

# Variazioni delle caratteristiche di acque e sedimenti in un canale di bonifica colonizzato da *Nuphar lutea*: implicazioni per la gestione della vegetazione

Daniele Longhi\*, Elisa Soana, Luca Lorenzoni, Marco Bartoli

Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma, Parco Area delle Scienze 33/A – 43124 Parma

\* Autore referente per la corrispondenza: daniele.longhi@nemo.unipr.it

Pervenuto il 20.12.2011; accettato il 30.12.2011

## Riassunto

La gestione della vegetazione acquatica nei canali di bonifica è solitamente indirizzata alla rimozione o al contenimento delle specie con maggiore produttività al fine di garantire la funzionalità idraulica. Viene invece trascurata la possibilità di gestire la vegetazione acquatica per controllare e rimuovere nutrienti, materiale particolato ed eventualmente microinquinanti. In questo studio sono analizzate le caratteristiche di acque e sedimenti di un canale di bonifica in cui sono presenti ampie formazioni a *Nuphar lutea*. Le interazioni tra macrofite, acqua e sedimenti sono quindi valutate al fine di individuare criteri per il raggiungimento degli obiettivi di qualità delle acque e dell'ecosistema acquatico previsti dalla normativa vigente.

PAROLE CHIAVE: *Nuphar lutea* / canali di bonifica / qualità dell'acqua / sedimenti / gestione

## Water and sediment characteristics in a lowland channel colonized by *Nuphar lutea* as a tool for identifying management criteria

Lowland channels in the Po river watershed are mainly used for irrigation and flood control. For these reasons, they are managed in order to remove the aquatic vegetation and maintain an optimal hydraulic performance. Other option, i.e. the vegetation management for controlling nutrient and contaminants loadings are not pursued, although this kind of channel are the interface between the main aquatic systems and the farmland, which is the main source of diffuse pollution.

This study aims at analyzing the relationships between *Nuphar lutea*, which is a common macrophyte, and water and sediment characteristics in a typical lowland channel in the Po river watershed (Navarolo channel). Here, seasonal samplings of water were performed in 9 station over the 20 km length of the channel. Temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, dissolved inorganic carbon, nitrogen, phosphorus and silica, and phytoplankton chlorophyll-*a* were determined. Sediment with and without *N. lutea* vegetation were analysed for bulk density, porosity, organic matter, and porewater characteristics. Potential nitrification was also assessed.

Finally, potential nitrification was also determined on roots and rhizome tissues from *N. lutea* specimen, in order to assess their capacity to release oxygen. Overall, hydromorphology and vegetation meadows seems to have slight effects on nutrient transport and transformations along the channel. Whilst *N. lutea* has a low capacity to release oxygen from roots and to influence the sedimentary redox status.

KEY WORDS: *Nuphar lutea* / drainage channels / water quality / sediments / management

## INTRODUZIONE

Nelle aree agricole della Pianura Padana la rete dei canali di bonifica viene gestita prevalentemente a fini irrigui e per la difesa idraulica del territorio. Non sono invece considerate pratiche di gestione indirizzate a sfruttare i servizi ecosistemici che questi ambienti possono fornire. Tra questi vi sono la capacità di trasformazione e rimozione dei nutrienti, dei microin-

quinanti e del materiale particolato che possono favorire il miglioramento della qualità delle acque (BUKAVECKAS, 2007).

I canali di bonifica sono distribuiti in modo capillare sul territorio, per cui costituiscono i primi ricettori dei carichi inquinanti di origine agricola diffusa. Per questo motivo possono essere utilizzati per la riquali-

ficazione ambientale e il miglioramento della qualità delle acque. In particolare durante la stagione estiva, quando grandi volumi di acqua vengono derivati dai corsi principali e distribuiti nel reticolo idrografico secondario, la vegetazione acquatica e le comunità batteriche presenti all'interno dei canali possono favorire processi di trasformazione e rimozione degli inquinanti.

Le macrofite radicate nel sedimento controllano il trasporto dei gas e la disponibilità dei nutrienti nell'acqua sia libera che interstiziale: favoriscono l'ossigenazione della colonna d'acqua, promuovono la rimozione dei nutrienti tramite assimilazione e accumulo nelle biomasse e forniscono ossigeno al sedimento dove avvengono processi ossidativi (CARACO *et al.*, 2006). Entro certi limiti del carico dei nutrienti, le comunità a fanerogame bentoniche sono sostenute da feedback positivi, ad esempio dal mantenimento della trasparenza delle acque e dall'esclusione competitiva di altri produttori primari (VIAROLI *et al.*, 2008). Parte dell'ossigeno prodotto dalla fotosintesi può essere rilasciata nelle acque interstiziali attraverso i peli radicali (ROL, Radial Oxygen Loss) creando micronicchie ossiche in sedimenti completamente anossici e riducenti, così stimolando l'accoppiamento di processi batterici ossidativi e riducenti che favoriscono la decomposizione della sostanza organica, le perdite di azoto e la segregazione del fosforo (VARTAPETIAN e JACKSON, 1997; COLMER, 2003; BARTOLI e VIAROLI, 2006). La vegetazione acquatica dei canali è quindi potenzialmente in grado di trasformare ed eliminare, almeno in parte, i carichi della materia organica e dei nutrienti, tramite processi diretti di assimilazione e, indirettamente, attraverso il sostegno alle comunità microbiche.

*Nuphar lutea* è una fanerogama radicata a foglie flottanti, ampiamente diffusa nei corsi d'acqua del reticolo minore della Pianura Padana; colonizza ambienti d'acqua stagnante o a lento deflusso e, data la sua morfologia, è in grado di interagire sia con il sedimento che con la colonna d'acqua, modulandone il chimismo. In particolare, essa è nota per la grande capacità di assimilare nutrienti dal comparto acquatico (TOMASZEWICZ, 2009); mentre meno conosciuti sono gli effetti che esercita sulle caratteristiche dei sedimenti dei siti che colonizza, in particolare quelli legati al ROL (DACEY, 1980; PADGETT, 2007).

Data la grande produttività, la gestione di *N. lutea* da parte dei consorzi di bonifica prevede solitamente il taglio raso della vegetazione, nell'ottica del mantenimento della piena funzionalità idraulica dei canali. Non viene invece considerata, se non a livello sperimentale, la possibilità di una gestione conservativa di questa specie, basata sul controllo delle aree occupate dalle

praterie con l'obiettivo di migliorare la qualità chimica delle acque, creare diversità di habitat in alveo e una migliore connettività con la fascia riparia, in modo da incrementare la naturalità diffusa e la biodiversità locale.

In questo lavoro, sono presentati i risultati di una ricerca sulle relazioni tra le praterie di *N. lutea*, la qualità chimica delle acque e alcuni processi sedimentari nel canale Navarolo, un tipico canale di bonifica situato nella bassa pianura tra Cremona e Mantova. Lo studio ha come obiettivi:

- la valutazione delle variazioni delle concentrazioni della clorofilla-*a* fitoplanctonica e delle principali forme inorganiche disciolte di azoto, fosforo e silicio lungo il corso del canale e in relazione alla presenza dei banchi di *N. lutea*;
- l'analisi delle caratteristiche dei sedimenti e di alcuni processi microbici sedimentari in aree con e senza vegetazione a *N. lutea*.

Le informazioni così acquisite servono per individuare criteri per la gestione della vegetazione acquatica che siano in grado di conciliare l'esigenza del mantenimento della capacità di trasporto delle acque con la possibilità di raggiungere un migliore livello di qualità ecologica dell'ecosistema acquatico.

## AREA DI STUDIO

Lo studio è stato condotto sul canale Navarolo, un corso d'acqua che ha origine nella provincia di Cremona e si sviluppa nella porzione sud occidentale della provincia di Mantova, dove attraversa i territori comunali di Sabbioneta, Commessaggio e Viadana. Il canale è lungo circa 20 km e presenta una larghezza variabile tra i 10 e i 40 m, con i tratti più ampi e profondi concentrati nella porzione terminale, tra gli abitati di Squarzanella e San Matteo delle Chiaviche (Fig. 1). Contrariamente alla maggior parte dei canali di bonifica di questo territorio, il canale Navarolo presenta ancora diversi elementi di naturalità, tra cui emergono principalmente formazioni a canneto, concentrate prevalentemente nella porzione centrale del corso, e letti di *N. lutea* che sono presenti lungo tutto il corso del canale, in particolare nelle aree a minore profondità e a ridosso degli argini (Fig. 1).

## MATERIALI E METODI

### Monitoraggio della qualità del canale Navarolo

Sono state effettuate quattro campagne di campionamento il 23 gennaio, 15 giugno, 7 settembre e 4 novembre 2011, durante le quali sono stati prelevati campioni di acqua da nove stazioni poste tra l'origine del Navarolo e la sua confluenza nel fiume Oglio (Fig. 1).

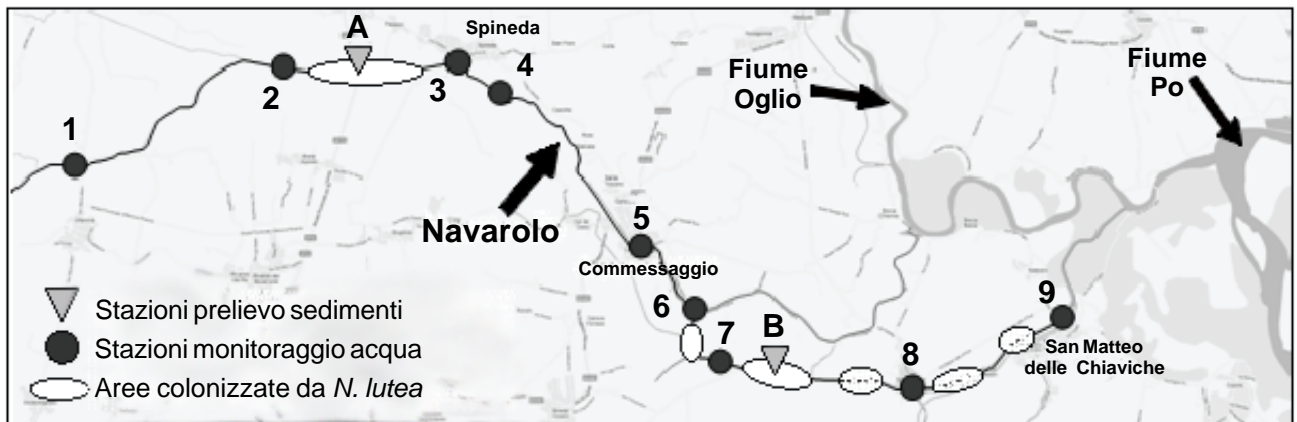


Fig. 1. Localizzazione delle stazioni di campionamento di acqua e sedimenti e delle formazioni a *Nuphar lutea* nel canale Navarolo.

Nel corso di ogni campionamento sono stati misurati *in situ*, mediante sonda multiparametrica (YSI Instruments, modello 556 MPS), i valori di temperatura, conducibilità, pH e concentrazione dell'ossigeno disciolto. Dal centro del canale, alla profondità di circa 20-30 cm, sono stati prelevati campioni d'acqua tramite una bottiglia in PE fissata all'estremità di un'asta di lunghezza regolabile. Aliquote filtrate su filtri GF/F (Whatman) sono state poste in provette di vetro per la determinazione del fosforo reattivo solubile (SRP) e in provette di PE per l'analisi dell'azoto inorganico disciolto ( $\text{DIN} = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ) e della silice reattiva (Si). Sui filtri è stata determinata la concentrazione di clorofilla-*a* fitoplanctonica (Chl-*a*) e di solidi sospesi totali (SS). Le analisi sono state effettuate secondo le metodiche standard descritte in VALDERRAMA (1977) e A.P.H.A. (1981).

#### Analisi degli effetti della presenza di *N. lutea* sul chimismo del comparto sedimentario

Al fine di valutare gli effetti della presenza dei letti di *N. lutea* sul chimismo dei sedimenti sono stati effettuati due esperimenti: il primo ha avuto l'obiettivo di analizzare le caratteristiche delle acque interstiziali in sedimenti nudi e in sedimenti colonizzati dalla macrofita; il secondo ha avuto l'obiettivo di identificare le porzioni dell'apparato radicale di *N. lutea* che sono maggiormente coinvolte nel rilascio radiale di ossigeno.

ESPERIMENTO 1. Lungo il canale Navarolo sono stati individuati due siti caratterizzati dalla presenza di estesi letti di *N. lutea* (A e B in fig. 1) da ciascuno dei quali sono state prelevate manualmente 30 carote intatte di sedimento (diametro interno 4 cm; altezza del sedimento 20): 20 carote sono state prelevate dentro ai banchi di *N. lutea*, in prossimità dei rizomi, e 10 da aree limitrofe prive di vegetazione acquatica

(aree di controllo). I campionamenti sono stati effettuati il 26 aprile nel sito A e il 15 giugno nel sito B (Fig. 1). Le carote sono state sommerse in acqua del sito e trasportate in laboratorio all'interno di celle refrigerate. Entro due-tre ore dalla raccolta, i primi 10 cm di sedimento di ogni carota sono stati estrusi e omogeneizzati. Aliquote di sedimento fresco sono state incubate per circa 20 ore in soluzioni arricchite di ammonio per misurarne l'attività nitrificante potenziale (HANSEN *et al.*, 1981; HENRIKSEN e KEMP, 1988). Una seconda porzione del sedimento di ogni carota è stata invece utilizzata per la determinazione di densità, porosità e contenuto di sostanza organica. La parte restante è stata centrifugata (10 minuti a 3500 giri) per l'estrazione dell'acqua interstiziale, sulla quale sono stati successivamente analizzati pH, Eh, carbonio inorganico disciolto (DIC), SRP, DIN, Si,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ . Le analisi sono state effettuate secondo le metodiche standard descritte in VALDERRAMA (1977) e A.P.H.A. (1981).

ESPERIMENTO 2. Le porzioni dell'apparato radicale di *N. lutea* maggiormente coinvolte nel rilascio di ossigeno nel sedimento sono state individuate mediante il test di nitrificazione potenziale (HANSEN *et al.*, 1981; HENRIKSEN e KEMP, 1988). A tal fine, il 24 agosto sono state campionate dal sito A tre porzioni di rizomi e radici intatti di *N. lutea*. In laboratorio, i campioni della macrofita sono stati accuratamente lavati con acqua distillata al fine di rimuovere il sedimento e da ciascuna porzione di rizoma sono stati sottocampionati 11 frammenti (peli radicali, frammenti di rizoma, frammenti di radici nuove e vecchie, sia nella parte basale che apicale) secondo lo schema riportato in figura 2. Ciascun frammento è stato quindi incubato per la determinazione del tasso potenziale di nitrificazione. Il processo di nitrificazione è strettamente aerobico e di conseguenza può aver luogo nel sedimento all'interfaccia

con la colonna d'acqua, dove l'ossigeno giunge da essa per diffusione, o in prossimità di apparati radicali di macrofite che presentano ROL. La quantità di ione nitrato prodotto dipende dall'abbondanza dei popolamenti di batteri nitrificanti associati al substrato, a sua volta legata alla disponibilità di ossigeno presente *in*

*situ*. In questo senso il tasso di nitrificazione potenziale può essere considerato come *proxy* per il rilascio radicale di ossigeno.

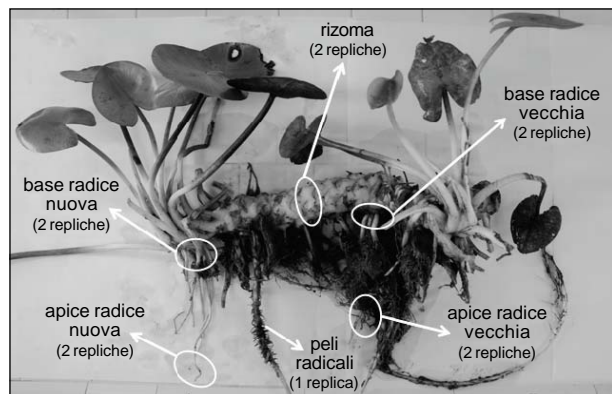
**Analisi statistica**

L'analisi statistica è stata condotta utilizzando R 2.10.0. In particolare, è stato impiegato il test di analisi della varianza a una via sia per valutare eventuali differenze tra i parametri delle acque interstiziali misurati nelle aree colonizzate da *N. lutea* rispetto a quelle di controllo, sia per evidenziare eventuali differenze tra i tassi di nitrificazione potenziale associati alle diverse porzioni dell'apparato radicale di *N. lutea*. Le differenze sono state assunte significative per valori di  $p < 0,05$ .

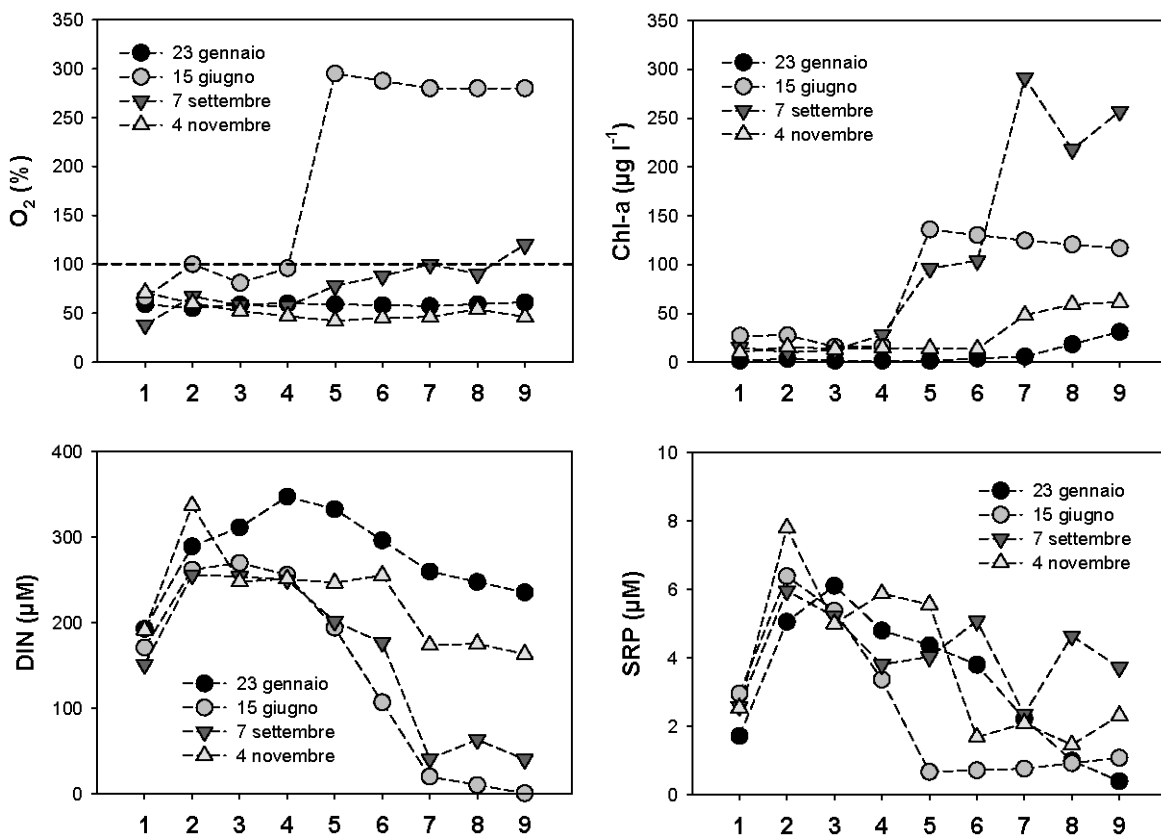
**RISULTATI**

**Caratteristiche delle acque del canale Navarolo**

La temperatura della colonna d'acqua del canale Navarolo è risultata caratterizzata da un tipico andamento stagionale con valori compresi tra 4 e 29 °C. Durante i campionamenti di gennaio e novembre la



**Fig. 2.** Porzione di rizoma di *Nuphar lutea* con indicazione delle tipologie di frammenti sottocampionati per la stima dei tassi di nitrificazione potenziale.



**Fig. 3.** Andamento della concentrazione dell'ossigeno disciolto (O<sub>2</sub>), della clorofilla-*a* fitoplanctonica (Chl-*a*), dell'azoto inorganico disciolto (DIN) e del fosforo reattivo solubile (SRP) nelle nove stazioni di monitoraggio della qualità delle acque del canale Navarolo.

temperatura delle acque lungo il corso del canale è costante, mentre in giugno e settembre si osserva un incremento monte-valle, probabilmente determinato dal ristagno delle acque.

La conducibilità elettrica specifica è mediamente alta ( $669 \pm 150 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) e denota una leggera diminuzione da monte a valle, soprattutto nel periodo estivo.

Il pH è mediamente alcalino ( $7,83 \pm 0,34$  unità) e d'estate risente degli effetti dei processi fotosintetici, raggiungendo picchi di oltre 8 unità.

In tutte le stazioni si osserva un deficit pronunciato dell'ossigeno disciolto, che raggiunge valori minimi fino al 50% in novembre e gennaio (Fig. 3). In giugno e in misura minore in settembre, a valle della stazione 4 si hanno invece condizioni di sovraturazione che sono largamente sovrapponibili all'andamento delle concentrazioni della clorofilla-*a* fitoplanctonica (Fig. 3). Concentrazioni della clorofilla-*a* fino a  $300 \mu\text{g L}^{-1}$  rendono conto dell'elevata torbidità delle acque, caratterizzate da elevate concentrazioni di materiale particolato in sospensione ( $31,8 \pm 13,5 \text{ mg L}^{-1}$ ), anche se clorofilla-*a* e solidi sospesi totali non risultano correlati.

La concentrazione del DIN è mediamente alta ( $202 \pm 95 \mu\text{M}$ ) e decresce da monte a valle in tutte le date di campionamento, soprattutto in giugno e settembre (Fig. 3). Il DIN è costituito prevalentemente da azoto nitrico ( $54 \pm 20 \%$ ), soprattutto in giugno e settembre, mentre il contributo dell'ammonio è più importante a novembre e gennaio.

Le concentrazioni di SRP ( $3,4 \pm 2,0 \mu\text{M}$ ) e silice reattiva ( $3,7 \pm 1,6 \text{ mg L}^{-1}$ ) non presentano andamento stagionale, ma decrescono in modo significativo da monte verso valle.

### Caratteristiche fisico-chimiche dei sedimenti colonizzati da *N. lutea* e dei sedimenti di controllo

I sedimenti dei siti A e B (Fig. 1) sono risultati inconsistenti, caratterizzati da un contenuto di acqua relativamente alto, da un pH debolmente alcalino e da concentrazioni di sostanza organica comprese tra 6 e 11% e potenziale redox mediamente negativo (Tab. 1).

La concentrazione del DIC nelle acque interstiziali è compresa tra 7 e 25 mM, con un valor medio complessivo pari a  $13 \pm 4 \text{ mM}$ . La concentrazione di DIN è risultata generalmente alta ( $714 \pm 318 \mu\text{M}$ ) e dipende per oltre il  $97 \pm 1\%$  dal contributo dello ione ammonio.

Dal confronto tra le caratteristiche delle acque interstiziali delle aree colonizzate con quelle di controllo sono emerse differenze significative per tutti i parametri monitorati ad eccezione di Eh, SRP e Si (Tab. 1; ANOVA  $p < 0,05$ ); tali differenze non sono risultate tuttavia sistematiche in quanto, per la maggior parte dei parametri, sono state determinate per un sito, ma non per l'altro; oppure, come nel caso degli ioni  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Fe}^{2+}$ , i valori dei parametri analizzati sono risultati significativamente più elevati nelle aree colonizzate per il sito B e nelle aree di controllo per il sito A (Tab. 1).

Complessivamente i sedimenti del sito A presentano tassi di nitrificazione potenziale significativamente più alti ( $231 \pm 67 \text{ nmol N-NO}_x \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ DW}$ ) rispetto a quelli del sito B ( $56 \pm 51 \text{ nmol N-NO}_x \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ DW}$ ), mentre non si rilevano differenze significative tra sedimento nudo e sedimento vegetato in entrambi i siti (Fig. 4).

### Rilascio di ossigeno dall'apparato radicale di *N. lutea*

Le parti della rizosfera di *N. lutea* coinvolte nel rilascio radiale di ossigeno sono state individuate utiliz-

**Tab. 1.** Risultati della caratterizzazione delle acque interstiziali di aree colonizzate da *Nuphar lutea* e di aree di controllo per i due siti di indagine (Fig. 1). Eh: potenziale redox; SO: sostanza organica; DIC: carbonio inorganico disciolto; SRP: fosforo reattivo solubile; Si: silice reattiva. Con i simboli maggiore (>) e minore (<) vengono indicate differenze significative ( $P < 0,05$ ) tra aree (in grigio) e tra siti (senza riempimento).

	Stazione A			Stazione B		
	Controllo		<i>N. lutea</i>	Controllo		<i>N. lutea</i>
Densità ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$1,17 \pm 0,05$	<	$1,39 \pm 0,18$	$1,20 \pm 0,01$		$1,17 \pm 0,05$
Porosità	$0,84 \pm 0,03$	>	$0,65 \pm 0,09$	$0,75 \pm 0,03$		$0,73 \pm 0,02$
pH	$7,21 \pm 0,06$		$7,27 \pm 0,12$	$7,36 \pm 0,02$	>	$7,24 \pm 0,06$
Eh (mV)	$-70 \pm 13$		$-43 \pm 51$	$-1 \pm 43$	<	$-36 \pm 46$
SO (%)	$10,5 \pm 0,4$		$8,4 \pm 2,0$	$6,6 \pm 0,4$	<	$7,3 \pm 0,2$
DIC (mM)	$16 \pm 4$	>	$10 \pm 2$	$13 \pm 1$		$14 \pm 4$
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{M}$ )	$795 \pm 138$	>	$495 \pm 152$	$540 \pm 69$	<	$881 \pm 417$
$\text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ )	$1 \pm 1$		$1 \pm 1$	$4 \pm 1$	<	$11 \pm 3$
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{M}$ )	$18 \pm 6$	>	$11 \pm 6$	$15 \pm 3$		$17 \pm 4$
SRP ( $\mu\text{M}$ )	$5 \pm 6$		$2 \pm 2$	$11 \pm 1$	<	$11 \pm 3$
Si ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$10 \pm 2$		$9 \pm 2$	$6 \pm 1$	>	$6 \pm 1$
$\text{Fe}^{2+}$ ( $\mu\text{M}$ )	$104 \pm 36$	>	$48 \pm 44$	n.d.	<	$5 \pm 4$
$\text{Mn}^{2+}$ ( $\mu\text{M}$ )	$71 \pm 9$	>	$42 \pm 16$	$35 \pm 3$	>	$32 \pm 7$

zando come indicatore il valore dei tassi di nitrificazione potenziale ad esse associati (Fig. 5). Le radici avventizie presentano attività nitrificante significativamente maggiore di quella associata ai peli radicali (ANOVA,  $p < 0,05$ ) e ai rizomi, ai quali è associata un'attività nitrificante quasi nulla. Nelle radici avventizie i tassi di nitrificazione potenziale associati alle porzioni apicali sono risultati due volte maggiori di quelli associati alle porzioni basali (ANOVA,  $p < 0,05$ ). Inoltre, le radici poste vicino alla porzione meristemica del rizoma (radici nuove) presentano tassi di nitrificazione potenziale significativamente più elevati rispetto a quelli delle radici vecchie (ANOVA,  $p < 0,05$ ).

**DISCUSSIONE**

Da monte a valle, il canale Navarolo presenta un progressivo aumento di larghezza e profondità e una corrispondente diminuzione della velocità della corren-

te. Parallelamente si evidenziano variazioni significative delle caratteristiche fisiche e chimiche delle acque. La ridotta velocità della corrente e le maggiori temperature del tratto di valle, accoppiate alla grande disponibilità di nutrienti, favoriscono importanti fioriture fitoplanctoniche, particolarmente evidenti durante il periodo primaverile ed estivo. Concentrazioni elevate di clorofilla-*a* fitoplanctonica sono associate ad alte percentuali di saturazione dell'ossigeno disciolto e ad alti valori di pH, come conseguenza dei processi fotosintetici; d'altro lato l'attività del fitoplancton determina un elevato consumo di nutrienti, evidenziato dagli andamenti decrescenti di DIN, SRP e silice reattiva lungo l'asta del canale.

Meno evidenti risultano invece gli effetti sulle caratteristiche fisico chimiche delle acque legati alla presenza delle formazioni a *N. lutea* presenti all'interno del canale. Infatti, allo stato attuale *N. lutea* è largamente

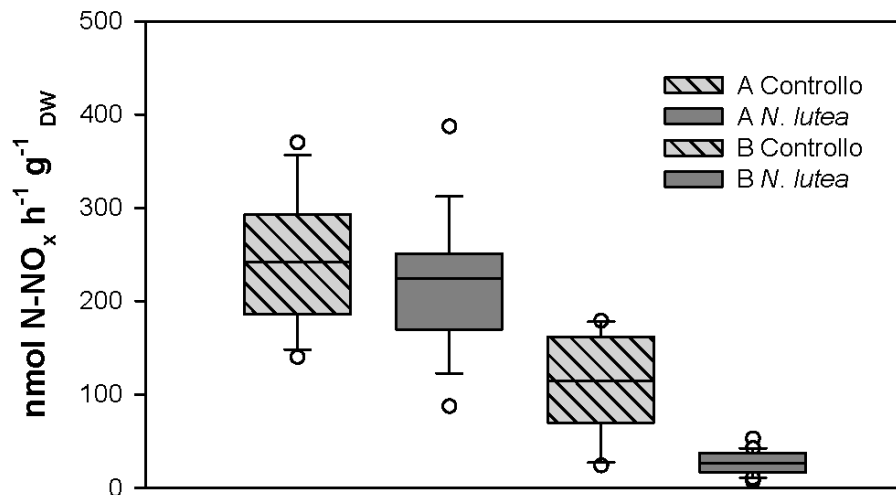


Fig. 4. Tassi di nitrificazione potenziale associati ai sedimenti delle aree colonizzate da *Nuphar lutea* e di quelle di controllo dei siti A e B (Fig. 1).

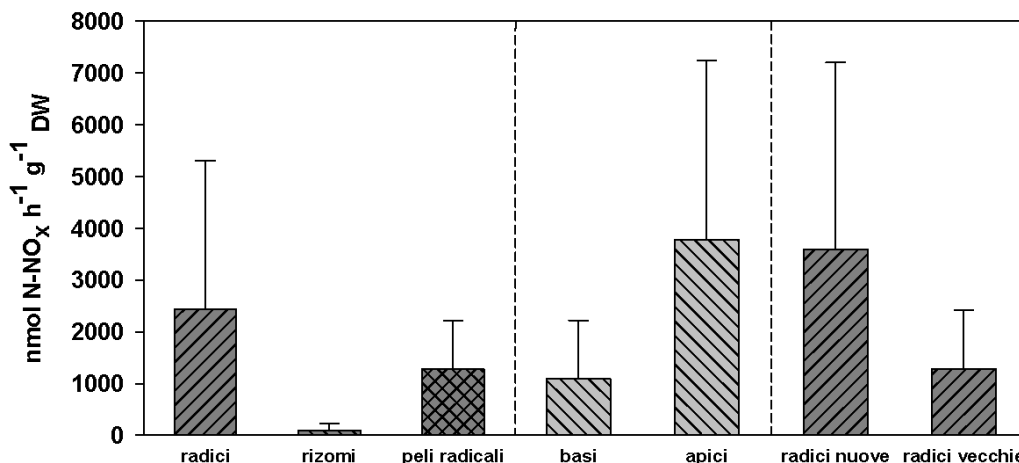


Fig. 5. Tassi di nitrificazione potenziale associati alle diverse porzione dell'apparato radicale di *Nuphar lutea* rappresentate in figura 2.

diffusa in vari tratti del canale Navarolo, dove però colonizza solo porzioni di alveo a ridosso degli argini. In questa situazione, quindi, il deflusso delle acque avviene prevalentemente al centro del canale, riducendo notevolmente le possibilità di interazione con la pianta.

Poco evidenti risultano anche gli effetti di *N. lutea* sulle condizioni red-ox dei sedimenti delle aree colonizzate che non sono significativamente diverse da quelle senza vegetazione. Questo risultato contrasta con quelli ottenuti in studi condotti su altre specie di macrofite radicate, per le quali è stato dimostrato che il ROL è in grado di influenzare il potenziale red-ox del sedimento (ALDRIDGE e GANF, 1994; RACCHETTI *et al.*, 2010).

*Nuphar lutea* non sembra avere effetti rilevabili sulle concentrazioni dei nutrienti nelle acque interstiziali. Ad esempio, non sono state determinate differenze significative delle concentrazioni di SRP tra aree colonizzate e aree di controllo. Nel caso dell'ammonio le differenze di concentrazione tra aree sono risultate significative in entrambe le stazioni, ma contrastanti, in quanto per la stazione A le concentrazioni di ammonio interstiziale sono risultate maggiori nelle aree di controllo, mentre per la stazione B è stato verificato il contrario. Per i nutrienti, quindi, è possibile che gli effetti della presenza della pianta siano molteplici e in alcuni casi contrastanti. Per quanto riguarda l'SRP ad esempio, il ROL può ridurre la concentrazione nelle acque interstiziali per effetto della formazione di ossidi di ferro e ortofosfato. Allo stesso tempo ioni SRP possono venire rimossi direttamente tramite assimilazione da parte delle radici della pianta. D'altro lato è possibile che nelle aree colonizzate l'intensità dei processi di decomposizione e quindi la rigenerazione dei nutrienti siano maggiori in seguito alla maggiore disponibilità di materiale vegetale morto che si deposita sui sedimenti al termine del ciclo vegetativo della pianta. Le foglie e i piccioli di questa specie risultano infatti facilmente decomponibili (BROCK *et al.*, 1985; LONGHI *et al.*, 2008). Per quanto riguarda l' $\text{NH}_4^+$  è possibile che in presenza della pianta questo ione possa essere rimosso dalle acque interstiziali per effetto dell'assimilazione radicale e venire ossidato a nitrato a livello della guaina ossica che circonda le radici; d'altro lato è possibile che il rilascio contemporaneo di ossigeno e di essudati da parte delle radici favorisca i processi di decomposizione e quindi la sua rigenerazione (KARJALAINEN *et al.*, 2001).

Aree colonizzate e aree di controllo non presentano infine differenze significative dei tassi di nitrificazione potenziale associati ai sedimenti. Il test della nitrificazione potenziale eseguito su campioni di sedimento viene utilizzato in quanto fornisce un'indicazione riguardo l'abbondanza dei popolamenti di batteri nitrifi-

canti presenti nel sito di campionamento. La presenza di batteri nitrificanti dipende dalla disponibilità di ossigeno; di conseguenza è possibile che in presenza di macrofite radicate nei sedimenti venga favorita la presenza di colonie più o meno numerose di batteri nitrificanti in base alla quantità di ossigeno rilasciato dalle radici. La mancanza di differenze significative tra aree colonizzate e aree di controllo porta ad ipotizzare che *N. lutea* non rilasci dalle radici quantità di ossigeno sufficienti per sostenere i processi microbici ossidativi. Questa ipotesi risulta supportata dai risultati dei test di nitrificazione potenziale condotti sulle diverse porzioni dell'apparato radicale di *N. lutea*, dai quali è emerso che solo una piccola frazione della biomassa totale della rizosfera è coinvolta attivamente nel rilascio radicale di ossigeno.

In conclusione quindi, i risultati ottenuti suggeriscono che *N. lutea* non sia in grado di determinare variazioni del chimismo dei sedimenti, se non all'interfaccia radice-sedimento e limitatamente alla parte apicale e più attiva dei peli radicali. Infatti, solo una piccola parte dei tessuti analizzati è in grado di rilasciare ossigeno, mentre la maggior parte di essi è protetta da una spessa cuticola che impedisce le interazioni dei tessuti con il sedimento riducente circostante.

Ciò nonostante la presenza di letti di *N. lutea* nel canale Navarolo non è di importanza trascurabile. Diversi autori concordano infatti nel ritenere che questa specie ricopra un ruolo ecologico di notevole importanza nei confronti della fauna. Ad esempio, è stato dimostrato che determinate specie di invertebrati trascorrono l'intero ciclo vitale su *N. lutea* e che la presenza di questa pianta può in alcuni casi favorire l'aumento della biodiversità e della densità zoobentonica (PADGETT, 1997; ZBIKOWSKI, 2010). Inoltre, i piccioli e le foglie di *N. lutea* costituiscono la superficie di appoggio per lo sviluppo di epifiti che possono avere un ruolo importante nella trasformazione e rimozione degli inquinanti (DONDESKI e KALWASINSKA, 2002).

Tuttavia, nel canale Navarolo, *N. lutea* colonizza attualmente le aree a minore profondità a ridosso degli argini; tale disposizione non favorisce l'interazione con la colonna d'acqua, riducendo probabilmente la capacità della pianta di rimuovere i nutrienti. Un'alternativa a questa situazione potrebbe prevedere la creazione di zone vegetate con *N. lutea* poste perpendicolarmente al flusso della corrente. In questo modo le aree colonizzate dalla pianta favorirebbero la riduzione della velocità dell'acqua, l'assimilazione e la trasformazione degli inquinanti e l'aumento della sedimentazione dei solidi sospesi (MADSEN *et al.*, 2001; COTTON *et al.*, 2006; GURNELL *et al.*, 2006; FRANKLIN *et al.*, 2008). Questo contribuirebbe a ridurre i carichi di nutrienti e materiale particolato trasportati a valle con effetti posi-

tivi sulla trasparenza delle acque e di conseguenza sulla possibilità di colonizzazione da parte di macrofite sommerse. Allo stesso tempo, la deposizione di grandi quantità di solidi sospesi in punti localizzati, favorirebbe gli interventi di sfangamento del canale, riducendo notevolmente i costi di gestione e il disturbo arrecato al sistema a causa degli interventi.

## BIBLIOGRAFIA

- A.P.H.A., A.W.W.A., W.P.C.F., 1981. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Am. Publ. Health Ass., Washington, 440 pp.
- ALDRIDGE K.T., GANF G.G., 1994. Modification of sediment redox potential by three contrasting macrophytes: implications for phosphorus adsorption/desorption. *Marine and Freshwater Research*, **54**: 87-94.
- BARTOLI M., VIAROLI P., 2006. Zone umide perfluviali: processi biogeochimici, funzioni ecologiche, problemi di gestione e conservazione. *Biologia Ambientale*, **20**: 43-54.
- BROCK T.C.M., DE LYON J.H., VAN LAAR E.M.J.M., VAN LOON E.M.M., 1985. Field studies on the breakdown of *Nuphar lutea* (L.) Sm. (Nymphaeaceae), and a comparison of three mathematical models for organic weight loss. *Aquatic Botany*, **21**: 1-22.
- BUKAVECKAS P., 2007. Effects of channel restoration on water velocity, transient storage, and nutrient uptake in a channelized stream. *Environmental Science & Technology*, **41**: 1570-1576.
- CARACO N., COLE J., FINDLAY S., WIGAND C., 2006. Vascular plants as engineers of oxygen in aquatic systems. *BioScience*, **56**: 219-225.
- COLMER T.D., 2003. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell and Environment*, **26**: 17-36.
- COTTON J.A., WHARTON G., BASS J.A.B., HEPPELL C.M., WOTTON R.S., 2006. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment. *Geomorphology*, **77**: 320-334.
- DACEY J.W.H., 1980. Internal winds in water lilies: an adaptation for life in anaerobic sediments. *Science*, **210**: 1017-1019.
- DONDERSKI W., KALWASINSKA A., 2002. Epiphytic bacteria inhabiting the yellow waterlily (*Nuphar luteum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, **11**: 501-507.
- FRANKLIN P., DUNBAR M., WHITEHEAD P., 2008. Flow controls on lowland river macrophytes: A review. *Science of the total Environment*, **400**: 369-378.
- GURNELL A.M., VAN OOSTERHOUT M.P., DE VLIET B., GOODSON J.M., 2006. Reach-scale interactions between aquatic plants and physical habitat: river frome, Dorset. *River Research and Application*, **22**: 667-680.
- HANSEN J.I., HENRIKSEN K., BLACKBURN T.H., 1981. Seasonal distribution of nitrifying bacteria and rates of nitrification in coastal marine sediments. *Microbial Ecology*, **7**: 297-304.
- HENRIKSEN K., KEMP W.M., 1988. Nitrification in estuarine and coastal marine sediments. In: BLACKBURN T.H. & SORESENSEN J. (eds.), *Nitrogen cycling in coastal marine environments*. John Wiley & Sons, Chichester: 207-250.
- KARJALAINEN H., STEFANSDOTTIR G., TUOMINEN L., KAIRESALO T., 2001. Do submersed plants enhance microbial activity in sediment? *Aquatic Botany*, **69**: 1-13.
- LONGHI D., BARTOLI M., VIAROLI P., 2008. Decomposition of four macrophytes in wetland sediments: Organic matter and nutrient decay and associated benthic processes. *Aquatic Botany*, **89**: 303-310.
- MADSEN J.D., CHAMBERS P.A., JAMES W.F., KOCH E.W., WESTLAKE D.F., 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, **444**: 71-84.
- PADGETT D.J., 1997. A biosystematics monograph of the genus *Nuphar* Sm. (Nymphaeaceae). Ph.D. dissertation, Univ. New Hampshire, Durham, NH.
- PADGETT D.J., 2007. A monograph of *Nuphar* (Nymphaeaceae). *Rhodora*, **109**: 1-95.
- RACCHETTI E., BARTOLI M., RIBAUDO C., LONGHI D., BRITO L.E.Q., NALDI M., IACUMIN P., VIAROLI P., 2010. Short term changes in pore water chemistry in river sediments during the early colonization by *Vallisneria spiralis*. *Hydrobiologia*, **652**: 127-137.
- TOMASZEWICZ H., 2009. Changes in macroelement content of rhizomes of *Nuphar lutea* (L) Sibth & Sm. during the annual cycle. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, **3**: 257-262.
- VALDERRAMA J.C., 1977. Methods used by the Hydrographic Department of National Board of Fisheries, Sweden. In: GRASSHOF K. (eds.), *Report of the Baltic Intercalibration Workshop*. Interim Commission for the Protection of the Environment of the Baltic Sea, Annex: 13-40.
- VARTAPETIAN B.B., JACKSON M.B., 1997. Plant adaptations to anaerobic stress. *Annals of Botany*, **79**: 3-20.
- VIAROLI P., BARTOLI M., GIORDANI G., NALDI M., ORFANIDIS S., ZALDIVAR J.M., 2008. Community shifts, alternative stable states, biogeochemical controls and feedbacks in eutrophic coastal lagoons: a brief overview. *Aquatic Conservation: Freshwater and Marine Ecosystems*, **18**: S105-S117.
- ZBIKOWSKI J., KOBAC J., ZBIKOWSKA E., 2010. Is *Nuphar lutea* (L.) Sm. a structuring factor for macrozoobenthos and selected abiotic parameters of water and bottom sediments throughout the year? *Aquatic Ecology*, **44** (4): 709-721.

## Ringraziamenti

La ricerca è stata effettuata nell'ambito del "Progetto di riqualificazione e valorizzazione dei canali Navarolo, Bogina e Fossola", promosso da una partnership tra il Consorzio di Bonifica Navarolo, il Parco Regionale Oglio Sud e i comuni mantovani di Comemessaggio, Viadana, e Sabbioneta (responsabile scientifico prof. Pierluigi Viaroli).