

# Processi biologici innovativi e modellazione matematica per l'innovazione dei sistemi di depurazione

A seguito di 30 anni di ricerca sperimentale ed applicata, è stato dimostrato che l'implementazione del processo anammox per il trattamento delle acque reflue rappresenta un metodo più economico ed efficiente per rimuovere l'azoto dalle acque reflue rispetto ai metodi tradizionali. Nel presente lavoro si descrive l'applicazione di questo processo al trattamento del percolato di discarica in un impianto in piena scala, evidenziando il ruolo della modellazione matematica sia in fase previsionale che per l'ottimizzazione del processo.

DOI 10.12910/EAI2023-015

di **Michela Langone, Davide Mattioli, Gianpaolo Sabia, Luigi Petta**, Laboratorio Tecnologie per l'uso e gestione efficiente di acqua e reflui - ENEA

**L'**azoto è un elemento essenziale per la vita, ma in concentrazioni elevate può provocare gravi problemi ambientali. Quando le acque reflue contenenti azoto raggiungono i corpi idrici naturali, l'azoto può favorire fenomeni di eutrofizzazione caratterizzati dalla crescita eccessiva di alghe e piante acquatiche, le cui biomasse tendono, a seguito della fine del ciclo vitale, ad accumularsi e degradarsi, creando ambienti con concentrazioni di ossigeno al di sotto dei valori necessari a sostenere la vita degli organismi acquatici. **Per ridurre l'azoto veicolato in ambienti naturali tramite le acque reflue, esistono diverse tecniche di trattamento e tra queste i processi biologici rivestono un ruolo fondamentale.**

I processi biologici tradizionali, come ad esempio i trattamenti a fanghi attivi, utilizzano principalmente la nitrificazione e la denitrificazione per rimuovere l'azoto dalle acque reflue. La nitrificazione è il proces-

so attraverso il quale, utilizzando ossigeno, l'ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ) viene ossidato a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e successivamente a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediante l'azione di due differenti gruppi di batteri nitrificanti: gli ammonio-ossidanti (AOB) e i nitrito-ossidanti (NOB).

La denitrificazione, invece, è un processo articolato in quattro fasi principali, attraverso il quale i batteri coinvolti riducono i nitrati in azoto gassoso, utilizzando composti organici come fonte di carbonio. Questi processi di depurazione tradizionali presentano, tuttavia, alcuni svantaggi rappresentati in primo luogo dall'elevata richiesta di ossigeno, che determina elevati consumi energetici per la fornitura continua di ossigeno mediante sistemi di aerazione dedicati, e dall'elevata produzione di fanghi, ed in secondo luogo dalla possibile produzione di gas serra come l'ossido di azoto, con un potenziale di riscaldamento globale sui 100 anni di circa 300 volte maggiore rispetto alla  $\text{CO}_2$ .

**L'implementazione del processo anammox per il trattamento delle acque reflue**

**La scoperta dei batteri anammox** (abbreviazione di "ANAerobic AM-Monium OXidation"), avvenuta negli anni '90, ha contribuito in modo determinante alla comprensione del ciclo dell'azoto. Questi batteri anaerobi sono in grado di convertire l'ammonio ( $\text{NH}_4$ ) e i nitriti ( $\text{NO}_2^-$ ) in azoto gassoso ( $\text{N}_2$ ), senza la necessità di ossigeno. Tale scoperta ha avuto un impatto significativo anche sull'industria del trattamento delle acque reflue, molto spesso caratterizzate da concentrazioni significative di azoto, che può provenire da diverse fonti come ad esempio le attività residenziali ma, soprattutto, le attività produttive ovvero l'agricoltura, l'allevamento, le discariche e l'industria.

**A seguito di 30 anni di ricerca sperimentale ed applicata, è stato dimostrato che l'implementazione del processo anammox per il trattamento delle acque reflue rappre-**

**senta un metodo più economico ed efficiente per rimuovere l'azoto dalle acque reflue, rispetto ai metodi tradizionali.**

**Il processo anammox può essere applicato, in combinazione con altri processi biologici, sia per il trattamento di reflui ad elevato tenore di azoto e con basso rapporto BOD/N, quali i percolati di discarica e gli effluenti della digestione anaerobica, sia nella linea acque degli impianti di depurazione civili per il trattamento dei reflui municipali, caratterizzati da minori concentrazioni di azoto.** In particolare, il processo di parziale nitrificazione-anammox (PN/A), sfruttando il metabolismo dei batteri AOB e dei batteri anammox, entrambi autotrofi, consente di rimuovere l'azoto, dimezzando il fabbisogno di ossigeno, annullando la richiesta di sostanza organica e riducendo la produzione di fango di supero. Anche la possibilità di coesistenza di batteri denitrificanti con i batteri anammox è stata ampiamente dimostrata e discussa, presentando una serie di vantaggi legati alla presenza del carbonio nelle acque reflue e all'efficienza di rimozione dell'azoto totale.

I bassi tassi di crescita dei batteri anammox e AOB rendono necessario lo sviluppo di reattori con un elevato tempo di ritenzione della biomassa, come i reattori basati sul biofilm, i sistemi a letto fisso, i bioreattori sequenziali (SBR), i bioreattori a letto mobile (MBBR), i bioreattori a membrana (MBR) e i reattori a biomassa granulare. Inoltre, il processo PN/A richiede una attenta gestione. Esso può, infatti, essere gravemente inibito da diversi fattori, come ad esempio da elevati valori di concentrazioni di substrato ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), o dalla presenza di sostanza organica, sali, solfuri, metalli pesanti e fosfati. Anche le condizioni operative, quali la miscelazione, la temperatura, l'ossigeno disciolto e il pH possono avere un impatto negativo sul processo PN/A.

#### Ottimizzare i processi depurativi biologici

Le suddette tematiche rientrano tra gli ambiti di studio del Laboratorio Tecnologie per l'uso e gestione efficiente di acqua e reflui di ENEA, con particolare riferimento ai processi depurativi biologici che vengono indagati secondo un approccio

combinato sia di tipo sperimentale che modellistico, finalizzato alla loro ottimizzazione. **Nell'ambito del programma di Ricerca di Sistema Elettrico nazionale 2019 – 2021 (finanziato dal MISE), in collaborazione con l'Università di Trento, l'Università Federico II di Napoli e l'Agenzia per la Depurazione della Provincia Autonoma di Trento, sono state poste a confronto le prestazioni di due diversi processi innovativi di rimozione dell'azoto in reattori di tipo SBR in scala reale per il trattamento del percolato vecchio di discarica (Lavis, Trento): il processo PN/A e il processo SPND (parziale nitrificazione e denitrificazione).** Dall'analisi dei dati operativi dell'impianto si deduce un'elevata efficienza di rimozione dell'azoto ammoniacale sia per l'SBR<sub>PN/A</sub> che per l'SBR<sub>SPND</sub>, pari rispettivamente al 94% e 95%.

Prendendo a riferimento dati operativi reali, mediante l'impiego del software di modellazione BioWin® (Figura 1), sono state simulate diverse possibili condizioni operative con l'obiettivo di studiare i relativi impatti sulle prestazioni del processo e valutare il contributo alla rimozione

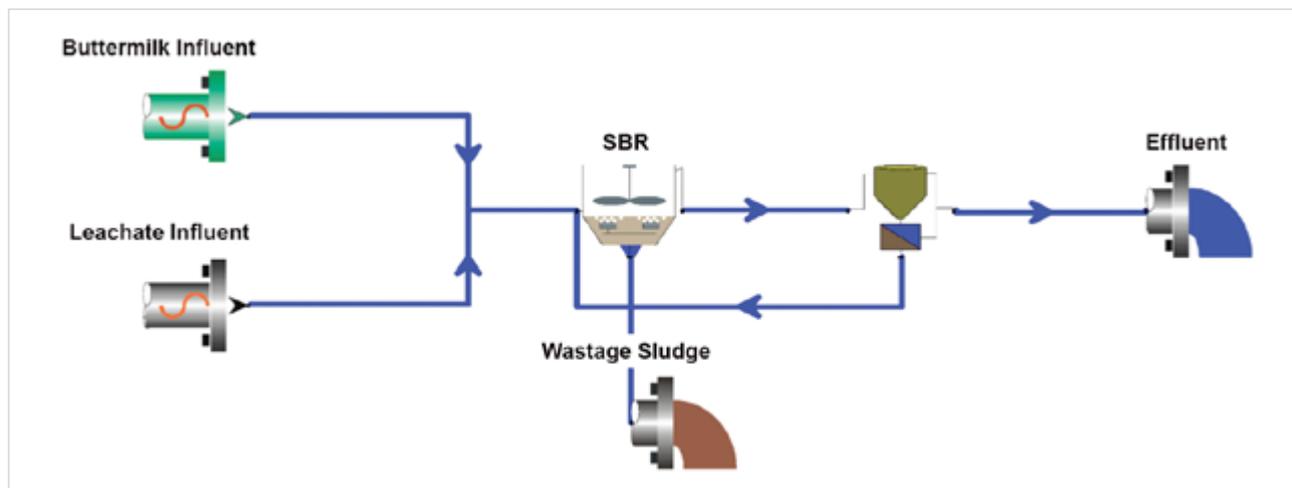


Figura 1. Schema dell'impianto SBR modellato in BioWin®.

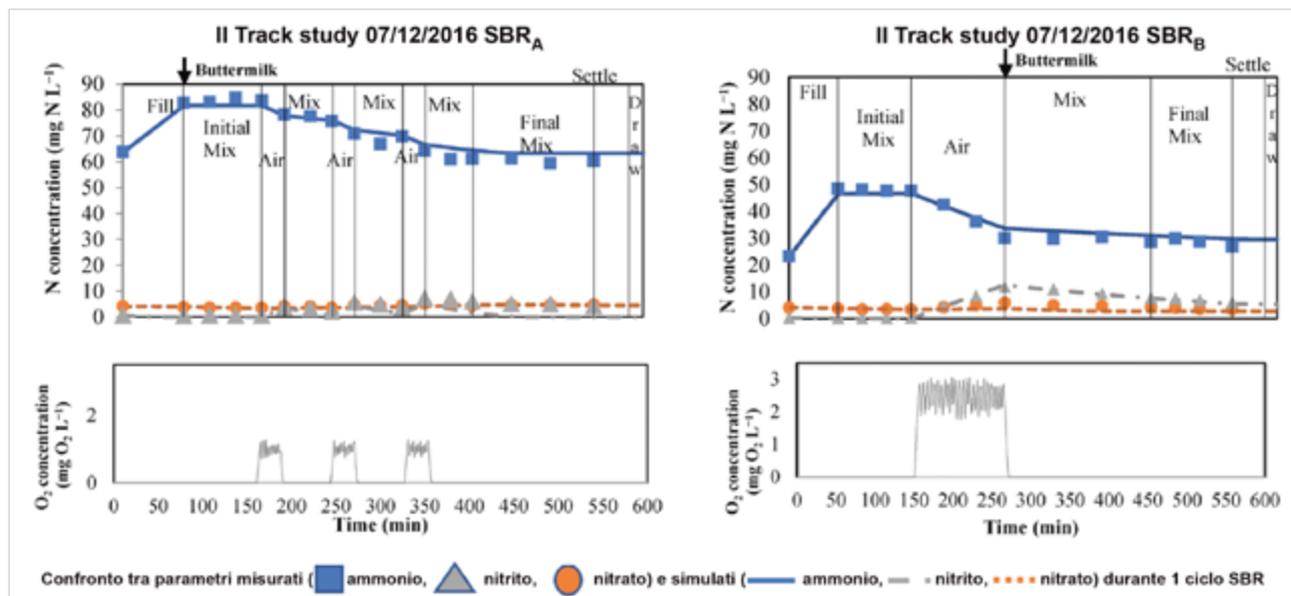


Figura 2. Simulazioni del processo PN/A (SBR<sub>A</sub>) e SPND(SBR<sub>B</sub>).

dell'azoto da parte dei batteri coinvolti, ovvero AOB, NOB, anammox e batteri eterotrofi ordinari (Figura 2). I modelli hanno evidenziato che:

- i) le elevate concentrazioni di ammoniaca libera, condizione tipica nei percolati di discarica, inibiscono i batteri NOB, favorendo il processo di nitrificazione;
- ii) la presenza simultanea di ammonio e nitrito e la loro capacità di recuperare dall'inibizione da ossigeno, consente lo sviluppo dei batteri anammox;
- iii) la scarsa disponibilità di carbonio organico nel refluo da trattare determina il prevalere del processo anammox sul processo di denitrificazione;
- iv) viceversa, un incremento della disponibilità di carbonio organico mediante una fornitura esterna (i.e. latticello) provoca una rapida riduzione della biomassa anammox rispetto alla biomassa eterotrofa denitrificante.

I modelli SBR sviluppati in questo studio sono stati applicati per ot-

timizzare le condizioni operative dell'impianto di trattamento del percolato in esame, con l'obiettivo di massimizzare le efficienze depurative e minimizzare i consumi energetici. Considerando il solo processo PN/A, la modellazione matematica ha consentito di simulare diversi interventi di efficientamento energetico, quali:

- a) la riduzione del quantitativo di latticello introdotto nell'SBR<sub>PN/A</sub> in modo da evitare la competizione della biomassa eterotrofa con la biomassa anammox per il consumo di nitrito;
- b) la riduzione della concentrazione di ossigeno presente all'interno del reattore SBR<sub>PN/A</sub> verificando ed analizzando sia le efficienze depurative ottenute, sia il risparmio energetico ed economico;
- c) la riduzione della durata della fase di miscelazione e della potenza impiegata nei mixer.

**I risultati delle simulazioni condotte hanno confermato che gli interventi proposti consentono di man-**

**tenere elevate rimozioni di azoto dell'impianto, che rimangono in linea con gli obiettivi del trattamento** anche in assenza di dosaggio di carbonio esterno (si rileva un aumento della concentrazione di nitrito medio in tutti i periodi analizzati, che però si mantiene sempre al di sotto di 20 mg l<sup>-1</sup>). La riduzione della concentrazione di ossigeno da 0,85 a 0,6 mg l<sup>-1</sup> permette di ridurre la concentrazione media di nitrito e di ottenere efficienze di rimozione pressoché simili. Infine, la minore durata delle fasi di miscelazione non compromette l'efficienza di rimozione del processo, dimostrando l'eccessiva durata di questa fase così come attualmente impostata in impianto. Rispetto allo scenario di riferimento, la combinazione dei diversi interventi di efficientamento esaminati comporta un **risparmio nei consumi energetici complessivi del 20%**, grazie alla maggiore efficienza delle fasi di aerazione e miscelazione. Si evidenzia che tutte le soluzioni individuate sono di carattere puramente

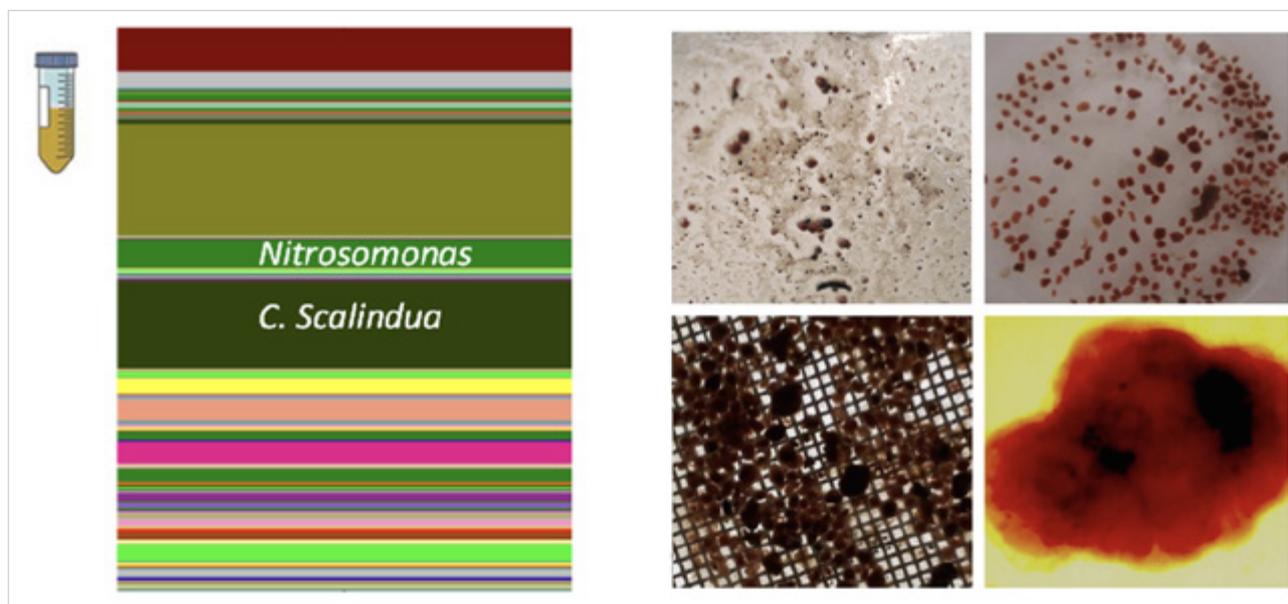


Figura 3. Identificazione microbica mediante tecnica basata sulle sequenze del gene rRNA 16S e analisi morfologica del processo PN/A.

gestionale e non richiedono alcun costo di investimento, ma soltanto modifiche nella impostazione dei cicli di trattamento dell'impianto SBR. Ulteriori possibili interventi di efficientamento a costo zero sono quelli che prevedono l'eliminazione dell'idrociclone – che nel caso specifico viene utilizzato solo per il lavaggio dei granuli di biomassa anammox senza effettuare una vera separazione della biomassa fioccosa e che in base ai risultati della modellazione non pare essere necessario al processo – e la sostituzione dei quattro mixer attuali con due adattivi di minore potenza. Considerando l'insieme dei diversi interventi di efficientamento proposti, l'implan-

to potrebbe arrivare ad un consumo medio annuo di circa 15.000 kWh che, rapportato al carico di azoto rimosso di 8.800 kgN anno<sup>-1</sup>, restituisce un consumo unitario di circa 1,8 kWh kgN<sup>-1</sup> rimosso, pari a circa il 30% degli attuali consumi dell'impianto in una configurazione non ottimizzata.

Infine, i modelli sono stati applicati anche per stimare i tassi di produzione di protossido di azoto da parte dei processi PN/A e SPND, rispettivamente pari a 0,5-3,7% e 0,8-10% del carico di azoto in ingresso.

**Ad oggi l'attività di ricerca prosegue, con la collaborazione di diverse università italiane, al fine ulteriore di dimostrare l'importan-**

**za della caratterizzazione microbiologica nella comprensione dei processi biologici innovativi nonché nella corretta modellazione matematica** (Figura 3). L'introduzione, infatti, di tecniche di amplificazione genomica, oltre che lo sviluppo di tecnologie di sequenziamento genetico di nuova generazione, consentono di approfondire la conoscenza del microbioma che si sviluppa nei processi biologici di depurazione delle acque reflue e di ottimizzare, di conseguenza, la scelta di processi e parametri cinetici all'interno delle simulazioni matematiche.

per info: [michela.langone@enea.it](mailto:michela.langone@enea.it)

#### Referenze

- Lanzetta A., Mattioli D., Di Capua F., Sabia G., Petta L., Esposito G., Andreottola G., Gatti G., Merz W., Langone M., 2021. Anammox-Based Processes for Mature Leachate Treatment in SBR: A Modelling Study. *Processes*, 9(8), 1443; <https://doi.org/10.3390/pr9081443>
- Langone M., Ferrentino R., Merz W., Mattioli D., Petta L., Andreottola G., 2023. Microbial community composition from full-scale anammox-based reactors treating mature landfill leachate. Submitted.
- Mattioli D., Giuliano A., Sabia G., Petta L., Ferraris M., Granieri M., Nuzzi R., Langone M. 2021. Efficientamento energetico di impianti di depurazione in ottica di economia circolare. Report Ricerca di Sistema Elettrico. Report RdS/PTR2020/096.