

## LA PRODUZIONE DI BIOGAS DA DEIEZIONI DI ANIMALI DA ZOO

Lorenzo De Pascalis

Studio di ingegneria De Pascalis [Melendugno, LE; lorenzo.depascalis@gmail.com](mailto:Melendugno, LE; lorenzo.depascalis@gmail.com)

### SOMMARIO

Lo smaltimento delle deiezioni animali rappresenta per uno zoo un importante capitolo di spesa, al quale le società preposte alla loro gestione devono far fronte. Stoccaggio, trasporto e conferimento in discarica sono attività che incidono per una quota non trascurabile sul conto economico di queste strutture. A partire dagli anni '90 del secolo scorso, diverse ricerche hanno valutato la possibilità di sfruttare le deiezioni, o almeno di una parte di esse, con finalità energetiche, attraverso una loro conversione in biogas. La valorizzazione di questa tipologia di scarti animali determinerebbe così, da un lato, una riduzione della spesa di smaltimento e, dall'altro, un risparmio sull'energia da prelevare dalla rete (qualora il biogas venisse convertito in energia elettrica e termica in loco) o un introito (nel caso la produzione fosse destinata alla vendita a terzi).

Allo stato dell'arte, tuttavia, la letteratura scientifica in materia risulta molto rarefatta e spalmata su pochi studi slegati tra di loro. Lo scopo di questo articolo è, dunque, quello di delineare un quadro generale sul tema, riassumendo i risultati più rilevanti ottenuti dalle varie ricerche e definendo le preliminari condizioni di applicabilità di questa opportunità tecnologica ai giardini zoologici attualmente in attività.

### PREMESSA

Gli scarti degli zoo – tra cui le deiezioni animali, i residui di pasti, verdura, piante e fiori marciti – rappresentano spesso una possibilità di sfruttamento per produrre biogas da utilizzare come combustibile. Diversi sono stati gli studi condotti sia relativamente sia alla valutazione della matrice da sottoporre a digestione anaerobica capace di massimizzare la produzione di biogas, sia alla scelta della tipologia di soluzione impiantistica da adottare. In questo articolo sono riassunti i risultati più promettenti.

### MATRICI A CONFRONTO

Uno studio condotto da Mandal e Mandal (1997) [1] ha posto in confronto diverse tipologie di materiali di scarto e ne ha valutato le loro potenzialità per la produzione di biogas. Gli esperimenti hanno riguardato (tabella 1):

1. *letame animale (bovino, bufalino, di cammello ed equino)*
2. *rifiuti umidi (foglie di te esauste, bucce di banana, di patata e d'arancia)*
3. *scarti di fiori (girasoli, fiori di modar, calendule, fiori stagionali)*
4. *fogliame (cavolo, foglie di patata, di ravanella, di banana)*

In figura 1 è schematizzato il setup sperimentale. Esso comprende: un'unità di digestione (costituita da un contenitore in vetro da 500 cl dotato di agitatore magnetico), una camera termostatica (costituita da un relay azionato da un termostato per l'accensione della lampada a filo caldo e da un ventilatore per l'uniformizzazione della temperatura) e un serbatoio graduato di raccolta del biogas.

I campioni preparati (da 300 cl) comprendono

anche una quantità d'acqua pari alla metà del peso totale, al fine di uniformarli e creare una pasta. Essi sono mantenuti per 90 giorni nella camera termostatica a una temperatura di  $37 \pm 1^\circ\text{C}$ . Oltre al rimescolamento magnetico, ogni giorno il digestore viene agitato manualmente per 2-3 minuti.

In riferimento alle condizioni termiche a cui avviene la digestione anaerobica, generalmente, si opera a temperature maggiori quando vengono impiegati insilati o altre biomasse vegetali e a temperature minori per sostanze quali deiezioni zootecniche, in quanto già predigerite.

I risultati dello studio hanno mostrato come con il letame equino sia possibile produrre la maggior quantità di biogas. Secondo i ricercatori, questo è da imputare al fatto che tale deiezione risulta più degradabile rispetto alle altre. In ordine quantità di biogas prodotto, si ha (figura 2):

5. *letame equino*
6. *letame di cammello*
7. *miscela di tutti i letami*
8. *letame bufalino*
9. *letame bovino*

In figura 3 sono poi riportate le produzioni di biogas ottenute a partire dai rifiuti umidi mescolati assieme al letame bovino. Si osserva come sia la matrice di bucce di banana a ottenere i risultati migliori. Nell'ordine:

1. *bucce di banana*
2. *bucce di patata*
3. *foglie di te esauste*
4. *miscela di tutti i rifiuti umidi*
5. *bucce d'arancia*

I ricercatori giustificano la ridotta produzione di biogas delle bucce d'arancia considerando gli effetti tossici di questo materiale organico sui batteri

digestori. Perciò, consigliano di evitarne l’impiego. In figura 4 viene riportato il caso della biogassificazione degli scarti dei fiori mescolati con il letame bovino. L’ordine di producibilità di biogas è il seguente:

1. *fiore di modar*
2. *calendula*
3. *miscela di tutti gli scarti di fiori*
4. *fiori di stagione*
5. *girasole*

Infine, la figura 5 riassume la producibilità di biogas a partire da foglie mescolato con letame bovino. Si osserva come l’ordine delle produzioni risulti:

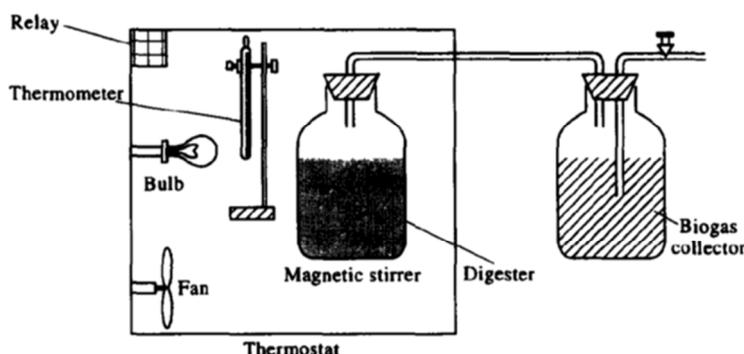
1. *foglie di patata*
2. *foglie di banana*
3. *miscela di tutti i tipi di foglie*
4. *cavolo*
5. *foglie di ravenello*

Un confronto generale dei campioni analizzati (ad eccezione delle miscele) conduce al seguente ordine di producibilità di biogas:

1. *letame equino*
2. *fiore di modar*
3. *letame di cammello*
4. *fiori stagionali*
5. *foglie di patata*
6. *foglie di banana*
7. *bucce di banana*
8. *letame bufalino*
9. *calendule*
10. *bucce di patata*
11. *foglie esauste di te*
12. *letame bovino*
13. *girasole*
14. *cavolo*
15. *foglie di ravenello*
16. *bucce d’arancia*

**Tab. 1:** Composizione dei campioni per lo studio di Mandal e Mandal (1997) [1]

Tipo campione	ID	Composizione	Rapporto in massa
Letame animale	1	Letame bovino, bufalino, di cammello, equino e acqua	1:1:1:1:4
	2	Letame bovino e acqua	1:1
	3	Letame bufalino e acqua	1:1
	4	Letame di cammello e acqua	1:1
	5	Letame equino e acqua	1:1
Rifiuti umidi	6	Foglie di te esauste, bucce di banana, di patata, di arancio, letame bovino e acqua	1:1:1:1:1:5
	7	Foglie di te esauste, letame bovino e acqua	1:1:2
	8	Bucce di banana, letame bovino e acqua	1:1:2
	9	Bucce di patata, letame bovino e acqua	1:1:2
	10	Bucce di arancia, letame bovino e acqua	1:1:2
Scarti di fiori	11	Girasoli, fiori di modar, calendule, fiori stagionali, letame bovino e acqua	1:1:1:1:1:5
	12	Girasoli, letame bovino e acqua	1:1:2
	13	Fiori di modar, letame bovino e acqua	1:1:2
	14	Calendule, letame bovino e acqua	1:1:2
	15	Fiori stagionali, letame bovino e acqua	1:1:2
Fogliame	16	Cavolo, foglie di patata, di ravenello, di banana, letame bovino e acqua	1:1:1:1:1:5
	17	Cavolo, letame bovino e acqua	1:1:2
	18	Foglie di patata, letame bovino e acqua	1:1:2
	19	Foglie di ravenello, letame bovino e acqua	1:1:2
	20	Foglie di banana, letame bovino e acqua	1:1:2



**Fig. 1** - Setup sperimentale per lo studio di Mandal e Mandal (1997) [1]

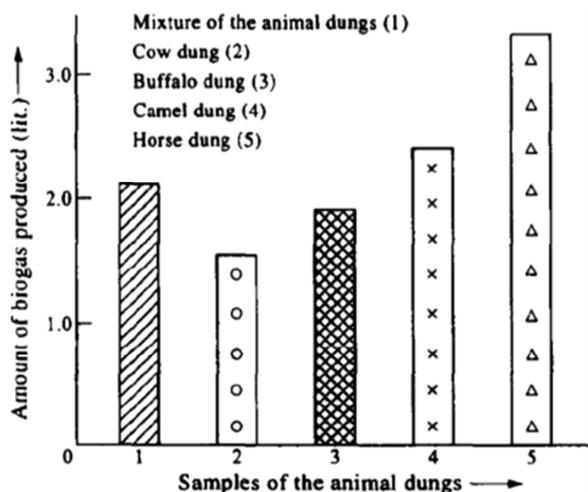


Fig. 2 - Produzione di biogas a partire da letame animale, secondo Mandal e Mandal (1997) [1]

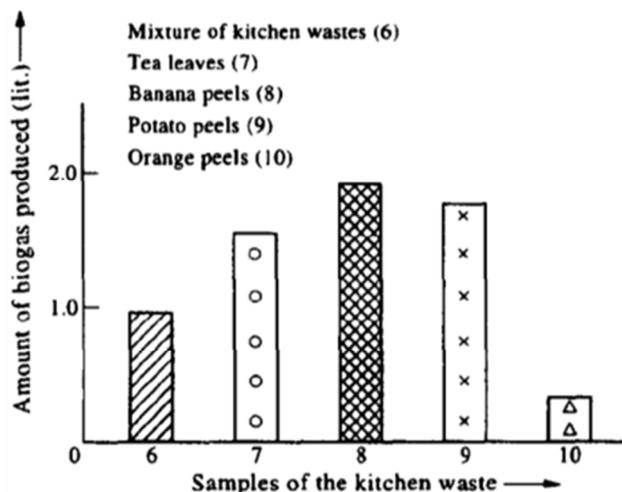


Fig. 3 - Produzione di biogas a partire da rifiuti umidi, secondo Mandal e Mandal (1997) [1]

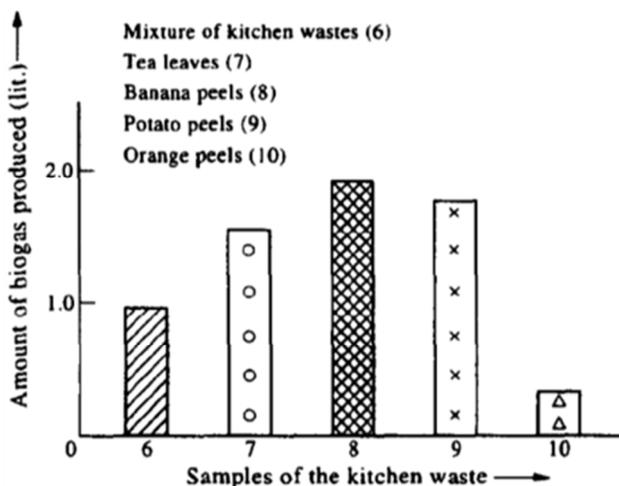


Fig. 3 - Produzione di biogas a partire da rifiuti umidi, secondo Mandal e Mandal (1997) [1]

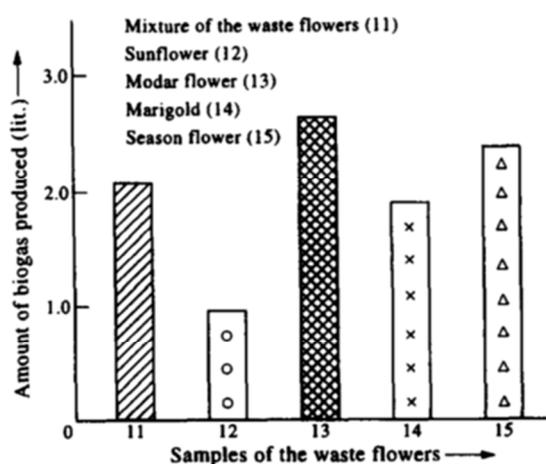


Fig. 4 - Produzione di biogas a partire da scarti di fiori, secondo Mandal e Mandal (1997) [1]

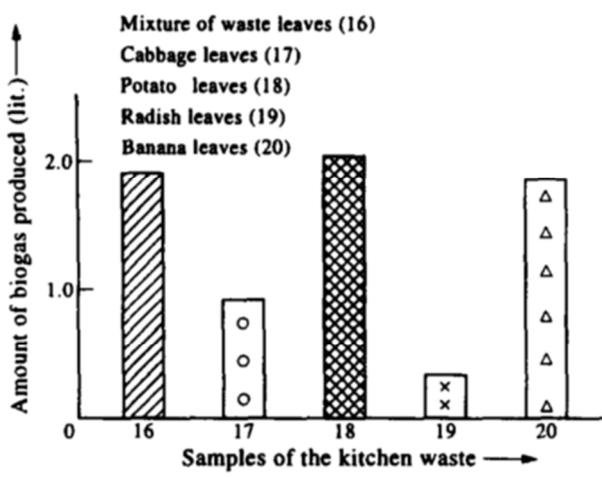


Fig. 5 - Produzione di biogas a partire da fogliame, secondo Mandal e Mandal (1997) [1]

Si riscontra come molti degli scarti a maggior producibilità – quali i letami equino, di cammello e bufalino, i fiori stagionali, le foglie di banana e le

bucce di patata – siano reperibili all’interno degli zoo.

Uno studio più focalizzato sul tema è condotto da

Klasson e Nghiem (2003) [2] affronta la possibilità di utilizzare i liquami prodotti da elefanti e rinoceronti al fine di produrre biogas per supplire ai bisogni elettrici e termici dello zoo di Knoxville (Tennessee, USA). Le due matrici studiate riguardano animali erbivori di grandi dimensioni, poiché nello zoo sono di maggiore disponibilità giornaliera: le quantità prodotte sono di circa 20 tonnellate a settimana e il metano ottenibile è intorno a 0,3-0,4 m<sup>3</sup> per kilogrammo di solidi volatili<sup>1</sup>.

L’aspetto dei letami prodotti dai due erbivori risulta simile in struttura, con una colorazione maggiormente tendente al verde delle deiezioni di elefante. Entrambi i campioni, comunque, sono solidi e contengono in buona parte fibre vegetali non digerite. L’umidità degli stessi (determinata per mezzo di essiccazione a 105°C per 24 ore) e il contenuto di solidi volatili totali TVS (ottenuto attraverso riscaldamento a 550°C per 45 minuti) sono riassunti in tabella 2.

**Tab. 2** - Umidità e solidi volatili totali TVS dei campioni utilizzati nello studio di Klasson e Nghiem (2003) [2]

Tipo campione	Umidità	TVS [kg/kg secco]	TVS [kg/kg umido]
Letame di elefante	83%	0,91	0,15
Letame di rinoceronte	81%	0,83	0,16

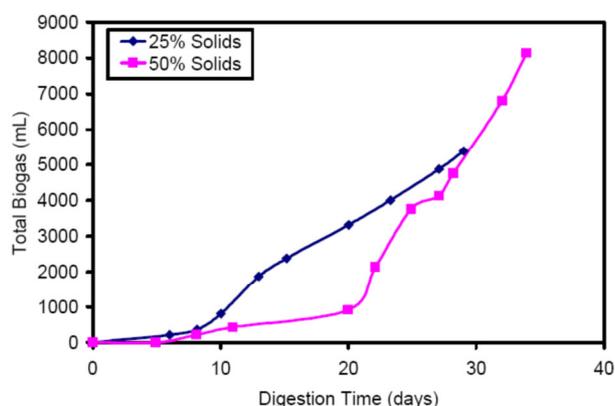
Il processo di digestione anaerobica è realizzato in diversi contenitori in vetro (di capacità da 250 a 2000 ml) collegati da un tubo in plastica a un serbatoio di accumulo del biogas prodotto (figura 6). I digestori sono posti all’interno di un ambiente a temperatura controllata e non è previsto alcun sistema di agitazione meccanica.

Campioni del biogas prodotto (del volume di 150 µl) sono prelevati periodicamente dal serbatoio di accumulo mediante una siringa per gas e analizzati con un gas cromatografo modello HP 5890 Serie II. Come attivatore del processo di digestione anaerobica è utilizzato letame bovino miscelato con acqua a concentrazione del 25% e del 50%. I digestori sono mantenuti a 37°C. La produzione di biogas e la frazione di metano sono riportate rispettivamente nelle figure 7 e 8. Ciò ha condotto a constatare una più rapida generazione di biogas quando la concentrazione del letame bovino in acqua è pari al 25%. Perciò è stata adottata proprio questa concentrazione nelle matrici dei letami da zoo contenenti il materiale attivatore.

<sup>1</sup> Con il termine “solidi volatili” si indica la quota di materia decomponibile rispetto a un certo quantitativo di materia prima introdotta nel digestore dell’impianto. In particolare, sono la frazione solida di un campione che volatilizza in seguito all’esposizione alla temperatura di 550 °C.



**Fig. 6** - Digestore da 2000 ml utilizzato nello studio di Klasson e Nghiem (2003) [2]



**Fig. 7** - Produzione di biogas del materiale attivatore nello studio di Klasson e Nghiem (2003) [2]

Sono state poi preparate le seguenti prime cinque matrici con letami da zoo e bovini:

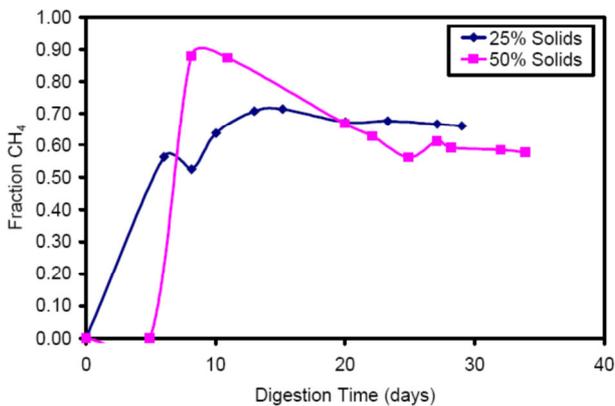
1. *letame di elefante (25%) + acqua*
2. *letame di rinoceronte (25%) + acqua*
3. *letame di elefante (22,5%) + letame bovino (2,5%) + acqua*
4. *letame di rinoceronte (22,5%) + letame bovino (2,5%) + acqua;*
5. *letame bovino (25%) + acqua*

I digestori sono mantenuti alla temperatura di 37°C. La produzione di biogas imputata al solo materiale da zoo è stata determinata sottraendo un decimo della quota di biogas prodotta dal solo letame bovino al 25%. In tabella 3 sono riassunte la producibilità e la frazione di metano totali.

Si osserva come la presenza del materiale attivatore riduca il tempo necessario a produrre le prime quantità di biogas di circa 1-2 settimane. Sia la produzione, sia il contenuto di metano nel biogas calano drasticamente dopo 35 giorni di digestione anaerobica. I due tipi di letame, addizionati con il materiale attivatore, mostrano una simile

produzione di biogas (compresa tra 0,051 l/g<sub>letame</sub> e 0,057 l/g<sub>letame</sub>). Il risultato risulta superiore a quello ottenuto da Mandal e Mandal (1997) [1] utilizzando letami di animali diversi (2,4-3,3 l con 150 g di letame). La produzione di metano per unità di solidi volatili totali è in linea con quella ottenuta da Gunaseelan (1997) [3] per matrici di tipo vegetale. Sono state poi preparate altre otto matrici, mescolando anche i letami non digeriti delle precedenti matrici già processate e aggiungendo anche 1,34 g/l<sub>matrice</sub> di cloruro di ammonio (NH<sub>4</sub>Cl) per avere una sorgente di azoto (ciò poiché il letame di elefante contiene una quota di azoto inferiore a quella che ottimizza la produzione di metano) pari a 25 g<sub>C</sub>/g<sub>N</sub>. In particolare:

1. *letame di elefante (25%) + matrice 3 (3%) + acqua [temperatura di digestione: 37 °C]*
2. *letame di rinoceronte (25%) + matrice 4 (3%) + acqua [temperatura di digestione: 37 °C]*
3. *letame di elefante (25%) + matrice 3 (3%) + acqua + NH<sub>4</sub>Cl [temperatura di digestione: 37°C]*
4. *letame di rinoceronte (25%) + matrice 4 (3%) + acqua + NH<sub>4</sub>Cl [temperatura di digestione: 37°C]*
5. *letame di elefante (25%) + matrice 3 (3%) + acqua [temperatura di digestione: 50 °C]*
6. *letame di rinoceronte (25%) + matrice 4 (3%) + acqua [temperatura di digestione: 50 °C];*
7. *letame di elefante (25%) + matrice 3 (3%) + acqua + NH<sub>4</sub>Cl [temperatura di digestione: 50°C]*
8. *letame di rinoceronte (25%) + matrice 4 (3%) + acqua + NH<sub>4</sub>Cl [temperatura di digestione: 50°C]*



**Fig. 8** - Frazione di metano nel biogas prodotto dal materiale attivatore nello studio di Klasson e Nghiem (2003) [2]

Come accadeva per la prima serie di matrici, i risultati mostrano un rapido incremento della produzione di metano nelle prime fasi di digestione, per poi ridursi progressivamente. La presenza del cloruro di ammonio produce un incremento della producibilità di biogas per la matrice contenente il letame di elefante.

In tabella 4 vengono riassunti i risultati ottenuti: si

osserva come la matrice 8 consenta di ottenere la maggior quantità di metano, anche se inferiore rispetto alla matrice 3 di partenza.

In generale, tutte le sperimentazioni confermano il vantaggio, in termini di produzione, ottenuto mescolando i letami da zoo con quelli bovini. Oltre a ciò, si assiste ad una maggiore produzione di biogas quando il processo avviene a 37°C rispetto a quando esso avviene a 50°C.

In riferimento allo zoo di Knoxville, la produzione totale di letami da erbivori è pari a circa 23 m<sup>3</sup> a settimana, circa 1050 tonnellate annuali. Simili quantità consentono una produzione di circa 17400 m<sup>3</sup> di metano all’anno, con un valore energetico di 6,6x10<sup>8</sup> kJ. L’energia producibile permette di coprire, almeno parzialmente, i fabbisogni della struttura.

### DIGESTORI A CONFRONTO

Relativamente agli impianti tecnologici che meglio si prestano a realizzare il processo di digestione anaerobica dei letami animali provenienti da zoo, uno studio condotto da Kusch (2012) [4] riscontra come essi contengano, in percentuali variabili, pietre, sabbia, paglia, foglie e rami non digeriti. Questi materiali non sono adatti ad alimentare i tradizionali sistemi ad umido (fig. 9), sia per problemi di mescolamento delle matrici, sia per gli alti rischi di stratificazione dei componenti. Ciò è confermato anche dallo studio di Kusch et al. (2008) [5] relativo alla digestione anaerobica di letame equino.

Kusch riconosce come tecnologia appropriata a digerire questa tipologia di matrici, il sistema batch a secco, di cui uno schema esemplificativo è riportato in fig. 10. Questo tipo di digestore opera con un mix di matrici fresche e già precedentemente digerite (che fungono da inoculo del processo). Una portata di percolato liquido viene spruzzata sul letto di digestione per garantirne l’adeguata umidità. Il processo avviene per un periodo di tempo predeterminato, al termine del quale la matrice digerita è rimossa dal digestore e ne viene caricata dell’altra fresca. La produzione di biogas, quindi, è di tipo discontinuo; per questo i sistemi commerciali prevedono più digestori in serie caricati e scaricati alternativamente.

Il sistema descritto è stato implementato nel 2007 dallo zoo Hellabrunn di Monaco (Germania). Esso consiste di tre digestori separati del volume totale di 870 m<sup>3</sup>, all’interno dei quali vengono processate dalle 2000 alle 3000 tonnellate all’anno di letame di grossi erbivori alla temperatura di 37°C. A causa della presenza di materiali quali sabbia, pietre e legno, è necessario integrare il percolato liquido ricircolato con acqua.

**Tab. 3** - Producibilità e frazione di metano delle prime cinque matrici nello studio di Klasson e Nghiem (2003)[2]

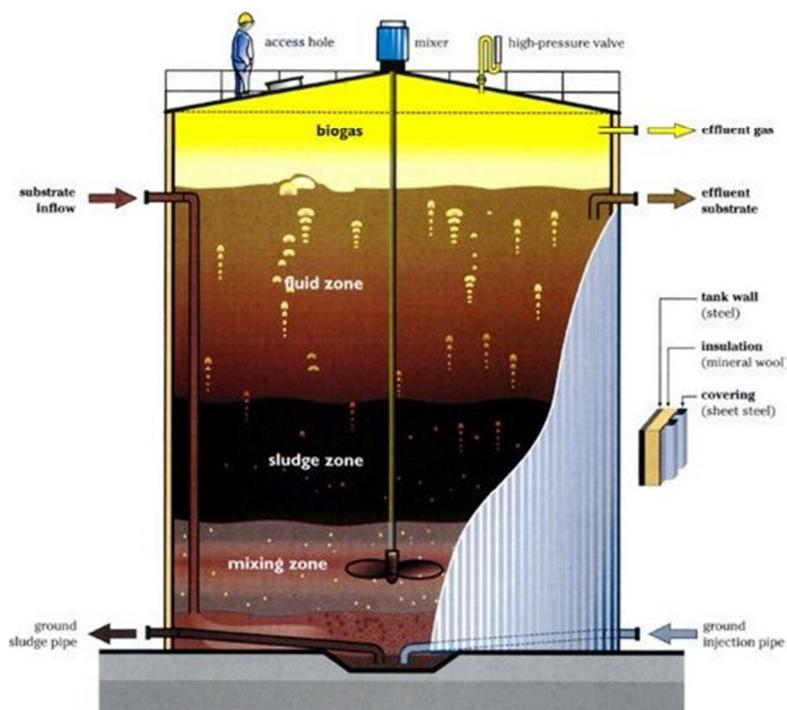
ID	Matrice	Q.tà [g]	TVS [g]	Produs. biogas [l]	Produs. CH <sub>4</sub> [l]	Rendimenti		
						[l <sub>biogas</sub> /g <sub>letame</sub> ]	[l <sub>CH<sub>4</sub></sub> /g <sub>letame</sub> ]	[l <sub>CH<sub>4</sub></sub> /g <sub>TVS</sub> ]
1	Letame di elefante	37,5	5,7	1,21	0,68	0,032	0,018	0,120
2	Letame di rinoceronte	37,5	6,1	1,16	0,44	0,031	0,012	0,072
3	Letame di elefante e bovino	37,5	5,7	1,90	1,13	0,051	0,030	0,200
4	Letame di rinoceronte e bovino	37,5	6,1	2,12	1,24	0,057	0,033	0,200

Nota: volumi di biogas e metano determinati a 0 °C e 1 atm.

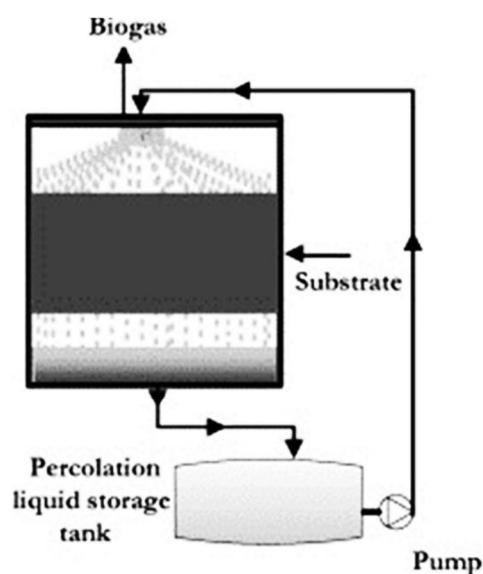
**Tab. 4** - Producibilità e frazione di metano delle altre otto matrici nello studio di Klasson e Nghiem (2003) [2]

ID	Matrice	Q.tà [g]	TVS [g]	Produs. biogas [l]	Produs. CH <sub>4</sub> [l]	Rendimenti		
						[l <sub>biogas</sub> /g <sub>letame</sub> ]	[l <sub>CH<sub>4</sub></sub> /g <sub>letame</sub> ]	[l <sub>CH<sub>4</sub></sub> /g <sub>TVS</sub> ]
6	Letame di elefante e matrice 3 a 37°C	37,5	5,7	0,98	0,61	0,026	0,016	0,110
7	Letame di rinoceronte e matrice 4 a 37°C	37,5	6,1	1,23	0,72	0,033	0,019	0,120
8	Letame di elefante e matrice 3 e NH <sub>4</sub> Cl a 37°C	37,5	5,7	1,59	0,99	0,042	0,026	0,170
9	Letame di rinoceronte, matrice 4 e NH <sub>4</sub> Cl a 37°C	37,5	6,1	1,17	0,69	0,031	0,019	0,110
10	Letame di elefante e matrice 3 a 50°C	37,5	5,7	1,21	0,56	0,032	0,015	0,097
11	Letame di rinoceronte e matrice 4 a 50°C	37,5	6,1	0,74	0,41	0,020	0,011	0,068
12	Letame di elefante, matrice 3 e NH <sub>4</sub> Cl a 50°C	37,5	5,7	0,57	0,32	0,015	0,009	0,060
13	Letame di rinoceronte, matrice 4 e NH <sub>4</sub> Cl a 50°C	37,5	6,1	1,02	0,57	0,027	0,015	0,093

Nota: volumi di biogas e metano determinati a 0°C e 1 atm.



**Fig. 9** - Schema esemplificativo di un digestore anaerobico a umido (del tipo completamente miscelato)



**Fig. 10** - Schema esemplificativo di un digestore anaerobico a secco (del tipo batch)

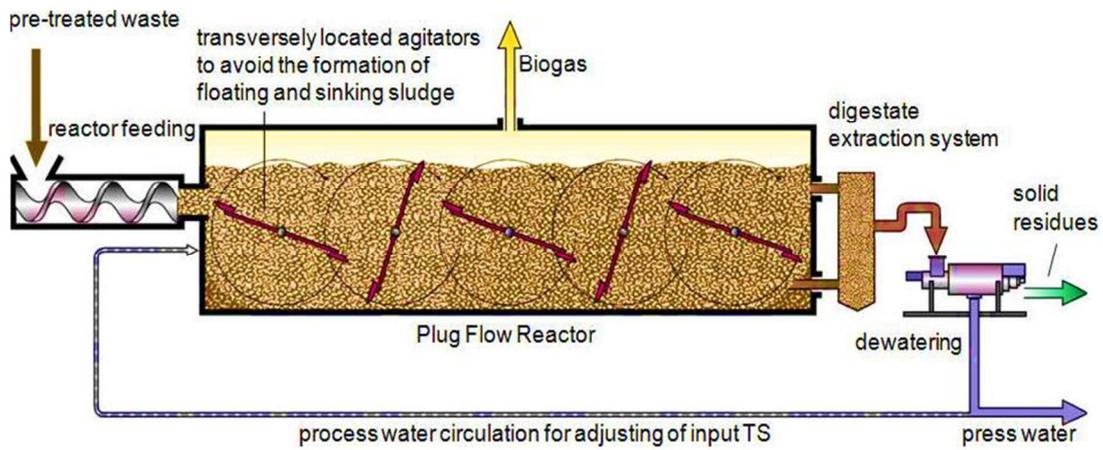


Fig. 11 - Schema esemplificativo di un digestore anaerobico del tipo plug flow

Il biogas prodotto alimenta un impianto cogenerativo capace di ottenere 40 kW elettrici e 74 kW termici. L’energia elettrica è venduta alla rete locale, mentre il calore è sfruttato per soddisfare i bisogni dello zoo.

Altra tecnologia promettente per la sua applicazione all’interno degli zoo è il sistema di tipo *plug flow* (fig. 11). Esso è concettualmente costituito da un canale lungo e stretto: la sostanza organica viene caricata da un’estremità e altrettanto digestato viene scaricato dall’altra. Nel canale si ha un lento avanzamento della matrice, che percorre l’intero digestore in un tempo prefissato. Le fasi della digestione risultano essere distinte all’interno del reattore e avvengono una di seguito all’altra. Eventuali mescolamenti avvengono in direzione normale a quella del flusso, all’interno di una stessa sezione di avanzamento.

Il sistema è stato implementato nel 2003 nello zoo di Heidelberg (Germania) e dispone di un canale di digestione da 110 m<sup>3</sup>. Il processo avviene a 37°C in 25 giorni e coinvolge circa 2000 tonnellate all’anno di letami solidi, residui vegetali e alimentari. La produzione media di biogas è pari a 400 m<sup>3</sup>/anno, capace di alimentare un impianto di cogenerazione da 59 kW elettrici e 79 kW termici.

## CONCLUSIONI

Allo stato dell’arte esistono diverse tecnologie capaci di valorizzare, tramite processo di digestione anaerobica, i letami prodotti da animali (generalmente, grossi erbivori) da zoo. Molto spesso, tuttavia, è necessario integrare questi

materiali con altre sostanze, tra queste le più utilizzate sono i letami bovini e alcuni scarti vegetali e alimentari. Non mancano, comunque, esempi di collaborazione tra uno zoo e le attività produttive nelle vicinanze. Lo zoo di Toronto (Canada) ha ritenuto opportuno includere nella matrice di biogassificazione i grassi e gli scarti animali provenienti dal vicino ipermercato al fine di incrementare la producibilità dell’impianto.

Anche se, quindi, l’opportunità di sfruttare vantaggiosamente le deiezioni animali è certamente perseguibile con le attuali tecnologie, non esiste una matrice o un impianto di biogassificazione specifici che ottimizzano il processo, ma volta per volta è necessario condurre uno studio di fattibilità legato sia alle condizioni specifiche di uno zoo, sia sua collocazione all’interno del territorio.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Mandal T., Mandal N.K. (1997), *Comparative Study of Biogas Production from Different Waste Materials*, Energy Conversion Management, **38(7)**, 679-683.
- [2] Klasson K.T., Nghiem N.(J.)P. (2003), *Energy Production from Zoo Animal Wastes*, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2003/51, Oak Ridge (Tennessee, USA).
- [3] Gunaseelan V.N. (1997), *Anaerobic Digestion of Biomass for Methane Production: a Review*, Biomass and Bioenergy, **13**, 83-114.
- [4] Kusch S. (2012), *Organic Waste as Energy Source in Zoos*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorization, 1211-1216, September 10-13, Porto (Portugal).
- [5] Kusch S., Oechsner H., Jungbluth T. (2008), *Biogas Production with Horse Dung in Solid-Phase Digestion Systems*, Bioresource Technology, **99**, 1280-1292.



L’ing. **Lorenzo De Pascalis**, salentino, si occupa di ingegneria impiantistica, ambientale e della sicurezza. Ha sviluppato negli anni la sua attività professionale collaborando con enti pubblici, dipartimenti di ricerca, industria e partner privati, con lo scopo di fornire ai propri clienti servizi di progettazione, direzione dei lavori, consulenza e supporto nella gestione di progetti complessi. Opera attivamente nel campo dell’istruzione pubblica e della formazione professionale, ed è autore di numerosi articoli di ricerca, monografie e manuali pubblicati in ambito nazionale e internazionale.