

Nuove evidenze
sulla circolazione idrica sotterranea
delle fonti carsiche di Poiano
(Appennino reggiano)





FSRER

Federazione Speleologica
Regionale dell'Emilia-Romagna



Gruppo Speleologico
Paleontologico
"G. Chierici" (RE)



Speleo GAM
Mezzano (RA)



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA



Parco Nazionale
APPENNINO
TOSCO-EMILIANO



Progetto finanziato con il contributo della Legge Regionale 9/2006 "Norme per la conservazione e valorizzazione della geodiversità dell'Emilia-Romagna e delle attività ad essa collegate".

ISBN:



Finito di stampare
nel mese di marzo 2021

Nuove evidenze sulla circolazione idrica sotterranea delle fonti carsiche di Poiano (Appennino reggiano)

Francesco Ronchetti¹, Manuela Deianna¹, Stefano Lugli¹, Vincenzo Critelli¹, Diego Arosio¹, Mario Musi², Laura Longoni³, Vladislav Ivov Ivanov³, Marco Taruselli³, Davide Brambilla³, Alessandra Curotti⁴, Stefano Bergianti⁵, Massimo Ercolani⁶, Baldo Sansavini⁶

Riassunto

Le Fonti di Poiano con la portata media annuale superiore a 400 L/s sono la più grande risorgente carsica della Regione Emilia Romagna. Esse scaturiscono in superficie dalle Evaporiti Triassiche dell'alta val Secchia a circa 420 m s.l.m. Dal punto di vista idrogeologico ed idrochimico le Fonti sono state studiate da vari Autori e uno degli argomenti più controversi e complessi riguarda l'alimentazione delle acque delle Fonti. Sono due i principali modelli idrogeologici concettuali ad oggi pubblicati. Il primo (COLOMBETTI, FAZZINI, 1987) prevede alimentazione da due circuiti: uno superficiale costituito dalle piogge e dai travasi dei torrenti Lucola e Sologno, e uno profondo alimentato dal fiume Secchia. Il secondo (CHIESI et al., 2010), oggi generalmente accettato, ipotizza tre differenti apporti idrici: 1) il torrente Lucola; 2) l'infiltrazione meteorica sui gessi; 3) il rio Sologno. Lo studio delle portate e della composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno delle acque effettuato su di un ampio areale, ripetute nel tempo su diverse fasce altimetriche ha permesso di evidenziare nuovi elementi riguardo l'origine delle acque delle Fonti di Poiano. I nuovi dati suggeriscono un contributo pressoché nullo da parte del torrente Lucola, un contributo limitato da parte del torrente Sologno e una componente preponderante da parte del fiume Secchia. I nostri risultati appaiono in accordo con il modello proposto da Colombetti e Fazzini (1987), modificato eliminando un contributo da parte del torrente Lucola.

Introduzione

Le Fonti di Poiano costituiscono la più grande risorgente carsica della Regione Emilia Romagna, con una portata media annuale superiore a 400 L/s. Esse fuoriescono in superficie, a circa 420 m s.l.m., dalle Evaporiti Triassiche dell'alta val Secchia e danno luogo a diverse polle molto vicine tra loro e ubicate alla stessa quota. (CHIESI, FORTI, 2009). Per la loro portata sorgiva e per le spettacolari caratteristiche geologiche dell'area circostante, le Fonti e l'area carsica dell'alta val Secchia negli ultimi secoli hanno attirato l'interesse di numerosi ricercatori su differenti tematiche di ricerca (BOTTEGARI, 1612; SPALLANZANI, 1906; BERTOLANI, 1949; MALAVOLTI, 1949; FORTI, 1986; ALESSANDRINI *et al.*, 1988; LUGLI, 2001; LUGLI *et al.*, 2004; CHIESI, FORMELLA, 2008; CHIESI, FORTI, 2009; DE WAELE *et al.*, 2011; D'ANGELI *et al.*, 2017).

Tutta l'area è inclusa nel Parco Nazionale Appennino Tosco Emiliano, nell'omonima Riserva della Biosfera UNESCO e nel Sito Rete Natura 2000 IT4030009. È inoltre stata iscritta, insieme alle aree gessose importanti dell'Emilia Romagna, nella lista propositiva italiana del Patrimonio mondiale dell'UNESCO come sito "Grotte e carsismo evaporitico dell'Emilia Romagna".

¹ Università di Modena e Reggio Emilia., Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, DSCG.

² CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Pisa.

³ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, sedi di Milano e di Lecco.

⁴ Ente Parco Nazionale Appennino Tosco-Emiliano.

⁵ Gruppo Speleologico Paleontologico "Gaetano Chierici" Reggio Emilia.

⁶ Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna - Speleo GAM Mezzano (RA).

La zona di deflusso delle acque salate delle Fonti è stata oggetto nel 2014 di un importante intervento di restauro ambientale, nell'ambito del Progetto LIFE Gypsum (LIFE08NAT/IT/000369) (AA. Vv., 2016). L'intervento ha ripristinato condizioni morfologiche, idrauliche e idrogeologiche preesistenti agli interventi effettuati negli anni '80 e 2000 di rilevante trasformazione a fini turistici, che ne avevano profondamente modificato e turbato il contesto naturale e paesaggistico.

Dal punto di vista idrogeologico ed idrochimico le Fonti sono state studiate da vari Autori e nonostante il numero elevato di studi, alcuni quesiti sull'alimentazione, sulle direzioni principali di flusso e sulla profondità dei circuiti idrici sotterranei non hanno trovato ancora completa risposta (COLOMBETTI, FAZZINI, 1976; FORTI *et al.*, 1986; CHIESI, FORTI, 1987; COLOMBETTI *et al.*, 1988; CERVI, 2003; CHIESI, FORTI, 2008; CHIESI *et al.*, 2010). Uno degli argomenti più controversi e complessi fa riferimento all'alimentazione delle acque delle Fonti. Quasi tutti gli Autori sono d'accordo nell'affermare che le Fonti sono alimentate dalle precipitazioni, dai torrenti e dai fiumi locali che si infiltrano nell'ammasso roccioso evaporitico. I diversi modelli idrogeologici concettuali ad oggi pubblicati coinvolgono nel bilancio finale delle sorgenti diversi fiumi e torrenti.

In bibliografia esistono diverse ricerche che utilizzano l'idrochimica e gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno con il fine di definire l'alimentazione di circuiti carsici, i percorsi idrici sotterranei e il mescolamento di flussi differenti in varie parti del mondo (LEANNEY *et al.*, 1995; EFTIMI, 2005; MOORE *et al.*, 2009; CAETANO BICALHO *et al.*, 2012; FILIPPINI *et al.*, 2018). Altre ricerche invece, utilizzando metodi d'indagine quali idrochimica e/o isotopi talvolta associati alle misure di portata, si focalizzano sulla comprensione dell'alimentazione di sorgenti carsiche e sulla definizione di scambi idrici che avvengono tra fiumi/laghi e falde in circuiti carsici (BAILLY-COMTE *et al.*, 2009; MUSGROVE *et al.*, 2010; MENNING *et al.*, 2015; CHU *et al.*, 2017).

L'obiettivo della presente ricerca consiste nell'approfondire e indagare quali corsi d'acqua superficiali contribuiscono realmente all'alimentazione del sistema carsico delle Fonti di Poiano. Le tecniche utilizzate nella presente ricerca sono tecniche già utilizzate in passato, ma con poca continuità e frequenza temporale e su un areale più ristretto. Si tratta perlopiù di due tecniche di indagine che prevedono:

- campionamenti, eseguiti con frequenza circa mensile per un anno e mezzo, delle acque dei torrenti e dei fiumi principali circostanti le Fonti di Poiano, di sorgenti superficiali di versante e delle stesse Fonti di Poiano. Le acque campionate sono state poi sottoposte all'analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno e successivamente ne sono stati restituiti i rapporti isotopici $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$;
- misure di portata ripetute nel tempo e a quote differenti lungo i torrenti e i fiumi.

I risultati della ricerca hanno evidenziato nuovi interessanti elementi da tenere in considerazione riguardo l'origine delle acque delle Fonti di Poiano e che possono aggiornare il più recente modello idrogeologico proposto (CHIESI *et al.*, 2010).

Inquadramento geologico

L'area oggetto dello studio appartiene all'Appennino settentrionale ed è situata nel versante emiliano dell'Appennino Tosco-Emiliano nel bacino idrografico del F. Secchia.

Dal punto di vista cartografico l'area ricade principalmente all'interno del Foglio Geologico 235 Pievepelago (scala 1:50.000) e in piccola parte nel Foglio Geologico 234 Fivizzano e nel Foglio Geologico 218 Castelnovo né Monti della Carta Geologica d'Italia.

I "Gessi triassici" o "Gessi di Sassalbo" della Val Secchia appartengono alla Formazione evaporitica di Burano, una successione di età tardo triassica datata dal Carnico al Norico nella Toscana meridionale (circa 229-204 milioni di anni fa; MARTINI *et al.*, 1989) e dal Norico al Retico in Umbria (circa 216-200 milioni di anni fa; CIARAPICA *et al.*, 1987). La Formazione raggiunge uno spessore di 2.200 m nella val Secchia (COLOMBETTI, ZERILLI, 1987) ed è costituita da alternanze a scala metrica e decametrica di rocce gessoso-anidritiche e dolomie con locali accumuli di salgemma. La notevole attitudine delle rocce solfatiche allo scorrimento in regime sub-fluidale in condizioni di seppellimento ha spesso determinato il completo smembramento degli strati carbonatici intercalati, i quali si rinvencono generalmente in giacitura di mega-budini immersi in una matrice solfatica (CIARAPICA, PASSERI, 1976; DE PAOLA *et al.*, 2007). Le rocce gessose ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) prevalgono in affioramento ma sono praticamente assenti nel sottosuolo. Tutte le rocce gessose presentano caratteristiche riconducibili direttamente o indirettamente a gessificazione di un precursore anidritico. Le rocce anidritiche (CaSO_4) prevalgono in profondità, dove il gesso non è presente, ma possono essere del tutto o quasi assenti in affioramento. Il significato di tale distribuzione è legato alla esistenza di un ciclo gesso-anidrite-gesso: l'anidrite è stabile in condizioni geotermiche di seppellimento, ma in affioramento viene idratata a gesso dalle acque meteoriche

razione e soprattutto per carsismo.

Le Fonti di Poiano sono composte da 5 sorgenti situate in sponda destra del fiume Secchia, alla quota di circa 420 m s.l.m. Queste Fonti drenano, con una portata media annua di 400 L/s, le acque sotterranee contenute nei gessi triassici che costituiscono la dorsale rocciosa su cui sorge l'abitato di Poiano e che si estende dall'abitato di Sologno fino alla confluenza tra il torrente Lucola e il fiume Secchia. Le fonti, con la loro elevata portata, contribuiscono in modo importante al deflusso del fiume Secchia. La cresta è interessata da forme e fenomeni carsici, quali doline e grotte, e il rilievo maggiore su di essa ubicato ha una quota di 851 m s.l.m. La dorsale rocciosa è delimitata a sud dal torrente Lucola, a ovest dal rio Sologno e a nord fiume Secchia. L'estensione laterale e continua dei gessi va però oltre i fiumi che la delimitano; infatti, essa si estende con continuità verso sud-ovest sino a raggiungere il torrente Ozola e il suo affluente Rossendola.

Due sono le principali ipotesi sull'alimentazione delle fonti. Secondo l'ipotesi di COLOMBETTI, FAZZINI, 1987, le Fonti di Poiano risultano alimentate da due circuiti: uno superficiale, alimentato dalla pioggia e dai travasi dei torrenti Lucola e Sologno; uno profondo, che satura completamente i gessi al di sotto del livello del fiume Secchia e che viene alimentato dallo stesso fiume.

Secondo l'ipotesi più recente, CHIESI *et al.*, 2010, le Fonti di Poiano sono alimentate da tre differenti apporti idrici, che in ordine di importanza relativa sono risultati: 1) l'alimentazione dalle acque del torrente Lucola (fortemente maggioritaria); 2) l'alimentazione dalle acque meteoriche con infiltrazione diretta sulla dorsale degli affioramenti gessosi; 3) l'alimentazione dalle acque del rio Sologno. Questa ipotesi definisce il modello idrogeologico delle Fonti di Poiano ed è quella oggi generalmente accettata.

Metodi

Misura di portata

Nel 2018 e 2019 sono state condotte delle misure di portata sulle Fonti di Poiano, sul torrente Lucola e sul rio Sologno (Figura 1). In alcune date, le misure di portata sono state condotte contemporaneamente con due metodi differenti (GUIZERIX, FLORKOWSKI, 1983; KILPATRICK, COBB, 1985; TAZIOLI, 2011) (Figura 2): metodo della diluizione di un tracciante salino (Q-pdt), che utilizza un sale e una sonda in continuo per la misura della conducibilità elettrica dell'acqua; metodo del correntometro (Q-cm), che utilizza un mulinello. L'utilizzo delle due tecniche si è reso necessario al fine di controllare gli errori delle stesse misure di portata. In alcune date, sul torrente Lucola e rio Sologno sono state ripetute le misure di portata su sezioni a quote differenti. Sulle Fonti di Poiano, le misure di portata sono state realizzate nel canale di scarico totale, prima della confluenza con il F. Secchia. I punti dove sono state eseguite le misure di portata sono rappresentati in Figura 1: T. Lucola, codice punto misura P.Lu, quote 725, 625, 595, 540, 508, 485 m s.l.m.; R. Sologno codice punto misura P.So, quote 525, 475 m s.l.m.; Fonti di Poiano, codice punto misura P.Po, quota 417 m s.l.m.

Isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno

Le analisi isotopiche (Figura 1) sono state eseguite durante il periodo compreso tra agosto 2017 e dicembre



Figura 2 – Tecniche utilizzate per la misura della portata dei torrenti e delle Fonti di Poiano. a) tecnica del tracciante salino Q-pdt; b) tecnica del correntometro Q-cm.



Figura 3 – Campionamento acque superficiali e sotterranee per analisi isotopiche. a) Collettore finale Fonti di Poiano, codice punto di campionamento I.Po; b) campionamento torrente Ozola, codice punto di campionamento I.Oz.

2018 su un totale di 7 punti di campionamento, con frequenza di campionamento circa mensile (Figura 3). La determinazione dei rapporti isotopici è stata eseguita presso l'IGG-CNR di Pisa attraverso lo spettrometro IRMS ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$; ovvero $\delta^{18}\text{O}$) e il Los Gatos Research Liquid Water Isotope Analyser LGR-LWIA-24d liquid isotope water analyser ($^2\text{H}/^1\text{H}$; ovvero $\delta^2\text{H}$). I risultati sono riportati come δ (‰) che riflette la deviazione del valore ottenuto dal valore isotopico dello standard (V-SMOW). La precisione analitica è di ± 0.10 e di $\pm 1.0\%$ per $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, rispettivamente. I punti campionati sono rappresentati in Figura 1: T. Ozola, codice punto campionamento I.Oz; F. Secchia, codice punto campionamento I.Se; F. Secchia dopo confluenza con Ozola, codice punto campionamento I.Se+Oz; Rio Sologno, codice punto campionamento I.So; T. Lucola, codice punto campionamento I.Lu; Fonti di Poiano, codice punto campionamento I.Po; Sorgente Tanone, codice punto campionamento I.Ta. Le sorgenti superficiali, codice punto campionamento I.Ss, sono sparse nell'areale di studio e non sono state riportate nella Figura 1 in quanto non tutte ricadono nell'immagine.

Risultati

Prove di portata

Le misure di portata eseguite nel 2018 e 2019 sono state condotte sul torrente Lucola, sul torrente Sologno e sul canale di scarico delle Fonti di Poiano (Figura 1). Nella stessa data sui torrenti Lucola e Sologno, sono state ripetute le misure in sezioni a quote differenti, con il fine di valutare la presenza o l'assenza di perdite di portata dall'alveo stesso. Gli spessori delle alluvioni nel torrente Lucola alle quote maggiori di 485 m s.l.m. sono pressoché trascurabili e anche nel rio Sologno alle quote maggiori di 525 m s.l.m.

Le misure di portata sono state condotte con l'utilizzo dei traccianti salini (Q-pdt) e in alcuni casi (7 misure) con l'utilizzo dei traccianti salini contemporaneamente al correntometro (Q-cm) per escludere eventuali errori sulle misure di portata. Le due tecniche hanno misurato sempre risultati simili ($R^2 = 0.96$) e che discostano costantemente di poco secondo una relazione lineare con coefficiente angolare (Q-cm)/(Q-pdt) di 0.857. Viste la procedure di svolgimento delle misure, la portata con il tracciante salino (Q-pdt) è più attendibile della portata misurata con il mulinello (Q-cm).

Sulle Fonti di Poiano le misure sono state realizzate nel canale di scarico totale verso il F. Secchia, alla quota di 417 m s.l.m. (Figura 4). Le misure di portata hanno un valore medio di 548 L/s, valore prossimo a quello indicato da Chiesi e Forti (2009); mentre la portata minima e massima misurate sono rispettivamente di 352 e 768 L/s. In particolare nel T. Lucola sono state effettuate le seguenti misure di portata (Figura 5): alla quota 725 m s.l.m., appena a monte della strada Sologno-Villa Minozzo e a monte dell'affioramento dei gessi; alla quota 625 m s.l.m. prossima all'inizio dell'affioramento dei gessi; all'interno dell'affioramento dei gessi, alle quote 595, 540 m s.l.m., e quest'ultima coincidente con il limite inferiore dell'affioramento; alle quote 508 e 485 m s.l.m., ubicate a valle dell'affioramento dei gessi e alla quota 410 m s.l.m., appena prima della confluenza con il Secchia. Solo in alcune date nel torrente è stato possibile effettuare le misure su tutte le sezioni e si segnala che, anche se non

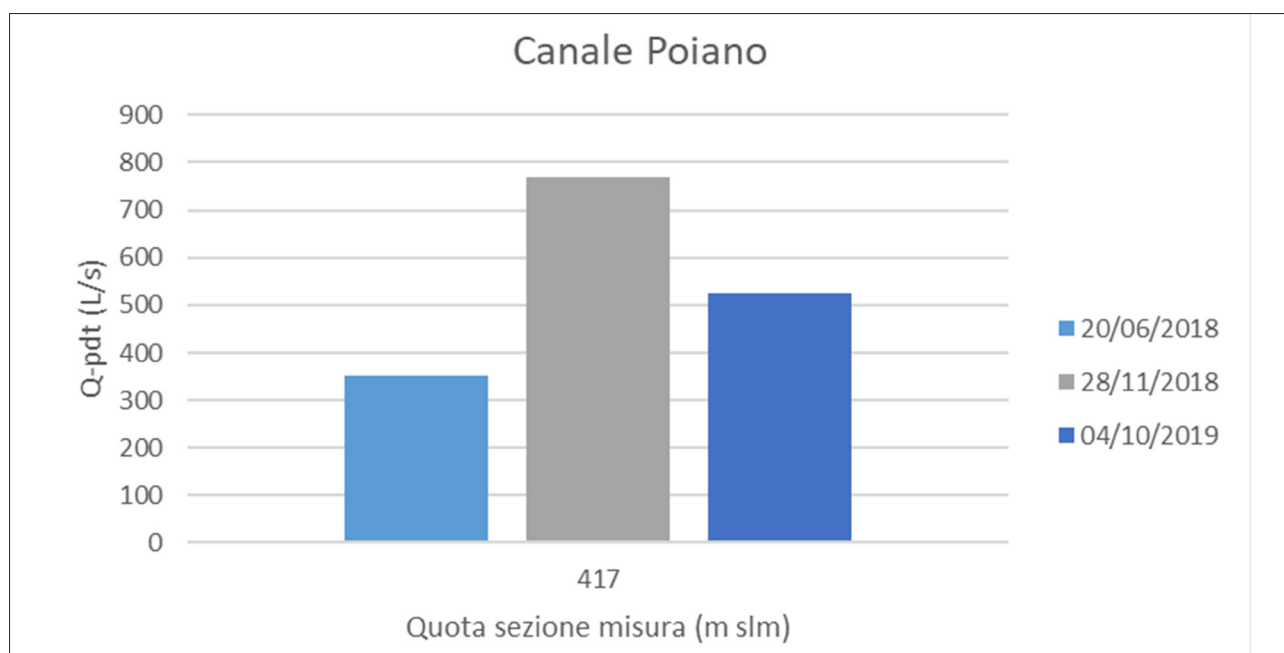


Figura 4 – Misure di portata nelle Fonti di Poiano in date differenti.

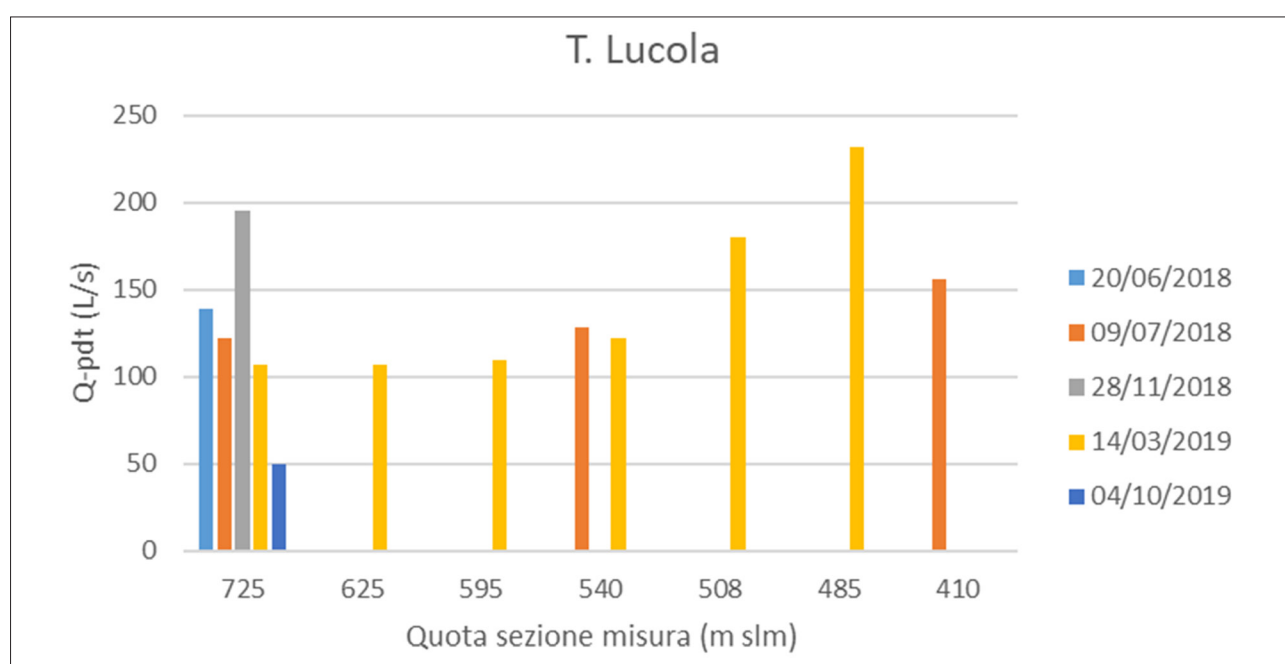


Figura 5 – Misura di portata in diverso tempo e a diverse quote nel T. Lucola.

sono state realizzate misure lungo tutta l'asta del torrente, nell'alveo è sempre stato rilevato un deflusso attivo dalla strada Sologno-Villa Minozzo sino al Mulino di Poiano (485 m s.l.m.).

Per il bacino del T. Lucola (Figura 5), come sezione rappresentativa, è stata selezionata la sezione a quota 725 m s.l.m.; in questa sezione la portata minima e massima misurata di 50 e 195 L/s, mentre la portata media rilevata è di 123 L/s, che corrisponde circa al 22% della portata media delle Fonti di Poiano.

Solamente nelle date 09/07/2018 (rappresentativo di una situazione di limitato deflusso, periodo di magra) e 14/03/2019 (rappresentativo di una situazione di medio alto deflusso, periodo di morbida) sono state condotte le misure su più sezioni con una certa regolarità. In particolare, nella data estiva di magra di luglio 2018, dove gli apporti dei rii laterali erano circa nulli (<3 L/s), alle quote di 725, 540 e 410 m s.l.m. sono state realizzate misure

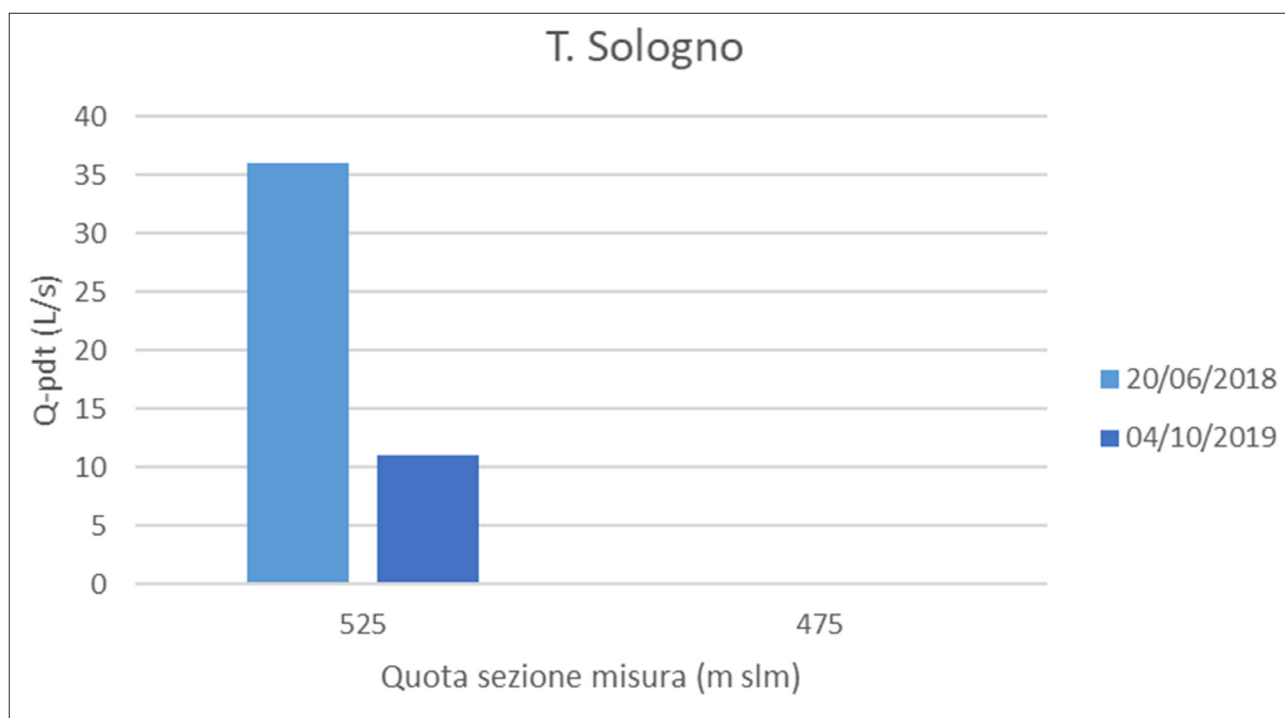


Figura 6 – Misura di portata in diverso tempo e a diverse quote nel T. Sologno.

di portata che hanno permesso di osservare valori circa costanti, senza evidenziare perdite lungo l'alveo tra le quote 725 e 540 m s.l.m., quote che comprendo l'affioramento dei gessi triassici.

Nella data di marzo 2019 (tardo inverno), valutando anche attentamente gli apporti dei rii laterali e sottraendo queste misure dal deflusso del T. Lucola, alle quote di 725, 625, 595, 540, 508 e 485 m s.l.m., sono state realizzate misure di portata che hanno ancora permesso di osservare portate circa costanti, senza evidenziare perdite lungo l'alveo tra le quote 725 e 540 m s.l.m., quote che comprendo l'affioramento dei gessi triassici.

Per il bacino del R. Sologno (Figura 6), come sezione rappresentativa, è stata selezionata la sezione a 530 m s.l.m.; in questa sezione la portata media rilevata è di 24 L/s, che corrisponde circa al 4% della portata media delle Fonti di Poiano; le portate minima e massima misurate sono di 11 e 36 L/s, rispettivamente.

Nel rio Sologno le misure sono state realizzate (Figura 6): alla quota 525 m s.l.m.; alla quota 475 m s.l.m. (circa coincidente con il ponte sul Rio Sologno). Nelle date 20/06/2018 e 04/10/2019 sono state condotte le misure su tutte le sezioni; in tutte le date il rio Sologno ha evidenziato un'assenza di deflusso a partire dalla quota di 475 m s.l.m., evidenziando perdite totali dall'alveo, come già rilevato da altri autori (CHIESI, FORTI, 2009).

Nel Fiume Secchia, poiché caratterizzato da un alveo molto largo di tipo braided (canali intrecciati) e con spessore notevole dei depositi alluvionali, le misure di portata non sono state realizzate. Analizzando però i dati di portata presenti negli Annali Idrologici (ARPA-RER) nella sezione di Gatta, si segnalano portate medie di circa 10.000 L/s e portate minime prossime a 1.000 L/s.

Isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno

I risultati ottenuti dalle analisi isotopiche sono riportati nella Tabella 1. I valori isotopici medi più negativi sono stati misurati nel torrente Lucola (I.Lu) ($\delta^{18}\text{O}$: -9.64‰, $\delta^2\text{H}$: -65.8‰). I campioni d'acqua del torrente Lucola per le analisi isotopiche sono stati prelevati a quota 725 m s.l.m. circa, punto di campionamento rappresentativo della composizione del torrente e punto scelto per rispondere agli obiettivi della ricerca in quanto selezionato a monte dell'affioramento dei gessi.

Il fiume Secchia presenta, al contrario, i valori isotopici medi più positivi (I.Se) ($\delta^{18}\text{O}$: -8.36‰, $\delta^2\text{H}$: -54.0‰). Il punto di campionamento selezionato per il fiume Secchia è ubicato a circa 600 m s.l.m. e a monte della confluenza con il Torrente Ozola; questo permette di ottenere dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ rappresentativi esclusivamente della composizione isotopica del fiume Secchia.

Il rio Sologno mostra valori isotopici medi (I.So) di -8.83‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -60.1‰ ($\delta^2\text{H}$). Il punto di campionamento

Punto campionato	Sigla Campione	Valore medio $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	Dev std $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	n° analisi	Valore medio $\delta^2\text{H}\text{‰}$	Dev std $\delta^2\text{H}\text{‰}$	n° analisi	Periodo campionamento
Ozola	I.Oz	-9.06	0.26	7	-59.9	1.39	7	Ago. 17 - Dic. 18
Secchia	I.Se	-8.36	0.17	5	-54.0	0.93	5	Ago. 17 - Dic. 18
Secchia-Ozola	I.Se+Oz	-8.71	0.27	7	-56.9	2.24	7	Ago. 17 - Dic. 18
Sologno	I.So	-8.83	0.11	5	-60.1	1.76	5	Ago. 17 - Dic. 18
Lucola	I.Lu	-9.64	0.10	7	-65.8	0.67	7	Ago. 17 - Dic. 18
Poiano	I.Po	-8.87	0.28	7	-59.1	2.08	7	Ago. 17 - Dic. 18
Sorgenti	I.Ss	-9.41	0.24	22	-63.7	1.87	16	Mar. 17 - Dic. 18
Tanone	I.Ta	-8.99	0.03	2	-61.7	1.28	2	Giu. 18 - Dic. 18

Tabella 1– Risultati delle analisi isotopiche eseguite sui differenti punti campionati. Il valore isotopico riportato è un valore medio tra diversi valori ottenuti durante il periodo di campionamento.

selezionato è ubicato a circa 525 m s.l.m., subito a valle della confluenza di due collettori secondari che contribuiscono al deflusso del rio e appena a monte dell'affioramento dei gessi. In questo modo il valore isotopico ottenuto è fortemente rappresentativo della zona di alimentazione del rio Sologno.

I valori isotopici medi del torrente Ozola (I.Oz) sono di -9.26‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -59.9‰ ($\delta^2\text{H}$). I campioni analizzati sono stati prelevati da un punto ubicato a circa 575 m s.l.m. a valle della confluenza dei collettori secondari che compongono il deflusso del torrente stesso, permettendo così di ottenere una composizione isotopica indicativa del bacino idrologico del torrente Ozola.

Nel punto a valle della confluenza tra il Fiume Secchia e il torrente Ozola (I.Se+Oz) i valori isotopici medi misurati sono di -8.71‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -56.9‰ ($\delta^2\text{H}$). Il punto selezionato per il campionamento delle acque si trova ad una quota di circa 510 m s.l.m. e ad una distanza di circa 1.5 km a valle dalla confluenza dei due corsi d'acqua. Il punto è stato selezionato distante dal punto di confluenza per permettere, prima del campionamento, ad un efficace mescolamento delle acque tra il torrente Ozola e il fiume Secchia ed ottenere in questo modo dei valori isotopici tipici del processo di mescolamento.

Le Fonti di Poiano (I.Po) mostrano valori isotopici medi di -8.87‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -59.1‰ ($\delta^2\text{H}$). I campioni d'acqua sono stati prelevati direttamente nel collettore finale prima della confluenza con il fiume Secchia e a monte della derivazione con il laghetto artificiale, evitando così i possibili fenomeni di evaporazione che modificherebbero il risultato isotopico finale.

Nelle sorgenti superficiali (I.Ss) campionate nei versanti limitrofi sono stati misurati valori isotopici medi di -9.32‰ ($\delta^{18}\text{O}$) e -62.9‰ ($\delta^2\text{H}$). Le sorgenti selezionate per questo studio presentano aspetti e caratteristiche simili tra di loro. Si tratta infatti di sorgenti che hanno circuiti idrici sotterranei superficiali e nei quali le acque permangono per tempi brevi. La superficialità dei circuiti e i veloci tempi di percorrenza fanno sì che le acque campionate da queste sorgenti possano essere utilizzate, in mancanza di dati isotopici raccolti da pluviometri, come rappresentative della composizione isotopica delle precipitazioni infiltrate nel sottosuolo dell'area in studio (DEIANA *et al.*, 2018; TAZIOLI *et al.*, 2019).

I valori isotopici ottenuti, inseriti all'interno del grafico $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ (Figura 7), permettono di identificare una Linea Meteorica Locale descritta dall'equazione $y = 8.5x + 17$ ($R^2 = 0.93$) (Local line) che si discosta molto poco dalla Linea meteorica ottenuta per un'area ubicata nella stessa valle del Fiume Secchia (DEIANA *et al.*, 2019) e indicata in Figura 7 con la sigla NSVMWL. Inoltre la figura mostra come i valori isotopici delle Fonti di Poiano (I.Po) si vanno a collocare circa al centro del grafico e sulle linee meteoriche, mentre il T. Lucola (I.Lu) e il F. Secchia (I.Se) si vanno a collocare agli estremi, ma sempre lungo le stesse linee. Osservando con attenzione il grafico, si può notare come il valore isotopico delle Fonti sia più vicino al valore isotopico del Secchia rispetto a quello del torrente Lucola. Inoltre, la figura evidenzia come il valore isotopico delle Fonti è molto simile a quello del rio Sologno (I.So), del torrente Ozola (I.Oz) e della miscela Secchia e Ozola (I.Se+Oz).

Discussioni

Le misure di portata ripetute, realizzate tra il 2018 e il 2019, sui torrenti Lucola e Sologno e sul canale di scarico totale delle Fonti di Poiano evidenziano come le Fonti siano caratterizzate da una portata di qualche centinaio

di litri al secondo maggiore rispetto alla portata misurata nel Lucola e Sologno. La portata media del Lucola rappresenta solamente il 22% della portata media di Poiano, mentre la portata media del Sologno rappresenta solamente il 4%. Anche le misure di portata condotte nella stagione estiva in assenza di piogge evidenziano le seguenti portate: nelle Fonti circa 400 L/s; nel Lucola 75 L/s (circa il 20% della portata delle Fonti); nel Sologno 20 L/s (circa il 5% delle Fonti).

Le misure ripetute a diversa quota lungo le aste dei torrenti Lucola e Sologno, al fine di verificare la presenza di perdite nel sottosuolo (travasi), evidenziano che non sono presenti perdite facilmente rilevabili nel torrente Lucola, ovvero perdite superiori all'errore strumentale, mentre sono presenti perdite importanti nel torrente Sologno, che rendono per la maggiore parte dell'anno il torrente secco a valle del ponte sulla SP108.

Queste misure e una loro attenta analisi permettono di evidenziare rispetto ai dati passati alcune novità che appaiono in contrasto con il modello idrogeologico proposto da CHIESI *et al.*, 2010. In primo luogo, si evidenzia come la portata del torrente Lucola, anche a monte degli affioramenti gessosi, sia fortemente inferiore rispetto alla portata delle Fonti di Poiano e questo suggerisce come difficilmente il Lucola possa incidere in maniera preponderante sul bilancio finale delle Fonti, anche se si ipotizzasse una sua completa infiltrazione nel sottosuolo. Inoltre, conducendo misure ripetute su diverse fasce altimetriche lungo il torrente Lucola non sono state rilevate le perdite evidenziate dai precedenti Autori.

Nel caso del rio Sologno si conferma quanto già evidenziato dai precedenti Autori (COLOMBETTI, FAZZINI, 1988; CHIESI *et al.*, 2010), ovvero che le portate del rio sono generalmente ridotte ed è confermata la sua completa infiltrazione, per la maggior parte dell'anno, che avviene circa in corrispondenza del ponte sulla SP108.

Il monitoraggio isotopico (Figura 7) mostra valori unici e caratteristici per le Fonti di Poiano e per i torrenti/fiumi limitrofi, e un quasi perfetto allineamento lungo la retta meteorica locale individuata nella stessa area da DEIANA *et al.*, 2019. L'allineamento lungo questa retta evidenzia l'ovvia origine meteorica delle acque superficiali e sotterranee analizzate. Le variazioni isotopiche evidenziate tra i vari punti campionati nell'area dipendono dai vari processi idrologici e di frazionamento isotopico che avvengono nell'atmosfera o all'interfaccia atmosfera-sottosuolo (Mazor, 2003). I valori isotopici finali ottenuti nel nostro sito di studio dipendono da vari

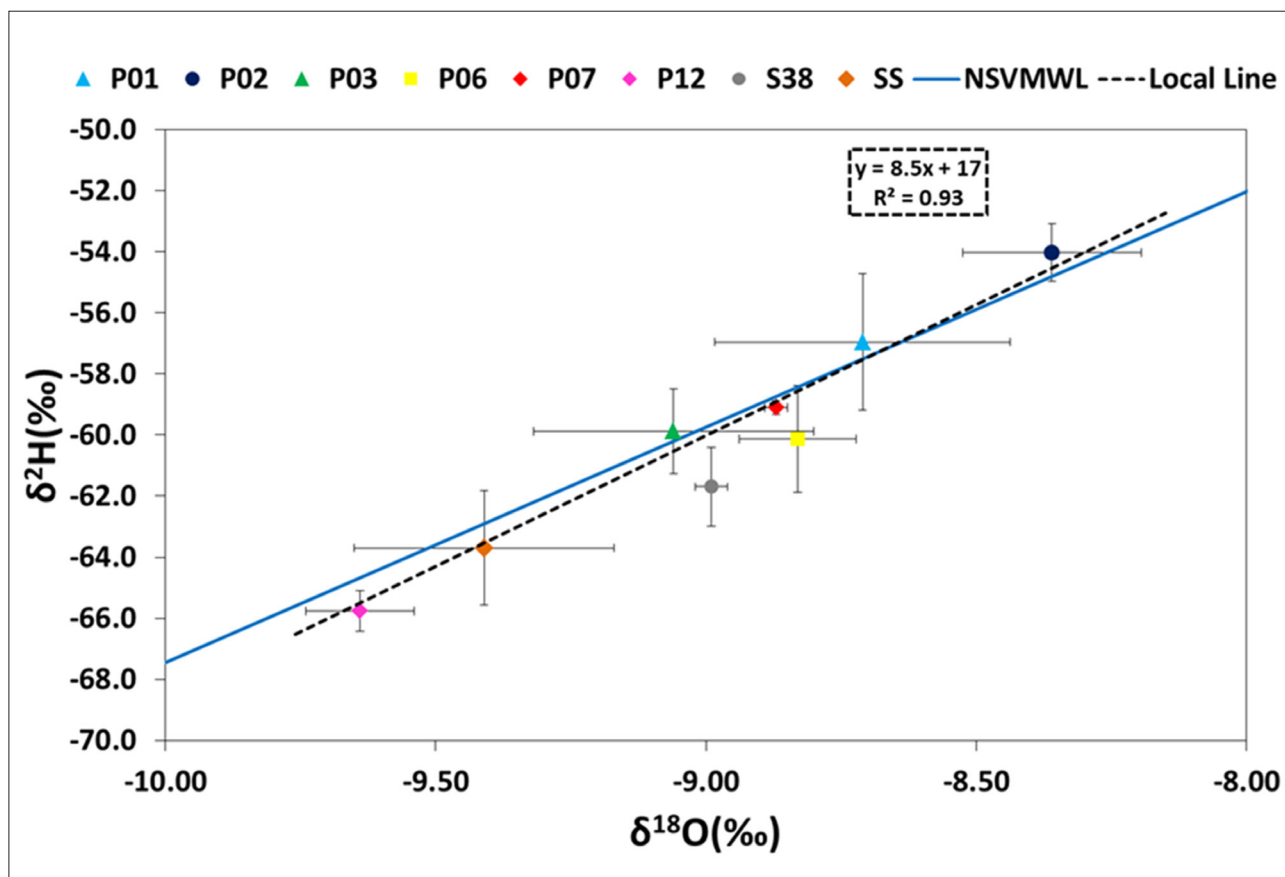


Figura 7 – Grafico $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ dei valori isotopici medi calcolati per ciascun punto di campionamento (Figura 1). Per ciascun punto sono riportate le barre di deviazione standard. Legenda punti di campionamento: T. Ozola, I.Oz; F. Secchia, I.Se; F. Secchia dopo confluenza con Ozola, I.Se+Oz; Rio Sologno, I.So; T. Lucola, I.Lu; Fonti di Poiano, I.Po; Sorgenti superficiali, I.Ss; Sorgente Tanone, I.Ta.

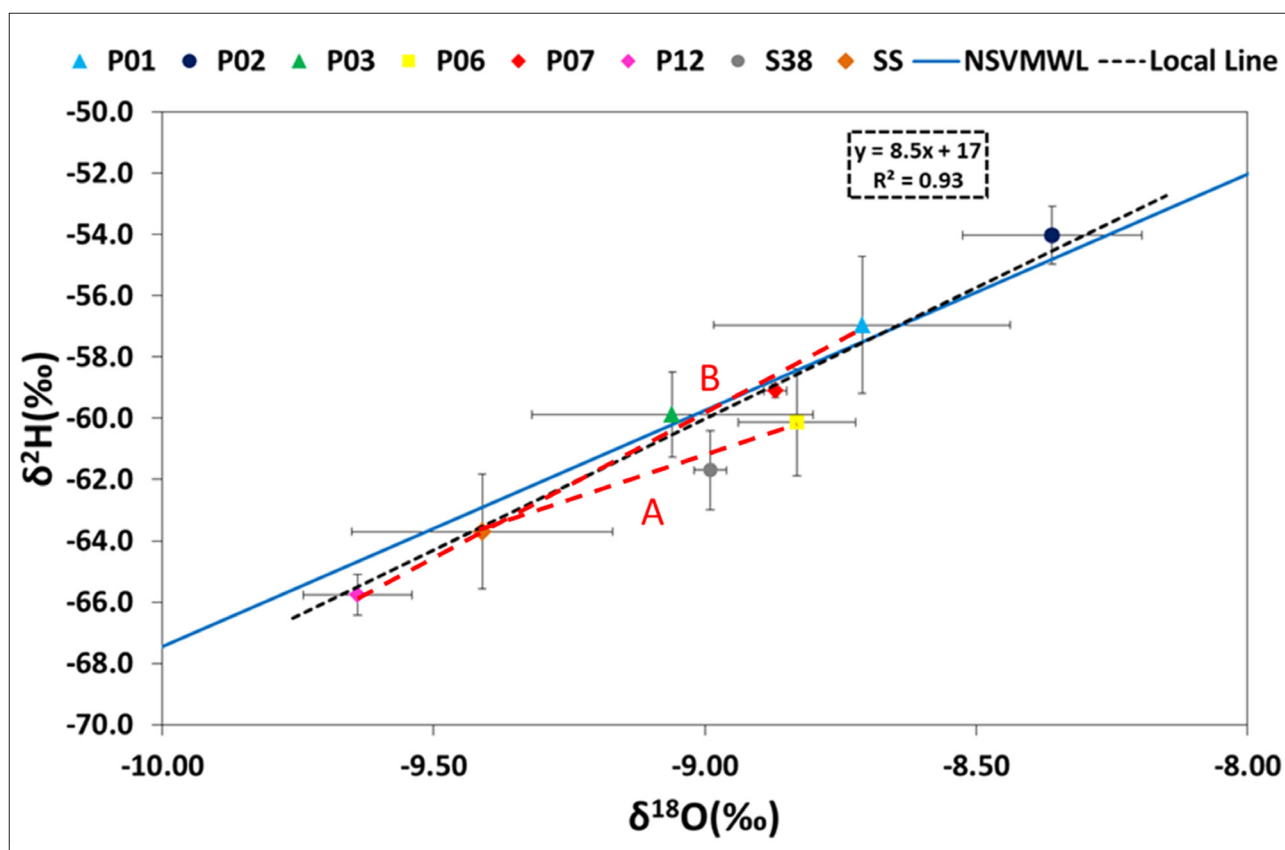


Figura 8 – Grafico $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ dei valori isotopici medi calcolati per ciascun punto di campionamento (Figura 1). Nella figura sono state aggiunte le possibili linee di mescolamento per comprendere il bilancio di massa (isotopico) che stabilisce l'alimentazione della risorgente del Tanone (linea rossa A) e l'alimentazione delle Fonti di Poiano (linea rossa B).

effetti che normalmente agiscono sulla composizione isotopica delle acque: effetto continentalità (percorso delle masse umide che generano le precipitazioni); effetto stagionalità (riflette il maggiore o minore tasso di evaporazione); effetto quota.

Per quanto riguarda il valore isotopico dei fiumi e torrenti campionati, nonostante sia stato analizzato un areale ristretto dell'Appennino, e con bacini idrologici a caratteristiche geologiche ed altimetriche simili, la presente ricerca mostra valori isotopici talvolta limitatamente o marcatamente differenti (Figura 7). Il valore isotopico medio più negativo è stato misurato nel torrente Lucola ed è probabilmente dovuto alla presenza all'interno del suo bacino di alimentazione di alte vette, alla presenza di sorgenti sotterranee alimentate dallo scioglimento delle nevi e alla minore incidenza delle correnti meteoriche provenienti dal mar Tirreno, che solitamente conferiscono alle precipitazioni composizioni isotopiche più positive (TAZIOLI *et al.*, 2019). Il valore isotopico medio più positivo è stato misurato nel fiume Secchia, nonostante le alte vette presenti nel suo bacino idrografico, probabilmente perché influenzato dalla maggiore incidenza delle correnti meteoriche provenienti dal mar Tirreno (TAZIOLI *et al.*, 2019), che facilmente risalgono la val Magra e del Rosaro e attraversano la principale cresta appenninica in corrispondenza della bassa sella morfologica del P.sso del Cerreto. I torrenti Ozola e Sologno presentando caratteristiche intermedie dal punto di vista geografico, morfologico e altimetrico rispetto ai due corsi d'acqua precedentemente citati, risultano caratterizzati da valori isotopici intermedi. I campioni prelevati a valle della confluenza tra il fiume Secchia e il torrente Ozola, rappresentano un mescolamento tra i due corsi d'acqua e presentano valori isotopici intermedi, la cui composizione dipende in proporzioni uguali dalla composizione isotopica del fiume Secchia e del torrente Ozola.

Le sorgenti superficiali campionate nell'area presentano valori differenti rispetto al valore isotopico delle Fonti di Poiano e della risorgente del Tanone, pur avendo circa la stessa quota altimetrica di alimentazione meteorica. Questa differenza è molto probabilmente dovuta alle diverse caratteristiche idrogeologiche che caratterizzano le sorgenti, le Fonti e la risorgente del Tanone. Le sorgenti superficiali sono state scelte per le loro caratteristiche idrogeologiche peculiari: sono piccole sorgenti di versante di varia tipologia ("per affioramento della piezometrica", "per frattura", "soglia/limite di permeabilità") che vengono alimentate dalle precipitazioni e dallo sciogli-

mento delle nevi, e quindi possono essere considerate pluviometri naturali (VESPASIANO *et al.*, 2015). Le Fonti di Poiano e la risorgente del Tanone risultano essere caratterizzate da un valore isotopico che risente oltre che dell'alimentazione delle precipitazioni anche del contributo dei fiumi/torrenti locali, confermando così in parte quanto riportato da COLOMBETTI, FAZZINI, 1988 e CHIESI *et al.*, 2010.

Sia le sorgenti superficiali, che le Fonti di Poiano e il Tanone con questi valori isotopici caratteristici si collocano tra i due valori isotopici estremi del Secchia e del Lucola. Nel dettaglio, le sorgenti superficiali si posizionano più vicine al torrente Lucola, mentre le Fonti di Poiano si posizionano più lontane dal Lucola e più vicine al Fiume Secchia. Più precisamente quest'ultime si dispongono molto prossime ai valori isotopici del Sologno e Ozola o del Secchia dopo la confluenza con Ozola.

Il Tanone invece presenta un valore isotopico simile e vicino a quello del Sologno, e risulta allineato lungo la possibile retta di mescolamento tra le sorgenti superficiali e il rio Sologno (linea A, Figura 8), confermando quanto affermato da CHIESI *et al.*, nel 2009.

Visto che anche le Fonti di Poiano e gli altri punti di monitoraggio si collocano lungo una stessa linea (Figura 8), possibile linea di mescolamento B, e visto che idrogeologicamente tra i vari punti si possono ipotizzare scambi idrici, è possibile proporre una simile ipotesi di mescolamento anche per le Fonti di Poiano.

Per comprendere i possibili contributi di alimentazione alle Fonti di Poiano introduciamo la formula del bilancio di massa nota in idraulica e in idrogeologia, che restituisce in un volume noto un flusso finale di una certa

$$C_y \times Q_y = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_i$$

concertazione e portata, successivamente al mescolamento di flussi diversi per concentrazione e portata.

Questa formula secondo il modello proposto da CHIESI *et al.*, 2009 per le Fonti di Poiano coinvolgerebbe tre componenti: contributo principale del torrente Lucola; contributo secondario delle precipitazioni e del Sologno. Alla luce dei nuovi risultati ottenuti nella presente ricerca questo modello non può essere confermato per due motivi.

Primo, dalle molteplici misure di portata realizzate sul torrente Lucola emerge come il torrente non travasi nel sottosuolo volumi d'acqua o se li travasa, questi sono limitati ed inferiori all'errore delle misure.

Secondo, se si va ad applicare il bilancio di massa per il periodo di osservazione, conoscendo i valori isotopici medi delle Fonti di Poiano, del Sologno, del Lucola e delle precipitazioni (sorgenti superficiali) e stabilendo che ogni flusso può contribuire con una percentuale da 0 a 100% al flusso delle Fonti di Poiano, che è fissato al 100%, l'equazione del bilancio sarà così scritta:

$$\begin{aligned} C_{Fonti} \times 100\% &= C_{Sologno} \times (0 \div 100\%) + C_{Lucola} \times (0 \div 100\%) + C_{Precipitazioni} \times (0 \div 100\%) \\ -8.87 \times 100\% &= -8.83 \times (0 \div 100\%) - 9.62 \times (0 \div 100\%) - 9.22 \times (0 \div 100\%) \end{aligned}$$

Se si prova ad inserire diverse percentuali nei contributi di flusso delle diverse aliquote, si può notare facilmente che il contributo del Lucola dovrebbe essere circa nullo e quindi non prioritario per ottenere la concentrazione isotopica delle Fonti di Poiano. Inoltre, si può evidenziare come il contributo del rio Sologno dovrebbe essere elevatissimo e questo è in contrasto con la sua scarsa disponibilità d'acqua, ricordiamo che la sua portata media è circa il 5% della portata delle Fonti.

Le nuove misure isopiche qui presentate riportano in parte alla luce il precedente modello di COLOMBETTI, FAZZINI 1988. Infatti, le misure isotopiche evidenziano come le acque dell'Ozola o del Secchia dopo la confluenza con Ozola possono effettivamente contribuire al bilancio delle Fonti di Poiano. Questa nuova ipotesi oltre ad essere sostenuta dalle analisi isotopiche è anche fortemente sostenuta dalla distribuzione degli affioramenti delle evaporiti triassiche nel bacino del Secchia e dell'Ozola. Tralasciando quindi l'apporto del torrente Lucola per i motivi già precedentemente esposti e prendendo in considerazione gli altri due corsi d'acqua, la formula precedente del bilancio potrebbe essere così scritta:

tipo A) caso che prende in considerazione il torrente Ozola:

$$\begin{aligned} C_{Fonti} \times 100\% &= C_{Sologno} \times (0 \div 100\%) + C_{Ozola} \times (0 \div 100\%) + C_{Precipitazioni} \times (0 \div 100\%) \\ -8.87 \times 100\% &= -8.83 \times (0 \div 100\%) - 9.06 \times (0 \div 100\%) - 9.22 \times (0 \div 100\%) \end{aligned}$$

tipo B) caso che prende in considerazione il torrente Secchia dopo la confluenza con il torrente Ozola:

$$C_{Fonti} \times 100\% = C_{Sologno} \times (0 \div 100\%) + C_{Sec.+Oz.} \times (0 \div 100\%) + C_{Precipitazioni} \times (0 \div 100\%)$$
$$-8.87 \times 100\% = -8.83 \times (0 \div 100\%) - 8.71 \times (0 \div 100\%) - 9.22 \times (0 \div 100\%)$$

Nelle due formule, se si prova ad inserire diverse percentuali nei contributi di flusso delle diverse aliquote solamente nel caso in cui si prendesse in considerazione il Secchia dopo la confluenza con il torrente Ozola, il contributo del Sologno sarebbe irrisorio, quindi in linea con la sua portata media, escludendo in questo modo il solo contributo da parte dell'Ozola. Ciò porterebbe quindi a presupporre per le Fonti di Poiano ad un modello idrogeologico corrispondente all'equazione del bilancio di massa di tipo B.

Conclusioni

Le Fonti di Poiano rappresentano un sistema idrico carsico peculiare in gessi triassici e di particolare importanza sia dal punto di vista naturalistico che idrogeologico. Esse sono state oggetto di numerosi studi precedenti per chiarire gli aspetti legati alla loro alimentazione e ai circuiti idrici sotterranei.

Rispetto agli studi precedenti, i risultati ottenuti dal presente studio hanno aperto nuovi scenari relativamente all'aspetto dell'alimentazione delle Fonti di Poiano. I dati isotopici e delle portate in contrasto con l'attuale modello proposto da CHIESI *et al.*, nel 2010 suggeriscono infatti un contributo nullo, o quasi, da parte del torrente Lucola. I dati isotopici piuttosto, in accordo con i dati delle portate dei corsi d'acqua, sono a favore di un contributo limitato da parte del torrente Sologno e più elevato da parte del Secchia dopo la confluenza con l'Ozola e delle precipitazioni. I risultati così ottenuti sembrano più in linea con il modello proposto da COLOMBETTI, FAZZINI, 1988, seppure anche in questo caso il solo torrente Lucola perde di importanza nel contribuire alle Fonti. Tuttavia si ritiene necessario approfondire le indagini con ulteriori analisi che potranno contribuire a chiarire maggiormente alcuni aspetti ancora non del tutto chiariti, come ad esempio il punto o i punti di infiltrazione del Secchia e le geometrie dei circuiti idrici sotterranei, arrivando così ad una maggiore comprensione del sistema idrico delle Fonti di Poiano.

Bibliografia

- AA. VV. (2016). *Il progetto Gypsum - Tutela e gestione di habitat e specie animali associati alle formazioni gessose dell'Emilia-Romagna*, Faenza.
- ALESSANDRINI A., BERTOLANI MARCHETTI D., BERTOLANI M. et al. (1988). *L'area carsica dell'alta Val di Secchia, studio interdisciplinare dei caratteri ambientali [The karst area of the Upper Secchia Valley, interdisciplinary study of the environmental parameters]*. Studi e Documentazioni, 42, Regione Emilia Romagna, Bologna, Italy.
- BAILLY-COMTE V., JOURDE H., PISTRE S. (2009). *Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France)*. J Hydrol 376, 456-462.
- BERTOLANI M. (1949). *Rocce e minerali dell'alta valle del Secchia [Rocks and minerals of the Upper Secchia Valley]*. In: AA.VV. (ed.) *Studio sulla formazione gessoso-calcareo nell'alta valle del Secchia [Study on the gypsiferous-calcareous formation in the Upper Secchia Valley]*. Club Alpino Italiano, Modena, Italy.
- BOTTEGARI C. (1612). *Relazione di un viaggio all'acqua salata di Minozzo in quel di Reggio (di Modena) [Report on a journey to the salty water of Minozzo in the Reggio region (of Modena)]*, Documento XII in Libro di Canto e di Liuto (manuscript can be found at the Estense Library of Modena), partially printed in: VALDRIGHI L.F. (ed.) (1891) *Il libro di Canto e Liuto di Cosimo Bottegari fiorentino*, Florence.
- CAETANO BICALHO C., BATIOU-GUILHE C., SEIDEL J.L., VAN EXTER S., JOURDE H. (2012). *Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer*. J Hydrol 450-451, 206-218.
- CANEDOLI S., CUOGHI A.L., FRANCESCHINI A., GORGONI C., PANINI G., PELLEGRINI M., VOLTONI C. (1994). *Le risorse idropotabili dell'alto Appennino della provincia di Reggio Emilia. Studi della Vulnerabilità degli acquiferi, alta pianura e Appennino della provincia di Reggio Emilia*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, 33.
- CARMIGNANI L., KLIGFIELD R. (1990). *Crustal extension in the northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*. Tectonics, 9, 1275-1303.
- CERVI F. (2003). *Idrologia chimica, isotopica e radiometrica dell'alta Val di Secchia [Chemical, isotopical and radiometrical hydrology of the Upper Secchia Valley]*. BSc Thesis, Università di Modena e Reggio Emilia, Italy, 94.
- CERVI F., RONCHETTI F., DOVERI M., MUSSI M., MARCACCIO M., TAZIOLI A. (2016). *The use of stable water isotopes from rain gauges network to define the recharge areas of springs: Problems and possible solutions from case studies from the northern Apennines*. GEAM. Geingegneria Ambientale e Mineraria, 149, 19-26.
- CHIESI M., FORMELLA W. (2008). *Recenti indagini speleologiche nel Trias evaporitico dell'alta valle di Secchia (Reggio Emilia) [Recent speleological investigations in the Triassic evaporites of the Upper Secchia Valley]*. Atti del XX Congresso Nazionale di Speleologia, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia 21, Istituto Italiano di Speleologia, Bologna, 149-156.
- CHIESI M., FORTI P. (1987). *Le sorgenti carsiche di Poiano [The karst springs of Poiano]*. Ambiente Nat Po Appennini 3 (1), 11-15.
- CHIESI M., FORTI P. (2008). *Prime valutazioni circa i meccanismi di controllo della evoluzione nella concentrazione di sale delle fonti di Poiano (Appennino Reggiano) [First evaluation of the controlling mechanisms of the salt concentration in the Poiano springs (Reggiano Apennines)]*. Atti del XX Congresso Nazionale di Speleologia, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia 21, Istituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- CHIESI M., FORTI P. (a cura di) (2009). *Il progetto Trias: studi e ricerche sulle evaporiti triassiche dell'alta Val di Secchia e sull'acquifero carsico di Poiano [The Trias Project: studies and research on the Triassic evaporites in the Upper Secchia Valley and on the karst aquifer of Poiano springs]*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, 22. Istituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- CHIESI M., DE WAELE J., FORTI P. (2010). *Origin and evolution of a salty gypsum/anhydrite karst spring: the case of Poiano (Northern Apennines, Italy)*. Hydrogeology Journal, 18 (5), 1111-1124.

- CHU H., WEI J., WANG R., XIN B. (2017). *Characterizing the interaction of groundwater and surface water in the karst aquifer of Fangshan, Beijing (China)*. Hydrogeol J 25, 575-588.
- CIARAPICA G., PASSERI L. (1976). *Deformazioni da fluidificazione ed evoluzione diagenetica della formazione evaporitica di Burano*. Boll. Soc. Geol. It., 95, 1175-1199.
- COLOMBETTI A., FAZZINI A. (1976). *L'alimentazione e l'origine della sorgente salsosolfata di Poiano (Reggio Emilia): fenomeni di dissoluzione nella valle del Fiume Secchia [The recharge and origin of the salty sulfate spring of Poiano (Reggio Emilia): phenomena of dissolution in the valley of Secchia River]*. Boll Soc Geol Ital 95, 403-421.
- COLOMBETTI A., FAZZINI P. (1986) *Il salgemma nella formazione dei gessi triassici di Burano (Villaminazzo, RE)*. Le Grotte d'Italia (4) XII, 1984/85, 209-219.
- COLOMBETTI, A., FAZZINI, P. (1988). *Anhydrite-Dolomite Formation in the Upper Valley of the River Secchia: Karst Hydrogeology*. Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection. IAH 21st Congress, 10-15 October 1988 Guilin, China.
- COLOMBETTI A., ZERILLI A. (1987). *Prime valutazioni dello spessore dei gessi triassici mediante sondaggi elettrici verticali nella Valle del F. Secchia (Villa Minozzo- R.E.)*. Mem. Soc. Geol. It., 39, 83-90.
- D'ANGELI I.M., SERRAZANETTI D.I., MONTANARI C., VANNINI L., GARDINI F., DE WAELE J. (2017). *Geochemistry and microbial diversity of cave waters in the gypsum karst aquifers of Emilia Romagna region, Italy*. Science of the Total Environment, 598, 538-552.
- DEIANA M., MUSSI M., PENNISI M., BOCCOLARI M., CORSINI A., RONCHETTI F. (2019). *Contribution of water geochemistry and isotopes ($\delta^{18}O$, δ^2H , $3H$, $87Sr/86Sr$ and $\delta^{11}B$) to the study of groundwater flow properties and underlying bedrock structures of a deep landslide*. Environ Earth Sci 79, 30.
- DE PAOLA N., COLLETTINI C., TRIPPETTA F., BARCHI M.R., MINELLI G. (2007). *A mechanical model for complex fault patterns induced by evaporite dehydration and cyclic changes in fluid pressure*. Journal of Structural Geology, 29(10), 1573-1584.
- DE WAELE J., FORTI P., ROSSI A. (2011). *Il carsismo nelle evaporiti dell'Emilia-Romagna*. Speleologia e geositi carsici in Emilia-Romagna, 25-59.
- EFTIMI R. (2005). *Hydrochemical characteristics of some lithologically different karst massifs of Albania*. Water Resources & Environmental Problems in Karst – Cvijić, Serbia e Montenegro, 2015.
- FILIPPINI M., SQUARZONI G., DE WAELE J., FIORUCCI A., VIGNA B., GRILLO B., RIVA A., ROSSETTI S., ZINI L., CASAGRANDE G., STUMPP C., GARGINI A. (2018). *Differentiated spring behavior under changing hydrological conditions in an alpine karst aquifer*. J Hydrol 556, 572-584.
- FORTI P. (2004). *Gypsum karst*, in: GOUDIE A.S. (ed.) Encyclopedia of geomorphology. Routledge, New York.
- FORTI P., FRANCAVILLA F., PRATA E., et al. (1986). *Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Triassic evaporites in the upper Secchia valley (Reggio Emilia, Italy) and the Poiano karst springs*. International Symposium on Evaporite Karst, Bologna, Italy, 21-26 October 1985, pp 267-278.
- FORTI P., SAURO U. (1996). *The gypsum karst of Italy*. Int J Speleol 25 (3-4), 239-250.
- FORTI P. (a cura di) (1986). *L'area carsica dell'alta Val di Secchia: studio interdisciplinare dei caratteri ambientali*. Regione Emilia-Romagna.
- GUIZERIX J., FLORKOWSKI T. (1983). *Streamflow measurements*, in: Guidebook on nuclear techniques in hydrology - Vienna: International Atomic Energy Agency, 65-80.
- KILPATRICK F.A., COBB E.D. (1985). *Measurement of discharge using tracers: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations Report*, book 3, chap. A16, 52.
- LEANNEY F.W., HERCZEG A.L. (1995). *Regional recharge to a karst aquifer estimated from chemical and isotopic composition of diffuse and localised recharge, South Australia*. J Hydrol 164, 363-387.
- Lugli S. (2001). *Timing of post-depositional events in the Burano Formation of the Secchia valley (Upper Triassic, Northern Apennines): clues from gypsum-anhydrite transitions and carbonate metasomatism*. Sediment Geol 140, 107-122.

- LUGLI S. (2009). *La storia geologica dei gessi triassici della Val di Secchia [The geological history of the Triassic gypsum in the Secchia Valley]*, in: CHIESI M, FORTI P. (a cura di) *Il progetto Trias: studi e ricerche sulle evaporiti triassiche dell'alta Val di Secchia e sull'acquifero carsico di Poiano [The Trias Project: studies and research on the Triassic evaporites in the Upper Secchia Valley and on the karst aquifer of Poiano springs]*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 22, Istituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- LUGLI S, DOMENICHINI M, CATELLANI C. (2004). *Peculiar karstic features in the Upper Triassic sulphate evaporites from the Secchia Valley (Northern Apennines, Italy)*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia 16, Istituto Italiano di Speleologia, Bologna, 95-102.
- LUGLI S., MORTEANI G AND BLAMART D. (2002). *Petrographic, REE, fluid inclusion and stable isotope study of the magnesite from the Upper Triassic Burano Evaporites (Secchia Valley, northern Apennines): contributions from sedimentary, hydrothermal and metasomatic sources*. Mineralium Deposita, 37, 480-494.
- MALAVOLTI F. (1949). *Morfologia carsica dell'alta valle del Secchia (Karst morphology of the Upper Secchia Valley)*, in: AA. VV. (a cura di) *Studio sulla formazione gessoso-calcareo nell'alta valle del Secchia [Study on the gypsum-limestone formations in the Upper Secchia Valley]*. Club Alpino Italiano, Modena.
- MARTINI R., GANDIN A., ZANINETTI L. (1989). *Sedimentology, Stratigraphy and micropaleontology of the Triassic evaporitic sequence in the subsurface of Boccheggiano and in some outcrops of southern Tuscany (Italy)*. Riv. It. Paleont. Strat., 95, 3-28.
- MARTINIS B., PIERI M. (1963). *Alcune notizie sulla formazione evaporitica del Triassico nell'Italia centrale e meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., 4.
- MAZOR E. (2003). *Chemical and isotopic groundwater hydrology* (Vol. 98). CRC press.
- MENNING D.M., WYNN J.G., GAREY J.R. (2015). *Karst estuaries are governed by interactions between inland hydrological conditions and sea level*. J Hydrol 527, 718-733.
- MOORE P.J., MARTIN J.B., SCREATON E.J. (2009). *Geochemical and statistical evidence of recharge, mixing, and controls on spring discharge in an eogenetic karst aquifer*. J Hydrol 376, 443-455.
- MUSGROVE M., STERN L.A., BANNER J.L. (2010). *Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer*. J Hydrol 388, 144-156.
- PLESI G., CHICCHI S., DANIELE G., PALANDRI S. (2000). *La struttura dell'alto Appennino reggiano-parmense fra Valditacca, il Passo di Pradarena e il M. Ventasso*. Boll. Soc. Geol. It., 119, 267-296.
- SPALLANZANI P. (1906). *Acque minerali nella montagna reggiana [Mineral waters from the mountains close to Reggio]*. Antiche Porte, Bologna, Italy.
- TAZIOLI A. (2011). *Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter*. Hydrological Sciences Journal, 56:7, 1314-1324.
- TAZIOLI, A., CERVI, F., DOVERI, M., MUSSI, M., DEIANA, M., & RONCHETTI, F. (2019). *Estimating the isotopic altitude gradient for hydrogeological studies in mountainous areas: Are the low-yield springs suitable? Insights from the northern Apennines of Italy*. Water, 11(9), 1764.
- VESPASIANO G., APOLLARO C., DE ROSA R., MUTO F., LAROSA S., FIEBIG J., MULCH A., MARINI L. (2015). *The small spring method (SSM) for the definition of stable isotope-elevation relationships in northern Calabria (southern Italy)*. Appl Geochem 63, 333-346.

