

Il ruolo delle biotecnologie nella gestione dei rifiuti organici e nella depurazione delle acque reflue

La crescente pressione ambientale richiede un cambio di paradigma verso un'economia circolare in cui i rifiuti organici e le acque reflue diventino risorse. Le biotecnologie ambientali possono offrire soluzioni sostenibili per il recupero di energia, nutrienti e materiali ad alto valore aggiunto. Processi come la digestione anaerobica e il compostaggio consentono di ridurre l'impatto ambientale e generare biometano, recuperare CO₂ a fini industriali e produrre ammendanti compostati. Le prospettive future puntano al recupero di fosforo e biopolimeri come i poli-idrossialcanoati, e all'ottimizzazione dei processi già consolidati per la realizzazione di impianti di bioraffineria.

DOI 10.12910/EAI2025-071

di Alessandro Spagni, Antonio Giuliano, Luigi Sciubba – Laboratorio ENEA Tecnologie per la Gestione Circolare di Acqua e Reflui, Giulio Gazzola, Paolo Roberto Di Palma – Laboratorio ENEA Tecnologie per Rifiuti e Materie Prime Seconde – ENEA

La crescente pressione antropica sugli ecosistemi, unita al depauperamento delle risorse naturali e alla crisi climatica, impone una transizione urgente da un modello produttivo ed economico lineare ad uno circolare. In quest'ottica, la pressione ambientale degli ultimi decenni derivante dalla produzione di rifiuti e di acque reflue ha reso urgente l'adozione di strategie sostenibili per la loro gestione e trattamento (Spagni et al., 2016; 2023). In questo contesto, le biotecnologie ambientali possono rappresentare delle soluzioni promettenti per trasformare i rifiuti organici da problema a risorsa, favorendo approcci di economia circolare.

I rifiuti organici e i flussi di acque reflue, tradizionalmente gestiti come scarti da smaltire, sono infatti ricchi di componenti di valore come nutrienti (azoto, fosforo), sostanza organica, biomolecole ad alto valore aggiunto ed in ultimo energia. Attraverso l'impiego di processi biotecnologici è oggi possibile ridurre l'impat-

to ambientale dei reflui e dei residui organici e recuperare materie prime e prodotti di valore, come bioenergia (p.e. biogas-biometano), bioplastiche, anidride carbonica, nutrienti e acqua riutilizzabile. Tecnologie quali ad esempio la digestione anaerobica e il compostaggio, implementati in bioreattori possono costituire sistemi di bioraffineria ridefinendo il ruolo dei tradizionali impianti di trattamento, trasformandoli in impianti di recupero risorse (Rittmann e McCarty, 2020).

Di seguito, si propone di analizzare delle biotecnologie in studio in ENEA per il trattamento e il recupero di risorse da rifiuti organici e acque reflue, esaminando le sfide tecnologiche ancora aperte.

Digestione Anaerobica: Bioraffineria Integrata per il recupero di risorse

La larga maggioranza dei sistemi di trattamento delle acque reflue include almeno un processo biologico che, sfruttando comunità microbi-

che, degrada la sostanza organica presente negli effluenti. Tali processi prevedono generalmente l'aerazione dell'acqua di scarico in presenza di biomassa microbica, che ossida gli inquinanti organici e ne riduce il carico in uscita. Con l'introduzione della nuova Direttiva sulle acque reflue urbane (Dir.UE 2024/3019), che impone obiettivi più stringenti per la rimozione dei microinquinanti (come residui farmaceutici e composti emergenti), sarà necessario implementare trattamenti avanzati e più intensivi. Questi interventi, pur garantendo una qualità dell'effluente superiore, comporteranno maggiori consumi energetici rispetto agli impianti convenzionali. In tale contesto, risulta cruciale sviluppare strategie e tecnologie capaci di migliorare l'efficienza energetica dei processi di depurazione, al fine di contribuire al raggiungimento dell'obiettivo di neutralità energetica del settore entro il 2045.

La digestione anaerobica rappresenta uno dei processi biotecnologici più consolidati per il trattamento della

frazione organica contenuta nei rifiuti e nelle acque reflue, grazie alla sua capacità di combinare la riduzione del carico inquinante con il recupero di risorse. Attraverso una sequenza di processi microbici in condizioni anaerobiche, la sostanza organica biodegradabile viene convertita in biogas (contenente principalmente metano e anidride carbonica), e in un digestato ricco di nutrienti (Figura 1).



Figura 1 - Immagine di un campione di biomassa anaerobica granulare prelevato da un digestore anaerobico sperimentale presso ENEA di Bologna.

Il biogas prodotto costituisce una fonte energetica rinnovabile, facilmente utilizzabile per la produzione combinata di calore ed energia elettrica e/o purificabile a biometano per poter essere immesso nella rete di distribuzione del gas naturale o utilizzato come biocarburante nel settore dei trasporti (Giuliano et al., 2023). Parallelamente, il digestato derivante dal processo, è una potenziale matrice per il recupero del fosforo e di altre sostanze (De Carolis et al., 2019).

Le più recenti ricerche di settore mirano a ottimizzare la resa del biometano e il recupero dei nutrienti attraverso l'integrazione di approcci biotecnologici innovativi.

Tra questi ritroviamo ad esempio, l'upgrading biologico del biogas basato sulla metanogenesi idrogenotrofa, ovvero un processo che sfrutta

la capacità di alcuni microrganismi di catalizzare, in presenza di idrogeno, la conversione dell'anidride carbonica in biometano. Tale processo, attualmente in fase di sviluppo sperimentale da parte del Laboratorio Tecnologie per la Gestione Circolare di Acqua e Reflui presso il C.R. ENEA del Brasimone (Figura 2), risulta particolarmente interessante dato che l'idrogeno necessario per la produzione di biometano può essere generato in maniera sostenibile a partire dal surplus di energia elettrica rinnovabile mediante l'elettrolisi dell'acqua; in questo contesto, gli impianti di trattamento reflui potrebbero fungere da infrastrutture strategiche per l'implementazione di modelli di bioeconomia circolare a supporto della transizione energetica e la decarbonizzazione (Giuliano et al., 2021). In prospettiva, l'evoluzione della digestione anaerobica sembra essere orientata verso sistemi di bioraffineria circolare, capaci di valorizzare i flussi contenenti sostanza organica trasformandoli in prodotti ad alto valore aggiunto, fertilizzanti, ed energia (Spagni et al., 2023).



Figura 2 - Immagine di bioreattore pilota per la produzione idrogenotrofa di metano presso il Centro Ricerche ENEA di Brasimone.

Un altro importante contributo alla transizione verso l'economia circolare può essere rappresentato dal riutilizzo irriguo delle acque reflue depurate, pratica regolamentata e promossa dalle più recenti normative

europee come il Reg.UE 2020/741 e la Direttiva UE 2024/3019. In quest'ottica, ai fini di realizzare un riutilizzo sicuro ed efficace, i ricercatori ENEA del laboratorio SSPT-EC-AR, nell'ambito dello Spoke 8 del progetto CN Agritech (Nutrient recovery from waste to produce mineral fertilizers and promoting water recovery), hanno di recente installato presso il depuratore municipale HERA di Cesena un innovativo strumento che consente il monitoraggio online e real time della carica batterica (*Escherichia coli*) nelle acque reflue, parametro incluso proprio nel Reg.UE 741.

Il compostaggio: una soluzione sostenibile per la gestione degli scarti organici

Il compostaggio rappresenta una delle strategie più efficaci e sostenibili per il trattamento dei rifiuti organici, trasformandoli in una risorsa per l'ambiente. Attraverso processi biologici aerobici, microrganismi come batteri e funghi degradano la sostanza organica biodegradabile, generalmente proveniente da scarti alimentari, residui vegetali o sfalci verdi, fino a ottenere il compost, un composto organico stabile, ricco di humus e nutrienti. Questo prodotto può essere impiegato come ammendante naturale nei suoli agricoli e urbani, migliorando la struttura del terreno, la capacità di ritenzione idrica e la disponibilità di nutrienti per le piante.

Il punto di forza del compostaggio è la sua scalabilità, ovvero la capacità di realizzare il processo a diverse dimensioni, da quella domestica passando al compostaggio di prossimità, o di piccola scala, fino al processo industriale. All'aumentare della scala si richiede l'adozione di sistemi sempre più complessi, come le compostiere elettromeccaniche o gli impianti industriali, che consentono un controllo più preciso di temperatura, umidità

e aerazione (spesso forzata), accelerando i tempi e garantendo una qualità omogenea del compost.

La figura 3 mostra due impianti pilota per la produzione di compost nell'ottica di una gestione sostenibile e a "km 0" della frazione organica dei rifiuti solidi urbani prodotti da piccole comunità, sviluppati presso il centro ENEA di Casaccia.



Figura 3 - Immagine di due compostiere per piccole comunità presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia.

Conclusioni e prospettive

La frazione organica dei rifiuti e delle acque reflue rappresenta oggi una vera e propria "miniera" di risorse recuperabili, fondamentali a supporto di uno sviluppo sostenibile e della transizione verso un'economia circolare. Biotecnologie oggi ben consolidate permettono il recupero e valorizzazione di risorse quali, ad esempio acqua, energia, e materiale ammendante.

La frontiera della ricerca si sta dirigendo verso lo studio e sviluppo di consorzi microbici specializzati, in grado di convertire selettivamente substrati organici complessi in prodotti target di elevato valore aggiunto. Tra questi, negli ultimi anni, il fosforo e i biopolimeri rivestono un ruolo di crescente interesse scientifico ed industriale.

Il fosforo, elemento essenziale per la vita e risorsa non rinnovabile, può essere recuperato da fanghi di depurazione, digestati e altri residui organici attraverso la combinazione di processi biologici e chimici, otte-

nendo composti riutilizzabili come fertilizzanti. Il recupero del fosforo è particolarmente significativo, poiché si tratta di un elemento inserito nella lista delle materie prime critiche a causa il suo scarso approvvigionamento da parte dell'Unione Europea (De Carolis et al., 2019). Nell'ambito dello Spoke 8 del progetto CN Agri-tech i ricercatori ENEA hanno recentemente testato l'idrolisi enzimatica come tecnica di recupero del fosforo dai fanghi depurazione tal quali, ottenendo un idrolizzato liquido da usare come alternativa ai fertilizzanti fosfatici di sintesi chimica.

Alcuni microrganismi sono in grado di sintetizzare biopolimeri, quali ad esempio i poli-idrossialcanoati utilizzando come substrato carbonioso la sostanza organica di diversa origine (Figura 4). Questi materiali offrono un'alternativa ecologica alle plastiche tradizionali di origine fossile, con applicazioni che spaziano dal packaging alla medicina. Il recupero integrato di nutrienti e biopolimeri dalla sostan-

za organica residua non solo riduce l'impatto ambientale dei rifiuti, ma trasforma gli scarti in risorse strategiche, favorendo la sostenibilità dei sistemi produttivi e la tutela degli ecosistemi.

L'integrazione tra biotecnologie ambientali e l'ottimizzazione dei processi, supportata da strumenti di controllo ed automazione, potrà renderli più efficienti, ridurre il consumo energetico e gli impatti ambientali, promuovendo la transizione ecologica e favorendo la creazione di una filiera industriale più avanzata.

La piena implementazione di questo approccio richiede l'ottimizzazione dei processi esistenti e lo sviluppo di soluzioni innovative per migliorare l'efficienza dei sistemi biotecnologici. La sfida scientifica e tecnologica sarà quella di sviluppare piattaforme biotecnologiche in grado di valorizzare ogni flusso organico come fonte di nuovi materiali, nutrienti ed energia.

per info: alessandro.spagni@enea.it

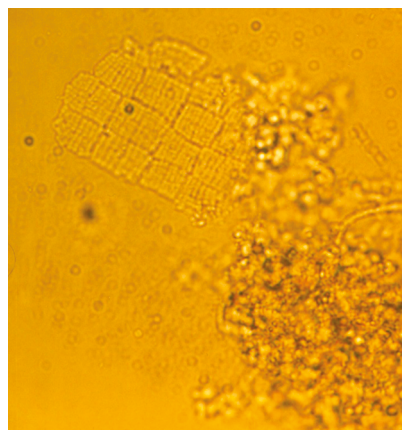


Figura 4 - Immagine al microscopio ottico (1000 x) di un campione di biomassa prelevata da un bioreattore sperimentale presso ENEA di Bologna. Si osservano aggregati regolari di cellule, disposte in file parallele e sovrapposte a formare piastre rettangolari, tipiche del genere *Lampropedia*, batterio indicato con potenziali capacità di accumulare fosforo e produrre biopolimeri (poli-idrossialcanoati)

Riferimenti bibliografici

1. De Carolis R., Spagni A., Cappucci S., Claps D., 2019. La Piattaforma Italiana del Fosforo. *Energia, ambiente e innovazione*, 3/2019: 141-144.
2. Giuliano A., Cellamare C.M., Chiarini L., Tabacchioni S., L. Petta, 2023. Evaluation of the controlled hydrodynamic cavitation as gas mass transfer system for ex-situ biological hydrogen methanation. *Chemical Engineering Journal*, 471: 144475. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144475>.
3. Rittmann B.E., McCarty P.L., 2020. *Environmental biotechnology: principles and application*. 2nd Ed. McGraw Hill. 656 pp.
4. Giuliano A. Petta L. 2021 The role of hydrogen in the circular management of wastewater treatment plants . *Energia Ambiente e Innovazione*. 1/2021: 148-150 DOI 10.12910/EAI2021-030.
5. Spagni A., Ferraris M., Mattioli D., Petta L., Brunori C., 2016. Water-energy nexus: la parte oscura del ciclo dell'acqua, cambiamenti climatici ed economia circolare. *Energia, ambiente e innovazione*, 1/2019: 82-87.
6. Spagni A., Ferraris M., Sabia G., De Carolis R., 2023. Recupero di materie dalle acque reflue in ottica di economia circolare. *Energia, ambiente e innovazione*, 1/2023: 51-54.

