

Aspetti economici della depurazione delle acque reflue

Riccardo Lucchetti Lorenzo Robotti
Dipartimento di Economia
Università di Ancona

1 Introduzione

Il Dlgs. 152/99 ha recepito nel nostro ordinamento quanto previsto dalla Direttiva 91/271/CEE sul trattamento delle acque reflue urbane e riproposto all'attenzione della società civile il problema dell'adeguatezza del nostro sistema di depurazione.

In questa relazione affrontiamo tre aspetti dell'economia della depurazione: la struttura dell'offerta di depurazione, l'efficienza tecnica e la qualità dei processi di depurazione ed infine l'efficienza economica del processo.

Affronteremo i primi due punti riprendendo i principali risultati dell'indagine condotta qualche anno fa dall'ISTAT sugli impianti di depurazione delle acque reflue urbane¹. Il terzo punto verrà invece analizzato utilizzando un'indagine campionaria sugli impianti di grandi dimensioni condotta nel 1995 dall'azienda Po-Sangone per conto di Federgasacqua ([2]).

2 La struttura dell'offerta di depurazione

Per quanto attiene alla struttura dell'offerta di depurazione, nell'indagine ISTAT vengono evidenziate con grande dettaglio la dislocazione sul territorio e le caratteristiche strutturali degli impianti di depurazione esistenti alla fine del 1993.

In base ai dati pubblicati, degli 11.218 impianti censiti, solo 8.570 sono effettivamente in funzione: 1.236 non risultano, infatti, in servizio mentre altri 1.412 sono ancora in fase di progetto o realizzazione. In termini di abitanti equivalenti (AE), alla data di riferimento, risultano serviti (AES) circa 58 milioni di abitanti. Con la messa in funzione degli impianti non attivati potrebbero essere serviti altri 4 milioni di AE, con la realizzazione degli altri 1.400 impianti si calcola di arrivare ad una potenzialità di quasi 77 milioni di AE (Tab. 6). Se si considera che la stima della domanda di depurazione si attesta intorno ai 99 milioni di AE, è facile per l'ISTAT concludere come sia ancora "necessario uno sforzo in termini di investimenti nel settore della depurazione civile, sforzo ormai reso urgente dall'avvicinarsi delle scadenze della Direttiva CEE 91/271"².

Per quanto riguarda la diffusione sul territorio, i dati del censimento mostrano come la maggior parte degli impianti in esercizio sia localizzata al Nord d'Italia (5.639 su 8.570, pari al 65%). Al Sud spetta il primato degli impianti non funzionanti: 427 sui

¹I risultati dell'indagine sono stati pubblicati in [7], [8] e [9].

²Vedi [9], pag. 23.

1.423 presenti sul territorio per un'incidenza di circa il 30% (Tab. 6). Dall'indagine è possibile rilevare anche che nelle zone "interne di montagna" si trova la maggior parte, quasi la metà, degli impianti primari i quali, essendo costituiti quasi per la totalità da fosse Imhoff, meglio si adattano rispetto ad altri tipi di impianti alla orografia e alla densità abitativa del territorio³ (Tab. 7).

Gli impianti esistenti hanno un'età relativamente giovane in quanto oltre la metà di essi ha meno di 10 anni e solo il 3% ha un periodo di attività superiore ai 20 anni. Se si considera la titolarità della gestione, si rileva che i depuratori esistenti risultano gestiti per la quasi totalità (75%) dal Comune sul cui territorio sono collocati. Circa l'8% è gestito da Consorzi ed Aziende Speciali e la restante parte (17%) da Enti di diritto pubblico e privati (Tab. 8).

Uno degli aspetti particolarmente rilevante dal punto di vista della funzionalità dell'impianto di depurazione è la sua dimensione. L'indagine dell'ISTAT propone numerose indicazioni al riguardo dalle quali emerge una realtà per molti versi già conosciuta dagli addetti ai lavori: la potenzialità degli impianti esistenti è generalmente piccola, mediamente, di poco superiore ai 6.000 AE (Tab. 8). Infatti, oltre la metà degli impianti ha una portata media di tempo asciutto inferiore ai 5 metri cubi all'ora e una dimensione media, espressa in termini di AE, inferiore a 2.000 (Tab. 10). Strutture in prevalenza piccole, quindi. In particolare, risultano di scala mediamente ridotta gli impianti gestiti in economia dai Comuni (2.300 AE) così che, nonostante la loro numerosità (7.372 impianti su 9.806 esistenti), servono solo il 27% degli AE totali mentre, le gestioni assicurate da Consorzi ed Aziende Speciali, con una dimensione media di 27 mila AE, assicurano la copertura del servizio al 34% degli utenti ed i privati e gli Enti di diritto pubblico si occupano del restante 39% (Tab. 8).

Per quanto attiene alla tipologia del trattamento dei liquami, la maggior parte degli impianti in esercizio utilizza trattamenti primari e secondari. Solo un piccola parte (450 su 8.570) si avvale del trattamento terziario. Si tratta però di impianti di grande dimensione per cui, in termini di AE, dall'indagine si riscontra che circa il 38% degli utenti è servito con questo trattamento mentre il secondario ed il primario coprono rispettivamente le esigenze del 57 e del 5% degli utenti (Tab. 7).

Vi sono alcune fasi del processo di depurazione che dal punto di vista ambientale sono assai rilevanti. Ci riferiamo alla produzione di fango e ai recapiti finali dello stesso e delle acque trattate. La considerazione di queste fasi è importante perché permette di verificare l'esistenza e la misura del trasferimento dell'impatto degli inquinanti esistenti nelle acque reflue da un aspetto ambientale ad un altro: infatti, se da un lato l'attività di depurazione contribuisce ad attenuare l'impatto ambientale dei liquami, dall'altro essa determina a sua volta un impatto che è funzione della qualità del processo e del recapito finale dei suoi "prodotti di risulta": fanghi, gas e acque trattate. Dall'indagine si rileva che l'ammontare dei fanghi prodotti per abitante equivalente servito è differente e si riduce con l'aumentare della potenzialità dell'impianto (Tab. 12). Nella maggior parte dei casi, la destinazione dei reflui trattati sono i corsi d'acqua superficiale mentre nel caso dei fanghi il recapito finale è la discarica (Tabb. 9 e 11).

Per concludere questa breve panoramica sulle caratteristiche strutturali dell'offerta di depurazione ecco alcuni dati sugli impianti in via di realizzazione: si tratta di impianti che dispongono di una potenzialità media di circa 10.500 AE, superiore a quella degli impianti esistenti che è di circa 6.500 AE. Un impianto su sei è progettato per il trattamento dei liquami di tipo terziario.

³Vedi [9], pag. 24.

3 Efficienza tecnica e qualità dei processi di depurazione

L'indagine ISTAT riferita al 1993 ha introdotto importanti innovazioni rispetto alle indagini condotte nel passato. Nel questionario sottoposto alle imprese sono state, infatti, introdotte domande relative ai valori medi di ingresso ed in uscita e cioè portata, BOD₅, COD, solidi sospesi, fosforo totale e azoto totale al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche quali-quantitative delle acque trattate e sull'efficienza del processo di depurazione⁴.

Poiché la funzione del processo di depurazione consiste nella riduzione del carico inquinante in ingresso, l'efficienza degli impianti è stata valutata in due modi. Innanzitutto, in termini di abbattimento percentuale delle componenti inquinanti rilevate nei liquami da trattare. Attraverso la comparazione dei valori di ingresso ed in uscita è stato possibile misurare la capacità depurativa degli impianti e disporre di un'indicazione di massima sulla rispondenza dei nostri processi depurativi alle disposizioni del Dlgs. 152/99, che ha recepito nell'ordinamento italiano la Direttiva CEE 271/91. Quest'ultima, come è noto, stabilisce i limiti per le concentrazioni dei reflui trattati (relative alle variabili di cui si è detto), ma indica anche le percentuali minime di abbattimento che costituiscono un requisito sostituibile ai valori di concentrazione.

Il secondo criterio di valutazione è consistito nel confrontare i valori medi in uscita (calcolati su base mensile) con i limiti di accettabilità degli scarichi fissati dalla normativa. Poiché l'indagine ISTAT è stata condotta con riferimento al 1993, si è pensato che fosse utile valutare l'adeguatezza dei processi prendendo a riferimento anche la normativa vigente a quel tempo. Nelle Tabelle 2 e 1 sono, dunque, riportati i valori limite fissati sia dalla L. 319/76 sia dal Dlgs. 152/99.

Prima di prendere in considerazione le percentuali di abbattimento rilevate dall'indagine è importante far presente che al questionario sulla qualità non ha risposto un gran numero di gestori di piccoli impianti per cui i risultati presentati sono maggiormente rappresentativi per gli impianti di medie e grandi dimensioni e con trattamenti secondari e terziari e portano a sovrastimare l'efficienza media del settore⁵.

Detto questo, i risultati dell'analisi confermano, innanzitutto, quanto era logico aspettarsi: gli abbattimenti più elevati si hanno con il trattamento terziario. In secondo luogo, mostrano come gli impianti che utilizzano esclusivamente il trattamento primario abbiano percentuali di riduzione inferiori al 50% e non riescano, in genere, a rispettare i limiti fissati dalla legge Merli e dal Dlgs. 152. Da ultimo, mostrano che, anche col trattamento secondario e terziario, ci possono essere difficoltà a rispettare i limiti posti dalla Comunità Europea: in media, gli impianti riescono a conseguire abbattimenti adeguati per il BOD₅, il COD e i solidi sospesi ma non anche per il fosforo totale e l'azoto totale (Tab. 8).

Queste conclusioni vengono confermate dai dati presentati nella Tab. 13 nella quale vengono riportati in forma sintetica i risultati dell'indagine che ha cercato di valutare la frequenza con cui si è rilevato uno scarico in linea con i parametri fissati dalla normativa in vigore. Dalla Tabella in oggetto si evince che la grande maggioranza dei depuratori che adottano un processo primario nel corso del 1993 non è mai risultata in regola: infatti, le concentrazioni dei parametri BOD, COD e solidi sospesi risultano sempre nella norma solo per un depuratore su sei mentre per i nutrienti la quasi totalità degli impianti è apparsa sempre fuori norma. La situazione è migliore (anche se non

⁴Vedi [8], pag. 17.

⁵Vedi [9], pag. 37.

eccellente) per i depuratori che utilizzano procedimenti secondari e terziari. In questi casi la grande maggioranza degli impianti ha accertato con i monitoraggi valori sempre nella norma per BOD, COD e solidi sospesi; per il fosforo e l'azoto totali, i risultati dimostrano un'efficacia assai più modesta poiché solo una percentuale molto ridotta di depuratori (2-13%) riesce a mantenersi costantemente nella norma.

Tabella 1: Limiti di emissione per gli impianti di acque reflue urbane secondo il Dlgs. 152/99

parametri	concentrazione max. (mg/l)		% minima di riduzione	
BOD ₅			70-90	
			(oltre 10.000 AE)	80
		25		(a) 40
COD		125		75
totale solidi sospesi		35		90
	(2.000-9.999 AE)	(a) 70	(2.000-9.999 AE)	(a) 70
fosforo totale (b)	(10.000- 99.999 AE)	2		80
	(oltre 100.000 AE)	1		
azoto totale (b)	(10.000-99.999 AE)	15		70-80
	(oltre 100.000 AE)	10		

(a) Per le acque situate in regioni di alta montagna purchè non si abbiano ripercussioni sull'ambiente.

(b) Per gli impianti recapitanti in aree sensibili.

Tabella 2: Limiti di accettabilità degli scarichi secondo la L. 319/76

parametri	tabella A (concentrazioni in mg/l)	tabella C (concentrazioni in mg/l)
BOD ₅	(a) 40	non più del 70% del valore a monte dell'impianto di depurazione limite imponibile: min= 40; max=250
COD	160	non più del 70% del valore a monte dell'impianto di depurazione limite imponibile: min= 160; max=500
materiali in sospensione	80	non più del 40% del valore a monte dell'impianto di depurazione limite imponibile: min= 80; max=200
fosforo totale	(b) 10	(b) 10
azoto totale	(c) 35,5	(c) 60,6

(a) Per gli scarichi industriali le cui caratteristiche di ossidabilità siano diverse da quelle dei liquami domestici la concentrazione limite deve essere riferita ad almeno il 70 per cento del BOD totale.

(b) Il limite è ridotto a 0,5 nel caso di immissione nei laghi, dirette o comprese entro una fascia di 10 chilometri dalla linea costiera.

(c) Per gli scarichi in laghi, diretti o indiretti, compresi entro una fascia di 10 chilometri dalla linea di costa, l'azoto totale non deve superare i 10 mg N/l.

4 Efficienza economica nella depurazione: analisi econometrica

4.1 Introduzione

In questo paragrafo sottoporremo ad un'analisi econometrica di efficienza dati relativi all'attività di denitrificazione condotta su un campione di grandi depuratori, al fine di evidenziare le principali caratteristiche di efficienza economica dell'attività di depurazione.

Come è noto, l'analisi econometrica dell'efficienza è basata sul concetto microeconomico di funzione di produzione come frontiera dell'insieme delle possibilità produttive. Partendo da un campione di unità di produzione, ve ne saranno alcune che giacciono sulla frontiera dell'insieme, e potranno di conseguenza essere considerate efficienti. Altre produrranno una quantità di output inferiore a quella che teoricamente potrebbe essere ottenuta a parità di input; queste ultime saranno considerate tecnicamente inefficienti.

Nel nostro caso, tuttavia, non è chiaro cosa si debba intendere per funzione di produzione di un depuratore: in altri termini, definire quali siano gli output dell'attività del depuratore e quali siano gli input utilizzati per produrli non è affatto immediato. Nel prosieguo, sulla scorta delle indicazioni dei tecnici, abbiamo considerato come output **la quantità di azoto rilasciata nell'atmosfera sotto forma di gas inerte**. Questa quantità (denotata dal simbolo N_{atm}) è stata scelta come output in quanto rappresenta l'unica forma in cui l'azoto presente nei fanghi in ingresso può essere trasformata senza ripercussioni negative sull'ambiente, ed è stata calcolata come

$$N_{\text{atm}} = N_{\text{in}} - N_1 - N_2$$

e cioè come differenza fra azoto in ingresso (N_{in}) e le quantità di azoto presenti nell'acqua in uscita (N_1) e nei fanghi (N_2); quest'ultima quantità è stata stimata valutando l'azoto presente nei fanghi al 4% del contenuto secco. Come input sono stati considerati:

- la quantità di azoto in ingresso;
- i costi di esercizio⁶, divisi in
 - Personale
 - Reagenti
 - Energia
 - Ammortamenti

In realtà, ci sono ragioni a priori (essenzialmente di tipo tecnico-ingegneristico) per ritenere che le spese per personale e per reagenti siano di fatto ininfluenti nell'attività di denitrificazione. Questo, comunque, formerà l'oggetto di una ipotesi statistica da verificare sui dati (vedi più avanti).

⁶Abbiamo utilizzato i costi di esercizio anziché le quantità fisiche per avere una misura della quantità di input aggiustata per la qualità. Peraltro, anche volendo procedere diversamente, non disponiamo dei prezzi unitari degli input.

4.2 Metodologia

Una volta definita la funzione di produzione, l'analisi di efficienza vera e propria viene generalmente condotta facendo ricorso a tecniche che possono essere raggruppate in due classi: tecniche di tipo DEA (anche dette non parametriche) e tecniche di tipo SF (anche dette parametriche)⁷.

Nella DEA (Data Envelopment Analysis)⁸ si parte da un campione di unità per le quali siano noti i dati sugli input e sugli output fisici per determinare, attraverso tecniche di programmazione lineare, quali di queste unità siano efficienti e quali no: l'efficienza è definita come l'impossibilità, da parte di una unità, di aumentare il proprio output a parità di input⁹ utilizzando una combinazione lineare delle tecnologie in uso in altre unità del campione. Un grande vantaggio di questa tecnica sta nel fatto che non è necessario specificare una forma funzionale per la funzione di produzione, la quale è *definita* dall'insieme delle tecnologie utilizzate dalle unità presenti nel campione. Tuttavia, questa caratteristica fa sì che i risultati che si ottengono con l'approccio DEA siano estremamente sensibili alla composizione delle unità osservate e soprattutto agli eventuali errori di misura presenti nei dati. Inoltre, questa tecnica non fornisce, nella sua versione di base, stime in senso statistico dei parametri che caratterizzano la tecnologia, cosicché è di fatto impossibile sottoporre a verifica ipotesi di interesse economico, come ad esempio ipotesi sulla natura dei rendimenti di scala.

Nell'approccio SF (Stochastic Frontier)¹⁰, per contro, viene fatta una precisa ipotesi sulla forma funzionale della funzione di produzione (o di costo, attraverso i teoremi sulla dualità) e si ipotizza che le unità osservate producano una quantità di output che differisce da quella teorica per due componenti: una erratica, legata a fattori puramente casuali o a caratteristiche particolari dell'unità non modellate, che si assume a media 0, ed una che costituisce la componente di inefficienza vera e propria. In formule si ha

$$y_i = f(x_i; \theta) + \epsilon_i$$

Dove:

- y_i : output
- x_i : input
- θ : parametri della funzione di produzione
- ϵ_i : disturbo ($u_i - v_i$)
- v_i : componente erratica
- u_i : componente di inefficienza (non negativa)

Una volta fatta un'ipotesi sulla forma della funzione $f(\cdot)$ e sulle distribuzioni delle due componenti u_i e v_i , si stimano — di solito con il metodo della massima verosimiglianza¹¹ — i parametri θ .

Abbiamo ritenuto che nessuno di questi due approcci fosse soddisfacente per i nostri fini. Nel nostro caso, infatti, la cattiva qualità dei dati (vedi più sotto) sconsiglia l'utilizzo della DEA; inoltre, l'uso della DEA avrebbe anche precluso la strada di un'analisi delle caratteristiche della tecnologia sotto forma di test di ipotesi. D'altronde,

⁷Per una rassegna dei metodi sia parametrici che non si veda il numero speciale del *Journal of Econometrics* dedicato all'argomento (n. 1-2, 1990) o [5]. Una rassegna succinta ma recente è contenuta in [10].

⁸Un riferimento d'obbligo è [4].

⁹Oppure di diminuire il proprio utilizzo di input a parità di output; queste diverse definizioni danno luogo ad analisi dette nel gergo DEA *output-* o *input-oriented*.

¹⁰Per una esposizione meno succinta vedi ad es. [6].

¹¹Si noti che, per costruzione, $E(\epsilon_i) < 0$, ciò che rende problematico l'uso degli OLS.

non è neanche proponibile un ricorso ad una pura tecnica di tipo SF in quanto alcune categorie di spesa sono evidentemente funzione dalla composizione chimica dei fanghi in entrata, e più in generale sono funzione degli obiettivi di produzione; di conseguenza, si pone evidentemente un problema di endogeneità di alcuni dei regressori. Le strade canoniche sarebbero a questo punto due: stimare una funzione di costo — come consueto nella letteratura microeconomica (vedi ad esempio Berndt a pag. 457) — in cui il costo totale varia in funzione della quantità di output e dei prezzi dei fattori, oppure stimare il modello con una logica di tipo LIML (*Limited Information Maximum Likelihood*). Nel nostro caso, nessuna delle due strade è percorribile: la prima perché i prezzi unitari dei fattori non erano disponibili; la seconda perché la specificazione LIML avrebbe dovuto tener conto della non normalità del termine di errore ϵ_i rendendo estremamente complessa la procedura di stima.

Per investigare l'efficienza dei depuratori abbiamo quindi condotto un'analisi ispirata ad un recente contributo di Arnold et al. ([1]) in cui si combina un approccio non parametrico con una stima parametrica della funzione di produzione. L'idea di base è quella di dividere l'analisi in due stadi: in un primo stadio si effettua un'analisi DEA per individuare un insieme di unità che possono essere ritenute efficienti in prima approssimazione. In un secondo stadio si effettua una regressione OLS del tipo

$$y_i = f(x_i; \beta) + f(x_i d_i; \gamma) + u_i$$

dove d_i vale 1 per le unità efficienti e 0 per quelle inefficienti. Per funzioni di produzione lineari nei parametri, l'espressione precedente si riduce a

$$y_i = x_i' \theta + d_i x_i' \gamma + u_i$$

e i parametri che caratterizzano la tecnologia efficiente sono dati semplicemente da $\beta + \gamma$ ¹². Da esperimenti di Monte Carlo effettuati da Bardhan *et al.* (cit.) emerge che questa procedura ha una buona capacità di individuare i parametri che caratterizzano la funzione di produzione.

Al fine poi di eliminare gli effetti dell'endogeneità dei regressori, abbiamo sostituito, al secondo stadio, la stima OLS con una stima a variabili strumentali in cui gli strumenti sono stati scelti in modo da controllare l'effetto della composizione delle acque in ingresso.

In sintesi, la metodologia da noi adottata prevede un'analisi in due passi:

1. In una prima fase, è stata effettuata un'analisi DEA canonica con orientamento all'output e rendimenti di scala variabili¹³.
2. In una seconda fase, la funzione di produzione (ossia la frontiera efficiente delle possibilità tecniche di produzione) viene stimata usando i soli dati delle unità risultate efficienti al primo stadio. Vengono inoltre stimati, per ogni input, dei coefficienti differenziali, che rappresentano lo scarto fra la tecnologia efficiente e quella usata dalle unità inefficienti (vedi Bardhan et al. per maggiori ragguagli). La stima viene effettuata col metodo delle variabili strumentali per tener conto dell'endogeneità di alcuni dei regressori.

¹²Si noti che di fatto questo equivale a stimare la frontiera con i soli dati delle unità risultate efficienti al primo stadio. Si può facilmente dimostrare che la regressione di secondo stadio è equivalente a quella che dà origine al test di Chow.

¹³Per coerenza con l'impostazione metodologica complessiva, sono state anche utilizzate, in luogo delle variabili relative ai costi endogeni, i valori fittati di una regressione OLS delle variabili stesse sugli strumenti, come in una regressione a due stadi. I risultati finali sono assolutamente analoghi.

4.3 Dati

I dati da noi considerati provengono da un'indagine, condotta nel 1995 dall'azienda Po-Sangone per conto di Federgasacqua ([2]), che contiene dati di varia natura su 169 depuratori di grandi dimensioni sparsi fra 13 regioni italiane. Sfortunatamente, la qualità dei dati è molto bassa, cosicché si è resa necessaria una pulitura preliminare dei dati, che ha ridotto la numerosità del campione considerato a 110 unità. Alcune statistiche descrittive sul campione da noi considerato sono riassunte nella tabella 3.

Tabella 3: Statistiche descrittive sul campione

	casi validi	media	dev. std.	min.	max.
AE progetto (in migliaia)	110	166.6	249.6	4	2000
AE di fatto (in migliaia)	110	182.1	382.5	1	3138
N. addetti	102	18.6	27.0	0	176
anno di entrata in servizio	102	1983.7	517.5	0	1996
costi (milioni/anno)					
personale	110	1498.8	3429.4	2	31667
reagenti	106	265.4	538.0	0	4422
energia	110	693.1	794.2	30	4600
smaltimento	108	790.6	1313.4	0	9352
vari	109	1361.0	2175.3	0	13530
ammortamenti	60	1352.8	1933.8	0	14692

Purtroppo, la mancata indicazione per molte unità dei dati disaggregati sui costi ci ha forzati a considerare un insieme ancora più ristretto di depuratori; dal campione sono poi stati ancora esclusi quei depuratori per i quali la differenza fra la quantità di azoto in ingresso e quella espulsa nell'acqua o nei fanghi risultava negativa¹⁴. La numerosità campionaria così determinata è stata pari a 47 unità¹⁵.

4.4 Risultati

L'analisi DEA ha evidenziato un numero di depuratori tecnicamente efficienti pari a 16 su 47 (34% circa). In seguito a questa prima fase, è stata costruita una variabile binaria D_i con il seguente criterio:

$$D_i = \begin{cases} 1 & \text{se l'unità } i \text{ è inefficiente} \\ 0 & \text{se l'unità } i \text{ è efficiente} \end{cases}$$

Il criterio da noi seguito è speculare rispetto a quello proposto da Bardhan et al.; è facile, tuttavia, mostrare che i due criteri sono equivalenti. Si tenga a mente, però, che rispetto alla simbologia di Bardhan et al. i nostri coefficienti β e δ hanno un significato diverso: in particolare, i parametri della funzione di produzione sono semplicemente β anziché $\beta + \delta$.

Nella seconda fase, è stata ipotizzata, per la funzione di produzione, una forma funzionale di tipo Cobb-Douglas ed è stata effettuata una stima a variabili strumentali

¹⁴L'apparente stranezza di questo risultato si spiega in realtà con il fatto che i flussi in ingresso non tengono conto degli eventuali ingressi non provenienti dalla rete, come ad esempio quelli di impianti industriali o allevamenti.

¹⁵Facciamo naturalmente l'ipotesi che questo processo di selezione sia completamente esogeno, cosicché la rappresentatività dei dati superstiti non venga pregiudicata.

nella quale sono state considerate endogene tutte le voci di costo fuorché il costo per il personale, cioè r_i , e_i e a_i ; come strumenti per queste variabili sono stati usati i valori in ingresso delle variabili COD (carbonio), Ptot (fosforo) e SST (sospensioni solide totali), così da controllare l'effetto della composizione delle acque in entrata. Nella regressione è stato poi aggiunto come variabile esplicativa addizionale l'anno di entrata in servizio (con 1970=0) come variabile ambientale in funzione di proxy della tecnologia. Infine, le osservazioni su ogni depuratore sono state ponderate per i metri cubi in ingresso per garantire che ogni unità fosse rappresentata nel campionaria in proporzione all'attività di depurazione effettivamente svolta.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 p_i + \beta_3 r_i + \beta_4 e_i + \beta_5 a_i + \beta_6 t + \delta_0 D_i + \delta_1 D_i x_i + \delta_2 D_i p_i + \delta_3 D_i r_i + \delta_4 D_i e_i + \delta_5 D_i a_i + \delta_6 D_i t + \epsilon_i \quad (1)$$

Dove:

- y_i : logaritmo dell'azoto in atmosfera (kg/giorno)
- x_i : logaritmo dell'azoto in ingresso (kg/giorno)
- p_i : logaritmo del costo per il personale
- r_i : logaritmo del costo per i reagenti
- e_i : logaritmo del costo per l'energia
- a_i : logaritmo del costo per gli ammortamenti
- ϵ_i : disturbo ($u_i - v_i$)
- v_i : componente erratica
- u_i : componente di inefficienza (non negativa)

Tabella 4: Risultati della prima stima

coeff.	stima	std. err.	t-stat	p-value
β_0	-6.069	21.514	-0.282	0.780
β_1	1.164	1.021	1.140	0.262
β_2	1.356	6.348	0.214	0.832
β_3	0.549	2.700	0.203	0.840
β_4	-0.509	10.338	-0.049	0.961
β_5	-0.956	3.641	-0.263	0.795
β_6	0.144	0.624	0.231	0.819
δ_0	-505.422	83862.690	-0.006	0.995
δ_1	-14.596	2383.409	-0.006	0.995
δ_2	13.503	2447.096	0.006	0.996
δ_3	-93.116	15209.750	-0.006	0.995
δ_4	61.542	10097.210	0.006	0.995
δ_5	84.729	13705.740	0.006	0.995
δ_6	1.048	199.476	0.005	0.996

Errori standard robusti all'eteroschedasticità (White)

La (1) riporta la forma dell'equazione stimata; i risultati delle stime sono riportati nella tabella 4. Come si vede, i risultati sono tutt'altro che buoni. Questo può essere dovuto a diversi fattori, fra cui tuttavia occupa un posto assolutamente prioritario la carenza di gradi di libertà: si ricordi che questa regressione preliminare stima 16 parametri con 47 osservazioni; inoltre gli 8 parametri β vengono di fatto stimati utilizzando

16 osservazioni, cioè quelle dei depuratori risultati efficienti con l'analisi DEA di primo stadio. Questo problema, tuttavia, può essere attenuato specificando l'equazione (1) in forma più parsimoniosa. In particolare, si può ipotizzare che l'emissione di azoto in atmosfera non dipenda dalle quantità degli input p_i e r_i , cioè personale, reagenti e ammortamenti. Un test di azzeramento per i parametri $\beta_2, \beta_3, \beta_5, \delta_2, \delta_3$ e δ_5 porta ad un valore del test di Wald pari a 0.088146, che indica l'accettazione dell'ipotesi nulla a qualunque livello di significatività (il p-value è 0.999986).

A seguito dei risultati di questo test, si è provveduto a rispecificare l'equazione eliminando le variabili superflue, pervenendo così alla stima finale riportata nella tabella 5.

Tabella 5: Risultati della stima finale

coeff.	stima	std. err.	t-stat	p-value
β_0	-4.576	1.298	-3.525	0.001
β_1	1.040	0.051	20.366	0.000
β_4	0.701	0.269	2.606	0.013
β_6	-0.032	0.050	-0.632	0.531
δ_0	3.456	1.833	1.885	0.067
δ_1	0.157	0.180	0.869	0.390
δ_4	-0.896	0.340	-2.633	0.012
δ_6	0.003	0.054	0.051	0.959

Errori standard robusti all'eteroschedasticità (White)

R^2	0.993623	media var. dip.	6.397836
\bar{R}^2	0.992479	dev. std. var. dip.	6.442024
errore std. residui	0.558687	somma q. residui	12.17312
statistica F	85.56358	prob(statistica F)	0

Le stime così ottenute sono state utilizzate per condurre test su due ipotesi:

Rendimenti di scala costanti $H_a : \beta_1 + \beta_4 = 1$. L'accettazione di questa ipotesi comporterebbe che i rendimenti di scala possono essere considerate costanti; viceversa, il rifiuto in favore dell'alternativa $\beta_1 + \beta_4 > 1$ indicherebbe rendimenti di scala crescenti, e di conseguenza la possibilità di diminuire i costi medi aumentando la dimensione degli impianti.

Irrelevanza dell'energia fuori dalla frontiera $H_b : \beta_4 + \delta_4 = 0$. Questa ipotesi, se accettata, implicherebbe che un legame positivo fra energia impiegata ed output sussiste solo nelle unità efficienti. In altri termini, non è detto che nelle unità inefficienti un maggior consumo di energia conduca necessariamente ad un aumento dell'efficacia dell'attività di denitrificazione.

Questi test, condotti come test di Wald, hanno dato luogo ai seguenti risultati:

ipotesi	valore del test	gdl	p-value
H_a	10.16917	1	0.001428
H_b	0.872919	1	0.350148

Come si vede, H_a risulta rifiutata; poiché la somma dei coefficienti β_1 e β_4 risulta maggiore di 1, se ne deduce una certa evidenza in favore di economie di scala sulla

frontiera efficiente. Viceversa, l'ipotesi H_b può essere accettata, il che implica che l'input di energia (misurato dal suo costo) non è necessariamente una variabile cruciale nel definire l'output: se l'unità è inefficiente, un minore impiego di energia non conduce necessariamente ad una diminuzione dell'output.

5 Conclusioni

Dall'analisi condotta possono essere tratte alcune conclusioni che non sorprenderanno gli analisti del settore. In particolare, volendo schematizzare per punti, possiamo dire che:

1. L'attuale struttura dell'offerta di depurazione è inadeguata a coprire il fabbisogno nazionale: questo, espresso in termini di abitanti equivalenti, è soddisfatto per circa tre quarti del totale; questo dato è ancor più preoccupante quando si consideri che soltanto l'80% dei depuratori esistenti è funzionante. Inoltre, una parte consistente dei depuratori attualmente in funzione non riesce a rispettare le norme vigenti in materia di abbattimento degli agenti inquinanti presenti nelle acque in ingresso.
2. La struttura dell'offerta è caratterizzata da impianti di piccole dimensioni. L'analisi econometrica indica che — per lo meno relativamente all'attività di denitrificazione — esistono dei consistenti ritorni di scala, cosicché per aumentare l'efficienza economica dell'attività di depurazione è necessario puntare, ove le caratteristiche del territorio lo rendano possibile, su depuratori di grandi dimensioni. Questa conclusione viene rafforzata dalla considerazione, che emerge in modo piuttosto netto dai dati ISTAT, che è normalmente negli impianti di dimensioni maggiore che si effettua l'attività di depurazione migliore in senso qualitativo.
3. L'analisi econometrica dell'efficienza del processo di denitrificazione delle acque reflue indica piuttosto chiaramente che molti dei depuratori presenti nel nostro campione non sono da considerarsi efficienti in senso economico. Sull'analisi pesa tuttavia la cattiva qualità dei dati di partenza, ciò che suggerisce la necessità di una migliore e più sistematica attività di raccolta dei dati come condizione preliminare per un effettivo controllo dell'efficienza economica dell'attività di depurazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] Arnold, Bardhan, Cooper e Kumbhakar (1996), "New Uses of DEA and Statistical Regressions for Efficiency Evaluation and Estimation — With an Illustrative Application to Public Secondary Schools in Texas", *Annals of Operations Research*, n. 66, pp. 255-278.
- [2] Azienda Po-Sangone (1996), *Indagine sui grandi impianti di depurazione con potenzialità superiore a 50.000 A.E.*
- [3] Bardhan, Cooper e Kumbhakar (1998), "A Simulation Study of Joint Uses of DEA and Statistical Regressions for Production Function Estimation and Efficiency Evaluation", *Journal of Productivity Analysis*, n. 9, pp. 249-278.

- [4] Charnes A., W. W. Cooper, A.Y. Lewin, and L. M. Seiford (1994), *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- [5] Fried, H.O., Knox Lovell, C.A. e Schmidt, S.S., (1993), *The measurement of productive efficiency*, Oxford University Press.
- [6] Greene, W. (1993) "The econometric approach to efficiency analysis", in Fried, H.O., Knox Lovell, C.A. e Schmidt, S.S., (cur.), *The measurement of productive efficiency*, Oxford University Press.
- [7] ISTAT (1996), *Gli impianti di depurazione delle acque reflue urbane. Anno 1993.*, Informazioni, n.3.
- [8] ISTAT (1998), *Il processo di depurazione e la qualità delle acque reflue urbane. Anno 1993*, Informazioni, n. 67.
- [9] ISTAT (1998), *Caratteristiche strutturali degli impianti di depurazione delle acque reflue urbane. Anno 1993*, Informazioni, n.76.
- [10] Kalirajan e Shand (1999), "Frontier Production Functions and Technical Efficiency Measures", *Journal of Economic Surveys*, vol. 13, n. 2, pp. 149-172.

Tabelle¹⁶

Tabella 6: Impianti esistenti o in corso di realizzazione. 1993. AE in migliaia

ripartizioni	impianti esistenti						in		totale	
	in esercizio		non in eserc.		totale		realizzazione		totale	
	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE
nord ovest	3026	15189	250	921	3276	16110	384	5277	3660	21387
nord est	2613	13853	179	208	2792	14061	228	2213	3020	16274
centro	1495	12013	242	990	1737	13003	325	1727	2062	14730
sud	996	13780	427	1270	1423	15050	356	3803	1779	18853
isole	440	3318	138	635	578	3953	119	1765	697	5718
totale	8570	58153	1236	4024	9806	62177	1412	14784	11218	76961

Tabella 7: Impianti in esercizio secondo il tipo di trattamento, la potenzialità e la zona altimetrica. 1993. AE in migliaia

potenzialità	primario		secondario		terziario		non indicato		totale	
	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE
fino a 1.999	3481		2702		122		81		6386	
2.000-9.999	80		1126		149		8		1363	
10.000-49.999	33		361		100		4		498	
oltre 50.000	4		113		79		0		196	
non indicata	94		23		0		10		127	
totale	3692		4325		450		103		8570	
zona altimetrica	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE
montagna interna	1777	509	970	2692	97	1567	33	24	2877	4792
montagna litoranea	17	93	50	1090	3	106	1	0	71	1289
collina interna	1530	472	1497	6913	119	8221	42	25	3188	15631
collina litoranea	113	1121	486	4935	51	1540	9	46	659	7642
pianura	255	437	1322	17560	180	10749	18	53	1775	28799
totale	3692	2632	4325	33190	450	22184	103	147	8570	58153

¹⁶I dati delle tabelle 6-14 sono tratti dalle pubblicazioni ISTAT [7, 8, 9]. Come il lettore attento noterà, non sempre i dati presentati dall'ISTAT nelle diverse pubblicazioni sono coerenti fra loro (vedi ad esempio le tabelle 7 e 10 relativamente alla numerosità degli impianti distinti per potenzialità).

Tabella 8: Impianti esistenti secondo l'ente gestore e per classe di potenzialità. 1993.
AE in migliaia

potenzialità	comune		az. speciale		consorzio		enti pubblici		altri		totale	
	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE	n.	AE
fino a 1.999	5698	2092	97	52	319	185	164	156	700	376	6978	2861
2.000-9.999	1148	3970	39	204	130	502	142	710	306	1124	1765	6510
10.000-49.999	260	4796	26	614	85	1622	114	1993	116	2261	601	11286
oltre 50.000	69	6061	28	6066	57	11852	30	4243	65	13297	249	41519
non indicata	197		2		3		3		8		213	
totale	7372	16919	192	6936	594	14161	453	7102	1195	17058	9806	62176

Tabella 9: Impianti in esercizio secondo il recapito finale dei reflui trattati e la zona altimetrica. 1993

zona altimetrica	corso d'acqua	mare	lago o invaso	altro recapito	non indicato	totale
montagna interna	2440	5	89	144	199	2877
montagna litoranea	47	16		2	6	71
collina interna	2616	4	24	325	219	3188
collina litoranea	474	95	1	69	20	659
pianura	1428	39	13	173	122	1775
totale	7005	159	127	713	566	8570

Tabella 10: Impianti in esercizio secondo la classe di portata media, la classe di potenzialità e il tipo di trattamento. 1993

potenzialità e trattamento	classe di portata media (m ³ / ora)								totale
	fino a 5	5-20	21-80	81-120	121-400	401-1200	1201-4000	oltre 4000	
fino a 1.999	4479	1537	108	13	5	2	3	3	6150
2.000-9.999	35	480	930	36	25	4	1	2	1513
10.000-49.999	6	4	77	131	290	34	5	2	549
oltre 50.000	1	0	4	4	42	101	53	26	231
non indicata	119	6	2	0	0	0	0	0	127
totale	4640	2027	1121	184	362	141	62	33	8570
primario	3191	376	79	17	22	3	1	3	3692
secondario	1333	1541	908	139	258	89	38	19	4325
terziario	34	97	129	26	81	49	23	11	450
non indicato	82	13	5	2	1	0	0	0	103
totale	4640	2027	1121	184	362	141	62	33	8570

Tabella 11: Impianti in esercizio, tonnellate di fango prodotto secondo la destinazione finale dello stesso. 1993, valori percentuali

destinazione		potenzialità				non indic.	totale
		fino a 1.999	2.000-9.999	10.000-49.999	oltre 50.000		
discarica	n.	50.8	47.8	44.7	54.4	11.8	48.9
	tonn.	54.6	45.0	64.2	58.6	47.4	57.1
incenerimento	n.	0.6	0.4	0.3	0.0		0.4
	tonn.	9.2	0.1	0.1	0.0		0.8
compostaggio	n.	4.3	7.1	11.1	0.5		5.9
	tonn.	4.8	25.2	8.6	0.1		5.7
agricoltura	n.	10.9	14.7	19.7	14.9		13.7
	tonn.	1.8	9.5	10.3	11.0		9.9
stoccaggio	n.	28.3	20.5	6.1	3.1	88.2	20.9
	tonn.	28.1	13.4	2.0	0.9	52.6	5.4
impianto di dep.	n.	2.8	2.2	1.3	0.0		2.2
	tonn.	0.5	1.7	0.2	0.0		0.3
più destinazioni	n.	2.3	7.3	16.8			8.0
	tonn.	1.0	5.2	14.6	29.5		20.8
totale	n.	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	tonn.	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabella 12: Fango prodotto per AE secondo la potenzialità degli impianti. 1993

potenzialità	tonn. annue/AE
fino a 1.999	0.251
2.000-9.999	0.101
10.000-49.999	0.050
oltre 50.000	0.040
totale	0.050

Tabella 13: Rispetto dei parametri della l. 319/76. Quote percentuali di impianti e di AE secondo il tipo di trattamento. 1993

parametro	quota %	tipologia di trattamento						totale	
		primario		secondario		terziario		rispetto della norma	
		rispetto della norma sempre	mai	rispetto della norma sempre	mai	rispetto della norma sempre	mai	sempre	mai
BOD ₅	n.	17.6	60.3	63.8	5.2	77.4	4.2	63.3	8.1
	AE	1.5	95.6	67.5	4.0	78.2	3.5	72.1	4.7
COD	n.	17.9	57.7	76.6	3.1	83.0	2.6	74.6	5.8
	AE	2.6	94.4	77.7	2.3	53.7	0.2	65.2	2.2
solidi sospesi	n.	24.0	44.0	80.0	2.6	85.3	2.6	77.5	5.0
	AE	3.1	91.3	85.2	2.3	94.1	0.3	88.3	2.4
fosforo	n.	0	73.7	7.3	33.8	13.0	33.0	7.9	35.9
	AE	0	98.0	4.4	42.6	6.7	22.6	5.4	33.9
azoto	n.	0	94.5	1.9	75.3	3.4	67.6	2.1	75.0
	AE	0	99.6	0.3	85.6	2.3	67.1	1.4	75.6

Nota: I dati si riferiscono agli impianti che hanno monitorato mensilmente i valori in uscita per tutto il corso del 1993.

Tabella 14: Percentuali di abbattimento secondo il tipo di trattamento e la classe di potenzialità. 1993

potenzialità	tipologia di trattamento			
	primario	secondario	terziario	totale
BOD ₅				
fino a 1.999	54.5	81.8	79.1	79.5
2.000-9.999	29.2	82.6	88.4	81.8
10.000-49.999	25.4	82.1	88.6	80.7
oltre 50.000		86.2	88.5	87.1
totale	43.3	82.4	87.0	81.2
COD				
fino a 1.999	50.8	77.3	77.2	75.2
2.000-9.999	27.3	78.5	84.4	77.9
10.000-49.999	19.8	79.2	86.4	78.2
oltre 50.000		83.0	84.8	83.7
totale	40.7	78.4	83.9	77.4
solidi sospesi				
fino a 1.999	56.5	78.3	81.3	76.1
2.000-9.999	42.5	78.2	84.3	77.7
10.000-49.999	31.9	78.9	84.8	77.6
oltre 50.000		86.0	87.7	86.7
totale	48.7	79.0	85.1	78.1
fosforo totale				
fino a 1.999	39.6	57.9	54.5	56.5
2.000-9.999	27.9	58.2	69.2	58.5
10.000-49.999	26.6	58.3	66.2	58.5
oltre 50.000		57.3	60.8	58.7
totale	32.4	58.0	64.0	57.8
azoto totale				
fino a 1.999	43.5	67.5	61.2	65.2
2.000-9.999	26.6	65.4	68.7	64.6
10.000-49.999	24.0	64.2	66.5	62.5
oltre 50.000		51.6	70.8	59.5
totale	35.2	64.9	67.4	63.8