

Attualità e prospettive per il Biogas e il Biometano

Paolo Balsari, Accademia dei Georgofili - Università degli Studi di Torino

Elio Dinuccio, Università degli Studi di Torino

Riassunto

Il processo di digestione anaerobica delle biomasse gioca un ruolo cruciale nella transizione verso un sistema energetico più sostenibile e a basse emissioni di gas inquinanti. La sua importanza risiede nella capacità di trasformare diverse tipologie di materiali organici in biogas, una risorsa versatile, utilizzabile per la produzione di energia elettrica e termica e il trasporto sostenibile (biometano). L'Italia è ancora agli inizi nello sviluppo del biometano, ma il potenziale è notevole, soprattutto nel settore dei veicoli che utilizzano il bioLNG (Biomethane Liquefied Natural Gas) con conseguenti possibilità di investimento e generazione di posti di lavoro a livello locale.

I recenti sviluppi della strategia energetica nazionale hanno determinato nuovi scenari e interessanti prospettive di sviluppo nel settore dell'agricoltura, concentrando l'attenzione sulla valorizzazione dei reflui zootecnici, i residui colturali e dell'industria agro-alimentare. Le esigenze che si profilano riguardano aspetti tecnici e operativi sulla totalità della filiera. Nella relazione vengono esaminate le prospettive di sviluppo del settore e le principali criticità, e sono condivise alcune esperienze di ricerca condotte su questa specifica tematica, con particolare riferimento agli aspetti legati all'ottimizzazione dell'efficienza energetica ed ambientale degli impianti.

Abstract

The anaerobic digestion process of biomass plays a crucial role to the transition to a more sustainable and low-emission energy system. Its relevance derives from its capability to convert different organic materials into biogas, a versatile biofuel that can be used to generate electrical and thermal energy as well as sustainable transportation (biomethane). Italy is still in its early stages of biomethane development, but the potential is substantial, especially in the field of vehicles utilizing bioLNG (Biomethane Liquefied Natural Gas), leading to investment opportunities and local job creation.

Recent developments in the national energy strategy have created new challenges and attractive opportunities in the agriculture sector, with an emphasis on exploiting animal waste, crop residues, and agri-food industry byproducts. The emerging needs concern technological and operational issues across the whole supply chain.

This report explores the development prospects of the sector, highlighting opportunities and key challenges. Some research experiences on this topic are also presented and discussed, with a particular focus on the energy and environmental efficiency optimization of anaerobic digestion plants.

Introduzione

L'impiego di fonti energetiche sostenibili è uno dei pilastri delle iniziative globali per affrontare le sfide del cambiamento climatico. Nel contesto europeo, la strategia di sviluppo delle Fonti di Energia Rinnovabile (FER) guida la corsa verso l'ambizioso obiettivo di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, delineando un percorso per affrontare le crescenti preoccupazioni ambientali e raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.

In questo scenario, emerge il ruolo del processo di digestione anaerobica delle biomasse per la produzione di biogas, una risorsa versatile, utilizzabile per la produzione di energia elettrica e termica e il trasporto sostenibile (biometano). Inoltre, il digestato, prodotto residuo di tale processo, si

configura come un fertilizzante organico di elevata qualità che garantisce l'apporto di nutrienti essenziali per le colture in sostituzione dei concimi di sintesi.

In Italia, lo sviluppo del settore della produzione di energia da biogas ha visto un forte sviluppo a partire dal 2008, a seguito dell'introduzione delle tariffe omnnicomprensive per l'incentivazione alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili previste dal DM 18/12/2008. Attualmente, sul territorio nazionale sono presenti circa 2.200 impianti di biogas, con una potenza lorda complessiva di circa 1,45 GW e una generazione annua di energia elettrica pari a 7,85 TWh (Noussan et al., 2024). Circa l'80% di questi impianti interessano il settore agricolo e sono situati nelle regioni del nord Italia in aree a prevalente vocazione zootecnica. In particolare, circa il 75% dell'energia elettrica prodotta deriva dall'impiego di colture energetiche dedicate (soprattutto insilati di cereali), il 17% dai reflui zootecnici e la quota restante da residui e scarti dell'industria agroalimentare.

L'Italia è ancora agli inizi nello sviluppo del biometano, con 33 impianti operativi e una capacità complessiva pari a circa 220 milioni di m³/anno, ma il potenziale è notevole, soprattutto nel settore dei veicoli che utilizzano il bioLNG con conseguenti possibilità di investimento e generazione di posti di lavoro a livello locale. Il biometano rappresenta un biocombustibile ottenuto attraverso l'upgrading del biogas prodotto dalla digestione anaerobica delle biomasse. Questo processo mira a eliminare umidità, anidride carbonica (CO₂), idrogeno solforato e altre impurità, consentendo un significativo incremento della proporzione di metano (CH₄) nel composto risultante. In tal modo, il biometano assume caratteristiche simili a quelle del gas naturale di origine fossile, raggiungendo livelli di purezza compresi tra il 97% e il 99% di CH₄. Il biometano può essere impiegato in diverse forme, tra cui il bioCNG (Biomethane Compressed Natural Gas) e il bioLNG (Biomethane Liquefied Natural Gas) nel settore dei trasporti, offrendo un'alternativa sostenibile ai carburanti convenzionali. In confronto alla filiera del biogas utilizzato per la produzione di energia elettrica, la filiera del biometano può contribuire in misura maggiore al risparmio di emissioni di CO_{2eq} (Figura 1). Questo perché il biometano evita le inefficienze spesso dovute alla scarsa valorizzazione del calore nel processo di cogenerazione, consentendo così un più efficace sfruttamento dell'energia contenuta nel biogas.

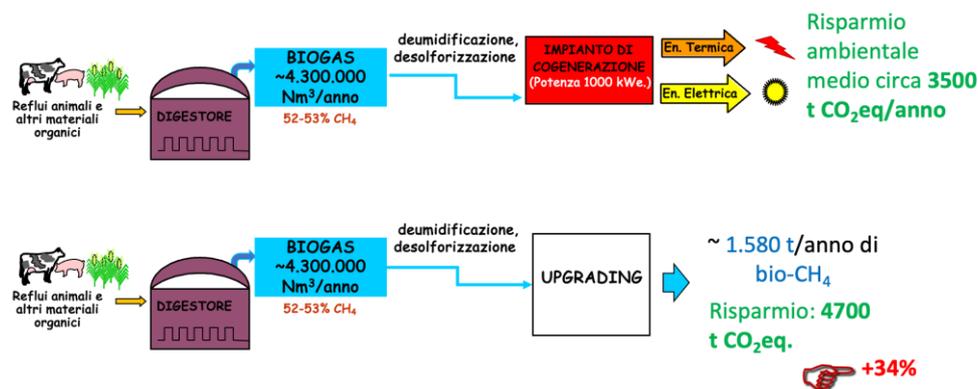


Figura 1 Vantaggi energetici ed ambientali della produzione di biometano

I recenti sviluppi della strategia energetica nazionale hanno determinato nuovi scenari e interessanti prospettive di sviluppo nel settore dell'agricoltura, concentrando l'attenzione sulla valorizzazione dei reflui zootecnici, i residui colturali e dell'industria agro-alimentare. In particolare, il Decreto n. 240 del 15 settembre 2022 - "Sviluppo del biometano, secondo criteri per promuovere l'economia circolare - Produzione biometano" si basa su un meccanismo di incentivazione che prevede il rispetto

di specifici livelli di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra rispetto a quelle generate dai combustibili fossili che il biometano andrebbe a sostituire.

Le esigenze che si profilano riguardano aspetti tecnici e operativi sulla totalità della filiera, al fine di garantire una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra pari almeno al 65% nel caso della produzione di biometano destinato al settore dei trasporti e all'80% in altri settori. Oltre agli sforzi per ridurre le emissioni di gas ad effetto serra, devono essere inoltre considerati i potenziali impatti sulle risorse idriche, conformemente ai requisiti previsti della Direttiva Europea sui nitrati (91/676/CEE).

Strategie per Migliorare la Sostenibilità energetica ed Ambientale degli Impianto di Digestione Anaerobica

Diversi studi evidenziano che i benefici ambientale ottenibili dalla produzione di energia da biogas rispetto ai combustibili fossili dipendono principalmente dalla tipologia di biomasse utilizzate e dalla gestione dell'impianto, con particolare riferimento all'ottimizzazione dell'utilizzo del calore prodotto e alle fasi di stoccaggio e distribuzione in campo del liquame digerito.

Scelta delle biomasse per l'alimentazione dei digestori

Gli impianti di biogas sono generalmente alimentati con biomasse di origine sia animale sia vegetale. Tra le colture energetiche è l'insilato di mais la biomassa utilizzata più frequentemente e, generalmente, è codigerita con reflui di origine zootecnica o altre biomasse vegetali (Dinuccio et al., 2010). Poiché le perdite di gas serra generate dalla filiera di produzione del biogas sono in buona parte legate alla produzione e al trasporto delle colture energetiche impiegate per l'alimentazione dei digestori (Fuchsz & Kohlheb, 2015), nell'ottica di un loro contenimento, una possibile opzione consiste nella sostituzione parziale o totale di tali biomasse dedicate, con i residui colturali e i sottoprodotti provenienti dal settore agroindustriale, il cui costo ambientale, in termini di emissioni di CO₂ equivalente in atmosfera, ricade su un altro settore produttivo. Da una ricerca condotta nell'ambito del progetto europeo Eu-Agrobiogas (Balsari et al., 2009), è emerso, infatti, che sostituendo le colture energetiche utilizzate per l'alimentazione di un impianto di digestione anaerobica con residui colturali e sottoprodotti agroindustriali, è possibile abbattere di oltre il 50% le emissioni di gas ad effetto serra generate dall'impianto stesso (Figura 2).

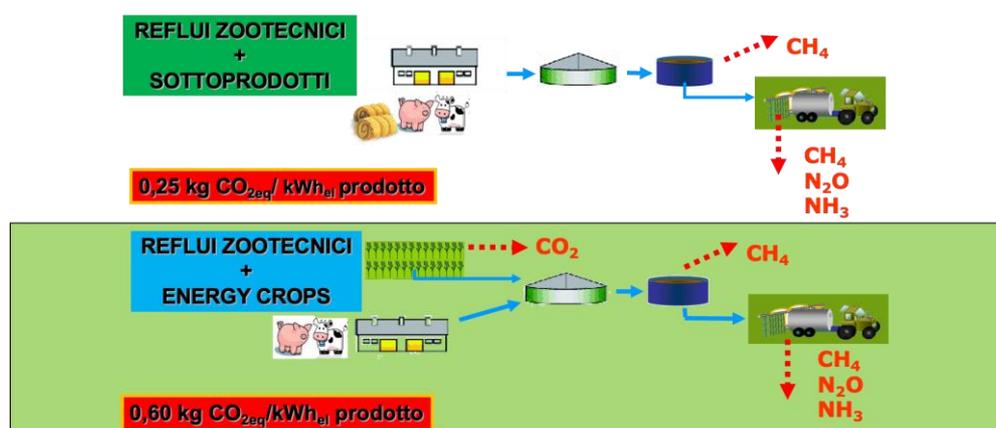


Figura 2 Emissioni di CO_{2eq} per ogni kWh elettrico prodotto, in funzione del tipo di miscela che alimenta i digestori anaerobici.

Queste ultime tipologie di biomasse sono tuttavia generalmente caratterizzate da elevati contenuti di composti ligno-cellulosici e quindi in grado di fornire limitate produzioni di biogas e di metano. Negli ultimi anni, per migliorare le rese in biogas dei sottoprodotti, sono state messe a punto diverse tecniche di pretrattamento finalizzate a spezzare i legami ligno-cellulosici e quindi a favorire la digestione della sostanza organica presente al loro interno. Alcune di queste tecniche, che possono essere di natura fisico-meccanica, chimica o biologico-enzimatica, sono state oggetto di sperimentazioni nell'ambito del progetto europeo Eu-Agrobiogas (Balsari et al., 2009), evidenziando variazioni più o meno significative nelle produzioni specifiche di biogas e metano (Figure 3-5).

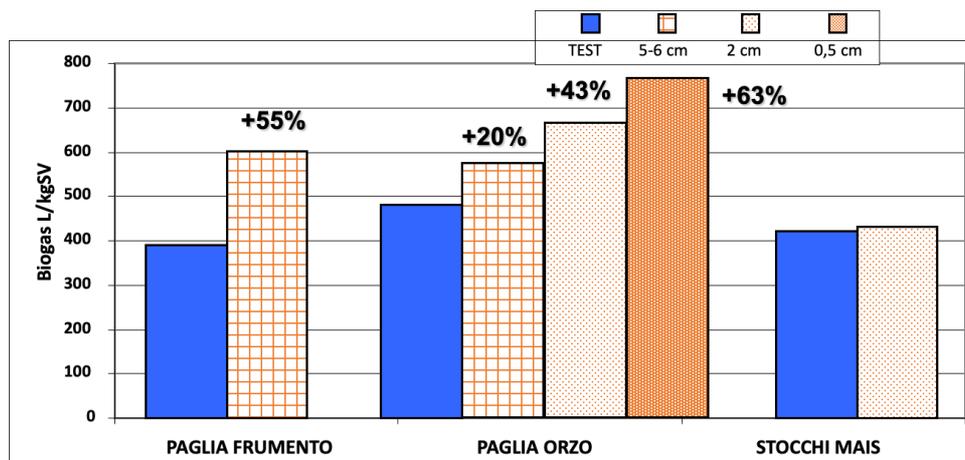


Figura 3 Produzioni di biogas di biomasse trinciate a diverse dimensioni e confronto con le produzioni delle biomasse non trattate. Prova condotta dal DISAFA dell'Università di Torino.

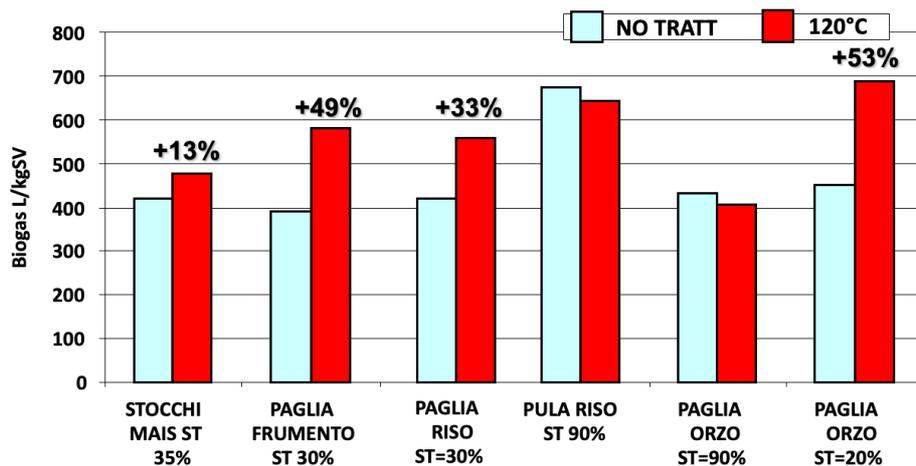


Figura 4 Produzioni specifiche di biogas di residui culturali pre-trattati a 120°C per 30 minuti e confronto con le produzioni specifiche di biogas dei campioni non trattati. Prova condotta dal DISAFA dell'Università di Torino.

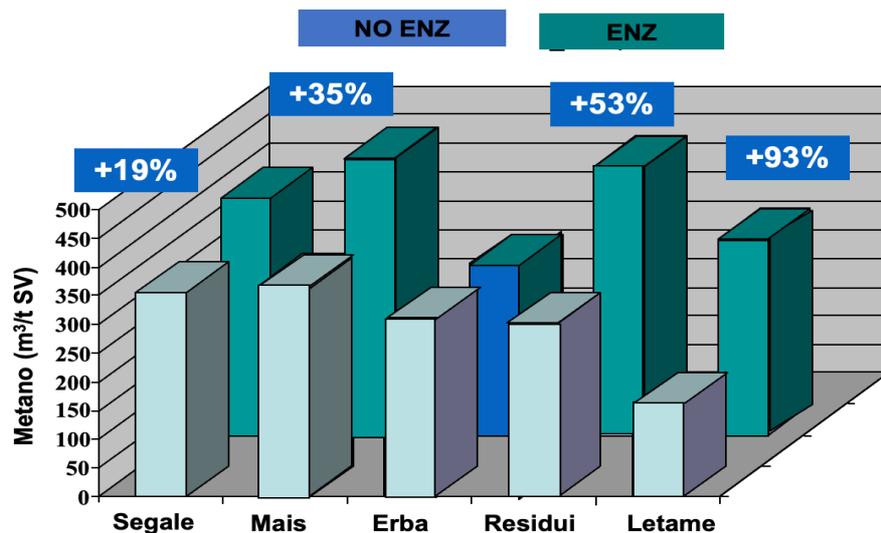


Figura 5 Risultati di una prova di digestione anaerobica con biomasse pre-trattate con un enzima idrolitico, condotta dal Leibniz Institute for Agricultural Engineering di Potsdam-Bornim, ATB, Germany.

Tuttavia, al fine di effettuare una scelta appropriata del tipo di pretrattamento da impiegare in un impianto reale, è essenziale considerare ulteriori fattori, tra cui:

- il costo economico del trattamento,
- la semplicità operativa,
- il tempo necessario per effettuarlo,
- l'efficienza energetica.

Per quanto riguarda i costi economici, i trattamenti fisici, come la trinciatura e la molitura, e i trattamenti chimici con l'uso di sostanze come la calce (CaOH), sono tra i meno onerosi. Anche il trattamento termico si può inserire tra quelli relativamente più economici, in quanto è possibile prevedere di utilizzare il calore in eccesso prodotto dal co-generatore, nel caso di trattamenti a temperature intorno a 100°C. Trattamenti a temperature più elevate risultano più dispendiosi e difficilmente attuabili in azienda, anche per ragioni di sicurezza dell'operatore. Sotto il profilo della semplicità operativa, sia i trattamenti meccanici che quelli biologici si collocano tra le opzioni più valide, mentre trattamenti termici ad alte temperature e quelli chimici con acidi o basi forti implicano la realizzazione di specifiche strutture complesse e dotate di adeguati dispositivi di sicurezza per l'operatore.

Infine, per quanto riguarda il tempo necessario per il trattamento, i trattamenti biologici sono generalmente più dispendiosi, poiché spesso richiedono lunghi periodi per l'attivazione dei microrganismi impiegati. Allo stesso modo, i trattamenti chimici possono risultare più prolungati nel caso in cui siano impiegate sostanze che richiedono correzioni dei parametri chimici delle biomasse (come il pH) prima della loro introduzione nel digestore, al fine di evitare l'inibizione del processo di digestione anaerobica.

Sebbene l'incremento della produttività, in termini di biogas, della biomassa rappresenti indubbiamente l'obiettivo principale dei pretrattamenti, non bisogna trascurare alcuni benefici indiretti che essi comportano sull'efficienza complessiva del processo di digestione anaerobica. La modifica della struttura delle biomasse, sia dal punto di vista fisico (attraverso la riduzione della pezzatura), sia da quello chimico (mediante la semplificazione molecolare), consente di rendere la

fase di alimentazione dei digestori più agevole, di ridurre i consumi energetici associati alla miscelazione del materiale durante il processo di digestione, oltre che di contenere la formazione di crosta superficiale all'interno dei reattori.

Valorizzazione dell'energia termica

Il bilancio termico dei digestori dipende da diverse variabili, tra cui le condizioni climatiche e in particolare le temperature ambientali, i volumi e le caratteristiche delle biomasse impiegate (capacità termica), la temperatura di processo (mesofila, termofila) e le soluzioni impiantistiche adottate. In particolare, la temperatura rappresenta un parametro chiave nel processo di digestione anaerobica, in quanto influisce direttamente sulla velocità di degradazione del materiale organico da parte dei diversi gruppi microbici coinvolti. Per mantenere il livello ottimale di temperatura e, quindi, garantire un processo stabile ed efficiente, di solito viene utilizzata una frazione del calore prodotto dall'unità di cogenerazione, che nelle specifiche condizioni dei contesti del nord Italia rappresenta mediamente il 20-30% della sua capacità termica. Circa l'80% della rimanente quota di energia termica prodotta durante il processo di cogenerazione, come evidenziato da un'indagine condotta dal DISAFA dell'Università di Torino, viene generalmente in larga parte dissipata. Tuttavia, una gestione ottimale dell'energia termica non solo contribuisce all'efficienza economica, ma anche a migliorare l'impatto ambientale complessivo del sistema. In particolare, da uno studio condotto sempre nel contesto del progetto europeo Eu-Agrobiogas (Amon et al., 2009), risulta che il corretto utilizzo dell'eventuale surplus di calore potrebbe consentire di ridurre di circa il 20% le emissioni di CO_{2eq.} generate dall'intero processo di digestione anaerobica. Diversi sono i possibili impieghi del surplus di energia termica, e dipendono dallo specifico contesto in cui si opera: il riscaldamento di edifici o serre ubicate in prossimità dell'impianto di biogas, il teleriscaldamento, l'essiccazione di cereali, il pretrattamento delle biomasse prima dell'introduzione nei digestori, o il trattamento della frazione solida separata con la produzione di concimi pellettati organo-minerali. E' tuttavia anche importante ottimizzare la potenziale produzione di energia termica evitando per quanto possibile la sua dispersione.

Nell'ambito del progetto LIFE CLINMED-FARM (LIFE20 CCM/ES/001751) è attualmente in fase di validazione una soluzione tecnologica (Cupola M3 Heat Shield[®]) appositamente realizzata per ridurre le dispersioni di energia termica dalle coperture gasometriche dei digestori anaerobici. Il sistema (Figura 6), è formato da 3 elementi principali:

- un telo esterno in fibra poliestere spalmata PVC tenuto in pressione con aria;
- una membrana intermedia isolante (Heat Shield[®]), costituita da un materiale innovativo a tre strati ultra-schermato che funge da protezione contro la dissipazione di calore;
- un telo interno in fibra poliestere spalmata PVC che consente lo stoccaggio del biogas prodotto all'interno del digestore stesso.



Figura 6 Schema illustrativo del sistema Cupola M3 Heat Shield® realizzato dalla ditta Ecomembrane.

Sulla base dei risultati sperimentali attualmente disponibili, la sostituzione del sistema di copertura attuale dei due digestori dell'impianto di digestione anaerobica in esame con il sistema Cupola M3 Heat Shield® potrebbe portare a una riduzione delle dispersioni di energia termica superiore al 50% (Figura 7). La potenza termica risparmiata, quantificabile in circa 50 kW, corrisponde approssimativamente al 5% della potenza termica installata del cogeneratore (994 kWth).

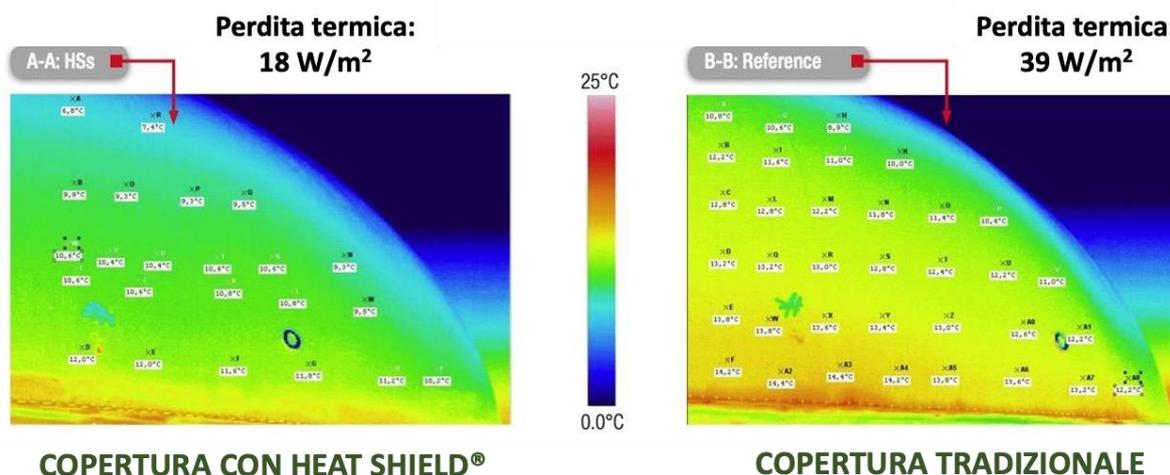


Figura 7 Confronto tra le termografie e i flussi di energia termica rilevati dalla Cupola M3 Heat Shield® (HSs) e da una copertura gasometrica tradizionale (Reference) nelle stesse condizioni operative.

Corretta gestione del liquame digerito

La gestione del liquame digerito rappresenta una delle sfide fondamentali per garantire la sostenibilità della produzione di biogas dagli impianti di digestione anaerobica di origine agricola. Nonostante il liquame digerito, in uscita dall'impianto di biogas, sia riconosciuto come un fertilizzante organico di elevato valore agronomico, la sua gestione presenta elementi di criticità legati alle sue caratteristiche intrinseche. Queste peculiarità contribuiscono a renderlo una potenziale fonte di emissioni di ammoniaca (NH₃) e gas ad effetto serra, oltre a costituire un rischio di inquinamento delle falde acquifere da nitrati.

In particolare, conformemente all'art. 2 lett. g) della Direttiva Nitrati (91/676/CEE), al liquame digerito sono applicate le limitazioni d'uso previste per le matrici zootecniche. Ciò implica l'applicazione di quantitativi massimi di azoto zootecnico ad ettaro, con un limite massimo di 170 kg/ha nelle Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN). La necessità di rispettare i limiti normativi e agronomici, insieme al miglioramento della gestione, motiva l'opportunità di utilizzare trattamenti adeguati per modificare le caratteristiche del liquame digerito.

Tra le tecniche di trattamento di questi effluenti, la separazione solido-liquido è sicuramente quella più diffusa, sia come trattamento a sé stante, sia in combinazione con altri processi. La frazione solida che ne deriva, ricca di sostanza organica, può costituire un prodotto più facilmente trasportabile e utilizzabile su terreni più distanti o eventualmente può essere ceduta ad altre aziende.

Nella fase di stoccaggio del liquame digerito si può intervenire coprendo i bacini con strutture per il recupero del biogas (Figura 8). Ciò non solo riduce l'impatto ambientale della digestione anaerobica, ma consente anche di recuperare il potenziale metanigeno residuo del liquame digerito.



Figura 8 Copertura in materiale plastico posta sopra la vasca di stoccaggio del liquame digerito per abbattere le emissioni di metano e ammoniaca.

Uno studio su uno stoccaggio del liquame digerito in scala reale (Gioelli et al., 2011) ha evidenziato la possibilità di recuperare da un impianto di 1 MWe circa 500 m³/giorno di biogas, corrispondente a circa 1 MWh/giorno e di evitare di emettere in atmosfera 4-5 t/giorno di CO_{2eq} (Figura 9). Le emissioni medie giornaliere di ammoniaca sono risultate mediamente pari a 4 g NH₃/m² di superficie della vasca al giorno.

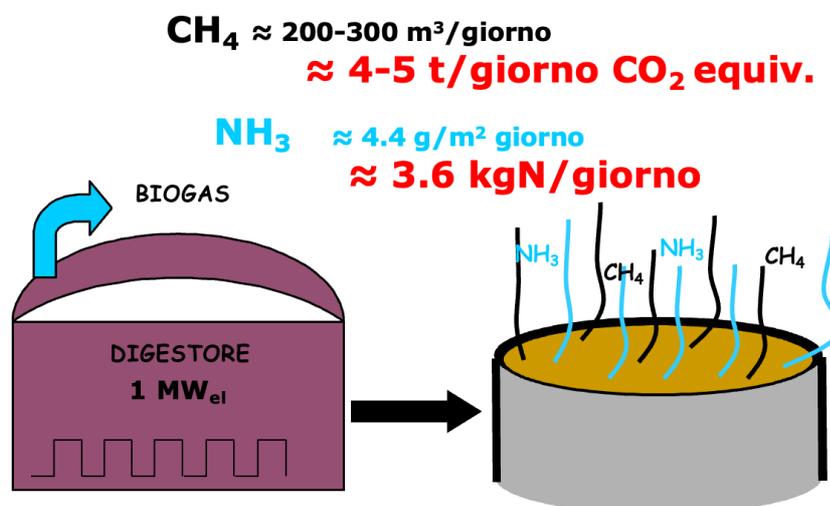


Figura 9 Possibili perdite di metano e ammoniaca dallo stoccaggio del liquame in uscita da un impianto di biogas della potenza elettrica di 1MW.

Anche gli obiettivi da perseguire per una corretta distribuzione del liquame digerito sono molteplici. Tra questi, il rispetto della dose di elementi fertilizzanti desiderata, la buona uniformità di distribuzione trasversale e longitudinale rispetto alla direzione di avanzamento della macchina, il contenimento del compattamento dei suoli e la riduzione delle emissioni di NH_3 e gas ad effetto serra sono tra quelli di maggiore rilevanza.

Il liquame digerito presenta una composizione molto variabile al variare della composizione delle biomasse in input al digestore, dei parametri di processo, delle condizioni di stoccaggio e della presenza o meno di sistemi di trattamento (es. separazione solido liquido). Inoltre, l'assenza o la scarsa efficienza dei sistemi di omogeneizzazione nelle vasche di stoccaggio determina notevoli difficoltà nella corretta definizione del contenuto di elementi fertilizzanti del refluo. Una possibile soluzione a questo problema è rappresentata dall'impiego di metodi rapidi di analisi che consentono di determinare direttamente sullo spandiliquame alcuni dei parametri analitici dell'effluente. A titolo di esempio, l'impiego di sistemi innovativi di analisi basati sulla spettroscopia nel vicino infrarosso (Near Infrared Spectroscopy - NIRS), integrati a dispositivi per la Distribuzione Proporzionale all'Avanzamento (DPA), permette di calibrare la portata dei sistemi di alimentazione in funzione della velocità di avanzamento dello spandiliquame e del reale contenuto in nutrienti del liquame. Inoltre, le recenti innovazioni tecnologiche, grazie alla possibilità di interfacciare il sistema di controllo della dose con un ricevitore satellitare (GPS) e le mappe di fertilità dei suoli consentono di realizzare una distribuzione a dosi variabili, in funzione delle esigenze nutrizionali delle colture sia spaziali sia temporali (Figura 10).

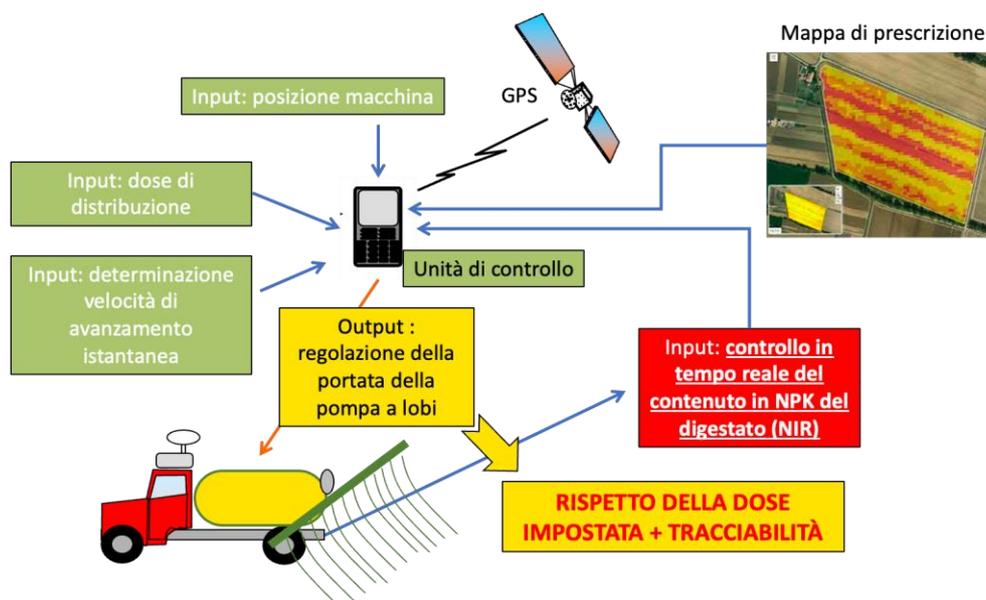


Figura 10 Distribuzione del liquame digerito a rateo variabile per la massimizzazione dell'utilizzo dei nutrienti .

L'operazione di spandimento in campo è anche la fase di gestione del liquame digerito che comporta i maggiori rischi di perdite di azoto tramite volatilizzazione. Tra le possibili mitigazioni di tali perdite e che sono state anche oggetto di valutazione da parte del DISAFA dell'Università di Torino, sempre nell'ambito del progetto LIFE CLINMED-FARM, vi è la distribuzione localizzata in bande rasoterra

e l'interramento immediato del refluo, in combinazione con l'acidificazione e l'impiego di inibitori della nitrificazione.

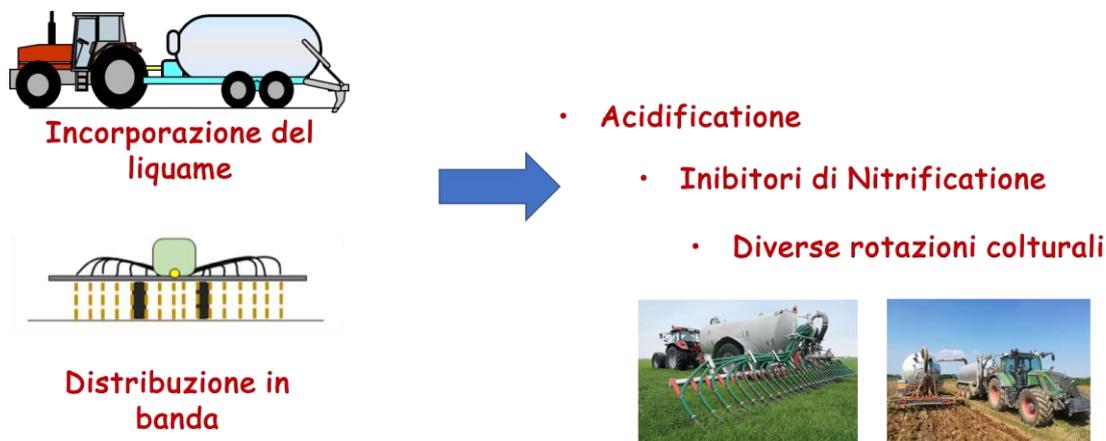


Figura 11 Alcune soluzioni di mitigazione delle emissioni di ammoniaca e gas ad effetto serra oggetto di valutazione nell'ambito del progetto LIFE CLINMED-FARM (LIFE20 CCM/ES/001751)

La distribuzione in banda, grazie alla limitata nebulizzazione del getto, è risultata in grado di ridurre del 40-50 % le perdite di NH_3 e permettere una migliore uniformità di distribuzione rispetto a tecniche tradizionali quali la distribuzione superficiale con piatto deviatore. L'interramento immediato, indicato come soluzione ottimale dalla maggior parte delle normative vigenti, prevede un'iniezione diretta del refluo all'interno dello strato di suolo interessato dalle lavorazioni ed esplorato dall'apparato radicale delle colture consentendo fino a oltre il 95% di riduzione delle perdite di NH_3 . L'acidificazione è un'efficace tecnica di abbattimento delle emissioni ammoniacali, ancora poco diffusa in Italia, considerata come alternativa all'interramento dei liquami. Con questa tecnica, i reflui vengono normalmente additivati con acidi forti come l'acido solforico, così da ridurre il pH e spostare l'equilibrio dall'ammoniaca allo ione ammonio che, essendo solubile e non volatile, non viene rilasciato in atmosfera: la riduzione delle emissioni di NH_3 risulta fino a oltre il 70% rispetto alla distribuzione di liquame non acidificato (Stevens et al., 1989; Nyord et al., 2013).

L'impiego di inibitori della nitrificazione, oltre ad avere un effetto mitigante sulle emissioni di protossido di azoto (N_2O), riduce le perdite per lisciviazione e favorisce la disponibilità di azoto per le colture (Di e Cameron, 2005; Randall e Vetsch, 2005).

Conclusioni

La digestione anaerobica può risultare una strategia chiave per promuovere la sostenibilità nei processi agricoli e zootecnici. Le prospettive di sviluppo del settore sono ampie, con possibilità di migliorare ulteriormente l'efficienza di conversione delle biomasse, ottimizzare la gestione dei nutrienti, e sfruttare in modo più efficiente l'energia prodotta. L'adozione di soluzioni integrate e orientate all'economia circolare rappresenta un passo fondamentale per massimizzare l'impatto positivo della produzione di biogas, privilegiando l'impiego delle deiezioni zootecniche, dei residui colturali e dei sottoprodotti agroindustriali e la produzione di biometano.

Bibliografia

- Amon, T., Mayr, H., Eder, M., Hobbs, P., et al., 2009. Proceeding of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, Germany - 29 Jun 2009 → 3 Jul 2009
- Balsari, P., Menardo, S., Gioelli, F., Dinuccio, E., 2009. Le soluzioni che ottimizzano la digestione anaerobica. *L'Informatore Agrario*, 27, 22-25.
- Di H. J., Cameron K. C. 2005. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures. *Agriculture, ecosystems & environment*, 109(3-4), 202-212.
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., Menardo, S., 2010. Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology*, 101 (10), 3780-3783.
- Fuchsz, M., Kohlheb, N., 2015. Comparison of the environmental effects of manure- and crop-based agricultural biogas plants using life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production* 86, 60-66.
- Gioelli, F. Dinuccio, E., Balsari, P., 2011. Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. *Bioresource Technology*, 102 (22), 10248-10251.
- Noussan, M., Negro, V., Prussi, M., Chiaramonti, D., 2023. The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy. *Applied Energy*, 355 (1), 122322.
- Nyord, T., Liu, D., Eriksen, J., Adamsen, A.P.S. 2013. Effect of acidification and soil injection of animal slurry on ammonia and odour emission. Proceeding of the 15th RAMIRAN International Conference in Versailles, France, 3–5 June.
- Randall G. W., Vetsch J. A. 2005. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by fall versus spring application of nitrogen and nitrapyrin. *Agronomy journal*, 97(2), 472-478.
- Stevens, R.J., Laughlin, R.J., Frost, J.P., 1989. Effect of acidification with sulfuric acid on the volatilization of ammonia from cow and pig slurries. *J Agric Sci* 113, 389–395.