

**Un confronto  
tecnico  
ed economico  
tra impianti  
tradizionali  
e forme più  
sostenibili  
di trattamento per  
le acque reflue**

di

Ilda Mannino - Enrico Piccioni  
Daniel Franco - Laura Favero  
Erika Mattiuzzo



# Impianti di fitodepurazione seminaturali, un giudizio di convenienza

## Premessa

I sistemi naturali presentano livelli di abbattimento degli inquinanti presenti nelle acque superficiali paragonabili, a tutti gli effetti, a quelli ottenuti con impianti tradizionali (Breux *et al.*, 1995; Ko *et al.*, 2004; Tomasinsig *et al.*, 2000) e le zone umide sono particolarmente efficienti nella rimozione di nutrienti e solidi sospesi (Nichols, 1983; Ewel e Odum, 1984; Breux e Day, 1994; Kadlec e Knight, 1996; Boustany *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2000; Day *et al.*, 2003), di BOD e patogeni (Wood, 1995; Nokes *et al.*, 1999; Mitsh e Gosselink, 2000).

La fitodepurazione è una tecnologia che sfrutta processi ecologici tipici delle zone umide per depurare le acque superficiali e reflue, soprattutto nel caso di volumi elevati o molto ridotti (Hawke e Josè, 1996; Hammer e Knight, 1994), e in alcuni casi la qualità delle acque da depurare possono migliorare le condizioni ecologiche di alcune zone umide (Breux *et al.*, 1995).

A parità di efficacia depurativa, i sistemi naturali presentano un impatto ambientale minore rispetto agli impianti tradizionali, che

come tutti gli impianti industriali devono consumare energia (non rinnovabile) e produrre rifiuti (Mitsh e Gosselink, 2000; Breux *et al.*, 1995; Tchobanoglous e Burton, 1991; Viessman e Hammer, 1998), e costituiscono quindi un'alternativa di processo potenzialmente meno costosa (Breux *et al.*, 1995; Cardoch *et al.*, 2000; Ko *et al.*, 2004; Steer *et al.*, 2003).

I confronti monetari tra diversi tipi di impianti vengono condotti raramente (Tomasinsig *et al.*, 2000), malgrado la minimizzazione dei costi sia indicata come priorità. Nella legislazione italiana, l'allegato 5 del D.Lgs. n. 152 dell'11 maggio 1999, ribadisce l'esigenza, per gli agglomerati urbani con meno di 2.000 abitanti, di scegliere il trattamento appropriato per rendere semplice la manutenzione e la gestione, e consentire la minimizzazione dei costi gestionali. Inoltre, al punto 3 dell'allegato 5, si specifica che "... per gli insediamenti con popolazione equivalente compresa tra 50 e 2.000 a.e., si ritiene auspicabile il ricorso a tecnologie di depurazione naturale quali il lagunaggio o la fitodepurazione o tecnologie come i filtri percolatori o impianti a fanghi attivi...".

Il legislatore, quindi, auspica l'adozione dei sistemi di fitodepurazione con riferimento alle piccole utenze e considerata adatta per "... tutti gli insediamenti in cui la popolazione equivalente fluttuante sia superiore al 30% della popolazione residente e laddove le caratteristiche territoriali e climatiche lo consentano...".

Scopo di questo lavoro è stabilire la convenienza economica degli impianti di fitodepurazione seminaturali sulla base di dati economici e di efficienza contabilizzati durante la realizzazione ed il monitoraggio dell'impianto sperimentale del Canale Nuovissimo (Chioggia, Ve), avvenuti sulla base delle conoscenze più aggiornate e delle tecniche più innovative.

Utilizzando l'*analisi costi-efficacia* si è messo a confronto il costo complessivo, a parità di efficacia depurativa, di una serie di impianti di fitodepurazione seminaturali a flusso superficiale realizzabili sulla base delle attività realmente contabilizzate, con impianti tradizionali, per il trattamento secondario di acque reflue. L'obiettivo è individuare quali impianti risultino finanziariamente più convenienti considerando esclusivamente la funzione di depurazione delle acque superficiali.

## Materiali e metodi

La depurazione di acque reflue è un beneficio che viene generalmente formulato in termini chimici o qualitativi: per effettuare una valutazione del beneficio finanziario conseguibile si sono qui considerati i costi necessari per raggiungere un certo livello di efficacia (depurativa) confrontandoli con quelli relativi ad un impianto tradizionale, mediante l'*analisi costi-efficacia* (Bazzani *et al.*, 1993; Hanley e Spash, 1993; Nuti, 1987).

Per effettuare il confronto tra sistemi tecnologici diversi possono essere individuate tre categorie metodologiche:

- metodologie monetarie;
- metodologie non monetarie;
- metodologie descrittive.

Le prime si avvalgono della moneta come parametro fondamentale di confronto, mentre le seconde stabiliscono delle graduatorie sulla base di parametri qualitativi e del "peso" che la collettività attribuisce ad ogni criterio di giudizio. Le metodologie descrittive sono basate per lo più sulla definizione e sulla successiva sovrapposizione di carte tematiche (Bazzani *et al.*, 1993) ed hanno una funzione di discriminazione spaziale delle scelte progettuali.

Le metodologie monetarie sono riconducibili all'*analisi costi-benefici*, dove per benefici di un progetto si intendono rispettivamente i beni e/o servizi prodotti o risparmiati come effetto della realizzazione del progetto stesso, e come costi i beni e/o servizi consumati. Nel caso dei progetti privati, i costi sono tutti i pagamenti che riducono il ricavo di cassa, derivanti dal progetto (materie prime, manodopera, affitti, energia, tasse, brevetti, ecc.).

Quando risulta difficile attribuire un valore monetario ai benefici di un progetto, si tende ad utilizzare l'*analisi costi-efficacia* (Nuti, 1987), che fissa un livello di efficacia, utilizzato come soglia di riferimento, e valuta i co-

sti delle diverse alternative che consentono di raggiungerlo. Il beneficio è massimo quando l'obiettivo fissato viene raggiunto al minor costo.

Nel caso in esame è, quindi, indispensabile definire un livello di efficacia depurativa (che i sistemi a confronto devono raggiungere per poter essere paragonati), e quindi stimare i costi relativi per raggiungerla definiti come "Costo del servizio", ovvero il costo che grava nel tempo sull'impianto (Tomasinsig *et al.*, 2000) che permette di confrontare la convenienza economica di un impianto rispetto ad un altro, in termini di costo complessivo.

Una volta stabilito il livello di efficacia ed identificati i costi, è necessario elaborare un modello che permetta di prevedere e confrontare i costi di ogni alternativa sulla base di una valutazione esclusivamente economica.

La minimizzazione del costo di servizio di un impianto rispetto alla soglia di efficacia stabilita si può così riportare (Bazzani *et al.*, 1993):

$$\min C(r) = \sum C \times t \times (Wnt) \times (1 + r) - t$$

dove: C = costo del progetto; r = tasso di sconto; t = tempo (in annualità); Wnt = variabili di decisione, rappresentate dai diversi decisori per settori diversi ed in tempi diversi.

## Descrizione dell'impianto

Il sistema sperimentale di fitodepurazione del canale Novissimo ramo abbandonato è una zona umida semi-naturale per il controllo dell'inquinamento diffuso di acque agricole e urbane rappresentative del bacino scolante della laguna di Venezia. L'impianto è stato realizzato per conto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Magistrato alle Acque di Venezia tramite il Consorzio Venezia Nuova nell'ambito degli interventi di salvaguardia di Venezia e della sua Laguna.

Le acque provengono da un canale di bonifica che raccoglie le acque di un sub-bacino per l'80% agricolo e per il 20% civile-industriale. Il sistema viene alimentato con un impianto di adduzione mentre in uscita un impianto di sollevamento recapita l'acqua in laguna. L'impianto è a flusso superficiale ed è stato realizzato rimodellando, sulla base di tre diversi schemi morfologici, un invaso demaniale in disuso interno alla conterminazione lagunare (canale Novissimo, Chioggia), della superficie totale di circa 21

ha, per la creazione di tre sistemi di transizione (i) a dominanza arboreo-arbustiva, (ii) intermedio, (iii) a dominanza erbacea.

## Definizione della soglia di efficacia depurativa

Per definire la soglia di efficacia depurativa per il confronto nell'*analisi costi-efficacia* si è proceduto per fasi.

### Tassi di abbattimento dell'impianto sperimentale

La realizzazione dell'impianto si è conclusa nel settembre 2002; il periodo considerato per definire il tasso di abbattimento annuale va dal 14 aprile 2004 al 15 aprile 2005 (tabella 1), quando il sistema si può considera-

**Con l'analisi costi-efficacia si confronta il costo complessivo, a parità di risultato depurativo, di impianti di fitodepurazione seminaturali con impianti tradizionali per il trattamento di acque reflue**

**TABELLA 1 - ABBATTIMENTO PERCENTUALE DI INQUINANTI NELL'IMPIANTO DI FITODEPURAZIONE (KG RIMOSI SU KG IN INGRESSO)**

NOTA	PERIODO	SOLIDI SOSPESO (%)	FOSFORO TOTALE (%)	AZOTO AMMONIACALE (%)	NITRATI (%)	AZOTO TOTALE (%)	BOD (%)	COD (%)
Periodo a regime	14/04/2004 - 15/04/2005	57,09	43,82	71,70	86,28	59,35	12,04	39,53

**TABELLA 2 - CARICHI DI INQUINANTI IN INGRESSO ED IN USCITA DALL'IMPIANTO E PORTATE DEL REFLUO NEI DIVERSI PERIODI.**

Periodo	Periodo a regime	
	14/04/2004 - 15/04/2005	
Portate (l/giorno)	2.678.400	
Solidi sospesi (Kg)	entrata	177
	uscita	100
Fosforo totale (Kg)	entrata	18
	uscita	9
Azoto ammoniacale (Kg)	entrata	1.525
	uscita	209
Azoto nitrico (Kg)	entrata	44
	uscita	9
Azoto totale (Kg)	entrata	3.149
	uscita	1.280
BOD (Kg)	entrata	2.770
	uscita	2.437
COD (Kg)	entrata	11.487
	uscita	6.946

re a regime dopo l'iniziale periodo di stabilizzazione (Franco *et al.*, 2006a; Franco *et al.*, 2006b; Favero *et al.*, 2006). I carichi in ingresso subiscono una significativa riduzione che risulta comparabile con quella riportata in letteratura per analisi paragonabili e per effluenti in uscita da una zona umida adibita a sistema di trattamento secondario (Breux *et al.*, 1995). L'ulteriore periodo di funzionamento dell'impianto non è stato considerato perché inferiore all'anno durante l'elaborazione della ricerca. A titolo conoscitivo i risultati in termini di abbattimento sono risultati più efficaci, e pertanto i risultati di abbattimento utilizzati nella presente analisi sono stimati per difetto, e l'analisi stessa risulta quindi basata sul principio di precauzione (tabella 2).

#### **Parametri di riferimento per il confronto**

Il dimensionamento degli impianti di depurazione tradizionali viene stabilito a partire dal-

le condizioni del refluo in entrata, in termini quantitativi come dotazione idrica pro-capite e numero di abitanti equivalenti<sup>1</sup> (tabella 3) e qualitativi come apporto giornaliero dei principali inquinanti (tabella 4). In questo caso, poste per approssimazione le portate di ingresso pari a quelle in uscita, il numero di abitanti equivalenti è stato ricavato considerando la dotazione idrica.

Un ipotetico impianto di depurazione tradizionale, alimentato pertanto da fonti puntiformi e non diffuse, per trattare un refluo con gli stessi abitanti equivalenti stimati in base alla portata effettiva del Nuovissimo, dovrebbe possedere concentrazioni in entrata decisamente superiori a quelle presenti nelle acque di bonifica per superare i limiti di legge (D.Lgs. 152/99).

#### **Definizione del refluo di confronto**

Per ovviare alla difficoltà di confronto, dovuta alla diluizione delle acque di bonifica trattate dal sistema di fitodepurazione rispetto ai sistemi a tecnologia tradizionale, si è dovuto procedere ad alcune verifiche ed assunzioni. Il refluo di confronto si è ottenuto *risolvendo i carichi in ingresso in funzione del tasso di abbattimento dell'impianto sperimentale di fitodepurazione, rispetto ai limiti di legge per lo sversamento in acque superficiali*, mediante la seguente formula:

$$C_i - (B_i \times C_i) = A_i$$

dove:  $C_i$  = concentrazione dell'elemento  $i$  nell'ipotetico refluo da trattare;  $B_i$  = tasso di abbattimento dell'elemento  $i$ ;  $A_i$  = concentrazione limite per lo sversamento dell'elemento  $i$  in acque superficiali.

Le assunzioni implicite nell'utilizzo dell'equazione sopra riportata riguardano: 1) la presenza di processi di abbattimento nei sistemi di fitodepurazione corrispondenti a cinetiche del primo ordine; 2) il permanere di queste dinamiche in presenza di concentrazioni in ingresso uguali o superiori a quelle utilizzate come riferimento (limiti di legge).

In generale esiste una differenza tra l'efficacia di abbattimento riferita ai carichi o alle concentrazioni in ingresso: è possibile avere carichi in ingresso elevati dovuti a portate elevate ma basse concentrazioni, o viceversa. Parlare di abbattimento di concentrazione o di carico assume quindi un significato diverso.

In questo caso la portata presente del sistema sperimentale di fitodepurazione si è assunta come parametro di riferimento, e perciò per definire il refluo di confronto sono state elevate le con-

centrazioni ipotetiche di ingresso per arrivare ai carichi di legge in uscita. Questa assunzione è ammissibile perché nei sistemi di fitodepurazione l'abbattimento percentuale tende ad aumentare all'aumentare delle concentrazioni in ingresso (Kadlec e Knight, 1996; Rousseau, 2004) secondo una cinetica del primo ordine. Perciò i valori ipotetici di concentrazione in ingresso forniti alle ditte del gruppo B, che risultano maggiori rispetto a quelli misurati nel sistema sperimentale Novissimo, dovrebbero essere abbattuti in maniera equivalente se non migliore da un sistema di fitodepurazione con caratteristiche analoghe a quelle monitorate. Ma Rousseau (2004) evidenzia tuttavia come esista un valore massimo di concentrazione oltre il quale il sistema

**La fitodepurazione in zone umide seminaturali a flusso superficiale risulta competitiva rispetto agli impianti tradizionali a fanghi attivi, a parità di efficacia depurativa ed indipendentemente dal tasso di sconto considerato**

non è in grado di supportare efficacemente gli abbattimenti.

Per tale ragione sono stati ricercati degli esempi in letteratura di zone umide con concentrazioni in entrata e abbattimenti simili a quelli ipotizzate. Nella tabella 5 si riportano esempi di letteratura per i singoli inquinanti considerati.

Nel caso del fosforo, Braskerud (2005) in una review sugli abbattimenti del P nelle zone umide sottolinea come l'abbattimento aumenti all'aumentare delle concentrazioni in ingresso (la concentrazione massima riportata è 2,15 mg/l), e lo stesso autore evidenzia (Braskerud, 2005b) l'esistenza di una cinetica del primo ordine. Kadlec e Knight (1996) confermano la cinetica e indicano per concentrazioni pari a 3,78 mg/l (media) abbattimenti pari al 57% (media). L'ITRC-USEPA (2001) riporta come alcune zone umide pur riportando concentrazioni in ingresso decisamente elevate continuano a presentare dei livelli di abbattimento consistenti. L'ITRC (2003) riporta per zone umide a flusso superficiale con concentrazioni in ingresso pari a 4 mg/l (P<sub>tot</sub>) efficienze di rimozione del 48%. Pertanto i livelli ipotizzati nel lavoro risultano chiaramente sostenibili.

Anche nel caso dei solidi sospesi è stato possibile verificare come le zone umide presentino concentrazioni in ingresso decisamente elevate mantenendo livelli di abbattimento consistenti (ITRC-USEPA, 2001).

Nel caso di BOD e COD, Dass (2004) riporta un lavoro dove gli abbattimenti (rispettivamente 95% e 80%) sono indipendenti dalla concentrazione in ingresso (posta progressivamente a 50-100-200 mg/l). L'ITRC (2003) riporta per le zone umide a flusso superficiale rimozioni dal 67 al 80% con concentrazioni in ingresso comprese tra 20-100 mg/l di BOD.

Per l'ammoniaca Kadlec e Knight (1996) riportano i risultati medi dei sistemi di fitodepurazione a flusso superficiale ricostruiti del Nord America, con concentrazioni in ingresso fino a circa 20 mg/l (inferiori alle soglie ipotizzate) ed efficienze di rimozione variabili (in media 54%). ITRC-USEPA (2001) dimostra invece come alcuni sistemi di fitodepurazione presentino concentrazioni in ingresso decisamente superiori ma livelli di abbattimento costantemente consistenti. Anche per l'ammoniaca, quindi, la concentrazione in ingresso ipotizzata non risulta essere tale da superare la capacità portante del sistema.

Le concentrazioni in ingresso dei nitrati negli studi riportati in letteratura (< 10 mg/l) sono generalmente inferiori alle concentrazioni ipotizzate in questo lavoro (143 mg/l). Jordan (2003) evidenzia come la rimozione dei nitrati segua effettivamente una cinetica del primo ordine (seppure lo studio si basi su concentrazioni in ingresso < 1 mg/l) e Kovacic (2000) riporta per concentrazioni in ingresso comprese tra 7,5 e 14,5 mg/l abbattimenti dal 25 al 99%. Hey *et al.* (1994), Mitsch *et al.* (1998) e Hunt *et al.* (1999) riportano valori di concentrazione compresi tra 1,2 e



**TABELLA 3 PARAMETRI QUANTITATIVI DI DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO.**

Parametro	Quantità
Dotazione idrica	2.595 m <sup>3</sup> /giorno
Abitanti equivalenti	12.975

6,6 mg/l ma abbattimenti variabili. Renee Lorion (2001) riporta il caso di acque in ingresso con concentrazioni comprese tra 100 e 150 mg/l (ITRC, 2003) e acque in uscita con valori di concentrazione inferiori a 10 mg/l. Anche in questo caso si può pertanto ipotizzare una consistenza delle soglie individuate nel reflu di confronto.

Quindi per tutti i parametri trattati per zone umide paragonabili a quella considerata si conferma: 1) la presenza di una cinetica del primo ordine degli abbattimenti (maggiori concentrazioni in ingresso corrispondano a maggiori abbattimenti percentuali); 2) che la presenza di concentrazioni in ingresso paragonabili a quelle ipotizzate consentono di mantenere abbattimenti comparabili o superiori a quelli riscontrati.

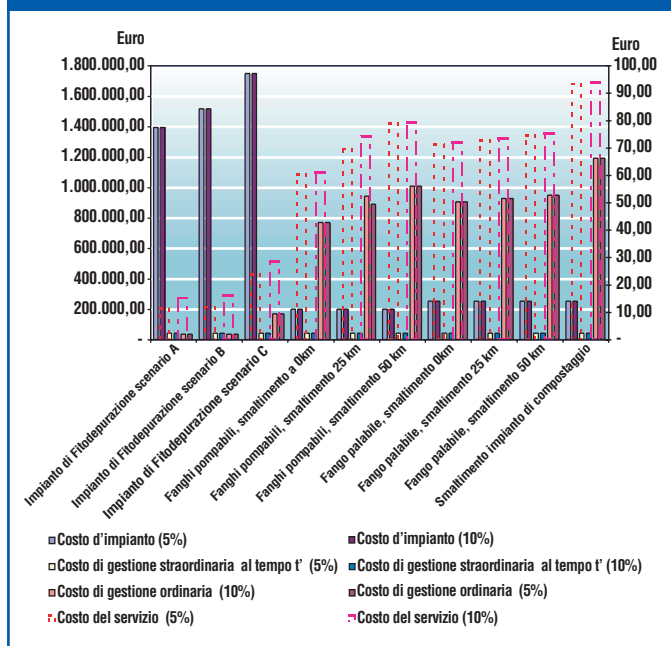
Si confermano pertanto entrambe le assunzioni implicite nell'utilizzo della equazione 1.

### **Indagine di mercato**

Una volta stabilita la definizione del reflu di confronto, si è proceduto ad una indagine di mercato per ottenere indicazioni tanto sul tipo di impianto equivalente a tecnologia tradizionale, da utilizzare per il confronto di convenienza, quanto sui suoi costi re-

**TABELLA 4 - APPORTI GIORNALIERI DEI PRINCIPALI ELEMENTI CARATTERIZZANTI LE ACQUE IN ENTRATA ALL'IMPIANTO DI FITODEPURAZIONE.**

Elementi	Apporto giornaliero (gr/giorno)
Solidi sospesi	484
Fosforo totale	49
Azoto ammoniacale	4.167
Azoto nitrico	120
Azoto totale	8.604
BOD	7.568
COD	31.385

**Fig. 1 - Si riportano in forma grafica e per ogni alternativa tecnologica individuata le voci di costo utilizzate per il calcolo del costo di servizio, riportato in seconda ordinata.**


lativi, mediante la richiesta di una proposta tecnica di dettaglio corredata da preventivo per categoria di costo (impianto, manutenzione straordinaria, manutenzione ordinaria).

Le ditte contattate sono state suddivise in due gruppi, utilizzati come confronto.

Al gruppo A)<sup>2</sup> di 8 imprese è stata comunicato il reale scopo dell'indagine, dando sia informazioni sulle caratteristiche depurative dell'impianto sperimentale, che sulle modalità di individuazione del refluo di confronto. Quindi è stato chiesto di fornire un preventivo tecnico descrittivo per il miglior impianto utile allo scopo.

Al gruppo B)<sup>3</sup> di 12 imprese non è stato comunicato il reale scopo dell'indagine e sono stati fornite direttamente le caratteristiche del refluo di confronto, richiedendo lo stesso tipo di preventivo rispetto al gruppo A.

In tal modo è stato possibile eseguire una verifica del tipo di informazioni fornite, che so-

no risultate sostanzialmente simili nei casi effettivamente rispondenti alle richieste. Complessivamente 11 ditte hanno fornito risposte utili.

### Individuazione dell'impianto tecnologico di confronto

Dalle informazioni ottenute, particolarmente esaustivi e utili da parte della ditta X del gruppo B), il sistema ottimale proposto è di tipo biologico, predisposto per l'abbattimento dell'azoto, completamente automatizzato composto dalle seguenti fasi:

- 1) arrivo liquami e sollevamento;
- 2) pre-denitrificazione;
- 3) nitrificazione;
- 4) sedimentazione;
- 5) ricircolo fanghi;
- 6) raccolta ed ispessimento fanghi di supero.

L'impianto prevede sollevamento del refluo ed il recapito nelle vasche di pre-denitrificazione per la trasformazione dei nitrati in azoto gassoso. Durante la nitrificazione avviene l'ossidazione dell'azoto ammoniacale a nitrati e della sostanza organica residua.

La rimozione dell'azoto ammoniacale in ambiente ossidato è condotta per via batterica con il sostegno di aria insufflata dal fondo delle vasche. La miscela areata viene convogliata alla fase di sedimentazione, dove si separano per gravità le particelle caratterizzate da peso specifico maggiore di quello dell'acqua. Il fango depositatosi viene in parte ricircolato nelle vasche di ossidazione per mantenerne una concentrazione ottimale di microrganismi, in parte ("fango di supero") smaltito in agricoltura o compostaggio, se non classificato rifiuto. Per ridurre i costi di gestione, è possibile installare un sistema di disidratazione meccanico, in grado di ridurre il volume da smaltire. L'impianto tradizionale proposto dalle ditte interpellate è stato dimensionato per il rispetto dei limiti per lo scarico in corso d'acqua superficiale, di cui all'allegato 5 D.Lgs. 152/99 (tabella 6).

L'impianto è costituito da vasche in Cls in due blocchi suddivisi in comparti (25 x 20 x 4,5 m) ed uno a pianta circolare (15 m diam. x 2,5 m).

L'impianto elettromeccanico è composto da:

- 2 elettropompe sommerse di sollevamento liquami;
- 1 miscelatore sommerso per comparto di pre-denitrificazione;
- 1 aeratore sommerso per comparto di nitrificazione;
- 1 elettropompa sommersa per ricircolo della miscela acqua-fango;
- 1 carro ponte completo di accessori per comparto di sedimentazione;
- 2 elettropompe sommerse per comparto di ricircolo fanghi;
- 1 quadro elettrico di controllo, impianto elettrico ed idraulico per i collegamenti interni all'impianto di depurazione.

### Definizione delle voci di costo per il confronto

#### Impianto di fitodepurazione

L'impianto di fitodepurazione del Canale Novissimo è un sistema sperimentale che presenta voci di costo di allestimento e di gestio-

**Si sono confrontati i costi di servizio di tre diversi impianti di fitodepurazione (con necessità strutturali crescenti) con tre impianti a fanghi attivi (i più competitivi sotto il profilo finanziario) di uguale capacità depurativa**

**TABELLA 5 - SI RIPORTANO DATI BIBLIOGRAFICI RELATIVI AL RAPPORTO TRA CONCENTRAZIONI IN INGRESSO E TASSI DI ABBATTIMENTO COMPATIBILI CON QUELLI IPOTIZZATI PER IL REFLUO DI CONFRONTO**

Riferimento:	Cin (mg/l)	Cout (mg/l)	% abb.	osservazioni
<b>Fosforo</b>				
Braskerud 2005	<2,15			cinetica I ordine
Kadlec & Knight 1996	3,78		57	cinetica I ordine
ITRC-USEPA 2001	2,1	2	4	knowlton et al., 2002
	28,4	6,8	76,1	McCaskey & Hannah
	25,3	10,8	57	Reaves & Dubowy 1996
	33	17	48	Moore & Niswander 1996
	4		48	
<b>ITRC 2003</b>				
<b>Solidi sospesi</b>				
ITRC-USEPA 2001	135,7	15,5	88,6	knowlton et al., 2002
	483,4	113,2	77	McCaskey & Hannah
	1596	48	97	Reaves & Dubowy 1996
	542	142	74	Moore & Niswander 1996
Nyakang'o 1999	200-600	70	85	
<b>BOD-COD</b>				
Dass 2004	50-200 BOD		80-95	BOD e COD
ITRC 2003	20-100		67-80	BOD
Nyakang'o 1999	500-750	20	98	BOD
	800-1000	20	96	COD
<b>Ammoniacca</b>				
Kadlec & Knight 1996	<20		54	
ITRC-USEPA 2001	55,6	8,6	84,5	Da:knowlton et al., 2002
	199,4	99,8	50	McCaskey & Hannah
	12	24	80	Reaves & Dubowy 1996
	126	65	48	Moore & Niswander 1996
	230		91	Mulamootil et al 1999
ITRC 2003				
Nyakang'o 1999	60-80	10	90	
<b>Nitrati:</b>				
Jordan 2003	<1			cinetica I ordine
Kovacic 2000	7,5-14,5		25-99	
Renee Lorion 2001	100-150	10		

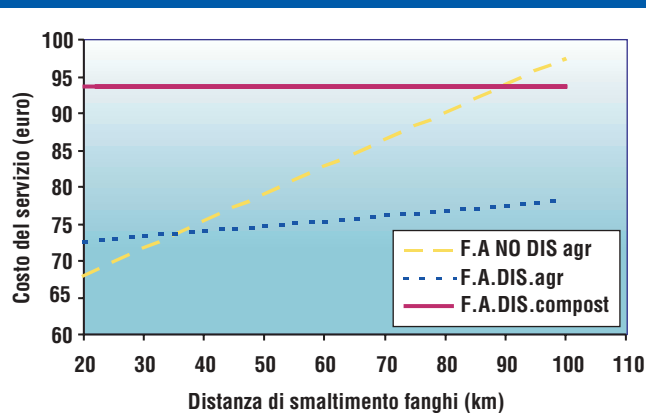


**TABELLA 6 - CONCENTRAZIONI DI INQUINANTI NEL REFLUO DI CONFRONTO DETERMINATE A PARTIRE DAI LIMITI DI SCARICO E DALLE PERCENTUALI DI ABBATTIMENTO RICHIESTE.**

(i) Elementi	(Ai) Limiti di emissione in acque superficiali ex. DLgs 152/99 (mg/l)	(Bi) efficacia di abbattimento richiesta (%)	(ci) Concentrazione ingresso reflu ipotetico (mg/l)
Solidi sospesi	≤80	57,09	186
Fosforo totale*	≤10	43,82	3,57
Azoto ammoniacale	≤15	71,70	53,6
Azoto nitrico	≤20	86,28	143
BOD	≤40	12,04	45,45
COD	≤160	39,53	266,67

**TABELLA 7 - DETERMINAZIONE DEL COSTO D'IMPIANTO, COSTO DI GESTIONE ORDINARIA, COSTO DI GESTIONE STRAORDINARIA DEI QUATTRO TIPI DI IMPIANTI DI FITDEPURAZIONE REALIZZABILI A PARITÀ DI EFFICACIA DI ABBATTIMENTO.**

Tipologia di costo	Voci considerate	scenario A	scenario B	scenario C
Costo d'impianto (CI)	Ricalibratura alveo e apporto terreni;	1.096.276,50	1.218.085,00	1.218.085,00
	Fornitura e installazione di impianto elettrico per allacciamento pompe			16.113,00
	Impianto di presa			118.992,00
	Impianto scarico			97.200,00
	Opere a verde	297.247,00	297.247,00	297.247,00
subtotale		1.393.523,50	1.515.332,00	1.747.637,00
Costo di gestione ordinaria (CGO)	Manutenzione impianto vegetale	34.008,69	34.008,69	34.008,69
	subtotale	34.008,69	34.008,69	168.287,49
Costo di gestione straordinaria (CGS)	Rinnovazione e utilizzo impianto,	40.000,00	40.000,00	40.000,00
	subtotale	40.000,00	40.000,00	40.000,00

**Fig. 2 - Costo del servizio degli impianti a fanghi attivi in funzione della distanza a cui vengono smaltiti i fanghi di supero, considerato un tasso di interesse del 5%.**

**Legenda**

- F.A. NO. DIS. agr** Impianto a fanghi attivi senza disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura
- F.A. DIS. agr** Impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura
- F.A. DIS. compost** Impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in impianto di compostaggio.

ne che non esistono in un impianto ordinario, anche se comparabile negli scopi e nelle modalità di realizzazione.

Per riferire i dati tecnico economici monitorati nello studio ad impianti di fitodepurazione reali, i costi relativi alla *realizzazione* ed alla *gestione* dell'impianto sperimentale sono stati raccolti in categorie. Nella categoria *realizzazione* sono stati considerati i costi relativi a quelli effettivamente sostenuti per: impianto vegetale; ricalibratura e apporto terreni; realizzazione strada di servizio; opere di presa e restituzione idraulica.

Nel caso dei costi di impianto, sono stati esclusi i costi di acquisizione dei terreni. Questa voce potrebbe potenzialmente incidere effettivamente nella stima del costo di servizio, e comunque in maniera superiore a quanto necessario per gli impianti tradizionali, che necessitano a parità di efficienza dimensioni decisamente inferiori. Si è pertanto assunto che la realizzazione di questi impianti si basi sull'utilizzo almeno parziale di aree pubbliche o demaniali, coniugando alle funzioni legate al disinquinamento altri benefici legati alla riqualificazione ecologica del sito.

Nella categoria *gestione* sono state considerate tra i costi *ordinari* la manutenzione dell'impianto vegetale, la gestione dei manufatti di presa e restituzione idraulica; e tra quelle *straordinarie*, l'utilizzazione ed il rinnovamento del soprassuolo arboreo dell'impianto.

In tal modo è stato possibile ricostruire quattro scenari realistici di spesa per altrettanti impianti di fitodepurazione con capacità di abbattimento equivalenti.

I quattro scenari di spesa (A, B, C, D) si differenziano per costi

crescenti di realizzazione a carico della modellazione morfologica e dell'accesso (modellazione e apporto terreni, presenza di strade di servizio) e per tipo di alimentazione idraulica (gravitazionale o meccanica).

### Costi di impianto

Schematizzando, le voci individuate per la definizione del costo d'impianto dei sistemi di fitodepurazione a partire dai costi sostenuti realmente per l'impianto sperimentale sono:

- scenario A: ricalibrazione alveo e apporto terreni, opere a verde;
- scenario B: ricalibrazione alveo e apporto terreni, realizzazione strada di servizio, opere a verde;
- scenario C: ricalibrazione alveo e apporto terreni, fornitura ed installazione di impianto elettrico, impianto di presa, impianto scarico, opere a verde.

### Costi di gestione ordinaria

Le voci di costo che sono state comprese nella categoria gestione ordinaria degli impianti di fitodepurazione A e B riguardano i costi sostenuti per la manutenzione dell'impianto vegetale.

Per l'impianto C oltre alla manutenzione delle opere a verde, sono stati considerati anche i costi sostenuti per la manutenzione ordinaria delle pompe di alimentazione e scarico del sistema. La manutenzione dell'impianto vegetale è stata prevista e condotta solo nei primi tre anni di esercizio.

### Costi di gestione straordinaria

La voce che concorre alla definizione dei costi di manutenzione straordinaria per gli impianti di fitodepurazione A, B, C è data dal costo di utilizzazione e rinnovamento del soprassuolo arboreo dell'impianto; il costo per l'attualizzazione di tale spesa è stato stimato in 20 anni e non comprende eventuali redditi derivanti dalla vendita del legname.

## Impianto tradizionale

### Costi di impianto

Le voci individuate per la definizione del costo d'impianto dei sistemi di depurazione tradizionale sono: 1) la realizzazione di n. 2 vasche in cemento armato e la fornitura ed installazione delle opere elettromeccaniche; 2) l'automazione dell'impianto; 3) l'e-

ventuale presenza di disidratatore meccanico di fanghi. Anche in questo caso sono stati esclusi i costi di acquisizione dei terreni per l'impianto.

Il disidratatore meccanico di fanghi di supero prodotti dal processo depurativo comporta la riduzione del volume del fango stesso. Questa soluzione aumenta il costo di realizzazione dell'impianto, ma permette di diminuire i costi di gestione ordinaria, per la riduzione del volume da trasportare e, conseguentemente, del numero di viaggi necessari allo smaltimento.

Dal momento che il refluo in entrata nell'impianto di fitodepurazione Novissimo non viene pretrattato, il costo relativo a questo fattore non viene considerato nel calcolo del costo complessivo. Inoltre, il costo d'impianto è stato limitato alle voci che effettivamente differenziano un sistema di trattamento dall'altro: non sono stati considerati, quindi, i costi relativi all'allacciamento dell'influyente all'impianto e alla connessione dell'effluente al corpo idrico recettore, potenzialmente comuni ad entrambe le tipologie di impianti in esame.

Il mantenimento dell'efficacia di depurazione nel corso del tempo è inoltre possibile solo rispettando alcune regole di corretta manutenzione e gestione delle opere. Sulla base delle indicazioni raccolte sono state determinate le voci di costo, nonché la frequenza e la durata degli interventi di carattere ordinario e straordinario.

### Costi di gestione ordinaria

Per quanto riguarda la gestione ordinaria degli impianti a fanghi attivi, le voci considerate sono:

- manutenzione tecnica e ordinaria delle componenti edili ed elettromeccaniche;
- gestione tecnico-analitica;
- consumo di energia elettrica;
- smaltimento dei fanghi di supero.

### Costi di gestione straordinaria

Tale stima ha richiesto la determinazione dei possibili eventi di carattere straordinario e delle scadenze in cui questi possono verificarsi. La forte aleatorietà associata a tali eventi ha richiesto una semplificazione nella determinazione di tali costi, che sono stati considerati alla stregua di interventi di manutenzione sup-

**TABELLA 8 - DETERMINAZIONE DEL COSTO D'IMPIANTO, COSTO DI GESTIONE ORDINARIA, COSTO DI GESTIONE STRAORDINARIA DEI SETTE TIPI DI IMPIANTI A FANGHI ATTIVI REALIZZABILI A PARITÀ DI EFFICACIA DI ABBATTIMENTO.**

Tipologia di costo	Voci considerate	fanghi pompabili, smaltimento a 0 km	fanghi pompabili, smaltimento 25 km	fanghi pompabili, smaltimento 50 km	fango palabile, smaltimento 0 km	fango palabile, smaltimento 25 km	fango palabile, smaltimento 50 km	Smaltimento impianto di compostaggio
Costo d'impianto (CI)	Realizzazione n 2 vasche in cemento armato	85.000,00	85.000,00	85.000,00	85.000	85.000	85.000	85.000
	Fornitura ed installazione delle opere elettromeccaniche	95.000,00	95.000,00	95.000,00	95.000	95.000	95.000	95.000
	Automazione dell'impianto e telecontrollo	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000	20.000	20.000	20.000
	Disidratatore meccanico fanghi				50.000	50.000	50.000	50.000
	subtotale	200.000,00	200.000,00	200.000,00	250.000	250.000	250.000	250.000
Costo di gestione ordinaria (CGO)	Manutenzione tecnica ordinaria	300.000,00	300.000,00	300.000,00	420.000	420.000	420.000	420.000
	Gestione tecnico analitica	108.000,00	108.000,00	108.000,00	108.000	108.000	108.000	108.000
	Consumo di energia elettrica	360.000,00	360.000,00	360.000,00	375.000	375.000	375.000	375.000
	Smaltimento fango pompabile in agricoltura	0,00	120.000,00	240.000,00	0	22.500	45.000	288.000
	subtotale	768.000,00	888.000,00	1.008.000,00	903.000	925.500	948.000	1.191.000
Costo di gestione straordinaria (CGS)		40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00
	subtotale	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00

TABELLA 9 - SI RIPORTANO PER OGNI ALTERNATIVA TECNOLOGICA INDIVIDUATA LE VOCI DEL MODELLO DI CALCOLO DEL COSTO DI SERVIZIO CALCOLATE PER TASSI DI SCONTO DEL 5% E DEL 10%.

Variable	Nome	Impianto di Fitodepurazione scenario A	Impianto di Fitodepurazione scenario B	Impianto di Fitodepurazione scenario C	fanghi pompabili, smaltimento a 0km	fanghi pompabili, smaltimento 25 km	fanghi pompabili, smaltimento 50 km	fango palabile, smaltimento 0km	fango palabile, smaltimento 25 km	fango palabile, smaltimento 50 km	smaltimento impianto di compostaggio
r	tasso di interesse	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
CI	Costo d'impianto	1.393.523,50	1.515.332,00	1.747.637,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00
CGO	Costo di gestione ordinaria	34.008,69	34.008,69	168.287,49	768.000,00	888.000,00	1.008.000,00	903.000,00	925.500,00	948.000,00	1.191.000,00
C'GS	Costo di gestione straordinaria al tempo t'	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00
a.e.	Abitanti Equivalenti	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975
t	Tempo di vita per il confronto (anni)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
t'	Tempo di attualizzazione delle spese di gestione straordinaria (anni)	20	20	20	10	10	10	10	10	10	10
AI	Quota annuale di rimborso del costo d'impianto	111.819,93	121.594,16	140.234,91	16.048,52	16.048,52	16.048,52	20.060,65	20.060,65	20.060,65	20.060,65
AGS	Quota annuale di rimborso del valore attuale delle spese di gestione straordinaria	1.209,70	1.209,70	1.209,70	985,24	985,24	985,24	985,24	985,24	985,24	985,24
Cs	Costo del servizio (5%)	11,33	12,08	23,87	60,52	69,77	79,02	71,23	72,97	74,70	93,43
r	tasso d'interesse	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
CI	Costo d'impianto	1.393.523,50	1.515.332,00	1.747.637,00	200.000,00	200.000,00	200.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00
CGO	Costo di gestione ordinaria	34.008,69	34.008,69	168.287,49	768.000,00	941.380,80	1.008.000,00	903.000,00	925.500,00	948.000,00	1.191.000,00
C'GS	Costo di gestione straordinaria al tempo t'	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00	40.000,00
a.e.	Abitanti Equivalenti	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975	12.975
t	Tempo di vita per il confronto (anni)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
t'	Tempo di attualizzazione delle spese di gestione straordinaria (anni)	20	20	20	10	10	10	10	10	10	10
AI	Quota annuale di rimborso del costo d'impianto	163.682,74	177.990,32	205.276,79	23.491,92	23.491,92	23.491,92	29.364,91	29.364,91	29.364,91	29.364,91
AGS	Quota annuale di rimborso del valore attuale delle spese di gestione straordinaria	698,38	698,38	698,38	905,72	905,72	905,72	905,72	905,72	905,72	905,72
Cs	Costo del servizio	15,23	16,33	28,79	61,06	74,42	79,55	71,91	73,65	75,38	94,11

plementare a scadenze prefissate.

Le voci considerate riguardano la sostituzione di componenti elettromeccaniche.

Individuazione della tipologia di impianto a fanghi attivi più economica in base alla modalità di smaltimento dei fanghi di supero. Sulla base della metodologia descritta, l'impianto tradizionale selezionato dall'indagine di mercato per il confronto è a fanghi attivi e prevede tre possibili varianti tecniche legate allo smaltimento dei fanghi di supero: 1) con disidratatore meccanico e smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura; 2) senza disidratatore e con smaltimento in agricoltura; 3) con disidratatore meccanico e smaltimento in impianto di compostaggio.

Le tre alternative sono legate ai costi della tecnologia (disidratatore) di riduzione dei volumi dei fanghi di supero, e al trasporto dei fanghi, funzione del volume prodotto e della distanza a cui il materiale dev'essere conferito.

Si è quindi assunto che il fango da smaltire (palabile o pompabile) sia privo di sostanze tossiche e possa quindi essere destinato all'utilizzo in agricoltura, così come disciplinato dalla DGRV n. 3247 del 1995, modificata dalla L.R. Veneto n. 3/2000, rendendo così il costo dello smaltimento pari al solo costo del trasporto.

Per l'impianto con disidratatore meccanico è stata poi considerata la possibilità di conferimento del fango di supero in impianto di compostaggio, soluzione possibile solo per fanghi in forma palabile.

Per individuare il costo complessivo, si è proceduto a confrontare il costo relativo alle tre alternative in funzione della distanza da percorrere per smaltire i fanghi, ai tassi di interesse prescelti, andando poi ad utilizzare per il confronto la variante con costo inferiore.

### Costo di servizio

A partire dai dati raccolti, si è infine proceduto al calcolo del "costo del servizio", che rappresenta il costo annuale del servizio di depurazione ( $C_s$ ) associato a ciascun abitante equivalente (Tomasinsig *et al.*, 2000). Il  $C_s$  deve tenere conto di tutti i parametri coinvolti: costi di investimento e messa in opera dell'impianto, costi per la manutenzione ordinaria, costi di manutenzione straordinaria e relativi tempi di attualizzazione, tempo di vita dell'impianto, tasso di sconto e numero di abitanti equivalenti per il dimensionamento dell'impianto. Per il calcolo è stato quindi utilizzato il seguente modello (Tomasinsig *et al.*, 2000; Ceccon *et al.*, 1999):

$$C_s = (A_1 + C_{GO} + A_{GS}) / a.e. \quad 2)$$

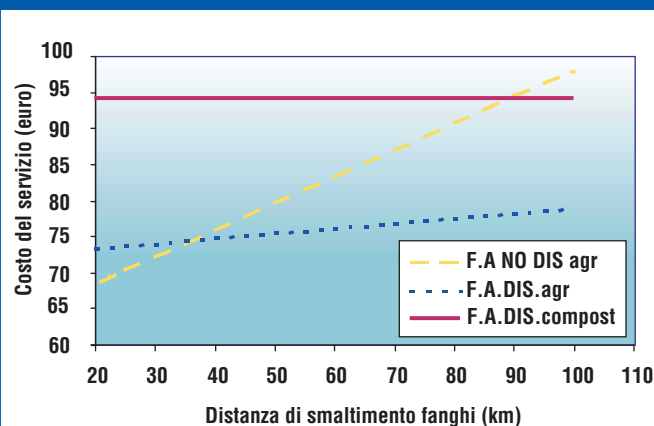
dove:  $A_1 = C_1 \times i \times [(1+i)^t - 1] / [(1+i)^t - 1]$ ;  $A_{GS} = C'_{GS} \times (1+i) - t' \times i \times [(1+i)^t - 1] / [(1+i)^t - 1]$

e:  $C_s$  = costo del servizio;  $A_1$  = quota annuale di rimborso del costo d'impianto;  $C_1$  = costo d'impianto;  $C_{GO}$  = costo di gestione ordinaria;  $A_{GS}$  = quota annuale di rimborso del valore attuale delle spese di gestione straordinaria;  $C'_{GS}$  = costo di gestione ordinaria al tempo  $t'$ ; a.e. = abitanti equivalenti;  $t$  = tempo considerato come vita dell'impianto;  $t'$  = tempo utilizzato per l'attualizzazione delle spese di gestione straordinaria;  $i$  = tasso di sconto.

### Tempo di servizio e tasso di sconto

Ai fini del calcolo del  $C_s$  è stata considerata una vita degli impianti pari a 20 anni, in quanto dopo tale periodo è prevedibile che mutino alcune delle condizioni che incidono sul corretto di-

Fig. 3 - Costo del servizio degli impianti a fanghi attivi in funzione della distanza a cui vengono smaltiti i fanghi di supero, considerato un tasso di interesse del 10%.



#### Legenda

- F.A.NO.DIS. agr** Impianto a fanghi attivi senza disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura
- F.A. DIS. agr** Impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura
- F.A. DIS. compost** Impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in impianto di compostaggio.

dimensionamento dell'impianto stesso e, di conseguenza, sulla sua capacità depurativa.

Ciò è in verità improbabile per gli impianti di fitodepurazione seminaturali, mentre molto probabile per un impianto tradizionale. Durante questo periodo si presuppone che le operazioni di gestione e manutenzione vengano correttamente eseguite e quindi rimangano costanti le condizioni necessarie per il mantenimento dell'efficacia depurativa (De Fraja Frangipane e Pastorelli, 1999).

La scelta del tasso di sconto ovviamente influisce sul costo complessivo nel tempo, associata alle diverse tipologie impiantistiche: tassi più elevati incidono soprattutto sugli impianti ai quali sono associati costi d'investimento iniziale maggiori e costi di gestione straordinaria consistenti (Tomasinsig *et al.*, 2000).

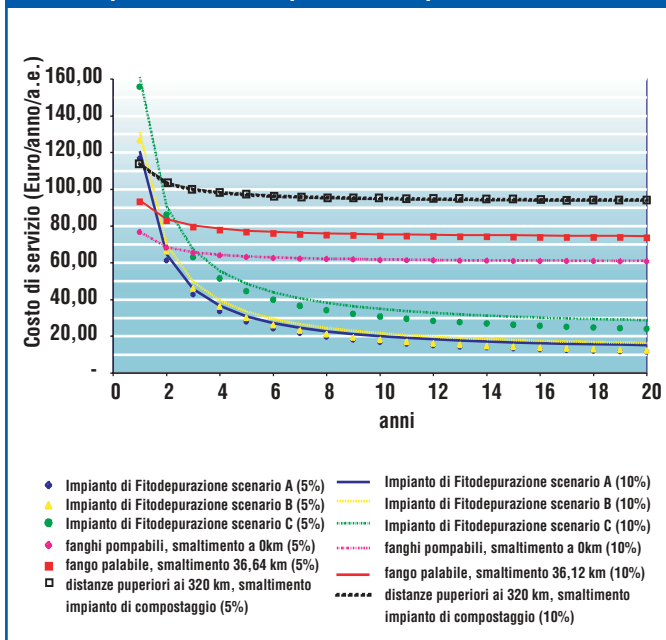
Per evidenziare l'effetto della variazione del tasso di sconto si è scelto di procedere esponendo i risultati sotto l'ipotesi di tasso 5% e tasso 10%; questi valori individuano un intervallo che comprende i tassi di sconto più comunemente utilizzati per la stima dei costi di costruzione di impianti di trattamento di acque reflue (Ceccon *et al.*, 1999; Breaux *et al.*, 1995; US OMB, 1992; US EPA, 2000; Steer *et al.*, 2003).

## Risultati

### Confronti tra le voci di costo

La tabella 7 riporta gli importi delle diverse categorie di costo che sono state utilizzate per costruire i tre diversi scenari di spesa per i quattro diversi impianti di fitodepurazione a capacità di abbattimento equivalente ma in condizioni di realizzazione diverse e a costo crescente,

Fig. 4 - Si riporta la curva dei costi di servizio, dal primo al ventesimo anno di operatività, dei sei impianti utilizzati per il confronto finale.



come sopra ricordato.

Le stesse categorie individuate per gli impianti tradizionali sono invece riportate in tabella 8. Nel caso di assenza di disidratatore meccanico, i fanghi di supero generati possono trovare impiego solo in agricoltura, e in questo caso, il costo dello smaltimento del fango corrisponde al costo del trasporto del fango al recettore finale. Sono stati quindi riportati costi di gestione ordinaria in funzione di tre soglie di distanza coperte dall'impianto in cui viene prodotto il fango al campo agricolo in cui viene smaltito (0, 25, 50 km).

Nel caso di presenza di disidratatore meccanico, i fanghi di supero generati possono trovare impiego sia in agricoltura, sia in apposito impianto di compostaggio. Anche in questo caso si sono formulate tre categorie di costo in funzione delle tre soglie di distanza del recettore finale (0, 25, 50 km). Nel caso del conferimento dei fanghi in impianto di compostaggio, l'azienda che ha progettato l'impianto può farsi carico del trasporto e del conferimento all'impianto di compostaggio; il costo dello smaltimento del fango è stato quindi stimato solo in funzione della quantità prodotta.

I costi di gestione ordinaria e straordinaria si riferiscono al periodo di vita dell'impianto, stimato in 20 anni.

La tabella 9 riporta i singoli componenti calcolati per costruire il modello del costo di servizio per ognuna delle alternative tecnologiche considerate e descritte.

La figura 1 riporta le sole variabili relative ai costi di impianto, gestione ordinaria e gestione straordinaria calcolate nel modello del costo di servizio per agevolare i confronti tra alternative.

### Impianto a fanghi attivi più conveniente

Si è proceduto a confrontare il costo relativo alle diverse alternative tecnologiche a fanghi attivi individuate in funzione della distanza da percorrere per smaltire i fanghi, considerando tasso di interesse pari al 5% (figura 2) e al 10% (figura 3). In questo modo si sono selezionate le alternative più convenienti, nell'ambito delle tipologie di impianto a fanghi attivi, per poi procedere alla comparazione con gli impianti di fitodepurazione.

La tabella 10 riporta i costi di servizio più bassi tra le opzioni a fanghi attivi in funzione delle distanze critiche di trasporto del fango di supero, per un tasso di sconto del 5% e del 10%.

## Discussione

Dalla analisi della tabella 9 e della figura 1 emerge come gli impianti a fanghi attivi presentino costi d'impianto più contenuti rispetto agli impianti di fitodepurazione. I diversi sistemi di fitodepurazione hanno costi d'impianto da circa 6 a circa 9 volte superiori a quelli degli impianti a fanghi attivi.

La differenza è spiegabile col fatto che gli impianti a fanghi attivi consentono alle ditte che li producono e commercializzano di proporre elementi prefabbricati, già dotati di tutte le componenti necessarie al loro funzionamento, agevoli da trasportare e facili da installare. Gli impianti a fanghi attivi godono di una elevata standardizzazione nella progettazione e produzione, con effetti sui prezzi di vendita dovuti alle economie di scala. Gli impianti di fitodepurazione, ed in particolare quelli semi-naturali a flusso superficiale come quelli analizzati, non godono delle medesime caratteristiche di impianto. Nonostante i modesti investimenti tecnologici richiedono progettazione e realizzazione strettamente legate al contesto nel quale verranno inseriti. In questo modo i costi risultano da un lato variabili a parità di dimensioni, dall'altro relativi alla reperibilità e disponibilità *in situ* delle materie prime. Dallo studio dei costi degli impianti esistenti si può comunque notare come questi generalmente si mantengano a livelli maggiori rispetto agli impianti tradizionali (Tomasinsig *et al.*, 2000).

Tali condizioni si invertono considerando i costi di manutenzione ordinaria (tabella 9, figura 1) con valori decisamente superiori nel caso di impianti a fanghi attivi, anche nel caso delle varianti tecnologiche meno onerose (senza disidratatore meccanico e con smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura su campi attigui all'impianto).

Gli impianti tradizionali a maggiore input tecnologici ed energetici richiedono interventi di gestione ordinaria costanti e costosi in termini di componenti, competenza tecnica, consumi energetici. Il processo de-

TABELLA 10 - COSTI DEL SERVIZIO DELLE OPZIONI PIÙ CONVENIENTI PER GLI IMPIANTI A FANGHI ATTIVI INDIVIDUATE IN BASE ALLA POSSIBILITÀ DI SMALTIMENTO DEL FANGO, PER TASSO D'INTERESSE DEL 5% E DEL 10%.

Opzioni per impianto a fanghi attivi	Distanze critiche di trasporto del fango (Km)	Costo del servizio a tasso d'interesse del 5%(Euro)	Costo del servizio a tasso d'interesse del 10%(Euro)
Assenza di disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura	0-35,6	60,5 - 73,7	61,07 - 74,4
Presenza di disidratatore meccanico di fanghi, smaltimento dei fanghi di supero in agricoltura	35,6 - 320,0	73,7 - 93,4	74,4 - 94,1
Presenza di disidratatore meccanico di fanghi smaltimento dei fanghi di supero in impianto di compostaggio.	>320,0	93,4	94,1



purativo richiede un costante controllo e mantenimento del processo, e sui costi di gestione ordinaria incidono dunque la manutenzione delle apparecchiature meccaniche, il consumo di energia elettrica attribuibile principalmente al funzionamento degli areatori ed allo smaltimento dei fanghi di risulta dal processo depurativo (Tomasinsig *et al.*, 2000).

Il disidratatore meccanico permette di ridurre la quantità di fango di supero da smaltire a fronte di un incremento di consumo di energia elettrica e del costo di manutenzione tecnica ordinaria. Dal confronto con la tabella 8 si osserva che i soli costi per lo smaltimento in agricoltura di fango palabile (in presenza di disidratatore meccanico fanghi) sono inferiori a quelli del fango pompabile (in assenza di disidratatore meccanico fanghi) per ogni distanza considerata. Secondo quanto indicato dalle imprese costruttrici, infatti, per lo smaltimento di fango pompabile sono necessari circa quattro viaggi in un mese, per lo smaltimento di fango palabile può essere necessario un viaggio ogni 40 giorni circa. Se però si includono tutte le voci implicate nel costo di gestione ordinaria, tale opzione diventa conveniente solo se il campo agricolo recettore del fango si trova a distanze medio-lunghe (50 km) dall'impianto di depurazione (figura 1). Per le altre distanze considerate per il conferimento del fango in agricoltura (0 km, 25 km) l'assenza di un disidratatore meccanico di fanghi consente di diminuire i costi di gestione ordinaria. Rispetto al conferimento del fango, per distanze di trasporto fino a 50 km e relativamente ai soli costi di gestione ordinaria, il conferimento del fango in impianto di compostaggio è la soluzione più sconsigliata (figura 1).

I sistemi di fitodepurazione sono impianti che mimano ecosistemi naturali, che come tali si basano su consumo di energia rinnovabile e sono autoregolanti entro un certo intervallo di condizioni di disturbo, legato in questo caso ai carichi in ingresso e agli idroperiodi progettati. L'assenza o la modesta presenza di apparecchiature meccaniche implica una riduzione della frequenza e della entità della manutenzione in termini di componenti, consumo energetico e risorse umane. Inoltre

questi impianti sono naturalmente esenti dalla necessità di smaltire dei sottoprodotti di processo, i fanghi, con tutto ciò che ne consegue.

Nel caso dei costi di gestione straordinaria si sono individuate stime sostanzialmente equivalenti per tutti gli impianti considerati e, quindi, non è possibile valutare la maggior convenienza di una tipologia impiantistica rispetto alle altre.

Tracciando le curve del costo del servizio in funzione della distanza per il conferimento del fango al recettore agricolo e considerando il costo dello smaltimento del solo fango palabile (con disidratazione meccanica dei fanghi), è stato possibile determinare delle distanze critiche per la scelta del compromesso più conveniente tra soluzioni tecnologiche e modalità di smaltimento (figura 2, figura 3, tabella 10).

Il tasso d'interesse influisce poco sulle distanze critiche di trasporto e sui corrispondenti costi del servizio. Tra le diverse opzioni considerate quella che non prevede adozione di sistema di disidratazione fanghi resta più conveniente se la distanza per il conferimento è inferiore o uguale a 36,12 km o a 35,64 km rispettivamente per un tasso del 10% o del 5%, pertanto l'aumento del tasso d'interesse dal 5% al 10% aumenta la prima distanza critica di 480 metri e un incremento del costo del servizio di 0,57 euro.

L'aumento del tasso d'interesse (tabella 10) non influisce invece sulla seconda distanza critica; risulta infatti che l'opzione impiantistica che prevede l'adozione di un sistema di disidratazione di fanghi è sempre preferibile se il fango può essere smaltito in agricoltura a distanze comprese tra 35,64 km e 320,00 km e tra 36,12 e 320,00 km in funzione del tasso applicato.

Tuttavia, indipendentemente dal tasso di sconto, se il conferimento del fango in agricoltura è possibile solo a distanze superiori di 320,00 km, oppure non esiste la possibilità di smaltimento in agricoltura, l'opzione più conveniente è il conferimento del fango in impianto di compostaggio. Il costo del servizio per questa opzione aumenta di 0,71 euro se invece di un tasso di sconto del 5% (93,41 euro) si considera un tasso di sconto del 10% (94,13

euro). In ipotesi conservativa e confrontando solo le soluzioni tecniche tradizionali in assoluto più convenienti, si possono riassumere le seguenti soluzioni:

- impianto a fanghi attivi senza disidratatore meccanico di fanghi, se è possibile smaltire i fanghi in agricoltura ad una distanza compresa tra 0 e 35,64 km (tasso di sconto del 5%) oppure tra 0 e 36,1 km (tasso di sconto del 10%);
- impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico di fanghi, se è possibile smaltire i fanghi in agricoltura ad una distanza compresa tra 35,6 e 320,0 km (tasso di sconto del 5%) oppure tra 36,1 e 320,0 km (tasso di sconto del 10%);
- impianto a fanghi attivi con disidratatore meccanico e smaltimento in apposito impianto di compostaggio, se non è possibile smaltire i fanghi in agricoltura, oppure se le distanze per il conferimento al recettore agricolo sono superiori a 320,0 km (tasso di sconto 5 e 10%).

#### Confronto tra i costi di servizio

Il tasso di sconto applicato (dal 5% al 10%) incide in primo luogo sul costo dell'investimento iniziale e solo secondariamente sulle spese di gestione straordinaria di importo più contenuto, mentre non vi è alcun riflesso sulle spese di gestione ordinaria. L'aumento del tasso penalizza, pertanto, le soluzioni tecnologiche a costi d'impianto superiori quali i sistemi di fitodepurazione. Fa eccezione l'impianto di fitodepurazione 3 (fornitura e installazione di impianto elettrico), caratterizzato da un costo d'impianto minimo e poco probabile.

Indipendentemente dal tasso di sconto i costi del servizio per gli impianti di fitodepurazione sono sempre inferiori a quelli degli impianti a fanghi attivi, con o senza disidratatore meccanico di fanghi, anche quando si considera l'opzione più economica per l'impianto tradizionale, cioè assenza di disidratatore meccanico di fanghi e smaltimento del fango di supero nei campi attigui all'impianto (figura 4).

L'analisi dimostra che, tra impianti a scala reale, quelli a fanghi attivi sono generalmente i più economici per quanto riguarda i costi d'acquisto, ma in realtà sono caratterizzati da costi di servizio complessivamente più elevati rispetto a quelli di fitodepurazione indipendentemente dal tasso di sconto considerato.

A parità di capacità depurativa, il più semplice tra gli impianti di fitodepurazione (impianto A, solo ricalibrazione del canale) presenta un costo di servizio al ventesimo anno inferiore di circa 6 (r = 10%) e 8 volte (r = 5%) rispetto al più costoso tra gli impianti a fanghi attivi individuati (smaltimento in compostaggio) (figura 4). L'impianto di fitodepurazione col costo di servizio più alto (impianto C: ricalibrazione canale, fornitura ed installazione di impianto elettrico, impianti di sollevamento e presa, impianto di scarico) presenta invece un costo di servizio al ventesimo anno inferiore da 2,1 (r = 10%) a 2,5 (r = 5%) volte rispetto all'opzione a fanghi attivi più economica (impianto senza disidratatore meccanico, con conferimento dei fanghi in agricoltura su campi attigui all'impianto).

Infine considerando l'andamento nel tempo dei costi di servizio, gli impianti di fitodepurazione risultano diventare più convenienti rispetto a quelli degli impianti a fanghi attivi, considerando tutte le alternative, da pochi mesi ad un massimo di tre anni dopo l'inizio attività (figura 4).

Risulta quindi che, qualsiasi sia lo scenario ipotizzato e indipen-

dentemente dal tasso di sconto considerato, gli impianti di fitodepurazione presentano costi di servizio inferiori rispetto agli impianti a fanghi attivi a parità di efficacia depurativa.

## Conclusioni

I risultati di questa analisi portano a ritenere che gli impianti di fitodepurazione basati sulla realizzazione di zone umide seminaturali a flusso superficiale sono competitivi rispetto agli impianti tradizionalmente adottati, quali quelli a fanghi attivi, a parità di efficacia depurativa ed indipendentemente dal tasso di sconto considerato.

Per ottenere questo risultato si sono confrontati i costi di servizio di tre diversi impianti di fitodepurazione (con necessità strutturali crescenti) con tre impianti a fanghi attivi (selezionati tra i più finanziariamente competitivi in base della modalità di smaltimento) a capacità depurativa equivalente.

I costi di servizio sono stati stimati, nel primo caso, utilizzando i valori dati contabilizzati in un impianto reale, nel secondo caso attraverso un'indagine di mercato.

Per il confronto si è assunto di non considerare tra i costi d'impianto l'acquisto dei terreni per la localizzazione delle opere, sia nel caso degli impianti tradizionali che nel caso degli impianti di fitodepurazione, ritenendo che la comparazione del servizio analizzato riguardi un bene socialmente condiviso che rende plausibile l'utilizzo di aree demaniali o almeno parzialmente pubbliche. Altre assunzioni hanno riguardato la definizione del refluo di confronto, necessario per il dimensionamento dei sistemi tradizionali di confronto caratterizzati (nel caso in esame) da acque in ingresso con diluizioni inevitabilmente diverse, ottenuto risolvendo i carichi in ingresso in funzione del tasso di abbattimento dell'impianto sperimentale rispetto ai limiti di legge per lo sversamento in acque superficiali. La solidità della assunzione è stata verificata da un'analisi comparata del comportamento del sistema rispetto ai dati di letteratura.

Dal lavoro svolto risulta che, a parità del tempo di vita degli impianti e a parità di efficacia depurativa, i tre possibili impianti di fitodepurazione realizzabili a costi crescenti in termini di realizzazione e gestione presentano costi di servizio da 2,5 a 8 volte inferiori rispetto ai costi di servizio degli impianti a fanghi attivi individuati.

La convenienza dipende sostanzialmente dai costi di gestione, costantemente e nettamente inferiori, mentre lo sbilancio rispetto ai maggiori costi di impianto si annulla e si inverte, in termini di costo di servizio, da pochi mesi a tre anni dopo l'avvio degli impianti.

La riduzione dei costi gestionali è dovuta al fatto che gli impianti artificiali si regolano a spese di costanti *input* energetici e di produzione di rifiuti che risulta necessario smaltire, mentre gli impianti di fitodepurazione semi-naturali a flusso superficiale mantengono le proprie funzioni a spese dell'energia solare e dei meccanismi di autoregolazione purché all'interno di un intervallo sostenibile di disturbi (in questo caso dati dall'immissione di inquinanti nel sistema).

Un sistema di fitodepurazione non produce fanghi di supero da smaltire, come invece accade per gli impianti a fanghi attivi. Il costo di smaltimento dipende sia dalla quantità del fango prodotto,

sia dalla distanza alla quale viene conferito, e risulta la principale voce che va a pesare nel calcolo del costo del servizio.

In un sistema di fitodepurazione semi-naturale, come quelli definiti sulla base delle caratteristiche realmente misurate nell'impianto Novissimo, il consumo di energia elettrica è scarso o nullo nel caso di alimentazione a gravità: i processi biologici, sebbene operino a scale spaziali e temporali più ampie rispetto a quelli degli impianti tradizionali, sfruttano la sola energia solare. Gli impianti di fitodepurazione, in conclusione, possono essere finanziariamente convenienti rispetto ai sistemi tradizionali di depurazione.

Inoltre riducono gli impatti in termini di consumi energetici e produzione di rifiuti, e possono essere elementi di gestione integrata dello stesso, fungendo contemporaneamente da tecnica di depurazione delle acque inquinate e da elemento di riqualificazione del territorio e di recupero di aree degradate.

## Bibliografia

- Bazzani G.M., Grillenzoni M., Malagoli C., Ragazzoni A. (1993) - *Valutazione delle risorse ambientali*. Edagricole, Bologna.
- Boustany R.G., Crozier C.R., Rybczyk J.M., Twilley R.R. (1997) - Denitrification in a South Louisiana wetland forest receiving treated sewage effluent. *Wetland Ecology and Management*, 4, 273-283.
- Braskerud B.C., Hartnik T., Lovstad O. (2005) - The effect of the redox-potential on the retention of phosphorus in a small constructed wetland. *Water Science and Technology*, 51, 127-134.
- Braskerud B.C., Tonderski K.S., Wedding B., Blauenberg A.-G., Ulen B., Koskiahio J. (2005) - Can constructed wetlands reduce the diffuse phosphorus loads to eutrophic water in cold temperate regions? *Journal of environmental quality*, 34 (6), 2145-2155.
- Breaux A., Day J.W. (1994) - Policy considerations for wetland wastewater treatment in the coastal zone: a case study for Louisiana. *Coastal Management*, 22, 285-307.
- Breaux A., Farber S., Day J.W. (1995) - Using natural coastal wetlands systems for wastewater treatment: an economic benefit analysis. *Journal of Environmental Management*, 44, 285-291.
- Cardoch L., Day J.W. Jr., Rybczyk J.M., Kemp G.P. (2000) - An economic analysis of using wetlands for treatment of shrimp processing wastewater: a case study in Dulac LA. *Ecological Economics*, 33, 93-101.
- Ceccon L., Marangon F., Tomasinsig E., Vecchiet M. (1999) - *Confronto economico tra tecniche di depurazione per le piccole utenze civili*. Atti del convegno "Efficacia e costi degli interventi di ingegneria naturalistica", Trieste, 25-27 novembre 1999, pp. 204-211.
- Dass P., Ryuhei I., Iwami N., Mizuochi M., Inamori Y. (2004) - *Role of emergent macrophyte (Phragmites and Zizania) in nutrient removal and flux of green house gases from wastewater in constructed wetland*. IWA Astee Conferences, 26 September-1 October, Avignon, France.
- Day J.W., Arancibia A.Y., Mitsch W.J., Lara-Dominguez A.L., Day J.N., Ko J.-Y., Lane R.R., Lindsey J., Lomeli D.Z. (2003) - Using ecotechnology to address water quality and wetland habitat loss problems in the Mississippi basin: a hierarchical approach. *Biotechnology Advances*, 22, 135-159.
- De Fraja Frangipane E., Pastorelli G. (1992) - *Recenti tendenze negli impianti di depurazione di piccole dimensioni*. Edizioni Esac.
- DGRV, Deliberazione della Giunta Regionale del Veneto, 6 giugno 1995, n. 3247, Direttiva B, Norme tecniche in materia di utilizzo in agricoltura di fanghi di depurazione e di altri fanghi e residui non tossici e nocivi di cui sia comprovata l'utilità ai fini agronomici.
- Ewel K.C., Odum H.T. (Eds.) (1984) - *Cypress swamps*. University Press of Florida, Gainesville, FL, 472 pp.
- Favero L., Franco D., Zennaro F., Mattiuzzo E. (2006) - Multiscalar analysis of N and P dynamics in an experimental surface-water semi-natural wetland. *J. Environ. Qual.* (submitted paper).
- Franco D., Favero L., Mattiuzzo E. (2006a) - A multiscalar estimation of a first order areal model of the performances of an experimental semi-natural surface water wetland in the Venice Lagoon watershed. *Water Research* (submitted paper).
- Franco D., Favero L., Mattiuzzo E. (2006b) - A multiscalar estimation of the performances of an experimental semi-natural surface-water wetland in the Venice Lagoon watershed. *Ecological Engineering* (submitted paper).
- Hammer D.A., Knight R.L. (1994) - Design constructed wetlands for nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 29 (4), 15-27.
- Hanley N., Spash C.L. (1993) - Cost-benefit analysis and the environment. Edward Elgar, Aldershot.
- Hawke C.J., José P.V. (1996) - *Reedbed Management for Commercial and Wildlife Interest*. The Royal Society for the Protection of Birds.
- ITRC - Common Constituents and Treatment Efficiencies in Agricultural Wastewaters. Da: USEPA 2001 constructed wetlands and wastewater management for CAFOs.
- ITRC - Technical and Regulatory Guidance for Constructed Treatment Wetlands De-

ember 2003.

- Jordan T.E., Whigham D.F., Hofmocker K.H., Pittek M.A. (2003) - Nutrient and sediment removal by a restored wetland receiving agricultural runoff. *J. Environ. Qual.*, 32, 1534-1547.
- Kadlec R.H., Alvord H. Jr. (1989) - Mechanisms of water quality improvements in wetland treatment systems. In D.W. Fisk (Ed.), *Wetlands: Concerns and Successes*. Atti presentati dall'American Water Resources Association, 17-22 settembre 1989, Tampa, FL, pp. 489-498.
- Kadlec R.H., Knight R.L. (1996) - *Treatment wetlands: theory and implementation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 928 pp.
- Ko J.-Y., Day J.W., Lane R.R., Day J.N. (2004) - A comparative evaluation of money-based and energy-based cost-benefit analyses of tertiary municipal wastewater treatment using forested wetlands vs. Sand filtration in Louisiana. *Ecological Economics*, 49, 331-347.
- Kovacic D.A., David M.B., Lowell E.G., Starks K.M., Cooke R.A. (2000) - Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agricultural tile drainage. *J. Environ. Qual.*, 29, 1262-1270.
- Legge regionale, Veneto, 21 gennaio 2000, n. 3, Nuove norme in materia di gestione dei rifiuti.
- Mitsch W.J., Gosselink J.G. (2000) - *Wetlands*. 3<sup>th</sup> ed. Wiley, New York.
- Nichols D.S. (1983) - Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 55 (5), 495-505.
- Nokes R.L., Greba C.P., Karpiscak M.M. (1999) - Reduction of enteric organisms in small scale, subsurface flow constructed wetlands. In J.L. Means e R.E. Hinchee (Eds.), *Wetlands and Remediation: Wastewater Remediation and treatment*. Battelle Press, Columbus, OH, pp. 195-203.
- Nuti F. (1987) - *L'analisi costi-benefici*. Il Mulino, Bologna.
- Nyakang'o J.B., van Bruggen J.J.A. (1999) - Combination of a well functioning constructed wetland with a pleasing landscape in Nairobi, Kenya. *Wat. Sci. Tech.*, 40 (3), 249-256.
- Patrick W.H.M. (1990) - *Microbial reactions of nitrogen and phosphorus in wetlands*. Utrecht Plant Ecology News Report, Utrecht, Olanda, pp. 52-63.
- Renee Lorian, "Constructed wetlands: passive system for wastewater treatment". Technology status report prepared for the USEPA technology innovation office under a national network of environmental management studies fellowship. August 2001.
- Rousseau D.P.L., Vanrolleghem P.A., DePauw N. (2004) - Model based design of horizontal subsurface flow constructed wetlands: a review. *Water Research*, 38, 1484-1493.
- Steer D., Aselyne T., Fraser L. (2003) - Life-cycle economic model of small treatment wetlands for domestic wastewater disposal. *Ecological Economics*, 44, 359-369.
- Tchobanoglous G., Burton F.L. (1991) - *Wastewater Engineering*. Mc Graw-Hill, New York, 1334 pp.
- Tomasinsig E., Vecchiet M., Marangon F., Ceccon L. (2000) - Valutazione economica delle tecniche di depurazione delle acque reflue per piccole utenze civili. *Genio Rurale*, 6, 15-25.
- US EPA (US Environmental Protection Agency) (2000) - *Guidelines for preparing economic analyses*. EPA 240-R-00-003.
- US OMB (US Office of Management and Budget) (1992) - *Guidelines and discount rates for benefit-cost analysis of federal programs*. Circolare n. A-94, www.whitehouse.gov/omb/circulars/a094/a094.html.
- Viessman W., Hammer M.J. (1998) - *Water supply and pollution control*. Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 827 pp.
- Vismara R. (1998) - *Depurazione biologica teoria e processi*. Hoepli, Milano.
- Wood A. (1995) - Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology*, 32 (2), 21-29.
- Zhang X., Feagley S.E., Day J.W., Conner W.H., Hesse I.D., Rybczyk J.M., Hudnall W.H. (2000) - A water chemistry assessment of wastewater remediation in a natural swamp. *Journal of Environmental Quality*, 29 (6), 1960-1968.

## Note

<sup>1</sup>Un abitante equivalente (a.e.) corrisponde ad una richiesta chimica di ossigeno (COD) di 130 grammi al giorno o ad un volume di scarico di 200 litri al giorno, facendo riferimento al valore più alto tra i due (art. 4, c. 1, L.R.T. n. 5/86).

<sup>2</sup>1) Virago Costruzioni (Cavasò del Tomba, Tv), 2) Depuracque (Salzano, Ve), 3) Veneta Prefabbricati (San Pietro Viminario, Pd), 4) Accadueò impianti (Montebelluna, Tv), 5) Ser.Eco (Cazzago di Pianga, Ve), 6) Carra depurazioni (Castelfranco Veneto, Tv), 7) CSG (Vicenza), 8) Depur Padana Acque (Borsea, Ro).

<sup>3</sup>9) Acquatech (Montebelluna, Tv), 10) Sodea - Società Depurazione Acque (Badia Polesine, Ro), 11) W.T.S. (Verona), 12) Chimica Ecologica (prov. Vi), 13) Ing. Cévese (prov. Pd), 14) Est. Ind. (Vicenza), 15) Sari (Padova), 16) Ecomarca (Montebelluna, Tv), 17) Colicelli Armando (Schio, Vi), 18) Manta Ecologica (Zevio, Vr), 19) Eco.Term (Montagnana, Pd), 20) Ravagnan (Padova).

## Autori

Laura Favero, Daniel Franco, Erika Mattiuzzo, Enrico Piccioni afferiscono a Planland®, Venezia; Ilda Mannino afferisce a Venice International University, Isola di San Servolo, Venezia.