



Luca Zini
Chiara Calligaris
Walter Boschin
Franco Cucchi

TRASMISSIONE DI IMPULSI DI PIENA NELLA ZONA SORGENTIFERA DEL CARSO TRIESTINO

FLOOD PULSES OF THE CLASSICAL KARST SPRING AREA

Riassunto breve - Nell'ambito di una ricerca volta a caratterizzare la falda d'acqua presente nel sottosuolo della ex cava di Sistiana, circa 3.5 km a SE delle Sorgenti del Timavo a Duino, si è appurato che le acque sono simili per caratteristiche chimiche e geochemiche a quelle delle Sorgenti di Aurisina, ubicate circa 3.5 km a SE, miscelate durante le precipitazioni con acque di neoinfiltrazione di provenienza locale e a circolazione superficiale. La falda oscilla in sincronia con quella del Carso e il suo livello è significativamente modificato in magra con la movimentazione delle paratoie che regolano il deflusso dalle Sorgenti a San Giovanni di Duino.

Parole chiave: Idrogeologia carsica, Carso Classico, Acquifero del Timavo, Sorgenti del Timavo.

Abstract - *In the framework of a study aimed at the aquifer system characterization in the Sistiana quarry area (Gulf of Trieste, Classical Karst coast line), resulted that geochemical characteristics of these waters are similar to the one of karstic Aurisina Spring. These springs are located at about 3.5 km SE from the quarry. Sistiana waters are mixed waters due to two contributions: the neoinfiltration waters and the one coming from a shallow circuit. Water table fluctuations are consistent with the ones typical of the Karst system and its water level result heavily modified during low water regime by the gate handling regulating the outflows at Timavo Springs in San Giovanni di Duino.*

Key-words: Karst hydrogeology, Classical Karst, Timavo aquifer, Timavo springs.

Premessa

Nel Carso Classico, carso maturo e dalle caratteristiche litologico-strutturali relativamente unitarie ed omogenee, si è sviluppata una rete eterogenea e non uniforme di vuoti collegati, una "rete a dreni dominanti", cui fanno capo localmente alcuni "dreni interdipendenti", cui fanno capo a loro volta numerosi "dreni diffusi" (sensu VIGNA, 2001). Si hanno quindi numerose vie di drenaggio, alcune delle quali importanti con lunghi tratti anche sifonanti, con una circolazione semidispersiva nella rete di condotti e fratture e più zone sature interdipendenti (CUCCHI et al. 2000, ZINI et al. 2005).

Il circuito carsico sotterraneo è sviluppato in un volume carbonatico dalla forma equiparabile ad un parallelepipedo lungo circa 40 km, largo circa 15 km, alto circa 600 metri. Oggi questa scatola è orientata NW-SE in lunghezza ed inclinata verso lo spigolo SW in modo tale che il vertice superiore sia praticamente a livello mare (Fig. 1).

Mentre abbastanza si sa dell'idrodinamica dei grandi condotti (chimismo, portate complessive, velocità,

ramificazioni sorgentizie), scarsi sono i dati sulla circolazione nella rete di fratture poco incarsite, cioè sull'idrodinamica nella rete a dreni diffusi.

Nell'ambito di una ricerca volta a caratterizzare la falda d'acqua presente nel sottosuolo del piazzale della ex cava di Sistiana (Figg. 2, 4) allo scopo di verificarne i rapporti con il reticolo idrico del Carso sono emersi interessanti dati sulla circolazione ipogea.

Utilizzando l'estesa rete di monitoraggio sulle acque di fondo del Carso Classico (Fig. 1) messa in essere da parecchi anni e gestita dal DMG (Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste), si è potuto infatti analizzare in particolare il regime di trasmissione degli impulsi di piena nei dreni diffusi (PERNE et al. 2012)⁽¹⁾.

Allo scopo si sono posizionati strumenti per l'acquisizione di dati in continuo del livello e della temperatura dell'acqua di fondo in fori ubicati nel piazzale della cava, si sono prelevati campioni d'acqua piovana

1) Si ringrazia l'Immobiliare S.S. Gervasio e Protasio s.r.l. per aver consentito l'utilizzo a scopi scientifici dei dati raccolti nel monitorare le acque di falda del piazzale cava.

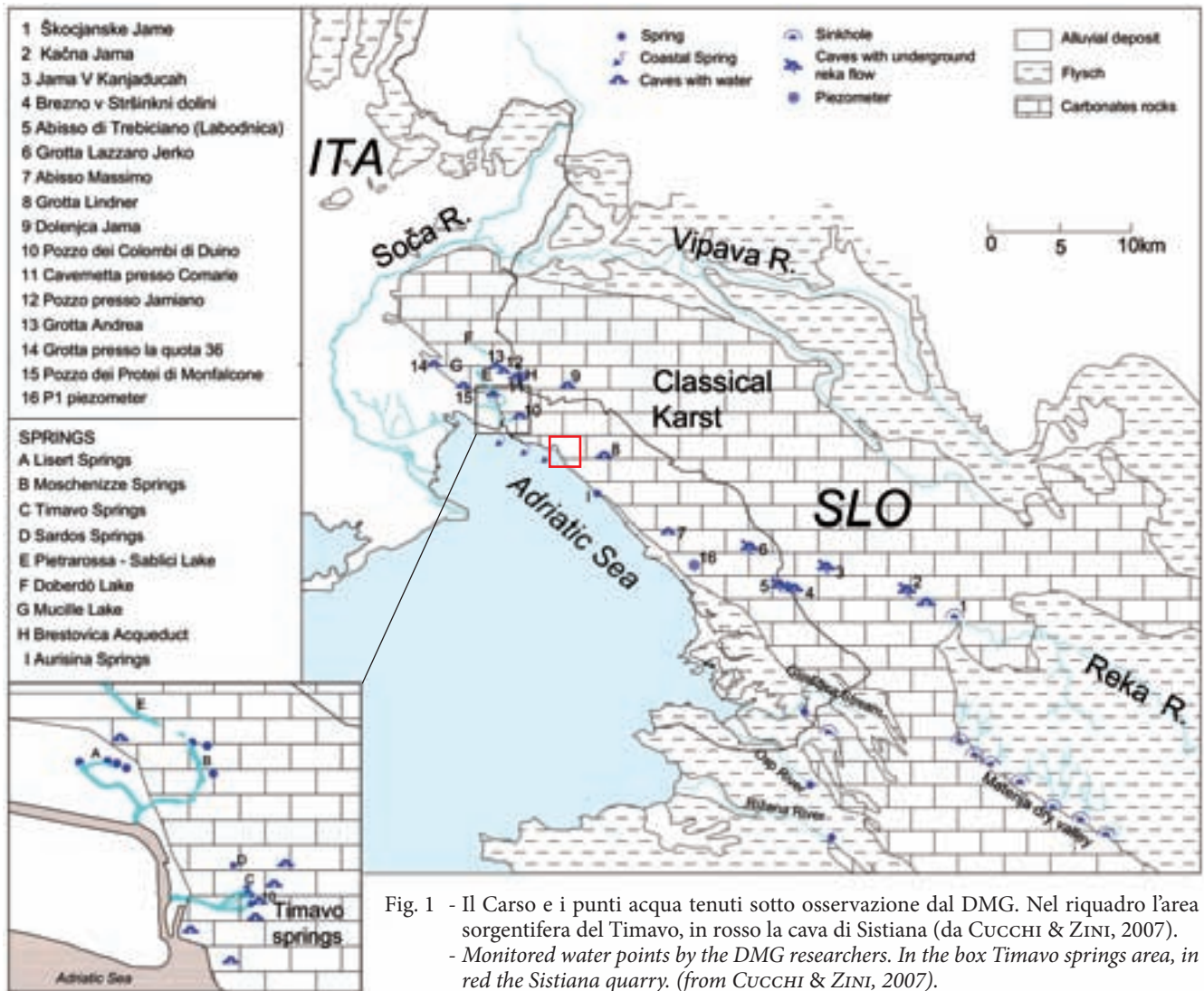


Fig. 1 - Il Carso e i punti acqua tenuti sotto osservazione dal DMG. Nel riquadro l'area sorgentifera del Timavo, in rosso la cava di Sistiana (da CUCCHI & ZINI, 2007).
- Monitored water points by the DMG researchers. In the box Timavo springs area, in red the Sistiana quarry. (from CUCCHI & ZINI, 2007).



Fig. 2 - La cava di Sistiana nel 2006. La freccia indica l'ubicazione del foro monitorato.
- The Sistiana quarry in the 2006. The arrow indicates the monitored borehole.

e di falda per analisi chimiche e degli isotopi dell'ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$), si sono eseguite misure periodiche dei livelli piezometrici, di temperatura e conducibilità⁽²⁾. Sono stati acquisiti i dati in continuo di livello, temperatura e conducibilità misurati presso l'inghiottitoio di San Canziano in Slovenia, l'Abisso di Trebiciano, le Sorgenti di Aurisina, il Terzo Ramo delle Risorgive del Timavo e il Pozzo dei Colombi di Duino.

Si illustrano di seguito i risultati delle misure di altezza della falda che consentono di chiarire alcuni aspetti della circolazione delle acque nel settore prossimo alle sorgenti nel quale le acque sono, in magra, a quote comprese fra 1.00 e 2.00 metri s.l.m.

Condizioni idrologiche al contorno

Fra tutti i punti acqua del Carso Classico, al fine del confronto fra i dati provenienti dal monitoraggio della falda presente nel sottosuolo del piazzale della ex cava di Sistiana e quelli competenti all'acquifero carsico propriamente detto, se ne sono scelti alcuni dai quali prelevare i dati utili: le Grotte di San Canziano, l'Abisso di Trebiciano, le Sorgenti di Aurisina, il Pozzo dei Colombi di Duino, il Terzo Ramo delle Sorgenti del Timavo (Fig. 1).

Le Grotte di San Canziano - Škocjanske Jame (Slovenia) costituiscono il sistema di voragini e gallerie sotterranee in cui si inabissa il Timavo Superiore (rekafiume Reka), al margine sud-occidentale del Carso Classico. La cavità ha uno sviluppo totale di 5.8 km; il percorso sotterraneo delle acque è in una forra dallo sviluppo di 3 km che termina in una serie di ampie caverne in cui l'acqua forma dei veri e propri laghi, alla quota di 214 m⁽³⁾.

L'Abisso di Trebiciano è una grotta gestita dalla Società Adriatica di Speleologia, attrezzata con scale fisse, dotata di parziale illuminazione, costituita da una serie di stretti pozzi verticali che conducono ad un'ampia caverna finale, in cui il Timavo scorre per 300 metri, entrando ed uscendo da due sifoni. Costituisce una finestra intermedia di osservazione su parte delle acque che si inabissano nell'inghiottitoio di San Canziano e che vanno ad alimentare il sistema sorgivo del Timavo. Antiche e recenti esplorazioni speleo-subacquee han-

no individuato nel tratto a monte alcune centinaia di metri di ampie gallerie allagate⁽⁴⁾.

Le Sorgenti di Aurisina consistono in 9 venute d'acqua disposte su un fronte di circa 350 metri al contatto tra Flysch e calcari che scaricavano direttamente a mare. Con la realizzazione di un acquedotto nel 1859, diventano una delle prime fonti di approvvigionamento per la città di Trieste. Tra il 1900 e il 1910 la resa venne incrementata incanalando tutto il fronte sorgentifero, costruendo una diga sul lato mare, mettendo a nudo la roccia calcarea ed abbassando mediante sbancamenti la soglia delle rocce marnoso-arenacee. Venne inoltre realizzata una galleria drenante trasversale della lunghezza di 250 metri.

Le Sorgenti del Timavo (ma anche Risorgive del T., Bocche del T., Rami del T.) sono il sistema sorgivo principale di tutto il Carso. Oggi, a San Giovanni di Duino da quattro polle raccolte in tre "rami" fuoriesce gran parte delle acque del bacino carsico del fiume (Fig. 3): in media 35 m³s⁻¹, con minime di 10 m³s⁻¹ e massime di 150 m³s⁻¹. Indagini speleo-subacquee hanno messo in luce un articolato e complesso sistema di cavità allagate che sono state rilevate per più di 1500 metri di sviluppo totale fino a -83 metri dal livello del mare.

L'altezza dell'acqua al 3° ramo delle Sorgenti (quello monitorato in continuo dal DMG) è normalmente a 1.67 m s.l.m., con oscillazioni fino a poco più di 2 m. Immediatamente a valle delle bocche e delle opere di presa una briglia, il cui coronamento è a quota 1.00 m s.l.m. garantisce una prevalenza "artificiale" utile ad evitare l'ingressione delle acque marine e/o salmastre. Le piene più intense si rilevano in concomitanza con le piene dell'Alto Timavo, con un ritardo del picco di piena di 1-3 giorni. Piene non correlate al bacino dell'Alto Timavo sono più rare e presentano variazioni di portata molto più modeste.

Nell'area prossima alle sorgenti si aprono alcune cavità minori che raggiungono in pochi metri le acque di base. Vista la loro vicinanza al sistema sorgentifero testimoniano come il sistema carsico ipogeo in quest'area sia costituito da cavità di diverse dimensioni (piccole sale, fratture e condotti) più o meno interconnesse tra loro, parzialmente o interamente allagate. Nel Pozzo dei Colombi di Duino, ubicato poche centinaia di metri a monte e direttamente connesso alle Sorgenti, il livello delle acque normalmente si trova ad una quota di circa 2 metri sul livello del mare e può subire oscillazioni massime di circa 4 metri, giungendo a quota 6 metri.

Il confronto dei dati chimico-fisici con le curve di portata mette in risalto l'esistenza di una serie di apporti che di volta in volta si possono attivare con tempi e quantità variabili tra loro. Se da un lato l'esistenza

2) I datalogger utilizzati per le misure in continuo sono i Diver miniCTD della Schlumberger-Eijkelpark con range livello: 0-10m, Accuratezza: $\pm 0.1\%$; range conducibilità: 0-30mS/cm, Accuratezza: $\pm 1\%$; range temperatura: -20° -100°C, Accuratezza: $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Per la compensazione dei dati di livello con il valore della pressione atmosferica è stato utilizzato un barometro (sonda Eijkelpark Baro-Diver) installato presso le Sorgenti del Timavo. La strumentazione per le misure periodiche è quella prodotta dalla Hanna instruments. Tutti i conduttivimetri utilizzati nello studio riportano valori di conducibilità riferiti a 25°C.

3) www.park-skocjanske-jame.si/ita/

4) <http://www.sastrieste.it/>



Fig. 3 - Sorgenti del Timavo: a) paratoia al 1° Ramo; b) stramazzo e paratoia al 2° Ramo; c) stazione di monitoraggio al 3° Ramo.
- *Timavo Springs: a) gate at the 1st branch; b) weir and gate at the 2nd branch; c) monitoring station at the 3rd branch.*



Fig. 4 - Schizzo geologico dell'area della ex Cava di Sistiana estratto dalla Carta geologica del Carso Classico (CUCCHI & PIANO 2013). In verde più scuro la Formazione di Monrupino, in verde chiaro i Calcari di Aurisina, in giallo il Flysch di Trieste; in rosso faglie e giaciture della stratificazione; il cerchio blu indica la posizione del foro monitorato.

- Geological sketch of the Sistiana quarry area (CUCCHI & PIANO 2013). In darker green Monrupino Fm. limestones; in light green Aurisina Fm. limestones; in yellow Trieste Flysch terrigenous Fm; in red faults and strata; in blue the monitored borehole.

di diversi apporti è evidente, dall'altro risulta difficile definire i rapporti quantitativi tra di essi. La presenza di acque provenienti da nord, dalle perdite dell'Isonzo, viene evidenziata bene in fase di magra primaverile mediante il confronto dei valori isotopici di ossigeno ed idrogeno. L'arrivo dell'onda di piena dell'Alto Timavo è segnalato anche da una diminuzione dei valori del calcio e dei bicarbonati, spesso netto nelle piene primaverili, pur se in molti eventi una diminuzione a più fasi della conducibilità testimonia il concomitante apporto di altre acque di neoinfiltrazione ed a scorrimento veloce. Un aumento della conducibilità si verifica sia all'inizio di alcune piene per espulsione di acque di riserva (effetto pistone), che per l'arrivo di acque prettamente "carsiche", in genere più povere in magnesio ma molto ricche in calcio.

La notevole variabilità di questi parametri è in definitiva la conseguenza della presenza di una rete carsica di drenaggio estesa e matura, con un'area di ricarica che comprende buona parte del Carso triestino, isontino e sloveno.

Per avere un'idea del contributo al bilancio complessivo di queste acque, si può tenere conto che nell'an-

no idrologico, alle acque sorgenti nel loro complesso contribuiscono per il 25% le acque provenienti dal bacino dell'Isonzo, per il 50% le acque di percolazione, per il restante 25% quelle provenienti dal bacino del Timavo-Reka (CIVITA et al. 1995).

La campagna di monitoraggio

Le misure del livello dell'acqua eseguite nei numerosi fori terebrati nel piazzale di cava con intenti geomeccanici ogni due settimane nell'arco di un anno (il 2006), mettono in luce che in magra il livello dell'acqua si attesta su quote molto simili per tutti i fori con valori compresi tra 0.6 e 1.55 m s.l.m. con un piano campagna posto a quote comprese fra 5 e 9 m s.l.m.

Il gradiente è espressione della scarsa conducibilità idraulica locale: è necessaria notevole prevalenza per consentire alle acque di superare lo sbarramento dato dall'acqua marina e dalla soglia sottoposta in flysch posta in pratica a livello mare lungo la costa.

Quando il livello della falda è a quote inferiori a 2 m s.l.m. è evidente l'influsso delle escursioni di marea:

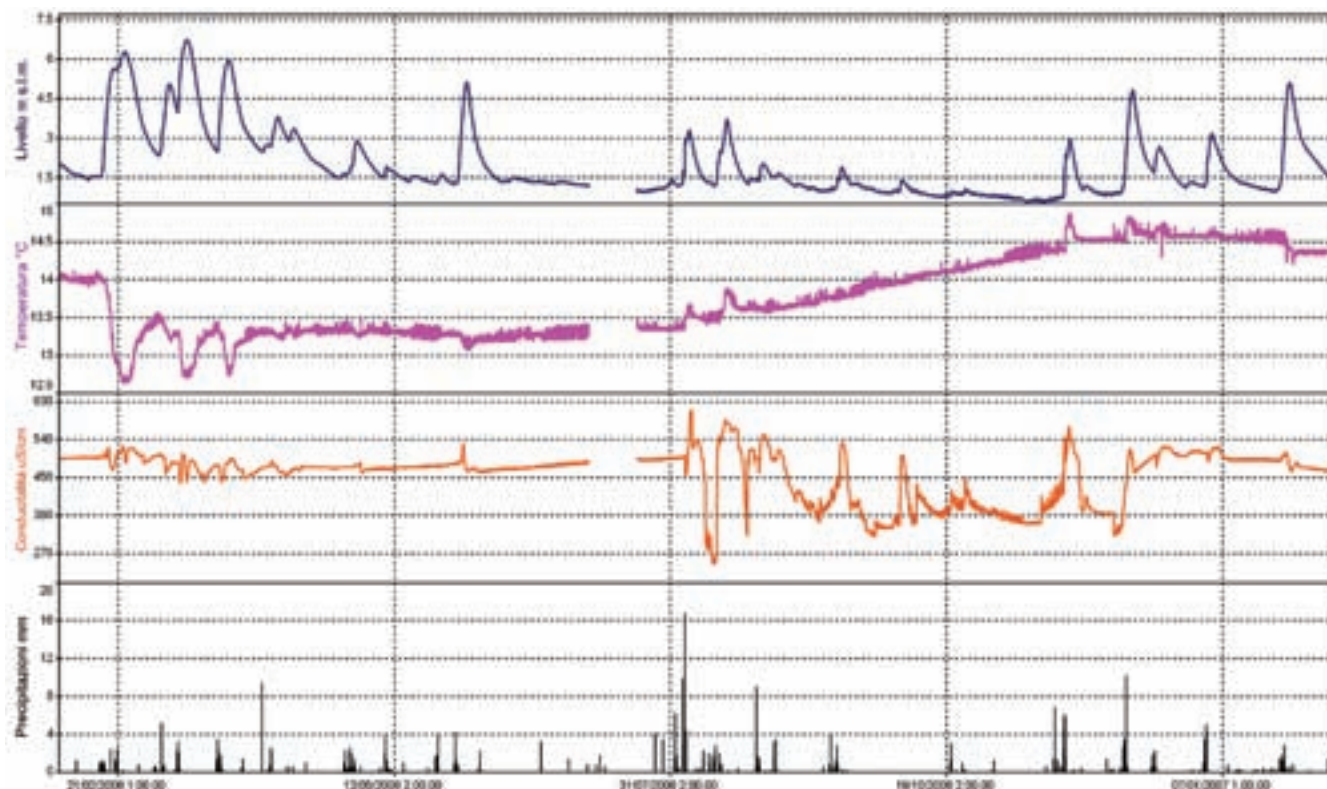


Fig. 5 - Livello idrico, temperatura e conducibilità delle acque di falda nel foro della cava di Sistiana e precipitazioni a Borgo Grotta Gigante dal gennaio 2006 al febbraio 2007.

L'escursione di livello è compresa tra 0.56 m s.l.m. durante il periodo di magra e 6.75 m in durante le piene. L'aumento di livello ha ritardo rispetto all'inizio delle precipitazioni compreso tra 4 e 24 ore. Il picco di piena si ha circa 24 ore dopo l'acme della precipitazione. Il decremento dei livelli inizia ad una velocità di circa 2 cm/h per tendere asintoticamente a zero dopo un periodo di esaurimento di 15-20 giorni.

La temperatura della falda diminuisce inizialmente passando da 14°C a valori di 13.1°C in primavera. Soggetta ad un successivo incremento raggiunge i 14.5°C in autunno. In corrispondenza degli eventi di piena più significativi si hanno abbassamenti della temperatura durante le piene primaverili (con escursioni massime di 1.2°C) ed innalzamenti durante quelle estive e tardo autunnali (con un aumento massimo di 0.4°C). In entrambi i casi il fenomeno testimonia l'arrivo delle acque di neoinfiltrazione.

La conducibilità ha andamento variabile, segnato da variazioni repentine sempre correlate con le precipitazioni. Fino alla fine di luglio i valori durante i periodi di magra sono compresi tra 480 e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$; a partire da tale data si assiste ad una irregolare diminuzione fino a circa 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seguita da una ripresa con valori che alla fine del periodo di monitoraggio risultano di poco inferiori a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In corrispondenza degli eventi di piena si assiste quasi sempre ad un aumento anche di 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seguito da un decremento (che si ha comunque anche nei rari casi di mancato aumento iniziale) anche di 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'aumento è legato verosimilmente a fenomeni di pistonaggio, la diminuzione alla miscela fra acque di neoinfiltrazione e acque residenti.

In termini di valori assoluti e di variabilità dei parametri, le acque del foro sono simili a quelle delle Sorgenti di Aurisina. In particolare durante, alcuni dei principali eventi infiltrativi, vi è contemporaneità tra i picchi minimi di conducibilità nei due siti.

- Groundwater level, temperature and conductivity in the borehole in the Sistiana quarry linked to the precipitation at Borgo Grotta Gigante site on the Karst Plateau (January 2006 - February 2007).

During low water regime, water table fluctuations are of about 0.56 m, while in high water level regime, excursions reaches also 6.75 m. The increasing water level has a delay with respect to the precipitations calculated in about 4-24 h with the peak at about 24 hours after the rainy event peak. Water level decreasing has a starting velocity of about 2 cm/h tending to zero after 15-20 days.

Water temperature from a winter value of 14°C tends to decrease during spring time reaching 13.1°C and increasing again during autumn with values of 14.5°C. During the meaningful springtime floods occurred wide temperature decreasing (with max excursion of 1.2°C), while during summer and late autumn a maximum increase of 0.4°C can be recorded witnesses the arrival of neoinfiltration waters.

Electrical Conductivity has a variable behavior connected to the rainfalls. Till the end of July, values, at low water regime, are between 480 e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, but, approaching to the winter season, an irregular decrease can be recorded reaching values of 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$. After this period, a new increase take EC to values of 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. While flooding the so called "piston effect" produces an increasing in EC values of about 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ followed by a decrease of about 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The decrease is due to the mixing between resident and neoinfiltration waters.

In terms of absolute values and parameters variability, well waters have the same characteristics than Aurisina springs, presenting a simultaneity between the negative peaks during the main infiltration events.



Fig. 6 - Stramazzo e paratoia alle sorgenti Sardos prossime a quelle del Timavo
- Weir and gate at the Sardos Spring, close to the Timavo Springs.

le oscillazioni hanno escursione massima di 8-10 cm, una lunghezza d'onda di 12 ore con un ritardo di 4-5 ore rispetto all'oscillazione marina rilevata nel Golfo di Trieste.

In tutti i fori si ha un aumento dei livelli molto evidente, anche se non della stessa entità, in corrispondenza degli eventi piovosi maggiori. Ciò indica la connessione con la falda all'interno anche se non con continuità laterale significativa. Le quote più elevate raggiunte dalla falda oscillano fra 7.5 e 6.5 m s.l.m.⁽⁵⁾

Uno dei fori (cfr. Fig. 2) è stato monitorato per un anno e l'escursione dei livelli idrici risulta compresa tra 0.56 m s.l.m. durante il periodo di magra e 6.75 m s.l.m. in concomitanza con le piene. Nel foro, il picco della piena si ha circa 36-72 ore dopo l'inizio della precipitazione e circa 24 ore dopo l'acme. Il successivo decremento dei livelli inizia ad una velocità di circa 2 cm/h per tendere a zero dopo un periodo di esaurimento di 15-20 giorni.

In regime di magra sono stati individuati alcuni incrementi di livello non direttamente correlabili con le maree o con le precipitazioni: il confronto tra i dati di livello acquisiti in cava e quelli registrati alle Sorgenti del Timavo mette in evidenza come il fenomeno vada collegato alle occasionali manovre effettuate da ACEGAS sulle paratoie che regolano l'afflusso al mare delle

polle. L'improvviso innalzamento della soglia genera rigurgiti delle acque con oscillazioni del livello di falda che si propagano verso monte. La ex cava è ubicata 4.5 km a monte delle sorgenti.

Un primo evento (Fig. 7) si è verificato in data 12/02/06, in seguito alla chiusura delle paratoie alle sorgenti iniziata alle 11.00 del 12/02/06 e terminata alle 23.00 con un innalzamento di 23 cm, da 1.40 a 1.63 m s.l.m.

A Sistiana, con un ritardo di circa 3 ore si è avuta una risposta con un aumento di livello di 14 cm nell'arco di 12 ore, passando da 1.41 a 1.55 m s.l.m. dalle 14.00 del 12/02/06 alle 2.00 del 13/02/06.

Un secondo evento (Fig. 8) si è verificato in occasione di una prolungata chiusura delle paratoie che il 26/04/06 hanno alzato di 26 cm il livello alle sorgenti portandolo da 1.34 a 1.60 m s.l.m. con manovre iniziate alle ore 5.00 e prolungate fino alle 21.30.

In cava, con un ritardo di 7 ore e mezzo circa si è avuta la risposta, con un pari aumento di 26 cm iniziato alle 12.30 e terminato verso le ore 1.30 del 27 passando da 1.47 a 1.63 m s.l.m.

Vale la pena notare come le variazioni di livello siano riscontrate anche nel Pozzo dei Colombi di Duino.

Ciò significa che le oscillazioni del livello di falda indotte artificialmente alle risorgive si propagano verso monte (fatto noto da tempo) con una velocità da 1.5 a 0.6 km/h ed intensità variabile (non sempre l'innalzamento è della stessa entità alle paratoie e a Sistiana). In sintesi è accertato il collegamento idraulico delle acque presenti nel sottosuolo di Sistiana con quelle facenti capo alle sorgenti di San Giovanni di Duino.

5) Tutte le descrizioni e le localizzazioni si riferiscono alla situazione in essere nell'anno 2006, all'apertura del cantiere per la costruzione del villaggio turistico che oggi esiste con annesso porticciolo. Al tempo, un fronte da gradinato a subverticale in calcari con stratificazione a franapoggio più inclinato del versante, incombeva ad anfiteatro su un ampio piazzale di cava (cfr. Fig. 2).

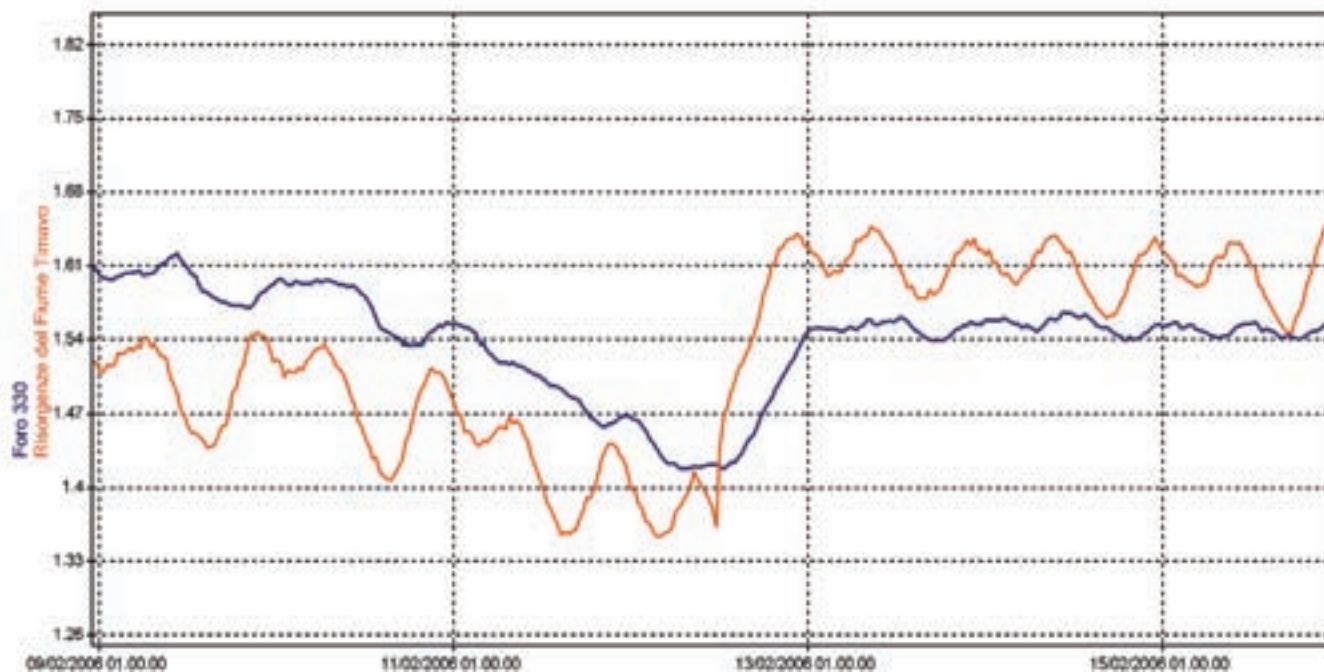


Fig. 7 - Confronto tra i livelli idrici espressi in m slm relativi alle Sorgenti del Timavo ed al foro la seconda settimana di febbraio 2006. Si noti in entrambi i siti l'influenza delle escursioni di marea e l'aumento di livello indotto dalla movimentazione delle paratoie.

- Comparison between Timavo Springs (red) and borehole (blue) water level (m asl) in the 2nd week of February 2006. The graph highlights for both sites the tidal influence and the increased level induced by the gates movement.

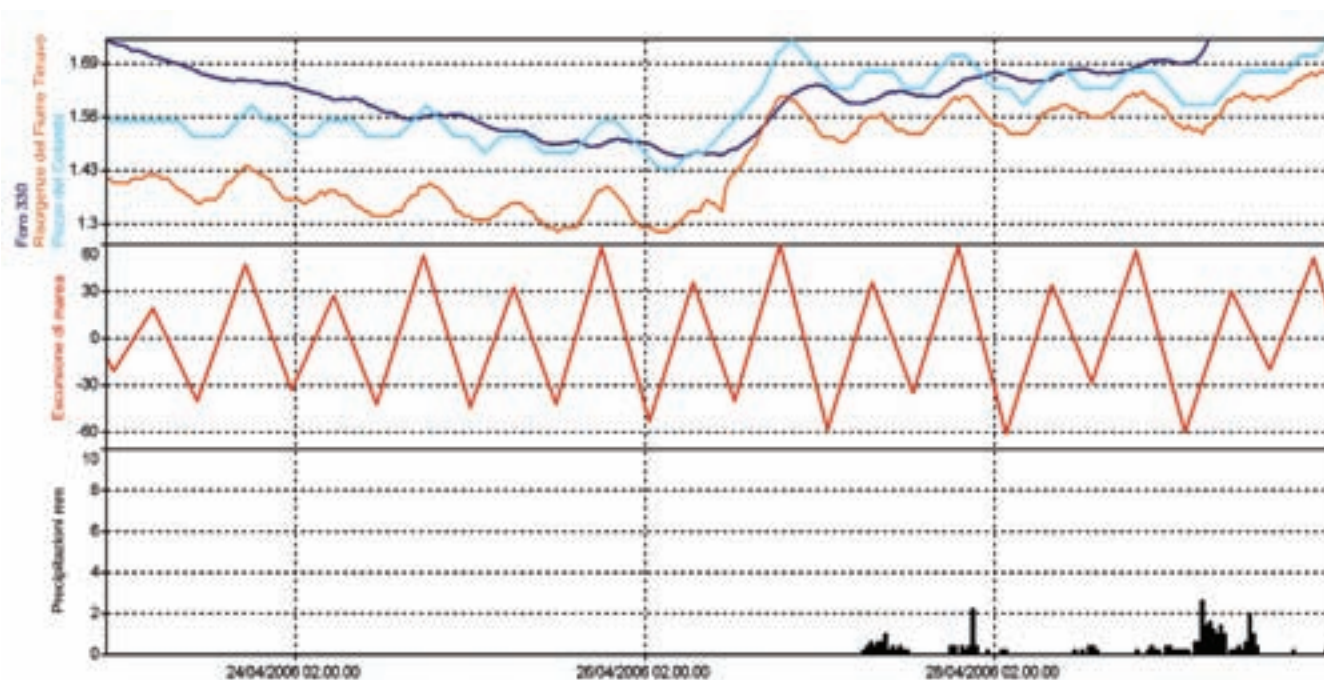


Fig. 8 - Confronto tra i livelli idrici espressi in m slm relativi alle Sorgenti del Timavo, al Pozzo dei Colombi di Duino ed al foro alla fine di aprile 2006. Si noti l'influenza delle escursioni di marea (nel grafico espressa in cm) e l'aumento di livello, non influenzato dalle precipitazioni, ma indotto dalla movimentazione delle paratoie presso le sorgenti.

- Comparison between Timavo Springs, Colombi cave and borehole water levels (m asl) at the end of April 2006. Note the influence of tidal (in the graph expressed in cm) and the level increase, not influenced by rainfall, but induced by the gates movements.

Considerazioni

Dato il contesto idrogeologico in cui è inserita l'area della ex Cava di Sistiana, su base chimico-geochemica, le acque dolci sono la miscela in diverse proporzioni di due tipologie di acque:

- acque carsiche di neoinfiltrazione, precipitazioni pertinenti esclusivamente all'area limitrofa al comprensorio della Cava di Sistiana, contraddistinte da valori di conducibilità molto bassi, temperature influenzate dalla stagionalità, valori altalenanti di $\delta^{18}\text{O}$. Questo tipo di acque è in assoluto il più abbondante.
- acque carsiche di fondo aventi caratteristiche chimico fisiche assimilabili a quelle drenate dalle Sorgenti di Aurisina e simili a quelle drenate dalle Sorgenti del Timavo. La conducibilità media di queste acque è di $490 \mu\text{S}/\text{cm}$ con valori compresi tra 420 e $530 \mu\text{S}/\text{cm}$, la temperatura oscilla tra 11.9 e 13.2°C con un valore medio di 12.5°C . I valori di $\delta^{18}\text{O}$ sono abbastanza costanti, con oscillazioni smorzate e valore medio di -7.7‰ . Questo tipo di acque nel sottosuolo della cava è relativamente abbondante.

Inesistente è in questo settore il contributo dato dalle acque dell'Isonzo.

La miscela dei diversi apporti determina valori di temperatura compresi tra 8.5 e 12.5°C e di conducibilità oscillanti tra 340 e $450 \mu\text{S}/\text{cm}$. I valori di $\delta^{18}\text{O}$ sono abbastanza costanti, con oscillazioni smorzate e valore medio di -8.04‰ .

In particolare quindi nel sottosuolo della ex cava di Sistiana sono presenti acque di falda e acque di neoinfiltrazione di provenienza locale e a circolazione superficiale. Queste ultime, legate essenzialmente alle precipitazioni, caratterizzano volumi rocciosi non ben collegati al reticolo carsico e quindi a lenta miscelazione.

Il livello delle acque è influenzato da differenti fattori: in primis è legato al condizionamento locale rappresentato dalla soglia di permeabilità sottoposta presente in prossimità della linea di costa e legata al contatto tettonico flysch-calcarei. In secondo luogo dalla difficoltà che le acque hanno nel defluire a mare per la scarsa conducibilità idraulica di gran parte dei volumi rocciosi coinvolti.

Le quote della superficie piezometrica, debolmente ondulata durante i periodi di piena, si inseriscono nei valori al contorno: le Sorgenti di Aurisina, anch'esse poste in prossimità del contatto tettonico tra flysch e calcari 3.5 km a SE, hanno quota di emergenza variabile tra circa 0.5 m s.l.m. in regime normale e circa 1.5 m s.l.m. durante le piene maggiori.

In prossimità delle sorgenti carsiche costiere situate tra la Baia di Sistiana ed il Villaggio del Pescatore la quota della falda è governata esclusivamente dal livello del mare e si trova poche decine di centimetri sopra il livello medio marino.

Presso le Sorgenti del Timavo, situate 4 km a NW della zona d'indagine, la tavola d'acqua ha un livello variabile compreso generalmente tra 0.9 e 2.20 m s.l.m. determinato sia dal regime idrodinamico, sia dalla quota di sfioro delle opere di presa e delle briglie.

Fatto interessante e significativo è che il livello può essere modificato con la movimentazione delle paratoie che regolano il deflusso delle sorgenti: nei periodi di magra gli effetti della movimentazione si ripercuotono a monte anche di chilometri.

Manoscritto pervenuto il 30.XI.2013, approvato il 5.XII.2013.

Bibliografia citata

- CIVITA, M., F. CUCCHI, A. EUSEBIO, S. GARAVOGLIA, F. MARANZANA & B. VIGNA. 1995. The river Timavo: an important supplementary water resource which needs to be protected and regained. *Acta Carsologica* 25: 169-86.
- CUCCHI, F., P. FORTI, E. MARINETTI & L. ZINI. 2000. Recent developments in knowledge of the hydrogeology of the "Classical Karst". *Acta Carsologica* 29, n. 1-4: 55-78.
- CUCCHI, F., & C. PIANO, cur. 2013. *Carta geologica del Carso Classico*. Trieste: Centro stampa regionale per il Servizio geologico.
- CUCCHI, F., & L. ZINI. 2007. Le acque del Carso Classico. In *L'acqua nelle aree carsiche in Italia*, cur. F. CUCCHI, P. FORTI & U. SAURO, 33-40. Bologna: Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, 19.
- PERNE, M., B. ŠABLER & F. GABROŠEK. 2012. Calculating transport of water from a conduit to the porous matrix by boundary distributed source method. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 11/2012, n. 36: 1649-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.06.001>.
- VIGNA, B., 2001. *Gli acquiferi carsici*. Bologna: Quaderni Didattici della Società Speleologica Italiana, 12: 48 pp.
- ZINI, L., F. CUCCHI & G. CASAGRANDE. 2005. Monitoring of Timavo springs karst area in order to plan the advance of a tunnel boring machine (tbn). *Proceedings of Aquifer Vulnerability and Risk - 2nd Workshop and 4th National Congress on the Protection and Management of Groundwater*. Abstract Section Monitoring to support decisions, ID 186, 7 pp.

Indirizzo degli Autori - Authors' address:

- Luca ZINI
Chiara CALLIGARIS
Walter BOSCHIN
Franco CUCCHI
Dipartimento di Matematica e Geoscienze
Università degli Studi di Trieste
Via Weiss 2, I-34127 TRIESTE
e-mail: cucchi@univ.trieste.it