

Valutazione della qualità ambientale della sorgente carsica Su Gologone (Sardegna centro-orientale) mediante l'impiego delle diatomee epilittiche: primi risultati

Giuseppina Grazia Lai^{1*}, Bachisio Mario Padedda¹,
Carlos Eduardo Wetzel², Antonella Lugliè¹, Nicola Sechi¹, Luc Ector²

¹ Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica (DADU), Università di Sassari, Via Piandanna 4 – 07100 Sassari, Italia

² Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), Environmental Research and Innovation Department (ERIN), 41 rue du Brill, L-4422 Belvaux, Luxembourg

* Referente per la corrispondenza: lai.gg@tiscali.it

Pervenuto il 9.2.2015; accettato il 4.4.2015

Riassunto

Vengono riportati i primi risultati di un'indagine svolta nel ramo minore del sistema sorgivo carsico Su Gologone (Sardegna), per la caratterizzazione fisico-chimica delle acque, l'acquisizione di informazioni sulla composizione in specie delle comunità di diatomee epilittiche e l'applicabilità di alcuni indici diatomici. La qualità ambientale della sorgente è stata valutata con gli indici EPI-D (qualità biologica generale), NNS ed NNS' (disturbo fisico). I risultati sono stati integrati con il dataset annuale delle variabili fisico-chimiche e microbiologiche (*Escherichia coli*, coliformi fecali e totali) e gli indici LIM e LIMeco. I risultati dell'EPI-D sono anche stati comparati con quelli degli indici IPS (qualità biologica generale) e TI (livello trofico). La comunità diatomica è stata rappresentata complessivamente da 89 taxa (36 generi), 25 dei quali sono stati osservati per la prima volta nelle acque lotiche della Sardegna. I taxa rinvenuti nei conteggi sono stati 39 (21 generi) e quelli dominanti sono alcalifili, alofobi-oligoalobio-tolleranti, xeno- β -mesosaprobici e caratteristici di acque oligotrofiche. Il giudizio dell'indice EPI-D (qualità ottima-buona: I-II classe), sembra in buon accordo con le variabili ambientali e con gli indici LIM (qualità buona: II classe) e IPS (qualità ottima e buona: I e II classe). Al contrario l'indice TI ha decisamente sovrastimato lo stato trofico. Gli indici NNS e NNS' hanno rivelato un basso grado di disturbo fisico, coerente con il basso contenuto di solidi sospesi. La sorgente ha mostrato un leggero deterioramento della qualità ambientale in tarda primavera, probabilmente legato alla diminuzione della portata e alla più intensa frequentazione turistica.

PAROLE CHIAVE: indici diatomici / qualità biologica / disturbo fisico / Sardegna

Environmental quality evaluation of the karst spring Su Gologone (Central-Eastern Sardinia) by the use of epilithic diatoms: first results

We report the first results of a survey carried out in the smaller water emergence of karst spring system Su Gologone (Sardinia) to acquire knowledge on the physico-chemical characteristics of water, the species composition of epilithic diatom community and the applicability of some diatom indices. The environmental quality of the spring was evaluated using the EPI-D index (general biological quality), the NNS and NNS' indices (physical disturbance). The results were integrated with the annual dataset of physico-chemical and microbiological variables (*Escherichia coli*, fecal and total coliforms) and the LIM and LIMeco indices. The results of EPI-D were also compared with those of the IPS (general biological quality), and TI (trophic level) indices. The diatom community was composed by a total of 89 taxa (36 genera), including 25 taxa observed in lotic waters of Sardinia for the first time. The taxa found in the counts were 39 (21 genera) and those dominant are alkaliphilous, halophobous-oligoalobous tolerant, xenosaprobic- β -mesosaprobic and characteristic of oligotrophic waters. The EPI-D indicated an excellent-good quality (I-II class) and it seems in good agreement with the environmental variables and with the LIM (good quality: II class) and IPS indices (excellent and good quality: I and II class). By contrast the TI index has decidedly overestimated the trophic state. The NNS and NNS' revealed a low degree of physical disturbance, consistent with the low content of suspended solids. The spring showed a slight deterioration of environmental quality in late spring, probably linked to the reduction of discharge and the increased presence of tourists.

KEYWORDS: diatom indices / biological quality / physical disturbance / Sardinia

INTRODUZIONE

L'utilità delle diatomee bentoniche come indicatori della qualità ambientale delle acque superficiali correnti è stata riconosciuta da numerosi studi in vari paesi del mondo (Ector *et al.*, 2004; Rimet *et al.*, 2005; Ács *et al.*, 2007; Stevenson *et al.*, 2010; Whitton, 2012; Venkatachalapathy e Karthikeyan, 2015) e, quali componenti del fitobenthos, dalla Direttiva Quadro sulle Acque della Comunità Europea (Water Framework Directive, WFD 2000/60 CE) (European Union, 2000).

Diversi studi hanno anche evidenziato la capacità di risposta delle diatomee bentoniche a fenomeni di disturbo fisico dell'ambiente acquatico legati all'erosione, sospensione e sedimentazione delle particelle solide, sia per cause naturali che antropiche (Bahls, 1993; Kutka e Richards, 1996; Battegazzore *et al.*, 2003, 2004, 2007).

Nell'ambito delle acque interne, le sorgenti sono considerate ambienti peculiari con un alto potenziale ecologico, sia in termini di biodiversità che di qualità dell'acqua (Di Sabatino *et al.*, 2009; Cantonati *et al.*, 2012). In questi ecosistemi, considerati anche come ottimi laboratori naturali per testare la risposta delle comunità in condizioni abiotiche relativamente stabili (Odum, 1971), le diatomee bentoniche possono essere indicatori di qualità ambientale particolarmente efficaci. Nonostante la loro importanza e l'elevata vulnerabilità alle pressioni antropiche (Stevens e Meretsky, 2008), le sorgenti non risultano specificamente menzionate dalla WFD e sono poco studiate rispetto agli ambienti fluviali e in generale ad altre tipologie di ecosistemi d'acqua dolce (Cantonati *et al.*, 2012).

L'applicazione di indici diatomici nelle sorgenti italiane ha riguardato principalmente l'area alpina ed appenninica, per le quali si dispone di una conoscenza approfondita delle diatomee (Battegazzore *et al.*, 2004; Torrisi e Dell'Uomo, 2009; Battegazzore, 2012; Battegazzore e Morisi, 2012). Al contrario, le conoscenze sono notevolmente carenti per l'area mediterranea.

Questo lavoro ha permesso la caratterizzazione fisico-chimica delle acque e contribuisce alla conoscenza delle diatomee epilittiche del sistema sorgivo carsico Su Gologone, il più importante della Sardegna. Le diatomee della sorgente sono state infatti studiate insieme ad altre classi algali, soltanto in un'altra precedente occasione (Dell'Uomo, 1990). I dati di abbondanza delle diatomee sono stati utilizzati per una prima applicazione dell'indice di Eutrofizzazione e/o Polluzione basato sulle diatomee o EPI-D (Dell'Uomo, 2004) e degli indici *Navicula*, *Nitzschia* e *Surirella* NNS e NNS' (Battegazzore *et al.*, 2003, 2004, 2007) al fine di testare l'applicabilità di questi metodi per la valutazione della qualità biologica e del disturbo fisico del sistema.

MATERIALI E METODI

Area di studio

La sorgente carsica Su Gologone (Fig. 1) è ubicata alle falde del Supramonte, un complesso montuoso di altopiani carbonatici che si estende nella Sardegna centro-orientale (Bianco, 1993). Il sistema sorgivo si trova in prossimità della riva destra del Fiume Cedrino, a monte dell'omonimo lago artificiale, ed è costituito da due punti di emergenza dell'acqua denominati Sa Vena Manna (104,5 m s.l.m.) e Sa Vena (103,7 m s.l.m.), con caratteristiche morfologiche e portata molto differenti. Sa Vena Manna, l'emergenza più grande, è una sorgente limno-reocrena con una portata media di 500 L sec⁻¹. Sa Vena, l'emergenza più piccola, è una sorgente reocrena modificata da un manufatto aperto e ha una portata decisamente inferiore alla prima.

La sorgente, riconosciuta come Monumento Naturale (D.R. 845/1998) e Zona di Rispetto (D.Lgs. 152/1999), ricade in un territorio poco antropizzato e con un alto grado di naturalità (De Waele, 2008), all'interno del Parco Nazionale del Gennargentu e del Golfo di Orosei. Inoltre l'acquifero fa parte del Sito di Importanza Comunitaria (SIC) e della Zona di Protezione Speciale (ZPS) "Supramonte di Oliena, Orgosolo e Urzulei-Su Sercone" (ITB022212) per la regione biogeografica mediterranea. Le potenziali fonti di disturbo presenti nel territorio sono la presenza di animali al pascolo nelle aree circostanti, la sommersione della sorgente durante gli eventi di piena del Fiume Cedrino, la frequentazione turistica. A Sa Vena è inoltre presente un sistema di captazione dell'acqua ad uso potabile.

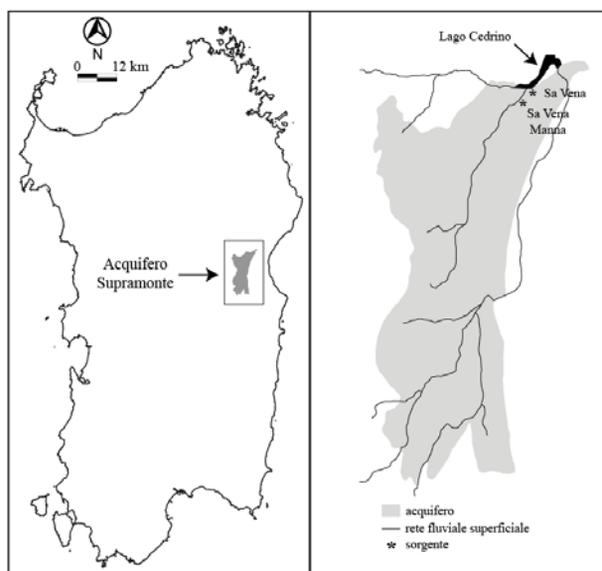


Fig. 1. Localizzazione geografica del sistema sorgivo carsico Su Gologone.

Campionamento, analisi e trattamento dei dati

Lo studio è stato svolto lungo il ruscello di Sa Vena da dicembre 2010 a dicembre 2011. La caratterizzazione fisico-chimica delle acque della sorgente è stata effettuata mediante campionamenti mensili. In campo, mediante una sonda multiparametrica (mod. YSI ProPlus) sono stati misurati temperatura, pH, conducibilità e ossigeno disciolto. L'analisi dei più importanti parametri chimici e microbiologici è stata svolta in laboratorio secondo le metodiche CNR-IRSA (1994) e APHA (1998). I risultati di alcuni parametri rappresentativi sono stati utilizzati per il calcolo degli indici LIM (Livello di Inquinamento da Macrodescriptors) e LIMeco (Livello di Inquinamento da Macrodescriptors per lo stato ecologico), previsti rispettivamente dal D.Lgs. 152/1999 e dal D.M. 260/2010, che sintetizzano lo stato di qualità fisico-chimico delle acque in cinque classi di qualità. Il LIM è stato calcolato sulla base di 7 parametri (% di saturazione dell'ossigeno, BOD₅, COD, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Fosforo totale, *Escherichia coli*) e il LIMeco sulla base di 4 parametri (% di saturazione dell'ossigeno, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Fosforo totale).

In inverno (dicembre 2010) e tarda primavera (giugno 2011) è stato effettuato il prelievo delle diatomee epilittiche per acquisire informazioni sulla composizione in specie delle comunità. I campioni sono stati raccolti da 5 ciottoli in piena corrente lungo il ruscello di Sa Vena, in accordo con Kelly *et al.* (1998) e ISPRA (2007) e sono stati fissati in campo con formalina (vol. 4%). Il trattamento in laboratorio è stato effettuato con perossido di idrogeno (130 vol.) a caldo e successiva aggiunta di acido cloridrico diluito per la dissoluzione dei carbonati (ISPRA, 2007). I frustuli sono stati montati su vetrini permanenti con resina StyraX (indice di rifrazione = 1,59). L'identificazione delle diatomee è stata effettuata con un microscopio ottico Zeiss (mod. Axiovert 10) a 1000 ingrandimenti e l'uso di monografie (Krammer e Lange-Bertalot, 1986-1991b, 2000; Lange-Bertalot *et al.*, 2003).

I dati di abbondanza ottenuti con il conteggio di circa 400 valve e/o frustuli per ciascun campione, sono stati utilizzati per una prima valutazione della qualità biologica dell'acqua con l'indice EPI-D e per la valutazione qualitativa e quantitativa del disturbo fisico dell'ecosistema rispettivamente con gli indici NNS e NNS'.

La scelta di utilizzare l'indice EPI-D è dovuta a tre ragioni principali: 1) questo indice è già stato applicato con buoni risultati in diversi ambienti sorgivi italiani, compresi quelli carsici come le Fonti del Clitunno (Torrise e Dell'Uomo, 2009); 2) in Sardegna non si dispone ancora di un'ampia casistica di studio e non sono state individuate le condizioni di riferimento richieste dalla WFD, necessarie per l'applicazione dell'Indice Multimetrico di Intercalibrazione o ICMi previsto dal D.M. 260/2010 (Mancini e Sollazzo, 2009); 3) il Trophic Index TI (Rott *et al.*, 1999) previsto per il

calcolo dell'indice ICMi non è risultato coerente con la condizione trofica della sorgente evidenziata dalle concentrazioni dei nutrienti.

L'ICMi è l'indice attualmente utilizzato per la valutazione della qualità delle acque correnti italiane sulla base delle diatomee. Recentemente sono stati organizzati ring-test per migliorare l'applicazione di questo indice e approfondire la conoscenza sulla tassonomia e l'ecologia delle diatomee (Torrise *et al.*, 2014).

Il calcolo dell'EPI-D è stato effettuato mediante il software Omnidia V. 8.1 (Lecointe *et al.*, 1993, 1999). Il calcolo degli indici NNS e NNS', basato sulla proporzione del numero di taxa e di individui appartenenti ai generi mobili *Navicula*, *Nitzschia* e *Surirella* rispetto al numero totale di taxa e di individui della comunità, è stato effettuato mediante le formule proposte da Battagazzore *et al.* (2003, 2004, 2007) con un foglio di calcolo Microsoft Excel.

RISULTATI

Parametri fisici e chimici

I valori minimi, massimi e medi delle variabili ambientali misurate e analizzate nel periodo di stu-

Tab. I. Valori minimi, massimi e medi delle variabili fisico-chimiche e microbiologiche misurate e analizzate nella Sorgente Su Gologone (Sa Vena) tra dicembre 2010 e dicembre 2011. N = 13. L.R. = Limite di rilevabilità del metodo.

Variabili	Min	Max	Med
Temperatura °C	11,5	14,0	12,6
pH unità	7,2	8,3	7,8
Alcalinità meq L ⁻¹	2,5	3,4	2,9
Conducibilità µS cm ⁻¹	275	408	347
Ossigeno mg O ₂ L ⁻¹	9,2	11,7	10,3
Ossigeno %	75	109	92
BOD ₅ mg L ⁻¹	< L.R.	5,6	2,9
COD mg L ⁻¹	< L.R.	24,5	9,0
Cl ⁻ mg Cl L ⁻¹	13,4	88,6	22,7
Durezza mg CaCO ₃ L ⁻¹	115	175	147
P-PO ₄ ³⁻ mg P L ⁻¹	0,003	0,007	0,004
P totale mg P L ⁻¹	0,010	0,059	0,018
N-NH ₄ ⁺ mg N L ⁻¹	0,011	0,034	0,019
N-NO ₂ ⁻ mg N L ⁻¹	< L.R.	0,216	0,067
N-NO ₃ ⁻ mg N L ⁻¹	0,271	0,747	0,555
N totale mg N L ⁻¹	0,621	1,017	0,807
Silice Reattiva mg Si L ⁻¹	1,6	2,0	1,8
Solidi sospesi mg L ⁻¹	< L.R.	10,0	2,5
<i>Escherichia coli</i> UFC 100 mL ⁻¹	1	428	102
coliformi fecali UFC 100 mL ⁻¹	2	2235	424
coliformi totali UFC 100 mL ⁻¹	5	3743	685

dio sono riportati in tabella I. L'acqua della sorgente ha mostrato una temperatura relativamente costante variando tra 11,5°C (gennaio) e 14°C (luglio-agosto). Il pH lievemente basico (7,2-8,3) è in accordo con la natura calcarea del substrato. È stato osservato un buon livello di ossigenazione dell'acqua (% di saturazione dell'ossigeno quasi sempre >75%) e un livello medio di durezza (115-175 mg CaCO₃ L⁻¹). I valori di conducibilità, compresi tra 275 e 408 μS cm⁻¹, hanno indicato un contenuto medio di sali minerali disciolti. Le massime concentrazioni dei nutrienti, in particolare del fosforo reattivo e totale, sono state rispettivamente pari a 0,007 e 0,059 mg L⁻¹. Tra le forme di azoto inorganico, i nitrati hanno avuto i valori più alti (0,271-0,747 mg N L⁻¹), dando quindi il maggior contributo all'azoto totale (0,621-1,017 mg N L⁻¹). Per il BOD₅ e il COD sono stati osservati dei picchi in alcuni mesi invernali e

Tab. II. Risultati dell'Indice LIM calcolato sul dataset annuale (dicembre 2010-dicembre 2011) nella Sorgente Su Gologone (Sa Vena). N = 13.

Macrodescrittori	75° percentile	Punteggio	Livello di inquinam.	Qualità
100-OD (% sat.)	13	40	II	buona
BOD ₅ mg L ⁻¹	3,4	40	II	buona
COD mg L ⁻¹	18,2	10	IV	cattiva
N-NH ₄ ⁺ mg N L ⁻¹	0,025	80	I	ottima
N-NO ₃ ⁻ mg N L ⁻¹	0,608	40	II	buona
P tot mg P L ⁻¹	0,019	80	I	ottima
<i>E. coli</i> UFC 100 mL ⁻¹	130	40	II	buona
LIM		330	II	buona

Tab. III. Risultati dell'indice LIMeco calcolato sul dataset annuale (dicembre 2010-dicembre 2011) nella Sorgente Su Gologone (Sa Vena). N = 13.

Campionamenti	LIMeco mensile	Stato di qualità
dicembre 2010	0,69	elevato
gennaio 2011	0,88	elevato
febbraio 2011	1,00	elevato
marzo 2011	1,00	elevato
aprile 2011	1,00	elevato
maggio 2011	1,00	elevato
giugno 2011	0,75	elevato
luglio 2011	0,69	elevato
agosto 2011	0,63	buono
settembre 2011	0,88	elevato
ottobre 2011	0,69	elevato
novembre 2011	0,63	buono
dicembre 2011	0,75	elevato
LIMeco	0,81	elevato

soprattutto tra la primavera e l'autunno, in coincidenza dei massimi di densità di *E. coli*, coliformi fecali e totali.

L'indice LIM (Tab. II) e l'indice LIMeco (Tab. III), hanno collocato la sorgente rispettivamente nella II classe (qualità buona) e nella I classe (Stato di qualità elevato).

Le Diatomee

Nei campioni analizzati sono stati complessivamente rilevati 89 taxa (36 generi), la maggior parte dei quali sono stati rari ed occasionali. Tra questi, 25 sono taxa di nuova segnalazione per le acque correnti della Sardegna, come *Amphora indistincta*, *Amphora meridionalis*, *Amphora vetula*, *Caloneis lancettula*, *Cocconeis neothumensis*, *Diatoma mesodon*, *Diploneis separanda*, *Fallacia lenzii*. Numerosi taxa risultano inseriti sotto varie categorie nella Lista Rossa delle diatomee della Germania (Lange-Bertalot e Steindorf, 1996). Tra questi, *Diploneis minuta* e *Navicula vilaplana* sono considerati "estremamente rari". Alcuni taxa interessanti sono riportati con immagini al microscopio ottico ed elettronico (Fig. 2-17). Tutte le specie trovate hanno distribuzione cosmopolita.

I taxa rinvenuti nei conteggi sono stati 39 (21 generi) di cui 38 Pennales e 1 Centrales (*Ellerbeckia arenaria*) (Tab. IV). In termini di numero di specie, i generi maggiormente rappresentati sono stati *Navicula* e *Nitzschia* (6), seguiti da *Cocconeis* e *Diploneis* (3). Le comunità diatomiche sono state caratterizzate da 7 taxa abbondanti (abbondanza relativa maggiore del 5%), 9 taxa frequenti (abbondanza relativa compresa tra 1,5 e 5%) e da 23 taxa rari (abbondanza relativa minore di 1,5%). Il numero totale di taxa è passato da 25 nel campione del dicembre 2010 a 32 in quello del giugno 2011.

Per quanto riguarda le preferenze ecologiche, la maggior parte dei taxa sono alcalifili, alofobi-oligoalobio tolleranti, xeno-β-mesosaprobi e tipici di acque oligotrofiche. Dei 39 taxa presenti nei conteggi, 10 non hanno contribuito al calcolo dell'indice EPI-D. Infatti 8 taxa non sono attualmente inclusi nel metodo (Tab. IV), mentre per *Achnanthydium subatomus* e *Planothydium frequentissimum* sono stati pubblicati soltanto i dati parziali di sensibilità "i" ed affidabilità "r" rispetto alla salinità, alla materia organica e ai nutrienti (Dell'Uomo e Torrisi, 2011). Tra i 10 taxa esclusi, alcuni sono stati abbondanti come *A. subatomus* e *P. frequentissimum* e altri frequenti come *Caloneis fontinalis* e *Cocconeis pseudolineata*.

Gli indici diatomici

I risultati degli indici diatomici calcolati in questo studio sono riportati in Tab. V. I valori di EPI-D, IPS e TI, uniformati mediante il software Omnidia, sono riportati in scala 1-20 per facilitarne il confronto. L'indice EPI-D (Fig. 18) ha collocato la sorgente nella

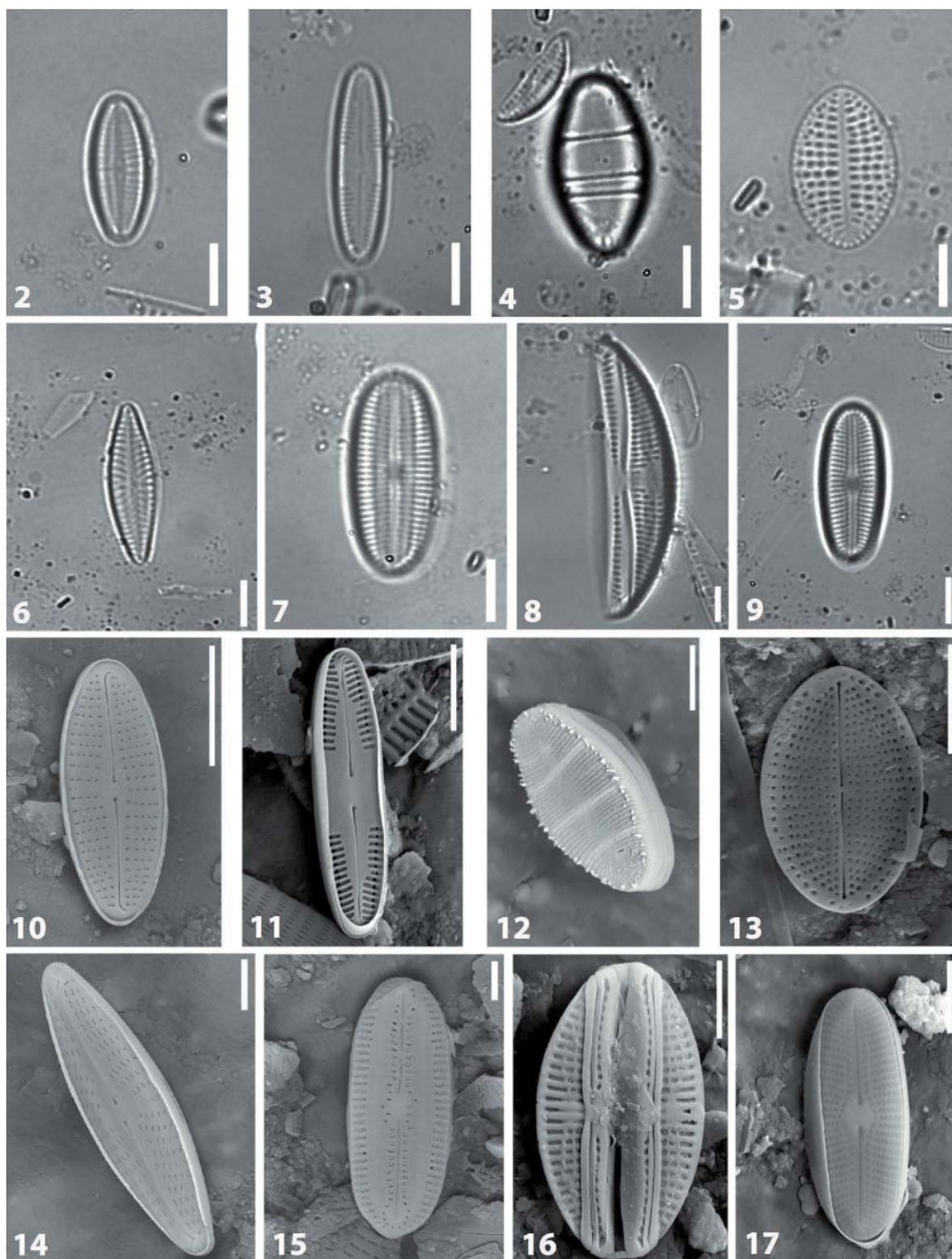


Fig. 2-17. Immagini al microscopio ottico (barra = 10 μm) e al microscopio elettronico (barra = 5 μm) di alcuni taxa osservati nella sorgente Su Gologone (Sa Vena). 2 e 10: *Achnanthidium subatomus* (Hustedt) Lange-Bertalot; 3 e 11: *Caloneis fontinalis* (Grunow) Cleve-Euler; 4 e 12: *Diatoma mesodon* (Ehrenberg) Kützing; 5 e 13: *Cocconeis neothumensis* Krammer; 6 e 14: *Navicula vilaplana* (Lange-Bertalot & Sabater) Lange-Bertalot & Sabater; 7 e 15: *Diploneis minuta* J.B. Petersen; 8 e 16: *Amphora meridionalis* Levkov; 9 e 17: *Diploneis separanda* Lange-Bertalot.

Tab. IV. Elenco delle diatomee rinvenute nei conteggi, distinte in base alla massima abbondanza relativa in almeno un campione. L'asterisco indica i taxa attualmente non inclusi nella lista del metodo EPI-D. In grigio sono evidenziate le specie di nuova segnalazione per le acque correnti della Sardegna.

> 5%

Achnanthydium minutissimum (Kützing) Czarnecki
Achnanthydium subatomus (Hustedt) Lange-Bertalot
Amphora pediculus (Kützing) Grunow ex A. Schmidt
Navicula tripunctata (O.F. Müller) Bory de Saint-Vincent
Nitzschia dissipata (Kützing) Grunow
Planothidium lanceolatum (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot
Planothidium frequentissimum (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot

1,5-5%

Caloneis fontinalis (Grunow) Cleve-Euler *
Cocconeis placentula Ehrenberg
Cocconeis pseudolineata (Geitler) Lange-Bertalot *
Diploneis cf. oculata (Brébisson in Desmazières) Cleve
Fallacia subhamulata (Grunow) D.G. Mann
Meridion circulare (Greville) C. Agardh
Navicula cryptotenella Lange-Bertalot
Nitzschia fonticola (Grunow) Grunow
Nitzschia sociabilis Hustedt

< 1,5%

Amphora ovalis (Kützing) Kützing
Amphipleura pellucida (Kützing) Kützing
Cocconeis euglypta Ehrenberg
Diatoma mesodon (Ehrenberg) Kützing
Diploneis separanda Lange-Bertalot *
Diploneis sp.1
Ellerbeckia arenaria (Moore ex Ralfs) R.M. Crawford
Eolimna minima (Grunow) Lange-Bertalot
Eunotia pectinalis (Kützing) Rabenhorst
Fallacia lenzii (Hustedt) Lange-Bertalot
Fragilaria capucina Desmazières
Gomphonema elegantissimum E. Reichardt & Lange-Bertalot *
Karayevia clevei (Grunow) Bukhtiyarova
Karayevia ploenensis var. *gessneri* (Hustedt) Bukhtiyarova *
Luticola goeppertiana (Bleisch) D.G. Mann
Navicula antonii Lange-Bertalot *
Navicula cryptotenelloides Lange-Bertalot *
Nitzschia commutata Grunow *
Nitzschia inconspicua Grunow
Nitzschia linearis (C. Agardh) W. Smith
Navicula gregaria Donkin
Navicula veneta Kützing
Rhoicosphenia abbreviata (C. Agardh) Lange-Bertalot

I-II classe di qualità (ottima-buona) sia in inverno che in tarda primavera. Nel campione di giugno il valore dell'indice (15,2) è stato leggermente inferiore rispetto a quello del campione di dicembre (15,3). I valori dell'EPI-D sono in buon accordo con quelli dell'indice IPS. Anche quest'ultimo, come l'EPI-D, ha mostrato un valore solo leggermente inferiore in giugno indicando il passaggio dalla I classe (qualità ottima) in inverno alla II classe (qualità buona) in tarda primavera. L'indice TI ha invece collocato la sorgente nelle classi di eutrofia ed eu-politrofia sovrastimando decisamente lo stato trofico della sorgente. I valori degli indici NNS e NNS' (Fig. 19) hanno indicato un basso livello di disturbo fisico dell'ecosistema in entrambe le stagioni. I valori degli indici sono stati di poco superiori nel campione di giugno (rispettivamente 42 e 23) rispetto a quelli del campione di dicembre (rispettivamente 40 e 17).

DISCUSSIONE

La sorgente Su Gologone (Sa Vena) ha mostrato una qualità ecologica coerente con la scarsa antropizzazione e l'alto grado di naturalità del territorio. Nonostante sia un ambiente di piccole dimensioni, la comunità diatomea è rappresentata da un alto numero di spe-

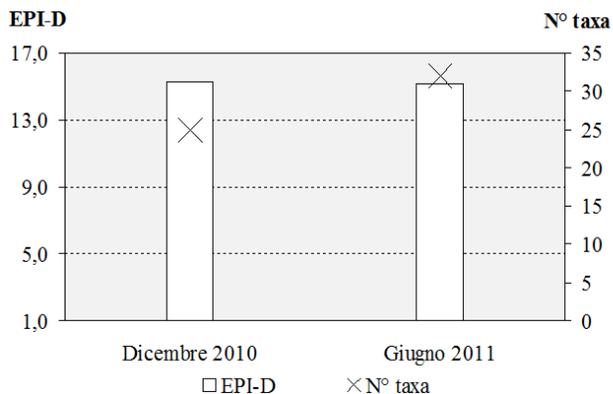


Fig. 18. Valori stagionali dell'EPI-D e numero di taxa utilizzati per il calcolo dell'indice.

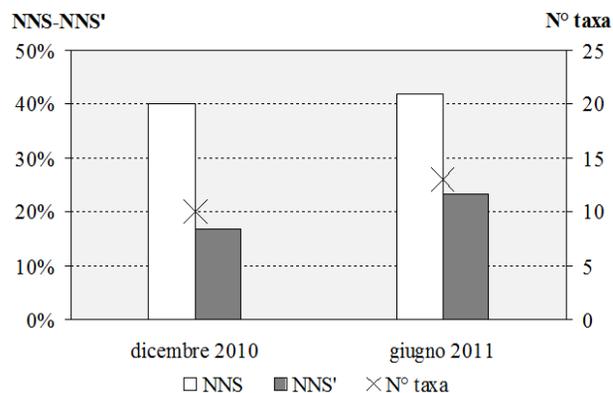


Fig. 19. Valori stagionali dell' NNS e dell'NNS' e numero di taxa utilizzati per il calcolo degli indici.

Tab. V. Valori stagionali degli indici diatomici applicati nella sorgente Su Gologone (Sa Vena). Gli indici EPI-D, IPS e TI sono riportati in scala 1-20.

	EPI-D	IPS	TI	NNS	NNS'
dicembre 2010	15,3	17,2	7,9	40,0	41,9
giugno 2011	15,2	16,9	7,4	16,7	23,4

cie, probabilmente dovuto alla presenza di un'elevata diversità di microhabitat. Questa ricchezza specifica è confrontabile con quella osservata in sorgenti del settore alpino meno colpite da alterazioni morfologiche (Angeli *et al.*, 2010) o inserite in aree protette (Falasco e Bona, 2011) e nei tratti superiori di corsi d'acqua e nelle sorgenti della regione appenninica centrale (Torrissi e Dell'Uomo, 2009).

Le preferenze ecologiche dei taxa osservati sono in buon accordo con le caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua rilevate in questo studio. In particolare, la comunità ha rispecchiato un basso contenuto di nutrienti (dominanza di specie tipiche di ambienti oligotrofici) e una moderata presenza di materia organica (buona rappresentanza di specie xeno- β -mesosaprobiche e oligo- β -mesosaprobiche). *Ellerbeckia arenaria* ed *Eunotia pectinalis* sono stati gli unici taxa caratteristici di ambienti ultraoligotrofici e ultraoligo-oligotrofici, ma hanno mostrato abbondanze basse. Tra le specie tipiche di ambienti oligotrofici le più abbondanti sono state *Achnantheidium minutissimum*, *Navicula tripunctata* e *Planothidium lanceolatum*. Il gruppo delle specie xeno- β -mesosaprobiche è stato rappresentato da *Cocconeis placentula*, *C. pseudolineata* e *Amphora pediculus* e quest'ultima è stata la specie più abbondante. Le specie oligo- β -mesosaprobiche più abbondanti sono state invece *Navicula cryptotenella*, *Nitzschia fonticola* e *Fallacia subhamulata*. La contaminazione organica della sorgente, evidenziata anche da picchi di BOD₅, COD e densità delle colonie batteriche in alcuni mesi, sembrerebbe per lo più legata alla presenza di animali al pascolo nel territorio circostante e alla sommersione da parte delle acque del Fiume Cedrino durante gli eventi di piena.

I valori stagionali dell'indice EPI-D hanno collocato la sorgente in una classe di passaggio (qualità ottima-buona: I-II classe) confermando il quadro generale delineato dalle variabili ambientali e in particolare il giudizio dell'indice LIM (qualità buona: II classe). Il giudizio dell'indice LIMeco (Stato di qualità elevato: I classe) sembra invece sovrastimare lo stato di qualità rispetto all'EPI-D e al LIM in quanto, a differenza di questi, considera soltanto i nutrienti e il grado di ossigenazione delle acque. In tarda primavera l'EPI-D ha evidenziato solo un lieve deterioramento della qualità che probabilmente è dovuto a una diminuzione della portata della sorgente, sia per il minore contributo delle acque meteoriche che per la costante captazione.

Il raffronto con l'indice IPS che è considerato l'indice diatomico di riferimento, ha evidenziato un giudizio di qualità piuttosto concorde. L'IPS, contrariamente all'indice TI, sviluppato per le acque correnti austriache, è un indice di qualità generale dell'acqua e ha considerato tutte le specie rilevate in questo studio. L'indice TI, basato sulla sensibilità delle specie alla sola trofia, è stato sviluppato in una realtà geografica molto differente da quella studiata e non sembra in grado di descrivere in modo adeguato la condizione trofica della sorgente.

Gli indici NNS e NNS' hanno indicato un lieve grado di disturbo fisico, in accordo con il basso contenuto di solidi sospesi nell'acqua. In entrambe le stagioni il contributo maggiore agli indici è stato apportato dalle specie appartenenti al genere *Navicula* (7 taxa e 52 individui in inverno e 8 taxa e 61 individui in tarda primavera). Tra queste, *N. tripunctata* e *N. cryptotenella* sono state le specie più abbondanti. In tarda primavera, i valori degli indici sono stati leggermente più alti, probabilmente anche a causa di una più intensa frequentazione turistica della sorgente. In questa stagione è stato rilevato un contributo maggiore del genere *Nitzschia* (5 taxa e 36 individui) rispetto a quello osservato in inverno (3 taxa e 20 individui) e *Nitzschia dissipata* è stato il taxa più abbondante. È interessante notare come in tarda primavera l'aumento del disturbo fisico sia stato contestuale con il lieve deterioramento della qualità biologica dell'acqua evidenziato dall'EPI-D. Questo suggerisce che la stagionalità, tipica del clima mediterraneo, ha un ruolo importante anche su ecosistemi come le sorgenti che, per loro natura, sono considerate relativamente stabili. I risultati degli indici di disturbo applicati in questo studio concordano con quelli di uno studio precedente (De Waele, 2009) in cui l'applicazione del Karst Disturbance Index o KDI (Van Beynen e Townsend, 2005), basato su un'insieme di indicatori appartenenti a diverse categorie (geomorfologia, atmosfera, idrologia, biota e fattori culturali), ha evidenziato un basso disturbo della sorgente.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro contribuisce alla conoscenza della biodiversità delle sorgenti carsiche in ambiente mediterraneo e riporta la prima esperienza di applicazione di indici diatomici in ambienti sorgivi carsici della Sardegna. Il giudizio fornito dall'indice EPI-D sembra attendibile, nonostante 10 taxa tra quelli presenti nei conteggi non abbiano contribuito al calcolo dell'indice

e la loro esclusione possa implicare un errore nella valutazione corretta dello stato di qualità. Infatti i risultati ottenuti dall'analisi delle diatomee sono in buon accordo con il quadro generale delle variabili ambientali e il loro uso come indicatori sembra appropriato anche in questa tipologia di ambienti acquatici. Inoltre l'EPI-D è risultato concorde con l'indice IPS che ha considerato tutte le specie trovate in questo studio. Il costante aggiornamento dell'EPI-D con i taxa eventualmente segnalati nelle diverse regioni italiane sarebbe importante per affinare l'applicabilità del metodo, peraltro concepito per le acque correnti italiane e testato con buoni risultati in differenti aree geografiche.

Anche gli indici NNS e NNS', ancora poco ap-

plicati sul territorio nazionale, si sono rivelati utili per la valutazione dell'impatto di tipo fisico e sarebbero auspicabili ulteriori indagini e verifiche su un contesto geografico più vasto. La buona qualità dell'acqua, l'elevata ricchezza di specie e la presenza di taxa inseriti nella Lista Rossa sottolineano il valore ambientale e la necessità di proteggere questo importante ecosistema.

Le sorgenti, in particolare quelle di tipologia carsica, rappresentano una risorsa strategica per la Sardegna e in generale, per l'area mediterranea. Ulteriori indagini potranno offrire un contributo importante non solo alla conoscenza delle loro biocenosi e delle loro dinamiche ecologiche, ma anche un supporto indispensabile per una loro corretta gestione futura.

BIBLIOGRAFIA

- Ács É., Kiss K.T., Padisák J., 2007. Use of algae for monitoring rivers VI. *Archiv für Hydrobiologie, Supplement Large Rivers*, **17**: 265-550.
- Angeli N., Cantonati M., Spitale D., Lange-Bertalot H., 2010. A comparison between diatom assemblages in two groups of carbonate, low-altitude springs with different levels of anthropogenic disturbances. *Fottea*, **10**: 115-128.
- APHA (American Public Health Association), 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, D.C., 1000 pp.
- Bahls L.L., 1993: *Periphyton bioassessment methods for Montana streams*. Water Quality Bureau, Department of Health and Environmental Sciences, Helena, Montana, 136 pp.
- Battegazzore M., 2012. Environmental conditions of alpine springs of the upper Po River (NW Italy) on the basis of their epilithic diatom communities. *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale di Milano*, **153**: 49-62.
- Battegazzore M., Morisi A., 2012. Environmental evaluation of springs in the intensely cultivated and industrialized inland plain of Cuneo (Northwest Italy). *Journal of Environmental Science and Engineering*, **B1**: 19-24.
- Battegazzore M., Gallo L., Lucadamo L., Morisi A., 2003. Quality of the main watercourses in the Pollino National Park (Apennine Mts, S Italy) on the basis of the diatom benthic communities. *Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Biologica*, **80**: 89-93.
- Battegazzore M., Morisi A., Gallino B., Fenoglio S., 2004. Environmental quality evaluation of alpine springs in NW Italy using benthic diatoms. *Diatom Research*, **19**: 149-165.
- Battegazzore M., Bianco L., Bona F., Falasco E., Fenoglio S., Gastaldi E., Morisi A., Shestani L., Badino G., 2007. Diatomee e qualità dei corsi d'acqua in tre aree alpine e prealpine ad altimetria e substrato geologico differenti. *Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Biologica*, **83**: 111-116.
- Bianco L., 1993. S.O.S Su Gologone. *Sardegna Speleologica*, **4**: 19-25.
- Cantonati M., Füreder L., Gerecke R., Jüttner I., Cox E.J., 2012. Crenic habitats, hotspots for freshwater biodiversity conservation: toward an understanding of their ecology. *Freshwater Science*, **31**: 463-480.
- CNR-IRSA (Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto di Ricerca sulle Acque), 1994. *Metodi analitici per le acque*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato-Libreria dello Stato, Roma, 342 pp.
- Dell'Uomo A., 1990: Chorological analysis of the algal flora of "Su Gologone" spring in Sardinia. *Proceedings of the International Symposium on Biogeographical Aspects of Insularity*, Rome, 417-427.
- Dell'Uomo A., 2004. *L'indice diatamico di eutrofizzazione/polluzione (EPI-D) nel monitoraggio delle acque correnti*. Linee Guida. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Roma, 101 pp.
- Dell'Uomo A., Torrisi M., 2011. The EPI-D diatom metric and three new related indices for monitoring rivers: the case study of the river Potenza (the Marches, Italy). *Plant Biosystems*, **145**: 331-341. DOI: 10.1080/11263504.2011.569347.
- Ector L., Kingston J.C., Charles D.F., Denys L., Douglas M.S.V., Manoylov K., Michelutti N., Rimet F., Smol J.P., Stevenson R.J., Winter J.G., 2004. Workshop report freshwater diatoms and their role as ecological indicators. In: Poulin M. (eds.), *Proceedings of the 17th International Diatom Symposium 2002*, Ottawa, Canada. Bristol, Biopress Limited: 469-480.
- De Waele J., 2008. Interaction between a dam site and karst springs: The case of Supramonte (Central-East Sardinia, Italy). *Engineering Geology* **99**: 128-137.
- De Waele J., 2009. Evaluating disturbance on mediterranean karst areas: the example of Sardinia (Italy). *Environmental Geology*, **58**: 239-255.
- Di Sabatino A., Bruni P., Miccoli F.P., Giustini M., Vignini P., Timperi G., Cicolani B., 2009. Diversità delle comunità macrobentoniche e qualità ambientale delle sorgenti dei Monti della Laga (Parco Nazionale Gran Sasso – Laga, Appennino centrale). *Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Biologica*, **84**: 43-51.
- European Union, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of

- water policy. *Official Journal of the European Communities, Series L*, **327**: 1-72.
- Falasco E., Bona F., 2011. Diatom community biodiversity in an Alpine protected area: a study in the Maritime Alps Natural Park. *Journal of Limnology*, **70**: 157-167.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), 2007. Protocollo di campionamento e analisi delle diatomee bentoniche dei corsi d'acqua. In: *Metodi biologici per le acque. Parte I*. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Roma, 29 pp.
- Kelly M.G., Cazaubon A., Coring E., Dell'Uomo A., Ector L., Goldsmith B., Guasch H., Hürlimann J., Jarlman A., Kawecka B., Kwandrans J., Laugaste R., Lindstrøm E.-A., Leitao M., Marvan P., Padišák J., Pipp E., Prygiel J., Rott E., Sabater S., van Dam H., Vizinet J., 1998. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe. *Journal of Applied Phycology*, **10**: 215-224.
- Krammer K., Lange-Bertalot H., 1986, 1988, 1991a, b. Bacillariophyceae-Süßwasserflora von Mitteleuropa. G. Fischer, Stuttgart, **2** (1-4): 876+596+576+437 pp.
- Krammer K., Lange-Bertalot H., 2000. Bacillariophyceae 5. English and French translation of the keys. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg and Berlin, **2** (5): 311 pp.
- Kutka F.J., Richards C., 1996. Relating diatom assemblage structure to stream habitat quality. *Journal of the North American Benthological Society*, **15**: 469-480.
- Lange-Bertalot H., Steindorf A., 1996. Rote Liste der limnischen Kieselalgen (Bacillariophyceae) Deutschlands. *Schriftenreihe für Vegetationskunde*, **28**: 633-677.
- Lange-Bertalot H., Cavacini P., Tagliaventi N., Alfinito S., 2003. *Diatoms of Sardinia. Rare and 76 new species in rock pools and other ephemeral waters. Iconographia Diatomologica*. A.R.G. Gantner Verlag Kommanditgesellschaft, Ruggell, **12**: 438 pp.
- Lecointe C., Coste M., Prygiel J., 1993. "Omnidia": software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia*, **269/270**: 509-513.
- Lecointe C., Coste M., Prygiel J., Ector L., 1999. Le logiciel Omnidia version 2, une puissante base de données pour les inventaires de diatomées et pour le calcul des indices diatomiques européens. *Cryptogamie Algologie*, **20**: 132-134.
- Mancini L., Sollazzo C., 2009. Metodo per la valutazione dello stato ecologico delle acque correnti: comunità diatomiche. Istituto Superiore di Sanità, Roma (Rapporti ISTISAN 09/19). Available on line (<http://www.iss.it/binary/publ/cont/0919web.pdf>). Last access date: 31/01/2015.
- Odum E.P., 1971. *Fundamentals of ecology*. W.B. Saunders co., Philadelphia, 574 pp.
- Rimet F., Ciutti F., Cappelletti C., Ector L., 2005. Ruolo delle Diatomee nell'applicazione della Direttiva Europea Quadro sulle Acque. *Biologia Ambientale*, **19**: 87-93.
- Rott E., Pfister P., Van Dam H., Pipp E., Pall K., Binder N. & Ortler K., 1999. *Indikationslisten für Aufwuchsalgen Teil 2: Trophieindikation sowie geochemische Präferenz, taxonomische und toxikologische Anmerkungen*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 248 pp.
- Stevens L.E., Meretsky V.J., 2008. *Aridland springs in North America: ecology and conservation*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, 432 pp.
- Stevenson R.J., Pan Y., Van Dam H., 2010. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. In: Smol J.P., Stoermer E.F. (eds.), *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*, 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge: 57-85.
- Torrise M., Dell'Uomo A., 2001. Alcune diatomee (Bacillariophyta) rare o notevoli rinvenute nelle Fonti del Clitunno (Umbria, Italia). *Archivio Geobotanico*, **7**: 11-15.
- Torrise M., Dell'Uomo A., 2009. Diatomee bentoniche del corso superiore di alcuni fiumi centro-appenninici. *Studi Trentini di Scienze Naturali*, **84**: 139-151.
- Torrise M., Monauni C., Zorza R., Della Bella V., Siligardi M., Wetzel C.E., Ector L., 2014. Ring-test su identificazione e protocollo di conteggio di diatomee bentoniche svolto all'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente di Trento (APPA). *Biologia Ambientale*, **28**: 113-127.
- Van Beynen P., Townsend K., 2005. A disturbance index for karst environments. *Environmental Management* **36**: 101-116.
- Venkatachalapathy, R., Karthikeyan P., 2015. Application of Diatom-based indices for monitoring environmental quality of riverine ecosystems: A review. In: Ramkumar Mu., Kumaraswamy K., Mohanraj R. (eds.), *Environmental Management of River Basin Ecosystems*. Springer International Publishing, Switzerland: 593-619.
- Whitton B.A., 2012. Changing approaches to monitoring during the period of the "Use of Algae for Monitoring Rivers" symposia. *Hydrobiologia*, **695**: 7-16.