio geochimico. Allegato 5* - Rapporto interno: 101 pp., 45 all.
- A.C.E.G.A. (1994) - (a cura di F. GEMITI), *Indagine idrochimica sulle acque dei pozzi di studio N° 15 - 24 - 15, Linea Sud dell'Acquedotto dell'Isonzo* - Rapporto interno: 20 pp., 28 all.
- AMATO A., BARNABA P.F., FINETTI I., GROPPI G., MARTINIS B. & MUZZIN A. (1976) - *Geodynamic outline and Seismicity of Friuli-Venezia Giulia Region* - Boll. Geof. Teor. Appl., 19 (72), 1: 217-256.
- ANSELMINI M. & SEMERARO R. (1985) - *Prime osservazioni geomorfologiche e idrologiche sull'Abisso "Massimo" (VG 5268) (Carso Triestino)* - Atti 7° Conv. Spel. Friuli-Venezia Giulia, Gorizia: 30-41.

- BALLARIN L., D'AMELIO L., KROKOS A., SERRA F. & SEMERARO R. (2000) - *Trieste Karst aquifer: review of hydrogeology and geochemistry* - COST Action 621 "Groundwater management of coastal karstic aquifers", 7<sup>th</sup> Management Committee Meeting, Karst Research Institute, Postojna 23-25 March 2000, Guide-Booklet for the excursion: 20 pp.
- BALLARIN L., GEMITI F. & SEMERARO R. (1994) - *Studio geoidrologico, idrochimico e speleogenetico del versante occidentale del Monte Carso (Istria montana nord-occidentale)* - Ipogea, 1: 49-131.
- BALLARIN L. & SEMERARO R. (1997) - *Geologia, geomorfologia e carsismo, geoidrologia e idrologia carsica, geologia tecnica, della zona di Trieste* - Ipogea, 2: 39-116.
- BARBIERI P., ADAMI G. & REISENHOFER E. (1998) - *Multivariate analysis of chemical-physical parameter to characterize and discriminate karstic waters* - Ann. Chimica, 88: 381-391.
- BARBIERI P., ADAMI G. & REISENHOFER E. (1999) - *Searching for a 3-Wai model of spatial and seasonal variations in the chemical composition of karstic freshwaters* - Ann. Chimica, 89: 639-648.
- BERLASSO G. & CUCCHI F. (1991) - *Caratteristiche geologiche e strutturali della bassa pianura isontina (Friuli-Venezia Giulia)* - Rend. Soc. Geol. It., 14: 13-16.
- BIDOVEC F. (1957) - *Prispevek Nostranjske Reke k vodnim mozinam kraskih izvirov v provodju Timava* - 10 let Hidrometeoroloske sluzbe, Zbornik HMZ: 29-43, Lubiana; trad. *Il contributo della Nostranjska Reka alle quantità d'acqua delle sorgenti carsiche del Timavo* su *Tecnica Italiana*, 1960 25 (6): 413-422.
- BIDOVEC F. (1960) - *Il Servizio idrologico deve esaminare e dimostrare il collegamento dell'Isonzo con il Timavo (Una proposta in relazione con lo studio di C. D'Ambrosi, sul problema dell'alimentazione idrica delle fonti del Timavo presso Trieste)* - *Tecnica Italiana*, 25 (8).
- BIDOVEC F. (1965) - *The hydrosystem of karstic springs in the Timavo Basin* - Actes Coll. Dubrovnik, AIHS-UNESCO, 1: 263-274.
- BOEGAN E. (1905/06) - *Le sorgenti di Aurisina con appunti sull'idrografia sotterranea e sui fenomeni del Carso* - *Alpi Giulie*, 10 (3-4-5), 11 (1-2-3), Tip. Caprin: 126 pp.
- BOEGAN E. (1909/10) - *La Grotta di Trebiciano* - *Alpi Giulie*, 14-1909, 15-1910: 1-66.
- BOEGAN E. (1921) - *La Grotta di Trebiciano (studi e rilievi dal 1910 al 1921)* - *Alpi Giulie*, 23: 1-42.
- BOEGAN E. (1938) - *Il Timavo. Studio sull'idrografia carsica subaerea e sotterranea* - Mem. Ist. It. Spel., s.e Geol. e Geof., 2: 251 pp.
- BORDON V., CANCIAN G. & PINTAR D. (1988) - *Ricerche sull'idrologia sotterranea tra il Lago di Doberdò e la Grotta di Comarie (Carso Goriziano) tramite i traccianti naturali* - *Atti Mus. Civ. St. Nat. Trieste*, 41 (2): 169-179.
- BUSER S. (1973/a) - *S.F.R.J., Osnovna Geoloska Karta 1:100.000, Gorica L 33-76* - Izdal Zvezni geoloski zavod, Beograd.
- BUSER S. (1973/b) - *S.F.R.J., Osnovna Geoloska Karta 1:100.000, Tolmac lista Gorica L 33-76* - Izdal Zvezni geoloski zavod, Beograd, 68 pp.
- BUSER S. (1986/a) - *Osnovna geoloska karta SFRJ, Tolmin in Videm 1:100.000, L 33-64* - Zvenzni geoloski zavod, Beograd.
- BUSER S. (1986/b) - *Osnovna geoloske karta SFRJ 1:100.000, Tolmac listov Tolmin in Videm (Udine) L 33-64 L 33-63* - Zvenzni geoloski zavod, Beograd, 103 pp.
- CALORE C., DELLA VEDOVA B., GRASSI S., MARSON I., NICOLICH R. & SQUARCI P. (1995) - *A hydrothermal system along the coastal area of Friuli-Venezia Giulia region (NE Italy)* - Proc. World Geothermal Congr., Firenze, 2: 1269-1274.
- CANCIAN G. (1987) - *L'idrologia del Carso goriziano-triestino tra l'Isonzo e le risorgive del Timavo* - St. Trentini Sc. Nat., Acta Geol., 64: 77-98.
- CANCIAN G. (1988) - *Significato idrologico della concentrazione di ossigeno e anidride carbonica nelle acque sotterranee tra il lago di Doberdò e le risorgive del Timavo (Carso Goriziano-Triestino)* - *Mondo Sotterraneo*, n. s., 12 (1-2): 11-29.
- CANCIAN G., MARCHI F. & MINIUSI D. (1996) - *L'idrologia del Pozzo di Polazzo (Carso Goriziano) mediante un monitoraggio chimico e microbiologico* - *Studi e ricerche, Soc. St. carsici "A.F. Lindner"*, n. un 1996, 3: 51-69.
- CAROBENE L. & CARULLI G.B. (1981) - *Fogli 40<sup>a</sup> Gorizia e 53<sup>a</sup> Trieste* - Carta tettonica delle Alpi Meridionali (alla scala 1:200.000) a cura di A. Castellarin: 8-13.
- CARULLI G.B. & CUCCHI F. (1991) - *Proposta di interpretazione strutturale del Carso Triestino* - *Atti Ticinesi Sc. Terra*, 34: 161-166.
- CIVITA M., CUCCHI F., EUSEBIO A., GARAVOGLIA S., MARANZANA F. & VIGNA B. (1995) - *The Timavo hydrogeologic system: an important reservoir of supplementary water resources to be reclaimed and protected* - Proc. Int. Symp. "Man on Karst", Postojna 1993, Acta Carsologica, 24: 169-186.
- COLUCCI R. (1999) - *Osservazioni meteoriche eseguite nel 1998* - Boll. Staz. Meteo. Borgo Grotta Gigante, Supp. Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan": 23 pp.
- COMAR M. & PELLIS M. (1999) - *Schema idrogeologico del Carso compreso tra l'Isonzo e le risorgive del Timavo* - Atti VIII Conv. Reg. Spel. Friuli-Venezia Giulia, Cave di Selz (Ronchi dei Legionari, Gorizia): 123-130.
- COMAR M., CANCIAN G. & SANDRIN M. (1996) - *L'idrologia dei laghi delle Mucille (Carso Monfalconese)* - *Studi e ricerche, Soc. St. carsici "A.F. Lindner"*, n. un 1996, 3: 87-103.
- CUCCHI F. & FORTI F. (1983) - *Primi risultati dello studio di alcune sorgenti carsiche marine presso San Giovanni di Duino (TS)* - Atti 6° Conv. reg. spel. Friuli-Venezia Giulia, Udine 1983, *Mondo sotterraneo*, 7 (2): 67-76.
- CUCCHI F., FORTI P., MARINETTI E. & ZINI L. (2000) - *Recent developments in knowledge of the hydrogeology of the Classical Karst* - Acta Carsologica, 29 (1): 55-78.
- CUCCHI F., GIORGETTI F., MARINETTI E. & KRANJC A. (1997) - *Experiences in monitoring Timavo River (Classical Karst)* - Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. Water Tracing, Slovenia 1997, Kranjc (ed.), Balkema, Rotterdam: 213-218.
- CUCCHI F., PIRINI RADRIZZANI C. & PUGLIESE N. (1987) - *The carbonate stratigraphic sequence of the Karst of Trieste (Italy)* - Mem. Soc. Geol. It., 40: 35-44.



- CUCCHI F., PUGLIESE N. & ULCIGRAI F. (1989) - *Il Carso Triestino: note geologiche e stratigrafiche* - Int. J. Speleol., 18, 1-2: 49-64.
- D'AMBROSI C. (1953) - *Carta Geologica delle Tre Venezie. Foglio Trieste 1:100.000* - Uff. Idrogr. Mag. Acque Venezia, Firenze.
- D'AMBROSI C. (1955/a) - *Note illustrative della Carta Geologica delle Tre Venezie. Foglio Trieste* - Padova: 85 pp.
- D'AMBROSI C. (1955/b) - *In merito alle ripercussioni sul regime delle risorgive carsiche presso Duino ed Aurisina (Trieste) conseguenti ad una eventuale derivazione idrica dall'alto Timavo verso l'Istria* - Tec. It., X (2): 1-4.
- D'AMBROSI C. (1955/c) - *Osservazioni su eventuali pericoli di futuri inquinamenti delle falde artesiane bassoisontine* - Tec. It., X (1): 1-8.
- D'AMBROSI C. (1960) - *Sul problema dell'alimentazione idrica delle fonti del Timavo presso Trieste (a proposito di un recente studio di Franc Bidovec)* - Tec. It., 25 (8): 547-565.
- D'AMBROSI C. (1961/a) - *Sviluppo e caratteristiche geologiche della serie stratigrafica del Carso Triestino* - Boll. Soc. Adriatica Sc., 51: 145-164.
- D'AMBROSI C. (1961/b) - *Lo stato attuale delle conoscenze sull'idrologia e sull'idrografia del Carso di Trieste* - Boll. Soc. Adriatica Sc., 51: 189-203.
- D'AMBROSI C. (1961/c) - *Nuove considerazioni sulle disponibilità idriche alle risorgenze carsiche del settore di Duino (Trieste) in rapporto con una derivazione d'acqua dal Timavo superiore verso l'Istria* - Atti Mus. Civ. St. Nat. Trieste, XXII, 4-1961 (7): 132-166.
- D'AMBROSI C. (1961/d) - *Su una proposta di Franc Bidovec, Superiore dell'Ufficio Idrometeorologico di Lubiana, riguardo il problema dell'alimentazione idrica del Timavo presso Trieste* - Tec. It., 26 (7): 501-506.
- D'AMBROSI C. (1962) - *Le acque del Carso ed il problema del rifornimento idrico della città di Trieste e della sua zona industriale* - Tec. It., XXVII (1-2): 3-14.
- D'AMBROSI C. (1962/a) - *Sul significato idrologico del pozzo carsico di Polazzo presso Fogliano-Redipuglia (Gorizia) nel problema dell'alimentazione idrica del Timavo e dei pericoli che ne derivano per la città di Trieste* - Tec. It., 27 (7): 5-11.
- D'AMBROSI C. (1964) - *Ai margini di un recente esperimento al tritio eseguito sulle acque del fiume Timavo presso Trieste* - Tec. It., 29 (4): 187-201.
- D'AMBROSI C. & MOSETTI F. (1960) - *Risultati preliminari di una ricerca geoidrologica per il nuovo acquedotto di Gorizia* - Boll. Geof. Teor. Appl., 2 (7): 3-12.
- D'AMBROSI C. & MOSETTI F. (1962) - *Contributo alla conoscenza della geoidrologia della piana isontina in sinistra del basso Isonzo* - Boll. Geof. Teor. Appl., 4 (13): 16-36.
- D'AMBROSI C. & MOSETTI F. (1965) - *Caratteristiche strutturali della zona fra Monfalcone ed il Timavo* - Adriatico, 5-6: 3-7.
- D'AMBROSI C. & MOSETTI F. (1972) - *Il conoide isontino e le sue falde acquifere nel loro stato attuale e con riferimento alle influenze carsiche collaterali* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 11: 19-36.
- D'AMELIO L., DINI M. & SEMERARO R. (1997) - *Geochemical-isotopic study of the underground waters and scheme of the karst hydrostructure of Mt. Stena (Karst of Trieste)* - Ipogea, 2: 15-38.
- DEL BEN A., FINETTI I., REBEZ A. & SLEJKO D. (1991) - *Seismicity and seismotectonics at the Alps-Dinarides contact* - Boll. Geof. Teor. Appl., 33 (130-131): 155-176.
- DELLA VEDOVA B. (1999) - *Caratterizzazione dell'area geotermica della Bassa Pianura Friulana* - Atti Incontro di lavoro Potenzialità geotermiche della Bassa Pianura Friulana: stato dell'arte e proposte operative, Reg. Auton. Friuli-Venezia Giulia e Università di Trieste: 5-14.
- DELLA VEDOVA B., LONGINELLI A., MARSON I. & PALMIERI F. (1987) - *Il termalismo artesiano della fascia litorale veneto-friulana: stato di avanzamento delle ricerche* - Atti 6° Congr. Naz. Ordine Geologi, Venezia 1987: 391-395.
- DE MARTINI L. & MAUCCI W. (1952) - *Risultati preliminari di alcune ricerche sul corso ipogeo del Timavo* - Boll. Soc. Adriatica Sc. Nat., 46: 61-74.
- DOCTOR D.H., LOJEN S. & HORVAT M. (2000) - *A stable isotope investigation of the Classical Karst aquifer: evaluating karst groundwater components for water quality preservation* - Acta Carsologica, 29 (1): 79-92.
- DORO B. & D'AMBROSI C. (1954) - *Ricerche chimiche, chimico-fisiche e geologiche sulle falde artesiane della bassa friulana, nello studio del nuovo acquedotto di Trieste* - Boll. Soc. Adriatica Sc. Nat., 47: 107-131.
- DROGUE C., RAZACK M. & KRIVIC P. (1984) - *Survey of a Coastal Karstic Aquifer by analysis of the effect of the sea-tide: Exemple of the Kras of Slovenia, Yugoslavia* - Environ. Geol. Water Sc., 6: 103-109.
- ERIKSSON E., MOSETTI F., HODOSCEK K. & OSTANEK L. (1963) - *Some new results on the karstic hydrology with the employ of tritiated water as tracer* - Boll. Geof. Teor. Appl., 5 (17): 18-32.
- FINETTI I. (1967) - *Ricerche sismiche a rifrazione sui rapporti strutturali fra il Carso ed il Golfo di Trieste* - Boll. Geof. Teor. Appl., 9 (35): 214-225.
- FLORA O., GALLI G., NEGRINI L. & LONGINELLI A. (1990) - *Studio geochimico-isotopico di alcune sorgenti carsiche: un nuovo modello idrologico* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 29: 83-102.
- FORTI F. (1978) - *Considerazioni sulla situazione idrogeologica del Carso Triestino in rapporto alle condizioni geolitologiche e strutturali del complesso carbonatico carsificabile* - Atti 12° Congr. Naz. Spel., S.Pellegrino Terme 1974, Rass. Spel. It., Mem. 12: 102-112.
- FORTI F., SEMERARO R. & ULCIGRAI F. (1979) - *Carsogenesi e geomorfologia dell'Abisso di Trebiciano* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 18: 51-99.
- FORTI F. & TOMMASINI T. (1965) - *Prime notizie su di una indagine termometrica sistematica alle Risorgive del Timavo a San Giovanni di Duino ed alle sorgenti del vallone di Moschenizze (Carso Triestino)* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", V: 93-106.
- GABUCCI G., GEMITI F. & MOSETTI F. (1973) - *Contributo alla conoscenza dell'idrologia delle risorgive carsiche di San Giovanni di Duino presso Trieste* - Boll. Lab. Chim. Prov., Trieste, 24 (4): 3-31.

- GALLI M. (1999) - *Timavo. Esplorazioni e studi* - Suppl. N. 23 Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 197 pp.
- GEMITI F. (1979) - *Contributo alla conoscenza dell'idrologia sotterranea nella pianura di Gorizia con particolare riferimento all'alimentazione della falda carsica di Doberdò* - Atti 1° Conv. ecologia dei territori carsici, Sagrado d'Isonzo 1979: 79-89.
- GEMITI F. (1982) - *Nuove esplorazioni e indagini idrochimiche alle risorgive del Timavo* - Atti 5° Conv. reg. spel. Friuli-Venezia Giulia, Trieste 1981: 161-172.
- GEMITI F. (1984) - *La portata del Timavo alle risorgive di S. Giovanni di Duino* - Ann. Gr. Grotte Ass. XXX Ott., 7: 23-41.
- GEMITI F. (1984/a) - *Nuova e originale prova di marcatura delle acque del Timavo* - Ann. Gr. Grotte Ass. XXX Ott., 7: 43-62.
- GEMITI F. (1994) - *Indagini idrochimiche alle risorgive del Timavo* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 31: 73-83.
- GEMITI F. (1996) - *Portata liquida e portata solida del Timavo alle risorgive di S. Giovanni di Duino* - Hydrores, 13: 75-88.
- GEMITI F. (1998) - *Marcatura delle acque del Timavo a seguito di un versamento di idrocarburi nella valle della Recca e interpretazione dell'evento mediante l'utilizzo di dati meteorologici, idrologici, idrochimici* - Ann. Gr. Grotte Ass. XXX Ottobre, 10: 93-104.
- GEMITI F. & LICCIARDELLO M. (1977) - *Indagine sui rapporti di alimentazione delle acque del Carso Triestino e Goriziano mediante l'utilizzo di alcuni traccianti naturali* - Annali Gr. Grotte Ass. XXX Ottobre., 6: 43-61.
- GEMITI F. & MILANI G. (1977) - *Correlazioni tra i livelli d'acqua della Grotta A.F. Lindner e il Fiume Timavo* - Ann. Gr. Grotte Ass. XXX Ott., 6: 23-30.
- GEOKARST S.N.C. (1979) - *Lo stato delle attuali conoscenze sull'idrogeologia del territorio compreso tra Grado e Punta Sottile. Carta idrogeologica 1:50.000* - Rapporto per conto di Università degli Studi di Trieste / Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.
- GEOKARST ENGINEERING S.R.L. (1997) - *Progetto Geotermia Grado. Studio geoidrologico per la realizzazione di un impianto geotermico* - Allegato: DELLA VEDOVA B., MARSON I. & NICOLICH R. - *Inquadramento geologico e geotermico dell'area* - Rapporto per il Comune di Grado.
- GOSPODARIC R. & HABIC P. (Eds.) (1976) - *Underground Water Tracing. Investigation in Slovenia* - Ljubljana: 312 pp.
- GUGLIA P. (1994) - *Risultati esplorativi del "Progetto Timavo" (1990-1993)* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 31:25-48.
- HABIC P. (1989) - *Kraska bifurkacija Pivke na jadransko crnomoreskem razvodju. Pivka karst bifurcation on Adriatic-Black See watershed* - Acta Carsologica, 18: 233-264.
- HABIC P. (1990) - *Sledenje kraskih voda v Sloveniji* - Geografski Vestnik, 61 (1989): 3-20.
- JURKOVSEK B., TOMAN M., OGORELEC B., SRIBAR L., DROBNE K., POLJAK M. & SRIBAR L. (1996/a) - *Formacijska geoloska karta južnega dela Trzasko-komenske planote. Kredne in paleogenske karbonatne kamnine, 1:50.000* - Institut geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana, 145 pp.
- JURKOVSEK B., OGORELEC B., SRIBAR L. & DROBNE K. (1996/b) - *New results of the geological researches of the Trieste-Komen plateau and comparison with other areas of the dinaric varbonate platform* - In: K. DROBNE, S. GORICAN & B. KOTNIK (eds.), *The Role of Impact Processes in the Geological and Biological Evolution of Planetary Earth*. Int. Workshop Postojna '96, Ljubljana: 125-132.
- KNEZ M., KRANJC A., MIHEVC A. & PETRIC M. (1997/a) - *The Caves of Skočjanske Jame and Kras* - Acta Carsologica, XXVI/1 Suppl., 7<sup>th</sup> Int. Symp. Water Tracing, Field guide of Karst in Slovenia: 9-36.
- KNEZ M., OTONICAR B. & SEBELA S. (1997/b) - *Geology of Kras* - In: M. ALJANCIC, P. FISTER, Z. KLEMEN KREK, A. KRANJC, L. LAH, M. OROZEN ADAMIC & J. SUMRADA (eds.), *Slovene Classical Karst*. 1997, ZRC SAZU, Ljubljana: 19-41.
- KOGOVSEK J., KRANJC A. & PETRIC M. (1997) - *Hydrology* - In: M. ALJANCIC, P. FISTER, Z. KLEMEN KREK, A. KRANJC, L. LAH, M. OROZEN ADAMIC & J. SUMRADA (eds.), *Slovene Classical Karst*. 1997, ZRC SAZU, Ljubljana: 55-75.
- KRANJC A., SLABE T. & ZUPAN HAJNA N. (1997) - *Speleology* - In: M. ALJANCIC, P. FISTER, Z. KLEMEN KREK, A. KRANJC, L. LAH, M. OROZEN ADAMIC & J. SUMRADA (eds.), *Slovene Classical Karst*. 1997, ZRC SAZU, Ljubljana: 77-101.
- KRIVIC P. (1981) - *Etude hydrodynamique d'un aquifère karstique côtière: le Kras de Slovenie, Yougoslavie* - Accadémie Montpellier, Univ. Sc. Techn. Languedoc, Thèse de Docteur-Ingénieur Université Montpellier II: 108 pp.
- KRIVIC P. (1982/a) - *Variation naturelles de niveau piézométrique d'un aquifère karstique* - Geologija, 25/1:129-150.
- KRIVIC P. (1982/b) - *Transmission des ondes de marée a travers l'aquifère côtier del Kras* - Geologija, 25/2:309-325.
- KRIVIC P. (1983) - *Interprétation des essais par pompage réalisés dans un aquifère karstique* - Geologija, 26:149-189.
- KRIVIC P., BRICELJ M. & ZUPAN M. (1989) - *Podzemne vodne zveze na področju Cicarije in osrednjega dela Istre (Slovenija, Hrvatska, NW Jugoslavija). Underground water connections in Cicarija recion and in Middle Istria (Slovenia, Croatia, NW Yugoslavia)* - Acta Carsologica, 18: 265-295.
- KRIVIC P. & DROBNE F. (1980) - *Hidrogeoloske raziskave Trzasko-komenskega krasa* - Zbornik 6 Jug. Simp. Hidrogeol. Inz. Geol., Portoroz, 1 : 233-239.
- KROKOS A. (1998) - *Ulteriori studi geochimico-isotopici su alcune sorgenti carsiche costiere dell'area triestina: considerazioni idrologico-ambientali* - Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università di Trieste.
- LONGINELLI A. (1988) - *Stable isotope hydrology of the classical Karst area, Trieste, Italy* - Rend. Soc. It. Min. Petrol., 43: 1175-1183.
- MAGISTRATO ALLE ACQUE, UFFICIO IDROGRAFICO (1950) - *Progetto di irrigazione del comprensorio dell'Agro Cormonese-Gradiscano. Relazione* (redatto da L. VOLLO) - Venezia, Off. Graf. C. Ferrari, 87 pp.
- MARTINIS B. (1951) - *Carta Geologica delle Tre Venezie. Foglio Gorizia 40<sup>A</sup>* - Uff. Idrogr. Mag. Acque Venezia, Firenze.
- MARTINIS B. (1953) - *Fenomeni carsici nel sottosuolo di Gradisca d'Isonzo (Gorizia)* - Rass. Spel. It., 5 (3): 102-104.
- MARUSSI A. (1960) - *I primi risultati ottenuti nella stazione per lo studio delle maree della verticale della Grotta Gigante* - Boll. Geod. Sc. Affini, 19 (4): 645-667.
- MARZONA R. (1991) - *Modellistica geofisica applicata allo studio dell'anomalia geotermica della zona litorale veneto-friulana* -

- Tesi di laurea in Geofisica Mineraria, corso di laurea in Ingegneria Mineraria, Università di Trieste.
- MAUCCI W. (1953/a) - *Relazione sul primo ciclo di ricerche svolte dalla sezione speleologica della Società Adriatica di Scienze Naturali sul corso sotterraneo del Timavo* - Rass. Spel. It., 5 (2): 67-74.
- MAUCCI W. (1953/b) - *Organizzazione tecnica e risultati delle ricerche sul corso ipogeo del Timavo (1952-53) (Carso Triestino)* - Prem. Congr. Inter. Spéléo., Paris 1953, 2: 201-213.
- MENICETTI M. (1997) - *Idrodinamica del sistema Reka-Timavo nel Carso (Slovenia, Italia)* - Atti 17° Congr. Naz. Spel., Castelnuovo Garfagnana 1994: 265-276.
- MIHEVC A. (1984) - *Nova spoznanja o Kacni jami* - Nase Jame, 26: 11-20.
- MIHEVC A. (1997) - *Upper part of the Ljubljana River basin* - Acta Carsologica, XXVII/1 Suppl., 7<sup>th</sup> Int. Symp. Water Tracing, Field guide of Karst in Slovenia: 56-76.
- MORELLI C. (1954) - *Rilievo gravimetrico alle foci del Timavo* - Tec. It., 9 (2): 111-113.
- MORGANTE S., MOSETTI F. & TONGIORGI E. (1966) - *Moderne indagini idrologiche nella zona di Gorizia* - Boll. Geof. Teor. Appl., 8 (30), 114-137.
- MORGANTE S. & ONOFRI R. (1963) - *Ricerche sulle falde idriche nella zona compresa fra Terzo di Aquileia e l'Isonzo* - Boll. Soc. Adriatica Sc., LII-1961/62: 75-86.
- MOSETTI F. (1954/a) - *Rilievo geoelettrico del delta sotterraneo del Timavo* - Tec. It., 9 (2): 115-119.
- MOSETTI F. (1954/b) - *Studio geoelettrico dell'idrologia sotterranea del Friuli orientale. Parte 1<sup>a</sup> - La zona tra Pieris e Monfalcone* - Tec. It., 9 (3): 3-8 (estr.).
- MOSETTI F. (1957) - *Prospezione geoelettrica per la cartiera del Timavo. Un caso di applicazione della geofisica a problemi di fondazione* - Tec. It., 22, n.s. 12 (4): 3-7.
- MOSETTI F. (1960) - *Étude sur le mouvement des eaux souterraines par la procédé thermométrique* - Boll. Geod. Teor. Appl., 2 (8), Trieste.
- MOSETTI F. (1962) - *Risorse idriche della zona del porto industriale di Trieste* - Tec. It., XXVII (1-2): 15-42.
- MOSETTI F. (1965) - *Nuova interpretazione di un esperimento di marcatura radioattiva del Timavo* - Boll. Geof. Teor. Appl., 7: 218-243.
- MOSETTI F. (1966) - *Lo stato delle attuali conoscenze sull'idrologia carsica e relative ripercussioni sul problema dell'alimentazione idrica di Trieste* - Atti Mus. Civ. St. Nat. Trieste, 25: 73-105.
- MOSETTI F. (1966/a) - *L'idrologia della Carsia Giulia e dei territori limitrofi* - Adriatico, 12 (5-6): estr. 5 pp.
- MOSETTI F. (1977) - *Contributo alla conoscenza della profondità dell'incassamento nel Carso Triestino* - Atti 3° Conv. spel. Friuli-Venezia Giulia, Gorizia 1977: 273-278.
- MOSETTI F. (1980) - *Su due pozzi profondi della piana isontina: risultati preliminari delle ricerche ACEGA per il nuovo acquedotto di Trieste* - Boll. Soc. Adriatica Sc., 64: 7-16.
- MOSETTI F. (1989) - *Carsismo e idrologia carsica nel Friuli-Venezia Giulia* - Quad. E.T.P., 17: 1-159.
- MOSETTI F. & D'AMBROSI C. (1963) - *Alcune ricerche preliminari in merito a supposti legami di alimentazione fra il Timavo e l'Isonzo* - Boll. Geof. Teor. Appl., 5: 69-83.
- MOSETTI F., ERIKSSON E., BIDOVEC F., HODOSCEK K. & OSTANEK L. (1963) - *Un nuovo contributo alla conoscenza dell'idrografia sotterranea del Timavo* - Tec. It., 38: 157-171.
- MOSETTI F. & MOSETTI P. (1986) - *Sulla carsificazione profonda del Carso Triestino* - Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan", 25: 61-90.
- MOSETTI F. & POMODORO P. (1967) - *Nuove indagini con traccianti naturali sulla provenienza delle acque carsiche del sistema del Timavo* - L'Acqua, 45 (4): 97-103.
- NICOLETTIS P. (1983) - *Il regime idrico del Lago di Doberdò e della falda carsica del monfalconese* - Atti IV Conv. Spel. Friuli Venezia Giulia, Pordenone 1979: 249-256.
- NOVAK D. (1965) - *Hidrogeologija abmocja Osapske Reke* - Inz. Ged. i Hidrogeol., 1964/65, Beograd: 81-91..
- NOVAK D. (1993) - *Hydrogeological research of the Slovenian karst* - Nase Jame, 35/1: 15-20.
- O.G.S. - OSSERVATORIO GEOFISICO SPERIMENTALE (1989) - *Studio delle anomalie geotermiche della Bassa Pianura Friulana. Rilievo di superficie e censimento dei pozzi d'acqua calda* (redatto da BERLASSO G., CUCCHI F., GIACOMICH R., MOSCA R., PADOAN G., REISENHOFER E., TOFFUL C. & VASCOTTO P.) - Rapporto per conto della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.
- ONORI R. & SEVERI G. (1963) - *Ricerche sulle falde idriche nella parte orientale della Pianura Friulana* - Boll. Soc. Adriatica Sc., LII-1961/62: 41-74.
- PETRIC M. & KOGOVSEK J. (2000) - *General characteristics of the Kras region* - COST Action 621 "Groundwater management of coastal karstic aquifers", 7<sup>th</sup> Management Committee Meeting, Karst Research Institute, Postojna 23-25 March 2000, Guide-Booklet for the excursion: 3-16.
- PEZDIC J., DOLENEC T., KRIVIC P. & URBANC J. (1986) - *Environmental isotope studies related to groundwater flow in the central Slovenian karst region* - 5. SUWT 5<sup>th</sup> Int. Symp. Underground Water Tracing, Athens: 91-100.
- PLACER L. (1981) - *Geoloska zgradba jugozahodne Slovenije* - Geologija, 24/1: 27-60.
- PLENICAR M. (1970) - *S.F.R.J., Osnovna Geoloska Karta 1:100.000, Tolmac za list Postojna L 33-77* - Izdal Zvezni geoloski zavod, Beograd, 62 pp.
- PLENICAR M., POLSAK A. & SIKIC D. (1973/a) - *S.F.R.J., Osnovna Geoloska Karta 1:100.000, Trst L 33-38* - Izdal Zvezni geoloski zavod, Beograd.
- PLENICAR M., POLSAK A. & SIKIC D. (1973/b) - *S.F.R.J., Osnovna Geoloska Karta 1:100.000, Tolmac za list Trst L 33-38* - Izdal Zvezni geoloski zavod, Beograd, 68 pp.
- POLAJNAR J., PRISTOV J., BAT M. & KOLBEZEN M. (1997) - *3.2. The water balance of the Trnovsko-Banjska Planota* - In *Karst Hydrogeological Investigation in South-Western Slovenia*, Acta Carsologica, XXVI/1:19-30.

- PRISTOV J. (1997) - 2.3. *The climate of the Trnovsko-Banjska Planota* - In *Karst Hydrogeological Investigation in South-Western Slovenia*, Acta Carsologica, XXVI/1:19-30.
- REISENHOFER E., ADAMI G. & BARBIERI P. (1995) - *Trace metals used as natural markers for discriminating some karstic freshwaters near Trieste (Italy)* - *Toxicological Environmental Chemistry*, 54: 233-241.
- REISENHOFER E., ADAMI G. & BARBIERI P. (1997) - *Using chemical and physical parameter to define the quality of karstic freshwaters (Timavo River, North-Eastern Italy): a chemometric approach* - *Wat. Res.*, 32 (4): 1193-1203.
- ROJSEK D. (1996) - *Velika Voda, Reka, a Karst River* - Acta Carsologica, 25: 193-206.
- SEMERARO R. (1982) - *Nuovi aspetti geologici, geomorfologici e geoidrologici dell'Abisso dei Serpenti (Slovenia, Jugoslavia) emersi dalle campagne esplorative svolte dal 1971 al 1975* - In A. DINI & G. TARABOCCHIA, *L'Abisso dei Serpenti*, Ed. "Italo Svevo", Trieste: 65-74.
- STACHE G. (1920/a) - *Goerz und Gradisca. (1:75.000)* - Geol. Spezialkarte der im Reichsraete vertretenen Koenigreiche und Lander Oesterreichischen-Ungarischen Monarchie. Geol. Bundesanstalt, Wien.
- STACHE G. (1920/b) - *Triest und Capodistria. (1:75.000)* - Geol. Spezialkarte der im Reichsraete vertretenen Koenigreiche und Lander Oesterreichische-ungarischen Monarchie. Geol. Bundesanstalt, Wien.
- STEFANINI S. (1978) - *Le acque freatiche della regione: sintesi delle attuali conoscenze* - *Rass. Tec. Friuli-Venezia Giulia*, 1978 (2): 3-10.
- STEFANINI S. (1980) - *Il termalismo delle acque artesiane nelle lagune di Marano e di Grado e nelle aree adiacenti* - *Rass. Tec. Friuli-Venezia Giulia*, 5: 19-24.
- STEFANINI S. & CUCCHI F. (1976) - *Gli acquiferi nel sottosuolo della provincia di Gorizia (Friuli-Venezia Giulia)* - *Quad. Ist. Ric. sulle Acque*, 28 (13): 351-366.
- STEFANINI S. & CUCCHI F. (1977) - *Le ghiaie nel sottosuolo della pianura veneta ad oriente del F. Piave* - *Quad. Ist. Ric. sulle Acque*, 34 (3): 67-79.
- TENTOR M., TUNIS G. & VENTURINI S. (1994) - *Schema stratigrafico e tettonico del Carso isontino* - *Natura nascosta*, 9: 1-32.
- TIMEUS G. (1910) - *Studi in relazione al provvedimento d'acqua per la città di Trieste. Dati idrologici, chimici e batteriologici* - Comune di Trieste, Stab. Art. Tip. G. Caprin: 82 pp.
- TIMEUS G. (1912) - *Ricerche sul Timavo inferiore. Osservazioni al parere conclusionale del dott. Kinzel e note riflettenti il provvedimento d'acqua di Trieste* - Municipio di Trieste, Stab. Art. Tip. G. Caprin: 81 pp.
- TIMEUS G. (1928) - *Nei misteri del mondo sotterraneo. Risultati delle ricerche idrologiche sul Timavo 1895-1914, 1918-1927* - *Alpi Giulie*, 24 (1): 1-39.
- TOMMASINI T. (1968) - *Indagine termometrica alle Risorgive del Timavo a San Giovanni di Duino ed alle sorgenti del vallone di Moschenizze (Carso Triestino)* - *Biennio 1966-67* - *Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan"*, VII: 63-73.
- TOMMASINI T. (1969) - *Indagine termometrica alle Risorgive del Timavo a San Giovanni di Duino ed alle sorgenti del vallone di Moschenizze (Carso Triestino)* - *anno 1968* - *Atti Mem. Comm. Grotte "E. Boegan"*, VIII: 53-78.
- TRISIC N. (1997) - 2.2. *Hydrology* - In *Karst Hydrogeological Investigation in South-Western Slovenia*, Acta Carsologica, XXVI/1:19-30.
- URBANC J. & KRISTAN S. (1998) - *Isotope investigation of the Brestovica water source during an intensive pumping test* - *RMZ Materials and Geoenvironment*, Ljubljana, 45 (1-2): 187-191.
- VECCHIA G., DE WRACHEN D. & MAGINI A. (1968) - *Le acque sotterranee nella pianura friulana orientale* - *Tip. Ambrosini, Penne*: 1-146.

Received December 1999; accepted April 2000

Referee: F. Gemiti